第七篇

动力配煤生产配方优化及煤质管理

第一章　我国动力煤质量与分配使用情况

第一节　动力用商品煤的水分、灰分、挥发分

煤的水分、灰分、挥发分和固定碳 4 个项目通常称为煤的工业分析或半工业分析。广义的工业分析还包括煤的发热量、全硫和真相对密度。

煤中水分的赋存状态分为 2 大类。一类是与矿物质相结合的水，称为化合水或结晶水。如石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）和高岭土（$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）中的结晶水就是以化合形式与矿物质相结合。这部分水分通常要在 200℃以上的温度下才能分解析出。如 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 中的 2 个分子结晶水要在 500℃以上才能完全脱除，在 170℃时能脱除其中 1.5 份结晶水。工业分析中的水分则不包括这部分结晶水。另一类水分是以物理状态与煤的有机物质相联系。即水分以附着和吸附等形式存在于煤中，这部分水统称为游离水分。这些游离水分在 105 ~ 110℃的温度下经过一定时间的蒸发即可全部脱除。游离水分的多少在一定程度上能表征煤炭的煤化程度深浅，也是决定煤质优劣的重要参数之一。

与有机质相联系的游离水分，还可根据其存在状态而分为外在水分和内在水分 2 部分。吸附或凝聚在煤有机质颗粒内部毛细孔（微孔）中的水分称为煤的内在水分。附着煤粒表面的水分称为外在水分。由于毛细孔吸附力的作用，煤的内在水分比外在水分较难蒸发除去。如煤样在空气中放置 8 ~ 24h 后，其外在水分一般就能蒸发除去，而内在水分只有在外在水分除去相当一部分后才会缓慢地向外逸散，且在室温下几乎不可能全部脱除。

当煤的内部毛细孔吸附的水分达到饱和状态时，其所含的水分称为煤的最高内在水分。煤内部毛细孔容积的大小，基本上能表征煤的煤化程度。尤其是低煤化度煤，毛细孔的内表面积很大，其最高内在水分含量也高。

煤的外在水分和内在水分合称为煤的全水分（M_t）。由于煤的外在水分随煤矿地质条件、大气的湿度等外界条件的改变而变化，所以煤炭的全水分含量也是经常发生变化的。

至于煤中存在的外在水分和内在水分的确切涵义，与煤的工业分析中测定的外在水分和内在水分的概念有一定差异。在工业分析中的外在水分，实质上是测定煤样达到空气干燥状态时所损失的水分，这时煤的内在水分也将往外逸散一部分而受到损失，因为当外在水分蒸发到一定程度以后，由于其水蒸气分压的降低而必然导致一部分内在水分往外蒸发逸出。所以严格地说工业分析中的外在水分应称为“空气干燥时的损失水分”。按同样原理，工业分析中的内在水分就应称为“空气干燥时的残留水分”（按 ISO、ASTM、B.S 的定义）。

由于工业分析中的外在水分和内在水分的煤样基准不同，所以全水分的测值不是两者直接相加，而必须通过下列公式计算。即：

$$M_t = -M_{fz} + M_{inh} \times \frac{100 - M_f}{100}$$

式中　M_t——煤样的全水分（%）；

M_{fz}——煤样的外在水分（%）；

M_{inh}——煤样的内在水分（%）。

空气干燥煤样水分是指煤样粉碎到 0.2mm 以下达到空气干燥状态后残留的水分。亦称分析煤样水分。由于其粒度比测定内在水分所用煤样的粒度（小于 6mm）小得多，所以它的测值必然与内在水分有较大的差异而不能互相替换，尤其是对一些水分高的低煤化度煤的差异更大。

煤的水分高低直接影响煤炭的质量。对精煤来说，如在寒冷冬季运输，水分大就会发生冻车事故，造成煤炭无法卸车。全水分大的煤，其收到基低位发热量就大大降低，严重影响商品煤的售价。

分析煤样水分的测定结果除了用来计算干基灰分和干燥无灰基挥发分、元素成分等外，其数值大小在相当程度上也表征了煤化程度的高低。如肥煤和焦煤的 M_{ad} 值普遍在 0.5% 以下，而不粘煤的 M_{ad} 多在 3% ~ 8% 以上，褐煤的 M_{ad} 普遍高达 10% ~ 30% 以上。当然，M_{ad} 结果还受空气相对湿度而变化。此外，烟煤的 M_{ad} 值大小还与其结焦性或粘结

性紧密相关，通常粘结性越强的烟煤，其 M_{ad} 值也越低，这是因为强粘结性烟煤的粘结组分中含较多富氢的脂环族化合物（憎水性强），而各种含氧的极性基团（喜水性强）较少。

煤炭全水分的高低除了与其煤化度有关外，还与矿井地下水的大小有关。如某些中等变质程度的烟煤，由于矿井水大，其全水分几乎与长焰煤、不粘煤等年轻烟煤接近。

煤的最高内在水分几乎不受空气中相对湿度大小的影响，因而它与煤化程度之间的关系比 M_{ad} 和 M_t 更好，尤其是低煤化度煤的最高内在水分与煤化程度的关系更为密切。我国新的煤炭分类国家标准（GB 5751—86）中就以含最高内在水分的无灰基高位发热量（$Q_{gr,maf}$）作为年轻煤的分类指标之一。即当低阶煤的透光率（P_M）大于 30% ~ 50% 之间时，再用 $Q_{gr,maf}$ 来区分褐煤和长焰煤：$Q_{gr,maf}$ 大于 24.00MJ/kg 为长焰煤，否则为褐煤。

煤的灰分是指煤在一定高温下得到充分燃烧后的残留物。煤的灰分绝大部分是煤中的矿物质燃烧时生成的无机氧化物（SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、TiO_2、CaO、MgO、P_2O_5、MnO_2、SO_3、Na_2O 和 K_2O 等）。年轻煤有机质中的金属有机化合物在燃烧后，其金属元素也氧化成金属氧化物而形成煤炭灰分的一部分。如低煤化度的褐煤类，其腐植酸中的钾、钠、钙、镁等盐类在煤燃烧前就是金属有机化合物，但燃烧后腐植酸中的碳、氢、氮、氧等有机元素形成 CO_2、H_2O 和 N_2 等气态物质逸出；钙、镁等金属元素则氧化成 CaO 和 MgO 等金属氧化物而成为煤灰的一部分。

在一般情况下，煤的灰分产率约比矿物质含量降低 1% ~ 5% 左右。通常含硫铁矿较多的煤，其灰分与矿物质间的差值小，而含碳酸盐矿物较多的煤，其灰分与矿物质间的差值就大。这是因为碳酸盐矿物在高温下分解成 CO_2 和金属氧化物两部分，前者呈气态逸出而只剩下金属氧化物变成了灰分。又如粘土类矿物，经高温燃烧后，其结晶水也成水蒸气逸出。至于硫化铁类矿物燃烧后形成的残留物 Fe_2O_3，分子量也有所降低。其燃烧反应式如下：

$$4FeS_2 + 11O_2 \xrightarrow{\Delta} 2Fe_2O_3 + 8SO_2\uparrow$$

351.40（分子量）　　319.4（分子量）

总之，煤中矿物质变成灰分后，其重量的降低幅度约占矿物质的 10% ~ 15% 左右。但腐植酸钙（镁）等含量较高的低灰分褐煤类，也有灰分比其矿物质含量稍有增高的可能。

煤的灰分高低对煤炭质量的影响更直接。如高水分煤经过一定时期的堆放或采取人工干燥后可使煤的发热量明显提高，而高灰分煤尤其是内在灰分高的煤，一经采出很难用简单方法提高煤质。

灰分是煤中的主要有害物质。它是我国商品煤尤其是炼焦精煤计价的主要依据。煤层灰分大于 40%时,地质勘探部门就作为尚难利用储量(即过去的表外储量)进行计算。许多用煤工业部门都以一定的灰分界线作为能否使用的依据,如水泥回转窑用煤的灰分 A_d 必须在 27%以下;炼焦精煤的灰分要求低于 12.5%,否则就作为非冶炼精煤计价。

煤的灰分与水分一样还是计算干燥无灰基挥发分和元素成分等化验结果时的必要指标。根据煤的灰分高低,可以大致估算出煤中原有矿物质的含量。如美国的派尔(PARR)曾提出过计算煤中矿物质的经验公式如下:$MM_d = 1.08A_d + 0.55S_{p.d}$ 或 $MM_d = 1.1A_d + 0.1S_{t,d}$(简化式)。此外,灰分的高低将直接影响发热量的大小,对同一矿井的煤来说,两者成很规律的反比关系。

煤的灰分高低还直接影响粘结性的强弱和焦油产率($T_{ar,d}$ 及 $T_{ar,daf}$),因为这些矿物组分不但是惰性组分,而且还会促使胶质体的分解,导致焦油组分分解成煤气。另外,人们根据灰分的颜色可大致判断煤灰熔融性特征温度的高低。如灰呈红色的煤表示其 Fe_2O_3 高,软化温度 ST 低;呈白色的煤灰如含 CaO 高,则 ST 也低。

煤的挥发分是指煤在一定温度下(如 900℃或 950℃)隔绝空气受热时裂解反应所逸出物的质量(不包括逸出的水分)占试验煤样的质量百分率。挥发物的组成颇为复杂,且与其煤化程度有密切关系。如含氧高的褐煤类,其挥发分中除一部分低分子量的碳氢化合物(如 CH_4、C_2H_6、C_2H_4)等可燃成分外,还有相当部分的 CO_2 和 H_2O 等非可燃成分,以及 CO、H_2S、COS 等可燃气体。此外,也有一些以苯、酚类芳香族化合物形态逸出。烟煤挥发分组成中含氧化合物(CO_2、H_2O、CO、COS)比褐煤的少,而低分子量的碳氢化合物和苯类化合物的含量比褐煤多,酚类化合物的量也比褐煤少。无烟煤挥发分组成中的含氧化合物比例更少,其苯类和酚类化合物比烟煤的还少,但 C_2H_4、C_2H_2 等不饱和碳氢化合物的比例比烟煤多。不同煤类的挥发分组成有明显差异,其挥发分热值差别也很大,通常以粘结性越强的烟煤挥发分热值越高,褐煤挥发分的热值最低,无烟煤因挥发分太少,故总的热值也不高。

挥发分是确定煤化程度最简易快速的指标,与其焦渣特征相结合,可以初步确定煤的大类别。另外,它还可以用来计算干燥无灰基煤发热量的大小。挥发分与其焦渣特征和 M_{ad}、A_{ad} 值结合,可以计算出各种烟煤的 $Q_{gr,ad}$ 及 $Q_{net,ad}$ 结果。此外,许多用煤工业都以挥发分的大小作为能否使用的依据。如工业锅炉用煤,要求以 V_{daf} 大于或等于 20%为最低限度;水泥回转窑用煤的标准中规定,V_{daf} 大于 25%的煤才能使用;发电用煤的挥发分 V_{daf} 下限为大于 6.5%;合成氨用无烟煤 V_{daf} 应低于 10%;配煤炼焦中以 V_{daf} 28% ~ 34%

为最佳。

根据挥发分的大小，可估算出低温焦油产率和 C_{daf}、H_{daf}、O_{daf} 等元素含量以及煤的着火点高低。此外，根据测定挥发分后的焦渣特征，还可粗略推断煤的粘结性强弱。总之，挥发分 V_{daf} 的测定很方便，是煤质分析中使用价值最大的一个指标。

煤中固定碳是指除去分析煤样水分、灰分和挥发分后的残留物。它的组成以元素碳为主。固定碳和元素碳两者之间，存在有规律的正比相关。固定碳中仍然有少部分氢、氧（多在芳香核环上形成氧键）、氮、硫等元素存在。煤中固定碳的高低除了与水分、灰分等杂质多少直接有关外，它还与煤化程度成正比。即煤化程度高的煤，其挥发分低，固定碳高。固定碳的数值与挥发分相似，其值随计算基准而异。如：

$$FC_{ad} = 100 - M_{ad} - A_{ad} - V_{ad}$$

$$FC_{ar} = 100 - M_{ar} - A_{ar} - V_{ar}$$

固定碳与挥发分的比值（FC/V）叫做燃料比，它也是表征煤化程度的有效指标。燃料比值越大的煤，煤化程度也越高。日本和美国的煤炭分类中，多用燃料比作为分类指标。

煤中固定碳是由差减法计算出的，有重要的使用价值。首先，由于煤的发热量与固定碳成正比，因而工业部门常把固定碳作为煤质分析的重要指标。如化肥用煤规定，固定碳必须大于 65%。因为煤的挥发分受热后很快析出，很难得到充分燃烧，而固定碳高的煤则能在锅炉中得到较长时间燃烧，其热量利用率高。因此，工业锅炉用煤也要考虑其固定碳大小。固定碳也可作为煤炭分类的指标。

一、动力煤的工业分析测定原理、方法要点及主要仪器设备

（一）煤的灰分测定

煤的灰分是指煤中所有有机可燃物质完全燃烧以及煤中矿物质在一定温度下产生一系列分解、氧化、化合等复杂反应后剩下来的残渣。煤的灰分几乎全部来自煤中的矿物质，但它的组成和性质与煤中矿物质不完全相同，因而确切地说煤的灰分应为灰分产率。

煤的灰分是煤中的有害物质，它降低煤炭质量，影响煤炭的利用，是动力用煤的一项重要指标。其测定方法有缓慢灰化法和快速灰化法 2 种，其中缓慢灰化法为仲裁法。

1.灰分的测定原理

一定量的空气干燥煤样，放入马弗炉或测灰仪中，以一定的速度加热到规定温度进行完全燃烧，其残留物的量占煤样总量的百分数即为煤的灰分产率。

2.灰分测定方法要点

(1)缓慢灰化法。

称取一定量的煤样,置于规定的瓷皿中,放入低于 100℃的马弗炉,在不少于半小时内升至 500℃,并保温 30min,再升至 815 ± 10℃,灼烧 1h 至质量恒定,计算残留物占煤样的质量百分数,即为灰分产率。

(2)快速灰化法;

方法 A 称取一定量的煤样置于规定的瓷皿中,放在预先加热到 815 ± 10℃的灰分快速测定仪的传送带上,煤样自动送入仪器内完全灰化,然后送出,计算残留物占煤样的质量百分数,即为灰分产率。

方法 B 将装有煤样的数只灰皿放在耐热瓷板上,缓慢送入预先加热到 815 ± 10℃的马弗炉中,灼烧 40min 至质量恒定,计算残留物占煤样的质量百分数,即为灰分产率。

3.测定灰分的主要仪器设备

(1)马弗炉 能保持温度为 815 ± 10℃,炉膛有足够的恒温区,炉膛后上部有烟囱。

(2)耐热瓷板或石棉板。

(3)瓷灰皿 长方形,底面长 45mm,宽 22mm,高 14mm。

(4)分析天平、干燥器 等同水分测定。

(5)快速灰分测定仪(见图 7-1-1)。

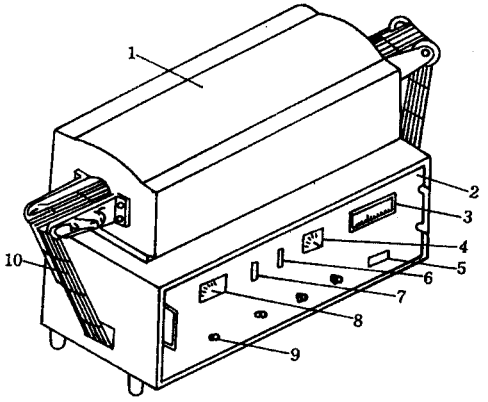


图 7-1-1　KH-1 型快速灰分测定仪示意图

1—马蹄形管式灰化炉;2—下机箱;3—高温计;4—安培表;5—辅助开关;
6—升温开关;7—传送带开关;8—电压表;9—调速组;10—试样回转传送带

(二)煤的水分测定

在煤的水分测定中,有接收煤样的全水分和分析煤样水分,另外还有最高内在水分。

接收煤样全水分是指煤样在收到状态时，在规定条件下加热所失去的水分。分析煤样水分是煤样与周围空气湿度达到平衡后，在规定条件下加热后失去的水分。

最高内在水分是煤颗粒中毛细孔吸附的水达到饱和状态时的水分，它是区分变质程度较浅的年轻煤的一项指标。

煤中的水分与煤的变质程度、组成结构有关。一般泥炭水分最大，可达 40%～50%；褐煤次之，约 10%～40%；烟煤又次之；无烟煤又有增大的趋势。

1.煤中水分测定原理

将已称重的煤样放在烘箱或专用微波炉内在一定温度下干燥，根据煤样减少的质量计算煤的水分。

2.煤中水分测定方法要点

煤中水分测定方法主要有空气干燥法、氮干燥法及微波干燥法。

(1)煤的全水分测定方法要点：送来测定全水分的煤样必须放在密封的容器中，并注明煤样总质量，运送过程中损失的水分要计入全水分中；制样时需在密封式破碎机中进行，防止水分的损失。

全水分的测定方法有 A、B、C、D 共 4 种。方法 A 适用于各种煤，并作为仲裁法。

方法 A 的要点：迅速称取粒度小于 6mm 的煤样 10～12g，在预先通入干燥氮气并加热到 105～110℃的干燥箱中到恒重，根据煤样减少的质量计算出全水分的百分含量。

其他 3 种方法：方法 B 为空气干燥法，煤样粒度小于 6mm；方法 C 为微波快速法；方法 D 为空气干燥法，煤样粒度小于 13mm。

(2)空气干燥煤样水分(又称分析煤样水分)测定方法要点：其测定方法有空气干燥法、通氮干燥法、微波测水法和甲苯蒸馏法。

空气干燥法测定的方法要点：称取粒度小于 0.2mm 的一定量的空气干燥煤样，放入预先鼓风并加热到 105～110℃的干燥箱，在空气流中干燥至恒重，根据煤样减少的质量计算出水分的百分含量。

通氮干燥法是在干燥氮气流中烘干；微波测水法是将煤样放在微波炉内干燥；甲苯蒸馏法是将煤样与甲苯共同煮沸后，分馏出的液体收集在水分测定管中，量出水的体积后计算水分含量。

3.水分测定的主要仪器设备

(1)干燥设备(按不同测水方法选用)：

①小空间干燥箱，能自动控温并保持 105～110℃。

②干燥箱，能自动控温和鼓风并保持 105～110℃。

③自动水分测定仪(见图 7－1－2)。

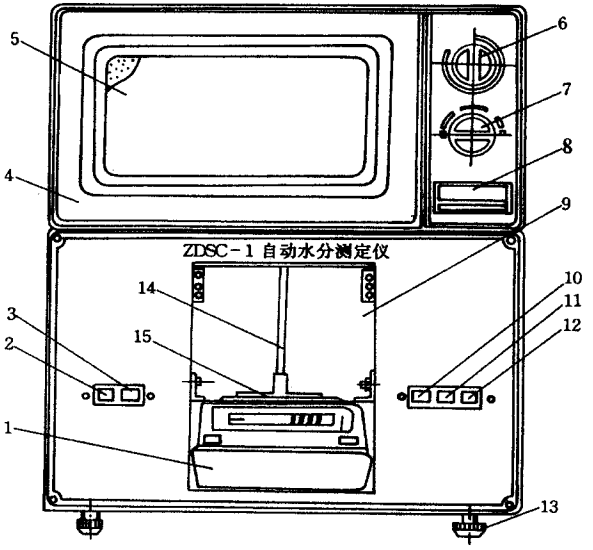


图 7－1－2　自动水分测定仪示意图

1—电子天平；2—电源开关；3—烘干/称重开关；4—微波烘箱；5—烘箱门；6—定时旋钮；7—功率选择；8—烘箱门开关；9—有机玻璃门；10—自动/手动选择；11—对位按钮；12—称重按钮；13—调平底脚；14—称量顶杆；15—称量盘

(2)干燥器：内放变色硅胶或无水氯化钙。

(3)玻璃称量瓶：直径 70mm，高 35～40mm(测全水用)；

直径 40mm，高 25mm。

(4)分析天平：感量 0.0001g。

(5)蒸馏装置：按规定要求加工。甲苯蒸馏法用。

(6)试剂：如氮气(纯度，99.9%)、无水氯化钙(化学纯)等。

(三)煤的挥发分测定

煤的挥发分是煤在特定条件下受热分解的产物，确切地说应称为挥发分产率。其测定结果受加热温度、时间、容器的形状、材质等试验条件的影响，因此是规范性很强的试验。

煤的挥发分是世界各国用于煤炭分类的主要指标。根据煤的挥发分可大致判断煤的变质程度，例如无烟煤的干燥无灰基挥发分(V_{daf})不超过 10%，瘦煤、贫瘦煤和贫煤的 V_{daf} 大于 10%～20%，焦煤的大于 10%～28%，气煤在 28%以上，气肥煤在 37%以上，等等。煤的挥发分也是评价动力用煤的一项重要指标，由挥发分的高低可判断煤燃烧性能

的好坏。煤的挥发分和焦渣特征对初步判断煤的类别及其加工利用性质有重要的意义。

1.煤的挥发分测定原理

煤样在隔绝空气的规定容器中于一定温度(多为 900℃)下加热一定时间(通常 7min),煤中分解出来的气态产物(液态产物呈蒸气状)减去煤中水分。即为该煤的挥发分,剩下的焦渣为不挥发物,并按规定的代号判别焦渣特征。

2.煤的挥发分测定方法要点

煤的挥发分测定有复式法和单式法,其区别是同时测定的煤样数不同,复式法一次可测多个煤样,单式法需采用特制的立式坩埚炉。两种方法的测定要点都是一致的。复式法为国家标准方法。

测定方法要点 称取空气干燥煤样(粒度小于 0.2mm、1 ± 0.1g),放在规定的带盖瓷坩埚中,在(900 ± 10)℃温度下隔绝空气加热 7min,以煤样减少的量占煤样总样的百分数减去该煤样的水(M_{ad})含量,即为挥发分产率。

挥发分测定后,坩埚内的焦渣需按规定的序号(1 ~ 8)进行判别,并纳入测定结果。

3.挥发分测定主要仪器设备

(1)马弗炉 带测温及控温装置,能保持在(900 ± 10)℃有足够的恒温带。炉后壁有一排气孔。

(2)坩埚 带盖,高 40mm,底部外径 18mm,上口外径 33mm,壁厚 1.5mm。

(3)坩埚架 用镍铬丝或其他耐热金属丝编织,一般容纳 6 个坩埚,并需考虑其尺寸恰当放入马弗炉内。

(4)坩埚架夹子 有较长的手柄,能伸入炉内并夹住带坩埚的坩埚架。

(5)压饼机 能压制直径 10mm 的煤样,测定褐煤、长焰煤及其他易崩煤样时用。

(6)分析天平 感量 0.0001g。

(7)干燥器 装有变色硅酸或无水氯化钙。

二、动力用商品煤的灰分分布情况及其变化规律

1997 年全国生产原煤 13.25 亿 t,当年入选 22343 万 t,其中入选炼焦原煤 13813 万 t、动力用煤 8530 万 t,生产洗动力用煤 6742 万 t,动力煤的入选比重只占全国原煤产量的 6.5%弱,而工业发达国家的动力煤入选比重达 80% ~ 100%。1996 年我国燃煤电厂的平均灰分 A_d 为 28%左右,其中 A_d 在 25% ~ 35%间的约占总燃煤量的 45% ~ 52%,尤其是广西壮族自治区各电厂的燃煤灰分普遍高达 40% ~ 50%以上,桂林、柳州、南宁和合山电厂的燃煤的灰分分别高达 50.4%、47.2%、53.4%和 50%以上。江西分宜电厂燃煤灰

分也高达 46.9%，景德镇电厂的燃煤灰分为 42.5% ~ 51.2%，因而当年全国 5 亿 t 左右发电用煤的平均灰分高达 28%左右。美国公用电网发电厂 1996 年消耗的 78263 万 t 燃煤平均灰分仅为 9.22%，其中烟煤和次烟煤的平均灰分各为 10.3%和 6.6%。此外，美国联合电气公司各电厂的燃煤平均灰分更低至 4.5%。即使是装机容量为 4.32GW、居世界第 3 位的波兰贝尔哈托夫电厂所燃用的褐煤灰分也低至 10% ~ 15%，只有印度燃煤电厂的灰分较高，A_d 为 25% ~ 42%左右。据印度的昌德拉普电厂对燃煤灰分与电厂热能利用率的关系进行研究后表明：如燃煤 A_d 在 28% ~ 38%之间，灰分每增加 1%，电厂的平均热能利用率就降低 2%；当燃煤灰分在 28% ~ 32%之间时，灰分每增加 1%，电厂的热能利用率约下降 1.5%；当燃煤灰分增至 36% ~ 38%之间时，灰分每增加 1%，电厂的热能利用率就下降 6%，发电效率下降 3.34%，即耗煤量要增加 10%。为了提高动力煤的热能利用率，降低工业生产成本，我国必须大力发展洗选加工能力，降低动力用煤灰分。

煤的灰分越高，其发热量越低，经济价值也越低。高灰煤作工业燃料和原料时，因排灰量的增大，增加堆灰场地面积和城市垃圾运量，同时增加“三废”污染。至于炼焦用煤受灰分的影响更显著，炼焦精煤灰分每增加 1%，焦炭平均灰分提高 1.33%，而焦炭灰分每增加 1%，炼铁焦比就增加 2% ~ 2.5%；同时还多用石灰石，少产生铁 2% ~ 3%。发电用煤的灰每增加 1%，发热量就下降 200 ~ 360J/g，每度电的标准煤耗增大 2 ~ 5g。

为了充分利用我国煤炭资源，提高煤炭的热能利用率和用煤企业的经济效益，因此制订出煤炭灰分分级国家标准具有十分重要的实用意义。国家技术监督局已于 1994 年批准了中国煤的灰分分级标准(见表 7 - 1 - 1)。

表 7 - 1 - 1　煤炭灰分分级(GB/T 15224.1—94)

序号	级别名称	代号	灰分 A_d(%)
1	特低灰煤	SLA	≤5.00
2	低灰分煤	LA	5.01 ~ 10.00
3	低中灰煤	LMA	10.01 ~ 20.00
4	中灰分煤	MA	20.01 ~ 30.00
5	中高灰煤	MHA	30.01 ~ 40.00
6	高灰分煤	HA	40.01 ~ 50.00

(一)我国不同牌号动力用商品煤的平均灰分

如表 7 - 1 - 2 所示，我国不同牌号动力用商品煤的平均灰分以大同矿区等弱粘煤的

最低，A_d 为 13.10%；不粘煤的灰分也低至 14.26%，贫煤和褐煤的平均灰分 A_d 分别为 31.55%和 26.32%；无烟煤和长焰煤的平均灰分分别为 20.76%和 23.99%。至于各炼焦煤选煤厂生产的洗混煤、洗末煤、洗中煤及煤泥等副产品的平均灰分多在 30%以上，从而导致我国动力煤的平均灰分为 23.85%（表 7－1－3）。

表 7－1－2　我国不同牌号动力用商品煤的平均质量

牌号	M_t(%)	M_{ad}%	A_d(%)	V_{daf}(%)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{net,ar}$(×4.18kJ/kg)	HGI
褐煤	26.5	13.33	26.32	48.08	0.51	4040	57
长焰煤	13.1	7.02	23.99	42.26	1.18	5340	58
不为煤	9.8	4.74	14.26	32.58	0.67	6410	64
弱粘煤	7.7	2.59	13.10	31.32	0.74	7080	57
1/2 中粘煤	7.3	1.05	30.64	27.92	0.61	6261	78
贫瘦煤	5.0	0.97	20.79	17.19	1.26	6024	96
贫煤	5.7	1.21	31.55	16.34	2.20	5830	93
无烟煤	5.7	2.32	20.76	8.68	1.07	6330	61

＊ 我国有 95%以上的贫瘦煤作为动力煤使用。

表 7－1－3　我国各大区动力用商品煤灰分

大区名称	平均灰分 A_d(%)	占本区动力煤产量(%)					
		特低灰分	低灰分煤	低中灰煤	中灰分煤	高中灰煤	高灰分煤
华北区	20.85	0.14	4.40	49.54	33.73	11.19	0.99
东北区	27.15	0.00	2.25	29.72	27.78	29.31	10.94
华东区	26.64	0.00	0.39	18.93	53.09	23.48	4.11
中南区	26.15	0.05	0.04	21.75	60.39	6.76	11.02
西南区	27.56	0.00	0.34	10.88	56.58	30.26	1.94
西北区	16.84	5.74	9.03	62.17	17.59	5.47	0.00
全　国	23.85	0.48	2.74	34.95	40.70	16.60	4.53

（二）我国各大区动力用商品煤的平均灰分

由表 7－1－3 表明，从我国各大区动力用商品煤的灰分看，以西北区的最低，其平均 A_d 为 16.84%；其次为产动力用商品煤最多的华北区，其平均 A_d 为 20.85%；灰分最高的

为西南区和东北区，动力煤平均 A_d 分别为 27.56%和 27.15%；华东区和中南区的平均 A_d 分别为 26.64%和 26.15%。

从各大区高灰分（A_d 大于 40%）动力用商品煤的比例来看，以中南区和东北区最多，分别占这两区动力用商品煤的 11.02%和 10.94%（表 7－1－3）；西北区则几乎没有 A_d 大于 40%的高灰分动力用商品煤；华北区的高灰分动力用商品煤比例也不到 1%（表 7－1－3）。A_d 小于或等于 5%的特低灰分动力用商品煤，其比例则以西北区最多，占该区动力用商品煤的 5.74%，而东北区、华东区和西南区的动力用商品煤几乎没有 A_d 小于 5%的特低灰分煤。

从全国来看，以 A_d 大于 20%～30%的中灰分煤比例最多，占全国动力用商品煤的 40.7%；其次为 A_d 大于 10%～20%的低中灰分煤，其比例亦达 34.95%。也就是说，在中国的动力用商品煤中以灰分 A_d 大于 10%～30%之间的比例最多，占全国动力用商品煤的 75%以上，而 A_d 大于 40%的高灰分煤及 A_d 小于或等于 10%的低灰分煤及特低灰分煤所占的比例均不到 5%。

（三）各省、市、自治区动力用商品煤平均灰分

从我国各省、市、自治区的动力用商品煤灰分看，以产煤量较少的广西壮族自治区和浙江省的最高，他们的平均 A_d 均超过 40%（表 7－1－4），吉林、江西和安徽 3 省的动力用商品煤平均灰分也都在 30%以上；灰分最低的为西北区的甘肃省和新疆自治区，该两省（区）的动力用商品煤的平均灰分分别低至 11.77%和 11.64%，北京市、宁夏回族自治区和山西省的动力用商品煤平均灰分也都在 20%以下（表 7－1－4）；而动力用商品煤较多的河南、山东及黑龙江等省的平均灰分均高至 23%～24%。其他各省，市、区的动力用商品煤的平均灰分详见表 7－1－4。

表 7－1－4　我国各省（市、区）动力用商品煤灰分

省（市、区）	广西	浙江	吉林	江西	安徽	云南	湖南	四川	河北
A_d（%）	43.77	40.62	36.23	34.76	32.20	29.42	28.02	27.96	27.24
省（市、区）	辽宁	贵州	青海	黑龙江	河南	湖北	山东	江苏	内蒙古
A_d（%）	26.57	26.20	24.58	23.94	23.55	23.40	23.29	22.30	22.26
省（市、区）	福建	广东	陕西	北京	宁夏	山西	甘肃	新疆	
A_d（%）	22.21	22.08	21.04	19.59	18.73	18.42	11.77	11.64	

(四)我国主要动力煤矿区商品煤平均灰分

从我国主要动力煤矿区的商品煤平均灰分看(表 7－1－5),以神府矿区的最低,其平均 A_d 为 5%～8%,产量达 3400 万 t 左右的大同商品煤的平均灰分也只 10%左右。此外,西北地区的窑街和靖远等不粘煤矿区商品煤的灰分也均不到 12%。而动力用商品煤灰分最高的为广西合山贫煤,其平均 A_d 超过 45%。吉林珲春褐煤及兴隆、长广等矿区烟煤的灰分也均在 40%以上。灰分超过 30%的则有铜川、舒兰、芙蓉等矿区,其他矿区动力用商品煤的平均灰分详见表 7－1－5。

表 7－1－5　我国各主要动力煤矿区商品煤灰分

矿区名称	北京	大同	西山	阳泉	晋城	平庄	阜新	铁法	霍林河	长广
平均 A_d(%)	20.78	10.06	16.31	18.59	16.14	26.28	22.89	29.96	23.59	40.62
矿区名称	神府	合山	淄博	淮南	兖州	肥城	鹤壁	义马	龙口	兴隆
平均 A_d(%)	5～8	47.60	24.50	25.94	16.28	23.18	17.12	27.52	23.79	42.31
矿区名称	平朔	郑州	芙蓉	松藻	舒兰	珲春	扎赉诺尔	铜川	窑街	靖远
平均 A_d(%)	14～15	15.03	35.22	26.60	35.53	41.51	14.46	32.46	11.74	11.65

三、动力用商品煤的全水分分布情况及其变化规律

动力用商品煤的全水分主要与煤炭类别有关,一般以低阶煤(如褐煤、长焰煤和不粘煤)的水分最高,炼焦煤如(焦煤和肥煤)的水分最低,无烟煤(尤其是超无烟煤)的水分又有所升高。此外,动力用商品煤的水分还与加工方式密切相关,即相同品种的洗选煤的水分总比其筛选煤的要高,如炼焦煤选煤厂的副产品洗混煤的水分常高于其筛混煤。不仅如此,商品煤的水分往往还与其粒度组成有关,如在同一矿井内,其大块煤的水分依次比中块和小块煤低,混煤的水分也依次比末煤和粉煤的低。对于地下水丰富的矿井来说,其水分一般也比涌水量少的矿井要高。由于煤中水分与灰分一样都不是可燃物质,而且水分在燃烧过程中还要吸收热量而蒸发逸出,据测算,每增加 1%的全水分,就会降低煤的热值约 293～335J/g,而高水分煤还影响煤的破碎筛分,因此煤中水分越低越好。但在燃烧前还要掺加一定水分,以避免煤粉被空气流吹走。

煤中全水分含量的高低是评价煤质的一个重要指标,它对煤的加工利用等均有重要影响。在有关工业用煤质量标准中对煤中全水分含量均有一定的要求。

煤中全水分按表 7－1－6 进行分级。

表 7－1－6　煤中全水分分级(MT 报批稿)

序号	级别名称	代号	全水分 Md(%)
1	特低全水分煤	SLM	≤6.0
2	低全水分煤	LM	>6.0～8.0
3	中等全水分煤	MM	>8.0～12.0
4	中高全水分煤	MHM	>12.0～20.0
5	高全水分煤	HM	>20.0

(一)我国不同牌号动力用商品煤的平均全水分

由表 7－1－2 看出,我国动力用商品煤的全水分以低阶煤中的褐煤最高,M_t 平均为 26.5%;依次为长焰煤和不粘煤,它们的 M_t 分别为 13.1%和 9.8%;贫瘦煤的水分最低,M_t 为 5%;无烟煤和贫煤的全水分(M_t)也均只有 5.7%。

(二)我国各大区动力用商品煤的全水分

从表 7－1－7 看出,我国不同地区的动力用商品煤的平均水分也有较大差异。如东北区以低阶气煤、长焰煤和褐煤等的比例较多,故其平均水分也最高,M_t 为 10.3%;华北区也有不少的褐煤和不粘煤,长焰煤,且还有相当一部分为炼焦煤选煤厂的洗混、洗末、洗中煤等含水分较多的动力用煤,因而其动力用商品煤的平均水分也较高,M_t 为 9.2%;而西北区及西南区的动力用商品煤的全水分分别低至 6.1%和 6.4%,这主要原因是目前这些地区生产的动力用商品煤多以高变质的烟煤为主。

表 7－1－7　我国各大区动力用商品煤水分(M_t)

大区名称	华北	东北	华东	中南	西南	西北	全国平均
M_t(%)	9.2	10.3	7.9	7.0	6.4	6.1	8.4

(三)我国各省、市、区动力用商品煤的平均水分

由表 7－1－8 看出,我国各省、市、区动力用商品煤的水分以产褐煤、不粘煤和长焰煤为主的内蒙古自治区最高,M_t 平均达 24.6%,低阶煤产量较多的吉林、辽宁、广西和新疆等省、自治区的动力用商品煤的全水分也均在 11%～15%之间,全水分在 5%以下的陕西、湖北、北京和宁夏等省、市、自治区的动力用商品煤基本上都是以较高变质的焦、瘦、贫等烟煤和无烟煤为主。总的来看,动力用商品煤水分较高的一些省、市、自治区生产的都是以褐煤和一些低阶烟煤为主,如青海省煤的 M_t 之所以高至 16.6%,是因为该省

只有大通局的高水分不粘、长焰煤。

表 7－1－8　我国各省(市、区)动力用商品煤水分

省(市、区)	内蒙古	青海	吉林	辽宁	广西	新疆	山东	云南	甘肃
M_t(%)	24.6	16.6	14.8	12.3	11.5	11.0	9.3	8.0	7.8
省(市、区)	福建	江苏	河北	贵州	湖南	江西	安徽	河南	广东
M_t(%)	7.8	7.4	7.1	7.1	6.7	6.7	6.7	6.6	6.4
省(市、区)	黑龙江	四川	浙江	山西	陕西	湖北	北京	宁夏	—
M_t(%)	6.2	5.8	5.5	5.1	4.7	4.7	4.2	3.6	—

(四)我国主要动力煤矿区商品煤的平均水分

我国主要动力煤矿区商品煤的全水分以内蒙古自治区东北部的大雁、霍林河和扎赉诺尔等矿区的褐煤最高,他们的 M_t 值分别高达 34.7%、33.1%和 33.5%(表 7－1－9),平庄和舒兰等矿区较年老褐煤的 M_t 平均值在 20%～25%之间;全国动力煤产量最大的大同矿区弱粘煤的平均 M_t 为 8.2%。烟煤及无烟煤矿区的动力用商品煤全水分相对较低,如长广气肥煤和石嘴山 1/3 焦煤的平均 M_t 就分别低至 3.1%和 2.7%,主要无烟煤矿区除焦作因井下水大以及选煤比例较多以致其 M_t 值达 8.6%以外,其余如北京、阳泉和晋城等矿区的 M_t 均在 4.7%～5.4%之间。其他主要动力用商品煤矿区的全水分详见表 7－1－9。

表 7－1－9　我国主要动力用商品煤矿区的平均水分

矿区名称	大同	南票	辽源	长广	淮南	淄博	兖州	淮北	鹤壁	铜川
M_t(%)	8.2	10.6	12.5	3.1	6.6	6.8	8.1	6.3	6.6	7.5
矿区名称	乌鲁木齐	蒲白	澄合	窑街	石嘴山	义马	靖远	哈密	崔家沟	平庄
M_t(%)	8.0	4.3	3.8	7.8	2.7	10.5	6.1	14.9	11.6	24.5
矿区名称	扎赉诺尔	大雁	霍林河	舒兰	珲春	阳泉	北京	晋城	焦作	
M_t(%)	33.5	34.7	33.1	20.4	17.9	4.7	5.4	5.4	8.6	

四、动力用商品煤的挥发分分布情况及其变化

在一定温度和时间下测得的煤的挥发分高低除了与其煤化程度有关以外,还与煤岩

显微组分中的镜质组、壳质组及惰质组等各组分的多少以及与煤中矿物质的含量及其组成成分等多种因素有关。对动力用商品煤来说，必然是褐煤的挥发分最高，V_{daf}一般都在40%以上，其次是长焰煤和气煤、不粘煤等低阶煤，贫煤和无烟煤等高变质的动力用商品煤的 V_{daf}一般都在 15%以下。

煤的挥发分产率是煤分类的主要指标，利用它和 CRC 能初步确定其煤化程度和煤的类别。对许多不能实测发热量的中、小型用煤企业，根据煤的挥发分产率及其焦渣特征，即可估算出发热量的大小。在选择动力用煤、气化用煤和配煤炼焦时，也都首先要了解其挥发分产率的大小。

煤的干燥无灰基挥发分产率按表 7－1－10 分级。

表 7－1－10　煤的干燥无灰基挥发分分级标准（MT 报批稿）

序号	级别名称	代号	挥发分产率 V_{daf}（%）
1	特低挥发分煤	SLV	≤10.00
2	低挥发分煤	LV	10.01～20.00
3	中等挥发分煤	MV	20.01～280.00
4	中高挥发分煤	MHV	28.01～37.00
5	高挥发分煤	HV	37.01～50.00
6	特高挥发分煤	SHV	>50.00

（一）我国不同牌号动力用商品煤的平均挥发分

我国不同牌号动力用商品煤的挥发分（V_{daf}）以褐煤最高，其平均 V_{daf}达 48.08%（表 7－1－2）；其次为长焰煤，V_{daf}为 42.26%；不粘煤和弱粘煤的 V_{daf}又分别降为 32.58%和 31.32%；无烟煤中的大部分系年轻无烟煤，其平均 V_{daf}为 8.68%；贫煤和贫瘦煤的平均 V_{daf}分别为 17.19%和 16.34%。

至于在炼焦煤牌号中的一些高灰、高硫难选煤以及选煤厂副产品（如洗混煤、洗末煤、洗中煤及煤泥等）作动力用分牌号的商品煤挥发分以气肥煤和气煤的最高，他们的平均 V_{daf}分别高至 42.29%和 39.43%（表 7－1－11）；挥发分最低的为瘦煤，其平均 V_{daf}为 18.28%；1/3 焦煤的平均 V_{daf}也达 34.63%；肥煤和焦煤的挥发分相对稍低，其平均 V_{daf}分别为 30.75%和 24.05%。

表 7－1－11　不同牌号炼焦煤作动力用商品煤的平均挥发分

牌号	气肥煤	气煤	1/3 焦煤	肥煤	焦煤	瘦煤
V_{daf}(%)	42.29	39.43	34.63	30.75	24.05	18.28

(二)我国各大区动力用商品煤平均挥发分

由表 7－1－12 表明,我国各大区动力用商品煤的挥发分有明显差异。东北区高挥发分的长焰煤、气煤和褐煤的比例较多,加上东北区动力煤的灰分较高,其平均 V_{daf} 值高至 39.06%。华东区气煤、气肥煤及 1/3 焦煤的的比例较多,其平均 V_{daf} 也高至 34.74%。华北区和西南区由于中、低挥发分煤的比例较多,故他们的平均 V_{daf} 在 23.4% 左右。全国动力用商品煤的平均 V_{daf} 为 28.71%(表 7－1－12)。

表 7－1－12　我国各大区动力用商品煤平均挥发分

大区名称	华北	东北	华东	中南	西南	西北	全国平均
V_{daf}(%)	23.46	39.06	34.74	25.06	23.41	26.74	28.71

(三)我国各省(市、区)动力用商品煤的平均挥发分

由表 7－1－13 表明,在我国各省(市、区)的动力用商品煤中,以产年轻煤为主的吉林、辽宁和内蒙古 3 省(区)的挥发分最高,他们的平均 V_{daf} 分别高达 44.78%、41.15% 和 42.65%。北京市和福建省因主要为无烟煤,故其平均 V_{daf} 低至 6% ~ 6.5% 左右。广东省煤也以无烟煤为主,仅少量长焰煤和高硫肥煤,故其平均 V_{daf} 也低至 12.43%。动力煤绝对产量最多且以中、低挥发分煤为主的山西省动力用商品煤的平均 V_{daf} 为 18.58%。其他各省、区动力用商品煤的平均 V_{daf} 值详见表 7－1－13。

表 7－1－13　我国各省(市、区)动力用商品煤的平均挥发分

省(市、区)	北京	河北	山西	内蒙古	辽宁	吉林	黑龙江	江苏
V_{daf}(%)	6.23	26.80	18.58	42.65	41.15	44.78	35.14	37.54
省(市、区)	浙江	安徽	江西	福建	山东	河南	湖南	广东
V_{daf}(%)	43.98	32.96	20.81	6.5	36.15	26.24	17.22	12.43
省(市、区)	广西	四川	贵州	云南	陕西	甘肃	宁夏	新疆
V_{daf}(%)	34.01	19.69	25.99	28.67	21.76	33.15	24.67	33.78

* 不包括大量地方矿的年轻褐煤(V_{daf} 均在 48% 以上)。

(四)我国主要动力煤矿区的商品煤平均挥发分

由表 7－1－14 看出,我国主要动力煤矿区的商品煤挥发分以云南可保矿区的最高,其 V_{daf}达 56.74%;内蒙古的霍林河、扎赉诺尔、大雁、平庄和山东龙口等褐煤矿区的平均 V_{daf}也均在 43%～47%;西北地区的窑街、乌鲁木齐等矿区的长焰煤和不粘煤的平均 V_{daf}分别为 43.71%以上和 38.17%;大同商品煤的平均 V_{daf}为 29.90%;挥发分较高的还有辽宁南票、吉林辽源、浙江长广、安徽淮南和山东兖州等矿区,其 V_{daf}也均在 37%以上。

表 7－1－14　我国主要动力煤矿区商品煤平均挥发分

矿区名称	兴隆	下花园	大同	西山	潞安	轩岗	东山	包头	南票	辽源	长广
V_{daf}(%)	30.51	31.20	29.90	19.02	16.48	33.75	15.27	24.38	37.31	42.77	43.98
矿区名称	淮南	淄博	兖州	鹤壁	义马	铜川	澄合	蒲白	可保	南宁	窑街
V_{daf}(%)	37.62	17.72	39.06	16.79	35.45	23.60	19.98	18.37	56.74	49.64	43.71
矿区名称	石嘴山	乌鲁木齐		靖远	哈密	龙口	平庄	扎赉诺尔		大雁	霍林河
V_{daf}(%)	36.24	38.17		30.85	29.51	44.23	43.30	44.20		44.39	47.02

第二节　动力用商品煤的硫分

一、煤的硫分测定

(一)煤中硫分的存在形态

煤中的硫根据其存在的形态,通常分为两大类。一是以有机物存在的硫,叫做有机硫;另一类是以无机物形态存在的硫,叫做无机硫。另外,在有些煤中还有少量的以单质状态存在的元素硫。

有机硫的组成极为复杂。至今对煤中有机硫的认识还不够充分,但大体上知道煤中有机硫有下列的几类官能团:

(1)硫醇类(R—SH);

(2)噻吩类杂环硫化物,如噻吩,苯骈噻吩等;

(3)硫醌类,如对硫醌;

(4)硫醚类(R—S—R′)；

(5)二硫化物(R—S—S—R′)；

(6)硫蒽类。

无机硫可分为硫化物硫和硫酸盐硫。硫化物硫中绝大部分是黄铁矿,但也有少量白铁矿。黄铁矿和白铁矿从组成上来说都是 FeS_2,不同的是在晶体结构上,所以它们是同质多晶体。如黄铁矿呈正方晶体,多成结核状、透镜状和浸染状等形态存在,白铁矿则成斜方晶体,多呈散射状存在。此外也有少量其他硫化矿物(如 ZnS、CuS、PbS 等)存在。硫酸盐硫则主要是 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$,有些已经受氧化的煤还含 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$,氧化煤中还有 $Fe_2(SO_4)_3$。

根据煤中的硫能否在空气中燃烧,又可以分为可燃硫和不可燃硫。有机硫、硫铁矿硫和元素硫都能在空气中燃烧,所以都是可燃硫。煤中硫酸盐不能燃烧,称为不可燃硫。在煤炭燃烧过程中,硫酸钙等不可燃硫仍旧留在煤灰中,所以又叫做固定硫。

我国煤中硫的含量很不一致。有的很低,小于 0.2%,如我国东北、华北地区煤田的含硫量就较低。有的地区较高,如我国中南、西南地区,有的高达 10%左右。

动力用煤中的硫在煤燃烧过程中形成 SO_2。SO_2 不仅腐蚀金属设备,而且还是造成空气污染的"公害"。炼焦用煤中的硫直接影响钢铁质量,钢的含硫大于 0.07%,就会产生热脆性而成为废品。为了脱去钢铁中的硫,必须在高炉炼铁时加石灰石,这样就减少了高炉有效容积的利用,还增加了出渣量。在煤的贮存过程中,FeS_2 含量多的煤会因为氧化而放出热量,如果热散不出去,会使煤堆温度升高而自燃。所以,如何脱除煤中的硫是煤炭利用中的一个重要课题。

(二)煤中全硫的测定方法

煤中全硫的测定方法很多,既有经典的艾氏卡重量法(常作为仲裁分析用),又有高温燃烧库仑法和高温燃烧法(又分中和法、碘量法、红外光谱法)。库仑法测定速度快,结果也能满足要求,因而目前用得最多。本节主要介绍艾氏卡法和高温燃烧库仑法。

1.艾氏卡法

(1)测定原理。

煤样和艾氏卡试剂均匀混合后在 850℃的高温下进行半熔,使有机硫、FeS_2、$CaSO_4 \cdot H_2O$、元素硫等各种形态硫都转化成可溶于水的硫酸盐(以 Na_2SO_4 为主),其反应过程如下：

煤样 $+ Na_2CO_3 + MgO +$ 空气$(O_2) \rightarrow Na_2S_4 + MgSO_4 + CO_2 + H_2O + N_2 + \cdots$

$MeSO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow Na_2SO_4 + MeCO_3$

$Na_2SO_4 + MgSO_4 + 2BaCl_2 \rightarrow 2BaS_4 \downarrow + 2NaCl + MgCl_2$

艾氏卡试剂中的 MgO 还能疏松反应物，使空气易进入煤样。

(2)方法要点

煤样用艾氏卡试剂在 850℃的高温下处理后，冷却，用水抽提、氯化钡溶液沉淀、过滤、洗涤、干燥、灰化和灼烧至恒重。根据硫酸钡的质量，即可求算出煤中的全硫含量。即：

$$S_{t,ad} = \frac{(G_1 - G_2) \times 0.1374}{G} \times 100(\%)$$

式中　G——煤样质量，g；

G_1——硫酸钡的质量，g；

G_2——空白试验的硫酸钡质量，g；

0.1374——由硫酸钡换算成硫的因数。

(3)主要仪器设备及试剂。

①箱形马弗炉：带自动控温装置，规格与测灰分的相同。

②分析天平：感量 0.0001g。

③瓷坩埚：容量 30mL 和 10～20mL 2 种。

④艾氏卡试剂：2 份重的轻质 MgO(化学纯)和 1 份重的无水碳酸钠(化学纯)。

⑤10% $BaCl_2$ 溶液及 1 + 1 的盐酸溶液等。

2.高温燃烧库仑法

(1)测定原理。

煤样在 1150℃的高温和催化剂(WO_3)作用下，于空气流中完全燃烧分解，使煤中的各种形态有机硫和无机硫均被氧化成 SO_2 和少量 SO_3。

生成的 SO_2 和 SO_3 被空气流带到电解池内，与水化合生成 H_2SO_3 和少量 H_2SO_4。电解池内装有 KI 和 KBr 溶液，有 2 对铂电极，其中一对是指示电极，另一对是电解电极。在 SO_2 进入电解池前，在指示电极对上有以下动态平衡；

$$2I^- - 2e \rightleftharpoons I_2$$

$$2Br^- - 2e \rightleftharpoons Br_2$$

SO_2 进入溶液后，将与其中的碘和溴发生如下反应：

$$I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2I^- + SO_4^{2-} + 4H^+$$

$$Br_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2Br^- + SO_4^{2-} + 4H^+$$

此时，指示电极对的电位改变，从而引起电解电流增加，不断地析出碘和溴，直至溶

液内不再有 SO_2 进入，电极电位又恢复到滴定前的水平。根据电生碘和电生溴时消耗的电量（电库仑积分仪自动积分而得），按照法拉第电解定律（电极上产生 1g 当量的任何物质需消耗 96500 库仑的电量）。即可计算出煤中的全硫含量。

（2）测定方法要点。

煤样在 1150℃的高温和催化剂作用下，于净化后的空气流中的燃烧分解，生成的 SO_2 被电生碘和电生溴滴定，其所消耗的电量由库仑仪分仪积分后，仪器上即显示或打印出煤中的全硫含量。

（3）主要仪器设备及试剂。

①自动库仑定硫仪：包括高温炉、程控仪、电磁搅拌器、电解池、库仑积分仪和电磁泵等。

②分析天平：感量 0.0001g。

③电解液：5g 分析纯 KI，5g 分析纯 KBr，加 10mL 冰乙酸，再加入 250～300mL 水。

其他高温燃烧法从略。

二、动力用商品煤的硫分及其分布

煤中硫分燃烧后产生的二氧化硫绝大部分排入大气形成酸雨，污染环境，破坏生态平衡。同时，高硫煤在燃烧时生成的二氧化硫及三氧化硫会加速锅炉炉体及管线的腐蚀，缩短设备寿命，因而对动力用煤来说硫分越低越好。从总体来说，中国煤中的硫分并不太高，但也有局部地区的部分矿区生产的动力煤中硫分较高，这与各矿区煤系的形成时代有关。一般来说，以海陆交互相沉积形成的晚古生代石炭纪太原统煤及晚二叠世乐平煤系的煤中硫分较高，其他时代煤中的硫分一般较低。据有关专家研究表明，石炭纪太原统煤中的硫分常在 2%～4%。华南地区的晚二叠世乐平煤系的硫分更高，平均在 2.5%～5%。华东及中南地区早二叠世石盒子统煤的硫分多在 0.5%以下。华北及华东等地区早二叠世山西统煤的硫分一般也在 0.3%～1.5%。中生代的侏罗纪煤中硫分也多在 1%以下。新生代第三纪煤的硫分则与地区分布有关，如南方的海南、广东及云南等省的第三纪煤系由于不少为海陆交互相沉积，因而有的煤中硫分就高，$S_{t,d}$ 可达 3%～6%以上；华北及东北地区的第三纪煤系由于多为陆相沉积，故其煤中硫分也多在 1%以下。

随着环保对燃煤排放 SO_2 总量的要求越来越严，国家对煤中硫分如何合理分级十分重视。为此，北京煤化所根据我国煤炭资源特点，结合各工业用煤对硫分的要求以及煤炭计价中硫分的比价不同，制订出适合我国的煤炭硫分分级国家标准，并已由国家技术监督局于 1994 年批准实施（详见表 7－1－15）。

表 7－1－15　煤炭硫分分级标准(GB/T 15224.2—94)

序号	级别名称	代号	硫分 $S_{t,d}$(%)
1	特低硫煤	SLS	≤0.50
2	低硫分煤	LS	0.51～1.00
3	低中硫煤	LMS	1.01～1.50
4	中硫分煤	MS	1.51～2.00
5	中高硫煤	MHS	2.01～3.00
6	高硫分煤	HS	>3.00

(一)我国不同牌号动力用商品煤的硫分

由表 7－1－16 看出,我国不同牌号动力用商品煤的硫分其总的趋势是低阶煤的硫分相对较低,如不粘煤的平均硫分只有 0.58%,褐煤、长焰煤、1/2 中粘煤和气煤、1/3 焦煤的平均硫分也都在 0.73%以下。而高变质的贫煤硫分高至 2.60%,无烟煤,贫瘦煤和瘦煤的平均硫分也都在 1.12%～1.45%之间。在炼焦煤牌号中的动力用煤则以气肥煤的硫分最高,$S_{t,d}$平均达 3.02%,这是因为我国的气肥煤几乎都是海陆交互相沉积的石炭纪太原统煤或晚二叠世乐平煤系的煤。焦煤的硫分也高至 1.37%(详见表 7－1－16)。

表 7－1－16　我国不同牌号动力用商品煤的平均硫分

煤种	气肥煤	贫煤	瘦煤	贫瘦煤	肥煤	无烟煤	焦煤
$S_{t,d}$(%)	3.02	2.60	1.45	1.27	1.18	1.12	1.37
煤种	褐煤	气煤	长焰煤	1/3 焦煤	弱粘煤	1/2 中粘煤	不粘煤
$S_{t,d}$(%)	0.73	0.69	0.72	0.69	0.72	0.68	0.58

注 表中属炼焦煤牌号的均为作动力煤用的选煤厂副产品如洗混煤、中煤、洗末煤等,也有部分高灰、高硫难选的炼焦煤直接作为动力煤使用。

(二)我国各大区动力用商品煤的平均硫分

由于我国各大区煤的成煤时代不同,因而他们之间的硫分差异也较大,如西南区的贵州和四川等省的动力用商品煤,基本上都是一些海陆交互相沉积形成的晚二叠世乐平煤系,故该大区动力用商品煤的平均硫分达 2.79%(表 7－1－17)。东北区煤绝大多数为陆海沉积的晚侏罗世煤及第三纪煤,故其硫分也最低,$S_{t,d}$平均仅 0.45%。中南区的两湖和两广虽有不少的高硫动力用商品煤,但他们多是地方矿且所占的比例较少,故该区的平均硫分只有 0.98%。产动力煤最多的华北区以低硫的二叠纪山西统及侏罗纪煤为

主,但又有部分高硫的石炭纪太原统煤,故其平均硫分高于东北区而稍低于华东区,其平均 $S_{t,d}$ 为 0.88%。西北区有大量的侏罗纪低硫煤,但目前国有重点矿生产的则以石炭纪太原统煤为主(如西北区最大的铜川、韩城等局),故该区动力用商品煤的平均硫分高至 1.30%,居各大区的第二位。随着今后神府、榆林等矿区侏罗纪低硫煤的大规模开发,西北区动力用商品煤的平均硫分必将逐年降低。

表 7－1－17　我国各大区动力用商品煤硫分分布

地区名称	平均硫分 $S_{t,d}$(%)	占动力用商品煤量(%)					
		特低硫煤	低硫分煤	低中硫煤	中硫分煤	中高硫煤	高硫分煤
华北区	0.88	31.58	30.15	31.49	2.58	2.96	1.24
东北区	0.45	60.39	35.05	2.59	1.88	0.10	0.00
华东区	1.00	37.33	38.32	8.16	2.69	5.36	8.14
中南区	0.98	57.55	19.60	6.84	2.90	5.40	7.71
西南区	2.79	16.35	7.82	0.98	8.47	13.34	53.04
西北区	1.30	28.21	30.76	9.26	3.47	17.96	10.35
全　国	1.01	39.56	29.69	15.34	2.98	5.12	7.31

此外,从表 7－1－17 还可进一步看出,在各大区动力用商品煤中,$S_{t,d}$ 在 0.50% 以下的特低硫煤的比例以东北区最多,占该区动力用商品煤量的 60% 以上,而该区几乎没有 $S_{t,d}$ 大于 3% 的高硫分煤;高硫分煤则以西南区的最多,占该区动力用商品煤量的 53% 以上;硫分大于 2% 至 3% 的中高硫分煤则以西北区的最多,占该区动力用商品煤的 18% 弱。

全国来看,动力用商品煤的平均硫分为 1.01%,其中又以特低硫煤的比例最大,占全国动力用商品煤的 40% 弱,硫分大于 0.50% 至 1.00% 的低硫煤的比例亦近 30%。也就是说在我国的动力用商品煤中,硫分在 1% 以下的约占 70%,而 $S_{t,d}$ 大于 3% 的高硫分煤只占 7.3% 左右,中高硫煤($S_{t,d}$ 大于 2% 至 3%)占 5.12%,所以在中国的动力用商品煤中硫分大于 2% 的只占 12.5% 弱。

(三)各省(市、区)动力用商品煤平均硫分

由于各省(市、区)煤矿区的成煤时代不同,因此他们之间的平均硫分也有明显差异。如浙江省的动力用商品煤系海陆交互相沉积形成的以晚二叠世乐平煤系的长广矿区为主,其平均硫分高达 4.24%(表 7－1－18);湖北、广西和贵州、四川等省(区)的动力用商

品煤也都是以晚二叠世乐平煤系为主，这些地区产煤的平均硫分也均在3%以上；陕西、宁夏和山东等省(区)的动力用商品煤多以海陆交互相形成的石炭纪太原统煤系为主，其硫分均在1.47%～1.87%之间；硫分最低的为黑龙江省和青海省，其$S_{t,d}$均在0.2%左右，这是由于这两省的煤田均由侏罗纪及第三纪的陆相沉积形成。其他各省(市、区)的动力用商品煤的平均硫分详见表7－1－18。

表7－1－18　各省(市、区)动力用商品煤平均硫分

省(市、区)	浙江	湖北	广西	贵州	四川	陕西	宁夏	山东	江西
$S_{t,d}$(%)	4.24	3.66	3.58	3.24	3.01	1.87	1.69	1.47	1.37
省(市、区)	广东	福建	山西	湖南	河北	内蒙古	江苏	辽宁	新疆
$S_{t,d}$(%)	1.03	0.96	0.95	0.94	0.86	0.84	0.71	0.70	0.62
省(市、区)	河南	安徽	甘肃	吉林	北京	云南	黑龙江	青海	
$S_{t,d}$(%)	0.61	0.48	0.48	0.40	0.26	0.25	0.20	0.20	

(四)我国各主要动力煤矿区商品煤的平均硫分

由于各矿区动力煤的成煤时代不同，其间的硫含量就相差很大，如北京矿务局的无烟煤多生成于陆相沉积的侏罗纪时期，故其平均硫分低至0.26%(表7－1－19)；而广西合山的贫煤为海陆交互相沉积的晚二叠世乐平煤系，故其平均硫分高达5.60%，两者相差达20倍以上。至于由海陆交互相沉积的湖南省黔阳煤系的硫分更高，如辰溪煤矿的平均$S_{t,d}$达8.11%，且其硫分以有机硫为主。

表7－1－19　各主要动力煤矿区商品煤平均硫分

矿区名称	北京	下花园	大同	阳泉	晋城	荫营	平庄	扎赉诺尔	大雁
$S_{t,d}$(%)	0.26	0.55	0.81	1.20	0.47	0.95	1.11	0.32	0.33
矿区名称	霍林河	阜新	铁法	辽源	舒兰	珲春	淄博	龙口	焦作
$S_{t,d}$(%)	0.70	0.85	0.67	0.52	0.29	0.23	2.81	0.65	0.48
矿区名称	鹤壁	义马*	郑州	合山	东罗	罗城	辰溪	长广	芙蓉
$S_{t,d}$(%)	0.28	1.72	0.35	5.60	4.51	2.42	8.11	4.69	3.88
矿区名称	松藻	林东	六枝	铜川*	窑街	靖远	哈密	乌鲁木齐	
$S_{t,d}$(%)	3.51	4.63	3.94	1.76	0.59	0.38	0.32	0.79	

* 由石炭纪矿井及侏罗纪矿井的动力煤综合平均。

总的看来，广西各矿动力用商品煤的硫分普遍较高，如东罗局和罗城局的平均硫分别高达 4.51%和 2.42%。此外，四川的芙蓉及重庆的松藻等矿区的无烟煤均属晚二叠世乐平煤系，其硫分分别高达 3.88%和 3.51%；贵州的林东和六枝等矿区的成煤时代与芙蓉和松藻等矿区相同，平均硫分更分别高达 4.63%和 3.94%。其他主要动力煤矿区的平均硫分详见表 7－1－19。

从表 7－1－20 中还可进一步看出，在我国的一些高硫动力用商品煤矿区的成分硫中，除少数以有机硫为主外，绝大多数系以硫铁矿硫为主。如在 20 个高硫煤（$S_{t,d}$ 大于 3%）矿区中，有机硫占全硫比例超过 50%的有辰溪、合山、松藻、黄石、英岗岭、苏赫图和坪石 7 个局（矿），其中以辰溪煤矿的有机硫比例最高，达 94.45%，且其全硫也最高，平均达 8.11%。合山和松宜两局煤的有机硫比例也均在 83%～87%以上，表明这两矿区的高硫煤通过洗选后不仅难以脱除硫分，而其精煤的硫分则很可能比原煤的还高。有机硫比例较少而硫铁矿硫较多的有芙蓉、淄博、松藻、天府和六枝等局，表明这些矿区的高硫煤除松藻煤中的硫铁矿因多呈星散状分布而很难通过洗选大幅度降低硫分外，一般通过洗选的方法至少可以脱去 50%的硫分。对于 $S_{t,d}$ 低于 0.50%的特低硫分煤来说，由于其成分硫多以有机硫为主，所以这种低硫煤也很难通过洗选的方法再进一步降低其硫分。

表 7－1－20　我国高硫（$S_{t,d}>3\%$）动力用商品煤中的硫含量及其组成成分

局（矿）名称	$S_{t,d}$（%）	$S_{p,d}$（%）	$S_{s,d}$（%）	$S_{o,d}$（%）	$S_{p,d}$ 占 $S_{t,d}$（%）	煤种
铜川局	3.30	1.65	0.09	1.56	47.27	焦煤、瘦煤
苏赫图矿	3.32	1.45	0.04	1.83	55.12	肥煤
长广局	4.69	3.50	0.20	0.99	21.11	气肥煤
石嘴山局	3.19	1.72	0.05	1.42	44.51	1/3 焦煤
英岗岭局	3.01	1.13	0.05	1.73	57.48	无烟煤
淄博局	3.21	2.63	0.10	0.48	14.95	贫煤
林东局	5.33	3.57	0.04	1.72	32.27	焦煤
辰溪矿	8.11	0.44	0.01	7.66	94.45	肥煤
黄石局	4.49	1.59	0.02	2.88	63.70	无烟煤
松宜局	5.62	0.94	0.01	4.67	83.10	贫煤

局(矿)名称	$S_{t,d}$(%)	$S_{p,d}$(%)	$S_{s,d}$(%)	$S_{o,d}$(%)	$S_{p,d}$占 $S_{t,d}$(%)	煤种
合山局	5.56	0.59	0.12	4.85	87.23	贫煤
东罗局	4.35	2.22	0.39	1.74	40.00	无烟煤
芙蓉局	4.07	3.51	0.10	0.46	11.30	无烟煤
华蓥山局	4.94	3.46	0.10	1.38	27.94	焦煤
六枝局	4.76	3.46	0.27	1.03	21.64	焦煤
西湾矿	3.60	1.99	0.06	1.55	43.06	焦煤
南桐局	3.69	2.21	0.10	1.38	37.40	焦煤、肥煤
松藻局	3.77	2.82	0.20	0.75	16.89	无烟煤
天府局	3.72	2.85	0.16	0.71	19.09	焦煤、瘦煤
坪石局	6.13	1.69	1.15	3.29	53.67	肥煤
稔子坪矿	3.05	1.06	0.02	1.97	34.75	长焰煤
海孰湾局	3.18	1.10	0.20	1.08	59.75	肥煤、焦煤
红茂局	3.37	2.50	0.12	0.75	74.18	无烟煤
华蓥山局	5.57	4.68	0.05	0.84	84.42	焦煤
北宿矿	3.73	7.91	0.05	1.77	51.21	气煤

第三节　动力用商品煤的发热量

一、煤的发热量测定

(一)煤炭发热量涵义

1.煤的弹筒发热量

煤的弹筒发热量也称为煤的氧弹发热量。它的涵义是单位质量的煤样在热量计的

弹筒(氧弹)中在过量的高压氧气(约 2.8～3.0MPa)中燃烧后产生的热量(燃烧产物的最终温度规定为 25℃,水成液体状态)。由于煤样是在高压氧气的条件下燃烧的,因此它产生了在空气中燃烧时不能进行的热化学反应。例如煤中的氮(以及充入氧气前在弹筒空气中含有的氮气)在空气中燃烧时一般都呈气态氮逸出,而在弹筒中燃烧时却能生成 N_2O_5,或 NO_2 等高价的氮氧化合物,这些物质溶于弹筒中的水后即变成硝酸,这一化学反应是放热反应。此外,煤中的可燃硫在空气中燃烧时只生成二氧化硫气体,而在弹筒中燃烧时却氧化成三氧化硫,它溶于弹筒的水中就成为硫酸。SO_2 氧化成 SO_3 以及 H_2SO_4 溶于水生成硫酸水合物等也都是放热反应。所以,煤的弹筒发热量要高于煤在空气中、在工业锅炉中等燃烧时实际产生的热量,且煤中的硫含量越高或煤的发热量越高,其高出的热量也越多。为此,在实用中,必须把弹筒发热量折算成符合于煤在空气中燃烧时的发热量,即煤的高位发热量。在我国‘煤的发热量测定方法’国家标准(GB 213—1996)中规定,煤的发热量报出结果必须采用分析煤样的高位发热量。从上述可以看出,煤的弹筒发热量实质上只是测定煤发热量的中间数据,所以还有人常把弹筒发热量叫做最高发热量。

弹筒发热量的简单定义 单位质量的煤在充有过量氧气的氧弹内燃烧,其终态产物为 25℃下的二氧化碳、过量氧气、氮气、硫酸、硝酸、液态水以及固态灰时放出的热量称为弹筒发热量。

2.煤的高位发热量

煤的高位发热量是在弹筒的一定容积下测定的,故有时也叫煤的恒容高位发热量。它是指煤在空气中在大气压条件下燃烧后产生的热量。在这种条件下,煤中的可燃硫只生成二氧化硫,氮则生成游离状态氮,其水呈蒸汽状态冷凝(25℃)。煤在工业锅炉中燃烧时,其水呈蒸汽状态逸出。由于液态水变成水蒸汽时需要吸收热量(称为汽化热),故在高位发热量中减去水的汽化热后即为煤的低位发热量。而煤的高位发热量实际上是由煤的弹筒发热量减去硫酸及硝酸的生成热后得到的。在这里需要指出,煤的弹筒发热量是在弹筒的容积(恒定容积)下测定的,因此严格地说应叫恒容弹筒发热量。在空气中大气条件下燃烧时测得的高位发热量实际上是在恒压(大气压)条件下获得的,应称为恒压高位发热量。在恒容高位发热量和恒压高位发热量之间有一个微小的差别,这是由于假定煤在恒压状态下燃烧时,煤中的氢元素和氧生成了几乎不占体积液态水(燃烧时生成的液态水的体积对气体来说可忽略不计),使恒压系统的气体体积有所收缩,其收缩部分的体积等于煤中氢元素在燃烧时所需氧的体积减去煤中原来呈气体状态部分的氧。

由恒容高位发热量换算成恒压高位发热量时应采用下列公式:

$$Q_{gr,p,ad} = Q_{gr,v,ad} + 6.15H_{ad} - 0.775O_{ad} \quad (7-1-1)$$

恒容高位发热量的简单定义：单位质量的煤在充有过量氧气的氧弹内燃烧，其终态产物为25℃下的二氧化碳、过量氧气、氮气、液态水和固态灰时放出的热量称为恒容高位发热量。

实际上，由弹筒发热量减掉稀硫酸和二氧化硫生成热之差，再减去稀硝酸的生成热，就是恒容高位发热量（简称高位发热量）。

煤的高位发热量系根据其弹筒发热量按下式换算得到：

$$Q_{gr,ad} = Q_{b,ad} - (94.1S_b + \alpha Q_{b,ad}) \quad (7-1-2)$$

式中　$Q_{gr,ad}$——分析煤样的高位发热量，J/g；

$Q_{b,ad}$——分析煤样的弹筒发热量，J/g；

S_b——由弹筒洗液测得的煤的含硫量，%；当煤中 $S_{t,ad} < 4\%$ 或 $Q_{b,ad} > 14600$J/g 时，可用 $S_{t,ad}$ 代替 S_b；

α——硝酸校正系数，当 $Q_{b,ad} \leqslant 16700$J/g 时，$\alpha = 0.0010$；当 16700J/g $< Q_{b,ad} \leqslant 25100$J/g 时，$\alpha = 0.0012$；当 $Q_{b,ad} > 25100$J/g 时，$\alpha = 0.0016$。

3.煤的低位发热量

煤的低位发热量也叫煤的低热值或净热值，严格地说应叫煤的恒容低位发热量。它是指煤在空气中大气压条件下燃烧时产生的热值扣除水分的汽化热（或叫蒸发热）后，剩余的实际上可以使用的热值。因为煤在高温燃烧后，其有机质中的氢元素均氧化成水（另外还有煤中原有的水分以及煤的矿物质中的结合水和结晶水），而水在高温下立即吸热，并变成水蒸汽与烟道气一起逸出，所以从煤的高位发热量中减去所有水的汽化热即为低位发热量。

恒容低位发热量的简单定义：单位质量的煤在充有过量氧气的氧弹内燃烧，其终态产物为25℃下的二氧化碳、过量氧气、氮气、二氧化硫、气态水以及固态灰时放出的热量称为恒容低位发热量。

实际上，由恒容高位发热量减掉水（煤中原有的水和煤中氢燃烧生成的水）的汽化潜热就是恒容低位发热量。

煤的恒容低位发热量系根据其高位发热量按下式换算得到：

$$Q_{net,ar} = (Q_{gr,ad} - 206\mathrm{Had}) \times \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} - 23M_{ar} \quad (7-1-3)$$

式中　$Q_{net,ar}$——煤的收到基低位发热量，J/g；

M_{ar}——收到基煤样水分，也可用全水分 M_t 代替；

H_{ad}——分析煤样的氢含量，%；

M_{ad}——分析煤样的水分，%。

煤的燃烧实际是在大气压条件下进行的，因而应把煤的恒容高位发热量换算成恒压低位发热量，换算公式如下：

$$Q_{net,p,ar} = (Q_{net,v,ar} - 212.1H_{ad} - 0.775Q_{ad}) \times \frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}} - 24.42M_{ar} \quad (7-1-4)$$

此外，还有作为年轻煤分类用的恒湿无灰基煤的高位发热量（$Q_{gr,maf}$）。其结果系按下式计算得到：

$$Q_{gr,maf} = Q_{gr.ad} \times \frac{100(100 - MHC)}{100(100 - M_{ad}) - A_{ad}(100 - MHC)} \quad (7-1-5)$$

式中　MHC——煤的最高内在水分，%；

A_{ad}——空气干燥煤样灰分，%；

$Q_{gr,ad}$、M_{ad}——见以上说明。

（二）煤炭发热量测定原理

发热量测定的基本原理是把氧弹放在一个盛有足够浸没氧弹的水的容器中，再使一定量的试样在充氧的弹筒中完全燃烧，由燃烧后水温的升高计算煤样的发热量。但实际情况并不如此简单。第一，试样燃烧放出的热量不仅被水吸收，氧弹本身、水筒以及插在水中供搅拌用的搅拌器和供测温用的温度计都吸收一定的热量，显然试样放出的热量应是氧弹、水筒及其中的水、搅拌器和温度计所吸收的热量的总和。第二，盛氧弹的水筒，或者更确切地说量热系统，不是与外界隔绝的，因而它又可能与周围环境发生热交换（散热或吸热），为了获得可靠的测定结果，对此也要给以考虑。

对第一个问题的解决，通常都是采用已知发热量的基准物，来标定量热系统温度每升高 1℃所需要的热量。这个热量通常称为仪器的热容量或水当量。

对第二个问题的解决，则是把盛氧弹的水筒放在一个双壁水套中（常称为外筒），通过控制水套的温度来消除量热系统与周围环境的热交换，或者经过计算对热交换所引起的误差进行校正。

（三）煤炭发热量测定要点

精确称取一定量的煤样，于特制的不锈钢（也可用石英质或铂制）坩埚中，并把它放入量热仪的弹筒中，接上点火丝，在充入 2.8～3.0MPa 的氧气后，通电点火，根据整个量热系统的温升结果（用恒温式热量计时，需对温度计刻度及整个量热系统进行冷却校正），按一定公式计算出煤的弹筒发热量。

(四)发热量测定的主要仪器设备

1.热量计

热量计有绝热式和恒温式2种主要类型,它们的差别只在于水套(外筒)温度的控制方式不同,而其余部分并无差别。因此,下面2类热量计合在一起介绍(图7-1-3)。

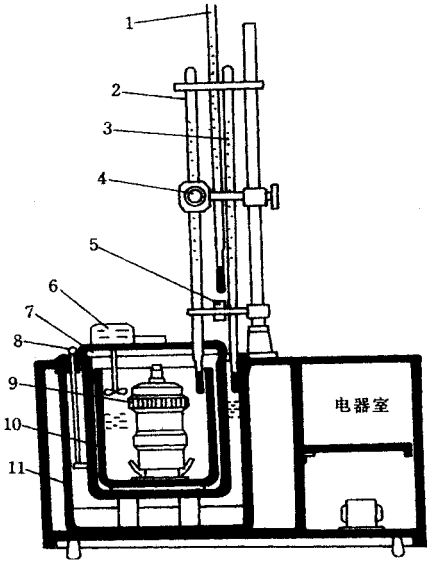


图7-1-3　氧弹热量计示意图

1—温度计;2—内筒温度计;3—外筒温度计;4—升降镜;5—振荡器;6—内搅拌器;7—盖;8—外搅拌器;9—氧弹;10—内筒;11—外筒

(1)氧弹。又叫弹筒,它是用耐腐蚀的合金钢制成的气密容器。它必须具备3个主要性能:①不受燃烧过程所出现的高温和腐蚀性产物的影响而产生热效应(吸热或放热);②能耐受充氧的压力及燃烧过程中产生的瞬时高压;③试验过程中保持完全气密。

为满足上述3项要求,目前多采用18/8铬镍钢为制造氧弹的材料。也有用18/8/3铬镍钼钢,以增加抗腐蚀强度。

氧弹的结构由3个部分组成:一个容积为250~300mL的圆筒形弹体;一个盖子;一个联接盖子和弹体的环。联接环常用与弹体相同的合金钢或与合金钢近似的铝青铜制造。也有的氧弹设计把弹盖和联接环做成一个整体。弹盖内径约为60mm,深约110mm,壁厚为内径的1/10,底和盖的厚度则稍大。这种氧弹的强度足够承受固体燃料燃烧时产生的最大压力(6.0~7.0MPa)。

(2)水筒(内筒)。水筒是用铜、黄铜或不锈钢薄板制成。断面有圆形、菱形和带有搅拌器的特殊形。把氧弹放入水筒后,可加水淹没氧弹,而水面至内筒上缘约留有250~

500mL 的空间(距内筒上边缘约 1cm)。水筒的装水量一般为 2000～2200mL,带搅拌器室的水筒约需水 3000mL。

(3)水套(外套)。水套为由金属薄板制成的双层容器,外层断面为圆形,内层形状则依内筒的形状而定,原则上要保持内筒周围和底部同水套之间都有 10mm 左右的间距。内筒放在水套中一个有 3 个支点的绝缘支架上。

(4)搅拌器及量热温度计等部件。

2.其他设备

(1)水银温度计的读数器和照明器。为了使温度读数能估读到 0.001℃,需要一个大约 5 倍的放大镜。通常把放大镜装在一个镜筒中,筒的后面装有照明灯,用以照亮温度计的刻度。

(2)振荡器。由于水银和毛细管内壁附着力的作用,水银柱的升降常受滞后影响,特别在降温时尤其如此。为了能准确测定温度,在每次读取温度之前,最好是在温度计上安装电动震荡器,用来轻击温度计。

(3)燃烧皿。盛试样用的燃烧皿最好用铂制成,但铂的价格昂贵,不宜普遍使用。燃烧皿一般用镍铬钢制成,厚度以 0.5mm 为宜。在保证试样完全燃烧而本身不受腐蚀作用产生热效应为前提下,也可使用其他合金钢或石英制的燃烧皿。必要时可以采用较薄(0.25m)、较小(直径 15mm、深 7mm)的镍铬燃烧皿,这样更能保证苯甲酸完全燃烧。

(4)压力表和氧气导管。指示充氧压力的压力表应由 2 个表头组成,一个指示氧气瓶中的压力,一个指示氧弹中的氧压。2 个表头之间有减压阀和保险阀,当氧弹中压力超过所需的限度时,保险阀即自动排放。

压力表通过内径 1～2mm 的无缝铜管与氧弹连接,以便导入氧气,或通过高强度塑料管与充氧装置连接,最大量程应为 6.0MPa。禁止压力表及所有联系部分沾染油脂,以防引起爆炸。

(5)点火电源和线路。点火采用 6～12V 的电源,可由 220V 的交流电源经变压器或电阻器供应。为了指示线路接通和点火情况,线路中还应接有指示灯或电流计。

二、动力用商品煤的发热量及其分布

收到基低位发热量($Q_{net,ar}$)的高低是评价动力用煤质量的主要参数之一,无论是动力用煤的计价,或是电站煤粉锅炉和工业锅炉及窑炉的设计制造等都需要煤的发热量($Q_{net,ar}$)数据。煤的发热量高低除与灰分和水分的大小有关以外,还与煤的变质程度有关。长期实践表明,干燥无矿物质煤(即纯煤)的发热量以中等变质的焦煤及挥发分较低

的肥煤最高，但一般都不超过 37.2MJ/kg(8900kcal/kg)；褐煤因煤化度最低，不可燃的含氧量最高，其纯煤发热量($Q_{gr,dmmf}$)也最低；到高变质的贫煤和无烟煤阶段，尽管含碳量(C_{daf})都在 90%以上，但热值相当于碳元素 3.5 倍的氢含量(H_{daf})明显降低，故纯煤热值又比焦煤、肥煤和瘦煤有所降低，但仍高于低阶的褐煤、长焰煤和不粘煤。

根据 GB/T 15224.3—1994，我国收到基煤的低位发热量分级标准如表 7－1－21 所示。

表 7－1－21　煤炭发热量分级(GB/T 15224.3—1994)

级别名称	代　号	发热量($Q_{net,ar}$)范围(MJ/kg)
低热值煤	LQ	8.50～12.50
中低热值煤	MLQ	12.51～17.00
中热值煤	MQ	17.01～21.00
中高热值煤	MHQ	21.01～24.00
高热值煤	HQ	24.01～27.00
特高热值煤	SHQ	>27.00

(一)我国不同牌号动力用商品煤的发热量

从上述可知，在我国动力用商品煤中，其发热量($Q_{net,ar}$)以褐煤的最低，平均仅 14.34MJ/kg(见表 7－1－22)，约为 3430kcal/kg。其次为长焰煤，平均 $Q_{net,ar}$为 19.80MJ/kg(4735kcal/kg)。由于我国目前生产的弱粘煤的灰分较低，全水分也不高，低位发热量在各牌号煤中最高，$Q_{net,ar}$达 26.18MJ/kg，灰分较低的不粘煤的 $Q_{net,ar}$也达 24.31MJ/kg。此外，瘦煤、贫瘦煤和无烟煤的平均低位发热量也都在 25MJ/kg 以上，至于一些肥煤和焦煤等作动力用的炼焦煤的发热量均不太高，其中 $Q_{net,ar}$最高的 1/3 焦煤也只 23.14MJ/kg，这是因为洗混煤等炼焦煤选煤厂的副产品灰分多在 25%甚至 35%以上。某些高灰难选炼焦煤的发热量也不高。

表 7－1－22　我国不同牌号动力用商品煤发热量分布特征

煤种	弱粘煤	瘦煤	贫瘦煤	无烟煤	不粘煤	1/3 焦煤	焦煤
$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	26.18	25.82	25.66	25.02	24.31	23.14	22.58
煤种	**气煤**	**气肥煤**	**肥煤**	**贫煤**	**1/2 中粘煤**	**长焰煤**	**褐煤**
$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	22.57	22.56	22.02	21.24	20.52	19.80	14.34

注：表中的炼焦煤牌号均为炼焦煤选煤厂的洗混煤等副产品或是高灰、高硫难选炼焦煤，目前均作为动力用煤。

(二)我国各大区动力用商品煤的发热量

如表 7－1－23 所示,我国各大区动力用商品煤的收到基低位发热量以西北区最高,$Q_{net,ar}$平均达 25.41MJ/kg,这是由于西北区的动力用煤目前大部分为低灰分的低阶烟煤或中灰分的高硫焦煤、瘦煤等高热值煤;华北区动力用商品煤的发热量居第二位,$Q_{net,ar}$为 23.49MJ/kg;发热量最低的是东北区,其 $Q_{net,ar}$平均为 20.51MJ/kg,比西北区的低 4.90MJ/kg,显然这是因为东北区的动力用商品煤以低阶的高灰分烟煤和褐煤为主。其他各大区动力用商品煤的平均低位发热量均在 21.75～22.75MJ/kg 之间。

表 7－1－23　我国各大区动力用商品煤的低位发热量

地区名称	平均发热量 $Q_{net,ar}$(MJ/kg)	占本区动力用商品煤量(%)					
		低热值煤	中低热值煤	中热值煤	中高热值煤	高热值煤	特高热值煤
华北区	23.49	0.64	13.41	9.64	15.44	44.60	16.27
东北区	20.51	5.86	15.52	22.74	30.26	20.85	1.50
华东区	21.75	0.18	2.81	21.25	58.03	14.52	0.85
中南区	22.40	1.66	10.42	16.29	34.47	30.07	7.09
西南区	22.75	0.00	1.36	22.95	45.02	29.51	1.17
西北区	25.41	0.00	0.00	2.89	13.46	76.30	6.14
全　国	22.63	1.43	9.52	15.39	30.83	34.42	7.93

从表 7－1－23 中还可进一步看出,在西南区和西北区几乎没有 $Q_{net,ar}$低于 12.50MJ/kg 的低热值煤,西北区也没有 $Q_{net,ar}$在 17MJ/kg 以下的中低热值煤,而 $Q_{net,ar}$大于 27MJ/kg 的特高热值煤以华北区最多,占该区动力用商品煤量的 16.27%。$Q_{net,ar}$在 21.01～24.00MJ/kg 的高热值煤的比例以西北区最多,占该区动力用商品煤量的 76.3%。华东区以 $Q_{net,ar}$在 21.01～24.00MJ/kg 的中高热值煤比例最多,占该区动力用商品煤的 58%强。

(三)我国各省(市、区)动力用商品煤的发热量

从表 7－1－24 中各省(市、区)动力用商品煤的收到基低位发热量看,以宁夏自治区和山西省的最高,平均 $Q_{net,ar}$分别达 26.02MJ/kg 和 26.01MJ/kg,这是由于这两省(区)的低灰分无烟煤及作动力用的炼焦煤比例较多,发热量最低的是吉林省和广西自治区煤,

平均 $Q_{net,ar}$ 分别低至 15.47MJ/kg 和 14.36MJ/kg，这是由于这两省（区）的高灰分年轻烟煤及褐煤较多，而广西自治区更有产量较大的高灰、高硫的合山矿区贫煤。发热量较低的还有浙江、青海和内蒙古等省、区，这是因为浙江省多以高灰分的气肥煤为主，青海省以氧化后的不粘煤较多，内蒙古自治区东北部的褐煤占全自治区动力用商品煤的大部分。

表 7－1－24　各省（市、区）动力用商品煤的低位发热量

省（市、区）	宁夏	山西	陕西	甘肃	新疆	北京	湖北	广东	福建
$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	26.02	26.01	25.31	25.23	24.98	24.52	24.20	23.69	23.63
省（市、区）	黑龙江	河南	贵州	江苏	四川	湖南	云南	山东	河北
$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	23.46	23.45	23.21	22.87	22.57	22.50	22.37	22.30	21.97
省（市.区）	安徽	江西	辽宁	浙江	青海	内蒙古	吉林	广西	—
$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	20.66	19.94	19.76	18.52	16.93	16.14	15.47	14.36	—

（四）我国各主要动力煤矿区商品煤的低位发热量

我国主要动力煤矿区的商品煤低位发热量如表 7－1－25 所示。从表中可清楚看出，发热量较低的都是一些褐煤矿区，如珲春和舒兰等高灰分褐煤的 $Q_{net,ar}$ 分别低至 12.28MJ/kg 和 11.89MJ/kg，霍林河、大雁等矿区的褐煤 $Q_{net,ar}$ 也只分别为 13.87MJ/kg 和 14.05MJ/kg。发热量最高的为鹤壁瘦煤及大同低灰分弱粘煤和阳泉年轻无烟煤，平均 $Q_{net,ar}$ 分别高达 27.24MJ/kg、26.46MJ/kg 和 26.30MJ/kg。$Q_{net,ar}$ 大于 25.09MJ/kg 的还有晋城、郑州、焦作、白沙、窑街、靖远和哈密等矿区的无烟煤和不粘煤，平朔和神府煤的平均 $Q_{net,ar}$ 均不到 25.09MJ/kg。其他矿区煤的低位发热量结果详见表 7－1－25。

表 7－1－25　全国主要动力煤矿区商品煤低位发热量

矿区名称	北京	大同	平朔	阳泉	晋城	平庄	扎赉诺尔	大雁	霍林河	阜新
$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	24.52	26.46	24.90	26.30	25.96	15.19	15.68	14.05	13.87	21.41
矿区名称	铁法	辽源	舒兰	珲春	淄博	龙口	兖州	焦作	鹤壁	义马
$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	18.27	17.52	11.89	12.28	22.25	18.28	23.60	25.42	27.24	19.28
矿区名称	郑州	白沙	合山	芙蓉	松藻	神府	铜川	窑街	靖远	哈密
$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	25.62	25.88	13.09	20.83	23.58	24.50	24.08	25.27	25.20	25.29

对动力配煤场来说，供煤矿点基本固定，如没有实测发热量仪器，也可用工业分析结果进行计算，一般都有较高的计算精度。兹将我国主要动力煤矿区煤的发热量计算公式分别介绍如下

1.大同矿区煤

$$Q_{net,ar} = 33.16 - 0.3596M_t - 0.3763A_{ar} \quad (7-1-6)$$

2.铁法矿区煤

$$Q_{net,ar} = 30.902 - 0.3345M_t - 0.3345A_{ar} \quad (7-1-7)$$

3.郑州矿区煤

$$Q_{net,ar} = 34.498 - 0.3345M_t - 0.3763A_{ar} \quad (7-1-8)$$

4.晋城矿区煤

$$Q_{net,ar} = 34.456 - 0.3596M_t - 0.3847A_{ar} \quad (7-1-9)$$

5.焦作矿区煤

$$Q_{net,ar} = 33.62 - 0.368M_t - 0.3513A_{ar} \quad (7-1-10)$$

6.阳泉矿区煤

(1)筛选煤：

$$Q_{net,ar} = 35.063 - 0.3554M_t - 0.3931A_{ar} \quad (7-1-11)$$

(2)洗选煤

$$Q_{net,ar} = 35.146 - 0.3471M_t - 0.3847A_{ar} \quad (7-1-12)$$

7.北京矿区煤

$$Q_{net,ar} = 31.99 - 0.3429M_t - 0.322A_{ar} \quad (7-1-13)$$

8.汝箕沟矿区(西沟平峒及白芨矿)煤

$$Q_{net,ar} = 34.728 - 0.3136M_t - 0.3847A_{ar} \quad (7-1-14)$$

9.抚顺老虎台矿煤

$$Q_{net,ar} = 32.70 - 0.3554M_t - 0.3513A_{ar} \quad (7-1-15)$$

10.阜新海州露天矿煤

$$Q_{net,ar} = 31.174 - 0.3345M_t - 0.3596A_{ar} \quad (7-1-16)$$

11.扎赉诺尔矿区煤

$$Q_{net,ar} = 26.762 - 0.2509M_t - 0.3345A_{ar} \quad (7-1-17)$$

12.平庄矿区煤

$$Q_{net,ar} = 27.766 - 0.2843M_t - 0.3011A_{ar} \quad (7-1-18)$$

13.舒兰矿区煤

$$Q_{net,ar} = 27.410 - 0.2843M_t - 0.2843A_{ar} \quad (7-1-19)$$

上述各计算公式的 $Q_{net,ar}$ 的单位都是 MJ/kg，其最大误差一般均在 0.42MJ/kg 以内。

对大多数未知矿区或地方矿的煤，他们的发热量则可按烟煤、无烟煤及褐煤 3 大类的公式分别进行计算。

计算烟煤 $Q_{net,ad}$(J/g)的回归式：

$$Q_{net,ad} = 35860 - 73.7V_{ad} - 395.7A_{ad} - 702M_{ad} + 173.6CRC \quad (7-1-20)$$

计算无烟煤 $Q_{net,ad}$(J/g)的回归式：

$$Q_{net,ad} = 34814 - 563V_{ad} - 382.2A_{ad} - 24.7M_{ad} \quad (7-1-21)$$

计算褐煤 $Q_{net,ad}$(J/g)的回归式：

$$Q_{net,ad} = 31733 - 388.4V_{ad} - 321.6A_{ad} - 70.5M_{ad} \quad (7-1-22)$$

由上述 3 式算出的 $Q_{net,ad}$ 值，再根据实测的 M_t 值，即可按下式换算成煤的收到基低位发热量：

$$Q_{net,ad} = (Q_{net,ad} + 23M_{ad}) \times \frac{100 - M_t}{100 - M_{ad}} - 23M_t \quad (7-1-23)$$

某些动力配煤场因没有配备测元素分析碳、氢的仪器，因此无法计算 $Q_{net,ar}$ 结果。作者以 137 个统检煤样结果为基础，推导出了利用工业分析结果计算各种煤的氢含量(H_{daf})的经验回归式：

$$H_{daf} = 0.00117A_d + 0.57\sqrt{V_{daf}} + 0.1362Q_{gr,daf} - 2.806 \quad (7-1-24)$$

上式的标准差 S 为 0.1636，因而有 95% 煤样的计算误差在 0.32% 以下，完全能满足计算 $Q_{net,ar}$ 的需要。

第四节　动力用商品煤的灰熔融性

一、煤灰熔融性测定方法

煤灰熔融性是煤灰在高温下达到熔融状态的温度，过去习惯上称作灰熔点。严格来讲，煤灰是一种多组分的混合物，没有一个固定的熔点，而只有一个熔融的温度范围，因而它不是用一个温度点所能表示的，而是在加热过程中煤灰熔融所呈现的几种物理形态时的温度。过去用 T_1、T_2、T_3 或 DT、ST、FT3 个温度表示，最新国家标准是用 4 个不同

形态下的温度表示，即 DT（变形温度）、ST（软化温度）、HT（半球温度）和 FT（流动温度）。

煤灰是煤中矿物质在高温下灼烧后的产物。煤中矿物组分极为复杂，主要有硅、铝、钛、铁、钙、镁、钾、钠等的硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐和硫化物及高岭土、石英等，经高温灼烧后大部分被氧化或分解，这些分解产物的含量和性质就决定了煤灰的熔融性。在一定温度下煤灰中各组分还会形成一种共熔体，这种共熔体在熔化状态时有熔解煤灰中高熔点组分的性质，从而改变熔体成分和熔化温度。因此，煤灰开始熔化的温度比任一组分的单纯矿物组分的熔点都低。

煤灰熔融性是评价动力用煤和气化用煤质量的重要指标。灰熔融性特征温度低的煤在固态排渣的锅炉中容易结渣，影响锅炉的燃烧和正常运行，甚至造成停产，也影响气化炉的运行并造成煤气质量下降。因此，对固态排渣锅炉和气化炉用煤，其灰熔融性特征温度一般越高越好。对液态排渣锅炉和气化炉用煤，煤灰熔融性特征温度以较低为好，以保持较好的流动性为宜，并需进一步测定煤灰的高温粘度。

（一）灰熔融性 4 个特征温度的定义

1. 变形温度 DT

灰锥尖端开始弯曲或变圆时的温度（如灰锥保持原形，则锥体收缩和倾斜不算变形温度）；

2. 软化温度 ST

灰锥弯曲至锥尖触及托板或灰锥变成球形（其高度等于底宽）时的温度；

3. 半球温度 HT

灰锥形变成近似半球（高度约等于底长的一半）时的温度；

4. 流动温度 FT

灰锥熔化展开成高度在 1.5mm 以下的薄层时的温度

灰锥原形及四个熔融特征形状见图 7－1－4。

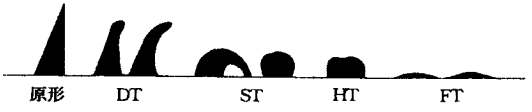


图 7－1－4　灰锥熔融特征形状示意图

（二）方法要点

将煤灰试样制成一定尺寸的三角锥体，在规定的气体介质中，以一定的升温速度加热，观察灰锥在受热过程中的形态变化，记录变形温度、软化温度、半球温度和流动温度 4 个特征熔融温度。

(三)主要仪器设备

1.高温炉

高温炉需满足以下条件:能加热到1500℃以上;有足够的恒温带(各部位温差小于5℃);能按规定的程序加热;炉内气氛可控制为弱还原性和氧化性;能在试验过程中观察试样形态变化。图7-1-5为一种适用的管式硅碳管高温炉。

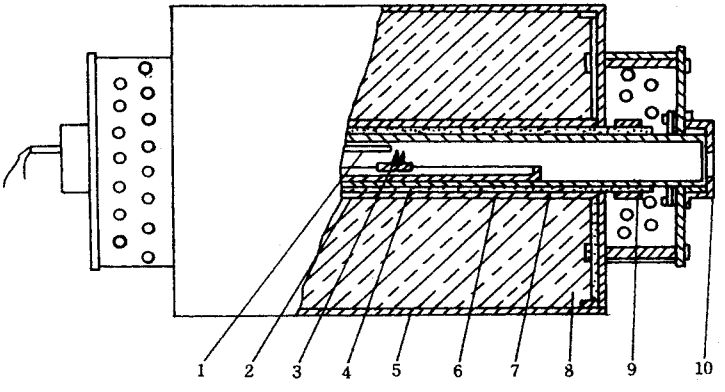


图7-1-5　硅碳管高温炉

1—热电偶;2—硅碳管;3—灰锥;4—刚玉舟;5—炉壳;6—刚玉外套管;
7—刚玉内套管;8—泡沫氧化铝保温砖;9—电极片;10—观察孔

2.铂铑-铂热电偶及高温计

测量范围0~1500℃,最小分度5K,加气密刚玉管保护。

3.灰锥模子(图7-1-6)

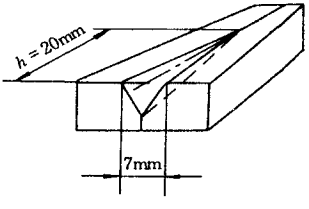


图7-1-6　灰锥模子

由黄铜或不锈钢制成,可将煤灰试样制成底边为7mm等底三角形,一个垂直边高20mm的锥体。

4.灰锥托板

由耐火材料制成,可容纳7个灰锥。

5.常量气体分析器

可测定一氧化碳、二氧化碳和氧含量。

6.有关的试剂材料

糊精、氧化镁粉、无烟煤粉、石墨粉等。

二、动力用商品煤的灰熔融性及其分布

煤灰熔融性的特征温度(DT、ST、HT 和 FT)的高低,主要取决于煤灰成分。如煤灰成分中的 Al_2O_3 大于 40%时,其软化温度(ST)均大于 1500℃以上;灰中 SiO_2 含量大于 70%时,其 ST 值也大于 1500℃;而灰中 Fe_2O_3 和 CaO 含量增高时,其 ST 值一般会有明显降低;但当 Fe_2O_3 超过 50%和 CaO 超过 40%时,则其 ST 温度又明显增高,有的可达 1500℃以上。煤灰的组成成分又与煤系的形成时代有关。如侏罗纪煤尤其是早、中侏罗世煤时期形成的不粘煤、长焰煤的 CaO 和 Fe_2O_3 普遍较高,煤灰软化温度(ST)多在 1150~1250℃左右;晚第三纪褐煤的 CaO 含量也很高,故其 ST 多在 1200℃以下;而二叠纪石盒子统煤的 Al_2O_3 最高,Al_2O_3 一般都在 35%~40%,山西统煤的 Al_2O_3 也多在 30%~40%,因此这两时代形成的煤灰软化温度(ST)分别可在 1500℃以上及 1400℃以上。

煤灰熔融性是评价动力用煤和气化用煤的重要质量参数。煤灰熔融性温度可以反应煤中矿物质在锅炉和气化炉中的动态,根据它可以预测锅炉的结渣和沾污情况。因此,煤灰熔融性也是指导锅炉设计和运行的一个重要参数。如固态排渣的工业锅炉或气化炉,就要求使用灰熔融性温度较高的煤,以免锅炉内产生结渣,影响锅炉正常操作或降低气化效率。液态排渣锅炉则要求使用灰熔融温度较低的煤,以保持熔渣有较好的流动性。现已结合我国煤炭资源特征,制订出煤灰熔融性温度分级标准。

(一)煤灰软化温度(ST,C)分级

煤灰软化温度分级标准见表 7-1-26。

表 7-1-26　煤灰软化温度分级标准(MT 报批稿)

序号	级别名称	代号	软化温度 ST(C)
1	低软化温度灰	LST	≤1100
2	较低软化温度灰	RLST	>1100~1250
3	中等软化温度灰	MST	>1250~1350
4	较高软化温度灰	RHST	>1350~1500
5	高软化温度灰	HST	>1500

(二)煤灰流动温度(FT,℃)分级

煤灰流动温度分级标准见表 7－1－27。

表 7－1－27　煤灰流动温度分级标准(MT 报批稿)

序号	级别名称	代号	软化温度 ST(℃)
1	低流动温度灰	LFT	≤1100
2	较低流动温度灰	RLFT	>1100～1300
3	中等流动温度灰	MFT	>1300～1400
4	较高流动温度灰	RHFT	>1400～1500
5	高流动温度灰	HFT	>1500

注 :煤灰熔融性测定时炉内气氛为弱还原性。

(三)不同牌号动力用商品煤的灰熔融性温度

由于煤灰熔融性温度的高低主要取决于它的煤灰成分,而煤系的沉积环境又决定了它的煤灰成分,从而影响了它的煤灰熔融性温度,因而判断煤灰软化温度的高低常可分成褐煤、烟煤和无烟煤 3 大类进行考察,由表 7－1－28 看出,总的趋势是 ST 大于 1500℃的样品数比例以烟煤和无烟煤的较多,分别占该 2 大类煤的 33.23%和 32.55%,而褐煤灰的 ST 值大于 1500℃的只占其样品数的 21.13% ;至于 ST 小于 1150℃的特低灰熔融性温度的比例以烟煤类最多,占该类煤的 12.67%,这些烟煤大多形成于早、中侏罗世时期的不粘煤和长焰煤,且以分布在西北和华北地区为主 ;而无烟煤和褐煤灰中 ST 小于 1150℃的只分别占该两类煤的 6.56%和 5.63%。从总的来看,ST 值大于 1350℃的高熔融性灰的比例以无烟煤和烟煤的较多,分别占这 2 大类煤的 56.96%和 56.93%,而褐煤中 ST 大于 1350℃的只占其样品数的 40.85%。对固态排渣的工业锅炉和窑炉以及气化炉来说,通常要求 ST 越高越好,否则煤灰容易结渣而影响空气畅通,从而导致煤炭不能完全燃烧和影响气化炉的顺利运行。同时,高温熔渣还侵蚀炉体耐火砖及损坏炉排等金属材料,缩短设备使用寿命。

(四)我国各大区煤灰熔融性软化温度

从表 7－1－29 可以看出,我国各大区的煤灰平均软化温度(ST)相差不大,除西南区和西北区的稍低、ST 分别为 1310℃和 1315℃外,其余各大区的平均煤灰软化温度都在 1350℃以上,其中以华东、华北和中南区的较高,ST 分别为 1437℃、1430℃和 1416℃,华北区为 1378℃。上述数据表明,从总体来看,我国大多数煤的煤灰软化温度较高。但不

同矿区(矿井)煤的 ST 值相差较大,因此也有不少矿区的煤灰软化温度太低而影响其正常使用,可通过动力配煤的方法提高煤灰软化温度。

表 7－1－28　我国不同类别煤的灰熔融性温度的分布范围

煤的类别	样品总数	煤灰熔融性温度 ST(℃)	>1500	≥1350～1500	≥1250～<1350	≥1150～<1250	<1150	合计
无烟煤	381	样品个数	124	93	54	85	25	381
		占本类煤(%)	32.55	24.41	14.17	22.31	6.56	100
烟煤	671	样品个数	223	159	91	113	85	671
		占本类煤(%)	33.23	23.70	13.56	16.84	12.67	100
褐煤	71	样品个数	15	14	20	18	4	71
		占本类煤(%)	21.13	19.72	28.17	25.35	5.63	100

表 7－1－29　各大区动力用商品煤灰熔融性

地区	华北	东北	华东	中南	西南	西北	全国
ST(℃)	1430	1378	1437	1416	1310	1315	1404

(五)各省(市、区)动力用商品煤的灰熔融性软化温度

从各省(市、区)动力用商品煤的灰熔融性软化温度(ST)来看,以安徽和山西两省的最高,其平均 ST 值分别为 1489℃和 1487℃(表 7－1－30),这是因为安徽省的动力用商品煤大部系高灰熔融性的二叠纪石盒子统和山西统煤,而山西省也是以山西统煤为主、部分为硫分较高的石炭纪太原统煤及少量侏罗纪煤。河北、江西、江苏、陕西、吉林、河南、湖南、湖北等省的煤灰平均 ST 温度也都在 1400℃以上。灰熔融性 ST 温度最低的为新疆自治区,其平均 ST 仅 1172℃,因为该自治区煤几乎都生成于含 CaO 较高、Al_2O_3 较低的早、中侏罗世时期,从而导致其煤灰 ST 值比其他省(市、区)的明显降低。

甘肃、北京和青海这 3 省(市)的煤灰平均 ST 温度也都低至 1250℃以下,因为这些省(市)的煤也是以生成于早、中侏罗世时期为主,其灰中的 CaO 和 Fe_2O_3 也均较高,如北京局无烟煤的灰成分中的 CaO 含量常达 20%～30%,Fe_2O_3 含量也在 10%～20%以上。

表 7－1－30　各省(市、区)动力用商品煤的灰熔融性温度(ST)

省(市、区)	安徽	山西	河北	江西	江苏	陕西	吉林	河南	湖南
ST(℃)	1489	1487	1474	1470	1458	1451	1442	1422	1422
省(市、区)	湖北	广西	山东	广东	黑龙江	辽宁	福建	四川	浙江
ST(℃)	1421	1385	1381	1373	1367	1367	1358	1345	1341
省(市、区)	宁夏	云南	内蒙古	贵州	甘肃	北京	青海	新疆	—
ST(℃)	1340	1300	1290	1254	1225	1221	1220	1172	—

(六)我国主要动力煤矿区商品煤灰熔融性软化温度

由表 7－1－31 表明,我国不同矿区的煤灰软化温度差异较大,一般以二叠纪山西统矿区煤灰的软化温度较高,如西山、阳泉、晋城、平朔、鹤壁、郑州等矿区的煤灰 ST 值均在 1450℃以上;而形成于早、中侏罗世的大同、神府、哈密、靖远、窑街等矿区煤灰的软化温度普遍较低,ST 绝大部分在 1250℃以下。最低的哈密矿区仅为 1136℃。此外,北方的一些晚侏罗世矿区褐煤的灰软化温度也都不太高,如扎赉诺尔褐煤的 ST 仅 1178℃,大雁和平庄的褐煤在 1280℃左右,ST 值相对稍高的霍林河矿区也在 1350℃以下。总的看来,西北及华北地区的生成于早、中侏罗世时期的一些不粘、弱粘及长焰煤矿区的煤灰软化温度普遍低于 1250℃;生成于晚侏罗世时期的内蒙古东部地区的褐煤灰的软化温度(ST)虽稍高,但一般也不超过 1350℃;只有生成于二叠纪石盒子统和山西统煤的灰熔融性软化温度最高,ST 多在 1400℃以上,其中还有不少大于 1500℃。

表 7－1－31　我国主要动力煤矿区商品煤平均软化温度(ST)

矿区名称	北京	大同	西山	潞安	阳泉	晋城	平庄	扎赉诺尔	大雁	霍林河	阜新
ST(℃)	1221	1244	1500	1461	1500	1499	1260	1178	1261	1339	1294
矿区名称	铁法	辽源	舒兰	淄博	龙口	焦作	鹤壁	义马	郑州	白沙	合山
ST(℃)	1399	1446	1450	1423	1246	13.14	1500	1301	1476	1334	1483
矿区名称	东罗	芙蓉	松藻	铜川	窑街	靖远	哈密	平朔	神府	—	—
ST(℃)	1500	1178	1484	1272	1277	1169	1136	>1450	1215	—	—

第五节　动力用商品煤的哈氏可磨性指数

一、煤的可磨性测定方法

煤的可磨性是动力用煤的重要特性之一，它表征煤磨制成粉的难易程度。在燃煤电厂的设计与运行中，煤的可磨性是煤粉制备工艺设计和电厂内部能耗的一个主要参数，可磨性好的煤可使磨煤机的出力增加而能耗降低。

实验室可磨性的测定是模拟实际生产中的磨煤机和煤粉细度，采用专门的仪器设备进行的，测定结果用可磨性指数表示，指数值越大，说明煤的可磨性越好，即越容易磨制成粉。

煤的可磨性测定方法目前国内外普遍采用美国的哈得格罗夫(Hardgrove)法，简称哈氏法，并已列为国际标准和我国国家标准。另外还有前苏联采用的并改进了的伏特依(VTI)法。哈氏法和 VTI 法的测定原理都是依据磨碎定律，但由于基准的不同，两种方法的测定结果相差很大。因此，只有同一种方法测定的可磨性指数才具有可比性。本节仅介绍哈氏法。

(一)可磨性测定原理

根据里廷格(Ritinger)磨碎定律：磨碎所消耗的能量与被磨颗粒增加的表面积成正比。

$$E = \frac{k}{k_{HG}} \cdot \Delta S \qquad (7-1-25)$$

式中　E——磨碎消耗后有效能量；

k——常数，与其他能量消耗有关；

k_{HG}——可磨性指数，与被磨颗粒有关；

ΔS——被磨颗粒磨碎后增加的表面积。

颗粒在磨碎过程中能量消耗主要用于增加颗粒表面积、机械运转、摩擦损失、颗粒和研磨件的弹性变形等，而增加颗粒表面积所消耗的能量是有效能量，当其他能量消耗一定，余下能量全部用于表面积增加。在规定条件下经过一系列的推算，可得出哈氏法测定可磨性指数的计算公式：

$$HGI = 13 + 6.93(50 - G) \qquad (7-1-26)$$

式中　HGI——为哈氏可磨性指数(无单位)；

G ——为试验最后测定的 200 号筛上物质量(g)。

上式推导及应用的条件：

(1)使用标准的哈氏仪、筛子和振筛机。哈氏仪按要求专门制造；3 种筛子孔径分别为 1.19mm、0.59mm、0.074mm，振筛机为振击式并有规定的振幅；

(2)选择美国宾夕法尼亚州某矿的煤为基准煤，规定其哈氏指数为 100；

(3)测定用煤样 50g，粒度 0.59～1.19mm；

(4)用规定的方法制取测定用煤样。

在规定条件(仪器设备、试验煤样及操作步骤)与公式推导条件完全一致时，可用该式计算结果。在实际测定时，由于仪器设备使用中的磨损变形等原因，影响了用公式计算的准确度和精密度，因此国际标准和我国标准都采用标准煤样校正法，即由标准图查取所测煤样的哈氏可磨性指数。

(二)可磨性测定方法要点

称取 50g 规定粒度的煤样，经哈氏可磨性测定仪研磨后，在规定条件下筛分，称量筛上煤样量，并计算筛下煤样量，由用标准煤样绘制的校正图上查得哈氏可磨性指数。

校正图的绘制需用 4 个一组的标准煤样，它们的哈氏指数分别约为 40、60、80、110。由煤炭科学研究总院北京煤化学研究所采用美国的哈氏仪对这 4 个标准煤样进行标定，分别测定其哈氏指数标定值，并向用户提供标准煤样。

(三)可磨性测定主要仪器设备

(1)哈氏可磨指数测定仪：见图 7－1－7。

主要技术性能：主轴转速 20±1r/min，限额工作转数 60±0.25 转，负荷力 284±2N。

(2)试验筛：孔径 0.071mm、0.63mm、1.25mm 三种，外形直径 200mm，并配筛盖和底盘。

(3)保护筛：孔径 13～19mm，外形尺寸同试验筛。

(4)振筛机：垂直振击频率 149mm^{-1}，水平回转频率 221min^{-1}，回转半径 12.5mm。

(5)天平：最大称量 100g，感量 0.01g。

(6)托盘天平：最大称量 1000g，感量 1g。

(7)二分器：格槽宽度 5mm、15mm^2 种。

(8)破碎机：辊式或圆盘式，辊或盘间距可调节，能将粒度 6mm 煤样破碎到 1.25～0.63mm，并尽量减少 0.63mm 以下的煤粉产率。

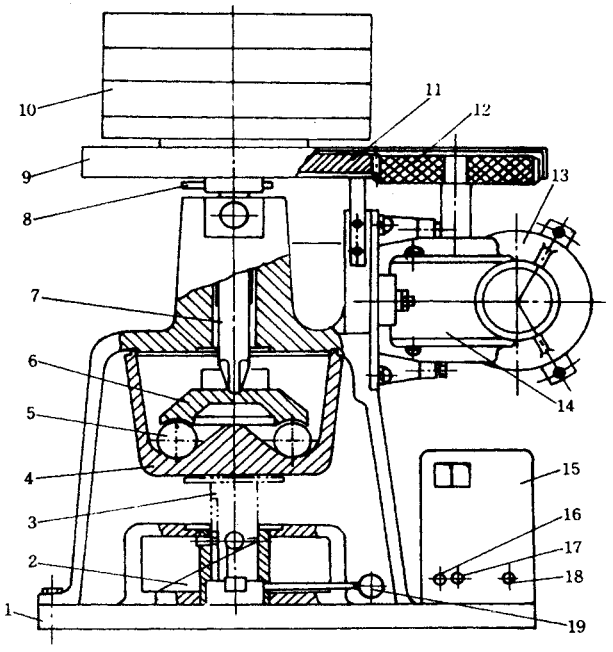


图 7－1－7　CHK－60 型哈氏可磨性指数测定仪

1—桥形底座；2—螺旋托盘；3—托碗芯轴；4—研磨碗；5—钢球；6—研磨环；7—主轴；8—传感元件；9—护罩；10—重块；11—大齿轮；12—小齿轮；13—电机；14—蜗轮盒；15—转数控制器；16—启动按钮；17—急停按钮；18—清零按钮；19—手柄

二、动力用商品煤的哈氏可磨性指数

煤的哈氏可磨性指数的大小主要取决于煤化程度，在正常情况下，总的趋势是以烟煤 HGI 值较高，褐煤和无烟煤的较低。对褐煤来说，其 V_{daf} 值越高，则 HGI 值越低，对无烟煤来说，如含碳量越高，则哈氏可磨性指数越低。但也有一些无烟煤矿区（如郑州及湖南白沙局）的无烟煤，由于在成煤过程中煤层受到地质构造的破坏、挤压而严重破碎，导致哈氏可磨性指数明显增大，有的 HGI 值可达 150 以上。

煤的可磨性在研究煤的物理性质和工业利用方面具有十分重要的作用。随着采煤机械化程度的不断提高，粉煤产率日益增多。此外，由于粉煤流态化技术的广泛应用，在很多工业部门，特别是电厂煤粉锅炉和高炉喷吹系统，都需要将煤制成粉状加以利用，这时就需要根据煤的可磨性来选择适合于某种特定型号磨煤机的煤种。煤的哈氏可磨性指数是评价煤粉锅炉和高炉喷吹用煤成粉的难易程度的一个重要参数。根据我国煤炭可磨性的情况，现已制订出煤的哈氏可磨性指数分级标准（表 7－1－32）。

表 7－1－32　煤的哈氏可磨性指数分级标准(MT 报批稿)

序号	级别名称	代号	哈氏可磨性指数(HGI)范围
1	难磨煤	DG	≤40
2	较难磨煤	RDG	>40～60
3	中等可磨煤	MG	>60～80
4	易磨煤	EG	>80～100
5	极易磨煤	UEG	>100

(一)我国不同牌号动力用商品煤的哈氏可磨性指数

由表 7－1－33 表明,在我国各类动力用商品煤中以褐煤的哈氏可磨性指数最低,其平均 HGI 值为 57;其次为弱粘煤和不粘煤、气煤,其 HGI 值分别为 55、64 和 67;由于我国年轻无烟煤的比例较多,因而无烟煤的平均 HGI 相对稍高,HGI 为 72;哈氏可磨性指数最高的为瘦煤和贫瘦煤,其 HGI 值分别为 97 和 96,焦煤和贫煤的平均 HGI 值均为 93。

表 7－1－33　我国不同类别动力用商品煤的哈氏可磨性分布

煤种	褐煤	长焰煤	不粘煤	气煤	气肥煤	1/3 焦煤	弱粘煤
HGI	57	70	64	67	76	81	55
煤种	**焦煤**	**瘦煤**	**贫瘦煤**	**贫煤**	**无烟煤**	**1/2 中粘煤**	**肥煤**
HGI	93	97	96	93	72	56	91

(二)我国各大区动力用商品煤的哈氏可磨性指数

我国各大区煤的类别相差较大,他们的哈氏可磨性指数也有较大的差异,如东北区因低阶的长焰煤、不粘煤和褐煤的比例较多,HGI 值也最低,平均仅 63(表 7－1－34);中南区因其炼焦煤较多(如平顶山、鹤壁等局),哈氏可磨性指数也最高,HGI 达 94。华东区和西北区低阶烟煤较多,平均 HGI 值也均只有 70。全国动力用商品煤的 HGI 平均值为 75。

表 7－1－34　我国各大区动力用商品煤哈氏可磨性指数

地区名称	华北	东北	华东	中南	西南	西北	全国
HGI	76	63	70	94	90	70	75

（三）我国各省（市、区）动力用商品煤的哈氏可磨性指数

从表 7－1－35 看出，在我国各省（市、区）的动力用商品煤中，以北京市的哈氏可磨性指数最低，HGI 平均为 48，这是由于北京市主要产高变质的超无烟煤；哈氏可磨性指数最高的为贵州省，其平均 HGI 值达 108，这是由于贵州省的主要动力用商品煤矿区多以炼焦煤的副产品洗混煤等为主；河南省煤的平均 HGI 值也在 100 以上。其他各省动力用商品煤的哈氏可磨性指数详见表 7－1－35。

表 7－1－35　各省（市、区）动力用商品煤哈氏可磨性指数分布

省（市、区）	贵州	河南	青海	湖南	江西	河北	湖北	四川	陕西
HGI	108	101	95	95	94	93	89	88	87
省（市、区）	云南	浙江	山西	江苏	黑龙江	山东	宁夏	新疆	广东
HGI	85	81	78	72	69	66	64	62	61
省（市、区）	内蒙古	甘肃	辽宁	广西	吉林	北京	福建	安徽	
HGI	61	60	59	56	51	48	66	69	

（四）我国主要动力煤矿区商品煤的哈氏可磨性指数

由表 7－1－36 表明，我国主要动力煤矿区商品煤的哈氏可磨性指数的大小主要与矿区的煤种牌号有关。如大雁、珲春、龙口等褐煤的 HGI 值低至 44～51；平庄、舒兰、霍林河和扎赉诺尔等年老褐煤的 HGI 稍高，为 54～63；晋城无烟煤的哈氏可磨性指数最低，HGI 仅 34；北京、阳泉和焦作等无烟煤的 HGI 稍高，为 48～64；但郑州和白沙等特殊地质条件下形成的无烟煤的 HGI 则高达 115～149；神府不粘煤和大同弱粘煤的 HGI 也均较低，分别为 54 和 53。HGI 值在 75 以上的有淄博、鹤壁，澄合、哈密等矿区的烟煤以及芙蓉、松藻等矿区的无烟煤。其他矿区动力用商品煤的平均 HGI 值详见表 7－1－36。

表 7－1－36　我国主要动力用商品煤哈氏可磨性指数

矿区名称	北京	大同	晋城	阳泉	平朔	焦作	郑州	白沙	芙蓉	松藻	六枝
HGI	48	53	34	64	62	56	149	115	83	87	108
矿区名称	阜新	铁法	南票	长广	淄博	鹤壁	铜川	澄合	窑街	义马	靖远
HGI	61	58	57	57	75	75	67	85	56	66	61
矿区名称	哈密	神府	平庄	扎赉诺尔	霍林河	舒兰	龙口	大雁	珲春	合山	
HGI	76	54	53	63	62	54	51	44	47	67	

在这里需要说明许多矿区常有若干生产矿井，而不同矿井间的煤种牌号有的差异也较大，即使是同一矿井的煤，其不同品种的商品煤（如大块、中块、混煤、末煤等）和不同煤层的哈氏可磨性指数也有不同程度的差异。兹以北京矿务局为例，各矿商品煤中混煤的HGI值明显高于其他各品种商品煤的加权平均值（表7－1－37），这是因为混煤的平均颗粒均为50～0mm，而各品种商品煤还包括有大、中、混块煤等大颗粒煤。此外，该局不同矿井的同一品种煤，其哈氏可磨性指数也相差较大。如房山矿混煤的HGI值为87（表7－1－37），而杨坨矿混煤的HGI值仅为38，其他各矿间混煤的HGI值也均有不同程度的差别。

此外，主要动力煤矿区的其他平均煤质指标同样也都会有较大的变化范围。

表7－1－37　北京矿务局各矿分品种商品煤的哈氏可磨性指数（HCI）

矿　　名	混　　煤	各品种商品煤加权
门头沟矿	51	46
城子矿	78	75
大台矿	47	45
房山矿	87	72
长沟峪矿	55	47
大安山矿	38	39
王平村矿	53	45
木城涧矿	50	46
杨坨矿	38	34

第六节　主要动力煤矿区的煤质特征

我国的动力用煤主要包括以下2大系列：

（1）低阶烟煤中的不粘煤、弱粘煤、1/2中粘煤、长焰煤和高阶烟煤中的贫煤以及无烟

煤和褐煤。

(2)炼焦烟煤中的气煤、1/3 焦煤、肥煤、焦煤、瘦煤等煤种经过选煤厂洗选后的洗混煤、洗末煤、洗中煤等作动力用的副产品。

此外,由于我国的气煤和 1/3 焦煤的产量大,其中有些高硫、高灰难选煤也直接供作动力用煤,贫瘦煤由于结焦性差,一般也多作为动力煤使用,另有不少高硫的气肥煤也直接作动力煤使用。

我国产量较大的动力煤矿区有山西的大同弱粘煤、辽宁的铁法和早新长焰煤、河南的义马长焰煤、内蒙古西部的东胜(及陕西神府)的不粘煤以及东北部的平庄、扎赉诺尔和霍林河等矿区褐煤。此外,云南省的小龙潭等褐煤也是产量较大的动力用煤。兹将各主要动力煤矿区的平均煤质指标列于表 7 – 1 – 38。

表 7 – 1 – 38　我国主要动力煤矿区商品煤的平均煤质指标

矿区名称	M_t (%)	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1 ~ 8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	HGI	SI(C)
北京	4.24	2.44	19.59	6.23	1	0.26	24.52	48	1221
大同	8.02	3.27	10.06	29.90	3	0.70	27.28	53	1202
阳泉	5.42	1.36	18.50	9.94	1	1.20	26.30	67	1500
西山	7.7	0.61	16.31	19.02	5	1.00	26.58	96	1500
晋城	5.8	1.01	18.44	6.91	1	0.47	25.96	34	1499
潞安	6.0	1.34	15.58	16.48	5	0.33	27.45	101	1461
扎赉诺尔	32.2	13.0	13.86	42.70	1	0.32	15.68	63	1190
平庄	24.8	10.52	24.35	44.06	1	1.11	15.19	53	1242
长广	5.5	1.18	40.62	43.98	3	4.24	18.52	81	1341
淮南	6.6	1.63	25.94	37.62	5	0.51	22.61	68	1500
淄博	6.8	0.66	24.50	17.72	4	2.18	23.77	99	1497
龙口	21.6	12.08	20.64	45.91	2	0.65	18.28	51	1199
焦作	9.4	1.22	17.53	7.29	1	0.48	25.42	50	1344

矿区名称	M_t（%）	M_{ad}（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	SI(C)
兖州	8.1	3.07	16.28	39.05	5	0.79	24.47	56	1465
义马	10.7	6.11	21.96	41.70	2	0.93	19.78	66	1278
鹤壁	6.6	0.80	17.12	16.79	5	0.29	26.67	95	1418
郑州	5.4	0.98	20.48	12.44	2	0.35	25.62	149	1476
铜川	4.1	0.82	32.46	23.60	5	2.61	21.60	93	1240
澄合	3.8	0.54	20.24	19.98	5	2.89	26.80	87	1464
霍林河	29.5	18.70	25.31	50.44	2	0.70	13.87	62	1293
阜新	13.5	7.71	19.67	39.53	2	0.85	21.41	61	1273
铁法	11.6	5.22	31.97	40.80	1	0.67	18.27	58	1340
可保	46.3	10.59	13.92	56.74	1	2.10	11.18	35	1253
舒兰	19.4	13.00	44.02	52.94	2	0.29	11.89	59	1340
合山	5.8	3.15	51.57	21.74	1	5.60	13.98	68	1483
平朔	8.5	4.80	14.01	37.35	4	1.16	24.94	62	1500
芙蓉	6.8	2.18	31.99	12.10	2	3.88	20.83	83	1178
松藻	5.9	2.21	24.87	12.37	1	3.51	23.58	87	1484
窑街	6.8	3.98	11.43	34.95	2	0.45	25.27	57	1278
靖远	8.5	3.58	11.76	30.95	2	0.41	25.20	61	1159
哈密	15.1	5.85	4.95	27.55	2	0.45	25.29	76	1185
乌鲁木齐	8.0	3.23	16.37	38.17	1	0.73	24.77	53	1087
神府	15.5	9.90	6.90	32.50	1	0.40	22.92	64	1210

从表 7－1－38 看出，我国主要动力煤矿区的全水分以扎赉诺尔等褐煤矿区的较高，M_t 可达 30%以上，云南可保的年轻褐煤 M_t 达 46%以上，而昭通矿区褐煤的全水分更高

可达 50%～60%；北京、阳泉、晋城和郑州等无烟煤的全水分较低，M_t 都在 6%以下；而焦作无烟煤的平均全水分之所以高至 9.4%，其主要原因是矿井水较大，同时其选煤产品也多。我国动力煤的灰分一般都在 20%～30%，仅合山、舒兰和长广等少数矿区的灰分较高，A_d 可达 40%～50%以上。动力煤的挥发分则主要取决于煤炭类别，即 V_{daf} 值以褐煤矿区的最高。无烟煤矿区的最低，烟煤矿区的居中。各动力煤矿区商品煤的硫分主要与其成煤时代有关，如北京矿区的无烟煤多形成于陆相沉积的侏罗纪，故其平均 $S_{t,d}$ 低至 0.26%，而广西合山矿区的贫煤为海陆交互相沉积的晚二叠世乐平煤系，故其平均硫分高达 5.6%。动力煤收到基低位发热量的高低主要与矿区的煤炭类别及其灰分的大小有关，如各褐煤矿区的 $Q_{net,ar}$ 值几乎都在 18.5MJ/kg 以下，而灰分 A_d 在 40%以上的烟煤矿区，其 $Q_{net,ar}$ 也几乎都在 18.5MJ/kg 以下。动力煤的哈氏可磨性指数也主要与其煤种有关，一般是炼焦煤的 HGI 值较高，无烟煤和不粘煤、弱粘煤、褐煤的 HGI 普遍较低，如潞安、淄博及鹤壁煤的 HGI 值均在 95 以上，晋城无烟煤的 HGI 低至 34，神府不粘煤的 HGI 仅 54，大同弱粘煤的 HGI 为 53，可保褐煤的 HGI 仅为 35。

各动力煤矿区的灰熔融性软化温度(ST)的高低主要与成煤时代及其沉积环境有关。如阳泉、西山、晋城等二叠纪山西统陆相沉积矿区无烟煤的 ST 温度均高至 1500℃左右，而大同、神府等早、中侏罗世时期形成的不粘煤和弱粘煤因灰成分中的 Fe_2O_3 及 CaO 含量较高，故其软化温度(ST)均低至 1200℃左右。内蒙古东部的霍林河、平庄等矿区的 ST 温度也均低于 1300℃，扎赉诺尔褐煤灰的 ST 温度更低至 1200℃以下。

主要动力煤矿区的分配使用情况

(一)北京矿务局

北京矿务局生产的无烟煤远销华北及华东等地区。1997 年全局生产原煤 490 万 t，但销售量达 623 万 t(包括 1996 年的库存煤)。其中供中央部委直属企业的用煤量达 167 万 t，且以供原冶金部所属企业的高炉喷吹及烧结矿和锅炉用煤为主，其供煤量达 130 万 t；供化工部小化肥厂的块煤 14.6 万 t。此外，供各省、市地方工业用煤为 337 万 t、出口朝鲜等国 118.8 万 t。供各省、市地方工业用煤中，供天津、北京两市的小化肥及民用最多，分别达 127 万 t 和 125 万 t，供河北省民用煤 42.5 万 t，山东省 20 万 t，江苏、辽宁、上海等省、市各为 6.3 万 t、5 万 t 和 4 万 t。

(二)大同矿务局

大同矿务局是我国生产动力煤最大的矿务局，产煤远销全国二十几个省、直辖市、自治区，每年还有几百万吨的动力煤出口日本及东南亚等国家。国内主要用户是各类大、中、小型燃煤电厂及大量的工业锅炉、窑炉、气化炉等。如 1997 年大同局共销煤 3516 万

t,其中供电力系统的动力煤达 1073.6 万 t。兹以华东地区为例,如发电机组容量均为 1.4GW、年用煤量都为 400 万 t 的江苏利港电厂和华能国际南通分公司电厂的燃煤均以大同煤为主;装机容量为 1.2GW 的常熟电厂及 500MW 的天生港电厂和 400MW 的扬州、淮阴等电厂也均配烧大同煤;装机容量为 1.2GW 的上海石洞口二电厂和 950MW 的吴泾电热厂也均配烧大同、神府优质煤;装机容量为 660MW 的浙江台州、嘉兴、长兴、温州等电厂也均燃用大同煤。

1997 年全局出口煤为 432.8 万 t,供机车用煤量达 238.7 万 t,供冶金系统的动力煤在 200 万 t 以上,供有色金属行业的燃料用煤亦达 61 万 t,供建材及轻工行业的也分别为 27.8 万 t 和 22.6 万 t。

1997 年全局供各省、市、区的地方企业用煤总量为 1208 万 t。其中,天津市最多达 347 万 t,辽宁、河北、北京、江苏、广东和上海等省市调入的大同煤分别为 207 万 t、165 万 t、143 万 t、104 万 t、60 万 t 和 52 万 t,供煤量超过 10 万 t 的还有浙江 26 万 t、山东 28 万 t、河南 24 万 t、湖南 11 万 t 以及广西 10 万 t。

(三)平朔矿区

平朔安太堡露天矿 1997 年产气煤达 1100 万 t 左右,全部入选作为动力用煤。1997 年共销售商品煤 1162 万 t,其中以出口南韩等国为主,达 745 万 t,占其销煤量的 64%强;另供中央各部委所属企业的动力煤达 274 万 t,而其中电力用煤即为 215 万 t,约占中央企业用煤的 79%弱,如装机容量 1GW、年用煤 225 万 t 的神头电厂就以平朔煤为主;供中央纺织业用煤 27.5 万 t、石化企业用煤 31 万 t;供各省、市的工业用煤 143.5 万 t,其中山西省 61.4 万 t,北京、天津、河北、浙江和海南等省、市分别为 12.5 万 t、10 万 t、11.6 万 t、16.5 万 t 和 17.2 万 t。

(四)阜新矿区

1997 年阜新全局生产动力用原煤 1100 万 t 以上,从其商品煤的使用行业分,以发电用煤最多,其次为水泥、机车、冶金、化工等行业。1997 年阜新全局供发电用煤 200 多万 t,平均 $Q_{net,ar}$ 为 20.14MJ/kg,其中发电容量为 750MW(实际 300MW)的阜新电厂使用阜新煤 160 万 t 以上,供煤 V_{daf} 为 40%左右,A_d 为 30%左右,M_t 为 12%～15%。其他如装机容量 800MW、年用煤 250 万 t 的锦州电厂以燃用阜新矿区的长焰煤为主,沈阳铁路局也多使阜新煤作为机车用煤,附近的水泥厂及玻璃厂等建材企业也多以燃用阜新煤为主。

(五)铁法矿区

铁法矿区是新兴的动力煤矿区,1997 年生产动力用原煤 1500 万 t,约 300 多万 t 供

电厂使用，主要供辽宁省内的铁岭、清河、沈海、辽宁等大、中型电厂使用。如清河电厂的装机容量达 1.2GW，年用煤量 365 万 t，主要用铁法煤为主。铁法煤供电厂的品种以末煤和粒煤为主，A_d 平均近 37%，$S_{t,d}$ 小于 0.5%，M_t 10%、V_{daf} 约 37%、$Q_{net,ar}$ 为 16.38MJ/kg，发电煤耗(标煤)356g/度电。矿区附近其他电厂也均燃用铁法矿区的长焰煤。此外，辽宁省内的一些建材企业及机车等也多使用铁法煤。

(六)淮南矿业集团公司

1998 年淮南矿业集团公司产煤近 1300 万 t，其中 90%以上作为动力煤使用。商品煤按用户分，以电煤最多，依次为水泥等建材行业、钢铁、化工、铁道和燃料系统等行业及民用。全公司 1998 年直接供作燃煤电厂使用的为 483 万 t。如 1998 年全局供江苏平圩电厂的数量达 217 万 t，供淮南洛河电厂的也近 54 万 t，供田家庵电厂 75 万余吨，其他还有江苏仪征和无锡、浙江绍兴和肖山等电厂。

此外，1998 年供安徽宁国、白马山和巢湖地区等水泥厂用煤量分别达到 15 万 t、11 万 t 和 10 万 t 以上；供化工厂 39 万 t，其中供安徽淮北集团公司的动力煤在 10 万 t 以上；供马鞍山钢铁公司的动力煤，近 30 万 t。作为机车用煤，1998 年供机车用煤 40 多万 t，其中上海铁路局为 18.5 万 t。1998 年供煤量超过 10 万 t 的还有铜陵海螺水泥厂、无为县燃料公司(民用)、皖维化纤化工等用煤大户。

从淮南动力煤的发往地区看，除以安徽本省最多外，其余多供华东地区的上海、江苏、浙江、江西、福建等省、市作动力及民用煤。总计给各省市的供煤总量达 492 万 t，其中安徽省为 360 万 t、浙江 242 万 t、上海市 37 万 t、江苏和福建两省均为 20 万 t、江西 11 万 t。

(七)淮北矿业集团公司

淮北矿业集团公司 1997 年生产原煤 1400 多万 t，除有 777 万 t 的炼焦煤入选生产炼焦洗精煤外，其余 600 万 t 左右全部作为动力用煤。在入选的炼焦煤中，也只生产出 60%的炼焦精煤，至少还有 150 万 t 的洗混煤等副产品也作为动力用煤。也就是说，淮北矿业集团公司 1997 年约有 800 万 t 作为动力煤销售。另有出口煤 96 万 t(包括炼焦煤和动力煤)。

(八)义马矿区

义马矿务局以生产中高灰、中低硫的长焰煤为主，1997 年全局生产长焰煤 456 万 t，这部分动力用煤主要供燃煤电厂使用，其余作为机车、水泥及其他工业锅炉和窑炉使用。其产煤大部分供中南地区的电厂使用，如用煤近 120 万 t 的湖北荆门电厂、天生港电厂、九江电厂、南京热电厂以及广东的一些电厂普遍使用部分义马长焰煤作为燃料。此外，

洛阳市和三门峡的一些工业锅炉和窑炉等也都使用义马煤。

(九)神府—东胜矿区

神府—东胜矿区是我国西北和华北地区新开发的大型动力煤矿区,1998 年产量已达 2000 万 t,远期能力可达 6000 万 t/a 左右。神华集团 1997 年矿井总能力 840 万 t/a,全年产煤量为 565 万 t,其中神府公司的大柳塔矿平硐产煤 286 万 t,东胜公司的马家塔、乌兰木伦、武家塔和补连塔等矿井的总产量为 230 万 t。此外,神府地区地方煤矿的年总产量更在 1000 万 t 以上。目前,神府矿区产煤主要供华东、中南等地区的电厂使用,如扬州二电厂、上海吴泾热电厂、上海外高桥电厂以及石洞口二电厂等。此外,神府矿区还有部分煤出口日本等国作为发电用煤。

(十)平庄矿务局

平庄矿务局是我国褐煤产量最大的国有重点煤矿,1997 年生产原煤 663 万 t,其中年老褐煤约 600 万 t,占全局产量 90%,长焰煤约占 10%。平庄煤的特点是易风化碎裂、燃点仅 270℃左右,夏季堆放 30 多天就会自燃发火。该局产煤以供附近地区的电厂为主,1997 年销煤 500 多万 t,其中电厂约占 75%,供电煤的平均 A_d 为 22.76%、M_t 约 24%,$Q_{net,ar}$ 平均 16.24MJ/kg,平均 St.d1.26%,元宝山电厂是平庄煤的主要大户。

(十一)其他主要动力煤矿区

1.阳泉矿区

年产无烟煤达 1600 万 t 以上的阳泉矿务局,除块煤供中小化肥厂生产合成氨用、洗末桔煤供高炉喷吹使用以外,其余绝大部分混、末煤均供作动力及民用,其中有很大部分供电厂使用(如阳泉电厂)。上海、江苏的一些电厂很喜欢用阳泉新景矿煤作为配煤燃烧,其主要优点是硫分在 0.40%以下、挥发分约为 10%、灰分较低、热值较高,灰熔融性软化温度在 1400℃以上。此外,阳泉无烟块煤还供立窑烧水泥和石灰等建材工业使用。

2.西山矿区

1997 年西山矿务局生产原煤 1700 万 t,其中作炼焦煤入选的为 1158 万 t,生产冶炼精煤 805 万 t 及作动力煤的洗混、洗末煤 93.6 万 t、洗中煤 21.6 万 t。因此,1997 年西山局供动力煤的数量仍在 600 万 t 以上,其中大部作为太原市附近的电厂使用,部分供工业锅炉和窑炉使用。

3.兖州矿区

1997 年生产气煤达 1900 万 t 以上的兖矿集团公司是华东区产煤最大的生产企业,当年有 1100 万 t 以上作为炼焦煤入选,生产冶炼精煤 778 万 t 和作为动力煤使用的洗混、末煤 143 万 t,因而兖州矿区可供的动力用煤仍在 800～900 万 t 左右。矿区的动力用

煤以供发电用煤为主，其次为工业锅炉和水泥等窑炉，另有部分动力煤出口。如 1997 年供邹县电厂的动力煤达 500 万 t 左右，供山东铝厂 40 万 t、大宇水泥厂 35 万 t、济南铁路局机车用煤约 40 万 t，还供浙江、厦门、江苏和上海等市场用煤分别为 30 万 t、10 万 t、40 万 t 和 30 万 t，以及国有矿区自用煤 90 万 t。1997 年出口日本国等动力煤约 300 万 t，出口动力煤的干基高位发热量（Qgr，d）均在 27.60MJ/kg 以上，硫分小于 0.80%，灰分（A_d）小于 15%，干基挥发分（Vd）31%～37%，全水分小于 10%，粒度小于 50mm。

4.松藻矿区

松藻矿务局是西南地区最大的无烟煤产地，1997 年产煤 270 万 t，其中有 70 万 t 供金鸡岩选煤厂作为动力煤入选，产出无烟精煤 61.7 万 t，精煤灰分（A_d）21%～28%、全水分（M_t）9.9%、硫分 2.70%、发热量 21.74MJ/kg 以上，洗出的无烟精煤供重庆电厂使用。

第二章　动力配煤发展现状与前景

第一节　国外动力配煤技术的现状

一、工业发达国家动力配煤发展概况

国外的动力配煤技术主要用于燃煤电厂，通常是采用高、低硫分（或低灰分）煤的混配燃烧，以减少 SOx 的排放，降低锅炉的结渣、沾污和积灰，充分利用中、低热值煤与高热值煤混配，保证燃煤的低位发热量（$Q_{net,ar}$）和控制燃煤的灰分。开展动力配煤研究较早的有美、德、日、英、加拿大、荷兰和西班牙等国，研究内容主要涉及到配煤混合系统和配煤混匀方法等方面。此外，有关配煤的着火性能、结渣性能对燃烧的影响以及采用配煤燃烧对降低 NOx 和 SOx 排放量等方面都做过研究。

在配煤技术方面，国外配煤一般采用仓混式、库混式、带混式或炉内直接混合等形式，已发展到依靠配煤理论、运用计算机指导煤场和电厂的动力配煤。

计算机优化配煤运行是美国应付目前火电厂燃煤频繁变更、控制入炉煤煤质的重要手段，可以有效地控制入炉煤品质，保证锅炉的稳定运行，减轻结渣、沾污、积灰、腐蚀和磨损。例如美国 Praxic 公司于 90 年代中期开发的电厂优化配煤专家系统（CBAS）已经用于美国和加拿大的部分电厂，根据 Praxic 公司的最新统计分析显示：

美国宾夕法尼亚电厂在使用了 CBAS 系统后，一改往日只使用固定煤种的情况，采用多煤种的配煤燃烧，仅此一项每年可节约 200 万美元。

美国肯塔基州电厂在使用了 CBAS 系统后，通过配煤燃烧，增加了廉价煤的使用量，降低了发电成本，同时降低了 SO_2 和 NOx 的排放，全年总计节约 100 万美元。

美国的另一座电厂使用 CBAS 系统控制配煤的质量，达到了减轻结渣的目的，全年总计节约 250 万美元。

瑞士 ABB 公司开发了应用于电厂的配煤专家系统（Coal Quality Expert），此套系统为电厂带来了良好的经济效益，并在控制污染物排放中起到了良好的作用。

二、主要工业国家动力配煤的现状

（一）美国

美国东部、中部煤含硫较高，分别为 1.8%～3.8%和 2.5%～5.0%，洗选后仍在 1.5%～2.5%和 2.0%～3.5%；而西部煤含硫低，约为 0.3%～1.5%。东部和中部的电厂须使用西部煤或采用脱硫装置才能满足 SOx 排放要求。采用东部、中部煤配烧西部煤，既可减少运费与脱硫装置，又能满足 SO_2 和 NOx 等废气排放要求。研究表明，某电厂用东、中部高硫煤（含硫 3.1%），其中仅掺烧 10%的西部低硫煤（含硫 0.3%），比单烧高硫煤运行费用低 60%，配煤的效果相当显著。此外，东、中部电厂还以委内瑞拉、哥伦比亚和印度尼西亚等国进口 $S_{t,d}$ 小于 0.7%和 A_d 小于 7%的优质动力煤与当地高灰、高硫煤混配燃烧，也取得了很好的经济效益。美国在采用配煤燃烧降低 SOx 的排放方面进行了较深入研究，同时也考虑了配煤的含灰量和发热量的稳定。保证煤质稳定，既可降低现行电厂的运行费用，又可降低新电厂的投资和运行费用。煤质稳定时，可避免锅炉结渣，并对防止沾污有好处，因为煤质波动是引起结渣、沾污的主要原因之一灰分稳定还能使灰处理系统高效运行。

由于配煤的上述优点，采用配煤燃烧的电厂越来越多。实际应用时也出现了一些新问题，促使美国对配煤方法进行了研究，即确定配煤的比例后，如何使配煤的成分更均匀，不致因煤质波动而影响燃烧的稳定性和经济性。

（二）德国

德国电厂配煤燃烧始于 70 年代初。当时，一些烧褐煤的电厂因其质量性能常常偏离设计指标，电厂无法满负荷运行，因而将褐煤与烟煤配烧，通过配烧来提高低热值褐煤的利用价值。根据 Ptolemosis 和 Aliveri 电厂的运行情况表明，在褐煤中配烧一定量的烟煤，（如烟煤量为 15%时），除能满负荷运行外，还取得了更高的燃烧稳定性、粗灰及飞灰中未燃成分（即灰渣含碳量）降低、出口烟气温度下降的效果。

近几年，德国对配煤的燃烧特性与燃烧配煤的各种燃烧室和燃烧器以及配煤设备进

行了较深入研究,研究了配煤的着火性和可磨性,并对燃用配煤电站的初期投资和运行成本进行了分析。还有人研究了在不同氧浓度下的不同细度配煤的着火情况,主要结论是配煤的掺配比例对煤的着火性有一定影响在低氧环境中,煤的着火性随掺配比例变化的趋势不同;对于粗粒煤,不同的氧浓度下掺配比例的变化对着火性的影响较明显。VGB 总部曾对 9 台热功率为 1000 ~ 2150MW 锅炉的燃烧设备进行了研究,设计出不少适用于不同煤种配煤燃烧的燃烧设备。

此外,德国还研究了多种配煤的低 NOx 燃烧设备,并已在电站锅炉中得到广泛应用。

(三)日本

日本的动力燃料依赖进口。为了减少运费,近几年来开始扩大利用发热量高的无烟煤等低挥发分煤,因而出现了煤粉锅炉中配烧无烟煤和石油焦等的低挥发分燃料倾向。石川岛播磨重工公司对原来水平燃烧烟煤和配煤的锅炉进行了反应管试验和试验炉试验,充分掌握了低挥发分煤配烧时的燃烧特性。在此基础上,设计了配烧低挥发分煤的 530t/h 锅炉。此锅炉采用了将炉内 NOx 还原的低 NOx 燃烧技术——INPACT 方法。试运行中,锅炉性能达到设计参数,而且成功地实现了低 NOx 运行;三菱重工开发了能烧各种煤的 1000MW 的超临界变压锅炉,运行情况良好。此外,福岛勿来电厂进口加拿大、澳大利亚和我国大同煤,通过配煤燃烧,燃煤质量长期稳定可靠,发电煤耗降低,其灰渣含碳量稳定在 3% 以下。日本对配烧不同煤种时出现的排放污染物增加及完全未燃烧损失增高等问题正在进行深入研究。

(四)其他国家

为防止结渣、沾污和腐蚀,并形成稳定火焰,荷兰常燃用配煤。采用配煤燃烧时的结渣和腐蚀倾向均有不同程度的降低。

西班牙的劣质煤储量较多,为充分利用这些煤,也多采用配煤燃烧。西班牙研究低挥发分煤燃烧时,也研究了配煤的燃烧特性,一些劣质煤干基灰分在 16% ~ 55% 之间,平均约 45%。研究表明,造成发电设备利用率下降的主要原因是锅炉结渣和磨煤机磨损,某些高灰分煤的可燃物含量低,难以燃烧。采用高、低挥发分煤的配煤燃烧,其配煤挥发分 V_{ar} 在 12% ~ 16% 之间,含灰量控制在 45% 以下。结果表明,配煤燃烧提高了燃烧效率和利用率,带来了良好的效果。

加拿大研究了用配煤的方法调节煤的燃烧及飞灰特性。主要结论有:燃用配煤的煤粉炉可以通过调节配入煤的比例来减少或避免运行中经常遇到的问题;岩相学和热重法可用于研究配煤的燃尽特性,如果飞灰中可燃物超过 12%,会导致除尘器效率下降;降低

氧化性飞灰中的可燃物，可以配入活性强的高挥发分煤以强化燃烧。但也有研究表明，测得配煤飞灰含碳量降低仅仅是表明高活性煤的燃尽度较大，总的飞灰含碳量并未改变。

英国利用配煤燃烧可将燃煤灰分控制在 17% 以下，取得了减轻结渣的良好效果。

三、美国拉巴德联合电厂的配煤系统

1990 年梅纳斯研究出建在拉巴德联合电厂的配煤系统。该系统的建立不仅满足了 24h 内 SO_2 排放量的平均值要求，而且还减少了高价低硫煤的用量。根据二氧化硫的实际排放量与排放标准间的差别，每降低 0.04g/MJ(0.1 磅/Btu)，估计每年可节约 4800 万美元，整套设备的安装费用约 2278 万美元。

(一)主要配煤设备。

该套设备包括低硫煤受煤系统、低硫煤返仓系统和混配系统。长大列车运来的低硫煤卸至移动的悬臂式堆料机的传送带上。煤场内可同时堆放几种低硫煤。

犁式给煤机从煤堆取煤，送至定量装载煤仓，准确计量。操作人员根据控制室内监示的烟道中 SO_2 的排放量来确定合适配比，并通过程序控制器来控制计量给煤机。受圆筒仓和缓冲仓容积的影响，周转时间 10h。这样就可保证 SO_2 排放量控制在规定的 24h 平均值内。

(二)配煤计量系统

在拉巴德电厂，利用定量装载煤仓和胶带秤实现配煤的精确计量。下面示出利用胶带秤的几种配煤例子，见图 7－2－1～7－2－3。利用变速给煤机与在关键部位设置的胶带秤，可保证配煤的准确性。

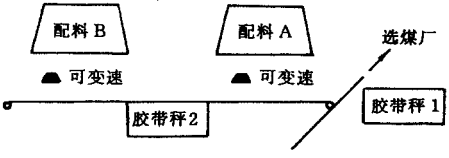


图 7－2－1　旋转犁式配煤系统(2 种配料)

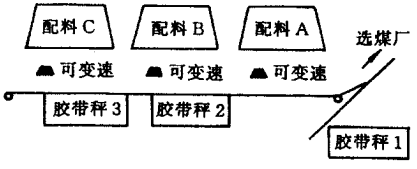


图 7－2－2　旋转犁式配煤系统(3 种配料)

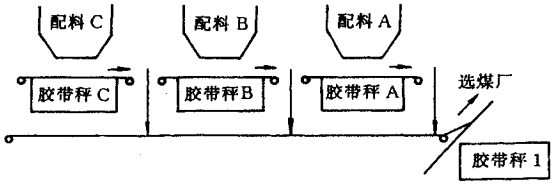


图 7－2－3　带重力给料机的日仓配煤系统

(三)在线分析仪

在线分析与准确的取样和计量系统相联,可随时显示煤的质量。目前,主要有 3 种在线分析仪:元素分析仪、测灰仪,水分测定仪。其中元素分析仪用于测定碳、氢、硫、灰成分和计算热值及灰熔融性温度。

在线分析仪可用于各种场合。配煤过程中,根据硫分、灰分或水分,将煤分别堆放或掺到同一煤堆,见图 7－2－4 与图 7－2－5。在线分析仪安在煤堆和锅炉之间,以确定从不同煤堆取煤量,从而达到锅炉要求和符合环保规定。在线分析仪的操作取决于煤的准确取样。因此,经济分析时应包括取样系统费用。

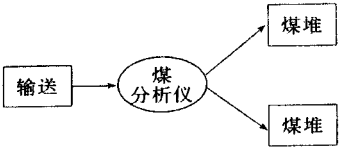


图 7－2－4　用在线分析仪将煤分别堆放

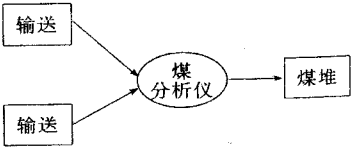


图 7－2－5　用在线分析仪将煤掺配堆放

使用在线硫分分析仪时,先定出炉前仓入料煤的硫分指标。根据不同煤的含硫量控制配煤量,从而达到合适配比。实际操作证明这种方法可行。配煤中,因减少了高价低硫煤用量,年节约 290 万美元。

(四)配煤质量的表示方法

配煤的一些性质,如硫分和灰分是以质量百分数表示,煤的热值也是以单位质量煤的发热量表示(Btu/磅或 MJ/kg)。这些参数在配煤过程中可通过准确计量来控制配比。例如,煤堆分层配煤或运输胶带上的配煤,将煤分成薄层、层层堆放,然后垂直煤堆薄层

取料，可使煤混合均匀（床式配煤）。从煤仓中分层取料，并送至同一运输胶带上也可达到此目的。

但是，有些品质是用实验获得的关系数据，而不是用质量表示，结渣指数和沾污指数就是根据煤的灰成分计算的。配煤中灰成分的相互作用会影响计算配比的准确性。

1990 年，曾有人研究了软质易磨煤和硬质难磨煤的配煤：一种是低挥发分的煤，哈氏可磨性指数为 106，另一种是高挥发分的烟煤，HGI 指数为 56。研究发现，配后煤的哈氏指数与单煤的指数和单煤质量间呈线性关系，表 7－2－1 是两种配煤的实验结果。结果表明，它与以往其他使用软质煤和硬质煤同时掺配的经验数据不一致。但是对东部这 2 种烟煤而言，其配煤的哈氏可磨性指数可以预测。

表 7－2－1　配煤的哈氏可磨性指（HGI）

烟　　煤	实测值	计算平均值
高挥发分	106	—
低挥发分	56	—
低∶高（2∶1）	93	89
低∶高（1∶2）	74	73

1991 年又研究了低硫、低挥发分煤与高挥发分煤的掺配，关键是保证燃烧的稳定性，发现仅根据挥发分高低进行配煤的效果并不好。煤中挥发分的高热值能很好地表示燃烧时火焰的稳定性。有人提出了煤稳定性指数（CSI）的计算公式，即：

$$\mathrm{CSI}=\frac{\text{煤中挥发分的高热值（磅）}}{\text{双显微组分反射率}}$$

挥发分的高热值是通过煤加热后所得产物的热分析来确定。双显微组分反射率来自岩相分析，它等于煤中壳质类、树脂类和镜质类物质反射率乘以各组分标准体积的百分数。CSI 值小于 25 的单煤（或配煤），燃烧时火焰不稳定。对于 V_{daf} 在 18% ~ 40% 的煤，CSI 值还与挥发分产率有关，其关系式是 $\mathrm{CSI}=2.652\times(V_{daf},\%)-22.18$。当挥发分已知时可用来计算煤的 CSI 值。该值可用于 2 种或多种煤的配煤，使其具有良好的火焰稳定性，即与高挥发分烟煤的特性基本相同。

英国皇家电子能源研究协会曾对哈氏可磨性指数和灰熔融性温度预测方法进行了研究。宾夕法尼亚大学等的研究人员评估了 14 种美国东部烟煤的配煤，也进行了这些煤与西部煤的配煤试验。除按常规以结渣特性来判定灰熔融特征温度外，还研究了配煤

灰成分的变化。

研究表明,配煤的哈氏可磨性指数可近似地用各种单煤的哈氏可磨性指数的加权平均值计算。用加权平均值预测的配煤哈氏可磨性指数与实测值的比较见图 7－2－6。

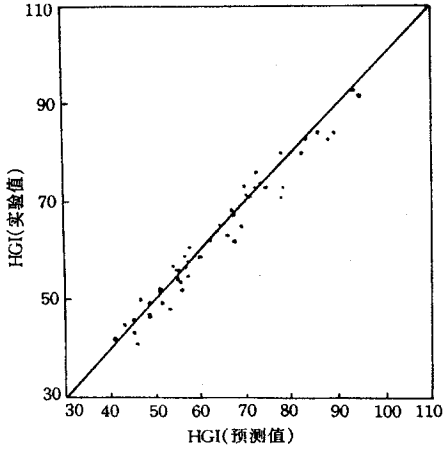


图 7－2－6　配煤的哈氏指数预测值与实测比较

在研究 2 种煤混配后的煤粒度分布时发现,当配煤粒度接近煤粉锅炉入料粒度时,配煤中哈氏可磨性指数(HGI)高的软质煤的细粒级量比硬质煤的多。此结果可根据单煤的其他性质(如挥发分和硫分等)来判断,见表 7－2－2。所有配煤的挥发分和硫分是几种单种煤的加权平均值,而配煤的粒度则不同,挥发分和硫分越低的煤,其粒度越小,即最软煤的挥发分和硫分也最低。

此外,还对整个配煤及其各粒级煤的灰成分和灰熔融性进行研究。利用新开发的公式预测配煤灰熔融性时应考虑到:

表 7－2－2　配煤性质随粒度、挥发分和硫分的变化(%)

粒度分布	A 煤(HGI39)		B 煤(HGI95)		配煤:A 煤 61、B 煤 39	
	质量	挥发分	质量	挥发分	质量	挥发分
+0.0744mm	57.56	38.04	25.04	17.81	40.21	33.73
0.074～0.037mm	20.32	35.91	27.67	18.32	25.51	28.97
－0.037mm	22.12	32.84	47.29	18.99	34.29	23.92
总计	100	36.46	100	18.51	100	29.16

粒度分布	A 煤(HGI39)		C 煤(HGI74)		配煤:A 煤 50、C 煤 50	
	质量	硫	质量	硫	质量	硫
+0.074mm	57.56	0.73	34.53	4.45	40.44	2.10
0.074~0.037mm	20.32	0.74	26.08	3.57	24.92	2.30
-0.037mm	22.12	0.75	39.39	2.40	34.64	1.58
总计	100	0.74	100	3.41	100	1.97

(1)单煤灰熔融性的加权平均值,

(2)配煤中灰成分的多元回归方程;

(3)论述结渣指数和结污指数有关文献中的若干公式。

研究中,将美国东部烟煤掺配后的数据作为一组数据,东、西部的配煤作为整个数据,发现以结渣指数和沾污指数为基础的方程并不是最好的。表 7-2-3 给出了根据东部烟煤数据预测配煤灰熔融性的最佳方程和方法。由于西部各地煤中灰成分的差别较大,配煤中的关系较复杂,因此并未列出所有基本数据间的关系。

表 7-2-3　预测东部烟煤灰熔融性的计算公式

灰锥开始变形温度(还原气氛) = $5010-19.4SiO_2-58.2Fe_2O_3-998MgO$
γ^2(配煤) = 0.98
软化温度(还原气氛) = $3852-43.5Fe_2O_3-997MgO$
γ^2(配煤) = 0.87
半球温度(还原气氛) = $4620-13.8SiO_2-44.1Fe_2O_3-976MgO$
γ^2(配煤) = 0.901
流动温度(还原气氛) = $4445-14.9SiO_2-35Fe_2O_3-747MgO$
γ^2(配煤) = 0.895
灰锥开始变形温度(氧化气氛) = $4097-11.6SiO_2-27.5Fe_2O_3-612MgO$
γ^2(配煤) = 0.875
软化温度(氧化气氛) = $3959-10.6SiO_2-23.9Fe_2O_3-531MgO$
γ^2(配煤) = 0.855
半球温度(氧化气氛) = $3841-9.53SiO_2-21.05Fe_2O_3-476MgO$
γ^2(配煤) = 0.869
流动温度(氧化气氛) = $3643-7.43SiO_2-18Fe_2O_3-394MgO$
γ^2(配煤) = 0.894

多数情况下,研究中所做的煤灰熔融性预测值与实测值非常吻合。

灰成分和灰熔融性也因粒度不同而发生很大变化。表 7-2-4 表明,灰成分也随粒

度变化而有所不同。在 0.074～0.037mm 的粒级煤中，Fe_2O_3 的含量非常高。这种变化在单煤 C 中亦出现过。在还原气氛下，该粒级煤灰熔融性比由粗细颗粒掺配的煤低得多。

表 7－2－4　不同粒级配煤的灰成分和灰熔融性变化

项　目	粒　度，(mm)			合　计
	>0.074	0.074～0.037	<0.037	
质量(%)	40.44	24.92	34.64	100.0
硫(%，干基)	2.10	2.30	1.58	1.96
灰熔融性(°F，还原/氧化气氛)				
灰锥初始变形温度	2480/2660	2160/2580	2505/2670	2470/2665
软化温度	2540/2690	2240/2620	2560/2720	2525/2700
半球时温度	2590/2720	2340/2655	2600/2750	2585/2720
流动温度	2630/2745	2450/2680	2635/2775	2635/2740
主要成分占灰质量(%)				
SiO_2	52.31	48.08	54.12	51.99
Al_2O_3	25.51	24.46	25.55	25.25
Fe_2O_3	16.41	21.42	12.13	15.36
TiO_2	1.26	1.34	1.29	1.38
P_2O_5	0.20	0.10	0.14	0.11
CaO	2.58	2.87	3.59	2.68
MgO	0.65	0.67	0.86	0.65
Na_2O	0.25	0.24	0.25	0.22
K_2O	1.97	2.05	2.27	1.96
SO_3	0.92	1.14	1.25	1.18

四、日本勿来电厂的配煤设施

日本勿来电厂建成于 1955 午，位于福岛县靠海的佐糠町区内，占地 43 万 m^2。目前发电能力为 1625MW，共有 4 台发电机组，其中装机容量为 175MW 及 250W 的各 1 台、600MW 的 2 台。除 6 号机组为烧重油外，其他机组均可同时以煤和重油燃料混合使用，其中 8 号机组还从 1985 年开始一直烧高浓度水煤浆，用量已达 50t/h。目前勿来电厂每年煤炭用量在 100 万 t 左右，水煤浆 7 万 t。

(一)重视科学配煤，达到质量稳定

由于日本煤炭资源有限，生产成本高，煤炭年产量已降至 1000 万 t 以下。为了避免

能源完全依赖国外，日本政府对煤炭工业采取补贴和支持政策，但本国煤的价格是进口煤的 3 倍，为此不得不采取强制性办法分配给国内的一些用户使用，其中包括发电厂。

日本所产的煤炭一般价格贵，而且质量差，灰、硫含量较高。为保证锅炉运行的最佳状态，取得发电的稳定出力，各发电厂通过与进口煤的科学合理配煤，在燃料的组成和稳定上很下功夫，在燃料管理方面有一套科学方法和制度，保证了锅炉燃料长期稳定，用煤质量达到规定的指标。

勿来电厂使用 1 种日本煤和 2 种进口煤（包括澳大利亚煤和中国煤）相配合，配煤指标达到水分 7%、硫分小于 0.7%、固定碳 57%、挥发分 30% 左右。由于锅炉长期烧质量稳定的优质燃料，不仅发电单耗低，锅炉运行情况良好，而且灰渣含碳量在 3% 以下，可作为优良的水泥原料和覆田与土壤改良剂。

（二）配煤贮煤场的设施和布置

表 7－2－5 列出配煤贮煤场的主要设施和设备。

勿来电厂使用的煤炭，无论是本国煤或进口煤都是经过海运到卸煤码头，而本国煤和进口煤分别使用各自的港口码头，便于堆放管理，然后由带篷的重型运煤汽车运至贮煤场。

表 7－2－5　配煤贮煤场的主要设施和设备

项　　目	受煤系统	出煤系统
运输能力	500t/h	500t/h
装运煤系统	2	1
胶带式喂煤机	5	18
输送胶带台数	18	17

配煤贮煤场的布置如图 7－2－7 所示。由图 7－2－7 可见，整个贮煤场分别由 3 个室内贮煤场所组成，运煤汽车由港口经公路运至贮煤场大约有 10km。运煤汽车将煤卸入受煤坑内，经过计量后，由胶带再输送至规定的室内贮煤场内。

该贮煤场共有 2 个受煤坑和 2 套受煤计量装置。由图 7－2－7 可见，经第 1 受煤坑的煤可贮于第 1 和第 2 室内贮煤场，而经第 2 受煤坑的煤贮于第 3 室内贮煤场内。受煤后的输煤胶带上都装有自动采样机，按着指令定时定量取样，以掌握来煤的质量变化情况。

同样，根据锅炉燃煤的需要量及其质量指标，由运煤指令室给出信号，通过不同胶带输送一定量的煤，经计量和采样后达到科学配合，实现燃料的均匀化和稳定化。

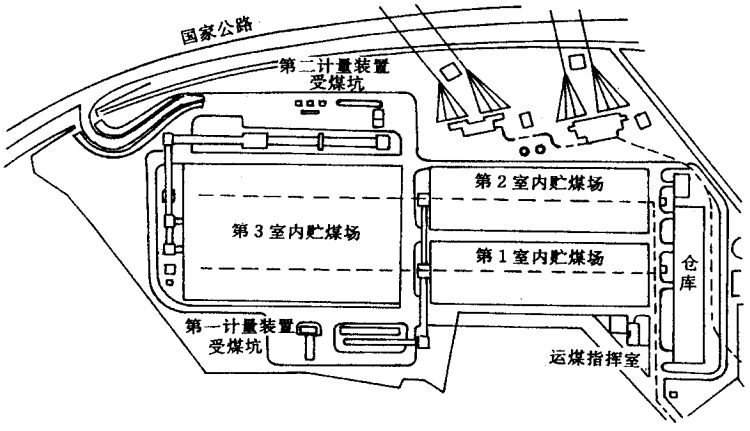


图 7－2－7　配煤贮煤场的布置

(三)室内贮煤场的结构和特点

勿来电厂配煤贮煤场最大的特点就是由 3 座室内贮煤场所组成。这种室内贮煤场避免了雨水的冲淋,可以保证煤的水分变化很小,而且不会因刮风造成煤尘飞扬,人们也看不见堆煤场,保证了附近的环境优美和舒适,反映了贮煤场设计的新动向。

1 座大的室内贮煤场可贮煤 13 万 t,2 座小的室内贮煤场可分别贮煤 4 万 t,总贮煤量可达 21 万 t,设计要求可满足发电厂 30d 存煤期要求。室内贮煤场的结构详见图 7－2－8。由图 7－2－8 可见,大的室内贮煤场高达 34.8m、宽 104m,长 150m,整个贮煤场为钢结构,内部为水泥地,便于煤炭清除和堆放。

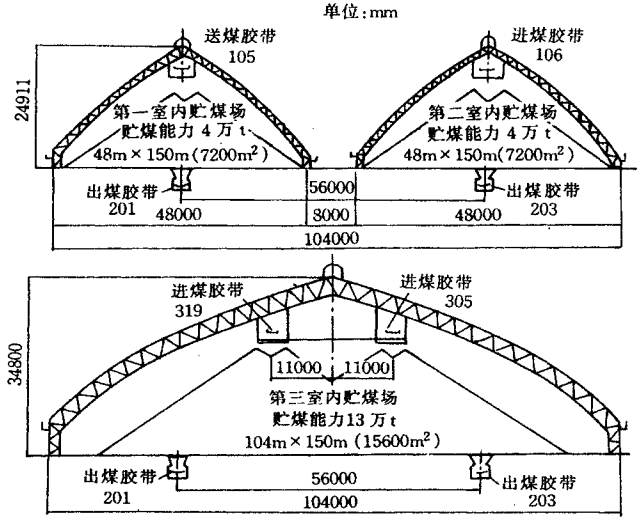


图 7－2－8　室内贮煤场结构

这种贮煤场的另一个特点是煤炭通过室内顶部胶带在贮煤场的上部将煤卸至贮煤堆上，而输出胶带安装于煤堆底部的地沟内，将煤炭输出。2 个小的室内贮煤场仅有一条输出胶带，大的室内贮煤场就有 2 条输出胶带。另外，室内贮煤场亦有设定的排水沟和净化水的设施。

第二节　国内煤炭系统动力配煤发展概况

一、煤炭系统开展动力配煤的可行性

90 年代以前的动力配煤工作基本上都在物资系统的燃料公司进行，其主要原因是进煤矿点多、煤种复杂、质量参差不齐，供应单种煤给用户往往满足不了不同工业锅炉和窑炉的需要，他们通过合理的、科学的配煤后，不仅供煤质量稳定，而且社会效益和经济效益明显增加。因此，近 20 年来在燃料系统的动力配煤工作长盛不衰，尤其是在进场的混煤和原煤中加工筛出 25～50mm 的中块煤后，不仅动力配煤的粒度（0～25mm）更趋于一致，煤场还增加了较大经济效益。

对煤炭系统来说，拥有产煤的销售权和不用现金购煤的便利，某些矿区煤种又多，特别是硫分和灰分变化较大的矿区，完全有条件搞动力配煤，根据不同用户对热值、挥发分和灰熔融性、硫分和全水分等质量指标的不同要求，分别配制出 2～3 种动力配煤供应用户。

二、煤炭系统开展动力配煤的现状

目前，煤炭系统正在开发的动力配煤场有杭州煤场、株洲选煤厂煤场、重庆煤场和安徽蚌埠煤场等。山西省煤炭运销总公司宁武发运站也拟在当地开发动力配煤直供用户。此外，邯郸、铜川和沈阳等局也有开发动力配煤的意向。

（一）杭州煤场

杭州煤场是由浙江省煤炭工业总公司牵头筹建的股份制责任有限公司，总投资 1.1 亿元，年产动力配煤 80 万 t，煤场总吞吐量 300 万 t/a，其中由铁路进煤 120 万 t/a，水运进煤 30 万 t/a。产品由汽车外运 75 万 t，航运 50 万 t，火车外运 25 万 t。煤场基建规模包括工业场地 2 万 m^2，铁路专用线占地 10690m^2，建铁路专用线 7.1km，贮煤容量（露天）20

万 t，已于 1996 年初开工，1997 年建成东区水运码头工程，1997 年底建成铁路装卸和贮、配煤场等全部工程。该配煤场于 1998 年底全部建成并开始生产，1999 年月产配煤数万 t，配煤硫分均在 0.80%以下，并加入一定量的固硫添加剂，可使配煤完全达到洁净燃烧。预计投资利润率 32.7%（税前），投资回收期 5.4a（税后），吨煤纯利 10 元。

杭州煤场的产品除粒度为 0～25mm 的 2～3 种配煤外，对进场的混煤或原煤先筛出 25～50mm 中块煤和 50～100mm 大块煤单独外销增加效益。

该煤场的主要设备有链斗卸车机（能力 540t/h）、门式装卸机（250t/h）、堆料机（800t/h）、轮式装载机、胶带运输机（800t/h，若干条）、地中衡（30t）2 台、电子胶带秤（ICS－800－ST2）等，并配有采、制、化设备和 586 微机监控。

（二）株洲选煤厂煤场

株洲选煤厂为 50 年代末期由波兰设计的入选能力为 180 万万 t/a 的大型选煤厂，现其核定能力已达 270 万 t/a，主要入选平顶山煤和潞安煤。随着市场经济的不断发展，有关局、矿的供煤量逐年减少，以致选煤厂的入选量严重不足，1997 年全厂入选原煤量仅 57.4 万 t，还不到全厂核定能力的 1/4。该厂因具有场地大、通有铁路专用线等先决条件，已决定开发动力配煤工艺，总投资 5000 万元，由国家给予几百万元的贴息贷款，计划生产发热量大于 21～23MJ/kg 的 2 号动力配煤和发热量 18.8～21M3/kg 的 1 号动力配煤，主要供株洲热电厂（需 100 万 t/a）、汕头热电一厂（需 210 万 t/a）及广西电力燃料总公司（需 70 万 t/a）等单位。株洲玻璃厂、冶炼厂和化工厂等工业锅炉、窑炉用煤量也达 60 万 t/a。该煤场配煤能力可达 200 万 t/a，贮仓能力 10 万 t，建工期 1.5a，纯利润 3200 万元/a，吨煤利润 16 元，投资回收期 3.1a（税后）。

该厂煤源多，品种和质量复杂，主要来煤矿点有潞安、萍乡、平顶山、宜洛、河南地方矿、牛马司、当地小矿无烟煤等，十分有利于开发动力配煤。配煤粒度 0～25mm，优质块煤（25～50mm）单独销售，低质块煤破碎后配煤，由电子胶带秤计量，采用搅拌机把配煤搅匀。

（三）蚌埠配煤场

安徽省 1995 年产煤 4322 万 t，耗煤 4600 万 t，其中热电厂 1600 万 t、地方工业用煤 2000 万 t、其他及民用煤约 1000 万 t。1997 年全省产煤更增到 4769 万 t，其耗煤量也就更多。

拟建年产动力配煤 200 万 t 的配煤场，煤种为淮南的气煤和淮北的贫煤及洗混煤（焦煤），生产发热量 21～23MJ/kg 的 1 号动力配煤及发热量大于 23～25MJ/kg 的 2 号动力配煤。配煤粒度 0～25mm，即来煤后先筛出大于 25mm 的块煤，其中优质的单销，低质的

破碎后掺入配煤。煤场总的贮煤能力 10 万 t(煤仓加露天),产品露天堆放;总投资约 8000 万元,建设工期一年半 纯利润 3600 万元/a,吨煤利润 18 元,投资回收期 3.7 年(税后)。配煤由火车外运,供巢湖、芜湖、铜陵及马鞍山等各热电厂使用。

(四)重庆煤场

重庆市 1997 年和 1995 年分别生产原煤 2787 万 t 和 1600 万 t,其中高硫煤占 3/4,全市年用煤 1300 万 t,销往外省 350 万 t。市热电厂年用煤 20 万 t,市其他工业锅炉、窑炉用煤近 30 万 t。煤源以南桐矿区为主,并调入綦江、赶水地区的地方矿煤。该煤场计划配煤能力 60 万 t/a,贮煤容量 3 万 t,以露天存煤为主,以汽车进煤、汽车和轮船外运。配煤中加入石灰石固硫,可减排 $SO_2$50%、节煤 7%。配煤的主要用户有年需煤量 30 万 t 的重庆市热电厂、市内务工业锅炉和窑炉(年用煤约 10 万 t),水路销往外省 20 万 t/a。配煤硫分不超过 2%,V_{daf}大于 20%,Mt 小于或等于 10%,粒度小于 25mm(或小于 50mm),发热量大于 17MJ/kg。配煤来源为邻水的高硫瘦煤和大竹的低硫肥煤。前者 $S_{t,d}$为 3.36%,后者硫分 0.57%,如两者以 1∶1 配煤后,硫分可降为 1.97%;挥发分前者仅 12.25%,后者为 30.90%,以 1∶1 配煤后的 V_{daf}可大于 21%。

(五)其他正在筹建或规划中的煤场

1.广西合山矿务局配煤场

合山矿务局是隶属于广西自治区的地方矿务局,地处广西合山市,所属 7 对矿井及局属小井年产贫煤约 170 万 t,产煤的 80%供合山电厂。由于所产煤的硫分太高,从 1999 年起国家限定年产原煤不超过 100 万 t。

该局 7 对矿井均有工业广场和铁路专用线,公路交通较为便利。其中溯河矿与合山市电厂共用一个工业广场,各矿铁路均可到达溯河矿。建设煤场无需征地,铁路、公路、水电设施具备配煤能力、300 万 t/a 的场地。国家计划从 2000 年起在合山局建设配煤能力 100 万 t/a 的配煤场,总投资约 5000 万元,并从贵州调入 50 万 t/a 的低硫、低灰煤与合山高硫、高灰煤配煤,同时加入固硫剂,使配煤硫分降至 2%以下。

2.重庆万县市配煤场

万县市是长江沿岸的重要港口,所辖各县煤炭储量丰富,年产煤量 820 万 t,万县下游各地均为缺煤地区,煤炭需求较大。

万县市水路交通十分便利,有公路与各县相连接。煤场建在万县市长江边,需征地 50 亩修建轮船码头。与忠县、开县及达州市运距较短,达州与万县市的铁路已经动工修建,全长 164km。配煤产品装船下水直达宜昌、武汉等沿江各城市用户,极为方便,运输成本费用相对较低。该市的材、化工、电力等行业亦蓬勃发展,动力煤消耗相当可观。

万县市煤炭公司是隶属重庆煤管局的地方煤炭公司，是重庆市的产煤大户，主要生产矿井分布在开县、忠县、奉节、云阳、巫山、梁平。各县煤炭质量不一，品种齐全。除当地用户外，万县市销售出川煤炭约 300 万 t/a，主要用户是长江沿岸城市的燃料公司、电厂、化肥厂、水泥厂等。根据市场需求等因素进行综合考虑，煤场配煤能力为 80 万 t/a，原料煤以开县瘦煤、忠县气煤和达川市大竹县 1/3 焦煤、石柱县气煤为主。

该项目估算投资 1650 万元，资金来源以贷款、自筹、合资等进行。

3.哈尔滨配煤场

哈尔滨是黑龙江省的省会和重要工业城市，年耗煤在 200 万 t 以上，附近没有大的煤矿，工业和民用煤炭受季节性影响特别大，煤炭质量无法满足要求。

位于哈尔滨市东新香坊火车站旁不到 1km 处有原东煤物资公司的大型物资仓库，现闲置未用，占地 14.7 万 m^2，有铁路专用线和公路交通网，水电设施齐全，可以采用租赁、合资或买断等多种形式，建成一个具有贮煤、配煤、代客贮存、中转等多功能服务的贮、配煤场。煤场能力 100 万 t/a，配煤规划能力初步定为 60 万 t/a。

该煤场主要煤源是七台河矿务局洗混煤产品和鹤岗、双鸭山等矿务局优质原煤以及地方小窑原煤。主要用户立足于哈尔滨工业及民用锅炉。特别是冬季取暖，煤炭供不应求，贮配、代客贮运十分有利，附近的电厂、水泥厂动力煤市场前景也十分乐观。

总投资估算为 3～4 千万元。

4.奉节配煤场

奉节是长江沿岸重要煤炭集运港口，有较完善的煤炭运销管理机制，已形成良好的煤炭流通体制，是出渝煤水路运输最为方便的码头之一。

煤场拟设在奉节县城以西 7km 处，需征地 60 亩，原料煤进场的公路运输方便，码头建设条件良好。三峡建成后，至万县水运距离为 121km，由万县进煤也极为方便。

奉节县年产煤 420 万 t，占万县地区的 50%以上，该地区无烟煤质量差异较大，近 1/3 的低硫中灰无烟煤可作优质配煤原料煤，如有需要；也可从长江上游调入优质烟煤，以调整挥发分。产品今后主要可供湖北、浙江的电厂、化肥厂及上海的电厂等。

据初步测算，项目总投资需 1740 万元。

5.江西九江煤场

江西省有不少高灰烟煤，也有一部分低灰、高硫、高热值无烟煤，单独使用高灰烟煤或高硫无烟煤时燃烧效果都不理想。如从外省调入部分优质煤，再充分利用省内这些低质煤资源，三者按一定比例配合，生产动力配煤，就能满足发电煤粉锅炉和工业锅炉、窑炉使用，因而江西省煤炭工业局正委托江西煤矿设计院计划筹建九江煤场。

江西省年用煤量达 3000 万 t 左右，1997 年全省产煤 2064 万 t，省内可自供的商品煤不足 2000 万 t，需要从外省调入大量优质煤，其中用煤量大而较集中的为火力发电厂。有些电厂（如井岗山电厂和丰城电厂等）正在建设中，这些电厂建成后的年用煤量达 300 万左右。省内的一些低质煤只有通过与外省调入的优质煤配煤后才能满足电厂对煤质的需要。

九江是省内的水陆交通要道，附近电厂和其他工业用煤都需要通过九江市转运，因此在九江市建立配煤场具有很大的优势。根据现有场地面积，可考虑建立年产动力配煤 100 ~ 150 万 t 的配煤场，建设总投资估算需为 4000 ~ 5000 万元左右。九江全市年用煤量需 250 万 t 以上，因此生产的配煤完全可以就近供应给九江电厂及市区的建材、化工、纺织等行业使用。

6. 铜川矿务局煤场

铜川局是西北地区高硫煤产量最多的一个矿务局，1997 年全局产煤 555 万 t，其中高硫和中高硫煤的产量达 383 万 t，占全局原煤产量的 69%，低硫煤只占 31%。因此，可考虑与黄陵低硫弱粘煤相配，以生产出符合用户需要的动力配煤。该局于 1986 年提出搞动力配煤，由于场地和经费等原因一直没有实施。根据生产情况，该局可考虑建设 150 万 t/a 的配煤场，需征地 300 亩左右，总投资将会超过 6000 万元。如没有国家贷款和拨款，则生产配煤的计划很难实现。

尽管煤炭系统开展动力配煤起步较晚，但自 90 年代以来发展很快，这是由于煤炭系统具有煤源多、已有现成铁路专用线等先决条件，因此大力开发动力配煤的优越性显然比燃料公司更大。且煤炭由产销直供，可减少许多中间环节，既可降低用户经济负担，又能使用户得到质量稳定的煤炭。对煤种单一的矿务局来说，由于无法利用各种不同煤炭的“长处”而克服其“短处”，也就很难实现动力配煤。但对有选煤厂的局、矿来说，仍有可能生产动力配煤，如灰分较高的洗中煤和煤泥等副产品，可与质量较好的混煤或末煤等配合以生产出用户需要的动力配煤。此外，还可收购地方小矿煤与大矿煤按用户需要合理配煤，配煤质量必须达到均匀一致。

第三节　国内燃料流通系统动力配煤发展概况

一、我国燃料流通系统动力配煤发展回顾

我国燃料流通企业开展动力配煤始于 70 年代末，为满足当时社会经济发展对煤炭的需求，上海市燃料总公司和广东省佛山市燃料公司开始生产锅炉用混合煤（即为动力配煤的雏形），受到用户的欢迎。1980 年天津市煤建公司建成 5 条机械化混合煤（动力配煤）生产线，形成工业化生产规模。到 1982 年 4 月后正式命名为动力配煤。至今我国的动力配煤得到了很大的发展，开展动力配煤由最初的 2～3 家发展到目前大部分省、区、市燃料流通企业，全国燃料企业动力配煤生产线由最初 5 条发展到目前 247 条，动力配煤生产量从 1980 年推广至今累计生产了 2.4 亿 t，为国家节约煤炭约 2000 万 t，平均节煤率达 5%～10%，取得了较好的经济效益和社会效益。

上海市燃料总公司自 1979 年开展动力配煤工作，经过 20 年的艰苦努力和不断发展，现有配煤生产线 12 条，配煤能力已达 1200 万 t/a，目前年加工配煤 300 多万 t，每年为用户配送煤炭 200 多万 t，占配煤加工量的 70%。根据不同用户对煤炭燃烧特性的不同要求，研制开发出沪燃一号、二号、三号配煤品种并进行了商标注册。已经初步建立起动力配煤生产、销售、服务网络，使煤炭配送基本覆盖全市，扩大了市场销售，提高了市场占有率，发挥了燃料流通企业主渠道作用。

无锡市燃料公司为全市 150 家生产企业用煤实行配送，配送量从 1992 年的 16 万 t 增加到 1996 年的 42 万 t，并对其中 60 家生产企业实行零库存配送，配送量发展到 25 万 t。同时，配送品种和服务范围不断延伸，从单一品种向多品种配送，由对国有大中型市属企业配送向‘三资’企业、中央直供企业、乡镇企业扩展。通过开展煤炭配送使市场占有率达 65%，新增销售收入 13641 万元，利税 413 万元，创利 251 万元，壮大了企业的实力。

天津市煤建总公司现已建成 9 条动力配煤生产线.形成年产配煤 271 万 t 生产能力，已累计向工业企业供应配煤 3000 万 t，取得了较好的经济效益，通过逐步完善配送设施，按照用户要求。保质保量定时送货上门，获得了生产企业的好评。

北京市煤炭 1～4 厂也都建立了动力配煤生产线，如曾利用北京无烟煤和兴隆矿气煤及蔚县不粘煤等配煤以供应中小型工业锅炉和窑炉。

此外，在 80 年代中期，沈阳、长春、南京、杭州、青岛、济南、潍坊、绍兴等许多中小城市也都建立了动力配煤生产线。生产不同热值的配煤，供应当地及附近的工业锅炉、窑炉及小型电厂使用。

二、动力配煤发展前景

我国的能源生产和消费主要以煤炭为主，煤炭生产和消费占一次能源生产和消费的 75%左右。1996 年全社会煤炭生产和消费分别达到 13.74 亿 t 和 15.10 亿 t。煤炭提供了 75%的工业燃料和动力、76%的发电能源、80%的民用商品能源及 60%的化工原料。目前我国煤炭应用主要以原煤直接燃烧为主，全国现有工业锅炉约 50 万台，年耗煤约占全国煤炭消费量的三分之一，原煤散烧时设备热效率只有 65%，每年造成的煤炭浪费达 3000 多万 t，燃煤排放的烟尘和二氧化硫等有害气体严重污染着环境。为此，国家对使用煤炭的环保问题非常重视，采取一系列措施，从法律、法规、政策、计划、资金等方面帮助扶持煤炭节约和节能技术的推广应用。

发展动力配煤是推广、使用洁净煤技术酌基础，同时各地燃料流通企业经过多年的实践，动力配煤生产技术已日趋成熟，可根据燃煤设备的不同特性开发生产系列品种的配煤产品，因此在我国发展动力配煤前景是广阔的。

第四节　国内电力系统动力配煤发展概况

近年来我国发电用煤量在 5 亿 t/a 左右，如全国燃煤电厂 1997 年和 1996 年的发电用煤量分别为 5.23 亿 t 和 5.22 亿 t，其中装机容量在 1GW 以上的大型火电厂的年用煤量达 3.5 亿 t 左右。1997 年全国发电用煤的平均 $Q_{net,ar}$ 为 21.32MJ/kg，平均含硫量约 1.04%。以煤为燃料的火力发电厂的装机容量普遍增大，到 1997 年末的统计，全国发电装机容量为 250GW，其中正在运行的火电装机容量在 1GW 以上的燃煤电厂达 36 座（其中有 4 座电厂为煤、油共用），至于装机容量在 300MW 以上的数量更多，装机容量在 1GW 以上正在建设的燃煤电厂也达 35 座之多。

目前正在运转的大型电厂中以深圳沙角 C 电厂、镇江谏壁电厂和唐山陡河电厂的装机容量最大，分别达 1.98GW，1.625GW 和 1.55GW，这 3 个电厂的年用煤量分别达 600 万 t、500 万 t 和 450 万 t 左右。正在扩建的宁波北仑港电厂、山东邹县电厂和元宝山电厂

全部建成的装机容量将分别高至 3GW、2.4GW 和 2.1GW，它们的年用煤量更分别高至 900 万 t、720 万 t 和 630 万 t 左右。鉴于这些特大型电厂及大型电厂的年用煤量过大，不仅单一矿井的煤炭数量很难满足它们的要求，而且有的煤炭质量如硫分、挥发分和灰熔融性等主要煤质指标也难以达到发电用煤粉锅炉机组设计的要求。如谏壁电厂原设计用淮北沈庄气煤及平顶山局的混煤，由于该厂用煤量大，所以实际供煤矿点十分分散，有华东区的徐州、淮北煤，中南区的平顶山、义马煤及陕西的铜川煤，还有华北区、山西省的一些混煤和洗混煤。所用煤种十分复杂，有的是硫高（如铜川煤），有的是灰高（如洗混煤），灰熔融性温度和哈氏可磨性指数等也都相差很远。只有采用配煤燃烧才能达到原电厂锅炉设计的要求。由于场地及没备等因素的制约，在配煤时并不十分严格地按各种煤占一定配比来掺配，而是按热值、灰分及挥发分和灰熔融性、硫分等指标的不同而分成 3～4 堆煤。根据运行时需要随时调整几种煤的配比。清河电厂原设计用铁法长焰煤及西山局的贫瘦煤配烧，实际所用的煤种除铁法和西山煤以外，还有黑龙江省的七台河、鹤岗及鸡西等 10 余个种煤。所以也只有采用配煤燃烧。宁波北仑港电厂以澳大利亚、俄罗斯和南非等国的低硫、低灰进口煤为主，再配烧兖州优质煤。此外，上海闵行电厂原设计用淮北烟煤，实际用的是内蒙古海勃湾的高硫煤、河南平顶山煤及雁北地方煤，所用煤种也很复杂。总之，除少数装机容量不大的电厂原设计煤种与供煤煤种相符可采用单种煤燃烧外，一般都不同程度地采用配煤燃烧，但大多数电厂不可能采用十分严格的配煤方案进行配煤燃烧，一般是根据当时各地来煤的矿点多少及各矿进煤的数量和质量等情情况，经过测算而采用不十分精确的配煤燃烧。电厂通过配煤燃炔，燃煤的质量基本达到了设计煤种的要求。取得了节能的目的，同时还解决了着火困难、锅炉运行不稳定、燃尽率低、灭火放电、积灰结渣、超温爆管、调峰能力差和检修频繁等一系列问题。此外，电厂通过配煤燃烧，还充分利用了一些高硫煤资源，使其 SO_2 的排放量达到环保的要求。

兹以日用煤量在 1 万 t 左右的黑龙江省某电厂为例。该厂用煤的质量指标如表 7－2－6 所示。

表 7－2－6　燃煤煤质分析结果

粒度(mm)	A_d(%)	V_{daf}(%)	M_t(%)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	ST(C)
＜13	≤24	≥27	≤6	≤1	17.325	＞1350

该厂用煤分别由表 7－2－7 中的 4 个矿井供应。为了配煤的成本价最低，质量又符合锅炉设计的要求，就需要利用线性规划原理进行优化计算。具体计算方法如下：

表 7－2－7　鸡西发电厂可以选购的煤炭数、质量指标及价格

指　　标	1 号矿井	2 号矿井	3 号矿井	4 号矿井
产量(t/d)	8000	6000	4000	1000
煤价(元/t)	75.5	81.0	65.0	71.0
A_d(%)	23.0	22.0	25.0	23.0
M_t(%)	5.0	7.0	5.0	7.0
V_{daf}(%)	26.04	30.20	25.0	35.0
$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	16.72	18.81	16.63	17.02
$S_{t,d}$(%)	0.7	0.9	1.0	1.4
ST(C)	1360	1400	1355	1390
粒度(mm)	13～0	13～0	13～0	13～0

设每日应购各矿井的煤炭数量分别为 X_1、X_2、X_3 和 X_4，则配煤成本最低的数学模型为：

$$P_{\min} = \sum_{i=1}^{4} C_i X_i = 75.5X_1 + 81.0X_2 + 65.0X_3 + 71.0X_4$$

其中，$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 10000$，则：

$$\frac{23}{100}X_1 + \frac{22}{100}X_2 + \frac{25}{100}X_3 + \frac{23}{100}X_4 \leqslant \frac{24}{100} \times 10000$$

$$\frac{5}{100}X_1 + \frac{7}{100}X_2 + \frac{5}{100}X_3 + \frac{7}{100}X_4 \leqslant \frac{6}{100} \times 10000$$

$$\frac{26.04}{100}X_1 + \frac{30.20}{100}X_2 + \frac{25.00}{100}X_3 + \frac{35.00}{100}X_4 \leqslant \frac{27}{100} \times 10000$$

$$16.72X_1 + 18.81X_2 + 16.63X_3 + 17.02X_4 \geqslant 17.33 \times 10000$$

$$\frac{0.7}{100}X_1 + \frac{0.9}{100}X_2 + \frac{1.0}{100}X_3 + \frac{1.4}{100}X_4 \leqslant \frac{1}{100} \times 10000$$

得到 $X_1 \leqslant 8000$；$X_2 \leqslant 6000$；$X_3 \leqslant 4000$；$X_4 \leqslant 1000$。

因 4 个矿井煤炭产品的灰熔融性温度和粒度均在要求范围内，故可取消灰熔融性温度和粒度的约束。

利用计算机求解上述线性规划，得到该电厂每日所用各矿井的煤炭数量：1 号矿井为

2829t/d；2 号矿井为 3052t/d；3 号矿井为 4000t/d；4 号矿井为 119t/d。

购买燃料煤的最低成本是 72.93 万元/d，即 72.93 元/t。

此外，也有一些电厂采购的就是配煤，如广东、广西的一些中、小型电厂就与株洲选煤厂配煤场订购符合电厂设计要求的配煤。株洲配煤场年供株洲电厂配煤 100 万 t，供汕头热电厂及广西电力公司的配煤分别为 43 万 t 和 25 万 t。广西合山电厂年用煤约 300 万 t，今后也计划使用合山矿务局生产的动力配煤。湛江电厂还从山西进配煤燃烧。最近的调研结果看出，大型电厂由于进煤矿点多、煤种杂，普遍是自己配煤燃烧，各种煤的配比并不十分严格；而中小型电厂除烧单种煤外，也可以购入配煤燃烧。总的来看，全国约有 80%以上的电厂都在配煤燃烧。且今后电力系统以发展大容量的发电机组为主，各厂的年用煤量普遍在几百万吨以上，因而配煤燃烧的比例也将不断增加。

第五节　动力配煤综合效益评述

中国的动力配煤发展已有 20 年的历史，全国已建成 250 余条配煤生产线，年产配煤约 2000 万 t，经济效益、社会效益和环境效益是有目共睹的。由上海市燃料总公司和上海市环保局等单位共同起草，由上海市技术监督局发布，于 1999 年制订了地方性的“工业锅炉动力配煤”技术标准。国外的动力配煤以电厂为主，经济效益和环境效益也十分明显。根据美国及西方国家的一些燃煤电厂统计，采用配煤燃烧后平均每年均可节约资金 200～300 万美元左右。

一、动力配煤总的经济效益

动力配煤的最大经济效益不仅是可以充分利用当地低热值煤资源，节约燃料费用，而且电厂煤粉锅炉和工业锅炉、窑炉采用动力配煤后供煤质量稳定且符合设计要求，燃烧时可提高锅炉热效率，使煤炭充分燃烧。这是由于采用科学配煤后，往往是其中的年轻煤在锅炉内首先燃烧，接着是中等变质程度煤的燃烧，高变质煤燃烧时间较晚，这样就能延长配煤的燃烧持续时间，燃煤热值得到充分吸收。单煤（尤其是年轻煤）燃烧时，往往在较短或很短时间内燃烧完全（北京市的一些工业锅炉实践表明，大同弱粘煤就比神府不粘煤明显耐烧而省煤），热值不能得到完全吸收，而且由灰渣带出的显热也多，煤的热能利用率就低。对高变质的单煤来说，由于着火困难，如同时灰分又高、灰熔融性温度

又低，就很难燃烧完全，灰渣含碳量增高，有的还需喷油助燃而提高了成本。如天津市经委对 49 家工厂的调查表明，燃烧配煤的炉渣含碳量平均降低 6% ~ 10%，燃用配煤可节煤 5% ~ 8%左右。生产配煤企业的吨煤纯利可达 5 ~ 10 元/t 以上。如某电厂用煤的发热量 $Q_{net,ar}$ 为 20.91MJ/kg 左右，使用单煤时的进价约 180 元/t，而用配煤时的价格仅 170 元/t，可降低 10 元/t 左右。

二、动力配煤的环境效益

动力配煤的环境效益也十分明显。某些硫分在 2.0%以上的动力煤单独燃烧时，SO_2 排放的浓度较高，不仅严重污染大气，破坏生态平衡，而且还腐蚀锅炉炉体和管线，缩短锅炉整体使用寿命，这种煤与硫分低于 0.5%的低硫煤相配后，配煤硫分降至 1%以下甚至 0.8%以下，燃煤的 SO_2 排放总量及废气中的 SO_2 浓度能达到环保要求。国家煤炭工业局于 1999 年 4 月已报国家经贸委审批，规划总投资 16.55 亿元，并要求国家贴息贷款 50%、拨款 20%，拟于 1999 ~ 2005 年期间准备在西南及中南地区对硫分在 2%以上的矿区筹建 37 个动力配煤场，计划采用外来低硫煤与本地高硫煤相配，年生产配煤 3475 万 t，以解决高硫煤矿井的出路问题。既减少了对大气的污染又延长了锅炉的使用寿命。同时又解决了高硫煤矿井的出路问题。电厂及工业锅炉对燃煤的热值一般要求在 20.91 ~ 23.00MJ/kg 过去单煤燃烧时，大同、鹤壁、潞安等一些 $Q_{net,ar}$ 大于 25.09 ~ 28.43MJ/kg 的特高热值煤的热能在燃烧时不能得到充分利用，不仅浪费了资源而且还会缩短锅炉寿命，甚至烧坏锅炉造成停产事故。当这些特高热值煤与低热值煤合理配煤时，既充分利用了低热值煤资源，又可减少高热值煤的用量。对低热值煤来说，灰分往往较高，有的挥发分又低，用这些煤单独燃烧时就很难得到充分燃烧，排出的炉渣含碳量有的可达 30% ~ 40%以上，损失了大量的热能。通过高、低热值煤的科学配方，节约了高热值煤资源，低热值煤的热能也得到充分利用，可提高锅炉的热效率和热利用率。同时减少污染物的排放量。

三、利用不同单煤的热值价格比配煤可取得最大经济效益

低热值煤的单位热值到场价(元/MJ)普遍低于高热值煤，低挥发分的无烟煤和贫煤的价格同样也低于中、高挥发分的煤，如株洲、杭州和上海等配煤场都是低热值煤和无烟煤的单位热值进场价最低。以株洲选煤厂动力配煤场为例，本厂洗中煤的价格最低，A_d 为 71.50%，低位发热量 $Q_{net,ar}$ 6.70MJ/kg，进场价为 5.99 元/MJ 煤泥的 M_t 为 26.51%、A_d 34.65%、$Q_{net,ar}$ 15.32MJ/kg，进场价为 6.68 元/MJ 攸县无烟煤的 A_d 为 21.76%、$Q_{net,ar}$

23.00MJ/kg，进场价为 6.96 元/MJ；而平顶山 1/3 焦煤的 A_d 为 26.41%、$Q_{net,ar}$ 为 22.06MJ/kg，但进场价高至 12.01 元/MJ，是低质煤的一倍；宜洛矿焦煤的 A_d 为 27.98%、$Q_{net,ar}$ 为 22.20MJ/kg，进场价也高至 10.99 元/MJ。杭州动力配煤场的配煤售价基本与原煤相同的主要原因之一就是在配煤中配入了不少于 35% 的低价无烟煤。所以，在质量符合用户需要时低热值煤或低挥发分煤的配比越多，其成本也就越低，经济效益也越好。在配煤生产中，一般高热值优质煤的配比以不超过 40% 为宜，最好能控制在 30% ~ 35%，低质煤的配比最好在 40% 左右，最低不低于 30%，否则配煤经济效益就差，中热值煤一般也可控制在 1/3 左右。从企业经济效益考虑，较理想的配比是优质煤占 30%、中质煤占 30%、低质煤占 40%。对配煤场来说，以生产配煤发热量较低的产品（如 $Q_{net,ar}$ 为 20.07 ~ 20.91MJ/kg）的利润相对最大，配煤的最高发热量一般以不超过 23.00MJ/kg 左右为宜。否则，如生产 $Q_{net,ar}$ 大于 24.25MJ/kg 的配煤，配煤场不仅无利润可言，而且很有可能亏本。总之，生产配煤的热值以 20.07 ~ 23.00MJ/kg 左右为宜。

四、合理配煤的综合效益

对我国西部地区和内蒙古、山西等省区的一些生产高热值、低灰、低硫的侏罗纪动力煤矿井，灰中 CaO 和 Fe_2O_3 含量高，灰熔融特征温度（ST 和 FT）低，在燃烧时容易结渣和沾污，影响锅炉和气化炉的正常运转，有时甚至发生锅炉爆炸事故。如将其与高灰熔融性煤配煤后，可解决结渣和沾污问题，成为真正的优质动力用煤.可进一步为出口和内销扩大销路。

对于单种动力煤来说，即使灰分和硫分很低，发热量和灰熔融性温度都很高，但不可能所有煤质指标都能达到电厂用煤和工业锅炉及窑炉的需要。如工业锅炉要求 V_{daf} 在 20% 以上，水泥回转窑烧成用煤更要求 V_{daf} 大于 25%，而我国不少大型优质动力煤矿区（如鹤壁、郑州、潞安和西山等）动力煤的其他指标都十分理想，唯一的不足是 V_{daf} 均在 12% ~ 18% 左右，通过与大同、黄陵或义马等特大型矿区的高挥发分煤配煤后就成为较理想的动力用煤，同时解决了这些矿区煤的硫分稍高（$S_{t,d}$ 小于或等于 1.5%）和灰熔融性温度较低的缺点，还改善了配煤的可磨性指数。

对东北及华北地区的一些低硫（$S_{t,d}$ 小于 0.50%）、高灰分动力煤，其热值多在 16.73 ~ 18.82MJ/kg，这种低热值煤也不符合电厂和工业锅炉、窑炉使用 如通过与大同等硫分在 1.5% 左右、$Q_{net,ar}$ 在 25.09MJ/kg 以上的高热值煤配煤后，热值提高到 20.91MJ/kg 以上，硫分低至 1% 以下，即达到了 2 种煤的优势互补而成为合格的动力配煤。

某些洗选后的低灰动力用煤，由于硫分仍在 1% 以上（如平朔煤），还有的灰熔融性温

度太低(如大柳塔煤),或是低挥发分煤,而这些洗煤产品都达不到优质动力煤的标准。通过合理的配煤,这些选煤可全部成为优质动力用煤。如平朔选煤与大柳塔选煤相配,配煤的硫分和灰熔融性温度都能达到出口、发电煤粉锅炉和工业锅炉及窑炉的要求。对某些要求挥发分不超过30%的用煤企业来说,只要把平朔、大柳塔和潞安王庄矿3种选煤按一定比例配煤,可使配煤的各种煤质指标全部达到用户的要求。

总之,动力配煤决不是一种权宜之计,只要在满足用户需要的前提下,采用因地制宜、因煤制宜的方法生产动力配煤,不仅能达到节约能源,减少SO_2和TSP(固体悬浮微粒)排放量的目的,取得良好环境效益,对配煤企业和用户来说还可取得较好的经济效益。

第三章　动力配煤的基本原理

第一节　线性可加性定义、性质及可加性的数学验证方法

一、定义

任意给定 n 种煤，它们按 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 的比例混合后得到配煤 P，对于煤化参数 A，如果有

$$A_1 \times X_1 + A_2 \times X_2 + \cdots + A_n \times X_n = A_p \qquad (7-3-1)$$

$$X_1 + X_2 + \cdots + X_n = 1 \qquad (7-3-2)$$

式中　$A_1, A_2, \cdots, A_n$ —— 各煤煤化参数 A 的指标；

$X_1, X_2, \cdots, X_n$ —— 各煤的配煤比例。

则煤化参数 A 具有线性可加性。

二、性质

(1) 如果煤化参数 A 具有线性可加性，则任意不等于零的常数 C 与它的乘积 $C \times A$ 也是具有线性可加性。

(2) 如果煤化参数 A、B 具有线性可加性，那么 A、B 的线性组合后得到的煤化参数 C($C = a \times A + b \times B + c$，$a$、$b$、$c$ 为常数)，也具有线性可加性。

该性质证明如下：

设两种煤配煤的比例分别为 x、$1-x$，对应的煤化指标 A、B、C 分别为 A_{11}、A_{12}、B_{11}、B_{12}、C_{11}、C_{12}，并且指标 C 与 A、B 的关系为

$$C = a \times A + b \times B + c \tag{7-3-3}$$

根据 A、B、C 的关系式有

$$C_{11} = a \times A_1 + b \times B_1 + c$$

$$C_{12} = a \times A_2 + b \times B_2 + c$$

因为 A、B 具有线性可加性，所以当两种煤按比例 x、$1-x$ 混合后，混煤 A、B 的量分别为 $x \times A_{11} + (1-x) \times A_{12}$、$x \times B_{11} + (1-x) \times B_{12}$；又根据指标 C 与 A、B 的关系式可得

$$\begin{aligned} C = {} & a \times [x \times A_{11} + (1-x) \times A_{12}] + b \times \\ & [x \times B_{11} + (1-x) \times B_{12}] + c = \\ & x(a \times A_1 + b \times B_1 + c) + (1-x) \times \\ & (a \times A_2 + b \times B_2 + c) = \\ & x \times C_{11} + (1-x) \times C_{12} \end{aligned}$$

所以指标 C 也具有线性可加性。

(3) 如果煤化参数 A、B 具有线性可加性，那么 A、B 的非线性组合后得到的煤化参数 C，一般不具有线性可加性。

举例说明，煤 A 的分析基灰分是 12%，分析基水分是 4%；B 分析基灰分是 16%，分析基水分是 10%，由煤的煤干基灰分和分析基灰分的关系式

$$C = \frac{A}{1-B} \tag{7-3-4}$$

式中　A —— 灰分的分析基数量；

B —— 分析基水分；

C —— 灰分的干基数量。

可知煤 A、B 的干基灰分分别是

$$A_{daf} = \frac{12}{1-0.04} = 12.5$$

$$B_{daf} = \frac{16}{1-0.10} = 17.78$$

设配煤比例各为 50%，并且已知分析基灰分具有线性可加性，那么配煤 C 的分析基水分是

$$0.5 \times 4\% + 0.5 \times 10\% = 7\%$$

分析基灰分是

$$0.5 \times 12\% + 0.5 \times 16\% = 14\%$$

C 的干基灰分是

$$C_{daf} = \frac{14}{1 - 0.07} = 15.5\%$$

而按干基灰分具有线性可加性来计算 C 的干基灰分是

$$C'_{daf} = 0.5 \times 12.5\% + 0.5 \times 17.78\% = 15.14\%$$

显然 C'_{daf}、C_{daf}两者不等，也就是干基灰分不具有线性可加性。

三、煤质指标可加性试验验证的数学原理

(一)随机变量分析法

当配煤的指标具有线性可加性时，配煤的煤质指标理论计算值 Y 与其实际测试值 Y_s 应该相等

$$Y = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \qquad (7-3-5)$$

式中　Y — 配煤指标的计算值；

y_i —— 第 i 种煤的煤样指标；

x_i —— 第 i 种煤的配煤比例。

但由于实验误差，理论计算值 Y 与实际测试值 Y_s 配煤指标的它们之间会有差值 δ

$$\delta = Y_s - Y \qquad (7-3-6)$$

因为 δ 是由实验误差引起，故 δ 是正态分布的随机变量，其期望值 $E\delta = 0$，方差为 σ(σ 与具体的煤质指标和实验条件有关)。

如果检验出 δ 是正态分布的随机变量，且其数学期望值 $E\delta = 0$，方差 σ 小于许可值，就可以认为 δ 是由实验误差引起，也就是说该煤质指标具有可加性。

(二) 利用线性回归分析法

如果配煤指标具有线性可加性，则其理论指标和实验指标之间应该有良好的线性关系。设两者的回归方程为 $Y = A \times X + B$，如果回归方程的相关系数大于一定的要求值(可要求为 0.99)，B 小于一定的值 δ_1，并且对 Y 值的预测标准差 δ_e 小于一定的值 δ_2，就可以认为该配煤指标具有线性可加性。

如果某一指标通过上述两种方法的验证，就可比较有把握地认为该指标具有线性可加性。

第二节　动力配煤的主要指标

配煤是将几种质量不同的煤炭以物理方法混合，从而改变配煤质量的方法。研究配煤的基础就是要分析与燃烧有关的煤炭的主要性质在配煤中的变化规律。锅炉对煤炭的主要要求指标有水分、灰分、挥发分、固定碳、发热量、灰融点等。

一、煤的水分

煤中都含有一定量的水分，它是煤中的无机成分。煤中的水有自由水分、湿存水分、结晶水分三种不同的存在状态，并具有不同的物理化学性质。自由水分是指附着在煤粒表面的水分，湿存水分是指存在于煤的小毛细管中的水分，这两种水分以机械方式和物理化学方式（附着、吸附）与煤结合，通常称为游离水。这些游离水分在 105℃～110℃的温度下，经过一定时间的蒸发即可全部脱除。游离水分的多少在一定程度上能表征煤炭的煤化程度的深浅，随着煤的变质程度不同，水分的变化很大。泥炭中水分最大，可达 40%～50%，褐煤次之，约在 10%～40%，烟煤含量较低，无烟煤则又有增高的趋势，这是由于煤中的水分除与煤的变质程度有关外，还与煤的结构有关，因此水分也是决定煤质优劣的重要参数之一，结晶水分是以化学方式结合的水，在严格的高温下才能除去，煤中该水分含量不大。吸附或凝聚在有机质颗粒内部毛孔中的水分称为煤的内在水分；附着在煤粒表面的水分称为外在水分。内在水分比外在水分较难除去，内在水分只有在外在水分除去相当一部分后才会缓慢向外逸散，且在室温下几乎不可能全部除去。

根据煤样状态，煤的水分测定可分为应用煤样水分（M_t）及分析煤样水分（M_{ad}）。应用煤样水分是指即将应用的煤的全水分，它包括内水和外水。

由于工业分析中的外在水分和内在水分的煤样基准不同，所以全水分的测值必须通过下列公式计算，即

$$M_t = \frac{M_{fz} + M_{inh} \times (100 - M_{fz})}{100} \tag{7-3-7}$$

式中　M_t——煤样的全水分，%；

M_{fz}——煤样的外在水分，%；

M_{inh}——煤样的内在水分，%。

煤中水分高，运输时会增加运力 炼焦时消耗热量，延长炼焦时间 燃烧时降低发热量，每增加 1% 的水分，降低发热量的 0.1%，从而增加了煤耗。煤中的水分还会给破碎、筛分造成很大困难，降低效率，损坏设备。但煤中有一定的水分可防止煤运输过程中粉煤的损失，改善炉膛的热辐射效能。

二、灰分

煤的灰分是指煤中所有的可燃物完全燃烧，煤中矿物质在一定温度下产生一系列分解、化合等复杂反应后剩下的残渣。这些反应包括硫化矿物的氧化、碳酸盐的分解和粘土类矿物脱去结晶水等。上述反应的生成物组分常由煤的灰化条件及煤中各种矿物质的含量决定。煤的灰分绝大部分是煤中矿物质燃烧时生成的无机氧化物和盐类。无机氧化物主要有 SiO_2、Al_2O_3、CaO、MgO、Fe_2O_3 等，占灰成分的 95% 以上。煤中矿物质极其复杂，故煤经完全燃烧后，煤灰成分也变得复杂，不同煤灰分产率变化很大，不同煤质所转化的煤灰特性也不相同。根据煤灰成分可以大致推测原煤的矿物组成，初步判断煤灰融点的高低，还可大致判断锅炉燃烧室的腐蚀情况。

煤灰的特性会直接影响煤的利用，灰分愈高，煤中矿物质含量就越多，煤炭运输的效率就越低。灰分反映煤中矿物质的数量和成分，对燃烧过程产生不良影响。除矿物质可能产生的催化作用外，它的存在都起着负面影响。主要表现在以下几个方面。灰分高，不仅使煤的热值降低，增加热能的消耗，还会由于灰的结渣而引起操作困难，使锅炉出力和煤的燃烧效率降低，严重时可能会引起熄炉、停电事故。煤的灰分高也使煤的破碎难度加大。燃烧高灰分的煤会增加飞灰和灰渣的热损失，降低燃烧效率和锅炉热效率。此外，燃煤的灰分高，粉煤灰和灰渣的排放量增大。粉煤灰和灰渣量影响烟囱排放及占地，微尘及微量有害元素对大气的污染，以及灰渣有害元素的积聚对水质的污染。1993 年我国排放的灰渣总量为 8602 万吨，2000 年已达到 1.5 亿多吨 煤中 As、F、Pb、Hg、Cd、Cl 等有害元素在燃烧过程中向大气排放，以及灰渣造成的环境污染在局部地区已经非常严重，已引起有关部门的重视，例如西南个别地区燃煤引起的 F、As 中毒 北方某地燃煤的 Cr 异常等等。

三、挥发分

煤样在高温隔绝空气的条件下，经过一定时间的加热，煤中有机质受热分解出一部分分子量较小的液态（此时为蒸气状态）和气态产物，这些产物称为挥发物。挥发物占煤

样重量的百分数称为挥发分产率或简称为挥发分，一般以符号 V 表示。挥发分是煤炭分类的主要指标，根据挥发分可以大致判断煤的变质程度。挥发分愈低，则煤的变质程度愈高。我国测定挥发分是在隔绝空气的条件下(900℃)，将 1 克煤样在带盖的坩锅中加热 7 分钟，煤样失重占煤样重量的百分数减去分析煤样水分，以符号 V_{ad} 表示，计算公式为

$$V_{ad} = \frac{G - G_1}{G \times 100 - M_{ad}} \tag{7-3-8}$$

式中　V_{ad} ——分析煤样挥发分，% ；

G ——分析煤样的重量，% ；

G_1 ——焦渣的重量，% ；

M_{ad} ——分析煤样的水分，% ；

$G - G_1$ ——分析煤样热分解后失去的重量，g。

挥发分与其焦渣特征和 M_{ad}、A_{ad} 结合，可以计算出各种烟煤的发热量。此外，许多用煤工业以挥发分的大小作为能否使用的依据。如工业锅炉用煤，要求以 V_{daf} 大于或等于 20% 为最低限度 水泥回转窑用煤的标准中规定，V_{daf} 大于 25% 的煤才能使用。发电用煤的 V_{daf} 下限大于 6.5%。不同的锅炉对煤的挥发分要求有所不同，只有当煤的挥发分含量与锅炉设计煤种的挥发分指标一致时，煤才能稳定燃烧，燃烧效率最高，锅炉出力最好 否则，煤的燃烧不稳定，燃烧效率低，锅炉出力差，严重时可能导致锅炉熄火，影响正常生产。合成氨用无烟煤 V_{daf} 应低于 10%，配煤炼焦中以 28% ~ 34% 为最佳。

四、固定碳

固定碳是指除去分析煤样水分、灰分和挥发分后的残留物。它的组成以元素碳为主，固定碳和元素碳两者之间，存在有规律的正比关系。固定碳中仍然有少部分氢、氧、氮、硫等元素。煤中固定碳的高低除了与水分、灰分等杂质多少直接相关外，它还与煤化程度成正比，即煤化程度高，其挥发分低，固定碳高。煤中固定碳的含量根据测定煤的水分、灰分、挥发分后用计算方法求出来的，计算方法为

$$FC_{ad} = 100 - (M_{ad} + A_{ad} + V_{ad}) \tag{7-3-9}$$

式中　FC_{ad} ——分析煤样固定碳的含量，% ；

M_{ad} ——分析煤样的水分，% ；

A_{ad} ——分析煤样的灰分，% ；

V_{ad} ——分析煤样的挥发分，%。

由于煤的发热量与固定碳成正比,因而工业部门常把固定碳作为煤质分析的重要指标。如化肥用煤规定,固定碳必须大于 65%,因为煤的挥发分受热后很快析出,很难得到充分燃烧,而固定碳高的煤则能在锅炉中得到较长时间燃烧,其热利用率高,因此工业锅炉用煤也要考虑其固定碳大小。

五、硫分

硫是煤中的元素组成之一。煤中硫根据其存在状态可分为有机硫和无机硫两大类。有机硫存在于煤的有机质中;无机硫以黄铁矿、白铁矿和硫酸盐的形式存在于煤的矿物质内,其中以黄铁矿和白铁矿形式存在的硫,又称硫化物硫,因硫化物硫和有机硫可燃故称可燃硫;硫酸盐硫又称非可燃硫。煤中各种形态硫的总和称为全硫,以符号 S_t 表示。

硫含量也是评价煤质的重要指标之一。在评价煤中硫含量时,全硫要换算成干燥基,有机硫换算为可燃基,这是由于煤中的硫只存在于有机质和矿物质中,而与分析煤样的水分无关,所以以干燥基表示煤中全硫的含量,其计算公式为

$$S_{t,d} = \frac{100}{(100 - M_{ad}) \cdot S_{t,ad}} \tag{7-3-10}$$

式中　$S_{t,d}$——干燥煤样的全硫含量,%;

$S_{t,ad}$——分析煤样的全硫含量,%;

M_{ad}——分析煤样的水分,%。

硫是存在于煤中的一种有害杂质,对煤的工业利用有不利的影响。动力用煤中的硫在煤燃烧过程中形成 SO_2,不仅腐蚀金属设备,而且还会造成大气污染。SO_2 在大气中形成酸雨,我国的酸雨现象已十分严重,每年因此而造成经济损失达百亿元以上。控制燃煤的含硫量是我国环保的主要措施之一。另外硫铁矿硫的存在,能促进煤的氧化和自燃。

六、发热量

煤的发热量是评价煤质的一项重要指标。根据纯煤的发热量,可以大致推测煤的变质程度以及其他某些煤质特征。收到基低位发热($Q_{net,ar}$)是评价动力用煤质量的主要参数之一。无论是动力煤的计价,或是电站粉煤锅炉和工业锅炉及窑炉的设计制造等都需要煤的发热量数据。煤的发热量有弹筒发热量、高位发热量、低位发热量三种定义。煤的弹筒发热量也称煤的氧弹发热量,它的含义是单位质量的煤样在热量计的弹筒中的过量高压氧气中燃烧后产生的热量(燃烧产物的最终温度规定为 25℃)。由于煤样是在高

压氧气的条件下燃烧的，因此它产生了在空气中燃烧时不能发生的化学热反应，例如煤中的氮（以及充入氧气前在弹筒空气中含有的氮气）在空气中燃烧时，一般以气态氮逸出，而在弹筒中燃烧时却能生成 N_2O_5 或 NO_2 等高价的氮氧化物，这些物质溶于弹筒中的水后即变成硝酸，这一化学反应为放热反应。此外，煤中的可燃硫在空气中燃烧时只生成 SO_2，而在氧弹中却能生成 SO_3，它溶于水生成硫酸。SO_2 生成 SO_3 以及 SO_3 溶于水生成硫酸等都是放热反应，所以煤的氧弹发热量要高于煤在空气中、在工业锅炉中等燃烧时产生的热量。为此，在实用中，必须把氧弹发热量折算成符合于煤在空气中燃烧时产生的热量，即煤的高位发热量。

七、煤灰熔融特性

煤灰熔融特性是煤灰在高温下达到熔融状态的温度，过去习惯上称为灰融点。严格来讲，煤灰是一种多组分的混合物，没有一个固定的融点，而只是一个熔融的温度范围，因此它不是用一个温度点所能表示的，而是在煤灰熔融过程中所呈现的几种物理形态时的温度，国家标准是用 4 个不同形态下的温度表示，即 DT（变形温度）、ST（软化温度）、HT（半球温度）和 FT（流动温度）。在工业上通常以煤灰的软化温度 ST 作为衡量煤灰熔融特性（灰融点）的指标。

煤灰熔融性和煤灰粘度是动力用煤的重要指标。煤的灰熔点大体能说明煤在锅炉中灰渣的熔融结渣特性。不同的锅炉要求不同的灰融点，当锅炉采用液体方式排渣时，要求煤的灰融点必须低于一定的值；当锅炉采用固体排渣时，要求煤的灰融点高于一定的值，否则给排渣带来困难。

八、各指标不同基准间的相互换算

在煤化学分析中，很多指标都是用分析煤样在实验室测定的，其指标是分析基，为了使所得实验结果采用相同的基准，必须换算。通常所用指标基准有煤的含水基，包括应用煤样（M_{ar}）、分析煤样（M_{ad}）、风干煤样（M_{inh}）；干燥基（即无水基）、可燃基（即无水无灰基）。各种基准间的相互换算公式如下：

（1）含水基与干燥基间的相互换算

$$X_d = \frac{X_{ad} \times 100}{100 - M_{ad}} \tag{7-3-11}$$

（2）含水基与可燃基之间的相互换算

$$X_{daf} = \frac{X_{ad} \times 100}{100 - M_{ad} - M_{ad}} \tag{7-3-12}$$

上述两式中 A、M 的基准与相应水分取同样的基准。

(3)干燥基和干燥无灰基间的相互换算

$$X_{daf}=\frac{X_d\times 100}{100-A_d} \tag{7-3-13}$$

(4)含水基本身的换算

$$X_{ar}=\frac{X_{ad}\times(100-M_{ar})}{100-M_{ad}} \tag{7-3-14}$$

以上各式中，X 代表某些煤质指标；ad，d，ar，daf 代表分析基、干燥基、应用基、可燃基；M_{ar}为应用煤样水分(%)。

第三节　煤质指标的可加性

一、灰分

配煤过程是一个物料间相互混合的过程，只有物理变化，没有化学变化。在配煤过程中，水分有可能在配煤过程中受外界环境的变化而蒸发或吸收，随着煤炭在空气中暴露时间的变化而发生氧化，导致煤中的水分、不可燃物质和含硫物质的总量发生变化。配煤的应用基水分受配煤时间和配煤过程等外界影响更大，在配煤过程中配煤的外在水分极易发生变化，因此一般来讲配煤的应用基水分不具有线性可加性，同样配煤的其他指标的应用基指标不具有线性可加性。

但配煤的分析基水分受外界影响较小，如果配煤时间很短，外界环境变化不大，并且忽略配煤过程中煤的轻微氧化等因素，就可认为煤中的灰分、水分和硫分不发生变化。又根据它们的测量方法，从物理化学和煤化学的角度来分析，配煤的分析基水分、灰分、硫分这些指标具有线性可加性。

下面用随即变量法和回归方程法来验证其可加性。

(一)随机变量法

表 7-3-1 为北京煤化所的试验结果。

表 7－3－1　配煤方案和理论灰分、实测灰分计算结果

煤样名称 灰分(%) 配煤方案	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	I	J	计算灰分 X(%)	实测灰分 Y(%)	$\delta = Y - X$
	22.92	25.07	8.66	23.19	16.69	57.1	33.84	25.52	28.5	19.47			
1		40		60							29.94	24.10	0.16
2				80	20						21.89	22.12	0.23
3			50	50							15.93	15.99	0.06
4		15							85		27.99	28.01	0.02
5				50					50		25.85	25.57	－0.27
6				60	40						20.59	20.64	0.05
7					50				50		22.60	22.70	0.11
8	50							50			24.22	24.00	－0.22
9	30		40					30			18.00	17.56	－0.44
10	30			30	40						20.51	20.29	－0.22
11	50				50						19.81	19.56	－0.25
12	30		40				30				20.49	20.52	0.03
13	20	40				40					37.45	37.02	－0.43
14	50					50					40.01	39.89	－0.12
15	50									50	21.20	21.62	0.43
16						50				50	38.29	38.20	－0.08
17							70			30	29.53	29.86	0.33
18						60				40	42.05	41.43	－0.62
19						40			25	35	36.78	36.56	－0.22
20						40			40	20	38.13	37.73	－0.40
21									50	50	23.99	24.17	0.19
22					50					50	18.08	18.44	0. 36
23			40							60	15.15	15.06	－0.09
24		30								70	21.15	21.42	0. 27
25			20			5		75			23.73	23.40	－0.33

注：表中数字表示该煤样在配煤中煤样所占的百分比(%)，空白表示该煤样没参加配煤。

① 对 δ 的统计分析

(ⅰ) δ 的数学平均值

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i \tag{7-3-15}$$

将 $n = 25$ 及 δ_i 代入(7-3-15)式得

$$\bar{\delta} = -0.058$$

(ⅱ) δ 的样本标准差值

$$s = \sqrt{\frac{n\sum_{i=n-1}^{n}\delta_i^2 - \left(\sum_{i=n-1}^{n}\delta_i\right)^2}{n(n-1)}} \tag{7-3-16}$$

将 $n = 25$ 及 δ_i 代入(7-3-16)式得

$$S = 0.28$$

② 对理论值与实际值之差 δ 进行显著性检验

对于 δ 的假设如下：

原假设　$H0:\delta = 0$ 备用假设 $H1:\delta \neq 0$ 根据数理统计的有关定理知

$$U = \frac{\bar{\delta} - \alpha_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \sim N(0,1) \tag{7-3-17}$$

α_0 为原假设检验的值。当总体方差 σ^2 未知，则可用样本方差 S^2 作为 σ^2 的估计量，此时可用公式(7-3-17)来对 $H0$ 作检验。

在本假设检验中，因为不知道样本的方差，用其将样本标准差 S 代替总体方差 σ，结果为

$$U = -1.04$$

$$U = \frac{-0.058 - 0}{\frac{0.28}{\sqrt{25}}} \tag{7-3-18}$$

给定显著性水平 $\alpha = 0.1$，查标准正态分布表，$\alpha_{0.1} = 1.64$

$$|u| < \alpha_{0.1}$$

所以我们不否认原假设，认为 δ 的数学期望值为 0。

③ 对方差 σ 进行显著性检验

对于灰分，以方差 σ 小于国家灰分化验标准的允许误差为原假设。灰分化验允许误差国家标准见表 7-3-2。

表 7 – 3 – 2　灰分测定允许误差

灰　　分(%)	同一实验室	不同实验室
< 15	0.2	0.3
15 ~ 30	0.3	0.5
> 30	0.5	0.7

因为采用煤样的灰分不同,故取中间值,以灰分 15% ~ 30%、相同实验室化验为标准,即 0.3。因此对于灰分方差 σ,假设如下:

原假设　$H0:\sigma^2 \leqslant 0.3$ 备用假设 $H1:\sigma^2 > 0.3$ 根据数理统计的有关定理知,统计量

$$\frac{nS^2}{\sigma^2} = \chi^2_{(n-1)} \tag{7 – 3 – 19}$$

将各数据值代入(7 – 3 – 19) 式得

$$\chi^2_{(25-1)} = \frac{25 \times 0.28^2}{0.3^2} = 21.8$$

给定显著性水平 $\alpha = 0.1$,其自由度为 $n - 1 = 24$,查 χ^2 – 分布临界值表得 因为 $21.8 < 33.196$,所以不否定原假设,认为 $\sigma^2 \leqslant 0.3$

$$\chi^2_{(25-1)}(0.1) = 33.196$$

根据以上的计算和分析,可以得出灰分的理论值与实际测试值之差是由实验误差引起的结论,因此可以认为分析基灰分具有线性可加性。

(二) 回归方程法

利用最小二乘法计算回归方程 $Y = A \times X + B$ 的系数 A、B 有

$$Y = 0.9843X + 0.0064$$

$$R = 0.9995$$

误差

$$\delta_e = 0.255$$

回归方程见图 7 – 3 – 1。

二、水分和硫分

利用随机变量法,对配煤的水分、硫分的线性可加性进行实验验证和数学分析。实验数据来自于株洲选煤厂的配煤实验。水分、硫分的具体实验数据见表 7 – 3 – 3,各实验数据的统计和分析结果见表 7 – 3 – 4,回归方程曲线见图 7 – 3 – 2。再利用回归分析法

对水分、硫分的线性可加性进行验证分析，分析结果见表 7－3－5，回归方程曲线见图 7－3－4。

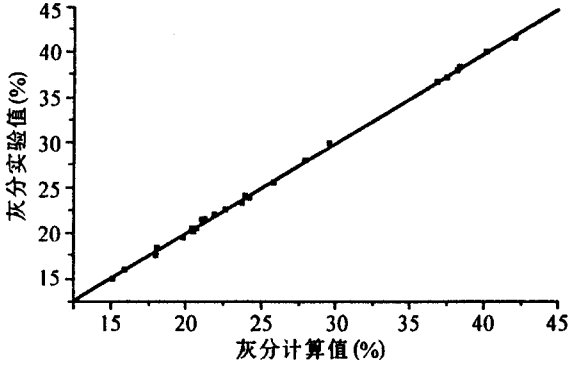


图 7－3－1　灰分计算值与实验值关系曲线

表 7－3－3　水分、硫分实验值与计算值对比结果表

实验编号	水　分（%）			硫　分（%）		
	计算值	实验值	差额	计算值	实验值	差额
1	1.42	1.32	－0.10	1.65	1.67	0.02
2	1.24	1.32	0.08	0.58	0.52	－0.06
3	0.99	1.08	0.10	0.42	0.40	－0.02
4	1.24	1.21	－0.03	0.72	0.66	－0.06
5	1.09	1.24	0.16	0.30	0.29	－0.01
6	1.42	1.46	0.04	0.78	0.81	0.03
7	1.54	1.54	0.01	0.81	0.84	0.03
8	4.49	4.48	－0.01	0.13	0.09	－0.04
9	3.06	3.08	0.02	0.26	0.25	－0.01
10	3.04	3.07	0.03	0.71	0.73	0.02
11	4.21	4.22	0.01	0.77	0.78	0.02
12	2.52	2.61	0.09	0.63	0.66	0.03
13	2.32	2.20	－0.12	1.57	1.62	0.05
14	3.54	3.66	0.12	0.21	0.22	0.02

实验编号	水　　分（%）			硫　　分（%）		
	计算值	实验值	差额	计算值	实验值	差额
15	3.75	3.90	0.15	0.17	0.19	0.02
16	0.83	0.82	-0.01	0.25	0.20	-0.05
17	0.82	0.92	0.10	1.01	1.05	0.04
18	0.79	0.92	0.13	0.25	0.25	0.00
19	0.89	0.94	0.05	0.24	0.24	0.00
20	0.90	1.05	0.15	0.24	0.26	0.02
21	1.08	1.08	0.01	0.22	0.22	0.01
22	1.50	1.29	-0.21	0.81	0.85	0.04
23	0.99	1.04	0.05	0.31	0.29	-0.02
24	1.31	1.18	-0.13	1.22	1.20	-0.02
25	2.14	2.22	0.08	0.20	0.18	-0.02

表 7-3-4　随机变量法验证水分、灰分、硫分可加性结果表

煤质指标	水分	硫分	灰分
样本个数 n	25	25	25
δ 标准方差	0.094	0.023	0.28
U	1.61	0.39	-1.04
$\alpha_{0.1}$	1.64	1.64	1.64
假设 $\delta = 0(U < \alpha_{0.1})$	成立	成立	成立
国标允许误差 σ	0.2	0.1	0.3
χ^2_{n-1}	5.51	2.38	21.73
$\chi^2_{n-1}(0.1)$	33.196	33.196	33.196
$\chi^2_{n-1} \leqslant \chi^2_{n-1}(0.1)$	小于	小于	小于
该指标是否有可加性	有	有	有

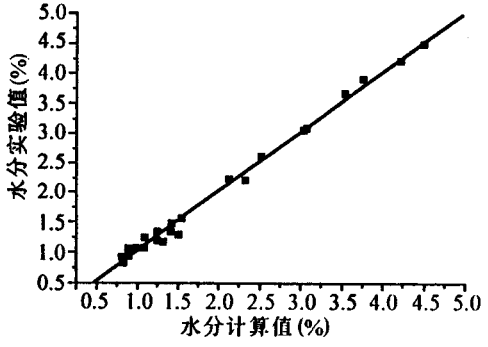


图 7－3－2　水分计算值与实验值关系曲线

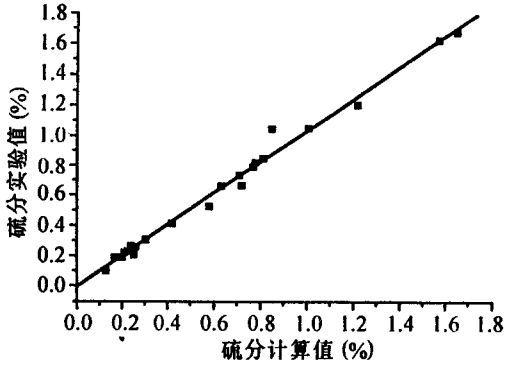


图 7－3－3　硫分计算值与实验值关系曲线

表 7－3－5　回归分析法验证水分、灰分、硫分可加性结果表

煤质指标	水分	硫分	灰分
样本个数 n	25	25	25
方程 $Y = A \times X + B$ 中的 A	1.000 4	1.029 3	0.984 3
方程 $Y = A \times X + B$ 中的 B	0.017	0.013 6	0.006 4
相关性系数 R	0.9934	0.996	0.999
$R > 0.99$	大于	大于	大于
对 Y 值的预测标准差 δ_e	0.096	0.03	0.25
国标允许误差 σ	0.2	0.1	0.3
$\lvert B \rvert \leqslant \sigma$	小于	小于	小于
$\delta_e \leqslant \sigma$	小于	小于	小于
该指标是否有可加性	有	有	有

三、挥发分

根据挥发分测试国家标准，煤的分析基挥发分 V_{ad} 按下式计算

$$V_{ad} = \frac{G_1}{G} \times 100 - M_a \tag{7-3-20}$$

式中　G_1 ——分析煤样加热后的失去的重量，g；

G ——分析煤样的重量，g；

M_{ad} ——分析煤样的水分，%。

从上式可以看出，M_{ad} 的大小主要取决于分析煤样加热后的减量 G_1，即煤加热热解时气体和液体逸出的量。

任意给定两种煤 m、n，m 煤和 n 煤相配得到混煤 p，m 煤和 n 煤的配比分别为 a 和 $1-a$，设 m、n、p 煤的重量都等于 G，加热后的减量分别为 $G_{1,m}$、$G_{1,n}$、$G_{1,p}$，则

$$V_{ad,m} = \frac{G_{1,m}}{G} \times 100 - M_{ad,m}$$

$$V_{ad,n} = \frac{G_{1,n}}{G} \times 100 - M_{ad,n}$$

$$V_{ad,p} = \frac{G_{1,p}}{G} \times 100 - M_{ad,p}$$

式中　$V_{ad,m}$、$V_{ad,n}$、$V_{ad,p}$ —— m、n、p 煤的分析基挥发分；

$M_{ad,m}$、$M_{ad,n}$、$M_{ad,p}$ —— m、n、p 煤的分析基水分。

由于煤的水分具有线性可加性，则

$$a \times M_{ad,m} + (1-a) \times M_{ad,n} = M_{ad,p}$$

又 m、n、p 煤的重量都等于 G，据 Stickler 等人提出的粉煤的热分解模型，在相同的测试条件（如热解温度、加热速度、热解时间、分析煤样粒度）下，G_1 的大小只与煤种有关。当两种或多种煤混合得到一种混煤时，该混煤的 G_1 值等于组成该混煤的各单种煤的 G_1 值之和，则

$$a \times G_{1,m} + (1-a) \times G_{1,n} = G_{1,p}$$

所以

$$a \times V_{ad,m} + (1-a) \times V_{ad,n} =$$

$$\frac{a \times G_{1,m} + (1-a) \times G_{1,n}}{G} \times 100 -$$

$$a \times M_{ad,m} + (1-a) \times M_{ad,n} =$$

$$\frac{G_{1,p}}{G} \times 100 - M_{ad,p} V_{ad,p}$$

可见，煤的分析基挥发分 V_{ad} 具有线性可加性。

（一）随机变量法验证

实验数据来自于株洲选煤厂的配煤试验，实验结果表 7－3－6 所示，统计和分析结果见表 7－3－7。

（二）线性回归法验证

利用线性回归法对配煤分析基挥发分和干基挥发分的线性可加性进行验证分析，分析结果见表 7－3－8，分析基挥发分的计算值与实验值的回归曲线见图 7－3－4。

由分析结果可知，配煤的分析基挥发分具有线性可加性，而干基挥发分不具有线性可加性。

表 7－3－6　分析基挥发分和干基挥发分计算与实验值对比结果

实验编号	分析基挥发分（%）			干基挥发分（%）		
	计算值	实验值	差额	计算值	实验值	差额
1	19.81	19.78	－0.03	26.68	26.52	－0.16
2	19.35	19.54	0.19	25.09	25.53	0.44
3	19.03	19.28	0.25	22.90	23.27	0.37
4	25.80	25.61	－0.19	36.47	36.04	－0.43
5	21.45	21.54	0.09	29.68	29.52	－0.16
6	21.87	22.18	0.31	27.86	28.47	0.61
7	27.75	27.61	－0.14	36.60	36.37	－0.23
8	16.66	16.42	－0.24	23.42	23.08	－0.34
9	18.49	18.04	－0.45	23.44	22.82	－0.62
10	25.57	25.29	－0.28	33.48	33.00	－0.48
Il	29.30	29.18	－0.12	38.62	38.28	－0.34
12	20.56	20.79	0.23	26.79	27.05	0.26
13	21.42	21.38	－0.04	35.18	35.06	－0.12
14	21.93	21.96	0.03	37.63	38.43	0.81
15	20.66	20.52	－0.14	28.17	27.55	－0.62

实验编号	分析基挥发分(%)			干基挥发分(%)		
	计算值	实验值	差额	计算值	实验值	差额
16	13.41	13.14	-0.26	24.72	21.55	-3.17
17	11.37	11.65	0. 28	16.42	16.83	0.41
18	13.66	13.76	0.10	26.61	23.87	-2.74
19	16.64	16.99	0.35	28.27	27.18	-1.09
20	18.73	18.80	0.07	31.54	30.70	-0.84
21	19.10	19.31	0.21	26.15	25.83	-0.32
22	20.78	20.81	0.04	25.71	23.90	-1.81
23	15.77	15.75	-0.02	18.55	18.77	0.22
24	15.78	16.00	0.22	20.65	20.67	0.02
25	8.09	8.37	0.28	10.72	11.28	0.56

表 7-3-7　随机变量法验证分析基挥发分、干基挥发分可加性结果

煤质指标	分析基挥发分	干基挥发分
样本个数 n	25	25
δ 标准方差	0.22	0.97
U	0.70	-2.01
$\alpha_{0.1}$	1.64	1.64
假设 $\delta = (U < \alpha_{0.1})$	成立	不成立
国标允许误差 σ	0.5	0.5
χ^2_{n-1}	4.7	93.5
$\chi^2_{n-1}(0.1)$	33.196	33.196
$\chi^2_{n-1} \leqslant \chi^2_{n-1}(0.1)$	小于	大于
该指标是否有可加性	有	没有

表 7－3－8　回归分析法验证分析基挥发分、干基挥发分可加性验证结果表

煤质指标	分析基挥发分	干基挥发分
样本个数 n	25	25
方程 $Y = A \times X + B$ 中的 A	1.0004	0.9887
方程 $Y = A \times X + B$ 中的 B	0.017	0.029 5
相关性系数 R	0.9934	0.9799
$R > 0.997$	大于	大于
对 Y 值的预测标准差 δ_e	0.14	0.98
国标允许误差 σ	0.5	0.5
$\lvert B \rvert \leqslant \sigma$	小于	小于
$\delta_e \leqslant \sigma$	小于	大于
该指标是否有可加性	有	没有

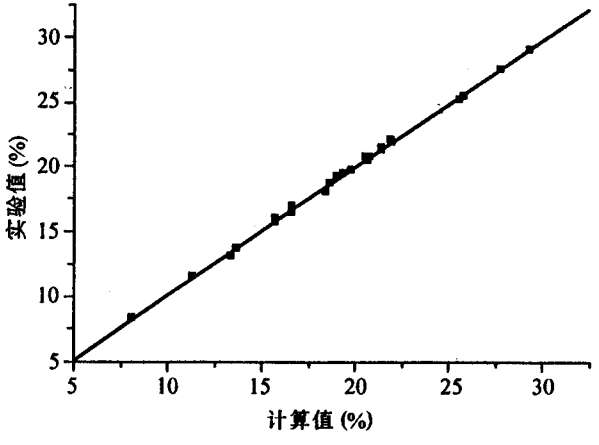


图 7－3－4　分析基挥发分计算值与实验值关系曲线

四、固定碳

根据固定碳的定义和计算公式

$$FC_{ad} = 100 - (M_{ad} + A_{ad} + V_{ad}) \tag{7-3-21}$$

式中　FC_{ad}——分析煤样固定碳的含量，%；

M_{ad}——分析煤样的水分，%；

A_{ad}——分析煤样的灰分，%。

可知固定碳含量是 M_{ad}、A_{ad}、V_{ad}的线性组合，而且已知 M_{ad}、A_{ad}、V_{ad}具有线性可加性，又根据线性可加性的性质(2)——具有线性可加性指标的线性组合仍具有线性可加性，因此可得出固定碳具有线性可加性的结论。

五、发热量

(一)弹筒发热量的可加性

如果忽略配煤过程中煤炭的轻微氧化等化学过程，则配煤过程是一个纯物理过程，配煤前后煤中所蕴藏的化学能不变，也就是煤的吉布斯函数不变。从另外一个角度分析，煤中的各元素含量在配煤前后也不会发生变化，配煤的 C、H、S、N 等元素具有线性可加性。燃烧是煤中 C、H、S、N 等元素与 O_2 反应，煤的化学能转化为热能的过程，如果完全燃烧，无论配煤前后它们的最终产物的吉布斯函数应该相同，即燃烧热相同。根据发热量的测量方法，也就是说煤的弹筒发热量具有线性可加性。

(二)高位发热量的可加性

煤的高位发热量是指煤在空气中在大气压条件下燃烧后产生的热量。在这种条件下，煤中的可燃硫只生成 SO_2，氮生成游离态氮，其水成蒸气状态冷凝(25℃)。煤的弹筒发热量减去煤燃烧过程中的硫酸和硝酸的生成热后，就是煤的分析基高位发热量，其计算公式为

$$Q_{gr,ad} = Q_{b,ad} - (95S_{b,ad} + Q_{b,ad}) \qquad (7-3-22)$$

式中　$Q_{gr,ad}$——分析试样的高位发热量，J/g；

$Q_{b,ad}$——分析试样的弹筒发热量，J/g；

$S_{b,ad}$——由弹筒洗液测得的煤的含硫量，%；

α——硝酸生成热校正系数。

当 $Q_{b,ad} \leqslant 16.70\text{kJ/g}$ 时，$\alpha = 0.001$

当 $16.70\text{kJ/g} \leqslant Q_{b,ad} \leqslant 25.10\text{kJ/g}$ 时，$\alpha = 0.0012$

当 $Q_{b,ad} \geqslant 25.10\text{kJ/g}$ 时，$\alpha = 0.0016$

根据以上的分析可知 $Q_{gr,ad}$、$S_{b,ad}$具有线性可加性，而 α 仅由发热量 $Q_{b,ad}$决定，如果两种煤的发热量 $Q_{b,ad}$都在同一范围之内，则 α 相同，那么这两种煤的配煤的分析基高位发热量具有线性可加性 如果两种煤的发热量都不在同一范围之内，α 会不同，则配煤的分析基高位发热量不具有线性可加性，但两者相差很小，α 的最大差值为 0.06%，这么小

的差值引起的相对误差也不会超过 0.06%。按煤的发热量 30kJ/g 计算，引起的绝对误差不会超过 18J/g，大大低于发热量允许误差的国家标准 300J/g，完全可以忽略不计，因此也可以认为配煤分析基高位发热量具有线性可加性。

（三）低位发热量的可加性

煤的高位发热量是把水作为液态存在，而煤在工业锅炉中燃烧时呈气态蒸发，因此由高位发热量减掉水的蒸发热就是低位发热量，其计算公式为

$$Q_{net,ad} = Q_{gr,ad} - 25(M_{ad} + 9H_{ad}) \tag{7-3-23}$$

式中　$Q_{net,ad}$——分析煤样的低位发热量，J/g；

$Q_{gr,ad}$——分析煤样的高位发热量，J/g；

M_{ad}——分析煤样的水分，%；

H_{ad}——分析煤样氢元素含量，%。

因为 H_{ad}和 M_{ad}具有线性可加性，$Q_{ar,ad}$又具有线性可加性，由可加性的性质（2）可知，$Q_{net,ad}$也具有线性可加性。

利用随机变量法，对配煤的发热量可加性进行实验验证和数学分析。实验数据来自株洲选煤厂的配煤试验，具体实验数据见表 7-3-9，各实验数据的统计和分析结果见表 7-3-10。再利用线性回归法对发热量的线性可加性进行验证分析，分析结果见表 7-3-10 回归曲线见图 7-3-5。

表 7-3-9　发热量计算和实验值对比结果

实验编号	发热量（MJ/kg）			实验编号	发热量（MJ/kg）		
	计算值	实验值	差额		计算值	实验值	差额
1	25.82	25.84	0.02	14	17.72	17.69	-0.03
2	26.85	26.86	0.01	15	24.90	24.78	-0.11
3	29.51	29.51	0.01	16	21.00	21.06	0.06
4	23.54	23.30	-0.24	17	24.06	24.01	-0.05
5	25.01	24.75	-0.25	18	19.56	19.72	0.16
6	27.05	27.02	-0.03	19	21.23	21.34	0.11
7	25.51	25.46	-0.05	20	20.51	20.68	0.17

实验编号	发热量(MJ/kg)			实验编号	发热量(MJ/kg)		
	计算值	实验值	差额		计算值	实验值	差额
8	22.36	22.12	-0.23	21	25.77	25.76	0.00
9	26.36	26.11	-0.25	22	27.92	27.99	0.07
19	25.55	25.33	-0.22	23	29.85	29.98	0.13
11	24.64	24.47	-0.17	24	27.09	27.22	0.13
12	26.12	26.11	-0.01	25	24.48	24.39	-0.09
13	19.68	19.83	0.15				

表 7-3-10　随机变量法、回归分析法验证发热量可加性结果

随机变量法		回归分析法	
样本个数 n	25	样本个数 n	25
δ 标准方差	0.138	方程 $Y = A \times X + B$ 中的 A	0.995
U	-1.03	方程 $Y = A \times X + B$ 中的 B	0.009
$\alpha_{0.1}$	1.64	相关性系数 R	0.998
假设 $\delta = 0(U < \alpha_{0.1})$	成立	$R > 0.99$	成立
国标允许误差 σ	0.3	对 Y 值的预测标准差 δ_e	0.14
χ^2_{n-1}	5.3	国标允许误差 σ	0.3
$\chi^2_{n-1}(0.1)$	33.196	$\lvert B \rvert \leqslant \sigma$	是
$\chi^2_{n-1} \leqslant \chi^2_{n-1}(0.1)$	小于	$\delta_e \leqslant \sigma$	是
该指标是否有可加性	有	该指标是否有可加性	有

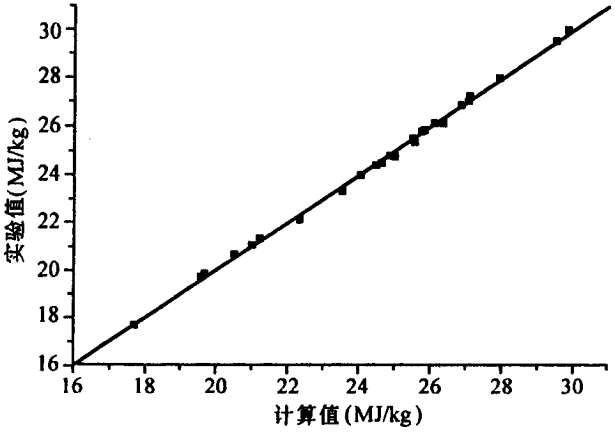


图 7－3－5　弹筒发热量计算值与实验值关系曲线

六、灰成分

配煤是一个纯物理过程，构成灰分的各矿物质含量不会发生变化。在燃烧时，煤中矿物质的主要反应方程式为

$$2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O \xlongequal{} 2SiO_2 + Al_2O_3 + 2H_2O\uparrow$$

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \xlongequal{} CaSO_4 + 2H_2O\uparrow$$

$$4FeS_2 + 11O_2 \xlongequal{} 2Fe_2O_3 + 8SO_2\uparrow$$

$$CaCO_3 \xlongequal{} CaO + CO_2\uparrow$$

$$CaO + SO_3 = CaSO_4$$

由煤的主要灰化反应学方程式可以看出，配煤后各矿物分解的产物不会发生变化，也就是各矿物的分解产物具有线性可加性，但矿物的合成反应有可能发生微小变化，主要是由于配煤之后煤灰中 CaO 和 SO_3 的比例发生变化，使生成 $CaSO_4$ 的量发生变化。不过，一般煤中的含硫量较低(绝大部分小于 3%)，当其燃烧时只有一部分生成 SO_3，一般煤灰中 CaO 的含量远远高过其生成的 SO_3 的量，因此当 CaO 和 SO_3 的量变化不是特别大时，其生成的 $CaSO_4$ 的量变化与整个灰分的量相比可以忽略不计，认为灰成分具有线性可加性。这里需要注意的是 在配煤加有固硫剂时，生成的 $CaSO_4$ 的量将显著增加，此时 $CaSO_4$ 的含量将不具有线性可加性。

另外，根据北京煤化所的实验(表 7－3－11)，配煤灰中 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 等主要成分的实测值与单煤的理论加权平均值基本一致，其中 Al_2O_3 的理论值与实测值的均方差

最小，仅为 1.76%，SiO_2 和 Fe_2O_3 的理论值与实测值误差相近，均方差分别为 2.33%和 2.35%，但 CaO 稍有差异，均方差为 3.03%，是最大的，这显然是由于试验误差过大所致。因此，可以认为配煤灰成分与单煤之间具有线性可加性。

表 7－3－11　灰成分实测值与其理论计算值的关系

配　煤	SiO_2		Al_2O_3		Fe_2O_3		CaO	
方 案	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
1	53.54	52.09	30.70	29.19	5.51	6.47	3.58	6.22
2	52.94	51.28	24.86	24.47	10.49	6.70	11.69	9.67
3	49.84	49.47	28.01	26.67	7.27	8.02	5.95	9.17
4	49.35	51.05	29.3	30.77	8.08	7.10	3.80	6.45
5	52.24	47.31	26.65	23.44	7.10	10.79	4.20	9.32
6	51.88	51.22	24.01	22.64	5.19	5.31	7.89	8.55
平均值	51.63	50.40	27.26	26.20	7.27	7.40	6.19	8.23
均方差	2.33		1.76		2.25		3.03	

七、灰融特性

煤灰熔融特性是煤灰在高温下达到熔融状态的温度，国家标准是用 4 个不同形态下的温度表示，即 DT（变形温度）、ST（软化温度）、HT（半球温度）和 FT（流动温度）。在工业上通常以煤灰的软化温度 ST 作为衡量煤灰熔融特性（灰融点）的指标。

煤灰的熔融特性主要取决于煤灰的化学组成。灰融特性是否具有可加性，主要取决于单煤的矿物组成（常以煤灰的组成表示），如果各单煤的煤灰成分都是 Al_2O_3 占 35%以上，则每一种单煤的 ST 和 FT 都在 1400℃以上，则其配煤的 ST 和 FT 也必然在 1400℃以上，这种煤灰的 ST 和 FT 就有较好的可加性。有些煤的 ST 大于 1400℃，但其灰成分中 CaO 的含量在 40%以上，当这种煤灰与 Al_2O_3 为主的高熔融性煤灰（ST > 1400℃）配合时，其配煤的 ST 就低于 1400℃。因为这两种煤配合后，煤灰成分中的 Al_2O_3 和 CaO 的含量较原单煤的最高值低许多，因而其 ST 必然有较大幅度的下降，这种煤的 ST 和 FT 就不具有可加性。有些高熔融性煤灰（ST > 1400℃）中的组分以 SiO_2 为主，其含量达

65%以上，当这种煤 CaO 含量很高或 Al_2O_3 含量较高的高熔融性煤相互混合时，由于配煤煤灰中的 Al_2O_3 和 SiO_2 或 CaO 的含量均较单煤的最高值有明显下降，这时其煤灰的 ST 也会将底至 1400℃以下，因而这种类型的煤灰熔融性不具有可加性。同样 DT 的线性可加性也不好，但可以通过其灰成分的线性可加性，利用经验公式来预测配煤后的灰熔融特性，目前常见的经验公式都是煤的灰融温度与灰成分具有简单的线性关系。常用的经验公式有

$$FT = 200 + 21Al_2O_3 + 10SiO_2 + 5(Fe_2O_3) + CaO + KNaO)$$

$$FT = 200 + (2.5\ b\ + 20Al_2O_3) + (3.3b + 10SiO_2)$$

式中 $$b\ = Fe_2O_3 + MgO + CaO + KNaO$$

(1)适用于 $Al_2O_3 + SiO > 70\%$ 的灰。(2)适用于 $b\ > 30\%$ 的灰。

注：A：$(2.5b + 20Al_2O_3) < 332$ 时，应再加上 $2[332 - (2.5b + 20Al_2O_3)]$

B：$(2.5b + 20Al_2O_3) < 475$ 时，应再加上 $2[475 - (3.3b + 10Al_2O_3)]$

$$DT = 1047 + 5.453Al_2O_3 - 2.474Fe_2O_3 + 1.399CaO$$

$$ST = 804 + 5.22SiO_2 + 11.612Al_2O_3 - 1.927CaO$$

$$FT = 829 + 5.346SiO_2 + 10.695Al_2O_3 + 1.608Fe_2O_3$$

由以上经验公式可知，FT 是煤灰成分的线性组合，煤的灰成分又具有线性可加性，因此根据线性可加性的性质(2)，配煤 FT 具有线性可加性。

根据北京煤化所对 10 个配煤的试验，DT、ST 和 FT 虽都比单煤的理论加权平均值有不同程度的增高。如配煤实测的 DT 温度普遍比其单煤的理论加权平均值高 5℃～39℃，平均高出 25℃ 配煤的实测 ST 温度也均高出其单煤的理论加权平均值 17℃～31℃，平均高出 22℃ 配煤的实测 FT 温度则高出其单煤的理论加权平均值 14℃～29℃，平均高出 17℃。但以上误差都在实验室测定误差以内，可以粗略地认为配煤的灰融温度具有线性可加性。

但事实上煤的灰融点与煤的灰成分关系比较复杂，不能用灰成分的简单线性关系来表示，只有在灰成分变化不大时，才能用经验公式来计算灰融点，FT 才具有较好的线性可加性。当配煤的各煤种的灰成分变化较大时，需要单独建立配煤的灰成分和灰融温度的数学模型。

第四节　动力配煤的燃烧特性

一、动力配煤的燃烧特性与其燃料比的关系

动力配煤的燃烧特性是指煤的着火特性、挥发分释放特性、燃尽特性、热解特性、表面积和孔隙特性、积灰结渣特性、磨损特性及污染物排放特性等。其中最重要的是着火稳定性、燃尽特性和结渣特性。

煤燃烧特性主要与煤的燃料比有密切关系。燃料比（F）是指煤的固定碳含量与挥发分之比，它是表示煤化程度的一个指标。燃料比随煤化程度的增高而增高，可用煤的燃料比来评价动力煤的燃烧特性。

中国矿业大学（北京校区）戴才胜博士对配煤的燃烧特性做了较系统的研究，他对株洲选煤厂的几种单种煤的燃烧特性通过试验得到了以下结论：燃料比（F）与其镜质组的平均随机反射率（$R_{r,m}$）呈线性相关关系（图 7－3－6）。

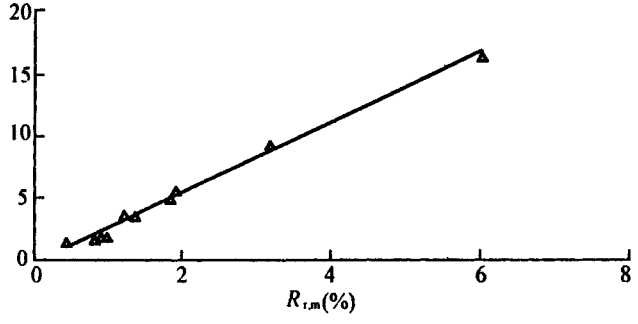


图 7－3－6　燃料比 F 与镜质组反射率 $R_{r,m}$ 关系图

$$F = 2.84R_{r,m} - 0.35 \qquad (7-3-24)$$

相关系数　　$R = 0.9951$

单种煤的着火温度（T_f）与其镜质组的平均随机反射率（$R_{r,m}$）的对数呈线性相关关系（图 7－3－7）。

$$T_f = 91.82\ln(R_{r,m}) + 470.53(℃) \qquad (7-3-25)$$

相关系数　　$R = 0.9952$

因此单种煤的着火温度(T_f)与其燃料比(F)的对数也呈线性相关关系

$$T_f = 79.70\ln(F) + 402.41(℃) \qquad (7-3-26)$$

相关系数　　$R = 0.9551$

从着火温度可以判断单种煤的着火难易程度。

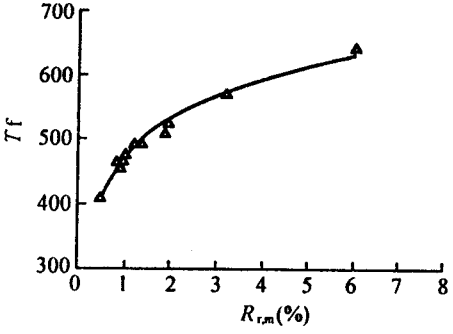


图 7-3-7　着火温度 T_f 与镜质反射率 $R_{r,m}$ 关系图

目前,热分析是国内外研究煤的燃烧特性的最常用的方法。它利用热天平测量煤燃烧时的特性曲线 DTG(微商失重曲线)、DTA(微商放热曲线)、TG(失重曲线),根据上述曲线可以得到煤的燃烧特性参数。对于 DTG 曲线特性相同的煤,其燃烧性能基本相同,因而把 DTG,曲线称为'煤的燃烧指纹'曲线。某种煤的燃烧特性曲线如图 7-3-8。

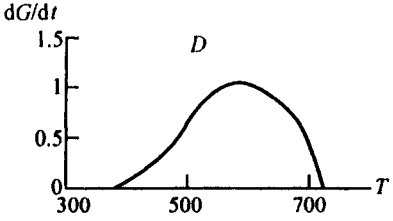


图 7-3-8　某种煤 DTG 曲线

一般单种煤的'燃烧指纹曲线'DTG 的形态呈非正态分布的单峰,其峰值温度 T_{max} (dG/dt 最大时所对应的温度)与其煤化程度相关,T_{max} 随单种煤的煤化程度的增高而增高。T_{max} 与 $R_{r,m}$ 的对数呈线性相关关系,如图 7-3-9 所示。

单种煤的 DTG 曲线的峰值温度 T_{max} 与其燃料比 F 的对数也存在线性相关关系(如图 7-3-10),从而预测单种煤的 DTG 曲线的形态,为预测配混煤的 DTG 曲线形态奠定了基础。

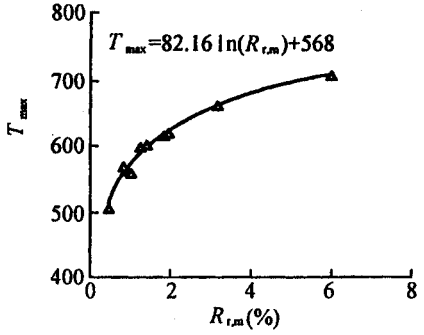


图 7－3－9　T_{max} 与镜质组反射率 $R_{r,m}$ 关系图

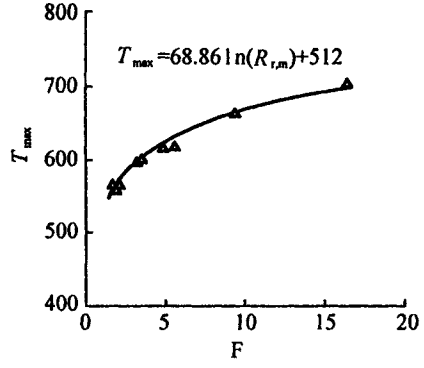


图 7－3－10　T_{max} 与燃料比 F 关系图

单种煤的煤化程度愈低，其燃烬时间愈短；反之亦然。对许多工业锅炉来说，煤在锅炉内的燃烧时间随锅炉设计煤种而定，因此，在动力配煤中必须考虑不同煤种的燃烬时间之间的关系，以提高配混煤的燃烬率，提高配混煤的燃烧效率。

二、配煤燃料比的计算及其评价

设 A 煤和 B 煤相配得到混煤 P，配入比例分别为 x 和 $(1-x)$，A 煤的燃料比为 F_a，B 煤的燃料比为 F_b，并且 $F_a > F_b$。戴才胜博士经过大量实验研究，有以下结论：

当 $F_a/F_b < B_1$ 时，这两种煤的燃料比十分相近，可认为燃烧特性相同，混煤 P 的燃烧性能好；

当 $B_1 < F_a/F_b < B_2$ 时，这两种煤的燃料比比较相近，可认为燃烧特性相似，混煤 P 的燃烧性能中等；

当 $F_a/F_b < B_2$ 时，这两种煤的燃料比差异较大，燃烧特性有较大差异，混煤 P 的燃烧性能差。

上述中，B_1、B_2 是与锅炉、燃烧方式等有关的数值，需要试验确定，例如对某一电厂试验得到的 $B_1 = 1.5$，$B_2 = 2.5$。

设 A、B、C 三种煤相配得到混煤 P，配比分别为 m、n、$(1-m-n)$，A、B、C 三种煤的燃料比分别为 F_a、F_b、F_c，F_{ab} 表示 A 煤和 B 煤以 m ∶ n 的比例相配所得混煤的燃料比，F_{bc} 表示 B 煤和 C 煤以 n ∶ $(1-m-n)$ 的比例相配所得混煤的燃料比，则

当 $F_a/F_c < B_1$ 时，配混煤 P 的燃烧性能好；

当 $B_1 < F_a/F_c < B_2$ 时，如果 $F_a/F_b < B_1$ 且 $F_{ab}/F_c < B_1$，或 $F_a/F_c < B_1$ 且 $F_a/F_{bc} < B_1$，配煤 P 的燃烧性能好；

其他情况下，配煤 P 的燃烧性能中等。

$F_a/F_c < B_2$ 时，如果 $F_a/F_b < B_2$，且 $F_{ab}/F_c < B_2$，或 $F_b/F_c < B_2$ 且 $F_a/F_{bc} < B_2$，则配煤 P 的燃烧性能中等；

其他情况下，配煤 P 的燃烧性能较差或差。

上述中 $F_{ab} = \dfrac{m \times FC_{ad,A} + n \times FC_{ad,B}}{m \times V_{ad,A} + n \times V_{ad,B}}$；

$FC_{ad,A}$ —— A 的分析基固定碳含量，%；

$FC_{ad,B}$ —— B 的分析基固定碳含量，%；

$V_{ad,A}$ —— A 的分析基挥发分，%；

$V_{ad,B}$ —— B 的分析基挥发分，%；

$F_{bc} = \dfrac{m \times FC_{ad,C} + n \times FC_{ad,B}}{m \times V_{ad,C} + n \times V_{ad,B}}$；

$FC_{ad,C}$ —— C 的分析基固定碳含量，%；

$FC_{ad,B}$ —— B 的分析基固定碳含量，%；

$V_{ad,C}$ —— C 的分析基挥发分，%；

$V_{ad,B}$ —— B 的分析基挥发分，%。

假设由 $n(n>2)$ 种单种煤按配比 $X_j(j=1,2,3,\cdots,n$，下同）配制成配混煤 P，各单种煤的燃料比为 F_j，n 种单种煤中燃料比的最大值为 F_{max}（该种煤的序号为 max），n 种单种煤中燃料比的最小值为 F_{min}，F_0 是除燃料比最大的单种煤外，剩下的 $(n-1)$ 种单种煤以各自原来的配比为比例配制的混煤的燃料比，则

当 $F_{max}/F_{min} < B_1$ 时，配混煤 P 的燃烧性能好。

当 $B_1 < F_{max}/F_{min} < B_2$ 时，如果 $F_{max}/F_0 < B_1$，则配混煤 P 的燃烧性能好；

其他情况下，配混煤 P 的燃烧性能中等。

当 $F_{max}/F_{min} > B_2$ 时，如果 $F_{max}/F_0 < B_2$，则配混煤 P 的燃烧性中等；

其他情况下，配混煤 P 的燃烧性能差。

上述中

$$F_0 = \frac{\sum_{i=1, i\neq \max}^{n} (x_i \times FC_{ad,i})}{\sum_{i=1, i\neq \max}^{n} (x_i \times V_{ad,i})}$$

X_i —— 第 i 种煤的配煤比例；

$FC_{ad,i}$、$V_{ad,i}$ —— 第 i 种煤的分析基固定碳含和挥发分；

max —— 为燃料比最大的煤种的序号。

因为 FC_{ad}、V_{ad} 具有线性可加性，根据线性可加性的性质(3)可知，配煤的燃料比 F 不具有线性可加性。

第四章　动力配煤的优化

第一节　动力配煤主要煤质指标间的关系及其可加性

一、主要煤质指标间的相互关系

控制动力配煤的主要质量指标是收到基低位发热量($Q_{net,ar}$)和干燥无灰基挥发分产率(V_{daf})必须符合工业锅炉和窑炉的需要。近年来,随着环保对燃煤硫分的要求越来越严格,对配煤的硫分也是一个十分重要的控制指标。国务院于1998年1月12日给国家环保局批复的国函[1998]5号文的第三条中明确指出"禁止新建煤层含硫分大于3%的矿井,建成的煤层含硫分大于3%的矿井,逐步实行限产或关停。新建、改造含硫分大于1.5%的煤矿,应当配套建设相当规模的煤炭洗选设备"。该文的第四条中又提出"除以热定电的热电厂外,禁止在大中城市城区及近郊区新建燃煤火电厂。新建、改造燃煤含硫量大于1%的电厂,必须建设脱硫设施。现有燃煤含硫量大于1%的电厂,要在2000年前采取减排SO_2的措施"。为此,国家环保局于1998年3月又公布了我国到2000年时的SO_2排放总量控制在2460万t以内。从而表明,我国对燃煤硫分的要求越来越严。

原煤炭工业部于1998年2月21日又颁发了煤厅字(1998)第73号《关于编制"两控区"煤炭洗选加工专项规划的通知》,在通知中明确提出"在用煤集中、运输条件较好的地方建设配煤场。通过配煤和添加固硫剂,为用户提供不同质量、规格的煤炭产品,节约煤炭,减少燃煤排放二氧化硫量。"

此外，在《大气污染防治法》第三章第 24 条又明确规定，国家推行煤炭洗选加工，降低煤的硫分和灰分，限制高硫分（指 $S_{t,d}$ 大于 3% 的）、高灰分（指 A_d 大于 40% 的）煤炭的开采。新建的所采煤炭属于高硫分、高灰分的煤矿，必须建设配套的煤炭洗选设施，使煤炭中的含硫分、含灰分达到国家规定的标准。

国家环保局在《大气污染防治法实施细则》修订说明中也提出了防治燃煤污染对策。如要求‘限制含硫分大于 2%、含灰分大于 30% 的煤炭的开采。新建的所采煤炭属于含硫分大于 1.4%、含灰分大于 20% 的煤矿，必须建设配套的煤炭洗洗设施，使煤炭的含硫分、含灰分达到国家规定的标准”。

另据有关部门调查，南方 20 多个城市对燃煤硫分普遍要求在 0.80% 以下。北京、天津、南京、杭州等城市对燃煤的硫分更要求低至 0.50% 或 0.60% 以下，上海市区燃煤硫分也不得超过 0.60%。为了减少电厂等由于燃煤对大气的二氧化硫排放量，国家对排放 SO_2 的罚款力度也日渐加大。如 1998 年 10 月 1 前每排放 $1kgSO_2$ 仅收罚款 0.20 元，1998 年 10 月 1 日起，在郑州、杭州和沈阳 3 个试点城市，凡企业每排放 $1kgSO_2$ 将罚款 0.60 元，1999 年 1 月 1 日起，该 3 个城市对每 $kgSO_2$ 的罚款力度又进一步加大，且以后将在全国城市逐渐推广实施。因此，在动力配煤生产中，今后必须同时要求配煤的硫分控制在一定范围以内，$S_{t,d}$ 值一般可控制在 0.80% 以内，最高也不允许超过 1.20%。煤灰熔融性温度（ST）和全水分指标也是动力配煤需要控制的指标。对发电用煤来说，还要求控制其哈氏可磨性指数在 50 甚至 55 以上。

从配煤各指标间的相互关系来说，通常是水分和灰分越高时，其收到基低位发热量（$Q_{net,ar}$）也就越低，氢含量和挥发分（V_{daf}）较高的煤，则收到基低位发热量相对也会较低一些。在相同水分、灰分和挥发分条件下，焦渣特征的号数（1～8 号）越高的煤，其发热量则相对也越高。硫分、灰熔融性和哈氏可磨性指标则与其他基本煤质指标无明显关系。

二、动力配煤主要质量指标间的可加性

动力配煤中，其质量指标是决定配煤售价的主要因素。配煤质量的预测，是基于如挥发分和发热量、灰熔融性温度等与单煤间具有较好可加性（即可加权平均性）。但近几年来，有些单位发现配煤的许多质量指标并不完全具有很好的线性可加性，这就涉及到动力配煤的基本原理问题。为了更科学地指导配煤生产，需要进一步研究配煤主要质量指标与单煤间的量变关系。目前看，需考察配煤与单煤间的主要质量指标有挥发分、发热量、硫分、灰成分和灰熔融性。以及灰分等与燃烧有关的指标是否具有可加性。由于水分经常变动，因而配煤水分必须实测，而不宜用可加性计算。

以往人们在动力配煤优化配方中，对各种配煤的主要煤质指标都是以各种指标具有可加性为基础来计算的。90 年代前期浙江大学提出配煤的实测发热量（$Q_{gr,ad}$）比各种单煤的加权平均值明显增高，而配煤的挥发分则比各种单煤的加权平均值明显降低，在配煤中如无烟煤的配比越多，则配煤挥发分（V_{ad}）比单煤的加权平均值（理论值）降低得也越多。1995 年北京煤化学研究所曾委托煤科总院杭州环保所也做过类似的试验研究，发现配煤的实测发热量（$Q_{gr,d}$）比其单煤的加权平均值略有增加，增值远不及浙江大学提出的高，配煤实测挥发分比其单煤的理论加权平均值降低不超过 2%。但无论是浙江大学还是杭州环保所在试验时都是先测单煤，后做配煤的煤质指标，其间的时间差至少在 1～2 个星期甚至更长时间，由于一些年轻烟煤极易氧化变质，导致其挥发分和水分（M_{ad}）、发热量以及元素成分等指标产生不同程度的变化。因此，在试验条件不很一致的情况下，其研究结论容易发生偏差。为了进一步考察实测配煤煤质指标与其单煤理论加权平均值的关系，北京煤化学研究所于 1999 年在 20 种单煤中任意选取了 10 种单煤（表 7－4－1）和 10 种配煤，试验煤种包括气煤、1/3 焦煤、不粘煤、弱粘煤和无烟煤。在单煤和配煤制备完毕后，同时测定了它们的工业分析、硫、发热量和灰熔融性等指标。根据试验结果，按符合科学规律的新方法进行计算，发现各种煤质指标几乎都有较好的线性关系。

表 7－4－1　某动力配煤厂原始煤样测试结果汇总表

编号	矿名	工业分析						
		M_t（%）	M_{ad}（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）
1	神混	15.50	8.23	6.33	35.75	2	0.28	23.88
2	大优	12.50	4.64	7.83	33.25	2	0.47	25.08
3	荆各庄	6.40	2.34	33.11	42.53	3	0.35	17.54
4	伊盟	16.80	9.98	7.99	35.71	2	0.52	22.96
5	林西	14.20	0.70	26.83	25.32	7	1.25	19.45
6	乡优	7.00	3.96	14.20	33.63	2	0.53	25.03
7	张家口市	12.80	4.57	19.34	32.58	2	0.90	21.35
8	准格尔	11.40	5.09	14.56	38.27	2	0.90	23.05
9	平朔洗	7.30	3.82	13.68	37.40	3	0.90	25.44
10	平朔混	6.00	3.73	18.39	35.43	3	0.87	23.84
11	榆林	11.00	8.13	7.40	34.87	1	0.30	26.53
12	开优	6.20	0.83	28.32	34.10	4	0.85	21.90
13	南窑	14.50	9.36	11.72	34.73	2	0.51	23.24
14	山优	9.70	3.70	8.23	28.72	4	0.37	25.14

编号	矿名	工业分析						
		M_t (%)	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1~8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)
15	长治	5.80	0.57	13.55	15.75	4	0.66	27.18
16	湾沟矿	7.80	2.31	40.28	43.04	2	0.82	17.56
17	青磁窑	8.10	1.77	5.35	30.00	2	1.06	26.76
18	永成矿	6.00	1.76	49.56	44.18	2	1.24	18.11
19	鑫源矿	5.50	1.54	36.42	41.20	4	0.84	15.13
20	柳江	5.01	2.00	42.76	12.87	1	0.31	17.35

关于配煤煤质指标的计算，过去一直沿用常规的方法，即无论是分析基水分、干基灰分和干燥无灰基挥发分、收到基低位发热量以及煤灰熔融性温度和煤灰成分等指标，一律按含分析水分煤的配比进行加权平均计算。由于干基和干燥无灰基指标还分别受水分（M_{ad}或 M_t）和灰分（A_d）的影响，而使它们的测值（X_d 及 X_{daf}）有的就不成线性关系。我们最近发现，除了含分析水的一些配煤指标（如 M_{ad}、A_{ad}、V_{ad}、FC_{ad}、$Q_{gr,ad}$……等）符合常规的计算方法以外，其他指标都必须考虑消除水分（如 X_d）和水分及灰分（如 X_{daf}）的影响，而配煤的灰熔融性温度和灰成分还必须考虑各单煤的灰分产率的影响。其具体计算方法如下。

（一）配煤水分（M_{ad}）的可加性

配煤空气干燥基水分（M_{ad}）的计算方法如下：

（1）把各单煤的 M_{ad} 值乘以相对应的配比（%），其乘积之和再除以各单煤的配比之和，即得配煤的 M_{ad} 结果。

（2）配煤 M_{ad} 的具体计算公式如下：

M_{ad}（%）= Σ[（A、B、C……几种单煤的配比）×（A、B、C……各单煤的 M_{ad} 结果）] ÷ ∑E（A、B、C……几种单煤的配比）

上述公式的原理同样适用于计算配煤的 A_{ad}、V_{ad}、FC_{ad}、$S_{t,ad}$、$Q_{gr,ad}$、C_{ad}、H_{ad}……等指标。只需把上式中的 M_{ad} 改成 X_{ad}（A_{ad}、V_{ad}……等）即可。

由表 7－4－2 看出，配煤的实测水分（M_{ad}）普遍低于由各单煤计算的理论加权平均值，相差最大的 P20 号配煤样（榆林煤 32%、林西洗末煤 28%、唐山地方鑫源矿煤 40%）的实测 M_{ad} 值比其理论加权平均值降低 1.14%。显然，由于空气干燥煤样水分（M_{ad}）随大气湿度的改变而变化较为灵敏，因此配煤的水分（M_{ad}）将不具有可加性。

表 7－4－2　某动力配煤工业分析等主要煤质指标可加性试验结果汇总表　　单位：%（除 CRC 外）

编号	煤样产地及配比	M_{ad}	理论	A_{ad}	理论	A_d	理论	V_{ad}	理论	V_d	理论	V_{daf}	理论	$S_{t,ad}$	理论	$S_{t,d}$	理论	CRC	理论
P01	神华(原)	8.23		5.81		6.33		30.73		33.49		35.75		0.26		0.28		1	
P02	林西洗末(原)	0.70		26.64		26.83		8.40		8.53		25.32		1.24		1.25		7	
P03	永城(原)	1.76		48.69		49.56		21.89		22.28		44.18		1.22		1.24		2	
P04	神华 29、林西 35、永城 36	3.23	3.27	28.45	28.54	29.40	29.50	23.57	23.23	24.36	24.02	34.50	34.07	0.97	0.95	1.00	0.98	3	3.5
P05	山优(原)	3.70		7.93		8.23		25.38		26.36		28.72		0.36		0.37		3	
P06	山优 30、神华 10、永城 60	2.81	2.99	32.15	32.17	33.08	33.13	23.53	23.82	24.21	24.53	36.18	36.74	0.87	0.87	0.90	0.89	2	2.2
P07	荆各庄(原)	2.34		32.34		33.11		27.78		28.45		42.53		0.34		0.35		3	
P08	鑫源(原)	1.54		35.86		36.42		25.79		26.19		4.20		0.83		0.84		4	
P09	山优 37、荆各庄 10、鑫源 53	1.65	2.42	25.34	25.17	25.77	25.80	25.98	25.84	26.42	26.48	35.58	35.68	0.61	0.61	0.62	0.62	4	3.5
P10	柳江曹山矿(原)	2.00		41.90		42.76		7.22		7.37		2.87		0.30		0.31		1	
P11	神华 33、林西 47、柳江 20	2.89	3.44	22.93	22.82	23.61	23.63	20.72	20.23	21.34	20.95	27.93	27.44	0.74	0.73	0.76	0.75	4	3.8
P12	山优 24、神华 10、荆各庄 66	2.30	3.26	24.06	23.83	24.63	24.63	27.57	27.50	28.22	28.42	37.44	38.54	0.33	0.34	0.34	0.35	2	2.8
P13	乡优(原)	3.96		13.64		14.20		27.71		28.85		33.63		0.51		0.53		2	
P14	山优 31、乡优 10、鑫源 59	1.77	2.45	24.70	24.98	25.15	25.6	26.2	25.85	26.68	26.50	35.65	35.63	0.61	0.65	0.62	0.67	4	3.5
P15	大优(原)	4.64		7.47		7.83		29.22		30.64		33.25		0.45		0.47		2	
P16	大优 10、山优 23、荆各庄 67	2.00	2.88	23.98	24.24	24.47	24.96	27.77	27.37	28.34	28.18	37.52	37.56	0.34	0.36	0.35	0.37	3	2.9
P17	榆林(原)	8.13		6.80		7.40		29.66		32.28		34.87		0.28		0.30		1	
P18	山优 30、榆林 10、永城 60	1.87	2.98	32.95	32.27	33.58	33.26	23.79	23.7	24.24	24.44	36.50	36.63	0.85	0.87	0.87	0.89	2	2.2
P19	山优 25、乡优 10、荆各庄 65	2.11	2.84	23.80	24.37	24.3	25.08	27.70	27.17	28.30	27.97	37.39	37.33	0.36	0.36	0.37	0.37	3	2.9
P20	榆林 32、林西 28、鑫源 40	2.27	3.41	23.83	23.98	24.38	24.83	25.54	24.96	26.13	25.84	34.56	34.38	0.80	0.77	0.82	0.80	4	3.9

(二)配煤灰分(A_d)的可加性

配煤干燥基灰分(A_d)的计算方法如下：

(1)把各单煤含分析水的配比扣除其水分后折算成干煤的配比。即：

$$\text{干煤配比}(\%) = \text{含分析水分煤的配比}(\%) \times \frac{100 - M_{ad}}{100}$$

(2)用上式算出的各种单煤的干煤配比(%)再乘以 A_d，并求算出几种单煤(如 2～4 种)的 A_d 的乘积。

(3)把上述各单煤的 A_d 的乘积之和再除以各单煤的干煤配比之和，即为配煤的 A_d。

配煤 A_d 的具体计算公式如下：

$$A_d(\%) = \Sigma[(A、B、C\cdots\cdots\text{几种单煤的配比}) \times (A、B、C\cdots\cdots\text{各单煤的 } A_d)] \left[\Sigma(A、B、C\cdots\cdots\text{几种单煤的配比}) \times (A、B、C\cdots\cdots\text{几种单煤的 } A_{ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}})\right]$$

上述公式的原理同样适用于计算配煤的 V_d、$S_{t,d}$、FC_d、$Q_{gr,d}$、C_d、H_d……等指标，只需把上式中的 A_d 改成 X_d(V_d、$S_{t,d}$、$Q_{gr,d}$……等)。

配煤的干基灰分(A_d)与其单煤的理论加权平均值相差不大。如表 7－4－2 中前 5 组的配煤实测 A_d 普遍稍高于其单煤的理论加权平均值，后 5 组配煤的实测 A_d 则又普遍低于其单煤的理论加权值，但无论配煤 A_d 值的增高或降低的数值均在 0.70%以下，可见其产生的最大偏差均在不同实验室间的允许差以内，从而表明配煤的干基灰分具有较好的可加性。在表 7－4－2 中还发现，配煤的空气干燥基灰分(A_{ad})同样也具有较好的可加性。

(三)配煤挥发分的可加性

配煤 V_{ad} 和 V_d 的计算原理与上述公式相同，但配煤干燥无灰分挥发分(V_{daf})应按以下公式计算：

$$V_{daf}(\%) = \Sigma[(A、B、C、\cdots\cdots\text{几种单煤的配比}) \times V_{daf}(A、B、C、\cdots\cdots\text{几种单煤}) \times \text{“}A、B、C、\cdots\cdots\text{几种单煤”的}(100 - M_{ad} - A_{ad})] \div [\Sigma(A、B、C、\cdots\cdots\text{几种单煤的配比}) \times \text{“}A、B、C、\cdots\cdots\text{几种单煤的”}(100 - M_{ad} - A_{ad})]$$

上述公式的原理同样适用于计算配煤的 FC_{daf}、$Q_{gr,daf}$、C_{dat}、H_{daf}……等指标，只需把上式中的 V_{daf} 改成 X_{daf}(FC_{daf}、$Q_{gr,daf}$……等)即可。

配煤挥发分是考核配煤质量的主要指标之一。一般工业锅炉和窑炉的燃煤最低挥发分必须大于 20%，某些大型和中型工业锅炉则要求挥发分大于 25%甚至大于 30%，配煤挥发分达不到要求，将会影响配煤的燃烧效率和降低锅炉的热效率。1994 年，浙江大

学曾为杭州动力配煤场作过配煤挥发分可加性试验。从 27 个配煤挥发分(V_{ad})实测结果中发现,有 20 个配煤的实测 V_{ad}值比其理论加权平均值降低,其 V_{ad}的降幅多在 1% ~ 4% 之间;仅有 7 个配煤的实测 V_{ad}值高于其理论加权平均值,增值一般不超过 1%。为了进一步考察配煤挥发分的变化,北京煤化所在 1999 年还进一步考察了配煤挥发分的实测值与理论加权平均值之间的关系,试验结果如表 7 - 4 - 2 所示。在所试验的 10 组配煤中,干基挥发分(V_d)结果中有 6 组的实测值稍高于单煤的理论加权平均值,另 4 组则稍低,但 V_d 的增高或降低的最大差值均小于 0.50%,远在不同实验室间的允许差以内,从而表明配煤的干基挥发分(V_d)具有较好的可加性。配煤的实测 V_{ad}值除 P06 号煤样比其单煤的理论加权平均值降低 0.29%外,其余 9 组的实测 V_{ad}值普遍高于单煤的理论加权平均值,最大差值为 0.58%(P20 样),且与浙江大学的研究结论正好相反,从而表明由于水分的变化而使配煤的 V_{ad}值可加性并不很好。此外,配煤的实测干燥无灰基挥发分(V_{daf})有 50%的煤样低于单煤的理论加权平均值,其降低的幅度在 0.03% ~ 1.10%之间,其他 5 组配煤样的实测 V_{daf}值高出单煤的理论加权平均值 0.02% ~ 0.49%,对 10 组配煤的 V_{daf}平均实测值比其理论加权值降低 0.012MJ/kg,从而表明配煤 V_{daf}的可加性也较好,且总的趋势是实测 V_{daf}值平均低于理论计算值约 0.06%。关于测定挥发分后的焦渣特征(CRC),原为判定其残渣结焦性的定性指标,共划分成呈粉状的一级至强膨胀的 8 级。这次对配煤的 CRC 也作了可加性的探索,发现尽管它是定性指标,却有较好的可加性,即实测的 CRC 值与其理论加权平均值之差最小的为 0.1 级,最大的为 0.5 级,表明采用单煤的理论加权平均 CRC 值基本可以用来判定其配煤的焦渣特征(CRC)。

(四)配煤硫分的可加性

从表 7 - 4 - 2 中看出,配煤的实测干基全硫含量($S_{t,d}$)与其理论加权平均值之差均在 0.00% ~ 0.05%之间,表明该指标亦具有很好的可加性。

(五)配煤发热量的可加性

由表 7 - 4 - 3 看出,在 10 组配煤实测干基高位发热量($Q_{gr,d}$)中,有 4 组比其单煤的理论加权平均值偏低,另有 6 组偏高。其 4 组配煤的实测 $Q_{gr,d}$。值偏低的幅度在 0.130 ~ 0.309MJ/kg 之间,平均偏低 0.206MJ/kg;偏高的 6 组配煤实测 $Q_{gr,d}$值的偏高幅度为 0.039 ~ 0.225MJ/kg,平均偏高 0.081MJ/kg。所以,总的趋势是配煤的实测 $Q_{gr,d}$值与其单煤的理论加权平均值之差在 0.20MJ/kg 以下,也就是说配煤的 $Q_{gr,d}$是符合能量守恒定律的。但配煤的实测空气干燥基高位发热量($Q_{gr,ad}$)有 70%的试样高于其单煤的理论加权 平均值,其最大差值为0.385MJ/kg,这主要是与配煤的实测水分(M_{ad})普遍低于其理

表 7-4-3 某动力配煤场发热量可加性试验结果

单位:MJ/kg

编号	煤样产地项目	$Q_{b,ad}$	理论	差	$Q_{b,d}$	理论	差	$Q_{gr,ad}$	理论	差	$Q_{gr,d}$	理论	差	$Q_{gr,daf}$	理论	差
P01	神华(原)	28.684			31.256			27.980			30.490			32.550		
P02	林西洗末(原)	25.418			25.597			23.844			24.013			32.817		
P03	永城(原)	15.220			15.493			13.920			14.169			28.092		
P04	神华 29、林西 35、永城 36	22.708	22.694	0.014	23.466	23.460	0.006	21.523	21.471	0.052	22.241	22.196	0.046	31.503	31.484	0.019
P05	山优(原)	30.176			3.335			29.354			30.482			33.218		
P06	山优 30、神华 10、永城 60	21.090	21.053	0.037	21.700	21.680	0.020	20.018	19.956	0.062	20.597	20.550	0.047	30.778	30.779	−0.001
P07	荆各庄(原)	20.404			20.893			9.839			20.315			30.372		
P08	鑫源(原)	20.161			20.476			9.138			19.437			30.572		
P09	山优 37、荆各庄 10、鑫源 53	23.894	23.891	0.003	24.295	24.483	−0.188	23.033	22.988	0.045	23.420	23.558	−0.138	31.548	31.749	−0.201
P10	柳江曹山矿(原)	17.907			18.272			17.410			17.765			31.034		
P11	神华 33、林西 47、柳江 20	25.009	24.994	0.015	25.753	25.885	−0.132	23.913	23.922	−0.010	24.624	24.776	−0.152	32.236	32.443	−0.207
P12	山优 24、神华 10、荆各庄 66	23.515	23.577	−0.062	24.069	24.371	−0.302	22.922	22.937	−0.015	23.462	23.709	−0.247	31.127	31.273	−0.146
P13	乡优(原)	28.058			29.215			27.129			28.248			32.924		
P14	山优 31、乡优 10、鑫源 59	24.202	24.055	0.147	24.638	24.660	−0.022	23.338	23.104	0.233	23.758	23.685	0.073	31.739	31.838	−0.099
P15	大优(原)	29.773			31.222			28.873			30.278			32.851		
P16	大优 10、山优 23、荆各庄 67	23.781	23.588	0.193	24.266	24.289	−0.022	23.176	22.931	0.245	23.649	23.612	0.037	31.310	31.464	−0.154
P17	榆林(原)	28.332			30.839			27.615			30.059			32.462		
P18	山优 30、榆林 10、永城 60	20.884	21.018	−0.134	21.282	21.663	−0.381	19.834	19.920	−0.086	20.211	20.531	−0.320	30.429	50.765	−0.336
P19	山优 25、乡优 10、荆各庄 65	23.958	23.612	0.346	24.474	24.303	0.171	23.332	22.947	0.385	23.835	23.618	0.216	31.49	31.525	−0.034
P20	榆林 32、林西 28、鑫源 40	24.531	24.248	0.283	25.101	25.105	−0.004	23.484	23.169	0.315	24.029	23.989	0.042	31.778	31.909	−0.132

论加权平均值等因素有关。配煤的实测 $Q_{gr,daf}$ 也有 80% 试样比其理论加权平均值偏低，最大偏低值为 0.336MJ/kg，其余 20% 试样的实测 $Q_{gr,daf}$ 值比其理论加权平均值增高，其最大增值为 0.19MJ/kg。所以从总的来看，配煤的实测 $Q_{gr,daf}$ 值与单煤的理论加权平均值甚为接近，具有较好的可加性。

总之，配煤的实测干基高位发热量（$Q_{gr,d}$）比其单煤的理论加权平均值稍低，而 $Q_{gr,ad}$ 和 $Q_{gr,daf}$ 值又稍增高，这直接与配煤的实测 M_{ad} 值普遍比其单煤的理论加权平均值偏低有关，但 $Q_{gr,d}$ 的降低值或 $Q_{gr,ad}$ 和 $Q_{gr,daf}$ 的增高值的幅度均不大。至于配煤的实测收到基低位发热量，由于其 M_t 值随时都会有所变化，因而与其单煤的理论加权平均值之间必然会有不同程度的差异。

以上试验结果表明，无论是配煤的实测 A_d、V_d、CRC、$S_{t,d}$ 或是 $Q_{gr,d}$，均与其单煤的理论加权平均值相差不大，因而配煤的一些主要煤质指标原则上均可按其单煤的理论加权平均值进行计算。

（六）配煤灰熔融性特征温度的可加性

由于各种单煤的灰分产率（A_d%）不同，因而在配煤的灰熔融性温度的计算中还必须考虑不同单煤的灰分产率（A_d），其 ST（软化温度）及 FT（流动温度）和 DT（变形温度）需按以下公式计算：

$$\text{ST、FT 或 DTC（配煤）} = \Sigma[(\text{A、B、C、……几种单煤的配比}) \times (\text{A、B、C、……几种单煤的}\frac{100 - M_{ad}}{100}) \times (\text{A、B、C、……几种单煤的 } A_d) \times (\text{A、B、C、……几种单煤的 ST、FT 或 DT})] \div [\Sigma(\text{A、B、C、……几种单煤的配比} \times \frac{100 - M_{ad}}{100}) \times (\text{A、B、C、……几种单煤的 } A_d)]$$

关于煤灰熔融性特征温度是否具有较好的可加性，这主要取决于其单煤的矿物组成（常以煤灰的组成成分表示）。如各种单煤的煤灰成分均是 Al_2O_3 占 35% 以上，则其每种单煤的软化温度（ST）和流动温度（FT）一般都在 1400℃以上，其配煤的 ST 和 FT 温度则也必然会在 1400℃以上，这种煤灰的 ST 及 FT 温度就具有较好的可加性。有些煤灰软化温度（ST）大于 1400℃的煤样，其煤灰组成中的 CaO 占 40% 以上，当这种煤灰与 Al_2O_3 为主的高熔融性煤灰（ST 大于 1400℃）配合时，其配煤的 ST 有的就会明显低于 1400℃，因为这两种煤配合后的煤灰成分中其 Al_2O_3 和 CaO 含量均有明显降低，因而其软化温度必然会有较大幅度下降，这种煤灰的 ST 及 FT 温度也就不具有可加性。有些高熔融性煤灰（ST 大于 1400℃）中的组成成分系以 SiO_2 为主，其含量达 65% 以上，当这种煤与以 CaO 含量很高或 Al_2O_3 较高的高熔融性煤灰配合时，由于配煤灰中的 SiO_2 和 CaO 或

Al_2O_3 的含量均有明显下降，这时其煤灰软化温度也就会降至 1400℃以下，因而这种类型的煤灰熔融性也就不具有可加性。关于煤灰的变形温度（DT）是否具有可加性的问题，虽没作过系统研究，但总的趋向是有的可加性不好，也有的具有一定可加性，因为某些含 Al_2O_3 在 40%以上，其 DT 值却低至 1150℃以下（其 ST 大于 1500℃），而另一些 Fe_2O_3 和 CaO 含量较高的煤灰，其 DT 值却比这种高 Al_2O_3 煤灰的还高，因而这些煤灰的 DT 温度也就没有较好的可加性。

为了考查配煤的 10 种单煤及其配煤的灰熔融性特征温度（DT、ST 及 FT）是否具有可加性，我们系统地作了上述 10 种单煤及其 10 组配煤的灰熔融性 DT、ST 和 FT3 种特征温度，以考查其配煤的实测 DT、ST 和 FT 温度与其单煤的理论加权平均值之间是否具有较好的可加性。试验结果如表 7－4－4 所示。

表 7－4－4　配煤灰熔融性特征温度（℃）可加性试验结果汇总

编号	煤种名称	DT	理论	差	ST	理论	差	FT	理论	差
P01	神华	1210			1220			1230		
P02	林西	1500			1500			1500		
P03	永城	1500			1500			1500		
P04	山优	1500	1483	17	1500	1483	17	1500	1484	16
P05	荆各庄	1260			1300			1370		
P06	鑫源	1500	1477	23	1500	1480	20	1500	1486	14
P07	曹山	1500			1500			1500		
P08	乡优	1500			1500			1500		
P09	大优	1500	1472	28	1500	1477	23	1500	1485	15
P10	榆林	1460			1500			1500		
P11	配煤	1500	1461	39	1500	1476	24	1500	1477	23
P12	配煤	1500	1474	26	1500	1477	23	1500	1483	17
P13	配煤	1360			1420			1440		
P14	配煤	1500	1469	31	1500	1476	24	1500	1484	16
P15	配煤	1250			1270			1320		
P16	配煤	1500	1474	26	1500	1478	22	1500	1485	15
P17	配煤	1140			1160			1180		
P18	配煤	1480	1475	5	1500	1478	22	1500	1484	16
P19	配煤	1500	1473	27	1500	1479	21	1500	1486	14
P20	配煤	1500	1467	33	1500	1469	31	1500	1471	29

注：各组配煤样号中的各种煤的配比（%）与表 7－4－2 中的相同。

从表 7－4－4 中明显看出各组配煤的实测煤灰熔融性结果，DT、ST 或是 FT 虽都比

其单煤的理论加权平均值有不同程度的增高，但都在实验室测定误差以内。如配煤实测的 DT 温度普遍比其单煤的理论加权平均值高出 5～39℃，平均高出 25.5℃ 配煤的实测 ST 温度也均高出其单煤的理论加权平均值 17～31℃，平均高出 22.7℃ 配煤的实测 FT 温度也比其理论加权平均值高出 14～29℃，平均高出 17.5℃。在参加配煤的 10 种单煤中，有 4 组的 DT、5 组的 ST 及 FT 温度均在 1500℃以上，而大于 1500℃的温度是个未确定的数字，也可能是 1501℃、1550℃、1600℃，甚至是 1700℃，利用特高灰熔融性的煤与低灰熔融性煤相配合时，其配煤的灰熔融性 DT、ST 及 FT 的理论加权平均值也就都成为一个大于 1500℃的未确定数字。总的看来，由这次试验的 10 种单煤组成的配煤实测灰熔融性特征温度均仅稍高于单种煤灰的理论加权平均值，且差值甚小，总趋势是 DT 值高出稍多，FT 值高出最少，从而表明由各种单煤计算出的配煤软化温度（ST）和流动温度（FT）在实际使用中都将只会稍有增高而不会降低，十分有利于发电煤粉锅炉、工业锅炉和窑炉的燃烧。

（七）配煤灰成分的可加性

与计算配煤 ST（FT 或 DT）值的相同原理，在计算配煤灰成分时也同样需考虑各种单煤的灰分产率（%）因素。因此，配煤灰成分（SiO_2、Al_2O_3……等）需按以下公式计算：

SiO_2、Al_2O_3……%（配煤）= Σ[（A、B、C、……几种单煤的配比）×（A、B、C、……几种单煤的$\frac{100-M_{ad}}{100}$）×（A、B、c、……几种单煤的 A_d）×（A、B、C、……几种单煤的 SiO_2、Al_2O_3……等灰成分）]÷[∑（A、B、C、……几种单煤的配比×$\frac{100-M_{ad}}{100}$）×（A、B、C、……几种单煤的 A_d）]。

表 7－4－5 列出了 6 种配煤灰成分的实测值与单煤的理论加权平均值对比，可以看出，SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 等主要成分的实测值与计算的理论值基本一致，仅 CaO 稍有差异，但也发现有系统的偏高或偏低值，这显然是由于实验误差过大所致。因此，总的来说，配煤灰成分与其单煤间具有可加性。

表 7－4－5　配煤的灰成分实测值与其理论计算值的关系

配煤方案		灰成分分析（%）					配煤矿点及其配比
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	
1#	实测	53.54	30.70	5.51	3.58		兖州 1 号 30%、淮南 40%、刘桥 30%
	计算	52.09	29.19	6.47	6.22		
2#	实测	52.94	24.86	10.49	11.69		兖州 2 号 30%、长广 30%、义马 40%
	计算	51.28	24.47	6.70	9.67		

配煤方案		灰成分分析(%)					配煤矿点及其配比
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	
3#	实测	49.84	28.01	7.27	5.95		黄陵煤 30%、兖州 2 号 40%、大同混 30%
	计算	49.47	26.67	8.02	9.17		
4#	实测	49.35	29.30	10.16	3.80		枣庄煤 20%、晋城 40%、长广 40%
	计算	51.05	30.77	8.08	6.45		
5#	实测	52.24	26.65	7.10	4.20	1.27	黄陵煤 50%、兖州 1 号 50%
	计算	47.31	23.44	10.79	9.32	1.84	
6#	实测	51.88	24.01	5.19	7.89	2.04	刘桥煤 50%、义马 50%
	1 计算	51.22	22.64	5.31	8.55	2.25	

第二节　动力配煤方案的优化

对一些大城市的燃料公司来说，来煤矿点常多达 10～20 个以上，而不同用户对配煤的发热量、挥发分和硫分、灰熔融性和可磨性等主要质量指标的要求又各不相同，因而在生产配煤时仅用人工进行配煤很难达到使配煤成本价为最低的优化配方，而采用微机进行配煤方案的优化完全能使配煤企业达到配煤成本最低、经济效益最好的优化配方，同时还能取得良好的社会效益和环境效益。

一、动力配煤优化方案设计

无论是动力配煤或炼焦配煤，均有配方的优化问题。动力配煤优化方案的实质是在完全满足约束条件下求解出目标函数的极值问题。具体可分为提出约束条件、确定目标函数和求解 3 个步骤。

(一)提出约束条件

锅炉对燃煤的各种技术参数都有特定的要求。假设有 n 种单煤，要配制具有 m 个技术指标 T 的动力配煤。若第 j 种单煤($j=1,2,3\cdots\cdots n$，下同)经过分析出来的第 i 个技术指标($i=1,2,3\cdots\cdots m$，下同)为 T_{ij}，又假设第 j 种单煤在配煤中的百分率为 X_j，那么用 n 种单煤配制的第 i 个技术指标则为：

$\sum_{j=1}^{n} T_{ij}X_j$　(由 n 种单煤配制的第 i 个技术指标)

如果适应某一炉型的第 i 个技术指标上限为 A_i，下限为 B_i。那么用 n 种单煤配制的第 i 个技术指标就必须在 $A_i \sim B_i$ 之间。即：

$$\sum_{j=1}^{n} T_{ij}X_j \leqslant A_i$$ （用 n 种单煤配制的第 i 个技术指标不能大于配煤技术指标的上限）

$$\sum_{j=1}^{n} T_{ij}X_j \geqslant B_i$$ （用 n 种单煤配制的第 i 个技术指标不能小于配煤技术指标的下限）

一个煤场在单位时间内(如一周、一月、一季或一年)生产动力配煤是有计划的，但往往因缺少某一种单煤而影响配煤计划的完成，或者由于某种优质单煤的进价太高而影响煤场的经济效益，因此还必须限制优质稀缺煤种的配比。若在计划期内计划配煤 S 吨，但是第 j 种单煤只有 H_j 吨，为了保证计划的完成，就必须使第 j 种单煤占配煤的比 X_j 不能大于它的堆存量 H_j 在配煤计划量 S 吨中的比。即：

$X_i \leqslant H_j/S$ （在配煤计划期内，堆存量不足的某种单煤配比不能大于它占配煤计划量的比）

既然是配煤，那么 n 种单煤的配比之和原则上必须达到 100%。即：

$$\sum_{j=1}^{n} X_j = 100\%$$ （n 种单煤相配，使配比之和正好达到 100%）

对于配煤中各种煤的配比必须为正值，即：

$X_j > 0$ （各种单煤的配比必须为正值）

以上就是动力配煤的约束条件。在这些约束条件的限制下，就保证了动力配煤的计划性和适应不同炉型的煤质要求。这些约束条件，实际上是一个具有 n 个未知数的线性方程组。由于配比的技术指标上下浮动在 $A_j \sim B_j$ 之间，所以在一般情况下能满足这些约束条件的解很多，这些解都称为“可行解”。在很多的可行解中，究竟应选择哪一个解呢？这里就有一个追求什么、想达到什么目标的问题。因此就有一个优化目标的问题。

(二)确定目标函数

目标函数的确定是依据实际情况，针对要达到的目标而确定的。

1. 追求配煤的成本最低

对动力配煤场来说，都需要尽量提高经济效益，因而降低配煤的成本应当是配煤企业追求的一项重要经济目标。

假设 n 种单煤相配，第 j 种单煤的成本价为 C_j，其配比为 X_j，则配煤的成本价为 $\sum_{j=1}^{n} C_jX_j$。为了提高配煤企业的经济效益，则应追求其最低。即：

$$MinZ = \sum_{j=1}^{n} C_jX_j$$ （n 种单煤相配，追求配煤的成本价最低）

2. 追求优质高价煤配比最小

优质煤的价格往往较高，在配煤中的比例太多会降低煤场的经济效益，因而在优化配方中尽量少用优质煤，以保证既能生产出质量合格的动力配煤，又能使配煤成本达到最低，为配煤场取得最佳经济效益。

优化原则：

设由 n 种单煤相配，其中第 j 种单煤是优质煤，它的配比为 X_j，在充分满足约束条件的前提下，为了使优质煤尽量少配，则应追求其配比最小。即：

$MinZ = X_j$　（n 种单煤相配时，追求优质煤的配比最小）

3. 追求低质廉价煤配比最大

目前，在我国优质煤价位较高的情况下，应尽量立足于多用当地价廉的低质煤资源，以最大限度地提高配煤企业的经济效益。

假设 n 种单煤相配，其中第 j 种单煤是资源丰富、单位热值进场价（元/100 千焦）最低、供货有保障的单煤，其配比为 X_j，为了使它尽量多掺配，则应追求其配比最大。即：

$MaxZ = X_j$　（n 种单煤相配时，追求低价位煤的配比最大）

（三）建立数学模型

根据上述要求，可将动力配煤优化配方的数学模型归纳为：

约束条件

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} T_{ij}X_j \leqslant A_i & \text{（用 n 种单煤配制的第 i 个技术指标不能大于配煤技术指标的上限）} \\ \sum_{j=1}^{n} T_{ij}X_j \geqslant B_i & \text{（用 n 种单煤配制的第 i 个技术指标不能小于配煤技术指标的下限）} \\ X_j \leqslant H_j/S & \text{（在配煤计划期内，数量不足的单煤配比不能大于它占配煤计划量的比）} \\ \sum_{j=1}^{n} X_j = 100\% & \text{（由 n 种单煤相配，配比之和必须达到 100%）} \\ X_j > 0 & \text{（各种单煤的配比不能为零）} \end{cases}$$

目标函数

$$\begin{cases} (1)\ MinZ = \sum_{j=1}^{n} C_jX_j & \text{（n 种单煤相配，追求配煤成本价最低）} \\ \text{或者：}(2)\ MinZ = X_j & \text{（n 种单煤相配，追求优质煤配比最小）} \\ \text{或者：}(3)\ MaxZ = X_j & \text{（n 种单煤相配，追求低质煤配比最大）} \end{cases}$$

（四）优化配方的求解

确定数学模型后，剩下的问题是如何求解。求解的方法有很多种，较常用的有图解法和单纯形法。下面仅举一例来进行简单说明。

有 3 种单煤，经化验分析得到的各项技术指标详见表 7－4－6，问怎样相配既能符合

该表提出的动力配煤各项技术指标的要求，同时又能使其原料成本价最低（不包括加工费）？

表 7－4－6　3 种单煤及动力配煤要求的各项技术指标

技术指标 / 配煤矿点	M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（kcal/kg）	HGI	ST（℃）	原料成本价元/t
潞安	7.78	20.43	17.04	4	0.33	5974	85	1400	255.00
黄陵	10.87	25.41	33.62	4	2.32	5177	54	1290	244.30
大同	3.05	25.63	34.04	3	0.47	5515	50	1450	220.75
要求配煤	≤7.00	—	≥23.00	≤5	≤0.80	≥5500	≥55	≥1300	最低

设潞安煤的配比为 X_1，黄陵煤的配比为 X_2，大同煤的配比为 X_3，根据动力配煤数学模型列出线性规划方程如下：

1. 约束条件（1）挥发分（V_{daf}）下限范围：

$$17.04X_1 + 33.62X_2 + 34.04X_3 \geqslant 23$$

（2）发热量（$Q_{net,ar}$）下限范围：

$$5974X_1 + 5177X_2 + 5515X_3 \geqslant 5500$$

（3）焦渣特征（CRC）上限范围：

$$4X_1 + 4X_2 + 3X_3 \leqslant 5$$

（4）灰熔融性 ST 下限：

$$1400X_1 + 1290X_2 + 1450X_3 \geqslant 1300$$

（5）全水分（M_t）上限范围：

$$7.78X_1 + 10.87X_2 + 3.05X_3 \leqslant 7$$

（6）HGI 下限范围：

$$85X_1 + 54X_2 + 50X_3 \geqslant 55$$

（7）硫分（$S_{t,d}$）上限值：

$$0.33X_1 + 2.32X_2 + 0.47X_3 \leqslant 0.80$$

（8）配比线：

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1（100\%）$$

2. 目标函数为：$MinZ = 255X_1 + 244.3X_2 + 220.75X_3$

采用计算机求算其最优解。当电子胶带秤的称量精度为 1% 时，其最佳配比为 X_1（潞安煤）= 0.13、X_2（黄陵煤）= 0.11、X_3（大同煤）= 0.76，即潞安煤配入量占 13%、黄陵

煤配比为 11%、大同煤占 76%。

从以上列出的各种单煤的煤质指标看，潞安煤的挥发分较低、硫分也低，但灰熔融性温度较高；黄陵煤的硫分较高，水分也较大，但灰熔融性温度也较低，这两种煤单种燃烧时都不是很理想；此外，大同煤的水分较低，挥发分也较高，但可磨性(HGI)较低。把这 3 种煤配合后，即能达到取长补短的目的，有利于工业锅炉和窑炉及电厂煤粉锅炉的正常燃烧。

3. 优化配方验证

(1)挥发分：

$17.04 \times 0.13 + 33.62 \times 0.11 + 34.04 \times 0.76 = 31.78$(%)

(2)发热量：

$5974 \times 0.13 + 5177 \times 0.11 + 5515 \times 0.76 = 5537$(kcal/kg)

(3)焦渣特征：

$4 \times 0.13 + 4 \times 0.11 + 3 \times 0.76 \approx 3$

(4)灰熔融性 ST：

$1400 \times 0.13 + 1290 \times 0.11 + 1450 \times 0.76 = 1426$(℃)

(5)全水分：

$7.78 \times 0.13 + 10.87 \times 0.11 + 3.05 \times 0.76 = 4.50$(%)

(6)HGI：

$85 \times 0.13 + 54 \times 0.11 + 50 \times 0.76 = 55$

(7)硫分：

$0.33 \times 0.13 + 2.32 \times 0.11 + 0.47 \times 0.76 = 0.66$(%)

从以上验证可以看出，各项技术指标均符合指定的动力配煤优化方案的要求，而配煤的最低成本价为：

$225 \times 0.13 + 244.3 \times 0.11 + 220.75 \times 0.76 = 227.79$(元/t)

这是个一般性的例子，在动力配煤的实际生产中遇到的问题有的可能比这要复杂得多，但其求解的原理则是相同的。

二、利用电子表格 EXCEL5.0 求解动力配煤优化方案中的线性规划问题

在动力配煤中进行优化配方时常需用到计算复杂的线性规划问题。如利用电子表格 EXCEL5.0 具有线性规划的功能，可省去大量编程工作和复杂命令。使用者即使数学造诣不深，或不熟悉计算机语言，只要正确领会问题及合理的构造模型就能顺利解决，具

有直观易学、方便快捷的特点。下面介绍配煤优化计算示例。

(一)计算举例

如有 8 种原料煤(A ~ H 煤),其煤质分析结果与符合工业锅炉要求的煤质数据列入表 7 – 4 – 7。试用线性规划方法求出符合配煤指标要求的最佳配煤方案,即吨煤成本价最低的配煤方案。

表 7 – 4 – 7　8 种单煤及用户要求的配煤指标

煤种	V_{daf} (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	CRC (1 ~ 8)	ST (℃)	M_{ar} (%)	A_{ar} (%)	粒度(6 ~ 25mm)(%)	成本价 C(元/t)
A 煤	22.74	30.68	8	1450	4.5	10	85	185
B 煤	54.27	11.93	4	1250	18	35.47	50	90
C 煤	50.15	28.75	6	1420	8.5	15	80	170
D 煤	23.75	30.46	4	1250	8	16	80	155
E 煤	45.85	22	3	1300	13	24	60	135
F 煤	27	14.65	2	1350	11.5	31.5	35	120
G 煤	26	28.64	1	1250	13.5	17	80	145
H 煤	32	12.63	4	1300	9	32	60	110
配煤指标	25 ~ 40	19.65 ~ 23.84	2 ~ 5	> 1350	8 ~ 12	10 ~ 30	> 60	

通过建立线性规划模型,利用电子表格 EXCEL5.0 中的线性规划求解模块,可获得最优解,即预测出 A ~ H 这 8 种原料煤在配煤中的配比、所得配煤的技术指标及配煤最低价格。

(二)表格设置

在 EXCEL5.0 空白工作簿上建立数据表,如表 7 – 4 – 8。

表 7 – 4 – 8　表格设置及规划计算结果

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	V_{daf} (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	CRC (1 ~ 8)	ST (℃)	M_{ar} (%)	A_{ar} (%)	粒度(6 ~ 25mm)(%)	成本价 C(元/t)	分配量
A 煤	22.74	30.68	8	1450	4.5	10	85	185	0.166
B 煤	54.27	11.93	4	1250	18	35.47	50	90	3.292
C 煤	50.15	28.75	6	1420	8.5	15	80	170	0.231
D 煤	23.75	30.46	4	1250	8	16	80	155	0
E 煤	45.85	22	3	1300	13	24	60	135	0
F 煤	27	14.65	2	1350	11.5	31.5	35	120	0.235

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	V_{daf} (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	CRC (1~8)	ST (℃)	M_{ar} (%)	A_{ar} (%)	粒度(6~25mm) (%)	成本价 C(元/t)	分配量
G煤	26	28.64	1	1250	13.5	17	80	145	0
H煤	32	12.63	4	1300	9	32	60	110	0.073
配煤指标	25~40	19.65~23.84	2~5	>1350	8~12	10~30	>60		
配煤计算指标	40	19.65	4.66	1350	11.35	25.28	60	132.93	1.00

1. 各数据格含义与公式说明

(1)单元格域 J3:J10

A、B……I、J8 种煤在配煤中的分配量(可变单元格),(J3:J10 表示单元格位置,从 J3 到 J10)。

(2) B12 = B3 * J3 + B4 * J4 + …… + B10 * J10

配煤挥发分计算(约束函数公式)。

(3) C12 = C3 * J3 + C4 * J4 + …… + C10 * J10

配煤发热量计算(约束函数公式)。

(4) D12 = D3 * J3 + D4 * J4 + …… + D10 * J10

配煤焦渣特征计算(约束函数公式)。

(5) E12 = E3 * J3 + E4 * J4 + …… + E10 * J10

配煤灰熔融性软化温度计算(约束函数公式)。

(6) F12 = F3 * J3 + F4 * J4 + …… + F10 * J10

配煤水分计算(约束函数公式)。

(7) G12 = G3 * J3 + G4 * J4 + …… + G10 * J10

配煤灰分计算(约束函数公式)。

(8) H12 = H3 * J3 + H4 * J4 + …… + H10 * J10

配煤粒度计算(约束函数公式)。

(9) J12 = J3 + J4 + …… + J10

配煤中 A、B……H 种煤的配比总量(约束函数公式)。

(10) I12 = I3 * J3 + I4 * J4 + …… + I10 * J10

配煤吨煤价格计算(目标函数公式)。

2. 操作步骤

(1)在工作底稿上建立问题模式,即设置表格,分别录入目标函数和约束函数(注:录入目标函数是指在单元格 I12 中输入“ = I3 * J3 + I4 * J4 + I5 * J5 + I6 * J6 + I7 * J7 + I8 * J8 + I9 * J9 + I10 * J10 ”。录入约束函数也是指在其单元格中输入包括等号在内的函数表达式,如在单元格 B12 中键入“ = B3 * J3 + B4 * J4 + B5 * J5 + B6 * J6 + B7 * J7 + B8 * J8 + B9 * J9 + B10 * J10 ”)。

(2)选中工具菜单,选中‘规划求解’命令,产生‘规划求解参数’对话框。若在‘工具’菜单下没有发现‘规划求解’子菜单,则可选中‘加载宏’命令,选中‘规划求解加载宏’,按‘确定’钮即可使工具菜单中产生‘规划求解’命令项。

(3)在[设定目标单元格]输入栏键入引用地址(本例为 $I$12)。

(4)在‘等于’选项后选最小值(本例为计算价格)。

(5)在[可变单元格]框中键入引用地址(本例为 $J$3:$J$10)。

(6)在[约束]窗口选中‘增加’按钮,产生[增加约束]对话框。

(7)在[单元格引用位置]与[约束值]输入栏中键入约束不等式:本例为($B$12 < = 40)(注:$B$12 为单元格引用位置,40 为约束值,表示配煤的挥发分不能大于 40% 的要求)。

(8)重复上述第(6)和第(7)步,依次输入:

$B$12 > 25 配煤挥发分不能小于 25% 的要求;

$C$12 < = 23.84 配煤发热量不能大于 23.84MJ/kg 的要求;

$C$12 > 19.65 配煤发热量不能小于 19.65MJ/kg 的要求;

$D$12 < = 5 配煤焦渣特征上限要求;

$D$12 > 2 配煤焦渣特征下限要求;

$E$12 > = 1350 配煤灰熔融性软化温度下限要求;

$F$12 < = 12 配煤水分上限要求;

$F$12 > 8 配煤水分下限要求;

$G$12 < = 30 配煤灰分上限要求;

$G$12 > 10 配煤灰分下限要求;

$H$12 > = 60 配煤粒度下限要求;

$J$12 = 1 配煤配比要求;

$J$3:$J$10 > = 0 各种单煤配比量要求。

(9)选中‘确定’按钮,结束约束值的输入,回到[规划求解选项]对话框。

(10)选中‘求解’按钮,开始计算。

(11)选中“保留计算结果”,计算结果将自动填入表 2 相应单元格中。

计算结果为表 7－4－8 中的 J3:J10 及 I12 栏数据,J3、J4、…、J10 单元格中的数据为满足配煤指标要求,同时获得最低成本价时,配煤中 A、B、…、H 种煤的计算分配值。I12 为所获得的最低成本价,即 132.98 元/t。B12、C12、D12、E12、F12、G12、H12 单元格分别为配煤的计算指标,也为程序自动填入。本例中,D、E、G 种煤的计算配比为零,即采用其他 5 种单煤就可获得最优配比。但在实际配煤生产中一般不超过 3 种煤相配。

3. 几点说明

(1)可变单元格即为线性规划方程中的规划变量,也是计算结果,初始时应为 0 或空格。

(2)目标函数、约束函数表达式的输入是地址后面包括等号在内的所有函数表达式。

(3)计算表中的所有原始数据和约束条件都可以根据具体条件加以修改(如:原料煤价格及配煤指标要求发生变化),修改后需按“求解”按钮,重新计算新条件下的最优配比。

(4)可以通过对单元格数据(配比量)的修改,观察其他指标的相应变化。如增加 A 种煤的配比,考察其对配煤的指标及相应价格的影响。

(5)实际应用过程可能会有比举例中更为复杂的情况,但本例已包含了一般情况。

(6)EXECL5.0 可计算 200 个变量(本例仅为 8 个变量,即单元格 J3、J4、…、J10),每个变量最多有 2 个约束条件,全部约束条件不能超过 600 条(本例为 14 条)。

三、配煤方式与配煤燃烧特性的评价

(一)配煤方式

采用不同煤种配煤燃烧时,配合的均匀性是必须首先考虑的问题。究竟采用何种配煤方式,取决于各用煤企业的实际情况,如煤场设施、面积大小,锅炉容量等。目前,常用的主要配煤方法有体积法和质量法。体积法是将一定体积的一种煤与特定体积的另一种(或二种)煤混合。质量法是将一定质量的一种煤与其他 1～2 种特定质量的煤配合达到预定比率。配煤方式主要有仓混式、床混式、带混式及炉内直接混合方式等。

1. 仓混式系统

此种方式是将不同的煤种在混煤仓内混合。混合仓一般采用多室结构,不同煤贮存在不同室内,按预先设置好的比例取出混合。仓混式配煤系统占地面积小,混配简单、方便,扬尘少,噪声低,但混煤量少,不适合于大型电厂。

2. 床混式系统

此种方式是在煤场进行。将不同的煤种按一定方式分层堆放在一起,然后由取煤机纵向取煤。堆煤的层数决定了混煤的均匀性。床混式系统混煤量大,方式简单,不需要特殊设备,均匀性好,可长时间大量混煤。对容量大、煤种较固定的电厂,这种方式通常最有效、最经济。最大缺点是对煤质变化的反应能力差,必须准确地掌握来煤质量,以便改变煤层中各种煤的比例。

3. 带混式系统

此种方式是在运输带上进行,从 2 个或多个煤堆上按一定比例取出并置于一条输送带上。其突出优点是煤质易于调节,当煤质变化时,只要调节不同煤堆的取煤比例,就可调节配煤煤质 缺点是系统较复杂,需要多条输送带,基建投资较大。

4. 炉内直接混合方式

将不同煤按一定比例从炉膛的不同位置送入。如在 W 型炉膛中将烟煤从下部一次风口送入,而将无烟煤从上部温度较高的区域送入,这样增高了无烟煤的着火条件,保证无烟煤的充分燃烧和燃尽。有些电厂则在燃烧器入口处将各种煤混合,并在入口处将不同煤种切换,增高了煤种的选择性。采用此方法需要对配煤与锅炉的适应性作更深入的研究和较高的运行管理水平。

(二)动力配煤的燃烧特性评价

动力配煤的燃烧特性评价与一般动力用煤相同,指煤的着火特性、挥发分释放特性、燃尽特性、热解特性、表面积和孔隙特性、积灰结渣特性、磨损特性和污染物的排放特性等。对锅炉安全经济运行最重要的是煤的着火稳定性、燃尽性和结渣特性。依据传统的挥发分产率来评价煤的燃烧特性,即挥发分产率越高,其着火和燃尽性能越好。这在一定程度上可以,但有些煤种往往与实际运行出入较大,特别是挥发分产率相近的劣质贫煤,有时会有相反的结果。因为燃烧特性除受化学因素影响外,还有物理因素影响,物理结构不同的煤可能有相同的化学组成。因此,目前多用燃料比(FC/V)来判别配煤的燃烧特性,通常认为燃料比小于 2.0(以 1.8～2.0 之间为宜)的配煤燃烧性能较好。根据配煤的燃料比,还可以利用下式大致估算出配煤的着火温度。

$$t(℃) = 33.24(FC/V) + 439.7$$

上式的相关系数为 0.8950。

根据着火温度,还可进一步判别配煤的着火难易程度。配煤的着火难易程度主要与各种单煤的燃料比大小有关,燃料比大的煤配入量较多,则对其着火不利。所以,在动力配煤中,燃料比大的无烟煤的配比一般不宜超过 35%,如在配煤中加入助燃剂,则无烟煤的配比可以提高到 50%～60%左右。

根据已有的研究结果表明 配煤的着火初始温度与其中高挥发分煤较接近。但当高挥发分煤比率较低时,此时的着火不稳定。此外,在通常燃烧方式下,配煤常比挥发分产率相近的单一煤难于着火,因此配煤时截面热负荷(q_F)及燃烧器区域热负荷(q_{rF})应稍大些。

配煤燃烧时,高挥发分煤首先消耗氧气,低挥发分煤在缺氧的气氛中燃烧,因而燃尽时间比同等挥发分的单一煤种长。当组成配煤的 2 种或 3 种煤的性能差别较大时,配煤的燃尽时间更长。因此,设计燃烧配煤锅炉时,上排一次风喷口中心至屏下的距离 L 应增大,锅炉容积热负荷 q_v 应减小。

配煤的结渣性能较复杂,其特性应由实验来确定。当结渣倾向增加时,应综合考虑着火的情况而减少 q_F 或 q_{rF}。

配煤燃烧时对污染物的排放有异于单一煤种。对 NO_x 而言,配煤燃烧后期的排放量比单一煤种大,在降低 NO_x 与提高其燃尽程度存在矛盾时,可采用多级燃烧方法解决。配煤燃烧时,SO_x 排放主要由煤质决定,同时还与配煤灰成分中的 CaO 等碱性组分的多少有关,对锅炉各参数的影响与单一煤种有时会有一定差异。

配煤的着火稳定性受炉膛截面热负荷 q_F、燃烧器区域壁面热负荷 q_{rF}、燃烧器配风方式及其工况参数(如风温、风速、煤粉细度、过量空气系数)等的影响 在炉膛结构方面,截面热负荷 q_F 及燃烧器区域热负荷 q_{rF} 起决定性作用,当($q_F + q_{rF}$)增大时,配煤的着火稳定性提高。

配煤在炉膛内的燃尽性能受炉膛结构参数、炉内火焰的充满程度、过量空气系数、燃烧器配风和混合条件、燃烧器出口距离等的影响。其中最主要的因素是煤粉在炉内的停留时间 τ。停留时间越长,配煤的燃尽性能越好。

配煤在炉内的结渣性能受到燃烧器区域的温度工况(与炉膛截面热负荷 q_F、燃烧器区域热负荷 q_{rF}、空气温度、燃烧器配风工况等有关)和燃烧过程中气流流动工况(与炉膛几何形状、燃烧器布置和燃烧器配风工况等有关)的影响。在炉膛结构参数方面,q_F 及 q_{rF} 起决定作用,$q_F + q_{rF}$ 越大,炉内结渣的倾向越大。从结构参数方面看,提高着火稳定性与降低结渣性能是相互矛盾的,因此在进行锅炉设计时,在保证着火稳定性的同时,必须顾及到其结渣倾向。

对特定的一台锅炉燃烧配煤时,应以设计煤种或校核煤种为依据,根据锅炉的结构参数选择合适的煤种和配合比例。与此同时,也应该在实验室对配煤的燃烧特性进行研究,然后协调各种特性,并进行锅炉结构参数的设计和运行参数的选择。

常用的煤燃烧特性评价指标见表 7 – 4 – 9。近年来,我国在煤的燃烧特性研究上取

得了较大进展，并在一些大型电站实际运行经验的基础上，建立了我国煤燃烧特性与锅炉适应性的关系。对于电站，必须及时知道所烧配煤的煤质特性和燃烧特性，以指导锅炉运行。最大限度地使配煤的燃烧特性与电站锅炉设备相适应。

表 7－4－9　单煤及配煤燃烧特性的评价指标

指标		定义式	说明
着火稳定性	挥发分释放特性指数 D	$D=(d\omega/dt)_{max}/T_{1max}\times\Delta T_{1/3}$	$(d\omega/dt)_{max}$ 挥发分最大释放速度 T_{1max} 最大释放速度时的对应温度 $\Delta T_{1/3}$ $(d\omega/dt)/(d\omega/dt)_{max}=1/3$ 的温度区间
	着火性能指数 F_z	$F_z=(V_{ad}+M_{ad})^2FC_{ad}\times 100$	根据分析煤样的工业分析结果
	着火稳定性指数 W_1	$W_1=a/T_i+b/T_{1max}+c(d\omega/dt)_{max}$	T_i 着火温度； a，b，c 计算常数 其它同上
	燃烧特性指数 S	$S=(d\omega/dt)'_{max}(d\omega/dt)_{mean}/T_1^2\times T_h$	$(d\omega/dt)'_{max}$ 煤焦最大燃烧速度 $(d\omega/dt)_{mean}$ 煤焦平均燃烧速度 T_i 着火温度，T_h 燃尽温度
	燃尽特性指数 W_B	$W_B=10/(aG+bT_{2max}+c\tau+d\tau')$	G 燃烧后期燃烧量 T_{2max} 煤焦燃烧最大速度时的对应温度 τ，τ' 煤和煤焦的燃尽时间 a，b，c，d 根据煤种的计算常数
灰熔融性		DT、ST、FT $T=(DT+4ST)/5$	变形温度、软化温度、流动温度
结渣指标	灰成分	$B/A=\dfrac{Fe_2O_3+CaO+MgO+Na_2O+K_2O}{SiO_2+Al_2O_3+TiO_2}$ $S/A=SiO_2/Al_2O_3$ $G=\dfrac{100\times SiO_2}{SiO_2\times CaO+MgO+Fe_2O_3}$ $F/C=Fe_2O_3/CaO$ $D=\dfrac{CaO+MgO}{CaO+MgO+Fe_2O_3+Na_2O_3+K_2O}$ B/A × S	碱酸比 硅比 硅铝比 铁钙比 白云石比
	灰粘度	粘温特性曲线 T_{cv} T_{250} 塑性粘度温度范围	10～1000Pa.s 临界粘度温度 对应粘度 250Pa.s 时的温度 $T_{cv}-T_{1000}$
	综合结渣指数	$W_s=xC_{12}+y\cdot(C_{B/A}-C_G)+zC_{S/A}$	$C_{12}=12-0.007t2$，$C_G=22.5-0.29G$ $C_{B/A}=0.45=5.2B/A$，$C_{S/A}=1.2S/A-0.9$ x、y、z 随煤种不同的计算常数

指　　标	定　义　式	说　　明
积灰　积灰指标	$H_w = B/A \times Na_2O$	
磨损　磨损指数	$HM = A(SiO_2 + 0.8Fe_2O_3 + 1.35Al_2O_3)$	A 收到基灰分

四、开发动力配煤优化方案的实例

利用微机开发动力配煤优化配方的主要原则是在配煤产品质量指标完全满足用户需要的前提下，尽量以到场价最低的几种单煤为基础进行配煤生产，这样就能使配煤厂获得最大经济效益。

在优化时一般多以 3 种单煤的配煤方案为主，当配煤条件合适时也可采用 2 种单煤的优化配方，这将有利于减少配煤的工序和加工费。有时为了使配煤的质量更加符合某些特殊锅炉燃烧的需要，必要时也可采用 4 种单煤的优化配方，这时就会增加配煤工艺的复杂性及其加工成本。究竟以采用几种煤进行配煤生产为最合适，则要根据配煤生产中的总成本而定。

(一)对配煤优化方案的基本要求

(1)高灰分煤，在配煤时采用‘干燥无灰基挥发分’值，将不能正确地反映其真正的可燃性挥发分。因此，对灰分(A_d)大于 30%的各种单煤，其 V_{daf}值均按以下公式校正：

$$V_{daf}(\text{校正后}) = V_{daf}(\text{实测值}) \times 0.90 - 0.09A_d$$

(2)随着市场对配煤质量要求的变化，对配煤产品的任一煤质指标均可根据需要进行调整。

(3)编制出的应用软件可随时适应来煤矿点及其质量和煤价的变化，及时调整优化配方。

(4)在优化配方中以收到基低位发热量($Q_{net,ar}$)、挥发分(V_{daf})和硫分($S_{t,d}$)3 个指标作为首要约束条件(即主要控制指标)，哈氏可磨性(HGI)、灰熔融特征温度(ST)和全水分(M_t)等则为配煤的辅助控制指标。

(二)配煤低位发热量($Q_{net,ar}$)的正确计算

对配煤收到基低位发热量($Q_{net,ar}$)的计算，过去一直是以各单煤分析基的配比乘以 $Q_{net,ar}$值进行加权平均计算。但最近发现，由于各单煤的配比与发热量($Q_{net,ar}$)不是同一基准，因此需先把配比换算成收到基后再计算加权平均值。配煤的 $Q_{net,ar}$值应按下述方法计算：

(1)先按下列公式把各单煤含分析基水分的配比换算成含收到基水分的配比：

各单煤的收到基配比(%) = 各单煤的分析基配比(%) × $\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_t}$

(2)求出 Σ 各单煤的收到基配比乘以 $Q_{net,ar}$ 结果 ÷ Σ 各单煤的收到基配比。

兹举例计算如下：

矿名	M_t(%)	M_{ad}(%)	分析基配比(%)	收到基配比(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)
甲矿	20.0	5.00	35	41.56	20.49(4900kcal/kg)
乙矿	5.0	3.00	25	25.53	23.00(5500kcal/kg)
丙矿	10.0	6.00	40	41.78	20.07(4800kcal/kg)
配煤			100	108.87	20.92(5013kcal/kg)

如按分析基配比来求算配煤的 $Q_{net,ar}$，则其值为 20.95MJ/kg，它比按收到基配比计算的增高 0.03MJ/kg。但鉴于过去计算的配煤 $Q_{net,ar}$ 值对结果影响不大，故要求不太严格时仍可用原法计算。

(三)要求分别按 3 种、2 种和 4 种单煤相组合的多种不同条件下由微机自动算出各种最优的动力配煤方案

某动力配煤场所用各种单煤的原始数据如表 7－4－10。

表 7－4－10　某动力配煤场配煤用单煤原始数据

矿名	M_t (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1～8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	HGI	ST (℃)	到场价 (元/t)	煤种
A 矿	12.50	8.33	35.63	2	0.53	25.64	52	1240	225	不粘煤
B 矿	9.70	6.71	33.75	3	0.40	27.19	58	1250	225	弱粘煤
C 矿	10.80	15.47	34.24	2	0.57	24.08	50	1250	215	不粘煤
D 矿	14.00	6.26	36.05	1	0.25	25.03	55	1140	220	不粘煤
E 矿	12.00	7.00	35.63	1	0.40	25.26	55	1250	240	不粘煤
F 矿	7.20	34.13	42.88	2	0.79	18.04	85	1500	143	气煤
G 矿	12.10	26.30	25.23	6	1.24	21.43	100	1500	153	焦煤
H 矿	5.01	41.28	6.61	1	0.61	17.35	45	1443	120.33	无烟煤
I 矿	6.01	35.25	35.61	4	0.79	17.14	88	1388	131.40	1/3 焦煤

设约束条件为：能同时满足 $Q_{net,ar}$ 大于 20.91～22.16MJ/kg、V_{daf} 大于或等于 25.00%、$S_{t,d}$ 小于 0.80%、HGI 大于或等于 50、ST 大于 1300℃、焦渣特征 CRC≤5 等多种约束条件下的动力配煤优化方案。

1. 按 3 种单煤组合的优化配方

由微机优化结果表明，能同时满足上述约束条件的‘原始优化配方’达数十个，表 7－4－11 中列出了按原料成本价由小到大排序的部分优化配方（全部优化配方均储存于软盘中）。但由于这些原始优化配方的配比精度均达到小数后两位。显然，这对大宗产品配煤来说，目前市场上的任何一种衡器的称量精度均达不到这样高的要求。为此，又进一步根据实际生产条件的可能将各种原始优化配方的配比精度均调整到 1% 的尺度。经调整后的优化配方已有实际生产的可能，故称之为‘实用优化配方’。

表 7－4－11　某动力配煤场以 3 种煤相配时的原始优化配方示例

方案号	矿名	配煤比（%）	配煤后质量								原料成本价（元/t）
			M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	ST（℃）	
1	B矿	34.54	7.2	27.56	25.00	2	0.58	20.92	59	1391	162.12
	F矿	24.86									
	H矿	40.60									
2	B矿	36.90	7.0	26.78	25.00	3	0.58	20.92	62	1356	162.15
	H矿	34.22									
	I矿	28.88									
3	D矿	28.99	10.4	23.73	32.13	4	0.79	20.92	83	1355	164.60
	G矿	34.79									
	I矿	36.22									
4	B矿	36.72	7.5	24.66	35.65	3	0.65	20.92	77	1349	166.93
	F矿	10.00									
	I矿	53.29									
5	A矿	34.43	9.5	24.20	33.55	4	0.79	20.92	78	1359	167.92
	G矿	19.89									
	I矿	45.68									
6	A矿	10.00	7.7	24.24	35.07	4	0.65	20.92	76	1333	168.04
	B矿	29.15									
	I矿	60.85									
7	B矿	29.76	7.9	23.86	35.10	3	0.62	20.92	76	1322	168.14
	D矿	10.00									
	I矿	60.24									
8	D矿	32.61	11.3	22.79	25.00	3	0.79	21.78	74	1371	168.26
	G矿	47.21									
	H矿	20.18									

计算机优化结果表明，由 3 种煤任意组合的实用优化配方达 21 个。兹将“原料成本价”（实际上为到配煤站的各种单煤的加权平均成本价）最低的前 12 种实用优化配方列于表 7－4－12。

表 7－4－12　某动力配煤场实用优化配方

（按原料成本价排序*，配比精度为 1%）

方案号	矿名	配煤比（%）	配煤后质量								原料成本价（元/t）
			M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	ST（℃）	
1	B矿	37.00	7.0	26.74	25.06	3	0.58	20.93	62	1356	162.27
	H矿	34.00									
	I矿	29.00									
2	B矿	35.00	7.2	27.39	25.18	2	0.58	20.97	60	1390	162.63
	F矿	25.00									
	H矿	40.00									
3	D矿	29.00	10.5	23.71	32.10	4	0.79	20.93	83	1355	164.65
	C矿	35.00									
	I矿	36.00									
4	B矿	37.00	7.5	24.58	35.65	3	0.65	20.95	77	1348	167.19
	F矿	10.00									
	I矿	53.00									
5	B矿	30.00	7.9	23.79	35.10	3	0.62	20.94	76	1322	168.34
	D矿	10.00									
	I矿	60.00									
6	D矿	33.00	11.3	22.68	25.08	3	0.79	21.80	74	1370	168.58
	G矿	47.00									
	H矿	20.00									
7	B矿	31.00	7.6	24.42	34.90	3	0.65	20.95	75	1331	168.78
	C矿	10.00									
	I矿	59.00									
8	B矿	30.00	7.7	23.86	35.05	3	0.63	20.97	76	1333	170.34
	E矿	10.00									
	I矿	60.00									
9	B矿	24.00	8.5	24.76	40.01	2	0.64	20.94	76	1404	170.38
	D矿	10.00									
	F矿	66.00									

方案号	矿名	配煤比(%)	配煤后质量								原料成本价(元/t)
			M_t(%)	A_d(%)	V_{daf}(%)	CRC(1~8)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	HGI	ST(℃)	
10	B矿	25.00	8.2	25.41	39.73	2	0.67	20.93	75	1413	170.70
	C矿	10.00									
	F矿	65.00									
11	E矿	32.00	9.6	23.70	32.71	4	0.79	20.94	81	1375	172.20
	G矿	28.00									
	I矿	40.00									
12	B矿	24.00	8.3	24.84	39.96	2	0.66	20.96	76	1415	172.38
	E矿	10.00									
	F矿	66.00									

＊以后各表的实用优化配方均按原料成本价由小到大排序。

在表 7－4－12 中，以 1 号方案(B 矿煤占 37%、H 矿煤占 34%、I 矿煤占 29%的实用优化配方)的原料成本价最低，为 162.27 元/t。当 1 号配方中有的矿井供煤数量不足时，也可采取 2 号或 3 号方案组织生产，因为 1～3 号方案的原料成本价均相差不大。总之，配煤的主要原则是除了尽量采用以最低原料成本价的配方生产外，还应同时优先考虑采用一些价格较低、煤源容易满足，可以持续生产时间较长的一些优化配方。

为了在电子胶带秤的称量精度达不到 1%时仍能进行生产，我们还按配比的称量精度为 5%时进行任意 3 种煤的实用优化配方(见表 7－4－13)。表 7－4－13 中符合上述约束条件的共有 22 组配方，最后几组配方的原料成本价都高达 180 元/t 左右，而前面几组优化配方的原料成本价都不到 170 元/t，相差达 10 元/t 以上。此外，虽然以 B 矿煤占 35%、F 矿煤占 25%和 H 矿煤占 40%的第 1 方案的原料成本价最低，但根据配煤中无烟煤的配比不能过大的情况来看，该实用优化配方基本上很难实现。表 7－4－13 中的 2 号及 3 号优化配方成本价较高，经济效益相对较小，但需要时也可以组织生产。

表 7－4－13　某动力配煤厂最优实用配方(配比精度为 5%)

方案号	矿名	配煤比(%)	配煤后质量								原料成本价(元/t)
			M_t(%)	A_d(%)	V_{daf}(%)	CRC(1~8)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	HGI	ST(℃)	
1	B矿	35.00	7.2	27.39	25.18	2	0.58	20.97	60	1390	162.63
	F矿	25.00									
	H矿	40.00									

方案号	矿名	配煤比（%）	配煤后质量								原料成本价（元/t）
			M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	ST（℃）	
2	B矿	30.00	7.9	23.79	35.10	3	0.62	20.94	76	1322	168.34
	D矿	10.00									
	I矿	60.00									
3	A矿	35.00	9.5	24.04	33.54	4	0.79	20.97	78	1359	168.48
	G矿	20.00									
	I矿	45.00									
4	D矿	35.00	11.3	22.28	25.29	3	0.77	21.87	73	1363	169.92
	G矿	45.00									
	H矿	20.00									
5	D矿	35.00	10.9	21.97	32.13	4	0.76	21.40	81	1340	169.97
	G矿	35.00									
	I矿	30.00									
6	B矿	30.00	7.7	23.86	35.05	3	0.63	20.97	76	1333	170.34
	E矿混	10.00									
	I矿	60.00									
7	B矿	25.00	8.2	25.41	39.73	2	0.67	20.93	75	1413	170.70
	C矿	10.00									
	F矿	65.00									
8	B矿	25.00	8.5	24.49	39.91	2	0.64	21.03	75	1402	171.20
	D矿	10.00									
	F矿	65.00									
9	A矿	10.00	8.4	24.70	39.87	2	0.67	21.09	75	1412	171.70
	B矿	25.00									
	F矿	65.00									
10	B矿	25.00	8.3	24.56	39.87	2	0.65	21.05	75	1413	173.20
	E矿	10.00									
	F矿	65.00									
11	A矿	10.00	8.0	22.57	34.96	3	0.63	21.51	74	1325	173.52
	B矿	35.00									
	I矿	55.00									
12	D矿	45.00	9.9	21.92	37.63	2	0.55	20.92	72	1304	174.17
	F矿	25.00									
	I矿	30.00									

方案号	矿名	配煤比(%)	配煤后质量								原料成本价(元/t)
			M_t(%)	A_d(%)	V_{daf}(%)	CRC(1~8)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	HGI	ST(℃)	
13	A矿	45.00	9.0	23.02	36.35	3	0.67	21.05	72	1333	174.68
	F矿	10.00									
	I矿	45.00									
14	A矿	30.00	9.2	24.52	39.84	2	0.69	20.92	72	1397	174.80
	C矿	10.00									
	F矿	60.00									
.....											
21	C矿	45.00	8.8	23.52	35.00	3	0.65	21.08	68	1312	179.88
	E矿	10.00									
	I矿	45.00									
22	A矿	35.00	9.5	22.39	39.62	2	0.66	21.42	70	1384	181.40
	E矿	10.00									
	F矿	55.00									

2. 由2种单煤组合的优化配方

由表7-4-14看出，能满足上述约束条件的实用优化配方共有5个(配比精度为1%时)。其中以B矿煤占38%、I矿煤占62%的1号配方的原料成本价最低，为166.97元/t；其次为A矿煤占38%、F矿煤占62%的2号方案，其原料成本价为174.16元/t。由于A矿和B矿煤的到场价相同，而I矿煤的到场价明显低于F矿煤。因而今后在配煤生产时应尽可能多用I矿的廉价低质烟煤。此外，从5号方案看出，以E矿煤占47%、I矿煤占53%的配方的原料成本价最高，为182.44元/t。所以，从配煤场来说，为了取得最大经济效益，今后如采用2种煤配煤时，优质煤资源以尽量多进热值相对较高的B矿煤为好，其次是A矿煤，E矿煤的热值虽不很高，但到场价最高，故尽量不用或少用为好。

表7-4-14　某动力配煤厂最优实用配方(配比精度为1%)

方案号	矿名	配煤比(%)	配煤后质量								原料成本价(元/t)
			M_t(%)	A_d(%)	V_{daf}(%)	CRC(1~8)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	HGI	ST(℃)	
1	B矿	38.00	7.4	24.40	34.90	4	0.64	20.96	77	1336	166.97
	I矿	62.00									
2	A矿	38.00	9.2	24.33	40.13	2	0.69	20.93	72	1401	174.16
	F矿	62.00									

方案号	矿名	配煤比(%)	配煤后质量								原料成本价(元/t)
			M_t(%)	A_d(%)	V_{daf}(%)	CRC(1~8)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	HGI	ST(℃)	
3	B矿	48.00	8.9	25.17	38.73	2	0.68	20.94	68	1380	177.56
	F矿	52.00									
4	E矿	40.00	9.1	23.28	39.98	2	0.63	20.93	73	1400	181.80
	F矿	60.00									
5	E矿	47.00	8.8	21.97	35.62	3	0.61	20.96	72	1323	182.44
	I矿	53.00									

此外，当用2种单煤优化配方的配比精度为5%时共有6个配方(见表7-4-15)。其中以A矿煤占45%、I矿煤占55%的1号配方及B矿煤占45%、I矿煤占55%的2号配方的原料成本价最低，均为173.52元/t，但仍比表7-4-14中的1号方案的原料成本价高出6.55元/t。这表明，从2种煤相配的原料成本价来看，以配比精度为1%时的较低。

表7-4-15　某动力配煤厂最优实用配方(配比精度为5%)

方案号	矿名	配煤比(%)	配煤后质量								原料成本价(元/t)
			M_t(%)	A_d(%)	V_{daf}(%)	CRC(1~8)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	HGI	ST(℃)	
1	A矿	45.00	8.9	23.14	35.62	3	0.67	20.97	72	1321	173.52
	I矿	55.00									
2	B矿	45.00	7.7	22.41	34.77	4	0.61	21.66	75	1326	173.52
	I矿	55.00									
3	C矿	55.00	8.6	24.37	34.86	3	0.67	20.96	67	1312	177.38
	I矿	45.00									
4	A矿	45.00	9.6	22.52	39.62	2	0.67	21.46	70	1383	179.90
	F矿	55.00									
5	E矿	40.00	9.1	23.28	39.98	2	0.63	20.93	73	1400	181.80
	F矿	60.00									
6	C矿	55.00	9.2	23.87	38.13	2	0.67	21.36	66	1363	182.60
	F矿	45.00									

3. 由任意4种单煤组合的优化配方

经计算机优化结果表明，由任意4种煤组合的优化配方共有39组(精度为1%时)。其中以B矿煤占27%、F矿煤占10%、G矿煤占23%、I矿煤占40%的1号方案的原料成

本价最低，为 162.80 元/t（表 7－4－16），2 号方案的原料成本价也仅为 164.08 元/t。此外，在一些原料成本价较低的原始优化配方中，由于调整其配比精度为 1%时，使其实用优化配方中的某些煤质指标就满足不了上述约束条件的要求，这就不能作为优化配方，但在这些不能全部符合约束条件的配方（简称为准实用优化配方）中，有的其原料成本价却比实用优化配方还低，而只是其中一些挥发分等指标稍有下降，其配方经适当调整后仍有较好实用价值。如 B 矿煤占 24%、G 矿煤占 31%、H 矿煤占 24%、I 矿煤占 21%的 7 号准实用优化配方中，仅 V_{daf} 值比要求的低了 0.01%，但原料成本价仅为 157.90 元/t，比 1 号实用优化方案还低 4.9 元/t。以上这种情况在用 3 种煤和 2 种煤优化配方时同样也有可能出现，因此在配煤生产时还应充分考虑采用这些原料成本价更低的准实用优化配方。

表 7－4－16　某动力配煤厂最优实用配方（配比精度为 1%）

方案号	矿名	配煤比（%）	配煤后质量								原料成本价（元/t）
			M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	ST（℃）	
1	H 矿	27.00	8.5	25.37	33.45	4	0.79	20.93	82	1388	162.80
	F 矿	10.00									
	G 矿	23.00									
	I 矿	40.00									
2	B 矿	30.00	7.3	26.76	25.05	2	0.59	20.92	61	1352	164.08
	C 矿	10.00									
	H 矿	34.00									
	I 矿	26.00									
3	C 矿	35.00	9.2	27.34	25.12	3	0.79	20.92	66	1397	164.88
	F 矿	10.00									
	G 矿	28.00									
	H 矿	27.00									
4	B 矿	19.00	8.8	24.76	32.66	4	0.79	20.93	82	1376	165.44
	E 矿混	10.00									
	G 矿	25.00									
	I 矿	46.00									
5	B 矿	15.00	9.5	25.27	36.41	3	0.79	20.96	82	1427	165.50
	D 矿	10.00									
	F 矿	50.00									
	G 矿	25.00									

方案号	矿名	配煤比(%)	配煤后质量								原料成本价(元/t)
			M_t(%)	A_d(%)	V_{daf}(%)	CRC(1~8)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	HGI	ST(℃)	
6	B矿	27.00	7.5	26.87	25.18	2	0.57	20.96	59	1385	165.77
	E矿混	10.00									
	F矿	23.00									
	H矿	40.00									
.....											
* 7	B矿	24.00	8.5	27.07	24.99	4	0.79	20.93	74	1403	157.90
	G矿	31.00									
	H矿	24.00									
	I矿	21.00									

* 为准实用优化配方。

4. 由3种煤组合优化配方,但在配方中对某一矿点煤的配比予以固定

某些配煤场为了充分利用当地廉价的低、中质煤资源,以尽量使配煤场获得最大经济效益,因而在配煤时要求固定某一种(甚至2种)煤为一定的配比。计算机在优化时也能满足固定某种煤为一定配比的要求。

例 如固定G矿焦煤配比为10%或20%的优化配方:

由表7-4-17看出,固定G矿焦煤配比为10%的优化配方中共有2个方案符合上述约束条件要求(配比精度为1%时)。其中以B矿煤占28%、F矿煤占62%和G矿煤占10%的1号实用方案原料成本价最低,为166.96元/t。B矿煤占33%、I矿煤占57%、G矿煤占10%的3号准实用优化配方,原始优化配方合格而实用优化配方不符合约束条件要求,但原料成本价最低,为164.45元/t。在这一准实用优化配方中,仅收到基低位发热量($Q_{net,ar}$)比约束条件要求低了0.1MJ/kg,如以这一准实用优化方案为基础,把B矿煤的配比由33%而提为34%,其他2种煤的配比不变(即这时总的配比为101%而不是100%),则该配方的各种约束条件均能满足要求,其原料成本价比1号实用优化方案还低1元/t多(即166.96元/t-165.04元/t=1.92元/t)。改变配比后的各项煤质指标及其原料成本价的具体计算方法,可由计算机按'人工配方'方法来完成。

此外,当配比精度为5%时(见表7-4-18),则共有5种优化配方。其中第1号方案的原料成本价仅166.32元/t,比配比精度为1%时的还低0.64元/t。

由表7-4-19看出,如G矿焦煤的固定配比为20%时的实用优化配方共有5组。其中以A矿煤占35%、I矿煤占45%和G矿焦煤占20%的1号配方的原料成本价最低,为168.48元/t。其2号配方的原料成本价基本和1号方案相近,根据煤源供应情况也可

表 7－4－17　某动力配煤厂最优实用配方

（G 矿焦煤固定配比为 10%，配比精度为 1%）

方案号	矿名	配煤比（%）	配煤后质量								原料成本价（元/t）
			M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	ST（℃）	
1	B 矿	28.00	.4	25.67	38.56	3	0.73	20.94	79	1430	166.96
	F 矿	62.00									
	G 矿	10.00									
2	C 矿	42.00	9.2	25.51	37.49	2	0.74	20.92	72	1395	174.24
	F 矿	48.00									
	G 矿	10.00									
3	B 矿	33.00	7.8	24.94	33.96	4	0.71	20.89	79	1354	164.45
	G 矿	10.00									
	I 矿	57.00									

＊为准实用配方。

表 7－4－18　某动力配煤厂最优实用配方

（G 矿焦煤固定配比为 10%，配比精度为 5%）

方案号	矿名	配煤比（%）	配煤后质量								原料成本价（元/t）
			M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	ST（℃）	
1	B 矿	35.00	7.9	24.37	33.92	4	0.70	21.09	79	1351	166.32
	G 矿	10.00									
	I 矿	55.00									
2	A 矿	35.00	9.5	24.32	38.58	2	0.74	21.04	75	1409	172.70
	F 矿	55.00									
	G 矿	10.00									
3	A 矿	45.00	9.5	22.24	34.58	3	0.72	21.39	73	1333	175.68
	G 矿	10.00									
	I 矿	45.00									
4	C 矿	55.00	9.3	23.48	33.82	3	0.71	21.39	68	1323	179.54
	G 矿	10.00									
	I 矿	35.00									
5	C 矿	60.00	9.2	24.30	25.05	2	0.65	21.80	54	1333	180.40
	G 矿	10.00									
	H 矿	30.00									

组织生产。

表 7－4－19　某动力配煤场最优实用配方

（G 矿焦煤固定配比为 20%，配比精度为 1%）

方案号	矿名	配煤比（%）	配煤后质量								原料成本价（元/t）
			M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	ST（℃）	
1	A 矿	35.00	9.5	24.04	33.54	4	0.79	20.97	78	1359	168.48
	G 矿	20.00									
	I 矿	45.00									
2	D 矿	37.00	10.2	22.73	33.70	3	0.68	20.92	78	1319	168.50
	G 矿	20.00									
	I 矿	43.00									
3	D 矿	32.00	10.4	23.65	37.16	2	0.71	20.95	78	1385	169.64
	F 矿	48.00									
	G 矿	20.00									
4	A 矿	35.00	10.0	23.53	36.81	3	0.79	21.38	76	1409	173.70
	F 矿	45.00									
	G 矿	20.00									
5	C 矿	41.00	9.7	24.91	35.81	3	0.79	21.19	74	1398	174.52
	F 矿	39.00									
	G 矿	20.00									
* 6	B 矿	29.00	8.3	25.18	32.99	4	0.77	20.91	82	1370	162.86
	G 矿	20.00									
	I 矿	51.00									
* 7	B 矿	24.00	8.8	25.98	37.16	3	0.79	20.91	82	1440	164.68
	F 矿	56.00									
	G 矿	20.00									

* 为准实用配方。

此外，原始优化配方符合约束条件要求而不能作为实用优化配方的 6 号准实用优化配方，仅低位发热量比约束条件要求低了 5kJ/kg，而原料成本价最低仅为 162.86 元/t，故也是今后配煤生产时可以考虑的方案之一。即只要将其配方中的 B 矿煤的配比由 29% 改为 30%，其他 2 种煤的配比不变（即实际总配比为 101%），其发热量就能达到 20.97MJ/kg，该配方的原料成本价为 163.48 元/t，仅增加 0.62 元/t 左右，仍比 1 号实用方案降低 5 元/t。

此外，计算机还可完成其他任何不同约束条件下优化配方，如满足收到基低位发热量（$Q_{net,ar}$）为 20.91～23.00MJ/kg 或硫分（$S_{t,d}$）小于 1.00%、挥发分（V_{daf}）大于 30%、灰熔融性软化温度（ST）大于 1250℃等各种不同要求的用 3 种煤、2 种煤或 4 种煤的动力配煤优化配方。具体方法从略。

5. 人工提出配方，由计算机自动计算配煤质量及原料成本价

当由计算机自动优化配方而煤场堆存的煤源不能满足配煤生产需要时，这时可根据存煤矿点及其数量、质量情况由人工提出一些配煤方案，由计算机自动计算出这些配煤的主要质量指标及其原料成本价等参数进行对比，以便尽量选择经济效益较好的配方进行生产。由表 7－4－20 看出，C 矿煤占 55%、I 矿煤占 30%、H 矿煤占 15%的人工 1 号配方的低位发热量（$Q_{net,ar}$）为 20.99MJ/kg，原料成本价为 175.72 元/t，该方案的成本相对不商而有可能进行生产。2 号配方原料成本价比 1 号配方高出 6.73 元/t，且灰熔融特征温度（ST）低于 1300℃，一般不宜进行生产。人工配方的 3 号方案中 $Q_{net,ar}$ 为 24.10MJ/kg，原料成本价为 194.40 元/t，在严格执行优质优价的方针时可考虑该配方进行生产。而 4 号人工配方原料成本价比 3 号方案还高，且其低位发热量（$Q_{net,ar}$）又低于 3 号方案，在一般情况下该方案就不宜进行生产。

表 7－4－20　某动力配煤场人工配方由计算机求算配煤质量和价格

方案号	矿名	配煤比（%）	配煤后质量								原料成本价（元/t）
			M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	ST（℃）	
1	C 矿	55.00	8.5	25.28	30.51	2	0.64	20.99	61	1320	175.72
	I 矿	30.00									
	H 矿	15.00									
2	D 矿	55.00	10.6	19.08	37.31	2	0.49	21.66	69	1274	182.45
	I 矿	25.00									
	F 矿	20.00									
3	B 矿	65.00	9.0	15.80	33.36	4	0.58	24.10	70	1310	194.40
	I 矿	25.00									
	G 矿	10.00									
4	A 矿	70.00	10.5	17.01	32.72	2	0.59	23.11	59	1290	195.81
	I 矿	20.00									
	H 矿	10.00									

6. 动力配煤优化配方有关问题及小结

(1)由于开发研究的各种实用优化配方是一种动态配方,因此对优化配方的约束条件可以根据需要而随时增加或减少,在一定约束条件下还可随着进煤矿点的增加、减少或改变,只需把改变后的有关参数输入微机后也就随之自动输出新的优化配方。在各矿点中只要有任意一种或几种煤的价格改变,其优化配方也就会随之改变。此外,即使进煤矿点不变,但每批来煤的质量不可能完全相同,因此必须随时输入新的煤质指标及与其相对应煤价,优化配方也就自动改变。因此,配煤场必须加强检测手段和严格计量,每批进煤的质量和数量必须随时检测和称量,并立即输入微机,以便迅速求算出新的优化配方。

(2)为了提高配煤厂的经济效益,凡是‘单位热值进场价’较高的煤尽量少进。如在本章实例中选定的A矿、B矿、C矿、D矿和E矿共5种优质煤中,根据它们的低位发热量和到场价之间的关系进行计算,这些单煤每418kJ的到场价依次为3.669元、3.383元、3.733元、3.675元和3.973元。这几种煤的硫分、灰熔融性、可磨性、水分、灰分和挥发分等主要参数又十分相近,因此在选择优质煤源时尽量考虑优先购入B矿和A矿等价格较低的煤,E矿煤的单位热值进场价最高,因此今后生产时以不进这种优质煤为好。随着各优质煤矿井之间煤价的调高或降低,可根据新的单位热值进场价的高低而重新选定合适煤源。对于低质廉价煤在煤质相近的前提下,也是以尽量多进单位热值进场价较低的矿点煤为好,但由于低质烟煤中有的硫分较高,有的灰分较高或水分较高,也有的是挥发分低、可磨性差的无烟煤,究竟以购入哪些低质煤为好,必须综合考虑不同矿点的主要煤质指标是否能与优质煤资源间做到取长补短、优势互补。

(3)为了使生产的配煤质量稳定可靠,配煤场所今后选用的优化配方除了应优先考虑成本价较低以外,还应同时考虑生产的配煤在一定时期内质量的稳定性,否则因配煤的某些非约束条件控制的质量指标(如挥发分、水分、灰分等)变化较大而影响用户的正常生产。

(4)某些‘准实用优化配方’的原料成本价往往比‘实用优化配方’更低,只要根据其配方的实际煤质情况而增加1%的优质煤或减少1%低质煤的配比,即可完全满足各种约束条件的要求,使配方具有更好的经济效益。当各种煤的配比与其能供应的数量基本接近时,即可组织较长时期的生产,以期取得更大经济效益。

(5)根据经验,凡供应电厂的配煤,以尽量不配或少配入H矿的无烟煤为宜;供应工业锅炉和窑炉用的配煤,则可配入不超过30%的无烟煤,如加入助燃剂,则配煤中无烟煤的配比可以根据试验情况而适量增加。

(6)由于低质煤的每418kJ进场价明显低于优质煤,如配煤的发热量要求较低,则能

配入的低质煤比例也就较大，其原料成本价也就越低，经济效益也越好。所以，配煤场以生产低位发热量（$Q_{net,ar}$）在 20.91MJ/kg 左右的配煤效益较高。如用户需要，还应尽量多生产 $Q_{net,ar}$ 在 20.07～20.91MJ/kg 的配煤，以求得最大经济效益。

（7）为了更科学地了解配煤燃烧时灰的结渣特征，在进行优化配方时最好同时测定每个单煤的灰成分分析，并根据不同工业锅炉的要求，在优化配方中同时提出能满足不同‘灰渣指数（R）’的要求。R 值的计算及分级方法如下：

$$R = 1.237B/A + 0.282SiO_2/Al_2O_3 - 0.0023ST - 0.0189G + 5.415$$

上式中 $B/A = \dfrac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$；

$$G = \frac{SiO_2 \times 100}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO}$$

R 的分级方法如下：

1 级：$R \leqslant 1.50$（轻微结渣）；

2 级：$1.50 < R \leqslant 1.75$（中偏轻结渣）；

3 级：$1.75 < R \leqslant 2.25$（中等结渣）；

4 级：$2.25 < R \leqslant 2.50$（中偏重结渣）；

5 级：$R > 2.50$（严重结渣）。

在配煤燃烧时，最好是 R 小于或等于 1.50 的 1 级（轻微结渣），但一般不超过 R 小于或等于 2.25 的 3 级中等结渣即可 如计算出的 R 值大于 2.50，则灰分会严重结渣，这种配煤方案基本上就不适宜采用。

（8）在利用计算机实施优化配方的同时，还可根据需要同时输入有关配煤生产中的财务运算方面的信息数据，如配煤中的材料费、人工费、运行费、折旧费等。兹举例如下：

单位：元/t

配煤种类	配煤总加工费	配煤各项费用						配煤毛利	税收	配煤纯利
		材料费	人工费	运行费	倒堆费	折旧费	其他费			
2	5.0	0.5	1.0	1.0	0.5	1.5	0.5	25.00	5.0	20.00
3	5.5	0.5	1.5	1.0	0.5	1.5	0.5	30.00	5.0	25.00
4	6.0	0.5	1.5	1.0	1.0	1.5	0.5	35.00	5.0	30.00

（9）在配煤过程中各种单煤的全水分必然会有不同程度的变化，导致配合煤的实际全水分与单煤加权后的理论全水分有不同程度的差异。如遇雨天时，配煤的实际全水分必然会有不同程度的增加，当空气中的相对湿度较低、有一定风速以及在强烈日光照射

下配煤时，配煤的实际全水分会明显低于各单种煤的加权平均全水分。因此，在实用配方的基础上，可根据实际生产的配煤，经采样、化验后所得的实测全水分来校正发热量（$Q_{net,ar}$）。校正公式如下：

$$Q_{net,ar}(MJ/kg) = (Q_{gr,ad} - 0.206H_{ad}) \times \frac{100 - M_t}{100 - M_{ad}} - 0.023M_t$$

上式是建立在空气干燥煤样水分基本稳定、全水分有一定变化的基础上，实际情况比这复杂得多，因为在其他条件不变的情况下，配煤分析水分（M_{ad}）往往与其理论加权平均值有不同程度的变化。

此外，在实际配煤中受各种单煤计量误差的影响，配煤后的灰分等主要质量指标也必然会与由各种单煤的加权平均计算值产生不同程度的差异，从而导致发热量（$Q_{net,ar}$）的变化。配煤中的灰分每改变 1% 时，对热值的影响大小不仅由参加配煤的每种单煤的有机质发热量（$Q_{gr,dmmf}$，近似地可由 $Q_{gr,daf}$ 替代）的大小及其矿物质的成分和每种单煤的配比多少而定（上述参数基本上都可以通过一定方法获得），更重要的是难以了解在配煤中导致灰分等偏差的来源究竟是由哪一种（或 2 种）单煤的配入量增多（或减少）所造成，也就很难根据配煤的实际灰分的变化数值来较准确地推算出其热值的变化。各配煤场可根据长期生产经验，利用水分、灰分、挥发分、硫分与热值之间的关系，导出下列回归方程：

$$Q_{net,ar}(MJ/kg) = b_0 + b_1 M_t (\text{或 } M_{ar}) + b_2 A_{ar} + b_3 V_{ar} + b_4 S_{t,ar}$$

（10）往往受配煤场地的制约和便于煤场内各种单煤的调配，许多配煤场尤其是一些场地有限的市内配煤场在实际配煤时很难同时堆放 7～8 种以上的单种煤。常用的办法是按优质煤（高热值）、中质煤（中热值）和低质煤（低热值）3 堆煤来进行配煤生产，需要时最多再增加一堆低挥发分煤（或高挥发分煤）。当进煤的矿点较多时，可根据其实测的热值等工业分析指标及其进煤的实际吨数堆放在热值相近的煤堆上并用堆土机掺匀，再根据该堆煤原来的存量及其发热量等指标，用加权平均法计算出它的主要煤质指标作为配煤时基础资料，以便根据配煤质量的要求，准确地求算出该堆煤的配比。

第三节　集成优化动力配煤（IOBSC）技术

一、集成优化动力配煤（IOBSC）技术构成及特点

（一）基础技术集成化

IOBSC 技术是根据动力配煤技术特点及其工艺要求，将以下相关技术集成组合，形

成一个整体技术的系统工程：①煤质分析及原料、产品质量监控；②煤燃烧学；③原料煤保障及市场、用户对商品煤品质要求分析；④最优化配煤技术；⑤计算机及自动控制；⑥煤炭筛选、成型技术；⑦机电工程及自动化配置。技术集成化使不同领域的技术形成一个整体，解决了不同领域、不同部门互为隔离、影响整体技术水平提高的问题。灰熔融性是动力煤的主要煤质指标，其特征温度的变化与煤灰成分呈非线性关系；挥发分为燃煤的重要特性，但挥发分相同的配煤与单种煤的燃烧特性不尽相同；动力煤发热量可直接测定或通过不同方法计算。IOBSC 技术克服以往配煤的单一和粗放，通过结合燃烧和煤质技术，深层次研究这些问题，以应用于动力配煤技术的开发和完善。

（二）集成化工程技术

IOBSC 技术形成集成化工程技术，其系统如图 7－4－1 所示。

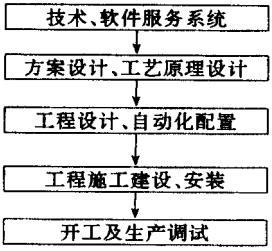


图 7－4－1　IOBSC 集成化工程技术系统

技术软件服务系统为工程前期基础研究，包括原料煤、配煤市场及与此相关的配煤方案、辅助工程条件调研分析、技术及管理人员培训等，如图 7－4－2 所示。

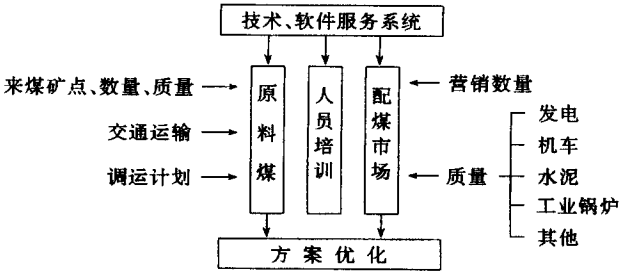


图 7－4－2　技术、软件服务系统

IOBSC 技术工程化第二阶段工作内容是基本工艺方案制定、工艺原理设计及工程投资、经济分析等工作。该阶段工作将完成工程项目的可行性研究，为工程决策提供最后依据。图 7－4－3 为工作系统图。

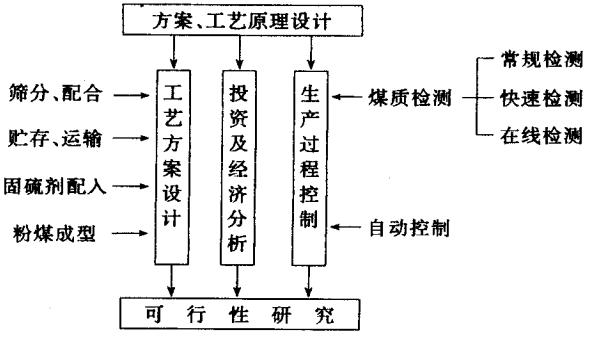


图 7－4－3　方案、原理设计系统图

工程化第三阶段是完成工程土建、机械、检测、辅助工程等一系列设计。工程施工建设、安装是主要实施阶段，其内容有施工队伍招标选定、工程原材料准备、工程监理、工程计划、建设、安装、工程验收等系列工作。

工程验收后的开工及生产调试，由 IOBSC 技术的工作人员与现场操作人员共同进行。IOBSC 技术可达到整体工程承包的水平，也可完成部分工程的承包。

动力配煤集成化中常用的煤质检测主要仪器设备如下。

1. 常规检测项目及其仪器设备

常测项目有 M_t、M_{ad}、A_d、V_{af}（包括 CRC）、$S_{t,d}$、$Q_{rg,d}$、$Q_{net,ar}$ 及碳、氢（也可以利用工业分析计算）。

有时需测项目有灰熔融性、灰成分、可磨性、着火点等。

常用设备如下：

(1)破碎缩分联合制样机；

(2)密封式粉碎制样机；

(3)标准筛振筛机；

(4)二分器；

(5)充氮干燥箱；

(6)箱式电阻炉；

(7)标准筛；

(8)电子分析天平；

(9)库仑法智能测硫仪；

(10)各种型号电脑量热仪；

(11)碳氢元素分析仪；

(12)全水分自动测定仪；

(13)其他辅助设备。

2. 快速检测的主要仪器：

(1)连续或间歇式快速测灰仪；

(2)微波快速测水仪；

(3)快速定硫仪。

3. 在线检测(或在线分析)仪

煤炭的在线分析仪早在六七十年代就有应用，当时仅用简单的 γ 射线测灰仪，且测值精度不高，仅用于选煤厂测定精煤的灰分。80 年代后期，国内外都已开发出第二代的在线分析仪，可以利用双能量 γ 射源[^{241}Am(60keV)和 Cs(662keV)]及低能射源在配煤或选煤等动态(或静态)条件下测灰和利用微波测水。

应用于配煤在线分析仪最早是美国圣地亚哥的 GAMMA—METRICS 公司于 1988 年首先开发出的 COBOS™(配煤优化系统)软件。该系统的应用软件可在每分钟内调节各种单煤的配比，配煤系统按几种单煤的不同配比生产出符合用户要求的配煤产品。在操作时应把在线分析仪放在配煤点的下游，便于实现过程控制，根据设定的各单种煤的配比，在线分析仪就自动频繁地分析出配比，使 COBOS™ 系统能随时测算出各种煤源的质量动态变化情况，从而为操作人员及时调整各种单煤的配比而提供准确可靠的信息和依据。

目前，国外能生产在线分析仪的还有德国的 Berthold 公司、RGI 公司、VEAG 公司和澳大利亚矿物控制仪器设备公司以及英国的不列颠煤炭公司等。国内则有清华大学等单位开发研制的 ZZ—89 型 γ 射线灰分在线分析仪，灰分测定精度在 1% 以内，每台仪器单价在 20 万元左右。

90 年代初期，美国又开发出第三代煤炭在线分析仪，它系利用‘瞬发 γ 中子活化分析(PGNAA)原理”，可同时在线分析配煤或单煤的灰分、水分和碳、氢、氮、硫、氯等有机元素成分，以及 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、TiO_2、CaO、K_2O 和 Na_2O 等灰中的无机成分。根据在线分析仪得出的水分、灰分和元素分析结果，可由计算机迅速自动算出配煤的发热量($Q_{net,ar}$ 或 $Q_{gr,d}$、$Q_{gr,ad}$ 等数据)和氧含量、SO_2 排放量及挥发分等参数 利用灰成分分析，可以按经验公式自动计算出配煤的灰熔融特征温度(DT、ST、HT 及 FT)。

我国大柳塔选煤厂已引进美国 GAMMA—METRICS 公司生产的第三代 1812C 型煤炭在线分析仪。该仪器每小时可测的流量为 8～400t，要求煤炭粒度小于 100mm，每分钟可测出一次全分析数据，以此对不同煤堆的进料速度及时进行调整。每 10min 测定精度 硫分可达 0.04%、灰分为 0.50%、水分 0.50%，发热量(计算值)75BTU/LB、煤流温

度小于60℃，工作环境温度－32℃～46℃。仪器尺寸：长401cm、宽244cm、高249cm。仪器为全封闭、自带空调，全重7370kg，用电要求为220V（AC）、50Hz；控制信号为4～20mA、24V（DC）。该仪器的在线分析流程如图7－4－4。

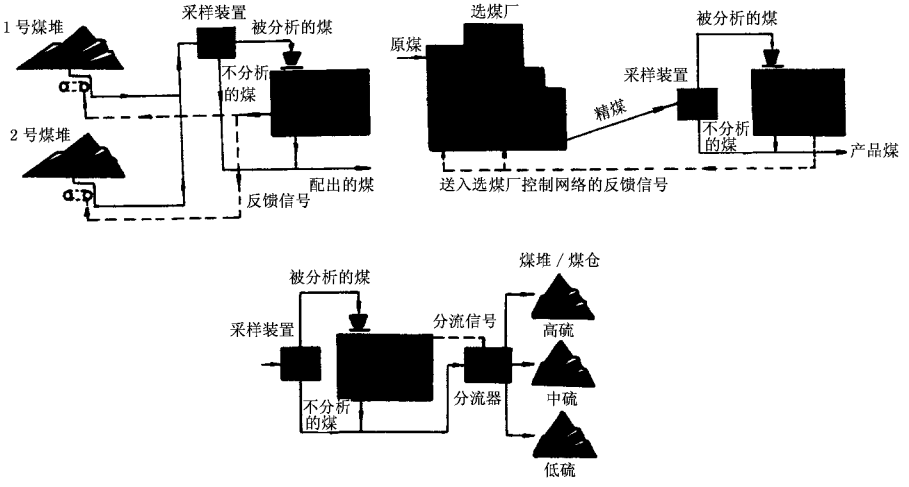


图7－4－4　GAMMA－METRICS1812C型煤炭在线分析仪

目前，1812C型在线分析仪的每台单价达50万美元。另外，上海石洞口电厂引进的水分和灰分在线分析仪的每台单价为7万美元，单测煤炭灰分在线分析仪的价格也在3.5万美元左右。

德国生产的煤炭水分在线分析仪包括一个电压控制的振荡器、一个坚固的小天线和一个以PC为基础的计算装置。一个应用统计分析的特殊数据处理程序能算出检测到的微波信号的平均值，并能进行计算值的可信度检验。

该仪器的原理是基于水的介电性质、透射微波的衰减和相位的变化能指示散状物料（如煤等）的水分，因为透射微波衰减量和煤样的水分之间虽非线性但两者成正变关系。该仪器能测粒度小于或等于50mm煤样的水分，测量的频率范围为4～7GHz，所测试样的M_t不超过7%。

该仪器的装置如图7－4－5所示。

测量水分时，微波由电压控制的振荡器发出。微波的频率可通过PC控制的电压进行调节。透射微波的衰减量是通过新的条带微波检测器显示并由PC记录，后者还对测出的数据进行分析并控制全部测量。因此，在PC中运转的是一个有效的软件。它掌握数据收集，控制产生微波的振荡器，调节放大器并进行标定。由于煤料的粒度范围、成分、料层厚度或运输带的大小以及天线间的距离等因素影响，必须对有些仪器参数（即放

大率)加以调节,以保证最佳测量,这些参数是通过软件控制。

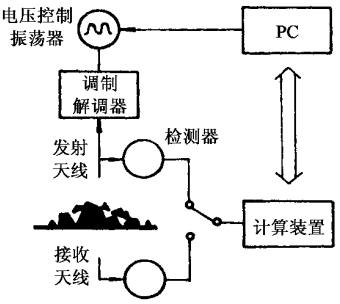


图 7－4－5　以微波为基础的原煤在线测定系统示意图

为了抵消料层厚度和运输带装载量的变化所造成的影响,来自称量器的信号必须与计算装置相连接。这个信号与通过微波测量装置的原煤数量相关,所有测出的衰减值都应折算为与每单位质量的分析过的物料相应的标准值。

对粗粒物料,为获得准确结果,必须采集和处理很多数据点。可利用统计分析法开展的一种特殊数据分析程序,它能算出检测到的微波信号的平均值,并进行计算值置信度的估计。

(三)装备集成化

IOBSC 技术提供集成化优化配煤软件,该软件在保证多品种商品煤的煤质适应用户的前提下,达到工业运行的可操作性及最佳经济效益。

IOBSC 技术推出整套的检测技术和装备,包括在线分析、快速分析、常规分析,项目有工业分析、元素分析、灰中主要成分分析、发热量测定、硫分析、粘结性测定、可磨性试验等,并提供发热量、挥发分、灰熔融性特征温度等指标的计算取值方法。

IOBSC 技术组合了运输、筛分、配合、成型等工程、装备、科研、生产、设计部门,推出集成化装备。

(四)整体集成化系列

I0BSC 技术推出以下系列整体集成化配煤系统。

配煤能力	(t/h) (万 t/a)	15 10	30 20	150 100	450 300	> 500 > 300
供应锅炉能力	(t/h)	50	100	500	市场	市场

配煤能力在 15t/h、30t/h 的小型系统可作为单元动力配煤工作系统,形成移动式整体装备;能力在 150 ~ 450t/h 中型系统为区域或电站配煤系统;500t/h 以上大型系统为

大区域供煤、煤炭集散地、港口等配煤工程。

（五）IOBSC 技术优化特点

IOBSC 技术针对不同炉型的燃烧方式，提供适宜商品煤，不但考虑煤的挥发分、发热量、结渣性，而且实现对煤粒度、灰熔融性、结焦性、固硫性、燃烧性能的最优化控制。与选煤、型煤、配入固硫剂工艺结合，可保证原料的充分利用和产品的优化，提高煤的燃烧效率，减少 SO_2、NO_x 及烟尘的排放。

在满足用户炉型对煤质要求的前提下，多配入当地煤、低质廉价煤，减缓运输压力，达到最优经济效益，同时提高用户使用配煤的综合经济效益。

IOBSC 技术在集成化的基础上，达到整体动力配煤工程投资、技术、工期、商业化水平的最优化。

二、IOBSC 技术的应用与经济性

（一）IOBSC 技术的应用性

IOBSC 技术可为供煤集运点、用煤集散点、城市供煤点、出口煤港口、大型用煤企业的动力配煤工程项目提供“交钥匙工程”。

IOBSC 技术组合的小型（小于 30t/h）动力配煤装备为单元动力配煤工作系统，可满足大量小型炉前配煤（包括筛分、成型）用户的要求。IOBSC 技术还可用于已有动力配煤生产线、型煤厂、动力煤选煤厂的改造和完善。

IOBSC 技术将实行技术关键攻关，如煤质在线检测技术（水分、硫分）的开发与完善，多指标在线或快速联检等煤质检测技术；通用配煤计算软件开发；炉前无粘结剂成型技术；高效固硫剂开发等。

（二）IOBSC 技术的经济性

动力配煤工程投资与工程规模、原始条件、工程目标等有关，如在原有选煤厂、集运站、港口码头等基础上改建，则总投资会大为减少；如配煤工程包括了仓储、装运等基础设施，则投资会较高。据测算，中型动力配煤工程按生产能力吨煤投资大约为 25～40 元左右。

使用动力配煤与烧单煤比较，锅炉热效率约提高 4%～5%，层燃锅炉使用小块煤可节煤 10%～20%，若按 250 元/t 煤价计算，用户使用 1t 配煤或小块煤直接节煤受益约 20～50 元，因此配煤比单煤或小块煤比散煤的价格高 20～40 元，用户是应该而且可以接受的。

工厂配煤的加工费用一般低于选煤，按 5～10 元/t 计算，则加工 1t 配煤的工厂销售

收益约在 10 ~ 20 元之间,工程投资的回收期大约在 3 ~ 5 年。若使用当地价格低廉的煤种作为原料煤之一,工厂会有显著的经济效益。

三、IOBSC 市场前景

动力配煤是实现煤炭高效、洁净燃烧的重要技术环节,是发展中国洁净煤技术的有效技术途径之一,有广阔的市场前景。集成优化动力配煤技术向用户提供成熟、配套的工程技术服务,可以用于以下领域。

(一)供煤集运点(站)

在产煤地区或较大的煤矿区,均设有煤炭集中、贮存和发运的站点,如山西、黑龙江、山东、内蒙等省(自治区)有许多较大的煤运站,结合煤的集中、贮存和发运建立动力配煤生产线,可在源头上解决煤质多变、均匀性差的问题,又可充分利用煤炭资源。目前山西、东北地区的动力配煤项目即属于这一类。

(二)用煤集散点

在工业较发达、煤炭资源相对较少的地区,如江苏、浙江、福建、广东等省区,工业和民用煤炭一般大多从华北、华东、西北等地调运,供煤矿点多,受交通或其他因素影响,煤量供应不稳定,煤种、煤质复杂多变。这些地区的煤炭集散点,面向较大区域的中小型电厂、工业锅炉、窑炉和民用燃煤用户,也有较好的经济条件和技术条件,适宜建立具有现代技术水平、规模较大的配煤工程。如浙江杭州已建成的动力配煤工程、湖南株洲选煤厂的动力配煤项目均属此类。

(三)城市的供煤点

城市是用煤较为集中的地方,以往的动力配煤技术相当一部分建立在大、中城市。城市煤炭用户有中小型工业、供热、餐饮业、民用等,结合锅炉型煤、民用型煤,建立自动化水平高、对环境污染小、产品品种齐全的配煤生产线,是发展城市动力配煤的方向。

(四)出口煤炭集港

中国目前每年出口煤炭 30Mt 以上,煤质问题已是影响出口煤市场和销售的主要因素。如神府、东胜矿区的动力煤有低硫、低磷、低氯、低灰等优点,但受到高水分、灰成分中钙含量高、灰熔融性特征温度(ST 及 FT)低的影响;平朔矿区的煤则硫和氯含量较高、灰熔融性特征温度高、灰中 CaO 含量低。不同的煤质缺陷削弱这些煤在国际市场的竞争能力,如相互配合或配入其他煤种,则达到优势互补、劣势相抵,成为质量优良的配合煤种。改造港区贮煤场或在新建港区建设现代化大型配煤生产线是实现这一技术的有效途径。

（五）大型用煤企业

用煤来源广、矿点多、煤质复杂的大型电站、供热、供气等企业结合运输、接受、贮存可建立与生产配套的配煤线，采用适宜的工艺，实现自动化配煤燃烧。

第四节　低灰熔融性煤的配煤技术

从中国动力煤资源分布特点看，约有40%左右的侏罗纪低灰、低硫、高热值煤（以早、中侏罗纪的不粘、弱粘和长焰煤为主），但灰成分中的CaO和Fe_2O_3含量较高，导致灰熔融性软化温度（ST）及流动温度（FT）均较低，ST多在1150～1250℃左右，FT约为1200～1300℃。这种分布在广大西北及华北地区的高热值煤在燃烧时容易结渣，影响工业锅炉和窑炉的正常运行，并会缩短锅炉寿命，如采用配煤技术，选用合适的高灰熔融性煤与之合理、科学的优化配方，就能充分发挥这种煤在燃烧中的优势，提高其热能利用率，节约煤炭，降低用煤企业的生产成本。特别是我国西部地区储量达到几千亿吨的东胜—神府不粘煤、长焰煤和大同矿区的弱粘煤，都是一些煤灰特征温度（DT、ST及FT）较低的高挥发分、高热值动力煤，如用华北及华东等地区的石炭纪、二叠纪高灰熔融性煤根据锅炉燃烧特性的需要按一定比例进行配煤，就能达到提高煤灰特征温度、使煤的能源得到充分利用的良好效果。兹举例说明如下：

神华集团马家塔矿不粘煤的主要煤质分析指标：

M_t (%)	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1～8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	DT (℃)	ST (℃)	FT (℃)
17.3	10.9	4.22	31.09	1	0.40	22.12	1120	1130	1150

徐州张集矿气煤的主要煤质分析结果：

M_t (%)	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1～8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	DT (℃)	ST (℃)	FT (℃)
5.8	2.52	17.58	32.91	4	0.89	25.83	>1500	>1500	>1500

由上述数据看出，当马家塔矿煤与张集矿煤以1∶1的比例配煤时，可使配煤的全水分降至11.55%，A_d为10.50%，V_{daf}为32.00%，CRC为2～3，$S_{t,d}$为0.65%，$Q_{net,ar}$为

23.97MJ/kg，ST、FT 温度均可至 1300℃以上，这些指标均能满足电厂煤粉锅炉和工业锅炉、窑炉的要求。如认为配煤发热量过高，则可把马家塔矿煤的配比增为 60%，这时配煤硫分还可更低，发热量仍在 23.60MJ/kg 以上，灰熔融性软化温度 ST 在 1300℃以上。

用户认为上述配煤的挥发分偏高，还可同时考虑配入高灰熔融性的低挥发分的贫瘦煤，这样就成为由 3 种煤组合的动力配煤。如配入河南鹤壁低硫、中低灰、高灰熔融性的贫瘦煤，则使配煤质量更优。鹤壁四矿煤的主要煤质指标如下：

M_t (%)	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1～8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	DT (℃)	ST (℃)	FT (℃)
6.9	0.61	17.44	16.34	5	0.27	26.54	1330	1420	>1500

当用上述 3 种煤以 1∶1∶1 的比例相配后，其配煤指标更好。即配煤的 Mt 可降为 10.0%，A_d 为 13.08%，V_{daf} 为 26.78%，CRC 为 3～3.5，$S_{t,d}$ 也降为 0.52%，$Q_{net,ar}$ 为 24.83MJ/kg，ST 及 FT 值则分别大于 1350 和 1400℃左右。

用上述 3 种煤相配后，配煤发热量过高，属于优质动力用煤，而实际配煤低位发热量（$Q_{net,ar}$）在 23.00MJ/kg 左右即可。需配入第三种低挥发分煤时，则可配入灰分较高的低热值煤，如由鹤壁四矿煤改为灰分在 28%左右、$S_{t,d}$ 为 1.55%的义马新安矿的贫瘦煤，则配煤成本可明显降低，而配煤质量仍能满足电厂、工业锅炉和窑炉的需要：义马新安矿煤的主要工业分析结果如下：

M_t (%)	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1～8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	DT (℃)	ST (℃)	FT (℃)
5.9	1.06	28.11	18.17	3	1.55	22.47	>1450	>1500	>1500

如神府马家塔矿、徐州张集矿和义马新安矿煤的配比仍为 1∶1∶1 时，则其配煤质量指标为：

M_t (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1～8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	ST (℃)	FT (℃)
9.7	16.64	27.39	3	0.95	23.47	>1380	>1400

由于该配煤的硫分在 1%以下，发热量仍在 23.42MJ/kg 以上，仍然属于优质动力配煤。

从以上对神府马家塔矿低灰熔融性煤的各种配煤方案的对比中可以看出，无论是采

用 1 种或 2 种高灰熔融性煤参加配煤，都能使低灰熔融性煤通过配煤而弥补其灰成分中 CaO 和 Fe_2O_3 含量高的缺点，使其成为真正的优质动力用煤。低灰熔融性且硫分稍高的大同煤与上述鹤壁低硫煤配煤时，同样也能取得提高煤灰特征温度和降低硫分的类似效果。如大同四老沟矿煤与上述鹤壁四矿煤以 1∶1 配煤，可使配煤硫分降为 0.58%，V_{daf} 为 24.03%，煤灰软化温度 ST 到 1260℃，$Q_{net,ar}$ 达 26.08MJ/kg，其质量比大同煤有明显提高。

第五节　中、高硫煤的配煤技术

在我国西南、中南、华东等地区和西北的陕西省境内均有不同数量的硫分大于 2% ~ 3% 的中高硫煤和 $S_{t,d}$ 大于 3% 的高硫煤。从目前环保对燃煤 SO_2 排放总量及浓度要求看，对硫分在 2% 以上的动力用煤也就不宜单独燃烧。因此常需采用洗选脱硫（无机硫）或烟气脱硫，当然也可采用循环流化床锅炉加入钙盐在炉内固硫。采用动力配煤的方法，可把硫分大于 2% 的煤与 $S_{t,d}$ 低于 0.50% 的特低硫分煤相配，将配煤硫分降至 1% 以下，仍能满足我国绝大多数电厂煤粉锅炉的需要。对既产高硫煤，又出低硫煤的矿区，有条件的可在矿区内配煤后销售。矿区没有条件配煤的可在主要供煤城市配煤后外销。特别是一些城市中的燃料公司场地很大，近年来随着煤炭市场由计划经济向市场经济过渡，各地燃料公司的进煤量逐年减少，场地大量空置，想生产动力配煤的矿区可以考虑租赁这种空置的场地进行配煤生产。如兖州矿区虽然低硫煤占 90% 以上，但杨村和北宿两矿 1997 年的高硫煤年产量也达 150 万 t 以上，加上已注销能力而仍在生产的唐村矿，其年产高硫煤近 200 万 t，如不采用配煤方法，这些矿井将随着环保对燃煤排放 SO_2 的控制力度不断加大而被迫停产。目前常州市燃料公司有大量空置场地，如兖州矿区能较长期（如 5 年以上）地租赁其场地，把矿区的低硫煤和高硫煤同时运入常州，配煤后完全可在苏、锡、常一带的电厂等大、中型用煤企业就近销售。从兖矿集团生产动力用煤的 7 个矿、厂的主要煤质指标可以看出（表 7 - 4 - 21），杨村矿商品煤的平均硫分（$S_{t,d}$）达 4.41%，北宿矿煤的硫分也达 3.60%，这 2 个矿井煤在配煤中的比例分别不得超过 10% 和 15%，保证配煤硫分在 1% 以下。用 10% 的杨村矿混煤与 90% 的鲍店选煤厂的洗混煤相配时，配煤硫分（$S_{t,d}$）为 0.97%，配煤低位发热量（$Q_{net,ar}$）为 22.06MJ/kg，灰熔融性温度等其他指标的变化不大，均能满足电厂和工业锅炉及窑炉的需要。用 15% 的北宿矿混

煤与85%的兴隆庄选煤厂的洗混煤相配时，配煤硫分为0.91%，配煤低位发热量（$Q_{net,ar}$）为22.71MJ/kg，其他煤质指标的变动都不大，也完全能满足苏南地区众多煤粉锅炉及其他工业锅炉的需要。

表7－4－21　兖矿集团动力用煤的主要煤质指标

矿(厂)名	品种	M_t (%)	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1～8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{gr,ad}$ (MJ/kg)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	Pd (%)
南屯煤矿	混煤	9.7	2.76	21.26	39.63	5	0.65	25.28	22.50	0.017
北宿煤矿	混煤	7.1	4.15	13.21	45.23	7	3.60	27.93	26.03	0.004
兴隆庄选煤厂	洗混煤	8.2	3.20	22.69	36.85	4	0.43	24.28	22.12	0.020
鲍店选煤厂	洗混煤	10.7	1.85	21.50	39.04	5	0.59	25.10	21.83	0.015
鲍店煤矿	混煤	7.3	3.50	21.58	39.28	4	0.50	24.85	22.87	0.015
东滩煤矿	混煤	7.0	3.16	20.24	38.88	4	0.56	25.19	23.17	0.018
杨村煤矿	混煤	6.6	2.42	19.80	45.23	7	4.41	26.15	24.06	0.006

矿(厂)名	品种	HGI	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	DT (℃)	ST (℃)	FT (℃)
南屯煤矿	混煤	60	55.50	28.04	5.53	2.02	2.81	1150	1480	>1500
北宿煤矿	混煤	48	42.94	15.00	18.66	13.62	2.43	1110	1140	1200
兴隆庄选煤厂	洗混煤	63	51.42	29.15	4.98	7.18	2.00	1130	>1500	>1500
鲍店选煤厂	洗混煤	60	55.72	24.42	4.53	7.18	3.40	1140	>1500	>1500
鲍店煤矿	混煤	58	57.44	26.04	4.38	4.57	2.94	1100	1470	>1500
东滩煤矿	混煤	58	50.72	30.58	3.62	7.38	1.19	1140	>1500	>1500
杨村煤矿	混煤	53	48.36	16.62	18.16	10.69	0.70	1130	1180	1250

此外，陕西铜川矿务局既有$S_{t,d}$在2%～4%左右的石炭纪太原统高硫焦煤和瘦煤，又有早、中侏罗纪时期形成的$S_{t,d}$为0.6%～1.1%的较低硫长焰煤和不粘煤，这两个时代形成的动力用煤硫分有显著差异，它们的灰分和挥发分也相差很大。如石炭纪商品煤的灰分多在25%～30%，而早、中侏罗纪煤的灰分一般在12%～20%，前者的挥发分（V_{daf}）平均仅20%左右，后者的V_{daf}高至36%～38%。但这两个时代煤商品煤的收到基低位发热量（$Q_{net,ar}$）十分相近，$Q_{net,ar}$一般均在21.7～24.1MJ/kg。该矿务局的产煤主要供给陕西电厂、镇江谏壁电厂和西安市工业以及附近的其他企业用煤。其中给陕西电厂的年供煤量在250万t以上，占全局原煤产量一半左右，每年供应谏壁电厂的煤也均在50～60万t以上，供西安市的为30～40万t左右。该局的高硫煤产量约占55%，低硫煤占45%，完全有条件在西安市及陕西电厂附近生产配煤。该局高、低硫煤的主要质量指

标如表 7－4－22 所示。

表 7－4－22　陕西某矿务局各矿主要煤质分析结果汇总表

矿名	工业分析					发热量(MJ/kg)		$S_{t,d}$ (%)	灰熔融性(℃)			煤炭类别
	M_t (%)	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1～8)	$Q_{gr,ad}$	$Q_{net,ar}$		DT	ST	FT	
三矿	4.8	0.75	29.28	9.00	3	23.50	21.86	3.95	1350	1385	1445	贫瘦煤
桃矿	4.3	0.79	26.37	20.09	4	25.00	23.41	2.62	1375	1425	1480	瘦煤
王矿	4.4	0.82	27.36	20.82	5	24.68	23.13	2.09	1410	1440	1490	瘦煤
徐矿	3.7	0.86	30.22	22.53	5	23.67	22.51	1.50	1450	> 1500	> 1500	瘦煤
鸭矿	3.5	0.64	27.79	20.40	5	24.58	23.26	2.19	1400	1420	1460	瘦煤
金矿	4.5	0.77	25.14	22.07	6	25.83	24.09	2.32	1300	1335	1370	焦煤
东矿	3.5	0.88	27.80	21.20	5	24.74	23.35	2.78	1490	1500	> 1500	焦煤
下矿	3.7	5.18	17.84	37.59	1	25.01	21.77	1.12	1230	1255	1285	长焰煤
焦矿	10.6	5.15	19.92	37.30	1	24.25	22.06	0.81	1270	1290	1315	长焰煤
陈矿	13.2	5.06	12.43	36.60	1	27.08	23.79	0.62	1155	1175	1225	不粘煤

为了降低配煤成本，可采用该局的一种低硫煤与另一种高硫煤相配，并按高、低硫分煤的质量不同，再根据用户的需要而配制出不同硫分的动力配煤。兹以人工配煤方案举例计算如下：

如采用王矿的中高硫瘦煤，硫分为 2.09%（表 7－4－22），陈矿的不粘煤，硫分为 0.62%，今要求配制出硫分为 1.0%以下的动力煤，应采用何种配比？

设配煤总和为 100%，王矿煤的配比为 x，则陈矿煤的配比应为 $1-x$。根据配煤硫分不超过 1.0%的要求，可按下列方程分别求出这 2 个矿井的配煤比如下：

$$2.09x + 0.62(1-x) \leqslant 1.0$$

解方程，得 $x = 0.2585(25.85\%)$，$1-x$ 为 74.15%，即王矿煤和陈矿煤的配比分别占 25.85%和 74.15%时，配煤硫分即可不超过 1.0%。由于配煤时不能过于精细，同时为称量方便和保证硫分低于 1.0%，可采用王矿煤的配比为 25%、陈矿煤的配比为 75%的方案，这时配煤的硫分为：

$$2.09 \times 0.25\% + 0.62 \times 0.75 = 0.99$$

即这种动力配煤的硫分为 0.99%。

此外，还可求算出配煤的挥发分（V_{daf}）和发热量（$Q_{net,ar}$）结果。

配煤挥发分：

$$V_{daf} = 20.82 \times 0.25 + 0.75 \times 36.60 = 32.66\%$$

挥发分在33%以下是较理想的动力用煤。

配煤发热量：

$$Q_{net,ar} = 23.13 \times 0.25 + 23.79 \times 0.75 = 23.62 MJ/kg$$

发热量在23.62MJ/kg的煤对大多数的工业锅炉都能满足要求。此外，灰熔融性温度(ST)也能达到1250℃以上，比单独使用陈矿煤可提高50～70℃左右，基本能达到一般工业锅炉的要求。至于煤的粘结性(CRC)可达3左右，也是动力用煤较理想的粘结性，因单独烧王矿煤会因粘结性过强容易影响通风，而单独用陈矿煤时因毫无粘结性而在层燃炉中容易漏煤而损失。这样既充分利用了高硫煤资源，又可使配煤的粘结性降低，有利于煤炭的完全燃烧和节约能源。

另外，对只生产高硫煤的局(矿)来说，也可与附近矿区的低硫煤相配。如重庆南桐局的高硫洗混煤可与永荣局的低硫洗混煤相配，使其配煤的硫分达到用户需要。

硫分($S_{t,d}$)在5%以上且以有机硫为主的特高硫分煤，其产量又较大，只采用与低硫煤相配的方法显然无法使配煤的硫分达到1%以下，这时只有在配煤的同时再添加固硫剂，以最大限度地将燃烧后的SO_2固定在灰渣中。如广西某矿以有机硫为主的高硫煤的$S_{t,d}$为5.5%左右，洗选后的硫分更高，这种煤以1:1的比例配入$S_{t,d}$为0.3%的盘江矿煤，配煤的硫分为2.9%，再加入固硫率在40%左右的固硫剂，那么该配煤在燃烧时排放出的SO_2量就相当于硫分为1.74%(2.9%×60%=1.74%)的煤燃后排放的SO_2量。如把广西高硫煤的配比改为25%，盘江煤的配比为75%，这时配煤的硫分为1.60%(75%×0.30%+25%×5.5%)，再加入固硫率为40%左右的固硫剂后，其配煤燃烧时排放出的SO_2量相当于硫分为0.96%(1.60%×60%)的煤燃后排放的SO_2量。该矿高硫煤的年产量在150万t以上，要使所产煤燃后的SO_2排放量全部达到环保要求，需配入$S_{t,d}$为0.30%的盘江低硫煤达450万t以上，因而利用动力配煤并加固硫剂的方法目前无法使大量的高硫煤得到充分利用。对这种以有机硫为主而产量又较大的矿区来说，为了使燃煤排放的SO_2达到环保要求，唯一的出路是采取投资和运行费用都很高的烟气脱硫方法或采用循环流化床锅炉加石灰石在炉内固硫的方法，而这2种方法对高硫、高灰的低质煤来说在经济上更难以承受。所以，对特高硫煤($S_{t,d}$大于5%)矿区来说，因地制宜地适当限产将是一种切实可行的办法。

第六节　动力配煤优化方案软件系统设计

一、系统分析

动力配煤的煤质技术指标必须满足用户要求，而且配煤成本最低，即动力配煤有配方的优化问题。其实质是在一定约束条件下求解目标函数的极值问题。通常可分为提出约束条件、确定目标函数和求解 3 个步骤。

某动力配煤中心提供了从 A、B、…到 I 的 9 个供煤单位和煤质指标及煤价等原始数据 这是一个二维表形式的数据，正好建一个基础数据库（如表 7－4－23）。

表 7－4－23　秦皇岛动力配煤原始数据

矿名	M_t（%）	A_d（%）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	$S_{t,d}$	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	HGI	ST（℃）	到场价（元/t）
A 矿	12.50	8.33	35.63	2	0.53	25.64	52	1240	225
B 矿	9.70	6.71	33.75	3	0.40	27.19	58	1250	225
C 矿	10.80	15.47	34.24	2	0.57	24.08	50	1250	215
D 矿	14.00	6.26	36.05	1	0.25	25.03	55	1140	220
E 矿	12.00	7.00	35.63	1	0.40	25.26	55	1250	240
F 矿	7.20	34.13	42.88	2	0.79	18.04	85	1500	143
G 矿	12.10	26.30	25.23	6	1.24	21.43	100	1500	153
H 矿	5.01	41.28	6.61	1	0.61	17.35	45	1443	120.33
I 矿	6.01	35.25	35.61	4	0.79	17.14	88	1388	131.40

该动力配煤中心提出了配煤后煤质指标满足的条件。其中之一如表 7－4－24 所示。

表 7－4－24　配煤指标满足条件值

配煤指标	下限值（≥）	上限值（≤）
M_t（%）		
A_d（%）		

配煤指标	下限值(≥)	上限值(≤)
V_{daf}(%)	25.00	
CRC		5
$S_{t,d}$(%)		0.79
$Q_{net,ar}$(MJ/kg)	23.00	24.25
HGI	50	
ST(℃)	1300	

根据动力配煤实际,可在表 7-4-23 中的 9 个矿点中任选 2~4 个矿点参加配煤。比如选取 B、G 和 I3 个矿点作为配煤单位,配煤后煤质指标满足表 7-4-24 要求。设 x_1、x_2、x_3 分别为 B、G 和 I 矿配煤后各占的百分比。V_{daf}和 ST 采用煤科总院北京煤化学研究所和信息中心 1999 年共同开发出的非线性公式计算:

$$V_{daf}:\{\Sigma xi \times V_{daf} \times (100 - M_{ad}i - A_{ad}i)\} \div \{\Sigma xi \times (100 - M_{ad}i - A_{ad}i)\}$$

$$ST:\{(\Sigma xi \times STi \times (100 - M_{ad}i)/100 \times A_d i)\} \div \{\Sigma xi \times (100 - M_{ad}i)/100 \times A_d i)\}$$

其中:xi 为各单煤的配煤比,$V_{daf}i$ 为各单煤的 $V_{daf}i$,STi 为各单煤的 STi,$M_{ad}i$ 为各单煤的 $M_{ad}i$,$A_d i$ 为各单煤的 $A_d i$。

即满足配煤后的 $V_{daf} \geqslant 25\%$ 和 $ST \geqslant 1300℃$

再将 V_{daf}和 ST 进行交换,并化为线性方程,可构成如下约束方程:

$$\begin{cases} V_1 * x_1 + V_2 * x_2 + V_3 * x_3 \geqslant 25(V_{daf}) \\ 3x_1 + 6x_2 + 4x_3 \leqslant 5(CRC) \\ 0.4x_1 + 1.24x_2 + 0.79x_3 \leqslant 0.79(S_{t,d}) \\ 27.19x_1 + 21.43x_2 + 17.14x_3 \geqslant 23.00(Q_{net,ar}) \\ 27.19x_1 + 21.43x_2 + 17.14x_3 \leqslant 24.25(Q_{net,ar}) \\ 58x_1 + 100x_2 + 88x_3 \geqslant 50(HGI) \\ S_1 * x_1 + S_2 * x_2 + S_3 * x_3 \geqslant 1300(ST) \\ \left.\begin{array}{l} x_1 > 0 \\ x_2 > 0 \\ x_3 > 0 \end{array}\right\} \text{(各单煤配比大于 0)} \end{cases}$$

其中:V_1、V_2、V_3 为 V_{daf}换算后的系数,S_1、S_2、S_3 为 ST 换算后的系数。

如果我们追求配煤的成本价最低(这也是用户最关心的问题),则有如下目标函数:

$$Z_{min} = 225x_1 + 153x_2 + 131.4x_3$$

在满足上述约束条件下求解该目标函数的极值，可借用线性规划方法中单纯形法求解。

在实际工作中，9 种煤任选 3 个进行配煤，共有 $C_9^3 = 84$ 种组合，但能够满足约束条件的组合就少得多，且要求最优解，又满足配煤实际要求。因此，系统运行时可先将各种最优解存放在数据库中，经过加工分析再输出实际可行的结果。

单纯形法标准 FORTRAN 程序要求的数据文件，以上面的约束方程为例如下：

	3.00		6.00	4.00	(CRC)
≤		5.00			
	0.40		1.24	0.79	($S_{t,d}$)
≤		0.79			
	27.19		21.43	17.14	($Q_{net,ar}$)
≤		24.25			
	V_1		V_2	V_3	(V_{daf})
≥		25.00			
	27.19		21.43	17.14	($Q_{net,ar}$)
≥		23.00			
	58.00		100.00	88.00	(HGI)
≥		50.00			
	S_1		S_2	S_3	(ST)
≥		1300.00			
	1.00				(x_1)
≥		0.10			
			1.00		(x_2)
≥		0.10			
				1.00	(x_3)
≥		0.10			
	225.00		153.00	131.40	(价格)

其中：x_1、x_2、x_3 分别大于 10%。

另外，单纯形法标准程序还要求一条信息放在文件的第一行上。即：

11　3　3　7　1

它们依次为：总的方程个数(11)、配煤个数(3)、“ < = ”方程个数(3)、“ > = ”方程个数(7)、“ = ”方程个数(1)。

二、系统设计

系统设计包括数据库结构设计和程序模块结构设计。

(一)数据库结构设计

本系统设计有 2 个数据库，基础数据库存放原始基础数据，结果数据库存放各种配煤最优解的结果。

(二)程序结构设计

通过系统分析，动力配煤软件设计的核心是如何建立约束方程和求解。为了建立一个良好的程序系统，系统的设计阶段很重要，我们采用 SD(结构化设计)方法进行系统设计。系统功能模块如图 7－4－6。

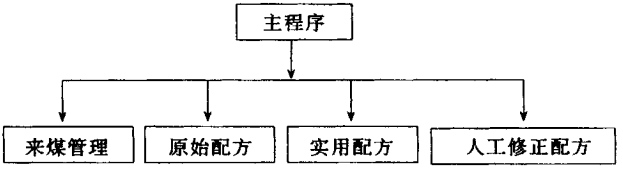


图 7－4－6　功能模块图

主程序——主控模块：预置计算机系统参数，控制其他模块。

来煤管理——数据管理模块：完成原始数据的录入、修改、删除和打印等功能。

原始配方——动力配煤原始配方模块：它调用一个通用过程和打印数据过程。

实用配方——动力配煤实用配方模块。由于原始配方各单煤的配煤比为有 2 位小数的数据，配煤生产中无法实现；通常实用配方经过一定原则处理，使配煤比数据精确到整数 1%或者 5%。它调用实用配方过程。

人工修正配方——人工修正配方模块：它调用人工修正、自动修正和人工给出 3 个子过程。

实用配方模块程序流程如图 7－4－7。

其中：CSSJ 为显示原始数据；DLSYGC 为动力配煤优化方案实施过程。

DLSYGC 模块流程如图 7－4－8。

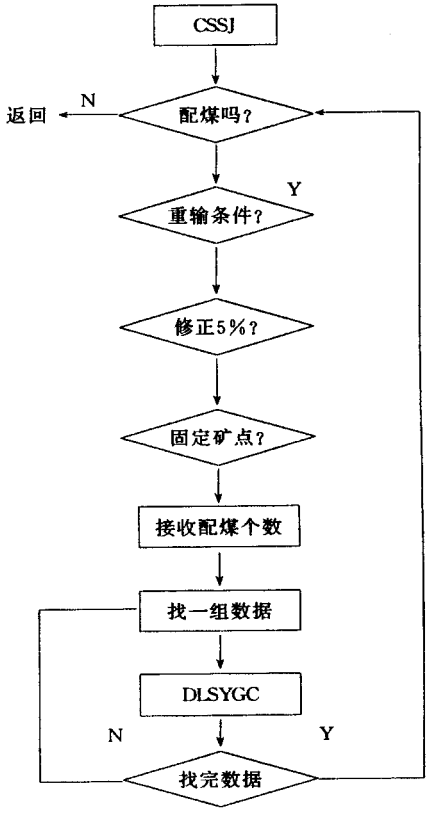


图 7-4-7　实用配方(DLSY)流程图

(1)SRTJ:若在 DLSY 模块中要求重输条件,在此输入配煤满足的指标条件。

(2)L—P:形成约束方程文件,L—P 存在约束方程系数文件。即系统分析中的单纯形法要求的 FORTRAN 数据文件。

(3)LP2:调用单纯形法 FORTRAN 程序。

(4)L—P1:单纯形法结果文件。

(5)最优解="T":即在 L—P1 文件中最后一行为'T'或'F'"如果'T'存在时表示最优解存在,否则没有最优解。

(6)SSWR:各种单煤的配煤比结果四舍五入,使其精确到个位。

(7)JYTJ:进行约束条件检验,满足约束条件的配方存放在 fadb1.dbf 中,以便执行打印模块输出结果。

(8)修正配煤比间隔 5%:各种单煤的配煤比结果进行间隔 5% 的舍入,然后执行 TYTJ,满足配煤约束条件的配方存在 Fadb5.dbf 中。

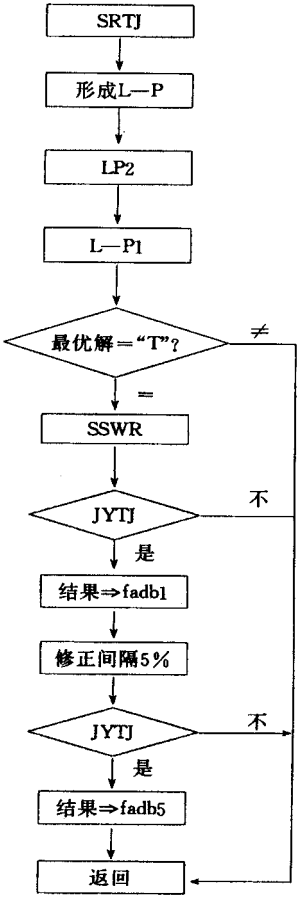


图 7－4－8　实用配方过程(DLSYGC)流程图

三、专家系统使用说明

(一)系统使用环境

1. 硬件需求

微机 :奔腾以上 CPU,内存 16M 以上,

显示器 :VGA 显示器,分辨率 800×600,颜色数 16 位以上;

打印机 :通用 A4 幅面的喷墨或激光打印机。

2. 软件需求

中文 Windows95 ’/98 ’

3. 数据库说明

icdb.dbf—基础数据库,存放化验数据。

fadb1一.dbf—存放原始配方配煤比间隔1%的各种配煤方案。

fadb2一.dbf—存放原始配方配煤比间隔1%的满足条件的配煤方案。

fadb1.dbf—存放实用配方配煤比间隔1%的各种配煤方案。

fadb5.dbf—存放实用配方配煤比间隔5%的各种配煤方案。

fadb2.dbf—存放实用配方配煤比间隔1%的满足条件的配煤方案。

fadb3.dbf—存放实用配方配煤比间隔5%的满足条件的配煤方案。

fadby2.dbf—存放修正配煤比间隔1%的满足条件的配煤方案。

fadb3y.dbf—存放修正配煤比间隔5%的满足条件的配煤方案。

(二)系统操作

1. 装入动力配煤系统

将安装光盘放入驱动器,安装程序将自动启动,或点按 setup 程序启动安装程序,在硬盘上建立 ZJXT 子目录,将系统软件安装到该子目,录下。

2. 启动动力配煤系统

选择‘开始/程序/专家系统/主程序’后即进入动力配煤系统,并在屏幕上显示各个功能模块的主菜单,用鼠标选择所需的功能模块。

3. 使用动力配煤系统的规程

系统共包含4个功能模块——来煤管理、原始配方、实用配方、人工修正配方。

运行‘人工修正配方’模块前,需要运行‘实用配方’模块。

所有的操作可以按屏幕提示顺序进行。

(三)来煤管理

本模块功能包括基础数据库的数据录入、修改、删除、浏览、查找、打印等管理功能。

1. 来煤登记

煤场的煤源来自不同的地方,凡需要一起配置的煤都要先到数据库进行注册,登记的内容包括来煤的日期(月/日/年)、来煤编号、矿名(汉字)、煤炭类别(汉字)及价格。

2. 输入化验数据

每一种来煤都要取样化验,化验结果要全部输入数据库。

一旦输入已注册的该煤样的编号,往下即可将化验的原始数据写入(程序会自动计算派生出其他配煤所需要的数据)。

3. 更新化验数据

若发现输入的化验数据有误,可以进行修改。

一旦输入需要该煤样的编号,屏幕上就会出现一张已入库的煤样的原始数据表。此

时即可将正确的化验数据写入即可。

4. 删除化验数据

在需要配煤的一批煤中，有某种煤不再参加配置或更换其他煤，就要将这种煤的化验数据从数据库中删掉。

5. 打印化验数据

如果需要，可以由打印机打印出全部化验的基础数据和配煤所需的全部指标。

(四)配煤原始配方

原始配方主界面，上方为配煤原始数据，下方为配煤的选项，选择完毕，按开始配煤按钮即进行配煤。

按照线性规划原理，利用多种煤进行不同组合的配置。

屏幕上首先出现要配煤的几种煤的配煤指标，紧接着出现选择判断指标的 5 种询问：

(1)这些数据需要配煤吗(Y/N)(一般情况选择‘Y’)？

(2)输入配煤单位个数(2～5)：(即输入要进行配煤的 2、3、4 或 5 种煤的个数。)

(3)自动打印最佳方案(Y/N)？(一般情况是选择‘Y’，打印机即可打印出配煤的全部结果 若选择‘N’，经过计算，每配好一个配方将询问一次是否打印。)

(4)需要固定一种煤的配煤比吗(Y/N)？(选择‘Y’，则输入需要固定矿的编号和配比值 选择‘N’，则不输入)。

输入固定一种煤的矿号(即序号)□□□□

输入固定一种煤的配比值(如 25%)□□□□

(5)重新输入配煤指标范围吗(Y/N)？(若与原来配煤条件相同，选择‘N’，则不再重新输入配煤指标范围 若需要重选配煤指标或指标范围，选择‘Y’，则屏幕显示约束条件的表格)

选择指标及范围(下限值≥ ；上限值≤)

□ 1——M_t：　　10.00

□ 2——A_d，　　30.00

□ 3——V_{daf}：　　25.10

□ 4——CRC：

□ 5——$S_{t,d}$：　　1.50

□ 6——$Q_{net,ar}$：　　20.9　　23.00

□ 7——HGI：　　55

□　8——ST：　　1300

注：□(核选框)选中√，需输入该指标的下限值或上限值；□不选中，不需输入。单击开始配煤按钮后，配煤开始。屏幕不断闪现所选择的指标及一个个配方：

配煤指标：M_t、A_d、V_{daf}、$S_{t,d}$、$Q_{net,ar}$、HGI、ST

第×单位：＊＊＊＊＊＊第×配煤比：＊＊.＊＊

……

单击预览方案和打印方案，可预览和打印动力配煤生产最佳的原始配方方案。

(五)配煤实用方案

为了使配煤的理论配方用于实际配煤中，还需进行实用性处理。

选择实用配方模块基本操作方法同理论配方一样，只是多修整配煤比值的信息：

需要修正配煤间隔比值5%吗(Y/N)？

需要固定一种煤的配煤比吗(Y/N)？

[当输入“Y”时，要接收固定一种煤种矿点在数据库(JCDB)中的顺序号和固定煤种配煤比值。可固定一种煤种配煤比或2种煤种配煤比。]

注：某方案中某一种煤的配煤比小于10%时，该方案去掉，有固定某种煤比值的方案除外，实用配方中每一种煤的配比大于10%。

(六)人工修正配方

第一种方式：人工修改配煤比值，使用者根据某一实用配方的配比值进行修改，程序要求输入某一配方的序号和配比值。

根据最佳实用配方配好的煤还需要化验，重新对配方进行人工校正。

配煤间隔1%数据是fadb2x.dbf中的记录号(即某一配方的序号)。

配煤间隔5%数据是fadb3x.dbf中的记录号(即某一配方的序号)。

第二种方式：自动修改配煤比值，程序中安排自动修改配煤比值。

第三种方式：人工给出配煤比值，然后进行计算加权均值。

注：人工修正配方满足条件的范围值需要与配煤指标范围值(DLPC.MEM)一致，否则，通过实用配方模块输入。

(七)帮助

即该配煤程序的操作过程的使用说明陈述，便于操作人员使用。

第七节　利用神经网络、模糊数学求解优化配方

一、优化配煤

研究结果表明，当采用配煤燃烧时，可以提高锅炉的燃烧效率以及保证锅炉燃烧的经济性。优化配煤技术是一种控制入炉煤煤质的重要手段，它可以有效地控制入炉煤质，保证锅炉的稳定运行，减轻结渣、沾污、积灰、腐蚀和磨损，提高锅炉运行的安全性和经济性。

有些研究文献证实配煤的各种指标（包括工业分析、发热量等和燃烧特性指标）与各组分单煤的指标之间的关系较为复杂，具有典型的非线性映射特征。但长期以来受计算技术、实验条件和手段、数学建模和解决等方面原因的限制，国内外的优化配煤数学模型在表达配煤各质量指标与单煤对应质量指标间的关系时都处理为线性的加权关系式，一般仅仅根据煤的发热量和挥发分要求进行简单的掺配，未考虑煤的着火、燃尽、结渣等特性和 SO_2 排放因素，且自动化水平较低，这样常会因配制不当，而不能满足锅炉燃烧的需要，造成燃烧设备着火困难、燃烧不稳、结渣积灰加剧和污染物排放增加等问题，甚至造成停炉事故。因此，发展动力配煤，全面提高优化配煤技术的研究和工程水平已成为一个重要课题。实际上，能否根据各组分单煤的煤质指标准确取得配煤的煤质特性和燃烧特性指标已成为配煤技术优劣的关键。

研究发现，配煤与单煤之间的某些指标存在非线性关系，因此配煤的各种实测数据必然反映了配煤与单煤之间关系的内在机理规律，用线性拟合或者多项式拟合都是对其内在规律的一种简单揭示。目前日益兴起的神经网络技术对实现非线性映射，尤其是解决输入对输出影响的具体机制不太清楚的‘黑箱’或‘灰箱’问题显得极为有效，是解决配宽中一些非线性问题的有效方法。

现代数学在人工智能神经网络、模糊数学、混合变量——最优化求解等方面取得的突破性进展给问题的解决带来了新的方法，现代信息技术的高速发展又给问题的解决提供了新的条件。综合运用这些方法和手段，可以得到令人满意的基于配煤自身特点的各项指标预测结果，从而使建立在非线性方法基础上的洁净优化配煤专家系统能够得以实现。

要有效地建立配煤领域专家系统,还必须选择适当的计算机的软、硬件环境。对于多元优化配煤专家系统而言,由于用户对象为非专业计算机用户,主要使用环境为实际生产环境,更应考虑建立和使用系统的方便性与时效性,知识表达和推理机制的领域适应性,配煤知识的动态获取和知识库的动态维护。此外,专家系统的运行效率、实时可操作性以及与其他软件环境能否灵活对接也应是很重要的考虑方面。因为配煤专家系统中最核心内容是基于多种非线性方法的离散变量全局优化过程,运算量很大,软、硬件开发应用环境只有能够提供较高的运算效率才能使专家系统实现实时可操作性及工业级应用精度,另外,开发环境还应能提供良好的图形和文字界面能力。优化配煤专家系统汇集了专家在动力配煤领域的先进知识,同时其友好的人机交互界面可以正确地指导电厂或煤场操作人员的正确运行。

二、优化配煤专家系统的特点

优化配煤技术离不开计算机技术的支持,它从简单的线性优化方法到复杂的非线性优化方法、再到全面完备的多元优化配煤专家系统的发展过程,也正是传统煤炭加工技术和现代信息技术成功结合的一个范例。

专家系统作为智能程序不仅处理数据,更重要的是处理知识。它有下列主要特点。

(一)基于知识的系统组织

专家系统中的知识分为三级结构 :事实数据库、知识库和推理机。事实数据库知识是特定的具体问题所具有的 知识库知识选用合适的知识表示模式进行显式表达,可以进行扩充和学习完善,推理机知识的组织一般采用固化的方式在专家系统的建模过程中被设计和固定下来,需要同知识库知识一样进行显式表达和推理。专家系统将知识库和运用知识库的推理机分开组织的结构体现了知识库的灵活性,便于知识库的扩充、学习和解释机制的解释实现。

(二)专家系统的启发性

专家系统在模拟专家求解问题的思维过程中不仅使用逻辑性知识,还大量使用启发性知识。在信息不完全、不精确的情况下,专家系统在求解复杂或高难度问题时结合和运用启发性知识能进行高水平的分析、推理。

(三)专家系统的符号推理

专家系统不仅仅以数据为处理对象,更强调符号推理。

(四)专家系统的灵活性

专家系统的灵活性是指系统具有在非编程状态下不断扩充和完善知识库,进行不断

改善系统性能的功能。

(五)专家系统的透明性

专家系统能向用户解释它的推理过程,回答用户一些关于它自身的问题,如何得到问题的求解。

(六)专家系统的高性能

专家系统拥有一定的配煤专门知识的数量和质量,在某些方面可以像专家一样具有解决高水平问题的能力。

(七)良好的人机界面

专家或用户能以一种接近自然语言的语言同系统进行信息交流,使得非计算机专业的领域专家和用户易于使用该专家系统,加强了系统的透明性和可接受性。

三、优化配煤专家系统的模块建立

任何专家系统都是依靠大量的专门知识来解决特定领域中的复杂问题,其核心任务是对特定领域所涉及的知识进行总结、归纳和利用,因而在专家系统的结构中,知识表达与推理技术始终是最重要的。

(一)建立优化配煤专家系统的知识表达

一般专家系统的知识表达可以采用状态空间法、语义网络法、产生式规则,知识表达语言(KRL)等多种技术,这些技术都是将专家知识模式化,存入计算机中,当专家系统推理判断时,根据算法到知识库中去搜索。在目前已有的优化动力配煤中,尚缺乏大量的具有代表性的实验数据,更主要的是对煤混合燃烧的机理知之不多,对配煤的煤质特性与组成单煤煤质特性之间的关系有待深化,特别是仍然有相当的煤质特性或燃烧特性指标尚未能总结出较为准确的计算模型,所以依靠以上提到的这几种方法很难精确地描述出知识的表达形式。

在这种情况下,本书提出利用神经网络理论的反向传播算法来建立专家系统的知识表达,它能将模糊的、不确定的因素隐式表达,并蕴含在网络的连接权矩阵中,充分地模拟了配煤和单煤煤质之间一些复杂的非线性关系,而连接权矩阵的数值可以通过不断地学习训练样本而得到。

(二)专家系统的功能模块

在优化配煤专家系统的设计过程中使用了模块化技术,具体而言,系统由 6 个功能性结构模块构成,如图 7 – 4 – 9 所示。

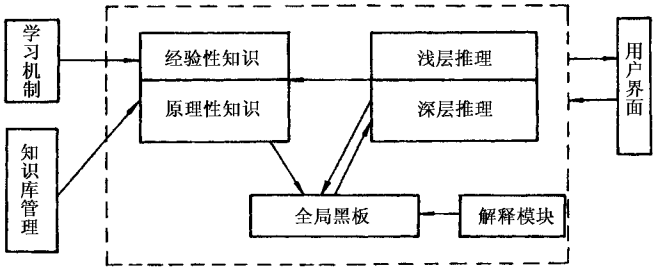


图 7－4－9　优化配煤专家系统的功能模块

(1)知识模块管理库作为优化配煤专家系统的核心,其功能包括存储和管理专家系统内的知识。作为神经网络学习对象的全国煤种数据库,以及作为其学习结果的阈值矩阵,也是数据知识之一。在优化配煤专家系统中,大型的 Access 数据库起着管理知识库模块的作用,并通过 SQL 技术进行数据库的维护。

(2)推理控制模块可以对用户提供的特定问题及要求,选用知识库中的有关知识,并经相应算法运算后做出回答。

(3)学习机制模块将洁净优化配煤领域内的理论知识、相关数据和领域专家所特有的经验性知识转化为计算机可识别的形式存入知识库。学习模块还负责维护知识库的完整性和一致性。

(4)全局黑板用于存放反映当前状态的事实数据和最终结论,包括用户的输入数据、已知数据和中间及最后结果等。

(5)解释模块阐述了系统推理过程中的有关问题和系统本身的问题,在优化配煤专家系统中,解释模块还包括动态的系统帮助方式。

(6)用户界面将外界输入转化为专家系统内部的表达形式,并交给相应的功能模块处理,同时将处理结果反馈给用户。优化配煤专家系统的的用户界面由 Visual Basic 语言编制。

四、优化配煤方法

优化配煤最基本的核心任务就是确定动力配煤的优化配比,即确定选什么煤,每种煤的数量。在求解时可以用多种数学方法,常见的有结合模糊数学的模糊综合评判法和基于煤质分析数据的数学方法,以下分别介绍。

(一)模糊综合评判法

模糊综合评判法的主要思路是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评判事物有关的各个影响所作的综合评价方法。采用模糊综合评判法的求解方法简述如下:

首先确定因素集 U，取

U = {着火温度、燃尽率 D、结渣指数 R、NO_x 排放量、SO_x 排放量}

针对高效低污染的要求及试验结果确定权重集 $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$。备择集则是掺配比例，从 0 到 100% 离散，可取为 $U = \{0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0\}$。

由试验结果作单因素评判可获得单因素评判矩阵 R，然后进行模糊综合评判 $B = A \cdot R$，得到模糊综合评判矩阵 $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$，再按加权平均法 $y = \sum b_j V_j / \sum b_j$，则得到了具体的掺配比例 Y。

以上仅考虑煤质本身特性时的评判结果，要应用到实际锅炉中去，还应考虑其他因素（如锅炉结构参数、运行参数、燃烧工况参数及燃烧方式）的综合影响。因此，这是属于多级评判问题，也可采用模糊综合评判法确定最佳掺配比。

总的来说，采用模糊综合评判法确定配煤燃烧特性时需要了解以下 4 个方面的因素：

(1) 煤质特性（A_1，R_1）：包括着火、燃尽、结渣、积灰、NO_x、SO_2。

(2) 燃烧器结构及燃烧方式（A_2，R_2）：①直流燃烧器切圆燃烧方式；②旋流燃烧器水平燃烧方式；③W 型火焰燃烧方式。

(3) 运行参数（A_1，R_3）：包括煤粉细度、煤粉浓度、配风方案、一次风率、一次风速、二次风速、过量空气系数。

(4) 炉膛结构参数（A_1，R_4）：包括 q_f、q_v、q_h。

由于模糊综合评判法在计算过程中权值矩阵需要根据计算者的经验给定，随意性较大，权值选取不当时会得到错误的结论。

(二) 基于煤质分析数据的数学方法

此类方法思想源自人工智能，在这种数学模型中，所期望解答的描述称为目标，而将从初始条件通向目标的可能步骤的集合视为搜索集，问题求解就是搜索可能的解集，找到满足目标的解。

由于对配煤特性的描述可以采用线性表示式或非线性表达式。煤质分析数据的数学方法可分化为 2 种不同的模型：线性规划问题求解模型和非线性规划问题求解模型。

在动力配煤中，用户对配煤各项煤质指标的要求就是动力配煤的基本约束条件，如果认为动力配煤过程是线性问题，即认为描述配煤特性的各类指标具有可加性时，则可采用线性规划问题方法求解。

设有 n 种单煤，要求配制具有 m 个技术指标 T 的配煤，若在配煤配比中占百分率为 X_j 的第 j 种单煤（$j = 1, 2, \cdots, n$）经分析出来的第 i 个技术指标（$i = 1, 2, \cdots, m$）为 T_{ij}，采

用线性规划问题求解方法时可认为配煤的第 i 个技术指标 $f_i(X_j)$ 可描述为：

$$f_i(X_j) = \sum_{j=1}^{n} T_{ij} X_j \tag{7-4-1}$$

如认为动力配煤过程是非线性问题，即认为描述配煤特性的各类指标不具可加性时，则采用非线性规划问题求解方法求解。此时配煤的第 i 个技术指标可描述为：

$$f_i(X_j) = f(X_j，\text{各组分单煤的煤质特性}) \tag{7-4-2}$$

如果用户要求配煤第 i 个煤质特性的上下限为 B_i 和 A_i，构成规划问题的约束：

线性规划：

$$A_i \leqslant f_i(X_j) = \sum_{j=1}^{n} T_{ij} X_j \leqslant B_i \tag{7-4-3}$$

非线性规划：

$$A_i \leqslant f_i(X_j) = f(X_j，\text{各组分单煤的煤质特征}) \leqslant B_i \tag{7-4-4}$$

在规划问题的约束条件确定后，下一步需确定追求的目标，在动力配煤中追求的目标详见本章第四节。

配煤的非线性优化数学模型如下：

(1)约束条件：

$$A_i \leqslant f_i(X_j) = f(X_j，\text{各组分单煤的煤质特性}) \leqslant B_i \tag{7-4-5}$$

(2)目标函数：

$$\min Z = \sum_{j=1}^{n} C_j X_i \text{ 或其他追求目标} \tag{7-4-6}$$

与炉内燃烧有关的煤质特性之间表现出较强的非线性。因此采用非线性优化数学模型更能反映真实情况。

五、优化配煤专家系统非线性模型的建立

由于各种单煤的性质不同，混合后的不同煤种颗粒在燃烧过程中相互影响，相互制约，因此配煤的着火、结渣、排放等特性不可能是各组分煤种相应特性的简单叠加，而呈现出非常复杂的非线性特征，用加权平均方法就有可能造成较大的误差。日益兴起的神经网络技术是解决配煤某些燃烧特性的非线性问题的有效方法。尤其是神经网络模型具有的自学习功能，可以模拟人脑思维的机理，在计算过程中随着使用新煤种的增加，不断地修正模型，提高模型的可靠性和推广能力，这是其他分析手段所不能达到的。

(一)优化配煤的非线性数学模型

根据配煤的非线性规律，本书将人工神经网络、模糊数学等理论应用于动力配煤，建立了非线性优化动力配煤的数学模型。根据锅炉燃烧的需要，选择煤的发热量、挥发分、

硫分、水分、灰分、灰熔融性、结渣特性、着火特性、燃尽特性、SO_2 排放特性 10 个燃煤指标作为优化配煤的约束条件，而保证配煤的最低成本是设置的规划目标（根据用户的特殊要求，可有多个不同的目标）。数学模型如下表示。

1. 约束条件

（1）发热量：$Q_A \leqslant f_d(X_i, Q_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leqslant Q_B$

（2）挥发分：$V_A \leqslant f_v(X_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leqslant V_B$

（3）硫分：$S_A \leqslant f_s(X_i, S_i) \leqslant S_B$

（4）水分：$M_A \leqslant f_m(X_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leqslant M_B$

（5）灰分：$A_A \leqslant f_a(X_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leqslant A_B$

（6）灰熔融性：$t_{2A} \leqslant f_{st}(X_i$，各单煤的灰成分分析$) \leqslant t_{2B}$

（7）着火温度：$t_A \leqslant f_t(X_i, Q_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leqslant t_B$

（8）结渣特性：$R_A \leqslant f_r(X_i$，各单煤的灰成分分析$) \leqslant R_B$

（9）燃尽特性：$D_A \leqslant f_d(X_i, Q_i, M_i, A_i, V_i, F_i) \leqslant D_B$

（10）SO_2 排放特性：$I_A \leqslant f_{so}(X_i, S_i, Q_i$，各单煤的灰成分分析$)$

2. 目标函数

$$P_{\min} = \sum_{i=1}^{n} CiXi(i = 1,2,3,\cdots n)$$或其他追求目标

数学模型中 X_i 表示单煤配比，F_i 为固定碳含量，S_i 为硫分含量，q_i 则为 SO_2 排放浓度。约束条件方程中 10 个质量指标方程描述如下：发热量、灰分、水分、挥发分、灰熔融性着火特性、燃尽特性和 SO_2 排放特性采用神经网络方法预测；结渣特性采用模糊判别方法；硫分及灰分中的 MgO、TiO_2、$(K_2O + Na_2O)$等各成分数据用加权形式；SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO 这 4 种成分用线性拟合公式。随着配煤技术研究的深入，今后这几种描述方法都可以实现用神经网络模型来表示。

（二）非线性优化模型的求解

非线性最优化是优化理论中最难的一种，对于连续型变量、目标函数及约束条件等可用函数表达式描述的优化问题，已有较多的算法，如复形调优法。但对于约束条件用过程来表达的情况，则无法求解，神经网络技术就无法纳入整个优化程序中。另外，由于配煤生产中实际需要，如配煤机械的运转精度，可能要求配比为离散量，如按 10%、5%或 1%梯度变化，这就构成了离散变量优化问题，只能选用离散变量算法求解。

混合离散变量的直接搜索法（MDOD 方法）是综合了非线性规划中“爬山”和“查点”策略思想基础上提出的一种约束非线性混合离散变量优化设计方法。其主要构思为：首

先从一个可行的离散点出发,沿相对混合次梯度方向进行离散一维搜索,得到一个满足约束条件同时又使目标函数值靠近目标值的新离散点,然后由此点开始重复,直至得不到新点,就开始在离散子空间 ED 和 EC 内进行轮变搜索。如轮变搜索后找到一个新的可行离散点,则返回第一步的搜索过程;否则就根据停留的离散点的目标函数和约束函数所提供的信息,按确定的规则在单位领域内查点,查到新点就返回第一步的搜索过程,否则根据最优解的基本性质,此点即为局部离散最优解。有关 MDOD 方法的具体论述可参见有关优化问题书籍。

六、优化配煤专家系统的主要功能

对优化配煤进行合理的求解,必须是以对配煤煤质特性及配煤燃烧特性要有个较为准确的描述为基础的。为此,浙江大学对配煤燃烧进行了大量的实验研究,总结出配煤特性与组成单煤之间的非线性关系,并以人工神经网络理论和模糊数学等方法建立了优化模型,因此基于这种原理开发的优化配煤专家系统可以得到最优的配煤方案。

优化配煤专家系统主要有配煤方案的优化计算、配煤性质预测、在线检测、煤场管理、销售查询、成本核算和在线帮助与打印等功能。

(一)煤场单煤数据库

优化配煤专家系统建立了"煤场现有单煤数据库",其中记录了贮煤场现有单煤的完整资料,包括来煤的时间、产地、品种、价格、数量、工业分析、灰熔融性以及元素分析等数据。

(二)历史单煤数据库

"历史单煤数据库"可以存储电厂等用户历年的进煤数据资料,甚至更多的煤质数据。

(三)设置配煤目标

煤场操作人员可以根据用户的要求,在"配煤目标"界面上分别设置配煤的煤质特性,包括发热量、挥发分、硫分、水分、灰分、灰熔融性、灰成分的范围以及配煤的结渣特性、着火特性、燃尽特性和排放特性。

(四)配煤方案的优化计算

在优化配煤专家系统中设置配煤目标,即输入符合锅炉燃烧需要的煤质特性和燃烧特性(包括着火特性、结渣特性、燃尽特性、排放特性等),再选择"现有单煤数据库"中单煤的使用情况(固定配比、不用、优化决策),就可以进行配煤方案的优化计算。

(五)优化计算结果

经过系统的运算,符合配煤要求的各方案存储到"配煤结果数据库"中,并以配煤成

本由小到大依次排列在‘计算结果’界面上，其中包括掺配煤种的名称和比例、配煤煤质特性与燃烧特性的预测值以及对各种配煤方案的评述，同时考虑到不同的锅炉燃烧要求，使运行人员可以根据配煤的各种指标进行各方案的重新排序，选择合适的优化配煤方案。

（六）实现在线监控的功能

配煤作业开始时，优化配煤专家系统首先将掺配煤种名称和掺配比例的信号输送至配煤生产线和生产控制系统，随即协调设备运行，同时为保证配煤作业的安全生产以及配煤的产品质量，优化配煤专家系统会不断地监控主要设备的运行，采集设备运行的参数，快速分析配煤的煤质特性，并由优化配煤专家系统进行判断与分析。如果参数有异，系统会视具体情况而重新计算配比或全面检查生产线的运行情况，发出新的指令以再次调整设备的运行，确实保证目标配煤的质量。

（七）配煤性质的预测

在优化配煤专家系统的运行中，只要选择‘现有单煤数据库’中的 2 种或几种单煤名称，并输入其对应的掺配比例，专家系统就可以快速预测出配煤的煤质特性和燃烧特性，以便在配煤生产前对掺配煤种以及掺配效果有基本的了解。

（八）煤场管理的功能

优化配煤专家系统的煤场管理功能可以实现对煤场单煤数据库、历史数据库、配煤数据库的查询；可以对各单煤种实施评价，并按来煤的省份、矿点、品种、煤质参数的大小（发热量、挥发分、硫分、水分、灰分等）进行查询与排序；可以动态管理煤场单煤的库存。

（九）燃煤销售管理

优化配煤专家系统可以对单煤和配煤的销售情况进行统计，并将各年、各季、各月的统计数据汇总，绘制出标准的金额统计图表和销售量柱状图。

（十）成本核算的功能

优化配煤专家系统可以进行配煤生产成本的登记与查看，并通过各类成本的核算正确及时地考核成本计划的完成情况，从而达到降低消耗、提高企业管理水平的目的。

（十一）在线帮助与打印的功能

优化配煤专家系统提供了在线的‘帮助’文件，其内容包括软件的操作、提示出错的原因、解答关于软件的疑难问题以及程序的制作原理。

“燃煤评价”、“现有单煤数据库”、“历史单煤数据库”、“配煤结果数据库”以及其他数据库中的记录均能以打印格式输出到打印纸上。

专家系统的核心是采用离散变量优化方法，可完成配煤方案的优化计算、配煤性质

预测、在线检测、煤场管理、成本核算和打印等功能。

七、非线性优化配煤专家系统的应用举例

某大型配煤场常用的原煤包括：①兖州 1 号；②黄陵；③长广；④大同；⑤兖州 2 号；⑥刘桥；⑦晋城；⑧枣庄(后文用编号代替煤种)，各种煤实测工业分析、灰成分分析以及灰熔融性、原煤价格见表 7 – 4 – 25。

表 7 – 4 – 25　参配单煤煤质特性及价格

煤样编号		1	2	3	4	5	6	7	8
煤样名称		兖州 1	黄陵	长广	大同	兖州 2	刘桥	晋城	枣庄
M_{ad}	%	2.56	5.16	2.34	2.17	2.44	0.58	4.73	2.47
A_{ad}	%	24.4	25.4	36.2	25.5	18	21.7	19.1	18.7
V_{ad}	%	27.7	22.3	24.2	24.3	30.1	9.85	4.66	28.75
FC_{ad}	%	45.4	47.1	37.2	48.1	49.5	67.9	71.5	50.4
$S_{t,ad}$	%	0.65	1.0	4.29	0.71	0.72	0.5	0.35	0.91
$Q_{net,ad}$	MJ/kg	23.9	22.7	19.1	23.3	26.4	26.6	26.6	25.5
SiO_2	%	51.5	51.6	50.3	55.3	47.4	44.6	48.4	50.2
Al_2O_3	%	25.6	20.1	29.8	18.9	26.6	31.5	32.7	27.2
Fe_2O_3	%	9.48	4.97	9.04	14.6	5.08	4.44	4.69	6.18
CaO	%	8.76	8.34	6.69	2.34	9.38	7.2	3.4	6.18
MgO	%	2.47	2.23	1.88	0.9	1.49	1.24	1.4	1.49
TiO_2	%	0.59	0.83	0.6	0.79	1.26	1.58	1.3	1.42
$K_2O + Na_2O$	%	0.226	0.65	0.159	1.6	1.22	0.89	2.37	1.29
ST	℃	1450	1180	1490	1310	1330	1380	1520	1450
价格	元/t	325	320	280	315	345	310	285	345

用户要求的配煤煤质为：

发热量 $Q_{net,ad} \geqslant 23.0MJ/kg$，$V_{daf} \geqslant 25\%$，$S_{t,ad} \leqslant 1.0\%$，$M_{ad} \leqslant 10\%$，$A_{ad} \leqslant 30\%$，$ST \geqslant 1350℃$，结渣中偏轻，较易着火，煤种自身固硫作用好，掺配煤种数见表 7 – 4 – 25。

计算结果如下：总组合数 $C_8^3 = 56$，符合用户要求的组合有多种，每一种组合的掺配煤种代号、最优配比和最低价格都列于表 7 – 4 – 26，表中前 6 列数字为煤种编号。为与线性规划方法比较表 7 – 4 – 26 同时列出厂线性优化方案解的结果。

表 7－4－26　非线性和线性优化配煤结果

优化配煤计算合适方案						线性规划求解结果								成本下降（元）
线性优化方法			非线性优化方法			最优配比（%）			最低价格（元）	最优配比（%）			最低价格（元）	
1	2	4				75	10	15	323					
1	2	5	1	2	5	30	10	60	336.5	45	10	45	333.5	3
1	2	8	1	2	8	10	10	80	340.5	10	10	80	340.5	0
1	4	5	1	4	5	20	10	70	338	60	10	30	330	8
1	4	8	1	4	8	10	10	80	340	10	10	80	340	0
1	5	6	1	5	6	10	70	20	336	55	35	10	330.5	5.5
1	5	7	1	5	7	10	75	15	334	50	40	10	329	5
1	5	8	1	5	8	10	10	80	343	10	10	80	343	0
1	6	8	1	6	8	10	10	80	339.5	10	20	70	336	3.5
1	7	8	1	7	8	10	10	80	337	75	10	15	324	13
2	4	8	2	4	8	10	10	80	339.5	10	10	80	339.5	0
2	5	8	2	5	8	10	10	80	342.5	10	10	80	342.5	0
2	6	8	2	6	8	10	10	80	339	10	25	65	333.8	5.2
4	5	8	4	5	8	10	10	80	342	10	10	80	342	0
4	6	8	4	6	8	10	10	80	338.5	10	20	70	335	3.5
4	7	8				10	10	80	336					
5	6	8				10	10	80	341.5					
5	7	8				10	10	80	339					
			1	2	6					65	25	10	322.3	
			1	2	7					65	25	10	319.8	
			1	3	7					80	10	10	316.5	
			1	4	6					70	20	10	321.5	
			1	4	7					65	25	10	318.5	

由上表可见，采用不同的描述配煤综合特性的方法（线性公式描述和神经网络方法描述），对应的最优化数学模型得到的最优方案不同。某些采用线性规划找到的配比方案不符合非线性规划的求解结果；某些非线性优化获得的配比也不能用线性优化获得；其他一些组合虽然 2 种方法求得的组合煤种相同，但最优配比却不同，最低成本也不同。

最后需要指出，浙江大学热能工程研究所研究认为配煤的各主要煤质指标与其单煤间多呈非线性关系，而煤科总院北京煤化所 1999 年最新研究发现配煤的工业分析（A_d、V_d、CRC）、硫分（$S_{t,ad}$、$S_{t,d}$）、发热量（$Q_{gr,d}$、$Q_{gr,daf}$）等都有较好的线性可加成性。V_{daf}、灰熔

融性特征温度(DT、ST、FT)及煤灰成分都不呈简单的线性关系,需把他们转化成线性关系后才能得到正确的配煤 V_{daf}、DT、ST、FT 及灰成分结果。目前有关科研单位所做的数据都还不够充分,有待各配煤场今后经过长期的实践来进一步予以验证。

第八节　配煤主要质量指标理论值的正确计算

兹以某配煤场的甲、乙、丙 3 种单煤为配煤原料煤为例,分别对配煤后的主要质量指标计算于后。该 3 种单煤的主要煤质指标如下:

设由计算机优化配方后,具配煤成本价最低的配方为:甲煤占 29%、乙煤占 35%、丙煤占 36%。兹将配煤后的主要煤质指标按本章第三节的公式分别计算于后。

煤种名称	配比(%)	M_t(%)	M_{ad}(%)	A_{ad}(%)	A_d(%)	V_{ar}(%)	V_{ad}(%)	V_d(%)	V_{daf}(%)
甲煤	29.0	20.0	8.23	5.81	6.33	26.79	30.73	33.49	35.75
乙煤	35.0	5.0	0.70	26.64	26.83	17.60	18.40	18.53	25.32
丙煤	36.0	10.0	1.76	48.69	49.56	20.05	21.89	22.28	44.18

煤种名称	CRC(1~8)	$S_{t,ad}$(%)	$S_{t,d}$(%)	$Q_{b,ad}$(MJ/kg)	$Q_{gr,ad}$(MJ/kg)	DT(℃)	ST(℃)	FT(℃)
甲煤	1	0.26	0.28	28.684	30.490	1210	1220	1230
乙煤	7	1.24	1.25	25.418	24.013	1500	> 1500	> 1500
丙煤	2	1.22	1.24	15.220	14.169	1500	> 1500	> 1500

一、配煤空气干燥基水分(M_{ad})的计算

配煤的空气干燥基水分系按一般的加权平均法求算。即:

配煤的 $M_{ad}(\%) = (29 \times 8.23 + 35 \times 0.70 + 36 \times 1.76) \div (29 + 35 + 36) = 3.27(\%)$

配煤的其他空气干燥基结果均与 M_{ad} 的相似公式求算。

二、配煤干燥基灰分(A_d)的计算

由于配煤中各单种煤的配比均以空气干燥基煤样为基础的,因此在求算配煤的干基灰分(包括其他干燥基结果如 V_d 和 $Q_{gr,d}$ 等)时,必须先把各种单煤的配比折算成干燥煤

样的配比后，才能用加权平均法求算其配煤的 A_d 结果。即干燥煤的配比(%) = 含空气干燥水分煤的配比(%) $\times \frac{100 - M_{ad}}{100}$。所以，配煤的理论 A_d 值应按下式计算：

$$\text{配煤 } A_d(\%) = \left[\left(29 \times \frac{100 - 8.23}{100} \times 6.33\right) + \left(35 \times \frac{100 - 0.70}{100} \times 26.83\right)\right] + \left(36 \times \frac{100 - 1.76}{100} \times 49.56\right)\Big] \div \left[\left(29 \times \frac{100 - 8.23}{100}\right) + \left(35 \times \frac{100 - 0.70}{100}\right) + \left(36 \times \frac{100 - 1.76}{100}\right)\right] = 29.50(\%)$$

鉴于用上法求算出的配煤理论 A_d 值，与按一般的加权平均法求出的 A_d 值一般相差不超过 0.50%，因而用人工求算配煤的理论 A_d 值时仍可用下列常规法求算其配煤 A_d 值。即：

配煤 A_d(%) = (29 × 6.33 + 35 × 26.83 + 36 × 49.56) ÷ (29 + 35 + 36) = 29.07(%)

从上述结果看出，按一般的加权平均法求算出的配煤理论 A_d 值仅比正确的计算值降低 0.43%，但最好还是按正确的公式进行计算。

三、配煤的干燥无灰基挥发分(V_{daf})的计算

与计算配煤的干燥基灰分相同的原理，计算配煤的理论 V_d(包括 $Q_{gr,daf}$ 及 H_{daf} 等结果)时，也必须先把各单煤的配比换算成干燥无灰基煤的配比后再进行加权计算。即干燥无灰基煤的配比(%) = 含空气干燥水分煤的配比(%) $\times \frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100}$。所以，配煤的理论 V_{daf} 值应按下式计算：

$$\text{配煤 } V_{daf}(\%) = \left[\left(29 \times \frac{100 - 8.23 - 5.81}{100} \times 35.75\right) + \left(35 \times \frac{100 - 0.70 - 26.64}{100} \times 25.32\right) + \left(36 \times \frac{100 - 1.76 - 48.69}{100} \times 44.18\right)\right] \div \left[\left(29 \times \frac{100 - 8.23 - 5.81}{100}\right) + \left(35 \times \frac{100 - 0.70 - 26.64}{100}\right) + \left(36 \times \frac{100 - 1.76 - 48.69}{100}\right)\right] = 34.07(\%)$$

如按常规加权平均法来求算配煤的理论 V_{daf} 值，就会出现较大的偏差。如

配煤 V_{daf}(%) = (29 × 35.75 + 35 × 25.32 + 36 × 44.18) ÷ (29 + 35 + 36) = 35.13(%)

即按常规法求算出的配煤 V_{daf} 值，比其正确的计算值要高出 1.06%。

四、收到基挥发分(V_{ar})的计算

在计算配煤收到基挥发分(V_{ar})时，必须先把各单煤的配比折算成含全水分煤样的配

比，然后再按常规的加权平均法求算出配煤理论 V_{ar} 值。计算公式如下：

$$\text{配煤 } V_{ar}(\%) = \sum\text{各单煤含分析水的配比}(\%) \times \frac{100 - M_{ad}}{100 - M_t} \times V_{ar} \div \sum\text{各单煤含分析水的配比}(\%) \times \frac{100 - M_{ad}}{100 - M_t}$$

根据上述实际配煤数据，其 V_{ar} 的理论加权平均值为：

$$\text{配煤 } V_{ar}(\%) = \left[\left(29 \times \frac{100 - 8.23}{100 - 20} \times 26.79\right) + \left(35 \times \frac{100 - 0.70}{100 - 5} \times 17.60\right) + \left(36 \times \frac{100 - 0.70}{100 - 10} \times 20.05\right)\right] \div \left[\left(29 \times \frac{100 - 8.23}{100 - 20}\right) + \left(35 \times \frac{100 - 0.70}{100 - 5}\right) + \left(36 \times \frac{100 - 1.76}{100 - 10}\right)\right] = 21.28(\%)$$

如配煤的 V_{ar} 理论加权平均值按一般的加权平均法计算，其值即变为：

$$V_{ar}(\%) = (29 \times 26.79 + 35 \times 17.60 + 36 \times 20.05) \div (29 + 35 + 36) = 21.14(\%)$$

即如其配煤的 V_{ar} 值不按正确的公式计算，其值就会偏低 0.14%。

配煤的其他收到基指标（如 A_{ar}、FC_{ar}、$Q_{gr,ar}$、$Q_{net,ar}$、H_{ar} 等）的加权平均值也均可用上述公式的原理计算。

五、配煤灰熔融性特征温度（DT、ST、FT）的计算

由于各种单煤的灰分（A_d）不同，因而在计算配煤的理论灰熔融性特征温度时，更不能采用一般的加权平均法进行计算，而必须综合考虑各单煤的灰分产率（A_d）因素。因而，配煤的理论灰熔融性温度（ST、FT 及 DT）必须按以下公式计算：

$$\text{配煤 } ST(C) = \left[\left(29 \times \frac{100 - 8.23}{100} \times 6.33 \times 1220\right) + \left(35 \times \frac{100 - 0.70}{100} \times 26.83 \times 1500^{*}\right) + \left(36 \times \frac{100 - 1.76}{100} \times 49.56 \times 1500^{*}\right)\right] \div \left[\left(29 \times \frac{100 - 8.23}{100} \times 6.33\right) + \left(35 \times \frac{100 - 0.70}{100} \times 26.83\right) + \left(36 \times \frac{100 - 1.76}{100} \times 49.56\right)\right] \geqslant 1483(℃)$$

注：1500^{*} 指 ST > 1500℃，下同。

如配煤的灰熔融性特征温度仍按一般的加权平均法求算，必然会有很大的偏差。如：

$$\text{配煤 } ST(℃) = [(29 \times 1220) + (35 \times 1500^{*}) + (36 \times 1500^{*})] \div (29 + 35 + 36) \geqslant 1419(℃)$$

从上述结果看出，如配煤的理论灰熔融性特征温度（ST）仍用一般的加权平均公式计

算，则算出的 ST 值就会比真实的理论 ST 值降低 64℃。

$$\text{配煤 FT(℃)} = \left[\left(29\times\frac{100-8.23}{100}\times6.33\times1230\right)+\left(35\times\frac{100-0.70}{100}\times26.83\times1500^{*}\right)+\left(36\times\frac{100-1.76}{100}\times49.56\times1500^{*}\right)\right]\div\left[\left(29\times\frac{100-8.23}{100}\times6.33\right)+\left(35\times\frac{100-0.70}{100}\times26.83\right)+\left(36\times\frac{100-1.76}{100}\times49.56\right)\right]\geqslant1484(℃)$$

上述配煤的 FT 值仍按一般的加权平均法计算，必然会产生较大的偏差。如：

$$\text{配煤 FT(C)} = [(29\times1230)+(35\times1500^{*})+(36\times1500^{*})]\div(29+35+36)\geqslant1422(℃)$$

从上述结果看出，如不按正确的方法计算配煤的 FT 值，其结果将偏低 62℃。

$$\text{配煤 DT(C)} = \left[\left(29\times\frac{100-8.23}{100}\times6.33\times1210\right)+\left(35\times\frac{100-0.70}{100}\times26.83\times1500\right)+\left(36\times\frac{100-1.76}{100}\times49.56\times1500\right)\right]\div\left[\left(29\times\frac{100-8.23}{100}\times6.33\right)+\left(35\times\frac{100-0.70}{100}\times26.83\right)+\left(36\times\frac{100-1.76}{100}\times49.56\right]\right.=1483(℃)$$

如按一般方法计算，则配煤的 DT 值将为：

$$\text{配煤 DT(℃)} = [(29\times1210)+(35\times1500)+(36\times1500)]\div(29+35+36)=1416(℃)$$

显然，由于错误的计算方法，将导致配煤的 DT 值比正确的计算结果降低 67℃。

从以上配煤的 DT、ST 和 FT 的计算结果可以看出，如采用一般的加权平均方法计算，将导致其结果偏低，其中以 DT 值的偏低幅度最大、ST 的居中、FT 值的偏低幅度相对最小，但偏低幅度均在 60℃以上。对其他配煤的灰熔融性特征温度的计算结果也存在相同情况。

此外，配煤的灰成分（SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3……等）的理论加权平均值同样也需采用与计算灰熔融性温度相似的公式进行计算，即在计算每一种灰成分（如 SiO_2……）时，只需把计算灰熔融性特征温度（如 ST）的公式中的各单煤的实测 ST 结果代之以单煤的某一种灰成分（如 SiO_2……）时，即可求算出配煤中每一种灰成分的理论值（%）。

如上述甲、乙、丙 3 种单煤的灰中 SiO_2 含量分别为 65.7%、48.4%和 35.6%，则其配煤灰中的 SiO_2 理论加权平均值应为：

$$\text{配煤灰中 } SiO_2(\%) = \left[\left(29\times\frac{100-8.23}{100}\times6.33\times65.7\right)+\left(35\times\frac{100-0.70}{100}\times26.83\times48.4\right)\right.$$

$$+\left(36\times\frac{100-1.76}{100}\times49.56\times35.6\right)\Big]\div\Big[\left(29\times\frac{100-8.23}{100}\times6.33\right)$$

$$+\left(35\times\frac{100-0.70}{100}\times26.83\right)+\left(36\times\frac{100-1.76}{100}\times49.56\right)\Big]$$

$$=43.07(\%)$$

如按一般的加权平均法计算其配煤 SiO_2 含量，则：

配煤灰中 SiO_2(%) = [(29 × 65.7) + (35 × 48.4) + (36 × 35.6)]

÷ (29 + 35 + 36) = 48.81(%)

从上述结果可以看出，用错误的方法计算配煤灰中的 SiO_2 含量，则其值将比正确的计算值增高 5.74%。

第五章　动力配煤生产工艺及主要设备

动力配煤生产工艺通常看似简单，认为将几种不同性质的煤掺合在一起，配成一个“新的煤种”，即可满足燃煤锅炉或其他使用动力煤的设备对煤质的要求。其实不然，动力配煤的工艺也是比较复杂的，由于燃煤锅炉的种类不同，锅炉的燃烧方式、炉拱的结构、水冷壁的设置、炉排长度、炉膛大小以及通风量等对煤质都有特定的要求。动力配煤技术就是研究多种单煤的优化配合，充分发挥各种单煤的优势，扬长避短，使配合煤既适合锅炉对煤质的要求，提高锅炉效率，又降低成本，给使用配煤的单位获得较好的经济效益。要实现这目的，在配煤中必须做到混配均匀，保证配煤的质量，必须有必要的配煤设备和严格的工艺加以保证，使配煤质量得到控制而实现最终的目的。由于煤是大宗的廉价商品，在确定动力配煤生产工艺和建立动力配煤的生产线上也有一定的灵活性。

第一节　建设配煤场应遵循的原则和建场条件

动力配煤场的建设应遵循以下原则：

(1)因地制宜，灵活多变，便于调整产品结构；

(2)必须实现机械化生产，以保证配煤的产量和质量；

(3)要根据用户要求，配出多种产品，满足用户需要；

(4)投资省，成本低，便于操作，便于运输，经济效益显著。

因此，建立动力配煤场应具备以下条件：

(1)资源的保证。配煤场的煤源,必须同时有可供加工配制的不同性质的煤炭资源,并具备充足的数量,以满足市场的需要;

(2)有运煤的铁路专用线、公路或水运码头等进、出煤的条件,交通较为方便;

(3)有能满足配煤场生产能力所必须的场地、水源和电源;

(4)有相对稳定的供煤市场,能具备一定的规模生产的能力,尽量使配煤年生产能力达到 5 万 t 以上,以保证配煤场能取得较好的经济效益;

(5)气候、温差、降雨等自然条件要保证年工作日在 240 天以上;

(6)要满足当地对环保的要求,包括粉尘、噪音和水污染等,配煤场一般应建在城镇郊区或矿区、港口、码头。

第二节　动力配煤的工艺流程

动力配煤是煤的机械加工的一种简易实用方式,其生产工艺是将 2 种或 2 种以上不同性质的煤根据用户对煤炭品质的技术要求,经过筛分、破碎、均匀掺混,使其成为一种新的品种,为实现这目的就需建设机械化的配煤生产线。在设计、建设动力配煤生产线时,必须要注意生产工艺的科学性和合理性,在生产工艺各个工序环节上的设备能力要互相匹配,设备选型要经济、合理和适用,要根据配煤场的具体情况和建设资金的投入,确定工艺流程的机械化和电子化的程度。为此,在建设动力配煤场以前,要进行项目的技术性和经济性的可行性分析论证。

动力配煤生产线的工艺流程一般包括原料煤的收卸、按品种堆放、分品种化验、计算和优化配比、配煤原料的取料输送、筛分、破碎、加添加剂、混合掺配、抽取检测、成品煤的存贮和外运等。动力配煤的原则工艺流程见图 7 – 5 – 1。

在实际生产中,根据配煤场场地特点、配煤生产线的规模大小、机械化程度的高低、资金投入的多少等情况,生产工艺流程是不尽相同的。通常有两类生产工艺流程,一类是简单动力配煤生产工艺流程,另一类为现代化大型动力配煤生产工艺流程。

简单的机械化配煤生产线的工艺流程:用装载机将不同性质的单种原料煤装入不同的贮煤斗,通过圆盘给料机或箱式给煤机出煤闸门的调节,控制各单种原料煤出煤量的大小,不同的煤经滚筒筛或振动筛等筛分设备进行筛分和混配,筛下物成为动力配煤,筛上物经粉碎后掺入动力配煤中,然后作为成品贮存或外运。一般中小型配煤场常用这种

简单的工艺流程，见图 7－5－2。

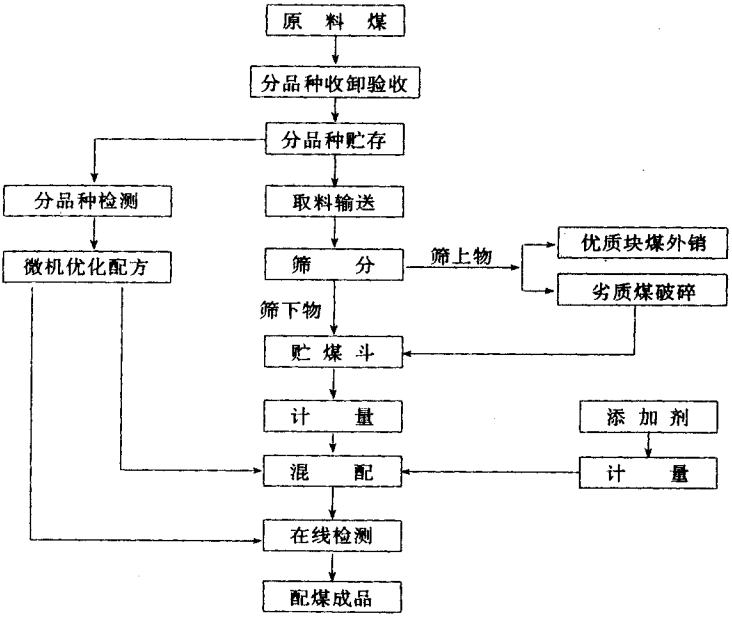


图 7－5－1　动力配煤原则工艺流程

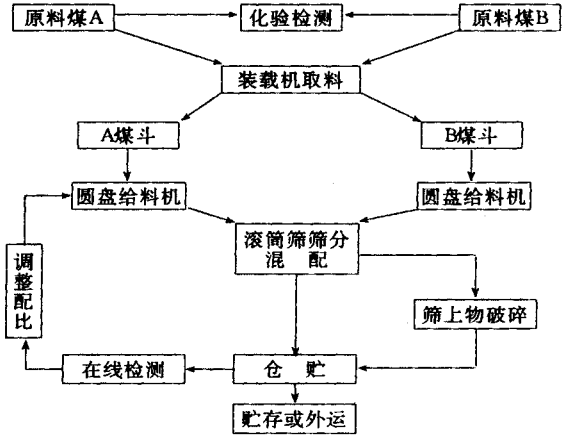


图 7－5－2　简单动力配煤生产线工艺流程

该生产工艺流程比较简单，其配比计量是靠体积比来估算，混合掺配是靠煤在运输胶带的迭加，再经过滚筒筛的滚转搅拌来实现，虽然加工出来的配合煤质量不太稳定，但一般能满足工业锅炉正常燃烧的要求。

对于工业用煤量较大的城市，如上海、北京、天津等大城市，这简单的配煤工艺就不

能满足用户对配煤数量和质量的要求。在这类大城市中建立的配煤生产线，机械化和电子化程度较高，取料基本上是专用设备，如滚轮取料机或斗轮取料机等 配比计量是靠电子胶带秤计量，按一定比例调节胶带的速度进行配料 混配是用专用的搅拌机完成，配煤的质量控制由在线分析仪监控等。这类配煤生产线加工量大，原料煤中常混有的优质块煤量也较多，因此在生产工艺流程中应先将优质块煤筛出后再混合，筛出的优质块煤单独存放和销售，以提高经济效益。这类动力配煤典型的生产工艺流程见图 7－5－3。

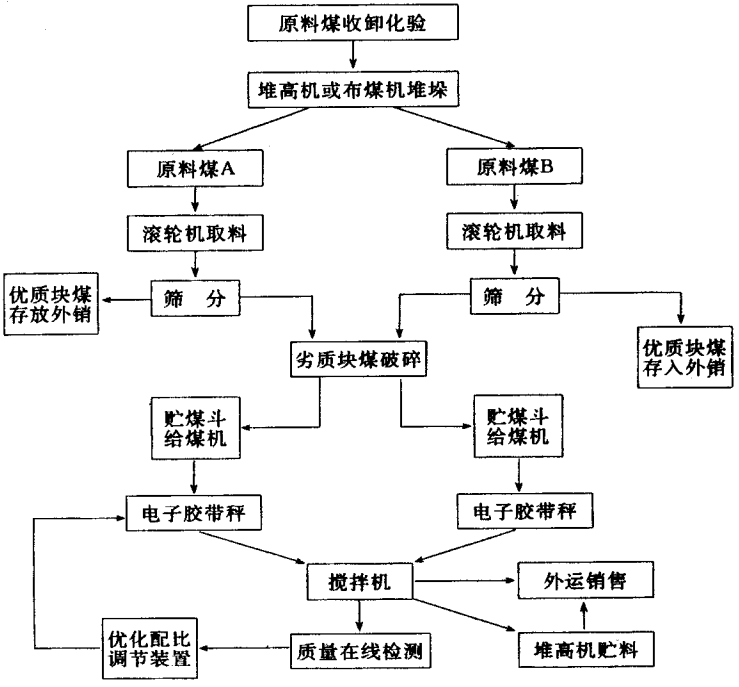


图 7－5－3　现代化大型动力配煤生产线工艺流程

为了使动力配煤有更高的燃烧效率并降低 SO_2 的排放量，在动力配煤中还有一种配加可以催化燃烧和固硫的添加剂生产工艺，添加剂的加入量仅为配煤量的 0.3% ~ 0.5%。加入固硫的添加剂后的动力配煤，有别于一般动力配煤，即称之为洁净煤。其生产工艺流程见图 7－5－4。

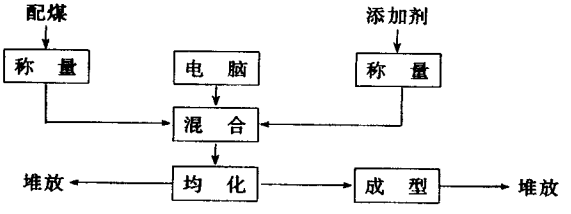


图 7－5－4　加入添加剂配煤的生产流程

该工艺的关键在于加入添加剂的给料设备和加入后的均匀化程度，在 1t 配煤中要均匀加入 3～5kg 添加剂的称量给料设备，其精度要求很高，目前没有合适的定型设备，需要专门设计制造。加入添加剂后，配煤与添加剂混合是否均匀，直接影响燃烧和脱硫效果，以及添加剂的有效使用。目前添加剂粒度在 0.17～0.15mm 左右，而煤炭粒度小于 25mm，二者要达到良好混均是有一定的难度，同时在运输、露天堆放过程中也会造成离析现象。

第三节　动力配煤的主要设备

一、输送设备

输送设备是动力配煤生产线中联接各个生产环节，使生产线能有效运转的重要设备。在动力配煤生产中使用最广泛的运输设备是胶带输送机，它可完成煤炭的水平输送和堆高输送。胶带输送机的优点是具有较高的输送能力、输送距离长、动力消耗低、结构简单、维修方便、工作平衡可靠等优点。

胶带运输机分固定式和移动式 2 种。固定式胶带机主要用于联接固定的装载和卸载之间的运输，经常直接与抓斗式取料机或堆料机等联接。在大型动力配煤生产线，常常可以看到几十米甚至几百米长的胶带输送机，有的还构成高架栈桥，通过这些输送机，把各种单煤和动力配煤卸在不同的存放地点。

移动式胶带输送机装有车轮，可根据装卸要求的变化而自由调动，有的还可以在平面转动一定的角度，扩大煤堆面积。它在中、小型配煤线上应用得比较多。

二、取料设备

原料煤从铁路、码头卸车或卸船后，通过胶带输送机在煤场堆高成煤垛，取料时从煤垛取煤，供应配煤生产。根据动力配煤生产规模的大小，为了提高经济效益，提高设备的利用率，一般分为通用型设备和专用型设备 2 种。通用型设备有装载机 挖掘机、推土机、抓斗式取料机等。它除了在生产线中完成取料之外，有时还可以用来推垛或装车等。通用性较强，一般用于年生产能力 10 万 t 以下的动力配煤生产线。专用型设备有地龙式刮板机，滚龙取料机和斗轮式取料机等。专用型设备能将煤垛上的煤连续供给胶带输送

机,是煤快速运出的高效率专用机械,一般都与固定的胶带输送机衔接。

上海市燃料总公司设计研制的斗轮取料机就是一种比较实用的取料专用设备。斗轮取料机的结构与旋臂堆料机相似,在旋臂的伸出末端装有一个斗轮,斗轮转动从煤堆挖取原料煤,并将原料煤倒在旋臂上的胶带输送机上,然后再通过固定的煤场胶带输送机将煤送到配煤生产线。跨在煤场胶带输送机上的斗轮取料机可以在轨道上行走,并通过旋转机构,旋臂上的斗轮可以在胶带输送机两侧的有效半径内取煤。斗轮取料机具有动力消耗少、操作简便和生产效率高等优点,特别适用于年产 50 万 t 以上的大中型动力配煤生产线。

三、筛分设备

根据层燃式工业锅炉的燃烧工况,要求动力配煤的粒度分布有一定的均匀性,所以煤炭的筛分是动力配煤生产工艺流程中不可缺少的一个重要环节。通过筛分设备,优质煤可以筛出优质块煤,弥补优质块煤资源短缺的问题,并为煤场增加一定的经济效益;低质煤可以把大块筛出来,破碎后再送入贮煤斗。在动力配煤生产线上比较常用的筛分设备有滚筒筛和振动筛等。

滚筒筛一般有圆柱形、圆锥形等几种,由架体、筛篦、进料斗、出料斗、中心轴、驱动装置等组成。滚筒筛在转动时,筛内原煤受磨擦力作用,随滚筒壁升到一定的高度,再受重力作用下滑,小颗粒和大块煤分开,小颗粒煤成为筛下物,大块煤成为筛上物进入破碎机或单独存放。滚动筛的滚动实际上起到一定的搅拌作用,因此在简易的中小型配煤线上,筛分和混配就合成一个工序。另外,由于滚筒筛的结构特点,如转速过快,筛分效率就会降低,过慢则筛网有效利用面积缩小,使筛分能力降低,所以滚筒筛适用于中、小型配煤生产线。在大型的动力配煤生产线上,宜选用振动筛,以加大筛分能力。

四、破碎设备

原料煤筛分出的大块煤必须经过破碎后才能进配煤线的贮煤斗。常用的破碎设备有颚式破碎机和锤式破碎机 2 大类。颚式破碎机多用于破碎原料煤中的矸石,在动力配煤生产线中使用比较广泛,适应能力较强。为避免硬金属棒、块混入煤中,造成破碎机过载或损坏,一般应该在破碎机的进料口安装电磁吸铁装置,随时清除金属杂物。

五、混配设备

混配设备是动力配煤生产线的重要设备之一。混配一般分为重量配料和容积配料

两种。在动力配煤生产中多数还是采用容积配料,但在一些大的生产线上已开始了重量配料。容积配料设备主要为圆盘配料机和胶带配料机,这 2 种设备都是用控制原料煤的流量来达到定量配比的目的。圆盘给料机的给料量一般通过改变刮刀位置等措施来调节 ;胶带配料机则通过出料闸门的开口高度控制出煤层的厚薄。重量配料一般采用电子胶带秤,通过重量显示比例,调节胶带机的出料速度,使配料更加准确可靠。

六、质量检测和控制设备

动力配煤场的煤炭质量检测和控制是动力配煤技术中重要组成部分,它主要包括原料煤质量检测、配煤过程中质量检测和最终配煤产品的质量检测等 3 个过程。根据分析方法和速度的快慢,可简单地将检测方法分为常规检测、快速检测和在线检测 3 种,配煤场应根据实际生产情况,在不同的检测过程中采用不同的检测方法和设备。

(一)原料煤的质量检测

原料煤是配煤的基础,其质量好坏在很大程度上决定了配煤的质量。除了解原料煤的各项技术指标外,最重要的是质量应保持相对稳定。在确定供煤矿点时,应对其煤质情况进行认真调查研究和深入了解,这一阶段宜采用常规检测方法对煤质进行全面分析。同时为确保配煤质量,对入场原料煤应进行严格的质量控制,这阶段因对煤质要及时了解,主要采取快速检测方法对煤的水分、灰分和硫分进行快速检测。不论是煤的常规检测或快速检测,所用设备均为一般煤炭化验室常用的煤质测试设备,如采(制)样机械、干燥箱、马弗炉等。在大型配煤场,当用户要求了解煤的全硫、灰熔融性温度和发热量指标,还需要配备相应的专用设备。

(二)配煤过程中的质量检测

对配煤过程进行质量检测的主要目的是及时了解配煤生产时的实际煤质情况,以便对不同煤的配入量及时做出必要的调整,对其技术要求是快速和准确,在这过程中宜采取的检测技术应是在线检测技术。在线检测技术的精度虽不如常规检测和快速分析方法,但对于控制生产过程的煤炭质量情况是十分及时的,动力配煤中宜采用的在线分析仪目前主要采用双射线的 γ 灰分测定仪。在生产控制上大型配煤场主要采用微机与在线灰分测定仪相结合的方法,随着市场对煤炭质量的要求不断提高,在线分析仪器的煤质测试内容正在不断扩大。

(三)配煤产品的质量检测

配煤场的最终产品的质量检测是配煤出场的最后检测,因测试结果对配煤的计价和使用直接相关,在技术上的要求是准确可靠,在检测方法上就应采用常规的标准测试方

法,以保证测试结果的准确性。这种常规检测方法所用的设备就是一般煤炭化验室通用的测试设备。

第四节　动力配煤的工程投资及经济评价

建设动力配煤场是一项生产性基本建设项目,是扩大社会生产、改善人民生活环境和不惭提高人民生活水平的重要手段。和其他生产性基本建设一样,其自身的存在与发展是离不开社会各部门投入一定资金、劳动力、技术、材料、机械设备和生活资料等。一个基本建设项目从规划建设规模、布局、建设前期工作(包括可行性研究和项目评估)、实施建筑安装,到竣工生产、交付使用,直到最后考核其技术经济效果,涉及到生产、分配、流通的各个方面。因此,不论是一个大型生产企业还是一个小的建设项目,都是一项复杂的系统工程,都有必要应用系统的观点和方法来筹划和运作,都必须有一定的工程投资。

一、建设工作程序和工程投资

随着国家经济体制改革的逐步深化,基本建设工程投资的资金来源已由原来单一的国家预算内拨款转变为国家预算内贷款、银行贷款、自筹资金或合资经营等多种方式,建设资金的管理也逐渐变为多层次的分级管理。

动力配煤场是在煤炭生产、流通和使用等环节中一个比较简单的小型工程建设项目,但它在建设中也要遵循基本建设固有特点所决定的建设工作程序。根据现行的规定,其程序大致如下。

根据国家或地区的国民经济发展规划,经过初步调查研究,由项目主办单位编制项目建议书,按照投资建设权限向所属的主管部门推荐拟建项目,经批准后列入建设前期工作计划进行项目可行性研究,经过审查、修改和评估后提出可行性报告,上报主管部门批准后,据此编制设计任务书,经批准后此项目即算成立,进而可安排年度计划,进行工程设计和建设前期工作,根据该设计任务书,建设单位即可着手与有关单位进行各类协议和合同的谈判和资金筹集等一系列准备工作,再根据批准的设计文件(如初步设计、技术标准、施工图设计)确定施工单位交付施工直至调整试车竣工验收。在此过程中的各个阶段,还要进行投资估算、概算、预算和结算等工作。从图 7 – 5 – 5(示意图)中可以看

出一个投资项目各个阶段的任务和投资等情况。

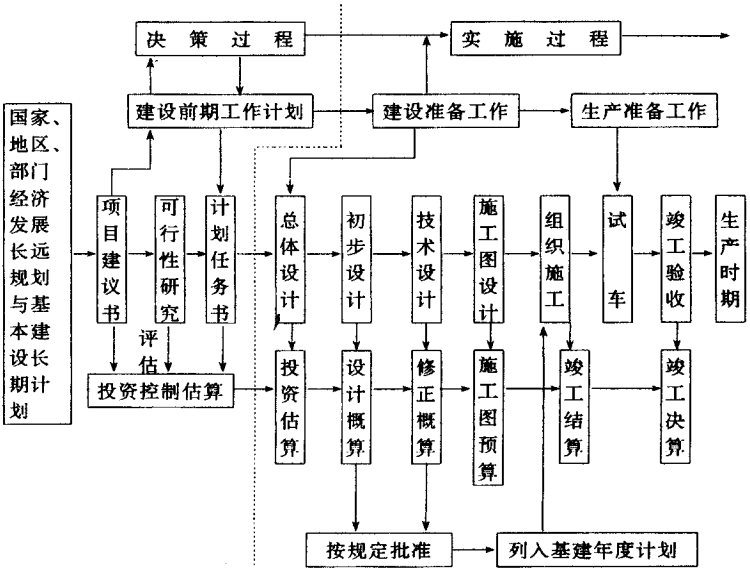


图 7－5－5　建设工作程序示意图

动力配煤场的工程投资一般包括土建工程费、机械设备购置费、安装工程费、工程建设其他费用、总预备费以及固定资产投资方向调节税和建设周期贷款利息等。

土建工程费：包括用于房屋和构筑物的各种结构工程、平整场地及地基土石方和混凝土工程、给排水管道及电气动力和照明工程、卫生和环保工程等费用。

机械设备购置费：主要用于动力配煤生产线中各种固定资产、工具器具及主要备件、配件、电气及控制设备的购置及运杂费。

安装工程费：包括人工费、材料费、施工机械使用费、材料二次搬运费、工程定位复测及场地清理费、施工管理费。

工程建设其他费用是指在建设工程总费用中除土建工程费、机械设备购置费及建筑安装工程费用以外的一切费用，如土地及青苗补偿费和安置补助费、耕地占用费和土地使用税、建设单位管理费、研究试验费、职工培训费、办公家具购置费、勘察设计费、试生产费、供电工程补贴费、施工机械迁移费及工程建设保险费等。

预备费是指在初步设计和概算中难以预料的工程和费用。其用途主要是在批准的初步设计和概算范围内所增加的工程费用；一般自然灾害造成的损失和采取的措施所发生的费用；在组织竣工验收时为鉴定工程质量必须开挖和修复隐蔽工程的费用及在工程设计期间设备材料因价格上涨而发生价差等。

建设动力配煤场除考虑以上各种工程投资外，还要根据拟建的动力配煤场的规模和

生产能力,依据国家及行业主管部门的规定,估算出企业必要的流动资金,从而确定建设配煤场项目的总投资。以上工程投资在项目可行性研究中要提出投资的控制估算,在总体设计和初步设计中还可经过投资估算、设计概算、施工图预算、直到竣工结算和决算等过程。

二、经济评价

建设动力配煤场要进行必要的经济评价,其中包括总成本费用估算、销售收入和利税分析、财务盈利能力分析、负债清偿能力分析和不确定性分析等。

(一)总成本费用估算

总成本的估算是以现行价格为基础,考虑到一定的年综合物价上涨系数为依据。动力配煤场的成本中以原料煤为主,原料煤价包括煤的出矿价、运杂费、保险费及税金等购成煤的到场价。如某矿的原料煤出矿价为 100 元/t,经过长途运输及一些中间环节收取的各种杂费,其到场价可能就为 200 元/t 或更多,对一个年生产 100 万 t 配煤场,煤的总成本即达 2 亿元以上,在配煤场成本中即占 95% 以上,因而对原料煤的产地和进厂价格必须仔细认真地选择和核算。一个配煤场能否取得经济效益关键在原料煤的成本上,另外就是生产经营费用,如外购燃料、水电的消耗、设备维修费(约 2% ~ 4%),建筑工程和设备的折旧费(残值率各按 4% ~ 5% 计);各种摊销费;职工的工资及福利费可根据不同地区规定计入成本,一般地区平均工资约 6000 元/(人·a),职工福利费按工资总额的 14% 计取,则每年职工工资及福利费约为 7440 元;此外,利息支出等财务费用也要摊入成本中。

(二)销售收入和税金

配煤场产品销售价格依据财务评价的定价原则,以现行价格为基础,考虑到一定的综合物价变动系数,预测至生产初期价格。一个动力配煤场根据用户需要生产几种质量的产品,其价格是不同的。在定价中要包括含税基价和含税时价,即含税销售价格,当年生产的各品种动力配煤数量乘以含税销售价即为当年的销售收入。销售收入扣除生产成本及税金即为年利润。税金有营业税、城市维护建设税、教育费附加税等。所得利润还要缴纳 33% 的所得税,才为可供分配的利润。每年在可供分配的利润中还可按 10% 的比例提取盈余公积金。

(三)投资估算示例

一个年加工生产动力配煤 100 万 t 的配煤场,其投资估算举例如下。

1. 基建投资(表 7 - 5 - 1)

表 7－5－1　基建投资(万元)

项目	土建工程	设备购置	安装工程	其它费用	预备费	合计
投资	2000	1000	500	200	300	4000

注 :土建工程含征地费。

2. 流动资金

动力配煤为大宗煤炭大进大出的产品,在正常状态下占用流动资金数额较大。如库存煤按生产规模的 1/10 计,则能力为 100 万 t/a 的配煤场经常要存有 10 万 t 的原料煤和产品煤,按每吨煤的价格为 200 元计,需占用流动资金 2000 万元,加上基建投资,以上两项投资就达 6000 万元,如自筹 50%、向银行贷款 50%,约需支付 180 万元的利息。

(四)成本估算

1. 原煤成本

按 2 种原料各占 50%配煤,100 万 t/a 的配煤场,成本如表 7－5－2。

表 7－5－2

原料煤	发热量 (kcal/kg)	到场价 (元/t)	数量 (万 t)	年总成本 (万元)	各单煤所占成本 (元/t)
A	5800	220	50	11000	110
B	4200	120	50	6000	60

加上运输损耗按 0.2%计,则每吨配煤成本还需增加 0.34 元。

2. 工资及劳保福利

配煤场如为一班生产,生产工人和管理人员为 20 人,按人均年工资 6000 元计为 12 万元 加上劳保费为工资总额的 13%,福利费为工资总额的 11%,计为 2.88 万元,此费用为 14.8 万元。

3. 折旧费

包括建筑及设备折旧,按总投资 4000 万元、折旧率 9%计,为 360 万元。

4. 设备维修费

按设备 1000 万元、维修费 4%计,为 40 万元。

5. 水、电费

按生产 1t 配煤耗电 1kW·h、水 0.1m^3,电费 0.5 元/(kW·h)、水费为 1 元/m^3 计,100 万 t 配煤需水、电费 55 万元。

因此,生产 1t 配煤加工费约为 4.70 元。

6. 利息

配煤场基建投资 4000 万元，流动资金 2000 万元，其中按 50% 为银行贷款、年利息按 6% 计，每年需支付利息 180 万元。每吨配煤为 1.80 元。

7. 税金及附加

配煤是一种产品，投入市场就需交一定税金，按营业税为 6%，加上城建税及教育费附加部分 0.6% 共 6.6%，每吨配煤需交税金 13.2 元。

以上 7 项费用构成配煤的生产成本，则每吨配煤成本为：

170.00 + 4.70 + 1.80 + 13.20 = 189.70(元)

(五)销售价格

配煤场生产的动力配煤，热值为 5000kcal/kg，配煤销售价格为 200 元/t，一个 100 万 t/a 的配煤场年营业额为 2 亿元。

(六)利润计算

(1)原料成本(A 煤、B 煤各 50%)	170 元/t
(2)加工费	4.7 元/t
(3)利息	1.8 元/t
(4)税金	13.2 元/t
(5)动力配煤成本价	189.7 元/t
(6)销售价	200.0 元/t
(7)毛利	10.3 元/t
(8)综合费用	0.5 元/t
(9)净利	9.8 元/t
(10)利润	9.8 元/t × 100 万 t/a = 980 万元/a
(11)所得税 33%	323.4 万元/a
(12)可分配利润	656.6 万元/a
(13)投资回收年限	4000/656.6 = 6.09 年

(七)配煤场经济评价

动力配煤是合理利用煤炭资源，提高锅炉热效率、节约煤炭和改善环境的简易有效措施，锅炉热效率可提高 5% 左右，节煤率也达 5%。如在配煤中添加少量脱硫或固硫剂，还可降低二氧化硫的排放量，从而取得较好的环境效益和社会效益。

从生产成本和利润分析中可以看出，配煤是一种微利产品，以净利和销售价相比，利润不到 5%。配煤场要取得较好利润，主要应从寻找廉价的原料煤入手，尽量减少供煤的

中间环节,降低生产成本,提高市场竞争力,使配煤生产在激烈的市场竞争中有一席之地。

通常配煤场的原料及产品数量较大、占地较多、投资也较大,在建设配煤场时必须遵循因地制宜、因煤制宜,充分利用现有场地、设施、运输及设备等条件,才能取得较好的经济效益。配煤原料品种不宜过多,能用 2 种煤配成质量合适的配煤,就不要用 3 种煤或 4 种煤,多用一种煤在工艺流程和操作中都要增加不少设备,操作工序也要相应增加,质量控制的难度随之增大。由于这些原因,建设动力配煤场投资差异也较大,同样建一个年产 100 万 t 的动力配煤场,如能充分利用现有条件,可能投资几百万元即可建成,而同样规模的配煤场可能要花 3000 ~ 5000 万元,如再加上港口、码头、铁路专用线,也许投资要上亿元。这就要依据当地条件和配煤场能否取得较好的经济效益和社会效益而定。

第五节　国内主要动力配煤场的工艺技术

80 年代以来,动力配煤作为一种有实用价值的洁净煤技术,已在国内十几个大中城市发展起来,配煤技术日趋完善,并发展了优化配煤和加入添加剂等技术,目前已初步形成具有现代化水平的整体技术体系。1996 年以来,在原煤炭工业部的支持下,突出重点,统筹安排,合理规划,建成了株洲、杭州等一批大型动力配煤场,取得了较好的经济效益和环境效益。

现将已建成的几个典型动力配煤场工艺技术简介如下。

一、杭州动力配煤场的配煤工艺技术

浙江省是我国用煤量较大、产煤较少的省份。1997 年全省只产原煤 120 万 t,但消耗煤炭达 4766 万 t,所缺的大量煤炭从安徽、江苏、山东、河南、河北、山西、陕西和内蒙等省(区)调入。在煤炭市场供大于求的情况下,这为浙江省搞好动力配煤提供了非常好的外部条件,原料煤的选择余地很大。因此,在浙江建立大型配煤场从技术、经济等方面考虑是必要的,而从地理位置、交通运输等条件考虑,该配煤场建在杭州郊区余杭县也是合适的。

杭州动力配煤场于 90 年代初期开始筹建,选用的配煤原料有高热值、高挥发分烟煤 ;中等挥发分和中等热值的烟煤 ;高挥发分、低热值或低挥发分、高热值的无烟煤 3 大

类，供应浙江原料煤的矿区遍及华东、中南、西北和华北各大区的主要矿区。配煤一般采用 2～3 种原料相配，按用户要求定出种配比，配合煤的挥发分为 22%～28%，热值 20～23MJ/kg，含硫量过去为小于或等于 1.0%，1999～2000 年将降至小于或等于 0.6%。

杭州配煤场配煤设施的生产能力为年配煤量 80 万 t，两班生产，年工作日为 280 天，设备小时生产能力为 135t。

配煤工艺流程见示意图 7－5－6。

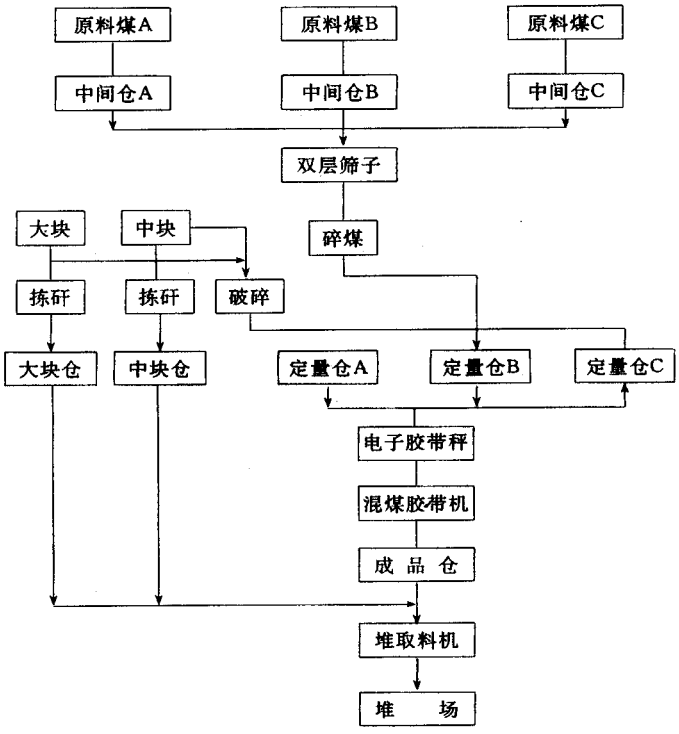


图 7－5－6　杭州配煤场工艺流程示意图

杭州配煤场采用的原料煤来自山西、山东、安徽等省煤矿，一般采用 3 种煤配合即可达到配煤的目的。如需配成一种发热量（$Q_{net,ar}$）大于 23.00MJ/kg 的煤，其他约束条件为 V_{daf}（大于 25%、$S_{t,d}$ 小于 1.0%、灰熔融性 ST 大于 1350C、M_t 小于或等于 10%，可采用大同煤或兖州煤 35%～40%、淮南煤 20%和潞安煤 40%进行配煤，也可采取与这 3 种煤质相似的其他矿煤，适当改变一下配煤比，也可获得所需的煤种，这就需要根据具体情况（如煤源、交通运输及煤价等）多种因素来决定所用的原料煤和合适的配比。

一个配煤场生产的配煤不只为一个品种，如来煤中含有一定数量的块煤，应首先将块煤筛出单独出售，以增加经济效益，一般可视原料煤情况分出 50～100mm 的大块

煤和 25～50mm 的中块煤，再将小于 25mm 的末煤进行配煤，按用户要求和煤质情况生产出 2～3 种符合一定质量要求的配煤产品。杭州动力配煤场生产的两种配煤质量如表 7－5－3。

表 7－5－3

品种	M_t(%)	V_{daf}(%)	$Q_{net,ar}$(MJ/kg)
动力煤 1#	8±2	25	>23
动力煤 2#	8±2	22	>21

按上述工艺流程，把原料煤从原煤堆取出到若干中间仓，按品种存放，取煤可用堆取料机，也可用装煤机进行。中间仓下设有振动式给料机，原料煤通过给料机进入双层筛，将煤分成大块(50～100mm)、中块(25～50mm)和末煤(小于 25mm)。块煤通过简单拣矸后分别进入到大块煤仓和中块煤仓，然后进入堆取料机，存入块煤堆。在配煤中因调整配煤质量，还需要配入一定的块煤时，就将部分大块煤、中块煤一并入破碎机破成碎煤，与筛下碎煤合在一起进入定量仓 A、B、C。仓下设有电子胶带秤，按配煤比例进行称量后入混煤胶带机，分别进入动力煤 1# 成品仓和动力煤 2# 成品仓，然后进入堆取料机，存入各自的贮煤场。

杭州动力配煤场设计年吞吐量为 300 万 t。其中铁路进煤量为 90 万 t，占总进煤量的 60%；出煤量为 60 万 t，占总出煤量的 40%。水运进煤量为 60 万 t，占总进煤量的 40%；出煤量为 90 万 t，占总出煤量的 60%，汽车外运量很少。配煤场实现铁路、水运的煤炭装卸、配煤和贮存的全部机械化作业，整个系统由微机监控，具有较先进的技术水平和较高的经济效益。

煤场贮煤量为 20 万 t，堆高 11～12m，煤堆底宽 24m，必要时还可借推土机、装载机等设备辅助，使底宽达 35m，贮煤量还能增加。煤堆放在堆取料机主胶带机两侧，每侧总长 650mm，主胶带机长度为 680mm。进场煤最大块度为 100mm。配煤场堆煤区内地坪用块石和三合土进行压实处理，以免地坪塌陷，面层用 20cm 厚的混凝土覆盖。

杭州配煤场生产流程示意图见图 7－5－7。

按此生产流程，配煤场生产配煤主要为煤炭的装卸，倒堆、掺配和贮存与作业，现分述于下：

(一)运河与铁路煤炭贮运(堆取)作业

如图 7－5－7 所示。主机一台 DQL800/1250.30 型斗轮堆取料机(800t/1250t/H)，运河、铁路的来煤与返煤各设一胶带机至主机的转载楼，出入胶带机(可正反转)长度 600m，带宽 1.2m，并由堆取料机作煤炭的堆取作业。在转载楼设临时出口和卸料设备，

以适应主机检修或故障时的装卸作业。

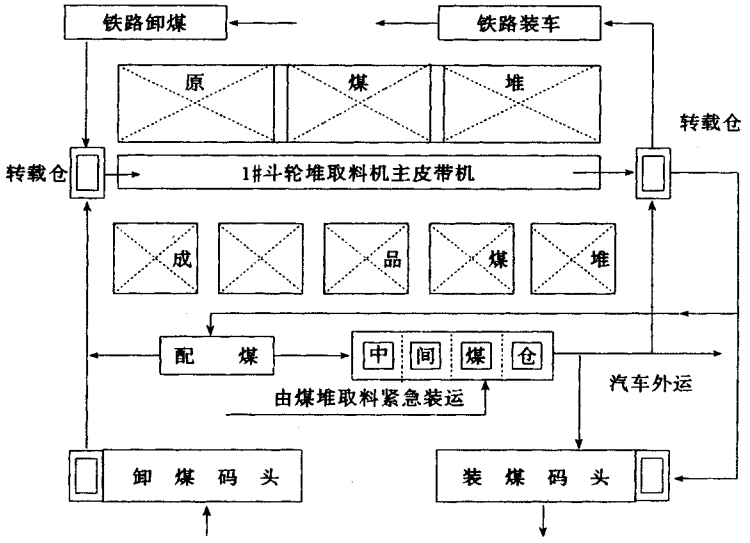


图 7－5－7　杭州配煤厂生产流程示意图

(二)运河卸船作业

采用 DGQ—8 型抓斗机,以 1.5m³ 抓斗把煤炭放入 6m³ 的料斗,给码头胶带机入堆取料机,主胶带到煤场贮存。共有抓斗机 6 台,每一卸船泊位 1 台。

(三)装船作业

设 4 个单点胶带装船机,由堆取料机取得煤炭,经主胶带机和转载胶带至码头胶带机,由卸料器把煤卸入胶带装船机装船。当装卸作业冲突时,有煤仓辅助装船作业。

(四)铁路卸煤作业

设 2 台移动式链斗卸车机(每台 300 ~ 400t/h),把车厢煤卸入一胶带机至主机的转载楼入主胶带机,由堆取料机入煤场堆存。

(五)铁路装车作业

由堆取料机取煤,经主胶带机(逆转)至转载楼,入铁路装车胶带机,至装车栈桥上的胶带机,由栈桥的移动式卸料车装煤入铁路车厢。当装卸车冲突时,有来煤仓辅助装车作业。

(六)紧急装运作业

当堆取料机因故不能作业时,可启动紧急装运系统。在运河、铁路的装运胶带处,设一个(或多个)受料斗,由铲斗车将成品煤铲入料斗,至运河、铁路装煤外运。卸煤时也可用移动胶带机从主胶带机中取料到堆放场。

(七)原煤掺配作业

根据原煤质量和配煤的质量标准或用户对煤质的要求,采用电子计算机系统进行优化配方,确定配煤品种和掺配的比例,输入计算机系统或通知配煤操作人员进行生产。打开待掺配的原料煤煤仓仓底闸门卸料,经电磁振动给料机喂入电子胶带秤计量,并对配合煤定时取样检测,当发现质量不符合要求时,及时通知计算机调整配比。如在配煤中需要加入添加剂,应在适当地方增加添加剂的装置,将添加剂加到煤中并经搅拌机进行均匀化处理后装车运出,出站外运配煤列车经轨道衡计量外运。配煤场将原煤中块煤筛出作为产品出售时还需有单独的块煤筛分、贮存、装车和计量系统。

杭州配煤场输煤系统主要设备见表 7－5－4。

表 7－5－4　输煤系统主要设备表

设备名称	型号或规格	生产能力(t/h)	数量	备注
链斗卸车机	DXM²－12.5(改进型)	540	1	增加胶带回转
门式装载桥	L = 40m、Q = 5t、抓斗 3m³	250	1	
堆料机	DB800、20 型、回转半径 20m	800	1	
胶带运输机				
输 1#	B = 1m，V = 2.5m/s、Lh = 372.05m	800	1	
输 2#	B = 1m、V = 2.5m/s、Lh = 80m	800	1	
输 3#	B = 1m、V = 2.5m/s、Lh = 43.2m	800	1	
输 4#	B = 1m、V = 2.5m/s、Lh = 340m	800	1	
输 5#	B = 0.8m、V = 2.5m/s、Lh = 138.465m	600	1	
输 6#	B = 0.8m、V = 2m/s、Lh = 178.255m	470	1	
输 7#	B = 0.8m、V = 2m/s、Lh = 118m	470	1	
移动胶带机	B = 0.8m、V = 1.6m/s、Lh = 15m	262	3	
轮式装载机	ZL40 斗容量 2m³		2	
轮式装载机	ZL40 斗容量 3m³		1	
地中衡	SCS－303000×120000	(30t)	2	
电子胶带秤	ICS－800－ST2		1	

输煤系统的工艺设备主要按以下原则设计：

(1)实现铁路和运河煤炭的装卸、中转、堆贮的基本功能和少量社会货物的中转、堆存要求。

(2)工艺布置和设备选型达到经济、合理、先进,以有限的资金力求实现装卸、贮运的机械化作业和自动化控制。

(3)铁路煤炭装卸工艺按铁路局提出的铁路车辆运行作业方案进行设备选型和布置,以一次最多来 36 节车皮、7h 内完成装卸作业计算。

(4)铁路煤炭装车设备能力按以卸定装的原则确定。装车与卸车可平行作业。输煤作业以优先完成铁路煤炭的装卸考虑。

(5)东区的码头作业区相对独立,具有运河煤炭和少量社会货物的装卸、贮存功能,并与西区煤场的输煤和配煤系统有机联系。

(6)工艺布置和设备能力留有充分发展余地,以适应生产发展需要,其中铁路链斗卸车机和门式装卸桥的轨道及基础均以 2 台设备设计,煤场南面预留堆取料机位置。

配煤系统主要设备表见表 7 – 5 – 5。

表 7 – 5 – 5　配煤系统主要设备表

序号	设备名称	型号或规格	生产能力(t/h)	数量	备注
1	煤用概率筛	GS2000×2000—Ⅱ　筛网 2 层	160 ~ 200	1	
2	环锤破碎机	PCH—1010 进料 < 300mm 出料 0 ~ 30mm	200 ~ 245	1	
3	轮式装载机	ZL40 型、铲斗 2m³	120	2	
4	微机核子秤	HCS—700 型、动态精度≤ ±1%		3	
5	调速胶带给料机	HCS—TP 型、B = 650、L = 3500	0 ~ 150	3	配核子秤用
6	γ射线煤灰分仪	ZZ—89A 型、动态精度 ± (0.5 ~ 1)%		1	
7	配 1# 胶带机	B = 650m、Lh = 38m、α = 15°、V = 1.0m/s	210	1	
8	配 2# 胶带机	B = 650m、Lh = 44.4m、α = 14°、V = 1.0m/s	210	1	
9	配 3#、4# 胶带柳	B = 500m、Lh = 52m、α = 16°、V = 1.25m/s	96	2	
10	配 5# 胶带机	B = 800m、Lh = 73.65m,α = 14°、V = 1.25m/s	275	1	
11	配 6# 胶带机	B = 800m、Lh = 47.85m、α = 16°、V = 1.25m/s	275	1	
12	配 7# 胶带机	B = 800m、Lh = 40.4m、α = 17°、V = 1.25m/s	275	1	

配煤系统工艺设备主要按以下原则设计:

(1)对进入煤场的多种性能各异的煤种进行洁净优化配制,把低品位、高污染的劣质燃料配成为优质燃料,获得具有节能、环保和经济效益的配煤产品。

(2)系统的工艺装备和自动化控制水平以达到国内先进水平设计。系统中设置核子计量秤、γ射线在线检测仪、微机自动控制等先进设备,结合浙江大学和煤炭科学研究总

院关于洁净燃烧及优化配煤科研中的工艺要求，实现计算机自动优化配煤生产线的工业性试验，并达到国内示范推广作用。

(3)设计实现 3 种不同煤种进入系统精确的自动优化配煤，并考虑有 4～5 种原煤进行配制的可能。获得 3 种动力配煤和 2 种优质块煤。

(4)系统中留有加入添加剂和增加或更新在线检测设备的余地，以适应洁净优化配煤技术的的需要并使不断完善。

(5)配煤工艺与输煤系统紧密结合，力求布置紧凑、衔接合理，使其既可相对独立运行又与输煤系统有机联系作业。

(6)配煤系统的布置接近东区码头，并与码头的输煤胶带机衔接，以适应煤场前期码头提前作业时的配煤要求。

(7)考虑南方多雨、有湿煤作业的特点，系统中采用概率筛进行煤炭筛分、各料仓下设衬有高分子低摩擦衬板的振动漏斗、系统中煤炭均采用胶带机输送等相应措施，保证系统在湿煤配制时正常运转。

(8)创造系统中清洁良好的工作环境，在系统的各落煤点采用封闭和布袋除尘等措施。

二、株洲动力配煤场的工艺技术

株洲地处湖南岳阳、长沙、株洲和衡阳的湘江经济开发带中部，地理位置十分优越。株洲又是我国南方最大的铁路枢纽，京广、浙赣、湘黔 3 大铁路干线交汇于此，公路四通八达，交通便利。

株洲选煤厂是有近 40 年历史的老煤炭加工企业，产品有一定市场并有较好声誉，为我国煤炭加工作出了较大贡献。随着市场经济的发展，株洲选煤厂根据市场对煤炭产品的要求，及时调整产品结构，于 90 年代开发了动力配煤，增加了企业的效益，又满足了市场的需要。

湖南省年产煤约 5000 万 t，其中大部分为地方小煤矿生产，产煤以低挥发分的无烟煤为主，湖南省年耗煤约 4500 万 t，但由于湖南本省产煤煤质不能完全适应省内动力用煤的要求，每年需调出无烟煤约 1500 万 t，从省外调入高挥发分烟煤约 1000 万 t，进行煤种的调剂，这就为在湖南省发展动力配煤提供了很好的外部条件。株洲选煤厂根据湖南省煤炭产、供、销的具体情况，率先建立了动力配煤场，目前正在建设生产能力为 200 万 t/a 的配煤场。

株洲选煤厂配煤站的原料煤主要来自山西、河南、江西以及本省。为株洲选煤厂提

供动力配煤的主要煤源及其煤质指标见表 7－5－6。

表 7－5－6　株洲选煤厂配煤站原料煤煤质情况

序号	原料煤名称	M_t（%）	V_{daf}（%）	$S_{t,d}$（%）	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	$G_{R.I}$（%）	ST（℃）	<25mm（%）
1	潞安煤	7.46	17.08	0.32	25.99	31.75	>1400	81.60
2	萍乡煤	6.50	18.46	2.36	21.37		1350	
3	平顶山煤	8.86	30.50	0.81	22.00	85	1400	82.43
4	宜洛煤	6.60	24.31	2.74	22.20	63.5	>1500	93.16
5	宝丰煤	9.02	29.17	0.91	23.09	81		
6	洗混煤	7.92	21.74	0.56	20.22		1400	
7	低质煤二	4.00	41.04	0.49	6.70		1400	
8	低质煤一	26.51	29.93	0.44	15.32		1400	
9	株洲煤	7.00	4.00	3.00	25.09		1400	

株洲选煤厂根据用户对煤质的要求生产 4 种产品 动力煤 1#、2#、3# 和 4#。4 种动力配煤的煤质指标见表 7－5－7。

表 7－5－7　株洲选煤厂配煤站配煤产品质量及配比

序号	配煤名称	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	V_{daf}（%）	$S_{t,d}$（%）	掺配原煤			合计（万 t）
1	动力 1#	18～20	18	0.6	65.9%潞安煤	21.6%低质二	12.5%株洲煤	100
					65.9 万 t	21.6 万 t	12.5 万 t	
2	动力 2#	21～23	28	<0.8	48.5%平顶山煤	2%株洲煤	49.5%洗混煤	40
					20.55 万 t	0.73 万 t	18.72 万 t	
3	动力 3#	20.91	18	1.0	44.2%潞安装	34.7%萍乡煤	21.1%低质一	23.75
					10.5 万 t	8.25 万 t	5 万 t	
4	动力 4#	25.09	23	<1.0	53.9%潞安煤	46.1%宝丰煤		43.4
					23.4 万 t	20 万 t		
	合计							207.15

株洲选煤厂配煤站本着技术先进、生产可靠、节省投资和提高效益的原则，确定适合本厂具体条件的生产工艺流程，见图 7－5－8。

按此生产工艺流程，火车来煤经化验后，由螺旋卸料机卸煤，通过 300mm×300mm 筛，进 10000t 受煤坑贮存。地坑中原料由叶轮给煤机、B1200 胶带输送机转入筛分破碎

楼分选。电磁除铁后，进 25mm 单层筛分选，入料粒度小于或等于 300mm，处理量为 450～800t/h。筛上块煤进 B800 手选胶带输送机，经人工手选块煤和矸石后，进 PCH1010 环锤式破碎机破碎，入料粒度小于或等于 250mm，排料粒度 5～25mm，处理量 80t/h。破碎后的粒煤和单层筛下末煤汇于 B1200 胶带输送机转载，经卸料车分别送入 7 座 ϕ20m 圆筒仓贮存，按单一煤种单仓贮存，仓贮容量（9300m^3 × 7）65100m^3。人工手选块煤经 B650 胶带输送机转载进 ϕ7m 块煤仓贮存，贮量 250t，汽车装载地中衡计量外运。

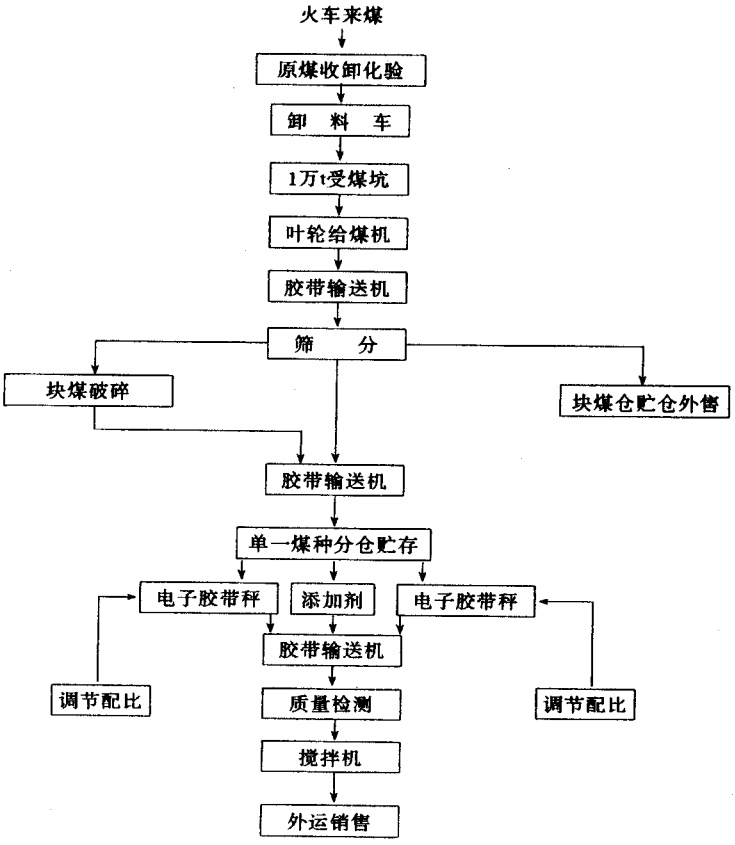


图 7－5－8　株洲选煤厂配煤站生产工艺流程图

原煤掺配过程 根据用户对煤质的要求，采用电子计算机系统进行优化配方 ;待掺配的原煤由圆筒仓底电液动扇形闸门卸料，经电磁振动给料机喂入电子胶带秤计量，进仓下 B1200 胶带输送机，并对掺配煤取样检测，及时调整配比。在 B1400 转载胶带输送机上加入添加剂，然后经搅拌机均化装入火车，每列车装车时间为 2h。出站外运动力配煤列车经动态轨道衡计量。

ϕ20m 煤仓系大型储料仓，为了避免物料在仓内起拱堵仓，每个圆仓底部采用 4 个排

料口(1500mm × 1300mm)卸料,漏斗倾角为 60°,内壁铺辉绿岩铸石板,设空气炮破拱助流装置系统,可以确保物料顺畅通过。破拱助流装置气源由空气压缩机供给。

株洲选煤厂配煤站的基本工艺设备与其他配煤场一样,计划有螺旋卸料机、叶轮给煤机、堆煤机、振动筛(300mm、25mm)、环锤式破碎机,电磁震动给料机、搅拌机、各类胶带输送机(B650、B800、B1200、B1400)、地中衡、胶带秤、灰分在线检测仪等 250 多台设备,贮煤采用圆筒煤仓,有利于减少煤尘对环境的污染。

株洲选煤厂配煤站是在老厂广阔的场地上,充分利用选煤厂原有的设备、设施、场地,如铁路、公路、受煤坑、机修厂、化验室、轨道衡等,节约了大量投资。在生产工艺中,它采用了国内已经掌握的先进技术和设备,自动化控制设施较好,设计和生产中采用电子计算机系统进行动力配煤优化配方,根据用户需求并充分考虑最大限度地节约优质煤,就地取材,选用低质煤和选煤厂的选煤副产品,可及时调整配方和配比,以达到节省能源和满足用户要求之目的。在生产过程控制上,该配煤站装车系统控制室内设有工业微机控制电子胶带秤称量系统,并配有彩显和打印机等外围设备,可人工设定、修改人工参数和实现工艺参数动态显示。

株洲选煤厂配煤站工艺设备先进、管理较好,在动力配煤生产中各项技术经济指标将可达到国内先进水平。

三、上海市动力配煤的工艺技术

上海市是我国最大的工业城市,1997 年全市耗煤 3900 万 t,以动力煤占 85% 为推算,全年动力用煤约 3300 万 t。上海动力用煤以发电为主,装机容量在 1GW 以上的燃煤电厂就有 3 个,年耗煤 1000 万 t 以上,一般工业锅炉和窑炉用煤大部分由上海市燃料总公司供应,最多时年供煤量达 1500 万 t。上海市的煤炭全从外省购入,矿点和品种多,煤质不稳定,为了保证供煤质量,增加经济效益,上海市早在 80 年代初期就开展了动力配煤工作。

上海市燃料总公司年配煤能力在 300 万 t 以上,原料煤主要来自山西、河北、江苏、安徽等 6 ~ 7 个矿点。上海市动力用煤的主要供煤矿区平均质量见表 7 – 5 – 8。

1982 年上海市提出了动力配煤标准,1990 年又规定了 3 个工业锅炉与配煤系列牌号标准,在动力配煤上开展较早并积累了丰富经验。

现在上海在闵行、沪南、北郊等煤场都建有配煤生产线,1996 ~ 1998 年每年生产配煤都在 260 万 t 以上,配煤发热量多在 20.91MJ/kg 以上,硫分在 1% 左右,多数在 1% 以下,质量稳定,受到用户一致好评。煤场配煤生产线加工成本为 3.6 元/t,总利润为 6 元/

t，纯利润约 3 元/t，经济效益较好。

表 7－5－8　上海市动力用煤的主要供煤矿区平均质量指标

局、矿名称	工业分析								灰熔融性(℃)			哈氏可磨性	煤种
	M_t (%)	M_{ad} (%)	A_d (%)	V_{daf} (%)	CRC (1～8)	$S_{t,d}$ (%)	$Q_{gr,d}$ (MJ/kg)	$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	DT	ST	FT	HGI	
大同四老沟煤矿	8.4	4.08	9.28	29.10	2	0.50	29.48	26.91	1200	1260	1300	50	弱粘煤
大同云岗煤矿	8.2	3.99	8.68	29.56	4	0.79	30.61	27.66	1180	1230	1280	47	弱粘煤
阳泉矿务局一矿	4.7	0.96	19.96	11.19	1	1.20	27.68	25.95	1355	> 1500	> 1500	79	无烟煤
阳泉矿务局二矿	6.7	2.06	23.79	10.51	1	0.97	25.66	23.74	1325	> 1500	> 1500	68	无烟煤
西山杜儿坪煤矿	5.6	0.72	20.65	16.90	5	1.13	27.44	25.31	> 1500	> 1500	> 1500	98	瘦煤
西山官地煤矿	4.1	0.46	19.09	16.58	5	1.30	28.48	26.56	> 1500	> 1500	> 1500	91	瘦煤
晋城古书院煤矿	6.2	1.25	21.96	7.41	1	0.57	26.60	24.70	> 1500	> 1500	> 1500	35	无烟煤
晋城凤凰山煤矿	6.5	0.79	18.13	6.75	1	0.33	28.30	26.14	> 1500	> 1500	> 1500	31	无烟煤
大屯姚桥煤矿	6.9	1.89	16.84	37.29	6	0.86	27.37	24.96	> 1450	> 1450	> 1450	67	1/3 焦煤
徐州三河尖煤矿	9.3	2.14	17.25	36.62	4	0.68	26.96	24.00	1360	1395	1430	74	1/3 焦煤
淮南新庄孜煤矿	6.2	1.49	23.59	35.10	6	0.47	25.75	23.59	> 1500	> 1500	> 1500	72	1/3 焦煤
淮南潘集一矿	6.4	1.77	29.00	41.41	4	0.29	23.50	21.48	> 1500	> 1500	> 1500	69	气煤
淮北朱庄煤矿	4.5	1.00	34.32	22.59	4	0.46	24.19	22.63	> 1450	> 1450	> 1450	88	瘦煤
淮北芦岭煤矿	6.8	1.43	20.81	33.80	6	0.41	26.38	24.01	> 1450	> 1450	> 1450	65	1/3 焦煤

上海燃料公司各煤场的配煤生产线与其他配煤场一样，采取 2～3 种原料煤进行配煤。如用 2 种煤进行配煤，其生产线工艺流程大致如图 7－5－9 所示。

如采用 3 种原料煤进行配煤，则需增加一条生产线，操作上也增加不少麻烦，因此如无特殊需要，一般不进行 3 种原料的配煤。配煤加入的添加剂有固硫、脱硫的，也有提高燃烧效率的，视煤的性质和用户要求而定。

上海燃料公司配煤场所用的配煤设备比较先进，有吸取了港口装卸设备设计经验、与机械制造厂共同研制的一整套大型配煤机械，如 HD1320 型动力配煤机械和 SGL140 型双向滚轮式动力配煤生产线等，它们在配煤生产上发挥了很好的作用。上海最新的一条配煤生产线建在闵行，主要有堆煤机 1 台、滚轮机 3 台、破碎机 2 台、大小胶带及除铁设备 10 余台、电子秤 2 台、微机控制及有关电器等整套设备，总投资约 1000 万元，配煤设备在国内较为先进。

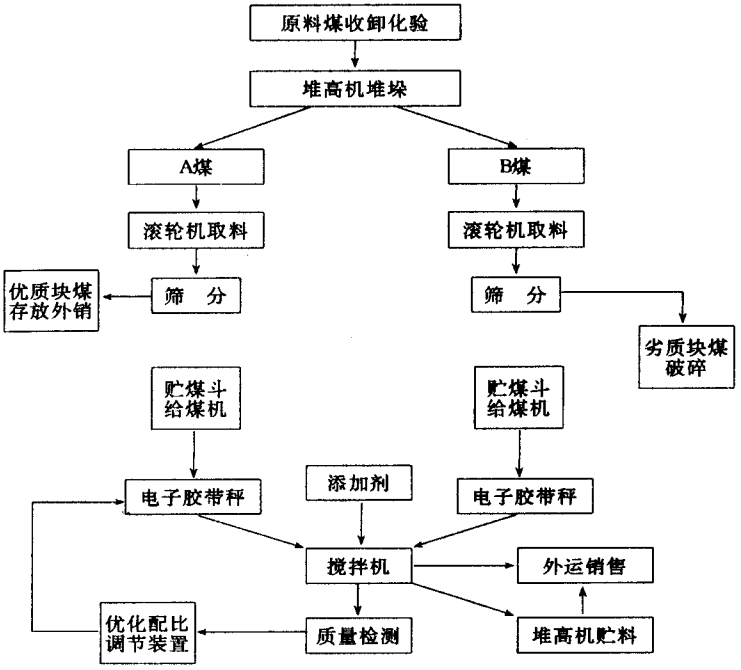


图 7－5－9　上海动力配煤生产线工艺流程示意图

上海市动力配煤所用的原料煤以华北区和华东区的烟煤为主，也有山西的阳泉、晋城等矿区的无烟煤。对各种煤的配比要求并不十分精确，如用 3 种煤相配时，大致是各占 30%、30%和 40%，其中无烟煤的配比一般不超过 30%。为了提高配煤场的经济效益，还增设了筛分设备，把 25～50mm 的优质中块煤筛分出后单独销售，有时生产的配煤还出口台湾、韩国和香港等地区，对硫分要求在 0.5%～0.8%以下。

上海市燃料总公司还在配煤中做过添加固硫剂以减排 SO_2 的试验，初步发现加入固硫剂 3‰～5‰左右时，固硫率能达 20%～25%左右，同时还能起到一定的催化燃烧作用，提高了煤的热能利用率，大致相当于提高了煤的发热量 0.836～1.25MJ/kg。

上海市工业锅炉对配煤质量要求不高，通常高档锅炉要求配煤的（V_{daf}）大于 24%、$Q_{net,ar}$ 大于 23.00MJ/kg，普通工业锅炉要求配煤的 V_{daf} 大于 22%、$Q_{net,ar}$ 大于 20.91MJ/kg。

第六章　动力配煤的固硫技术

我国煤炭消费中直接用于发电和各种工业与民用的动力煤约占煤炭比重的85%。煤炭燃烧导致严重的大气污染，其中尤以SO_2污染与酸雨为甚，大气污染中约80%～90%的SO_2是燃煤造成的。1995年全国SO_2总排放量达到2370万t，“八五”期间曾以年平均3.5%的速度增加。随着国家对SO_2及酸雨问题的日益重视，至1997年排放SO_2量降为2346万t。以SO_2为主要因素形成的酸雨污染区，曾达到约占全国国土总面积的40%（1997年已降为约30%），对人民生活及工农业生产造成严重危害，已引起国内外的广泛关注。1994年3月中国政府颁布了《中国21世纪议程》，提出到2000年SO_2年排放量控制在2100～2300万t。1995年8月，我国政府公布了新修订的《中华人民共和国大气污染防治法》，进一步强化了燃煤污染的防治。1998年1月，国务院正式批准国家环保局‘关于呈报酸雨控制区和SO_2污染控制区划分方案的请示’，要求‘两控区’到2010年SO_2排放总量控制在2000年排放水平以内。1998年3月国家环保局公布，到2000年全国SO_2年排放总量控制指标为2460万t。

目前，中国拥有工业锅炉近50万台，其中中小型层燃锅炉约占70%，各种窑炉约17万座，每年用煤量在400Mt以上，燃煤炊事炉灶1亿多个，每年消费生活用煤约130Mt以上。

发展洁净煤技术是解决中国以煤烟型污染为主的大气污染问题的一项战略对策，是实现经济、社会持续发展和经济、能源、环境协调发展的重要技术方向。洁净煤技术的核心是煤炭高效洁净燃烧，其中动力配煤固硫技术是一项适合我国国情的减排SO_2的技术措施之一。

第一节　国内外燃煤脱(固)硫技术现状

据美国环保局(EPA)统计,世界各国开发、研究、使用的 S02 控制技术多达 200 多种。这些技术归纳起来可分为 3 大类:①燃烧前脱硫,如选煤等;②燃烧中脱(固)硫,如工业型煤固硫、动力配煤加固硫剂固硫、炉内喷钙、循环流化床锅炉燃烧等;③燃烧后脱硫,即烟气脱硫(FGD)。目前国外控制 SO_2 排放的最有效的手段仍是烟气脱硫技术,但其基建投资和日常运行费用较高。

一、燃烧前脱硫

这种方法和脱除煤中矿物质相结合,在洗选的同时将煤中无机硫大量脱除。该技术也是我国'九五'煤炭科技攻关的一个重要方向。该方法又可分为物理法、化学法及生物法脱硫 3 大类。

物理法脱硫主要有电磁脱硫、浮选脱硫、重力洗选脱硫等,目前主要用于脱除高硫炼焦煤中的灰分和硫。

相对来说,在化学法脱硫方面比物理法做的工作要多而且广泛。化学脱硫一般是利用强酸、强碱或氧化剂等对煤进行处理,以脱除煤中的硫及矿物质,如辐射脱硫、超临界萃取脱硫及全氯乙烯脱硫技术等。常见的化学脱硫方法都还处于开发试验阶段。

煤的生物法脱硫也已研究了很多年,多偏重于无机硫的脱除。美国在这方面的研究最为活跃,德国、荷兰也在积极开展研究,但真正投入使用的很少。国内也正在研究煤的微生物脱硫和生物法脱除有机及无机硫等。目前用得最多、方法最简单而且成本最低的还是物理脱硫方法,也就是通过洗选脱除煤中大部分无机硫。

二、燃烧后脱硫(FGD)

FGD 技术主要是利用吸收剂或吸附剂去除烟气中的 SO_2,并使其转化为较稳定的硫的化合物或单体硫。由于要处理的烟气量大、SO_2 浓度低以及设备易腐蚀等特点,决定了 FGD 装置投资和运行费用一般都很高,使开发应用 FGD 技术困难重重。直到本世纪 70 年代,随着对环保要求的日益严格,FGD 技术在国外发达国家才得以较广泛地应用。而国内则采取引进吸收和消化的政策,如'九五'期间成都电厂及山东黄岛电厂都从日本

引进了烟气脱硫装置，经过实际生产运行，已取得显著脱硫、脱硝效果。

三、燃烧中脱(固)硫

该技术是在煤中添加一定的固硫剂，将煤在燃烧或气化时生成的气态硫氧化物在炉内吸收，气相中残存的硫氧化物与刚进入炉内的脱硫剂接触而被吸收，这样排出的气体中二氧化硫含量就大大降低了。这种方法较有优越性，它可大大减少燃烧后脱硫设备，但固硫剂部分或全部参与燃烧过程，将会影响煤的燃烧性能。此外，固硫剂中的碱性物质等的利用率低，以及已形成的硫酸盐($CaSO_4$ 及 $MgSO_4$ 等)的再分解等，导致脱硫效果下降。目前，使用最普遍的仍是以石灰、石灰石、方解石、白云石等为主的所谓钙系固硫剂。

钙系固硫剂的固硫反应过程十分复杂，其反应速度与温度、固硫剂的组成结构及 SO_2 的浓度有关，导致加入到炉内的固硫剂颗粒很难被充分利用。

除型煤固硫、气化炉气化过程固硫、炉内喷钙等固硫技术外，下面介绍另外几种固硫技术。

(一)循环流化床燃烧过程中脱(固)硫

对燃用高硫煤的用户而言，目前脱硫效果最好的是采用循环流化床锅炉来脱硫(实际为固硫)。其主要优点是对燃料的适应性强，燃烧效率高达 97%。当加入石灰石后钙硫摩尔比为 2 时，脱硫效率可达 80%～90%，燃烧温度 850～950℃，在脱硫的同时可实现低 NO_x 燃烧。因此，循环流化床技术对于解决我国面临的燃煤污染问题，可以说是一种非常合适的技术。

(二)增压流化床燃烧(PFBC)脱(固)硫技术

该技术是高效、低污染的燃烧发电技术，脱(固)硫方法简单。由于采用了压力床，燃烧系统的容积比常规同等级的锅炉小得多，热交换效果好，燃烧效率通常可达 99%，脱(固)硫效率可达 85%～90%，其投资、运行费、燃料费也较低。

(三)煤粉锅炉、链条炉等的脱(固)硫技术

炉排层状燃烧和煤粉悬浮燃烧是当今广泛采用的传统燃烧技术，虽然它们也有不少改进和发展，但是受到局限。对链条炉来说，适于燃用具有一定粒度范围的块状烟煤，燃用碎屑多的煤较困难 对煤粉炉来说，制粉系统比较复杂，耗电较多，适于大型电厂。在 SO_2、NO_x 排放方面，链条炉和煤粉炉均为高温燃烧，NO_x 排放量大，脱除 SO_2 的系统复杂并昂贵。在 80 年代以前，一些西方发达国家在煤粉炉、链条炉等燃煤锅炉上曾采用过固硫剂固硫技术。如将石灰石与煤混合或与煤同时加入，或者将石灰石粉从适当的部位

喷入炉膛(USP4226601、JP 昭 57－70193 和 USP4322218 号专利等),它们只是简单地将石灰类物质加入到煤中,结果只能获得最多 40%左右的固硫率。随着对环保要求的日益严格,40%的固硫率已无法满足大气质量要求,国外现均转向燃后脱硫技术。

国内自'六五'科技攻关以来,在炉内固硫技术的研究与开发上做了大量工作,很多单位都在积极参与,但多数均处于实验室研究阶段。所采取的技术途径主要有 2 条:一是以助燃为目的的助燃剂,同时也起到一定的固硫作用,其实际固硫率一般为 15% ~ 25%(包括煤自身的固硫率),加入量为 2‰ ~ 7‰,吨煤成本增加约 10 ~ 15 元,已形成 1 ~ 2 万 t/a 的生产能力,但实际未正常生产,累积销量也不过几百吨,固硫原理及其固硫率均值得商榷;二是以钙系氧化物为主的固硫剂或复合固硫剂,实际固硫率只有 25% ~ 30%,Ca/S 摩尔比约为 2 ~ 3,吨煤成本增加约为 10 ~ 20 元。目前,燃煤固硫技术的重点已转为固硫剂及其助剂的研制开发以及对煤种、煤质的适应性。

在控制和降低动力煤燃烧后 SO_2 排放量的 3 条技术途径中,燃前的洗选脱硫加工技术工艺已经比较成熟;流化床、循环流化床燃烧技术,需要对中国现有的大量层燃锅炉进行技术改造和设备更新,烟气净化技术则费用昂贵,这些技术目前还不适合中国国情而大规模采用。层燃锅炉的动力煤加脱(固)硫添加剂的脱硫与固硫技术,具有固硫率较高、催化燃烧效果好、成本低廉、可以综合利用劣质资源和工业废料、使用方便的特点,且采用这项技术不需增加设备投资,运行费用低,适应我国工业基础现状,符合企业经济承受能力,是实现动力煤高效、洁净燃烧的有效技术途径之一。

第二节　固硫剂及其助剂的研制开发

凡能与煤在燃烧过程中生成的 SO_2 或 SO_3 起化学反应或物理吸附形成固态残渣而留在煤灰中的物质均可作为固硫剂。固硫剂种类很多,如石灰石、白云石、方解石、氧化钙、氧化镁、碳酸镁、碳酸钠、氢氧化钠等均可作为固硫剂。目前使用最多、价廉易得的仍是碳酸钙,氢氧化钙等,俗称钙基固硫剂。有时也选用电石渣、造纸废液、硼泥等众多的工业废料。普通的钙基固硫剂具有钙的利用率低、高温固硫效果差的不足。因此,为了提高固硫率,在制备固硫剂的过程中往往添加一定量的助剂来改善其表面性质,以提高固硫率或者将固硫剂进行活化、改性,以利于提高固硫剂的利用率与固硫率。

YangR.T. 在研究流化床脱(固)硫过程中,加入了 Fe_2O_3、$V_2O_5$5 等助剂;DesaiN.J.

选择了 $Fe(NO_3)_3$ 和 Fe_2O_3 作为助剂，研究了这些助剂的加入对固硫效果的影响。

Mark 等人在固硫剂中加入 Na_2CO_3 制成了助剂固硫剂，极大地改善了脱硫效率。Stouffer 等在用 Na_2CO_3、NaCl、$CaCl_2$、$FeCl_3$ 作为助剂进行相似的研究中，发现加入 2% 的 Na_2CO_3 后，石灰石固硫效果最好。对此，他们认为加入 Na_2CO_3 会促使 CaO 晶格重排，所形成孔的分布、孔的尺寸有利于固硫反应，而且有一定的固硫作用（如生成 Na_2SO_3、Na_2SO_4）。

David 等在制水合石灰[$Ca(OH)_2$]时，加入一定量的磺化木质素，所得 $Ca(OH)_2$ 产品中大约含有 1% 的木质素碳酸钙。这样处理后，降低了固硫剂在反应过程中比表面和孔体积的烧结趋势，使固硫剂在高温区保留了较高的比表面积和孔隙率，提高了与 SO_2 的反应能力。研究结果表明，经木质素磺酸钙活化后，可使钙利用率提高 20%，固硫率增加 4% ~ 15%。

NaCl 的存在提高了 CaO 在固硫过程中的效率，这是因为在反应过程中会形成一薄层的 NaCl/CaO 低共熔层，从而改善了 GaO 的性质。Paolo Davini 的研究表明，用 2% 的 NaCl 溶液浸泡过的固硫剂，炉温为 850℃时，在脱硫过程中可形成一种有着适宜网络结构的 GaO，提高了 CaO 向 $CaSO_4$ 的转化率，且固硫率大大提高。

卢啸风等在试验中还发现，在炉温 950℃时，一定形式的碳酸钙和少量的 $Ca(OH)_2$ 的混和物具有比单用石灰石或 $Ca(OH)_2$ 更高的脱（固）硫能力，从而形成了一种新的固硫剂。这种固硫剂无论是粉状还是制成球形，都有较高的反应活性，新的固硫剂的 CaO 转化率比石灰石的高 60% 以上。

Ralph. T. Rang 等在实验中选用 Fe_2O_3 作固硫助剂，结果证明 Fe_2O_3 对 $CaSO_4$ 的再分解起着阻止作用，即对固硫是有利的。针对 $CaSO_4$ 的分解，Fe_2O_3 的加入量有一最佳值，多于或少于这一数值，对煤中的硫分以 CaSO 的形式固定下来都是不利的。

肖佩林等的研究表明，在固硫剂中加入铁、硅化合物组分，可在燃烧过程中生成新的 Ca—Fe—Si—O 体系，固硫率明显提高，尤其在高温下固硫率较高。固硫炉渣采用 X—射线衍射法与 X 射线荧光光谱法对所生成体系进行表征，发现有一种热稳定化合物 $CaFe_3(SiO_4)_2 \cdot (OH)_3$ 存在，它覆盖或包裹硫酸钙晶体，延缓并阻止了硫酸钙的分解，提高了固硫率。

黄信义等在 800 ~ 1100℃管式炉内进行了人工钙基脱硫剂的研究，发现人工钙基固硫剂的活性是天然石灰石的 2 ~ 3 倍。当加入添加剂后，发现 MgO 与 SO_2 的反应性比 CaO 高，可使钙的利用率达到 40%。

由浙大开发的 ZD 系列固硫剂，其加入量大致相当于煤中硫含量的 4 倍，煤在炉内燃烧时的固硫率为 32% ~ 42%。

煤科总院北京煤化所开发的 MHS 系列固硫添加剂，在 Ca/S 摩尔比约为 2、添加剂加入量约为 1% 时，煤在炉内燃烧时的固硫率可达 40% 以上。

第三节　固硫技术的基本原理

一、煤中硫的赋存状态及在燃烧过程中 SO_2 的析出特征

燃煤中硫形态可分为有机硫和无机硫 2 大类。

- 煤中全硫
  - 有机硫
    - 硫醚或硫化物　R—S—R
    - 二硫化物　R—S—S—R′
    - 硫醇或硫羟基化合物　R—SH
    - 噻吩类杂环硫化物
    - 硫醌化合物
  - 无机硫
    - 硫化物（黄铁矿硫）
    - 硫酸盐硫
    - 元素硫

中国高硫及中高硫动力煤中硫分平均为 2.76%，其中以黄铁矿硫为主，$S_{p,d}$ 平均 1.69%，占 61.23%；有机硫次之，$S_{o,d}$ 平均为 0.94%，占 34.06%；硫酸盐硫最少，$S_{s,d}$ 平均为 0.13%，仅占 4.71%。

由于硫酸盐硫含量少，所以人们往往就把燃煤中的硫形态分为有机硫和无机硫 2 大类。硫分在加热时析出，如果环境中氧浓度较高，则一般被氧化为 SO_2，而残存的部分往往是含铁的粘状熔渣。为了了解 SO_2 生成及脱硫过程，有必要讨论硫分的析出机理。

有机硫在煤加热至 400℃时开始发生分解，但不同煤化程度的煤稍有差异。一般认为，有机硫首先分解为中间产物 I，尔后在遇氧气和其他氧化性自由基 R 时逐步被氧化为 SO_2。这一过程可记为：

$$\text{有机硫} \longrightarrow \text{I} + \cdots \tag{7-6-1}$$

$$\text{I} + \text{R} + \text{O} \longrightarrow \text{SO} + \cdots \tag{7-6-2}$$

$$\text{SO} + \text{I} + \text{O} \longrightarrow \text{SO}_2 + \cdots \tag{7-6-3}$$

黄铁矿硫在 300℃时开始失去硫分，形成磁硫铁矿 $Fe^{1-x}S(0<x<1)$ 和赤铁矿 Fe_2O_3，但 FeS_2 大量分解则是在 650℃以上，其分解产物与气氛有关。在燃烧空气氧浓度低于 2%、温度 800～900℃时，赤铁矿的生成量很大；温度进一步升高时，赤铁矿减少，而磁铁矿（Fe_3O_4）增加；到 1100℃时，磁铁矿成为主要相，黄铁矿对温度敏感性较强。由黄铁矿形成 SO_2 的过程可写成如下分步方程：

$$4FeS_2 + 11O_2 \xrightarrow{\triangle} 2Fe_2O^3 + 8SO_2 \uparrow \qquad (7-6-4)$$

$$7FeS_2 + 6O_2 \xrightarrow{\triangle} Fe_7S_8 + 6SO_2 \uparrow \qquad (7-6-5)$$

$$3Fe_7S_8 + 38O_2 \xrightarrow{\triangle} 7Fe_3O_4 + 24SO_2 \uparrow \qquad (7-6-6)$$

$$R-S_X + nO_2 \xrightarrow{\triangle} xSO_2 \uparrow + nCO_2 + mH_2O \qquad (7-6-7)$$

一般来说，硫酸盐中的硫难于分解出来，为不可燃硫，进入灰分中。但在实际燃烧过程中，在高温下有些金属的硫酸盐是可以分解的。例如：

$$CaSO_4 + CO \xrightarrow{>1200℃} CaO + CO_2 + SO_2 \uparrow \qquad (7-6-8)$$

$$2CaSO_4 \xrightarrow{>1450℃} 2CaO + 2SO_2 \uparrow + O_2 \uparrow \qquad (7-6-9)$$

最新的研究证明，$CaSO_4$ 的高温分解在 900℃时就开始了，见图 7－6－1 和图 7－6－2。

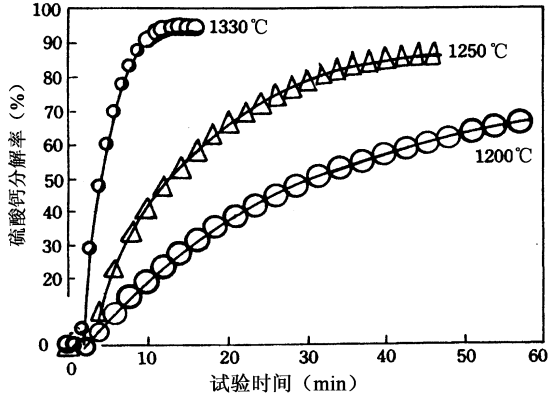


图 7－6－1　纯 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 在不同温度下的分解规律

图 7－6－1 是用纯化学试剂 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 所做的高温分解试验。可以看出，在 1200℃时 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 的分解率已达 60%；到 1330℃时分解率已达 95%以上。

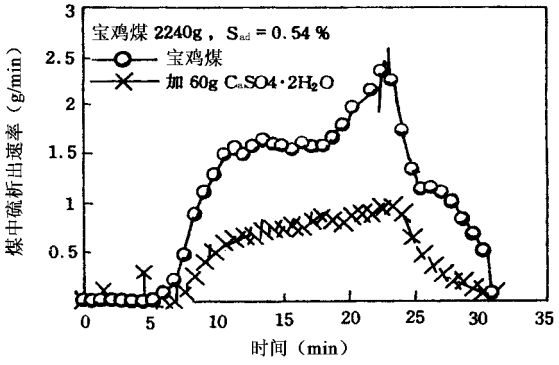


图 7－6－2　宝鸡煤中加纯 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 后的硫析出特征

图 7－6－2 是在小型层燃炉上的试验结果。在宝鸡煤中混入一定量的纯 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$，测试烟气中 SO_2 的析出特性。从图中可以看出，与未混入 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 的煤的试验相比，有 86% 的 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 发生了分解。

不同时代形成的煤，由于其硫的赋存状态不同，导致具有不同的硫析出规律，见图 7－6－3。

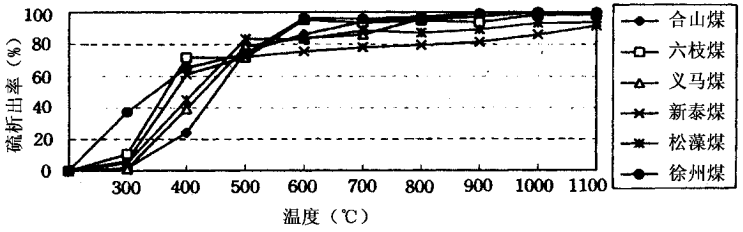


图 7－6－3　不同种类的煤的硫析出特征

因此，不同种类，煤中硫的含量及硫的赋存状态不同，硫的成分不同；煤中的硫在燃烧时析出规律不同；同一种煤在不同的燃烧条件下硫的析出特征也不相同；燃烧过程中，煤中的固硫产物不稳定，随温度的升高而迅速分解，故在选择固硫剂时，必须使它的固硫性能与煤中硫的析出规律相一致，并通过加入适当种类和比例的添加剂来改变固硫产物的结构形态，否则难以获得理想的固硫率。

二、固硫剂的固硫反应

燃烧过程中最常用的固硫剂是钙基固硫剂和在钙基固硫剂中掺加一定比例的含金属或金属氧化物的工业废料的添加剂，如石灰石（$CaCO_3$）、电石渣（$Ca(OH)_2$）、白云石（$CaCO_3 \cdot MgCO_3$）和含铁废料、含锌废料、含钠盐废料等。在层燃炉中，当炉温超过其煅

烧平衡温度时，将发生煅烧分解反应。

（一）石灰石反应式

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2 \quad (7-6-10)$$

$$CaCO_3 + SO_3 \longrightarrow CaSO_4 + CO_2 \quad (7-6-11)$$

$$CaO + SO_2 \longrightarrow CaSO_3 \quad (7-6-12)$$

$$CaSO_3 + 1/2O_2 \longrightarrow CaSO_4 \quad (7-6-13)$$

$$CaO + SO_2 + 1/2O_2 \longrightarrow CaSO_4 \quad (7-6-14)$$

（二）电石渣硫化反应式

电石渣[以 $Ca(OH)_2$ 为主]性质很活泼，常温下便能与 SO_2、SO_3 发生反应，高温下 $Ca(OH)_2$ 析出水分形成 CaO，CaO 的硫化反应式同式（7-6-12）、式（7-6-14）。$Ca(OH)_2$ 的硫化反应式为：

$$Ca(OH)_2 + SO_2 + 1/2O_2 \longrightarrow CaSO_4 + H_2O \quad (7-6-15)$$

（三）白云石反应式

$$CaCO_3 \cdot MgCO_3 \longrightarrow CaO \cdot MgO + 2CO_2 \quad (7-6-16)$$

$$CaO \cdot MgO \longrightarrow CaO + MgO \quad (7-6-17)$$

反应式（7-6-16）和式（7-6-17）可合写为：

$$CaCO_3 \cdot MgCO_3 \longrightarrow CaO + MgO + 2CO_2 \quad (7-6-18)$$

MgO 与 SO_2 的反应速度很低，故一般情况下可以认为是惰性的；CaO 将在有富余氧气时与 SO_2 发生如下硫酸盐化反应：

$$CaO + SO_2 + 1/2O_2 \longrightarrow CaSO_4 \quad (7-6-19)$$

有时还有：

$$CaO + SO_3 \longrightarrow CaSO_4 \quad (7-6-20)$$

（四）其他金属氧化物与 SO_2 发生的硫酸盐化应式

$$MO + SO_2 \longrightarrow MSO_4 \quad (7-6-21)$$

$$MO + SO_2 + 1/2O_2 \longrightarrow MSO_4 \quad (7-6-22)$$

为此，向动力配煤中添加的石灰石、电石渣和工业废料等均称为固硫剂。

（五）固硫产物 MSO_x 的再分解

在一定温度下，钙盐固硫剂的固硫产物 MSO_x 会发生再分解。

$$MSO_x \longrightarrow MO + SO_2 \quad (7-6-23)$$

不同品种的固硫剂反应性能差异很大，应根据需要对不同固硫剂品种进行选择，从

而保证固硫效果和经济性俱佳。

三、提高钙基固硫剂高温固硫效果的途径分析

一般认为，钙基固硫剂高温固硫效果差，主要原因：

(1)煤中硫在燃烧过程中的析出规律各不相同，不同种类的煤及同一种类的煤在不同的燃烧条件下均不尽相同。

(2)高温下 $CaSO_4$ 的稳定性下降，易分解成 CaO 和 SO_3，降低了高温下固硫剂的固硫效果。

(3)高温下固硫剂表面烧结失活，比表面积减小，使固硫效果降低。

(4)高温下煤中硫的分解速度大于 $CaCO_3$ 的分解速度，使含硫气体未来得及与固硫剂反应而排出，降低了固硫剂的固硫效果。

(5)在实际固硫反应中，含硫气体首先在固硫剂表面发生固硫反应，使固硫剂表面及内孔被 $CaSO_4$ 覆盖或堵塞，从而影响固硫剂内部与含硫气体的反应，大大降低了固硫剂的利用率。

(一)固硫剂的烧结

所谓烧结是指升温至低于熔融性温度时，多孔物质的孔隙被压缩，比表面积下降，随之密度增大的现象。由于固硫反应主要在固硫剂的表面或内孔表面进行，因此 CaO 的微观结构对反应很重要。影响 CaO 烧结的主要因素如下。

1. 温度和时间

从烧结的定义可知，温度是影响烧结程度最重要的一个因素。对 CaO 而言，在 1000℃以下时烧结较慢，当温度升到 1000～1250℃时，CaO 的烧结速率迅速提高，并且 CaO 的烧结程度随着加热时间的延长而加深。

2. 环境气氛

CaO 周围环境中的 SO_2、CO_2、H_2O 等气体的存在，都会加剧 CaO 的烧结。

另外，CaO 中杂质的存在也会对烧结产生影响，降低 CaO 开始烧结温度。

(二)$CaCO_3$ 的分解速率与硫的析出速率不相一致

混在燃料中的 $CaCO_3$，由于料层中 CO_2 分压较高，一般要在 750℃以上才开始分解。从前人的研究可知，煤中的硫分在 400℃左右就开始分解，这就使得以 $CaCO_3$ 为主的钙基固硫剂在燃料燃烧初期不能及时地捕捉在 550℃以下析出的 SO_2。

图 7－6－4 为在马弗炉内不断升温过程中煤中硫的析出过程与 $CaCO_3$ 分解过程的比较。

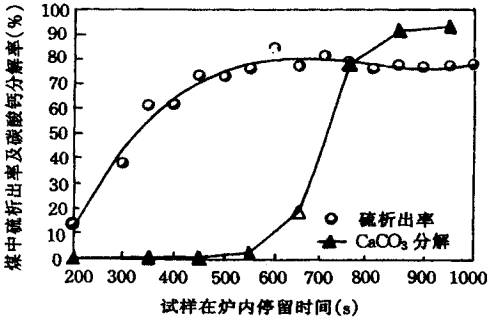


图 7－6－4　升温过程中煤中硫的析出过程与 $CaCO_3$ 分解过程的比较

从图 7－6－4 中可以看出，煤中硫在 200℃左右就开始分解，当炉温升至 500℃时，煤中硫已有 80% 析出。$CaCO_3$ 的分解在 550℃时仅有 4%，直到炉温升至 650℃以上时才开始迅速分解，当炉温升至 900℃以上时，$CaCO_3$ 的分解率可达 90% 以上。

图 7－6－5 为当恒温加热时煤中硫的析出过程与 $CaCO_3$ 分解过程的比较。这时，$CaCO_3$ 的分解在各阶段均略快于煤中硫的析出。因此，炉内喷钙脱硫技术中，如果喷入点选择适当，$CaCO_3$ 可迅速分解并与烟气中 SO_2 反应，并能避免 CaO 的烧结。

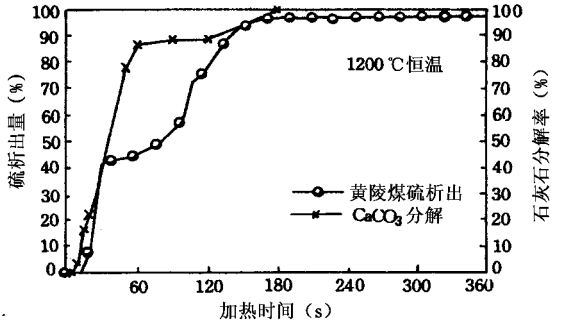


图 7－6－5　恒温加热煤中硫的析出过程与 $CaCO_3$ 分解过程的比较

显然，对于燃烧固硫，尤其是链条炉或其他中小锅炉，炉温总有一个由低至高的升温过程，其硫的析出与 $CaCO_3$ 分解规律更近似于图 7－6－4。硫的分解速率快于 $CaCO_3$ 的分解率，不利于固硫反应。

（三）几种固硫剂及固硫产物的摩尔容积的比较

表 7－6－1 为几种固硫剂及固硫产物的摩尔容积和膨胀比的比较。

从表 7－6－1 中可以看出，由 CaO 或 $CaCO_3$ 与烟气中的 SO_2 反应生成 $CaSO_4$，由于 $CaSO_4$ 的膨胀比较大，经过一段时间以后，固硫剂表面及内孔就会被固硫产物覆盖及堵

塞；当 $CaCO_3$ 在还原性气氛下与 SO_2 反应生成 CaS 时，则不会被覆盖及堵塞。如何促使固硫剂反应生成 CaS，也是提高高温燃烧固硫效果的途径之一，显然在锅炉燃烧中生成 CaS 是难以做到的。

表 7－6－1　几种固硫剂及固硫产物的膨胀比的比较

名称	CaO	$CaCO_3$	$CaSO_4$	CaS
$V(cm^3/mol)$	16.9	36.9	46.0～52.2	28.9
膨胀比	1	2.18	2.722～3.09	1.711

通过以上的分析，可以得出以下几个结论：

(1)由于原煤灰分中含有一定量的 CaO 等，自身有一定的固硫效果，但固硫效果随燃烧温度的升高而降低，到 1300℃时自身固硫率几乎为零。且煤种不同，其硫的动态析出特性也有所不同。

(2)$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 中的硫酸钙在 1050℃以下几乎不分解，在 1200～1300℃范围内迅速分解，到 1330℃时已有 95%的 $CaSO_4$ 完全分解。

(3)低温固硫产物在高温下的分解试验从另一个侧面表明，低温固硫产物在高温下有 85%～92%发生了分解。因此，低温固硫产物 $CaSO_4$ 在高温下再次分解，是导致钙基固硫剂在高温下固硫率迅速降低的最主要原因。

(4)纯 CaO 经高温灼烧后因烧结导致固硫率下降了约 10%，这是导致钙基固硫剂在高温下固硫率迅速降低的另一个原因。高温灼烧对不同钙基固硫剂的固硫效率影响不同。

(5)固硫剂中 $CaCO_3$ 分解速率也影响固硫效率，主要是影响对在 550℃以下分解的低温硫的脱除。不同钙基固硫剂微观结构不同及 $CaCO_3$ 分解的速度不同，固硫率相差近 19%。

从以上分析可知，提高钙基固硫剂高温固硫效果的关键：

(1)在钙基固硫剂中添加具有促进作用的化合物，使之在固硫过程中形成高温下稳定的固硫产物，如硫酸盐的络合物等，以减少固硫产物在高温下的再分解；

(2)采用多种化合物复合型添加剂捕捉煤中不同化合成分的硫；

(3)利用促进剂改善钙基固硫剂的微观结构，提高其抗烧结能力；

(4)降低钙基固硫剂的开始分解温度，如选用小颗粒固硫剂，从而改善钙基固硫剂捕捉在 550℃以下分解析出的低温硫的能力。

(5)固硫剂的固硫性能应与煤种,尤其是其中的硫含量、硫成分以及煤的灰分产率及灰成分相适应,才能保证有最优的固硫效果,这就为固硫剂的选择增加了难度。

第四节　影响动力配煤固硫效果的几种因素

影响动力配煤固硫效果的因素很多,其中最主要的影响因素通常有 Ca/S 比、固硫剂粒度、燃烧温度、燃烧工况、添加方式、固硫剂与煤种的适应性等。

一、Ca/S 摩尔比的影响

燃烧过程中,Ca/S 摩尔比反映了固硫剂用量的大小,Ca/S 比越大,固硫剂用量越大,固硫剂用量的大小对固硫率起着重要的影响。固硫剂用量不足,就不能控制或不能完全控制 SO_2 的排放。不同的煤,Ca/S 比对固硫率的影响不完全相同。图 7－6－6 为松藻煤固硫时 Ca/S 比对固硫率的影响。

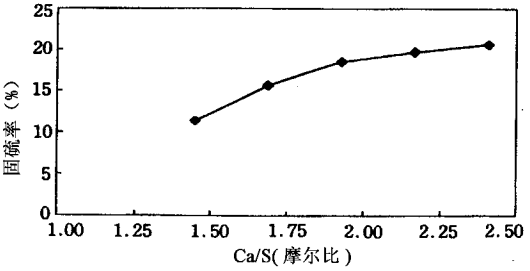


图 7－6－6　松藻煤固硫时 Ca/S 摩尔比对固硫率的影响

(炉温 1200～1230℃)

可以看到,随 Ca/S 摩尔比的增加,固硫率提高,当 Ca/S 比超过 2.17 后,固硫率随 Ca/S 摩尔比的增大而增加不明显。因此,对该煤而言,Ca/S 摩尔比为 2 左右即可。需要说明的是,对不同的煤和固硫剂,从最佳的固硫率和经济性综合看,其合理的 Ca/S 摩尔比不尽相同,一般认为合理的 Ca/S 摩尔比应为 1.6～2.5 左右,其固硫率和固硫剂的利用率等的综合效果较好。

二、固硫剂粒度的影响

当固硫剂粒度减小时，其比表面积相应增大，这在一定程度上可以减少外扩散阻力，提高固硫反应速率，使 Ca^{2+} 的利用率提高。

图 7－6－7 为普通石灰石与在试验室制成的粒度为小于 40nm 超细碳酸钙的固硫效果的比较。

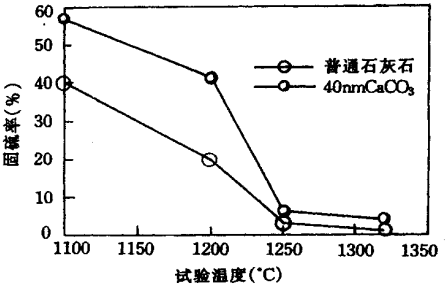


图 7－6－7　固硫剂粒度对固硫效果的影响

从图 7－6－7 中可以看出，当试验温度低于 1200℃时，超细碳酸钙比普通石灰石的固硫效果要高很多；随着温度继续升高，超细碳酸钙的固硫效果也开始下降，至 1330℃时，其固硫率也仅为 5%。

由此可以说明，适当减小固硫剂的粒径对提高高温燃烧固硫效果有一定好处，但这种依靠减小粒度来提高固硫率的方法会大大增加能耗。当温度升高至一定程度，固硫产物的不稳定性仍是阻碍固硫的主要原因。

三、燃烧温度对固硫率的影响

燃烧温度是影响固硫率高低的一个极重要条件，对是低温固硫和高温固硫均是如此。图 7－6－8、图 7－6－9 分别为低温和高温固硫时燃烧温度对固硫率的影响。

从图 7－6－8 上可以看出，随温度增高，固硫率降低，其原因可能与黄铁矿和固硫剂的分解温度有关。在较低温度时，固硫率较高实际是一种假象。因在 500℃左右时黄铁矿分解出 S 量极少，要到 550℃以上才开始大量析出硫，故实际灰渣中有部分未分解的黄铁矿硫，表现为固硫率高。随着温度的增加，生成的 SO_2 增多，但石灰石要到 800℃左右才大量分解，此时生成的 SO_2 没有足够的固硫剂与其反应，所以随着生成的 SO_2 增多，固硫率逐渐下降。随温度继续增高，达到 800℃时，石灰石开始大量分解放出 CaO，和黄铁矿放出的 SO_2 进行作用，实现固硫。但石灰石分解速度没有黄铁矿中的硫析出速度快，

所以仍有部分 SO_2 逸出，因而固硫率较低，这是真实的固硫效果。

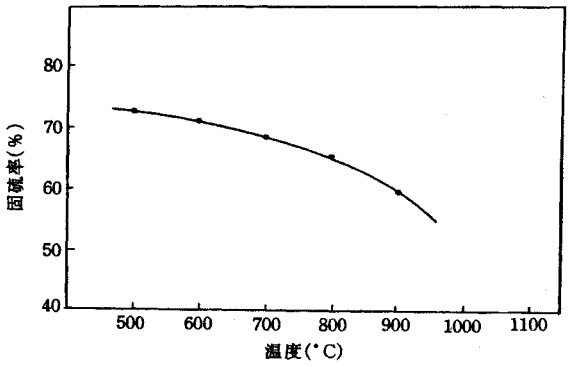


图 7－6－8　低温固硫时燃烧温度与固硫率的关系

试验条件，Ca/S = 3，燃烧时间 10min

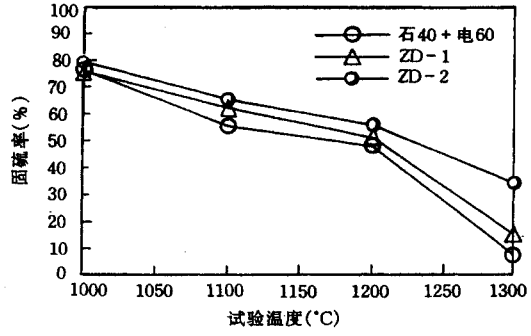


图 7－6－9　高温燃烧固硫剂的固硫效果

从图 7－6－9 中可以看出，两种固硫剂在不同温度下与普通钙基固硫剂相比，固硫率均有所提高，尤其是在高温下固硫率提高更多。试验也表明，1300℃时的固硫率仍只有 40%左右。

可见，温度对固硫有重要的影响。如果选择固硫剂时能考虑到其中固硫有用成分的分解温度与煤中形成 SO_2 的温度基本一致，使释放出的 SO_2 能及时与固硫剂起作用，并在高温下形成其他不易分解的含硫物质，那么对提高固硫效果将有极大意义。

四、燃烧工况的影响

层燃炉燃烧工况对脱硫效率影响明显，影响的主要因素为料层及炉温。如配风合理，料层着火距离合适，燃烧时火焰长度在炉排上均匀分布，炉膛最高温度将下降，在这样的燃烧工况下，不同的固硫剂均可得到较高的固硫效率，见图 7－6－10。图 7－6－10

从另一个侧面也反映出燃烧温度对固硫率的影响，温度越高，固硫率越低。

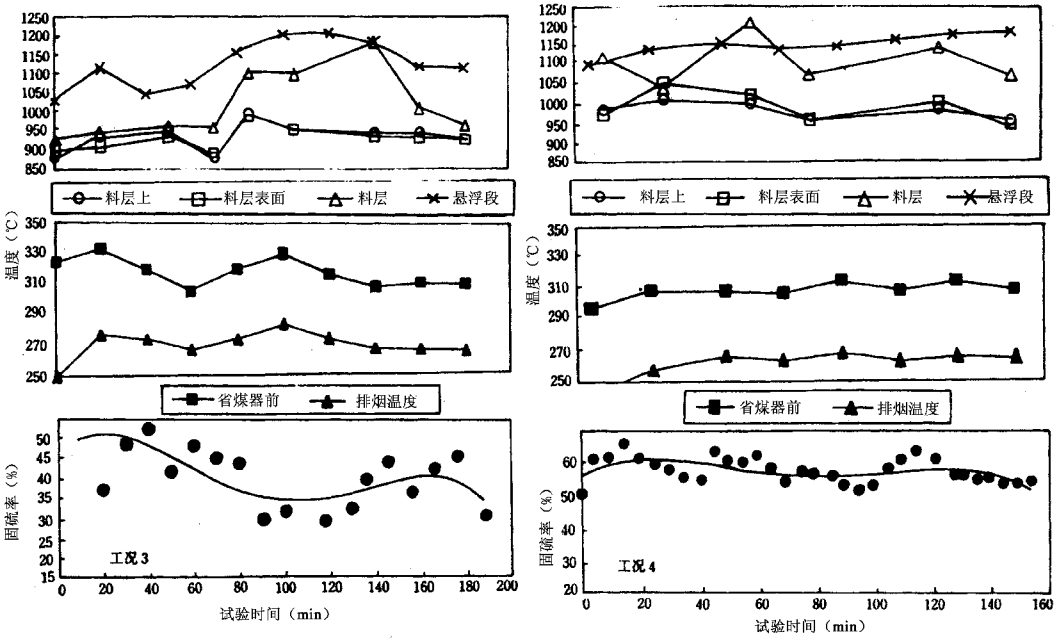


图 7－6－10　燃烧工况对固硫率的影响

五、添加方式的影响

固硫剂加入煤中的方式有多种，如：①机械掺混；②分层加入；③部分机械掺混或分层加入、部分喷粉等。实际在炉膛中，不同的工况及床层的不同部位，炉温存在着差异，见图 7－6－10，因而添加方式的不同必然影响固硫率。试验表明，当固硫剂以分层方式加入时，比单纯的机械掺混方式固硫率可增加 4.5 个百分点，而采用方式③时固硫率可比机械掺混时提高一倍左右。

六、固硫剂与煤种的适应性

采用动力配煤，不仅改善了煤质，由于配合煤中的硫含量、硫成分以及煤灰成分的变化，必然影响到固硫效果。

配合煤的自固硫率与单煤不同。对合山煤的研究表明，当配入 15% 的盘江煤，或配入 10% 的郑州煤，其自固硫率由单一合山煤的 4.80% 分别提高到 9% 和 20%，远远优于合山煤的自固硫率。因此，合理选择配煤煤种可以提高固硫率。

其次，配煤后，同样的 Ca/S 比情况下，固硫率也会发生变化。对合山煤的研究表明，

在 Ca/S 重量比约为 1.67～1.83 时，单一合山煤的固硫率为 24.58%，而加入 15% 的盘江煤后的配煤固硫率则可达到 38.64%，固硫率得到明显的提高。

其他的类似研究也有相近的结论，所以固硫剂的选择必须与煤种相适应。

第五节　几种固硫剂的基本配方及其固硫率

由于各个研究单位在研究固硫剂时采用的研究试验装置不同，选用的固硫剂及添加剂不同，所用煤种和煤质不同，工业试验选用的锅炉型号、规格及所控制的工况不同，因此对目前的各种固硫剂的基本配方及其固硫率作出正确的评价是难以做到的，此外，有些试验结果的可信度也值得商榷。这里仅选择几种有代表性的固硫剂，就其基本配方和固硫率作一简述。

一、HZ 系列节能清洁燃烧剂

HZ 系列节能清洁燃烧剂是以矿物质、生物质、碱金属促进剂为洁净燃烧添加剂的基本成分，再选择具有催化燃烧作用的含金属盐或金属氧化物的工业废料与钙基固硫剂按一定比例配合而成的，形成既可以直接在炉内燃烧过程中固硫，又有一定催化燃烧作用的洁净燃烧添加剂。HZ 系列节能清洁燃烧剂包括 HZ—1 型、HZ—2 型、HZ—3 型等系列品种，分别于 1994 年和 1998 年研制成功，现已批量投入各种工业层燃锅炉和窑炉上应用，效果良好。

(一) KZLZ－8 卧式锅炉应用效果

KZLZ－8 卧式锅炉燃用混煤，分别掺有 1.5% HZ－1 型、3% HZ—2 型节能清洁燃烧剂，对其排污情况实际对比监测。监测结果见表 7－6－2。

表 7－6－2　KZLZ—8 卧式锅炉监测结果表

监测 / 项目	监测值		
	工业混煤	加 HZ—1 型	加 HZ—2 型
烟气温度(℃)	176	187	190
测点风速(m/s)	20.0	21.0	21.9

监测 / 项目	监测值		
	工业混煤	加 HZ—1 型	加 HZ—2 型
烟气量(m^3/h)	6.91×10^3	7.26×10^3	7.56×10^3
标态烟气量(Nm^3/h)	4.1×10^3	4.26×10^3	4.4×10^3
实测 SO_2 平均浓度(mg/Nm^3)	2.5×10^3	1.69×10^3	$1.60\sim10^3$
SO_2 原始排放量(kg/h)	10.2	7.2	7.04
SO_2 浓度下降率(%)	—	32.4	36.0
SO_2 去除率(%)	—	29.4	31.0

从表 7－6－2 可见，锅炉燃煤掺有 HZ－1 型固硫剂，SO_2 初始浓度较燃用混煤下降 32.4%，排放量下降 29.4% 燃煤中掺有 HZ－2 型固硫剂，SO_2 初始浓度较燃用混煤下降 36%，排放量下降 31%。

(二)SZL—6—1.6AⅢ锅炉应用效果

SZL—6—1.6AⅡ锅炉应用 HZ－2 型固硫剂，在锅炉负荷基本稳定、煤种相同、燃煤参数基本不变的情况下，分以下 2 种工况进行测试，测试结果见表 7－6－3，所用原煤煤质分析见表 7－6－4。

表 7－6－3　SZL—6—1.6AⅢ锅炉监测结果

工况 / 项目	Ⅰ(散煤)	Ⅱ(散煤＋3%HZ—2 型剂)	2 种工况比较
烟气中 SO_2 排放量(kg/h)	5.11	2.99	减少率 41.5%
烟气中 NO_x 排放浓度(mg/m^3)	49	51	无明显变化
烟气中 O_2 含量(%)	13.7	14.6	无明显变化
炉渣干基全硫量(%)	0.06	0.12	增加率 100%

表 7－6－4　煤质分析数据(原煤)

M_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	O_{ar}	A_{ar}	$Q_{net,ar}$
%	%	%	%	%	%	%	MJ/kg
10.87	52.09	2.44	0.91	1.21	8.35	24.13	19.99

从表 7－6－3 中可以看出，入炉散煤中加 3%HZ—2 型固硫剂燃烧后，实测锅炉出口 SO_2 排放量比不加时减少 2.12kg/h，减少率为 41.5%，烟气中 SO_2 浓度从 444mg/m³ 变化至 258mg/m³。

（三）DZL10—13—AⅢ型锅炉应用效果

在 DZL10—13—AⅡ型锅炉上进行了对比试验，由国家级监测单位进行系统全面的测试，结果是掺加 HZ—1 型剂 3%时，正平衡效率提高 5.29%，节煤率 6.8%，炉渣含碳量下降率 17.2%，锅炉初始烟尘排放量降低 41%，SO。排放量减少 26.77%。

总之，利用 HZ 系列固硫添加剂，实际固硫率在 26%～41%左右。

二、ZD 系列洁净燃烧添加剂

ZD 系列洁净燃烧添加剂包括 ZD—1、ZD—2、ZD—3 共 3 个产品。ZD 系列洁净燃烧添加剂的组成成分和作用，与 HZ 系列节能清洁燃烧剂基本相同。试验用原煤的煤质分析同表 7－6－4，实测烟气的结果见表 7－6－5。

表 7－6－5　实测烟气中二氧化硫减少率及其他变化

（SZL—6—1.6AⅢ锅炉）

项目 / 工况	烟气中 SO_2 排放量(kg/h)	各工况与四工况经较减少率(%)	烟气中烟尘排放量(kg)	变化情况	烟气中氮氧化物排放量(kg/h)	变化情况
一工况（散煤＋8.7%ZD—1）	8.73	41.6	1.16	不增加	1.01	不增加
二工况（散煤＋8.34%ZD—3）	9.12	38.9			1.26	不增加
三工况（散煤＋5%ZD—3）	8.72	41.6			1.45	不增加
四工况（散煤）	14.9		1.5		1.83	

（1）试验表明，入炉散煤中加 ZD—1 型洁净燃烧添加剂 8.7%的比例燃烧后，实测锅炉出口 SO_2 排放量比不加添加剂减少 6.17kg/h，减少率为 41.6%，烟气中 SO_2 浓度从 1.26×10^3 mg/m³ 变化到 727mg/m³。

（2）入炉散煤中加 ZD—3 型洁净燃烧添加剂 8.34%比例燃烧后，实测锅炉出口 SO_2 排放量比不加添加剂减少 5.78kg/h，减少率为 38.9%，烟气中 SO_2 浓度从 1.26×103mg/m³ 变化到 767mg/m³。

(3)入炉散煤中加 ZD—2 型洁净燃烧添加剂 5%比例后,实测锅炉出口 SO_2 排放量比不加添加剂减少 6.18kg/h,减少率为 41.6%,烟气中 SO_2 浓度从 $1.26\times103mg/m^3$ 变化到 $739mg/m^3$。

(4)入炉散煤中加 ZD 系列洁净燃烧添加剂燃烧后,烟气中烟尘排放量、氮氧化物排放量与不加添加剂时,都有不同程度的减少,烟气中氧含量无明显变化。

总之,ZD 系列洁净燃烧添加剂在加入量相当于煤中硫含量的 4.13～7.21 倍时,其固硫率约为 38%～41%。

三、HN 固硫剂

该固硫剂的主要成分为 $CaCO_3$,工业试验用炉为一台 1t/h 的水平往复炉排锅炉,所用煤的含硫量 $S_{t,d}$ 为 2.58%～3.63%,$Q_{net,ar}$ 为 23.8～26.68MJ/kg。工业试验结果见表 7－6－6。试验表明,在固硫剂加入量为煤中硫含量的 2.75～3.88 倍时,固硫率为 41%左右。该工业试验还表明,固硫剂粒度越细,固硫效果越好;过分加大固硫剂的加入量(固硫剂加入量增加到为煤中硫含量的 4.13～5.81 倍时),炉内固硫率并未明显增加。

表 7－6－6　HN 固硫剂炉内掺烧固硫效果

固硫剂加入量,(%)	掺烧固硫率,(%)	备注
10	23.80	<10mm
10	41.32	粉状
15	42.05	粉状

四、MY941 和 MY942 型烟煤添加剂

MY 系列烟煤添加剂的主要成分为含 CaO、Al_2O_3、Fe_2O_3、MgO 等的工业废弃物及氧化剂。其中 MY941 为液体添加剂,可溶于水中使用,加入量为 0.8%;MY942 为固体添加剂,与煤掺混后使用,对含硫 1.19%的煤,加入量为 3%。

用该系列添加剂在 KZL—1—8 型链条炉排卧式快装锅炉上进行了工业性试验,所用原煤的煤质分析见表 7－6－7。试验表明,用 MY941 添加剂,固硫率为 6.7%;而加入 MY942 添加剂,固硫率为 10.39%。

表 7－6－7　试验用原煤的煤质分析

M_{ad} (%)	A_{ad} (%)	V_{ad} (%)	FC_{ad} (%)	焦渣特征 (1～8)	$S_{t,ar}$ (%)	$Q_{gr,ad}$ (MJ/kg)
2.93	13.88	27.77	55.42	3	1.19	27.76

五、MHS 系列添加剂

MHS 系列添加剂由煤科总院北京煤化所研制开发。它是由 Al_2O_3、SiO_2、Fe_2O_3、CaO、MgO 等金属氧化物和适当的助燃剂组成，与钙基固硫剂配合使用，加入量约为煤样量的 0.5%～1.5%。其作用一是加快低温时析出的 SO_2 与钙基固硫剂的固硫反应，提高固硫剂的利用率和固硫反应速度；二是在高温下生成含硫的金属复合物，改变固硫产物的结构形态，阻止 $CaSO_4$（或 $CaSO_3$）等的分解，从而提高高温固硫率。目前正拟进行工业性试验。下面将该固硫添加剂的实验室研究结果做一简介。

（一）MHS9908、MHS9909 固硫添加剂对单一合山高硫煤的固硫效果

合山煤硫含量高，且以有机硫为主（占 76%以上），其煤质分析结果见表 7－6－8。

表 7－6－8　合山高硫低热值煤的煤质分析

名称	M_{ad} (%)	A_{ad} (%)	V_{ad} (%)	$S_{t,ad}$ (%)	$S_{s,ad}$ (%)	$S_{p,ad}$ (%)	$S_{o,ad}$ (%)	$S_{o,ad}/S_{s,ad}$ (%)
商品煤	1.80	50.83	10.35	6.54	0.19	1.36	4.99	76.30

如果对该煤按照常规的 Ca/S 比，则固硫剂的加入量应在 20%以上，这时该煤的灰分更高、热值更低，用户将无法使用，因而对该煤只能在低钙硫比条件下通过加入添加剂来提高固硫率。表 7－6－9 为实验室试验结果。

表 7－6－9　不同种类的添加剂及加入量对固硫率的影响

添加剂加入量 / 固硫率，(%) / 添加剂种类	0.75%	1.0%	1.25%
不加添加剂	23.36	23.36	23.36
9905 添加剂	28.97	31.78	40.19
9906 添加剂	37.38	40.19	35.51
9907 添加剂	24.30	41.12	33.64

添加剂种类 \ 添加剂加入量 / 固硫率,(%)	0.75%	1.0%	1.25%
9008 添加剂	54.21	44.86	42.06
9909 添加剂	46.73	47.66	45.79
9910 添加剂	40.18	36.45	30.84

备注 :生石灰的加入量均为煤样量的 10%,炉温 1200 ~ 1230℃。

试验表明,加入添加剂比不加添加剂的固硫效率均有不同程度的提高,比例适当时可提高 100%左右。同时也看到,在加入量相同的情况下,不同添加剂的作用是不同的,即使同一种添加剂,加入量的不同也会使固硫率不同。对应每一种添加剂,其最优的加入量是不同的。某些添力喇中含有催化助燃的组分,随加入量的增大固硫率反而降低了。其中加入 9908 或 9909 添加剂后,其固硫率可以达到 40% ~ 45%水平。

(二) MHS9911 和 MHS9912 添加剂对配煤后合山煤的固硫效果

合山煤的灰分高、发热量低 ;只加入固硫剂而不采用配煤手段,将导致合山煤的热值更低。为使在加入固硫剂后的煤质基本保持不变,建议采用动力配煤,并对配煤后合山煤的固硫效果进行了一系列试验。

1. 配合煤的性质

配煤选用了贵州的盘江煤,该煤为低硫(小于 0.5%)、中等挥发分(25%左右)和较高的发热量(大于 5500kcal/kg)。配入 15%左右的盘江煤后,煤质的各项指标均会得到改善(见表 7 - 6 - 10)。

表 7 - 6 - 10　合山煤配煤前后煤质的变化(实测值)

项目 \ 煤质指标	M_{ad} (%)	A_{ad} (%)	V_{ad} (%)	$Q_{gr,ad}$ (MJ/kg)	$S_{t,ad}$ (%)	CRC (1 ~ 8)
100%合山煤	1.33	50.48	11.38	16.74	6.52	2
90%合山煤 + 10%固硫剂	0.68	54.09	12.34	15.73	5.67	2
15%盘江 + 75%合山 + 10%固硫剂	0.69	50.90	13.77	17.45	4.78	2
20%盘江 + 70%合山 + 10%固硫剂	0.76	49.26	14.02	17.48	4.57	2

可以看到,配煤的煤质指标实测值与理论计算值略有差异。在合山煤中配入 15%的盘江煤,配煤后的各项煤质指标均优于原合山煤,使煤质得到改善。

2. 配煤后硫析出规律的变化

配煤后不仅煤质指标得到了改善，而且煤中灰分的变化，特别是煤灰成分的变化，必然会影响到硫的析出规律的变化，结果见图 7－6－11。

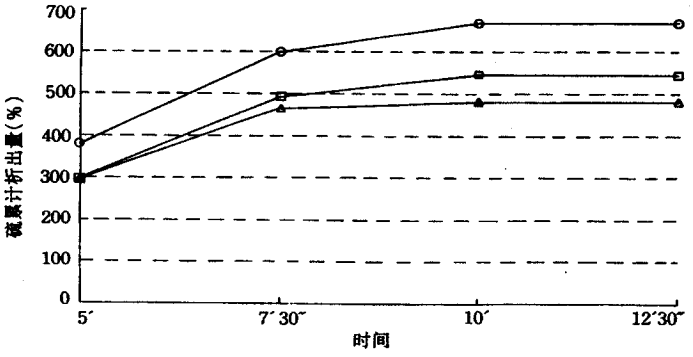


图 7－6－11　配煤后合山煤硫受热析出规律的变化

○—100%合山，□—85%合山＋15%盘江，△—90%合山＋10%郑州

试验表明，加入 15%的盘江煤，硫的析出率只相当于单一合山煤的 82%。从理论上讲，盘江煤中的部分硫也会析出，硫析出率应超过 85%，因而，合山煤配入盘江煤后自固硫能力提高了。如果配入的煤是 10%的郑州煤，硫的析出率只相当于合山煤的 75%，远远低于理论值 90%的水平。因此，配煤不仅能改善煤质特征，还可在一定程度上提高配煤的自固硫能力，合理选择配煤的煤种和比例，也是提高固硫率的一个有效手段。

综合考虑合山地区煤的来源及成本，选定盘江煤作为配煤煤种进行试验，配煤比例为 75%合山煤、15%盘江煤、10%固硫剂。

3．配煤后的高温固硫效果试验

MHS9911～9913 添加剂对配煤的固硫效果见表 7－6－11。

表 7－6－11　MHS9011～9913 添加剂的固硫效果

添加剂种类 \ 添加剂加入量 / 固硫率，(%)	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	0
9911 添加剂	36.36	40.91	46.59	43.18	42.05	
9912 添加剂	37.5	37.5	39.77	46.59	46.59	
9913 添加剂	42.05	43.18	35.23			
单一合山煤，不加添加剂						23.36
配煤，不加添加剂						38.64

备注　炉温 1200～1230℃，生石灰加入量 10%。

试验表明，MHS9911 和 MHS9912 添加剂对合山煤中配入 15%盘江煤后，固硫效果显著，在 MHS9911 加入量为 1.0%、MHS9912 加入量为 1.25%时，固硫率均可达到 45%以上。对比可知，加入 1.0%的 MHS9911 或 MHS9912 添加剂，固硫率均可提高 20%以上。因此，针对以合山煤为主的配煤，MHS9911 和 MHS9912 添加剂均是有效的。

总之，通过对合山煤的高温固硫实验室试验研究，认为：

(1)对于单一合山煤，加入 10%的生石灰及煤化所研制的 MHS9908 和 MHS9909 固硫添加剂，在加入量为 0.75%～1.0%时，固硫率可以达到 45%以上。

(2)合山煤配入 15%的盘江煤后，不仅可以改善煤质，还可以提高自固硫率，有利于提高固硫效果。

(3)配煤后，同样加入 10%的生石灰，固硫率可由 23.36%提高到 38.64%，提高率为 65.4%。合理配煤是提高合山煤固硫效果、改善煤质指标的有效手段之一。

(4)合山煤与盘江煤配煤后，加入 10%的生石灰及煤化所开发的 MHS9911 和 MHS9912 添加剂，在添加剂加入量为 1.0%～1.25%时，固硫率可以达到 45%以上。

(三)MHS 系列添加剂对其他 4 种煤的固硫效果研究

在对合山煤进行了固硫试验研究的基础上，煤科总院北京煤化所对其他 4 种煤进行了高温固硫试验。

试验选用了从弱粘煤到无烟煤的 4 个煤种，硫分变化范围为 0.89%～3.26%，灰分变化范围为 7%～27%，挥发分变化范围为 9%～40%，有较强的代表性。具体的煤质分析结果见表 7－6－12。

表 7－6－12　固硫试验所用煤样的煤质分析

产地	煤种	M_{ad},(%)	A_{ad},(%)	V_{ad},(%)	$S_{t,ad}$,(%)
山西大同	弱粘煤	4.11	10.66	26.86	0.89
山东	无烟煤	1.30	17.82	9.44	1.58
河南义马	长焰煤	12.25	24.39	26.34	2.22
江苏徐州	气煤	2.15	7.38	40.01	3.26

对上述 4 种煤，在各自较优的 Ca/S 摩尔比条件下进行了添加剂优选试验，试验采用正交法($L_9(3^4)$)对不同的煤分别进行，经过大量试验，优选出了分别适合上述 4 种煤的 MHS 系列固硫添加剂，使高温固硫效果明显得以改善。试验结果见表 7－6－13。

表 7－6－13　MHS 系列添加剂对四种煤高温固硫率的影响

产地	煤种	Ca/S 摩尔比	不加添加剂时固硫率,(%)	加入添加剂时		固硫提高率,(%)	备　注
				加入量,(%)	固硫率,(%)		
大同	弱粘煤	2.00	35.71	MHS99150.7	43.64	22.21	炉温 1100～1130℃
山东	无烟煤	1.94	30	MHS99150.7	41.67	38.9	炉温 1200～1230℃
义马	长焰煤	1.96	40	MHS99150.6	52.73	31.83	炉温 1100～1120℃
徐州	气煤	2.21	37.34	MHS99160.8	44.21	18.40	炉温 1200～1230℃
徐州	气煤	1.89	25.32	MHS99170.2	44	73.77	炉温 1200～1230℃

试验表明,加入添加剂后的固硫率达到 40%以上。对于大同煤,加入 0.6%～0.7%的 MHS9915 添加剂、炉温 1100～1120℃时,可使固硫率提高达 22%～45%,对于山东无烟煤,可使固硫提高率达到 38.9%;义马煤的固硫提高率也可达到 31.83%,对徐州煤,固硫提高率也达 18%～74%。这说明,所选择的添加剂 MHS9915、MHS9916、MHS9917 对提高固硫率具有显著效果。

总之,燃煤固硫技术是一项适合我国国情的减排 SO_2 的技术;燃煤固硫技术的关键是固硫剂及其添加剂的选择与优化,以及对煤种、煤质和燃烧方式的适应性,普通钙基固硫剂的高温固硫率只有 30%左右,主要是固硫剂的固硫反应与煤燃烧过程中的硫析出规律不一致,以及已生成的固硫产物高温下的再分解等;添加剂对提高高温固硫效果至关重要,由煤科总院北京煤化所开发的 MHS 系列添加剂,用于大同弱粘煤、义马长焰煤、山东无烟煤及徐州气煤和合山单煤及配煤,在加入量约为 0.2%～1.5%时,可使固硫提高率达 18%～74%,扣除煤自固硫率,加入添加剂后固硫剂的高温固硫率达到 40%以上。

上述各种 MHS 系列添加剂的试验结果都是在实验室的基础上完成的,今后有待进一步做工业性的燃烧试验后予以证实。

第七章　动力配煤标准化和系列化与质量管理

动力配煤标准化是指配制的动力煤各项技术指标有统一、公认的规范标准。这种标准是衡量其质量好坏和使用价值高低的依据。动力配煤系列化是指配制的动力煤各项技术指标有不同的标准，组成不同的牌号，以供不同用户选用。不同系列牌号的动力配煤产品可适应不同用户的需求。

动力配煤标准化和系列化是进行质量管理的基础。因此，要进行有效的质量管理，必须对其管理对象进行标准化和系列化。

第一节　动力配煤标准化和系列化的意义

动力配煤标准化和系列化具有重要的经济意义：

(1)有利于促进煤炭供应企业转轨变型，适应社会主义市场经济发展。动力配煤作为人为加工的新煤种、新产品，可使煤炭供应企业由单纯的‘做买卖’拓宽为‘流通领域的加工业”，增加煤炭的使用价值；也可使煤炭生产企业对自己的产品深加工，由单纯生产延伸为‘流通领域的加工业”。这样，企业依附于产品，考核有了标准，可促使企业加强检测、强化服务、讲究效益、提高企业管理水平、增加竞争能力，适应社会主义市场经济的发展。

(2)有利于保障产品质量的稳定性。动力配煤有了统一、公认的规范标准，就打下了质量管理的基础，便于标准计量部门检测、监督，可保障产品质量的稳定性，取信于用户。

(3)有利于提高锅炉热效率,保证锅炉的正常出力,节约煤炭,提高社会经济效益。配煤质量稳定,煤质与炉型匹配,是提高锅炉热效率、保证锅炉正常出力的重要依据,同时也是节约煤炭、减少烟尘等污染物排放的重要途径。因此,动力配煤标准化、系列化可促进社会经济效益的提高。

(4)有利于锅炉设计制造标准化、系列化和规范化。锅炉根据某一个煤种设计制造是过去的传统作法,但这种作法是不科学的,它往往造成设计制造与使用脱节。动力配煤标准化、系列化,为锅炉设计制造标准化、系列化和规范化提供了依据。

(5)有利于延长锅炉寿命和环境保护。高硫煤经燃烧后放出大量二氧化硫气体,不仅污染大气,而且腐蚀锅炉尾部受热面。如果标准中限制其含量,可以延长锅炉寿命,并有效地保护环境。

(6)有利于劣质煤资源的充分利用,促进煤炭物流合理化。劣质煤并非所有技术指标都劣(如褐煤的挥发分就很高),动力配煤可取其所长,避其之短,做到物尽其用。有了标准,就有了依据,自然就可以找到其使用途径,确定其流向,实现定点、定量的衔接渠道,促进煤炭物流合理化。

俗话说"没有规矩,不成方圆"。动力配煤标准化、系列化是要对其立下"规矩",使其成"方圆"。煤炭生产部门和流通部门今后必将组织制订标准,从而进一步促进我国动力配煤的健康发展。

第二节　我国生产动力配煤主要城市的配煤标准综述

我国动力配煤首先是由物资流通部门发起,以后逐渐发展到煤炭生产部门。

1982 年 4 月,国家物资局燃料局在北京召开的能源专家座谈会上,天津市某煤建公司周志诚同志就提出了混煤的技术标准问题,并商定了其代号。

1983 年 1 月 20 日,国家物资局下达的"物燃字 44 号"文件中指出:"加工动力配煤,应制定符合当地实际情况的质量标准";并提出以低位发热量为依据的 4 个等级(4000、4500、5000、5500kcal/kg),要求挥发分大于或等于 20%、水分小于或等于 10%、粒度小于或等于 25mm。同时还统一了标号:以 4 位阿拉伯数字表示,前 2 位代表低位热值,后 2 位代表挥发分。

上海市燃料公司开展配煤的时间最早,并于 1982 年 8 月由上海市能源利用技术研

究所承担了国家物资局指定华东地区 5 城市(上海、南京、济南、青岛、杭州)“动力配煤优化配方”的任务。与此同时,沈阳市燃料利用研究所也承担了国家物资局指定东北地区 6 城市(长春、齐齐哈尔、丹东、辽阳、本溪、鞍山)“动力配煤优化配方”的任务。他们都调查了这些城市的锅炉分布情况,先后提出了某些有针对性的规范化配方。

1984 年 4 月,由北京物资学院和沈阳市燃料利用研究所共同承担国家物资局指定的中南、华北、东北 3 地区 12 个市盟“动力配煤优化配方深化研究”的任务,不仅对配方进行电子计算机优化处理。而且提出了一系列标准化、系列化的配方,经实践应用,普遍得到用户的好评。

新生事物都需要有个发展过程。也需有个认识过程。到目前为止,动力配煤虽无国家标准,但许多省、市都制定厂自己的“地方标准”和“地方配煤系列”。这里选载 3 市 1 省的地方标准,可供借鉴。

一、天津市

天津市煤建公司、市煤炭应用研究所及市煤建公司下属一厂至五厂,在调查了全市 1910 个用户、3555 台锅炉(其中链条炉 2648 台、往复炉 125 台、抛煤机炉 59 台、手烧炉 723 台)烧煤情况的基础上,于 1983 年 5 月率先提出了天津市的动力配煤标准。

到 1985 年 1 月 31 日,由市煤建公司提出,经市物资管理局批准,由市标准局正式发布了“天津市动力配煤企业标准(津 Q/WZ15—85)”,正式确定了动力配煤 3 个系列牌号的标准(详见表 7－7－1)。

表 7－7－1　天津市动力配煤标准

配煤品种代号	$Q_{net,ar}$(kcal/kg)	V_{daf}(%)	M_{ar}(%)	粒度(mm)
1# 6022	5500～6500	≥22	≤9	0～25
2# 5020	4500～5500	≥20	≤9	0～25
3# 4018	3500～4500	≥18	≤9	0～25

随着国家对环保要求的日益严格,天津市对燃煤硫分等质量指标的要求也就更高,加上目前市场经济的迅速发展,导致动力配煤有呈疲软趋势。

二、北京市

北京市动力配煤标准是由市节能技术服务中心、市煤炭利用研究所及市煤炭总公司

下属的煤炭三、四厂提出，经市煤炭总公司批准，由市标准计量局于 1987 年 8 月 20 日颁布（京 Q/MT004—87），正式确定了动力配煤 4 个系列牌号的标准（详见表 7－7－2）。除此之外。他们还根据用户的特殊要求，加工配制厂若干种“特种配煤”。

表 7－7－2　北京市动力配煤标准

质量指标 / 品种	$Q_{gr,ad}$ (kJ/g)	挥发分 V_{ad}(%)	灰分 A_{ad}(%)	水分 M_{ar}(%)	粒度 (mm)
5924 动力煤	24700 ± 840	≥24	≤21	≤10	≤25
5825 动力煤	24430 ± 840	≥25	≤24	≤10	≤25
5522 动力煤	23000 ± 840	≥22	421	≤10	≤25
5222 动力煤	22000 ± 2840	≥22	428	≤10	≤25

鉴于北京市自 1998 年下半年起要求各用煤企业一律使用清洁燃料，对动力用煤要求灰分小于 10%、硫分小于 0.50%，这样也就很难生产合格的动力配煤以满足用户的需要了。同时，北京市技术监督局又于 1998 年 7 月 23 日颁布了“低硫优质煤及制品”的地方标准（DB11/097—1998），其中对燃烧散煤的要求如表 7－7－3 所示。

表 7－7－3　低硫散煤技术要求

项目	DL（A 区）	DL（B 区）
A_{ad}(%)	≤10.0	≤18
$Q_{net,ad}$(MJ/kg)	≥24.00	≥23.00
$S_{t,ad}$(%)	≤0.50	
M_t(%)	≤12.00	
V_{ad}(%)	≥24.00	
粒度 0～3mm 含量，(%)	≤30	

三、上海市

上海市能源利用技术研究所针对不同锅炉对煤质的不同要求，于 1982 年就提出了上海市动力配煤质量标准（详见表 7－7－4）。

表 7－7－4　上海市 1982 年提出的动力配煤标准

适应炉型	标准代号	工业分析(%)				V_{daf} (%)	$S_{t,ar}$ (%)	$Q_{net,ar}$ (kcal/kg)	焦渣特征 (1～8)	ST ℃	粒度 (mm)
		M_{ar}	A_{ar}	FC_{ar}	V_{ar}						
2t/h 及其以下固定炉排	SDM－1	8～12	10～15	50～60	19～22	25～30	≤1.5	5900～6200	3～4	≥1350	≤25，0.2 以下≤2.5%
4t/h 及其以下链条炉排	SDM－2	8～12	15～20	45～57	21～24	26～32	≤1.5	5400～5700	3～4	≥1350	同上
4t/h 以上其他炉排	SDM－3	8～12	20～25	38～48	23～26	28～33	≤1.5	4900～5200	3～4	≥1350	同上

到 1990 年 1 月 1 日，上海市燃料公司又以《工业锅炉与配煤管理规范》指令性文件规定了 3 个系列牌号的标准(见下表)。

工业锅炉配煤		收到基低位发热量	V_{daf} (%)	M_t (%)	粒度 mm	CRC (1～8)	$S_{t,d}$ (%)
品种	代号	MJ/kg					
1#	4520	18.80～20.90	≥20	8～10	440	244	≤1.5
2#	5022	20.90～23.00	≥22	8～10	440	244	≤1.5
3#	5524	23.00～25.10	≥24	8～10	440	244	≤1.5

1999 年，上海市燃料总公司、上海市环保局和上海市节能监察中心 3 个单位共同起草了《工业锅炉配煤》DB31/×××－1999(上海市地方标准)，目前正待上海市技术监督局审批中。该标准的具体划分如下：

类型	品种牌号	$Q_{gr,ad}$ (MJ/kg)	V_{daf} (%)	M_t (%)	$S_{t,d}$ (%)	CRC (1～8)	粒度 (mm)
工业锅炉	PM－1	≥18.80	≥20	≤10	≤1.0	2～5	≤40
	PM－2	≥20.90	≥22	≤10	≤1.0	2～5	≤40
	PM－3	≥23.00	≥24	≤10	≤1.0	2～5	≤40

实际上在工业锅炉中使用的是以 PM－2 号煤为主。据上海市的广大用户认为最合适的工业锅炉用煤质量是 $Q_{net,ar}$ 在 23～24.26MJ/kg、V_{daf} 大于 22%、燃料比(FC/V)在 1.8

~2.0 之间。据此，锅炉用配煤或单煤的 V_{daf} 以小于 35% 为宜。

四、江苏省

江苏省标准局、省物资局于 1991 年 7 月 1 日联合发文，规定了该省动力配煤 2 个系列牌号的标准（详见表 7-7-5）。

表 7-7-5　江苏省动力配煤标准

配煤号	$Q_{gr,ad}$ (J/g)	FC_{ar} (%)	V_{ar} (%)	M_{ar} (%)	A_{ar} (%)	$S_{t,d}$ (%)	粒度
4#	20908	≥46	≥20	8~10	≤24	≤1.5	≤25mm 占 70%~80%，最大粒度不超过 40mm
2#	18817	≥43	≥18	8~11	≤28	≤2.0	

从以上三市一省制定的动力配煤标准看，有的技术指标差距很大，甚至所用的技术指标也不相同，但都是经过调查研究并经过一段实践才提出来的。也就是说，各地方都重视了动力配煤的标准化、系列化问题。因此，急待制定各行业标准，乃至全国统一的国家标准。为此，国家内贸局有关部门 1999 年还提出了全国动力配煤质量指标的推荐性意见（见表 7-7-6）。从表中看出，动力配煤分成工业锅炉和电站煤粉锅炉 2 大部分，前者分成 GL—1、GL—2 和 GL—3 共 3 种品牌的动力配煤。各品种牌号间的发热量和挥发分的下限也都有所不同。总的看来，该配煤‘标准’中的硫分小于或等于 1.50% 似乎偏高，而电站配煤的灰软化温度 ST 要求大于 1350℃ 也偏高，因为我国华北和西北地区的大量侏罗纪动力煤的 ST 几乎都小于 1250℃。

表 7-7-6　动力配煤质量指标

类型	品种牌号	质量指标						
		$Q_{net,ar}$ (MJ/kg)	V_{daf} (%)	M_{ar} (%)	$S_{t,ar}$ (%)	ST (℃)	CRC (1~8)	粒度 (mm)
工业锅炉	GL-1	≥18.80	≥20	≤10	≤1.5	—	2~5	≤40
	GL-2	≥20.90	≥22	≤10	≤1.5	—	245	≤40
	GL-3	≥23.00	≥24	≤10	≤1.5	—	2~5	≤40
电站煤粉锅炉用煤	DF-1	≥15.48	≥27.0	≤10	≤1,5	≥1350	—	≤50
	DF-2	≥16.32	≥19.0	≤10	≤1.5	≥1350	—	≤50
	DF-3	≥18.41	≥10.0	≤10	≤1.5	≥1350	—	≤50
	DF-4	≥20.90	≥6.5	≤10	≤1.5	≥1350	—	≤50

第三节　动力配煤标准化系列化探讨

根据煤质对锅炉燃烧和运行的影响，经多年研究与实践，对煤质总结出这样一句话：“易着火、耐抗炼、不结焦、不结渣、稍结团、能透风、粒度适宜比例大、炉排尾部铺薄渣、有害成分受管辖”。按照这样的目标，我们就可以有的放矢地来探讨动力配煤有关的技术指标和配煤的标准化系列化了。

一、标准化、系列化有关技术指标的确定

(一)挥发分

挥发分是‘易着火’的必要条件，应作为重要技术指标。传统的锅炉设计是按 V_{daf} 设计的，这对高灰煤不尽合理。比如灰分在 30% 以上的煤，V_{ar} 比 V_{daf} 大约要低 8% ~ 15%，似乎 V_{daf} 到 20% 已经可以，但 V_{ar} 只有 12% 左右，本来就不易着火，挥发分太低就更不着火了。因此，对于低热值(即高灰)煤要加大其 V_{daf} 值，或者采用 V_{ar} 作为标准，才能满足“易着火”的要求。

(二)发热量

发热量是‘耐抗炼’的基础，是表征煤质好坏的重要依据。因此，在制定标准时，把其分成不同的等级作为系列化的标准，同时也作为定价的依据。

(三)焦渣特征

焦渣特征是能否燃尽的辅助条件。因此，对于机械炉排要限定焦渣特征级别。

(四)灰熔融性

灰熔融性温度不仅是能否燃尽的辅助条件，而且也是锅炉能否正常运行的必要条件，因此要限定其软化温度(ST)。

(五)水分

水分对煤的燃烧有利、有弊。考虑到自然条件和人为因素对煤质的影响，应对 M_{ar} 进行限定。

(六)硫分

为了保障锅炉寿命和尽量减少环境污染，对硫分的限定是十分必要的。

(七)粒度

粒度是能否燃尽的重要条件。因此，不仅要限定其粒度，而且要限定煤粉和煤屑的

含量，以保证粒煤的比例。

以上是对动力配煤标准化、系列化提出的 7 项技术指标。有人可能会问：为什么不把灰分也作为一项技术指标呢？这是因为发热量高的煤灰分必然较低。

我们根据大量煤样的实测结果，为烟煤创立了这样一个公式：

$$Q_{net,ad} = 8575.6 - 17.6V_{ad} - 94.6A_{ad} - 167.9M_{ad} + 41.5CRC$$

从这一公式可以看出，如果发热量、挥发分、水分和焦渣特征已经限定，那么灰分就接近常数。当然，有时也会出现发热量相同的煤，其灰分会有较大的差异。

二、动力配煤标准化、系列化推荐指标

经研究和广泛征询用户意见，动力配煤标准化、系列化提出如下推荐意见（详见表 7－7－7）。这些技术指标可供各地在配制动力煤时参考。

表 7－7－7　动力配煤标准化、系列化推荐意见

牌号	代号	$Q_{net,ar}$（MJ/kg）	V_{daf}（%）	CRC（1～8）	ST（℃）	M_t（%）	$S_{t,ar}$（%）	粒度（6～25mm，%）
1#	2330	≥23.00～25.09	≥30	2～4	≥1350	≤10	≤1.00	≥60（最大粒度不得超过30mm）
2#	2320	≥23.00～25.09	≥20～30					
3#	2130	≥20.91～23.00	≥30					
4#	2120	≥20.91～23.00	≥20～30					
5#	1920	≥18.82～20.91	≥20	2～5	≥1300	≤12		
6#	1722	≥16.73～18.82	≥22					
7#	1324	≥12.54～16.73	≥24	2～6	≥1250	≤15		

＊全硫作为重要参考指标。因各地煤炭含硫量差异大，故近期难以统一。对含硫大于 1.0% 的煤，建议加固硫剂固硫。

第四节　动力配煤质量管理

动力配煤质量管理是指以合理的价格、符合质量标准的动力煤供应用户，赢得用户

信任，开拓并占领用户市场，为用户服务，同时自身也获得相应经济效益。

提高产品质量是提高经济效益的基础，是增强竞争能力的保证，是企业生存的根本。上海市燃料总公司曾提出“配煤质量是燃料公司的生命”。的确，没有配煤的质量，或单纯地经营某些品种，在煤炭供过于求、价格下跌、多渠道竞争的情况下，燃料供应企业会产生生存危机，特别是个体户以‘灵活’的手段争相推销的中小城市更是如此。如果动力配煤质量无保证，等于是自走绝路。

动力配煤质量管理是一项综合性的管理工作，它涉及到进煤管理、配煤生产管理、质量检测管理、运送管理、售后服务管理和质量监督管理等。因此，动力配煤质量管理并不单纯是质量检测部门的事，各有关职能机构必须分工负责、通力合作、各司其职、各负其责、协调动作，进行全面管理。

一、进煤管理

进煤要有计划性。除不能自主、只能接收国家调拨之外，应有自己的进煤渠道。

（一）用户调查

在开展动力配煤之前，首先要把能覆盖用户的锅炉情况作一番调查，统计出不同的炉型，烧什么样的煤质最适宜等分组归类，做到心中有数；然后进行 A、B、C 分类，重点把占用户 20% ~ 30%、煤炭消耗量占 70% ~ 80% 的 A 类大用户管起来。至于占用户 70% ~ 80%、煤炭消耗量只占 20% ~ 30% 的 B、C 类零星小用户，则不必花费过多精力进行管理。

（二）进煤选择

进煤首先要考虑当地资源，当地资源一般运费省、成本低。其次要考虑能与当地资源互补的煤种，如当地都是贫煤，可考虑进些不粘煤、长焰煤或气煤等，以其挥发分补当地贫煤的不足。反之亦然。如当地全是焦煤，可考虑进些长焰煤、不粘煤或褐煤，以解结焦之弊。当然，进煤时一定要选择成本价最低、供货均衡或有替代性的煤种，可考虑以挥发分和焦渣特征作为选择煤种的依据。

为了使挥发分和焦渣特征互补，参照国标（GB7571—86）作图，可作为选择煤种的依据（详见图 7 - 7 - 1）。

（三）均衡进煤

在一个配煤计划期内，分批进煤要尽量周到安排，要充分考虑场地贮存能力和配煤生产的需要，与配煤生产相结合，做到均衡进煤、计划进煤。

（四）质量验收

进煤要按购销合同规定的验收期尽快做质量检测，不符合质量要求的，视情况进行

索赔,以保证进煤质量的稳定和挽回经济损失。

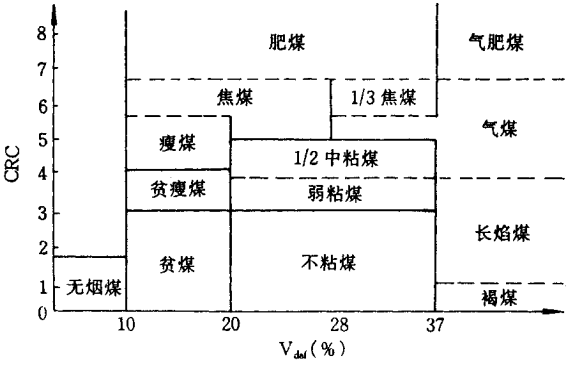


图 7－7－1　各大类煤种所在 CRC 和 V_{daf} 坐标位

注:煤的焦渣特征共分八级。其中无烟煤 1～2 级;贫煤 1～3 级;贫瘦煤 3～4 级;瘦煤 4～6 级;焦煤 6～8 级;肥煤 7～8 级;不粘煤 1～3 级;弱粘煤 3～5 级;1/2 中粘煤 4～6 级;1/3 焦煤 5～7 级;气肥煤 6～8 级;气煤 4～6 级、长焰煤 1～4 级;褐煤 1 级

(五)分品种堆放

煤场使用要合理布置,有利于分品种堆放,有利于配煤生产线取料、运出等作业进行。

二、配煤生产管理

配煤生产直接关系到配煤的质量,必须与煤质检测、设备运转和工艺流程相结合,把好采样关、化验关、破碎关、配比关、混匀关,成品把好质量检测关,严格按照配煤质量标准组织生产。

(1)生产前必须对掺配的单煤进行化验,按配煤质量标准进行优化配方,既要降低配煤成本,又要保证配煤质量。

(2)对不符合质量要求的大煤块要筛出,优质优价出售,或破碎后掺入,不得超过规定的粒度。

(3)严格按配比要求控制闸门或流量。在条件允许的情况下,由体积比改为重量比,并拌均搅匀,切不可生产"堆层"配煤。

(4)配煤产品要按时进行质量检测。如果质量不符合要求,要及时调整配方。出售前要为用户提供符合质址要求的化验单。

(5)为保证设备的正常运转,对易损零配件要有足够的储备量,并要建立设备档案,

定期维护保养。

三、质量检测管理

质量检测是保证配煤质量的关键。为此,必须有一批专职的采、制样、化验人员以及相应的化验设备,并能尽职尽责地把好进煤关和销售关：

(1)对化验人员要重视进行专业培训,强化质量意识,使他们牢固树立“质量第一”的思想,并有广博的煤质知识和较强的化验技术能力。

(2)要及时进行进煤验收,提出煤质检测报告。

(3)要及时提供配煤生产所需的煤质指标,进行优化配方,指导配煤生产。对不符合质量标准的配煤,要及时向有关领导汇报,制止出售。

(4)要与销售人员密切配合,听取意见,改进配方,提高配煤与炉型的适应性,以达到用户的满意。

(5)要积累资料,对煤质进行统计分析,向有关领导、采购人员和销售人员提供准确的煤质信息。

四、运送管理

运送管理涉及原料煤进入生产和成品配煤送达用户。它的职能就是要按指定的煤种或煤堆,保质、保量、适时运送到目的地。

五、售后服务管理

“优质、廉价和服务周到”是开展动力配煤的3大法宝。“物竞天择,适者生存”,要生存就必须有竞争力。为此,销售人员必须牢固地树立“用户至上,服务第一”的思想,把用户当成“皇帝”,跟踪服务：

(1)对消耗量占70%~80%的大用户,要经常深入厂矿征询烧用配煤的意见,掌握动态,做好信息反馈,不断地改进配煤质量。

(2)对尚不认识动力配煤的用户,要据理耐心地作好宣传,最好当场示范,让用户心服。如果确实配煤质量有问题,要了解原因,有的放矢地改进配方,提高配煤质量。

(3)因配煤质量问题影响用户生产或造成损失的,经证实后应赔偿用户经济损失,以取得用户的信任。

(4)学会识火方法,懂得各种锅炉对煤质的不同要求,以便更好地为用户服务。

下面介绍一种炉前肉眼识火的方法,以供参考。

从炉孔窥视，如果火焰黄亮、充满炉膛且烟囱不冒黑烟，炉渣不黑、锅炉出力足且稳定，说明配煤与炉型适应。如果新煤一进即燃，前炉膛火焰旺盛，但暗红，后炉膛无火焰，间有冒黑烟现象，说明配煤的挥发分太高。反之，如果起火推迟，前炉膛无火焰（或火焰小），而后炉膛火焰旺盛，且炉渣发黑，说明配煤挥发分太低。如果锅炉出力不足或不稳，火焰暗红，间有冒黑烟现象，说明配煤的发热量太低。如果炉膛火焰白亮刺眼，甚至烧坏炉排或炉墙，说明配煤发热量过高。如果煤层结饼，不能透风，说明配煤的结焦性太强。如果炉渣粘结成块，间有火口，说明配煤的灰熔点太低。如果煤粉漏扬、间有火口、亮渣即进灰坑，说明配煤的粒度不适、外水偏高。以上出现的问题，有的可通过调整操作加以解决，有的则是煤质与炉型不相匹配，需要调整配方才能妥善解决。

六、质量监督管理

质量监督管理是指由标准计量部门抽检质量，鞭策达标的管理办法。

北京市煤炭总公司地处首都，煤质好坏直接关系到国际影响和首都人们的切身利益。为此，他们强调质量第一，在行动中加强质量管理，增加质检投入。他们建立了四级质量保证体系，（总公司有质量监督处，各厂设质量监督科，车间设质量监督组，班组设质量监督员），设专职质量管理人员百余人。还以现代化设备武装厂 20 个化验室，配备足够的专职化验人员，形成厂一套完整的质量管理网络。为了使企业形成自我约束机制，建立了一套质量监督检查考核评比办法，作为企业升级和职上奖励的依据。总公司质量监督处十分重视质量监督管理，每月不定期到现场检测并出简报，每月评比，评比结果公之于众，年底还要进行总评比。因此，绝大部分用户反映满意。

上海市燃料公司也请市能源监测站对下属 5 个分公司的配煤经常进行质量检测。一次，有 3 个分公司的配煤质量不合格，结果吃了“黄牌”，公司立即召开现场会，提出 8 条整改措施（如充实化验力量、加强化验人员培训、武装化验设备、加强进煤和销售检测、把强化企业管理列为企业升级的重要考核内容等），不到一年时间，5 个分公司的配煤质量几乎全部达标，90％以上的用户反映满意。

第八章　煤质在线检测技术

燃煤在线监测是火电厂生产的需要,也是电力工业发展的体现。火电厂燃煤质量实现在线监测可以得到许多好处,下面就是几个主要方面：

对入厂煤,可及时监测煤质优劣,决定接收与否,同时也可为煤场科学贮存煤炭提供依据。

对入炉原煤,可提高煤耗计算的准确性,因它是以每一采样单元中更多的检测数据的平均值作为依据的。

对人炉煤粉,可适时依据煤质变化调整锅炉运行工况,以提高锅炉机组运行的安全性和经济性。

对贮煤场煤,可做到按煤质准确混配,使锅炉在接近设计煤质的情况下运行,提高锅炉机组的工效,同时,也可通过混配煤使锅炉燃用符合环保要求的煤质以减少环境污染。

据有关统计资料表明,火电厂发生事故中有相当比例与煤质有关。实现了燃煤在线监测可减少这方面事故的发生。从这一意义来说,火电厂燃煤实现了在线监测,对电力生产的安全性和经济性所产生的作用是显著的。

水分和灰分是最常用的表征煤炭质量的指标,因为煤炭加工利用和商务贸易都离不开这两项基础煤质资料。从众多国内外信息得知,煤炭的灰分监测多利用核技术,水分监测多利用微波或电容技术。随着电力能源的持续发展,火电厂燃煤质量的传统离线检测(实验室内)已远不能满足生产要求,它必将被在线监测所替代。在线监测非常适用于大煤量的实时检测,它具有对煤样不破坏、不接触、能自动连续运转,无需繁琐的制样和化验过程,监测速度局面,节省劳动力等优点。因此,国外近十年来迅速发展,国内也加快开发研制,有些产品已投放市场。但火电厂来煤多是原煤、品种杂、灰分一般较大,且

多燃用混煤，这给实现以煤炭物理性质为基础的在线煤质监测带来了一些困难，为此电力工业主管燃科部门要尽快组织技术力量攻关，使火电厂在不久的将来全面实现燃煤质量实时监测，以从根本上提高燃煤质量监督和科学管理水平。

第一节　灰分的核检测技术

一、灰分的核检测技术概况

在我国应用核技术检测煤炭质量至少有 40 多年的历史了，与英国和德国早期产品质一样。唐山煤炭分院最早也采用低能单源 Am－241γ 辐射原理检测灰分，主要用于选煤厂，该院最近又与国际原子能机构 IAEA 共同开发双源 ZTHY 型智能同位素灰分仪系列产品，可 适用于带式输送机上的在线实时检测 ;我国核工业总公司也生产类似的双源 γ 射线 XH－5220 在线灰分仪及 FJ－2821 离线灰分仪，已广泛应用于选煤厂，清华大学也开发研制 ZZ－89B 型双源 γ 射线扫描式煤灰分仪，用于炼钢厂检测精煤质量 ;青岛三能电力设备有限公司等单位开发的 ADM－SN 双能多道煤灰分析仪和西安天能机电有限责任公司研制的 TN－200 型快速煤质监测仪已在火电厂和煤矿应用。这些都取得了可观的经济效益。国外近几年在这方面也发展很快，主要应用于煤和焦炭的加工质量控制，煤矿的出矿煤、级别煤的质量控制，发电厂混配煤质量的控制和煤的贮存质量的控制等。最有代表的要首推澳大利亚 MCI(Mineral Control lnstrumentation)公司近期推出的 CoalSCAN系列在线煤质分析仪：

型号	被测物料	煤质参数
1500 型无放射源在线灰分仪	原煤	灰分
2500 型在线灰分仪	原煤或洗煤	灰分
3500 型全自动在线分析仪	原煤或洗煤	灰分
2800 型在线灰、水联合分析仪	原煤或洗煤	灰分、水分、发热量
		灰分、水分、硫分发热
9500 型元素分析仪	原煤或洗煤	量、挥发分等

这些分析仪远销世界各地，其中 2500 型在线灰分仪和 9500 元素分析仪在中国销售额分别为 14 台和 2 台。

此外，还有德国伯托(Berthob Co)公司生产的 LB420 灰分仪，已在陡河发电厂和石洞口第二发电厂分别安装使用，美国 Gamma Metric 公司推出的一种以热中子为放射源的旁线元素分析仪，其性能与上述 MCI 公司生产的 9500 型相似。这里值得一提的是上述 MCI 生产无放射源在线灰分仪，它是利用煤炭在生成过程中渗入的含有 K、V 和 Th 伴生矿物质所产生的天然 γ 射线强度来检测灰分的，因为它是无放射源的，因此也就不需要屏蔽、防护等特殊要求，若在电力生产上应用获得成功，其前景是十分广阔的。

二、应用核技术基础知识

(一)有关核技术常用术语

原子核：原子核的质子数和所有轨道上的电子数是相同，这个数 Z 叫做元素的原子序数，是决定着元素在元素周期表上的位置。

质量数 A：它是核内质子数和中子数之和。以原子质量为单位时，又是原子质量最接近的那个整数。原子质量等于原子核及核外电子质量之和。

核素：具有特定核特性的某一种原子。例如质量数 31 原子序数 15 的磷、质量数 243 原子序数 95 的镅和质量数 133 原子序数 55 的铯等。国际上表示核素特征的方法是把质量数 A 放在化学符号的左上角，原子序数 Z 放在左下角。例如：

$^{36}_{17}\mathrm{Cl}$　　$^{2}_{1}\mathrm{H}$　　$^{110}_{47}\mathrm{Ag}$　　$^{32}_{15}\mathrm{P}$ 等

或采用另一种表示方法：例如碳－14，碘－13 等。

同位素：原子序数 Z 值相同，但质量数 A 不同的一组核素，称为元素的同位素。

电子伏(eV)：电子伏特是一个电子沿电场方向通过一伏特电位差时所获得的能量。

γ 衰变：电子核从不稳定的高能激发态跃迁到稳定的基态或较稳定的低能态，并且不改变其组成的过程。

吸收定律：当 γ 射线通过物质时，由于发生光电效应、康普顿效应和电子对效应的结果，γ 射线的强度将被减弱(吸收)，并遵循指数衰变规律。

居里：它是表示同位素放射强度的单位，1 居里的放射源每秒有 3.7×10^{10} 核发生衰变。

$$1\text{ 毫居里}=10^{-3}\text{ 居里}\ ;1\text{ 微居里}=10^{-6}\text{ 居里}$$

在国际单位制中，放射性强度的单位是贝可勒尔，它表示放射源每秒内有一个核发生衰变，因此：$1\text{ 居里}=3.7\times10^{10}$ 贝可勒尔

(二)在辐射防护中经常使用的度量人体辐射的计量单位

照射剂量：表示 γ 射(或 x 射线)在单位质量的空气中被阻止后所产生的正负离子中正离子的总电荷。照射量常用单位量伦琴。$1\text{ 伦琴}=258\times10_{-4}$ 库仑/千克。

吸收剂量：表示质量受照射物质中吸收的辐射能量，常用单位为拉德。1g 质量的受照物质中所吸收的辐射能量为 100 尔格时，吸收剂量为 1 拉德。

吸收剂量的国际单位是戈瑞。1 戈瑞等于每千克的受照物质中吸收 1 焦耳的辐射能量。

$$1\text{ 拉德} = 10^{-2}\text{ 戈瑞}$$

吸收剂量当时 H：它是等于组只中的某一点的吸收剂量 D、线质因素 Q 和其他修正因子 N 的乘积。通常用雷姆(rem)单位表示。即

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

国际单位制中是西弗特(sv)，两者关系是：

1 西弗特：100 雷姆

(三)核辐射屏蔽防护基础知识

在核仪器中常用放射源有 α、β、γ 或中子原。今将其屏蔽防护特点简述如下：

α 射线在标准状态空气中的射强不大，只有数个厘米，很薄的薄膜就可挡住，因此一般不需专门防护，但电离能力很强，对肌体的损伤性很大，切忌接触或吸(气)人体内。

β 射线在标准状态空气中的射程小于数米，较薄的屏蔽物质就可挡掉。因此，采取适当的屏蔽就可安全防护。但对于能量较高的 β 射线在原子序数大的物质中会产生强的韧致辐射。因此需用低原子序数的物质做屏蔽材料。

γ 射线的穿透能力很强，防护比 α 和 β 射线难得多，一般可采用 Pb、Fe 作为屏蔽材料。屏蔽的厚度取决于放射源的强度及其能量、工作人员离放射源距离和停留时间等。

中子源的穿透能力很强，对人体的危害性比其他射线大得多。对快速中子原的屏蔽材料可选用水或石腊等含氢物质、镉片和铅片共同组成。含氢物质的作用是使快速中子尽快地减速为热中子，镉片的作用是吸收这些热中子，铅片的作用是吸收镉片在吸收热中子时发射的 γ 射线。

依据《辐射防护规定》GB8703 中要求，辐射工作人员年有效剂量当量限值为 50msv(5rem)。放射性物质货包外表面任何一点上的剂量当量值不超过 5μsv/h(0.5mrem/h)，

依据 EJ－528－90 标准对核仪器基本安全要求：仪器表面 5cra 外$\leqslant$7.5μsv/h，1m 外$\leqslant$0.75μsv/h。

三、灰分的核检测技术原理

对应用核技术监(检)测灰分，依据核辐射与煤炭的相互作用的不同，通常有低能 γ 射线法、电子对生成淹没法和中子辐射活化法三种，此外，还有天然 γ 射法线。低能 γ 射

线法因其仪器结构较简单、价格也低廉，因此被工业部门颇为广泛采用。

（一）低能 γ 射线法

低能 γ 射线法主要是采用铯、钚和镅这类发射低能 γ 射线的核素作为放射源的。检测灵敏度高。因被测煤炭所处状态相异，一般可分为低能 γ 射线透射法和低能 γ 射线反散射法两种。

1. 低能 γ 射线透射法

（1）基本原理：当一束准直 γ 射线透射被测煤层时就发生衰减作用，其衰减程度取决于煤样层的质量厚度（$x\rho$）和质量衰减系数 μ_L 从两个因素，并遵循下列指数方程衰减：

$$I = I_0 e^{-\mu_L x\rho} \qquad (7-8-1)$$

式中　I_0——γ 射线通过煤样层前的辐射强度，c/s；

I——γ 射线通过煤样层后的辐射强度，计数/秒；

μ_L——煤样层的质量衰减系数，cm^{-2}/g；

ρ——煤样层的堆积密度，g/cm^3；

$x\rho$——煤样层的质量厚度，g/cm^2。

质量衰减系数：质量衰减系数的大小与 γ 射线的能量（Er）和煤中各元素的原子序数有关，煤中不同元素的质量衰减系数是各不相同的。参见表（7－8－1）。

表 7－8－1　煤与灰分中主要元素的质量衰减系数

元素	原子序数	E_r，keV						
		20	30	40	60	180	300	600
C	6	0.432	0.254	0.207	0.175	0.140	0.107	0.080
H	1	0.369	0.257	0.346	0.326	0.301	0.243	0.173
O	8	0.843	0.373	0.257	0.190	0.132	0.107	0.081
S	17	6.590	2.080	0.978	0.404	0.181	0.109	0.081
Si	12	6.590	2.080	0.978	0.404	0.181	0.109	0.081
Al	13	3.360	1.110	0.562	0.277	0.154	0.104	0.77
Fe	26	25.60	8.090	3.590	1.200	0.278	0.110	0.080
Ti	22	15.70	4.900	2.200	0.760	0.228	0.104	0.081
Ca	20	12.90	3.970	1.800	0.651	0.220	0.111	0.081
K	19	10.80	3.320	1.520	0.565	0.203	0.108	0.079

表 7－8－1 中揭示：①各元素对能量低于是 80keV 的低能 γ 射线的质量衰减系数差异大，，且随着原子序数 Z 的增加而增加；②随着 γ 射线能量的增加，各元素的质量衰减系数的差异愈来愈小；③同一元素的质量衰减系数随着 γ 射线的能量的增加而变小。

煤炭组成与质量衰减系数的关系：煤炭组成极为复杂，它是由有机质和元机矿物质

混合组成的一种化石燃料。简单况来，有机质主要是 C、H、N 和 O 等元素组成的有机化合物，而矿物质主要是 Si、Al、Fe、Ca、K 和 Na 等元素组成的无机化合物。因此煤炭可粗略视为二元混合物，从表 7－8－1 中可得知，组成有机质的各元素基本为低原子序数，其等效原子序数为 6，而组成矿物质的各元素基本为高原子序数，其等效原子序数为 12。当煤完全燃烧后矿物质（MM_d）转变为灰分（A_d）两者之间有一定的关系，可用下式表示

$$A_d = MM_d/(1+0.08) \tag{7-8-2}$$

今假定高原子序数的元素占煤中的质量百分含量为 C_Z，则低原子序数的元素的质量百分含量为 $1-C_Z$。对某确定的低能 γ 射线，高原子序数元素和低原子序数元素的质量衰减系数分别记作 μ_z 和 μ_c，所以煤对这种低能 γ 射线的质量衰减系数 μ_L 为煤中高、低原子序数元素的质量百分含量分别乘以各自的质量衰减系数之和，即

$$\mu_L = C_Z\mu_Z + (1-C_Z)\mu_c \tag{7-8-3}$$

此式表明，煤对低能 γ 射线的质量衰减系数与煤中所含高 Z（原子序数）元素的质量百分含量有关。在某一确定条件下，$x\rho$ 可视为不变，I 和 I_0 可通过多（单）道能谱仪实测，这样就可以从式 7－8－1 中求出煤对低能 γ 射线的质量衰减系数，然后同式 7－8－6 的关系可得到煤中灰分。

（2）单放射源（下简称单源）灰分检测仪。它是由低能放射源（Am－241，100mci）、探测器（含碘化钠（钙）和光电倍增管）、电子线路、能谱分析（多道或单道）和微机处理系统等单元组成。当一束准直 γ 射线通过被测煤样层后能量被衰减，衰减后的 γ 射线打到碘化钠晶体上就闪烁发光，光电信增管将闪烁光转换为脉冲电信号，经电子线路放大后输入到能谱分析单元中，检出各脉冲电信号幅度的分布（脉冲计数率和幅度的关系），最后送入微机处理系统经处理后就可得到灰分值。

单源低能 γ 射线透射法检测煤中灰分的示意图，参见图 7－8－1。

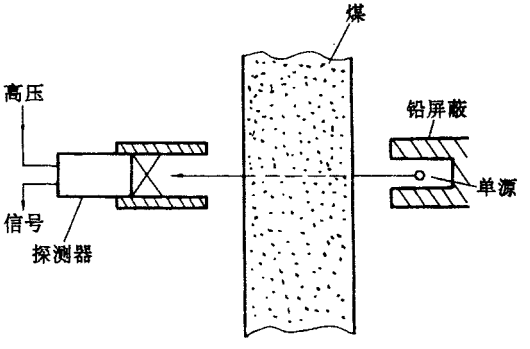


图 7－8－1　单源灰分仪结构示意图

由于单源低能 γ 射线用于在线检测、特别是带式输送机上煤流中监测灰分时，受到煤层厚度和堆密度（质量厚度 $x\rho$）影响大，检测精密度低。为了克服这一缺点，澳大利亚 MCI 公司等成功研制了双放射源（下简称双源）在线灰分监测仪。

（3）双源 γ 射线灰分监测仪。双源灰分监测与单源灰分监测仪的结构基本相同，但多了一个放射源。它是由一个低能放射源（Am－241）和中能放射源（Cs－137 或 Ba－133）组成了双源。Am－241 低能 γ 射线的衰减程度除了随煤样中元素的原子序数的增大而增大外，还与质量厚度有关，即煤的堆积密度和皮带流量有关。而 Cs－137 或 Ba－133 中能 γ 射线与煤中各元素的原子序数无关，即对各元素的质量衰减系数基本相同，因此它与灰分无关，但与被测煤的单位面积质量（质量厚度）有密切关系。基于低、中能 γ 射线对煤辐射作用具有不同的特性，我们就可以将与煤中灰分、单位面积质量有关的 Am 辐射检测结果和仅与单位面积质量有关的 Cs 辐射检测结果合起来，简单说来，就是用 Cs 辐射检测的结果对 Am 辐射检测灰分中受堆积密度的影响进行修正。这样就可得到只与灰分成比例有关而与单位面积质量无关的检测结果，双源 γ 射线透射法检测煤中灰分的原理就是依据这一关系建立起来的。Am－241 和 Cs－137 γ 射线对不同原子序数的物质衰减程度，参见图 7－8－2。

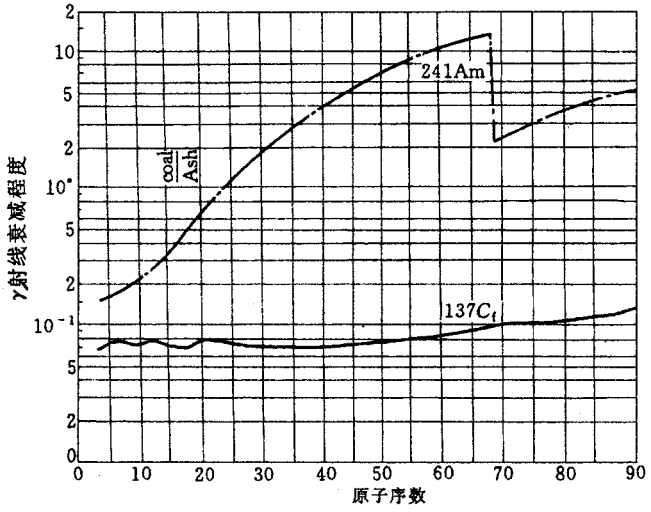


图 7－8－2　不同原子序数物质对 γ 射线的衰减

图中曲线显示，Cs 中能 γ 射线对原子序数低于 5.5 的物质的质量衰减程度基本是相同的，只有当原子序数超过 5.5 时才略有增加。而 Am 低能 γ 射线则不同，其衰减程度在原子序数据 70 以下时是随着原子序数的增加而增加，这些不同原子序数的物质也包

括了煤炭和灰分。

设同一窄束低、中能两种能量的 γ 射线透射皮带上煤流，则它们的能量衰减分别用下式表示：

$$I = I_0 e^{(-\mu_L x\rho)} \tag{7-8-4}$$

$$J = J_0 e^{(-\mu_{md} x\rho)} \tag{7-8-5}$$

式中　I_0、J_0——分别为皮带上无煤时的低、中 γ 射线的辐射强度，c/s；

I、J——分别为皮带上有煤时的低、中丁射纸的辐射强度，c/s；

$x\rho$——质量厚度，g/cm^2；

μ_L、μ_{md}——分别为低、中能 γ 射线对煤的质量衰减系数。

式 7-8-4 和式 7-8-5 各两边取对数，并经整理后得到：

$$\ln I_0 - \ln I = \mu_L(\ln J_0 - \ln J)/\mu_{md} \tag{7-8-6}$$

将上面式(7-8-3)中的 μ_L 代入式(7-8-6)后经整理可得到：

$$C_Z = \mu_{md}[(\ln I_0 - \ln I) - \mu_c(\ln J_0 - \ln J]/[(\mu_Z - \mu_C)(\ln J_0 - \ln J)]$$

进一步整理可获得：

$$C_Z = [\mu_{md}/(\mu_Z - \mu_C)] \cdot [(\ln I_0 - \ln I)/(\ln J_- \ln J)] - [\mu_C/(\mu_Z - \mu_C)] \tag{7-8-7}$$

对给定煤，则其元素的组成的 μ_{md}、μ_Z 和 μ_C 都是常数，对已确定的放射源的射线辐射强度和一定几何布置的检测系统，其 $\ln I_0$ 和 $\ln J_0$ 也都是可以预先确切定的常数。所以，在两种不同能量 γ 射线透射下，不管皮带上的煤流厚度如何变化，只要测定 I 和 J 就能检测出煤中高 Z 元素含量 C_Z，而 C_Z 与通常定义的灰分之间是成比例的。图 7-8-3 为用于检测带式输送机上煤中灰分的双源 γ 射线测灰仪的结构示意图。

(4)应用实例。

①离线检测 某洗煤厂为监控生产过程中的精煤质量，定期采样后把煤样送往实验室，利用某厂生产的双源 FJ-2821 型灰分仪检测灰分，煤样粒度小于 4mm，M_t 为小于 10%。根据该灰分仪要求，测定时需称取 3kg 煤样，从一定高度的漏斗注入塑料样品桶中，用一只固定质量砝码放在煤样表面压实，然后移入仪器内转盘上，开启放射源辐射 1min 后，煤样桶自动转动 120 转，又辐射 1min 后，又旋转 120 转，共旋转三次，将三次测定的结果取其平均值作为最终测定结果。仪器的结构示意图见图 7-8-4。

灰分仪测定结果与常规燃烧法相比，其极差值为 0.81%。

为了缩短检测灰分周期，也可采用移动式灰分仪。它的主要特点是将放射源、样品盒探测器及二次仪表等装在一辆可移动的小车，(见图 7-8-5)可很方便在现场就地检测，以提高工效。

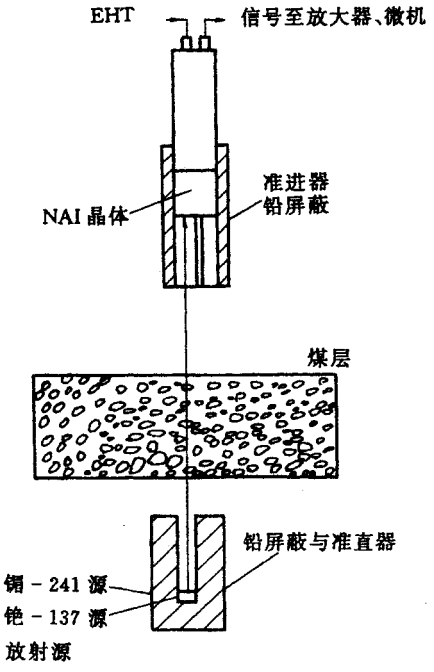


图 7 - 8 - 3　双源灰分仪结构示意图

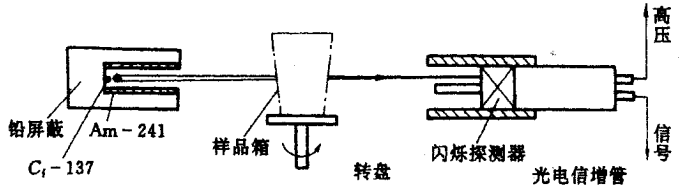


图 7 - 8 - 4　离线测灰仪结构示意图

表 7 - 8 - 2　仪器法与常规燃烧的测定结构的比较

燃烧法(A_d)	17.65	21.65	24.50	16.56	18.13	22.25
仪器法(A_d)	18.13	20.84	16.44	18.31	22.19	
差值(ΔA_d)	0.48	-0.81	-0.33	-0.12	-0.18	0.06

②在线监测 某钢铁厂安装了一台由某大学研制的双源 γ 射线灰分监测仪，以监测精煤灰分，收到了很好的效果。图 7 - 8 - 6 为该仪的工作简单流程。Am - 241 低能 γ 源

(60kev)和 Cs 中能 γ 源(662keV)放在同一铅屏蔽的准直器内,以同一窄束从同一个准直扎向上穿过皮带及其上煤层,部分 γ 射线被吸收,未被吸收而透过来的部分 γ 射线由 NaI(Ti)闪烁探测器检则,探测器测得混合能谱(参见图 7－8－7),由两个宽窗单道分别选取 Am＝241 和 Cs－137 全能峰内的脉冲,脉冲由发送单元变换后,可以远距离输到计算机,计算机根据记录到的两道计算,按预先确定的公式计算出灰分的大小。在 Am－241 道中混有 Cs－137 的康普顿脉冲数,应予以扣除。

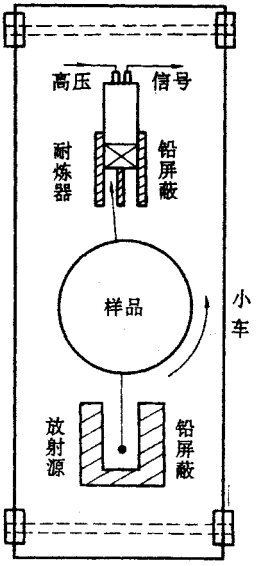


图 7－8－5　移动式小车灰分仪结构示意图

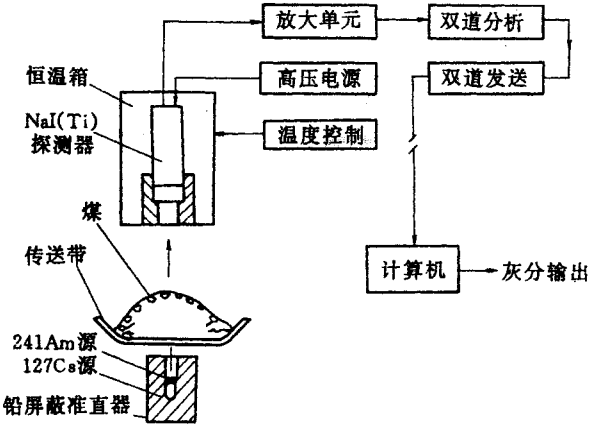


图 7－8－6　双源后 γ 射线灰分仪工作示意图

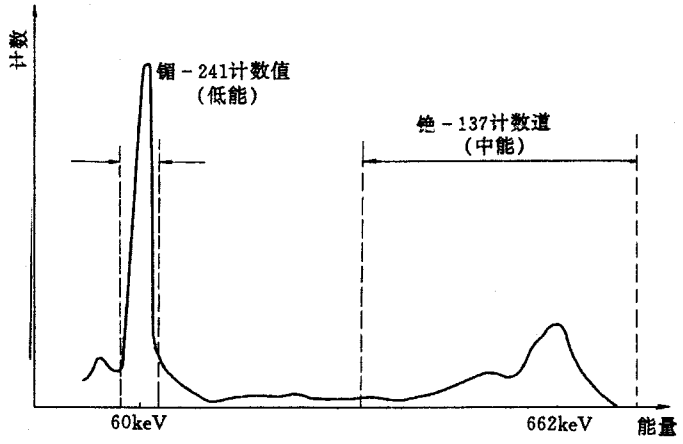


图 7－8－7　双源透射法 γ 射线能谱曲线

在电力系统火电厂也开始应用核技术监测燃煤灰分。有两个电厂分别于 1994 年底从德国柏托(Berthod)公司引进 LB4201 灰分检测仪和 LB354 微波水分仪各一台，安装在带式输送机上以监测煤灰分和水分。LB420 灰分检测仪包括有主机、放射源、闪烁探测器等主要组件，参看图 7－8－8。

LB420 灰分检测仪主要组件的技术参数：

放射源——Cs－137，强度为(370～1110) MBq，防护容器为浇铸加工件，带有开关。铅屏蔽厚度约 67mm，直径约 160mm，长约 200mm；Am－241，强度为 3700MBq，防护容器为牢固的黄铜做成，带有开关，铜屏蔽厚度约 10mm，长约 163mm。

闪烁探测器——NaI(Ti)，ϕ40/35，防爆设计，不锈钢外壳(用于 Cs 放射源)；NaI(Ti) ϕ44/5，不锈钢外壳(用于 Am 放射源)。

LB—4201 灰分检测系统的工作原理与国内某工厂和某大学生产的双源 γ 射线灰分仪相类似。

(5)检测精密度：低能 γ 射线透射法精密度对不同检测方式有所差异，相比之下，离线优于旁线，旁线又优于在线。下面为离线检测的精密度：

低灰分($A_d < 12\%$)误差$\leqslant 0.5\%(\sigma)$

中灰分($A_d = 12\% \sim 30\%$)误差$\leqslant 2\%(\sigma)$

高灰分($A_d = 30\% \sim 45\%$)误差$\leqslant 3\%(\sigma)$

2. 低能 γ 射线反散射法

(1)基本原则：利用反散射方式检测灰分也是较广泛应用的一种方法，其理论依据与上述透射法基本相似，但又不完全一样。在理论和实践上都表明在较宽的灰分范围内，

低能 γ 射线反散射强度与灰分呈倒数关系。利用低能 γ 源反散射强度检测煤灰分时，其放射源与探测器和几何布置是十分重要的，它直接影响检测的灵敏度。常见的两种布置方式如图 7－8－8a、b 所示。。

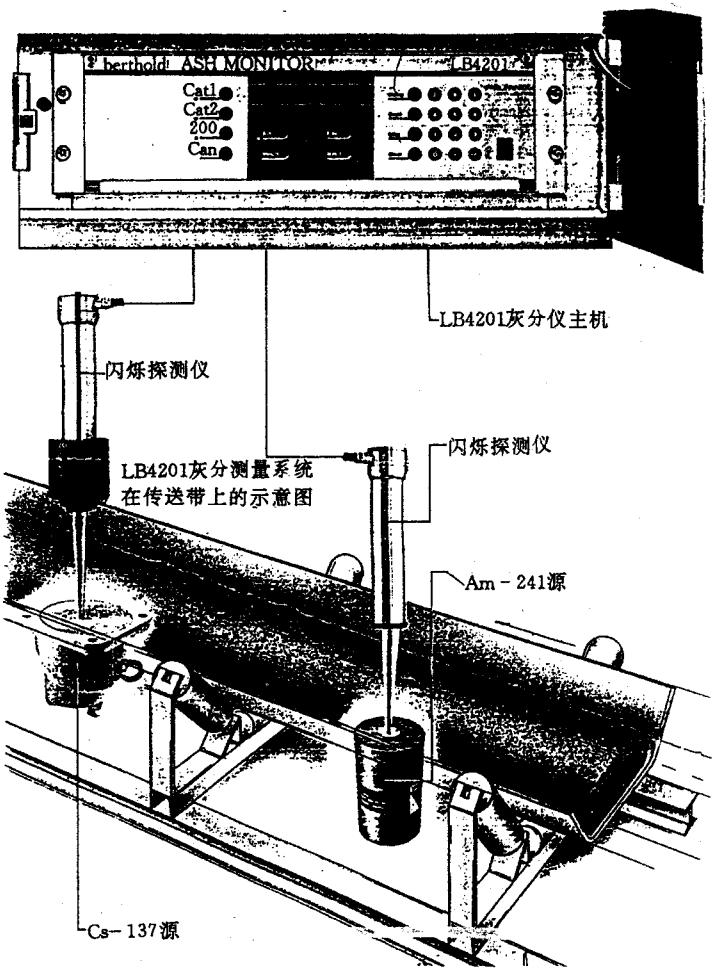


图 7－8－8　LB420 灰分仪在线检测系统

为便于设计和计算，通常对低能 γ 反散射检测灰分要做如下假定：

①煤样中各元素分布均匀，表面呈平面状，其厚度大于 γ 射线饱和深度。

②γ 射线辐射煤样的入射角和反散射到探测器方向的角度应是相等的。

③γ 射线在反散射过程中应没有能量损失。

④探测器和煤样表面之间的空气和低能 γ 射线不产生相互作用的。

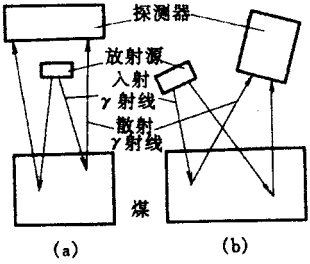


图 7－8－9　反散射两种几何布局示意图

今以图 7－8－10 的几何布置为例来推算射 γ 射线强度与灰分之间的关系式。假定入射低能 γ 射线在离煤层表面距离 x 的 dx 层内并被探测到的反散射 γ 射线的强度为：

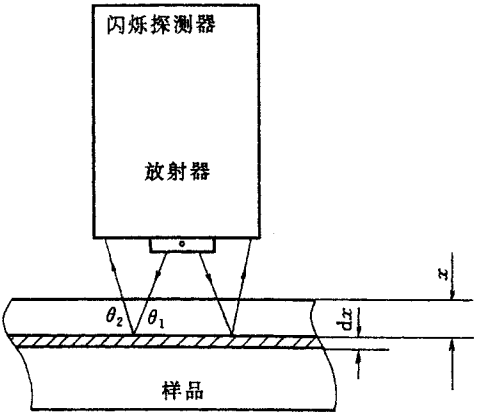


图 7－8－10　反散射测量法和内何条件

$$dI = K_1 [-\Sigma(-\mu'_i + \mu''_i) C_i \rho x/\cos\theta] dx \qquad (7-8-8)$$

式中　K_1——与几何条件、反散射截面和探测效率有关的常数；

μ'_i、μ''_i——分别为入射、反射 γ 射线的质量衰减系数，一般 $\mu'_i = \mu''_i = \mu$；

ρ——煤的堆积密度，g/cm^3；

C_i——煤中第 i 个元素的质量百分含量，%。

在 0～∞的厚度之间对上式积分，可得到被探测的反散射 γ 射线的强度 I 为：

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\infty} K_1 e^{[-\Sigma(-\mu'_i+\mu''_i)C_i\rho x/\cos\theta]} dx \\ &= K_1 \cos\theta/\Sigma(\mu'_i + \mu''_i) C_i\rho \\ &= K_2/\Sigma(\mu'_i + \mu''_i) C_i \\ &= K_2/2\mu_L = K \cdot I/\mu_L \end{aligned} \qquad (7-8-9)$$

$$K_2 = K_1 \times \cos\theta / p$$

$$2u_L = \Sigma(\mu'_i + \mu''_i) C_i$$

$$K = K_2/2$$

K_2、K_1、K 均与几何条件、反散射截面和探测器效率有关的常数。

依据前述式(7－8－3) C_Z 与 μ_L 呈线性函数关系，故可写成：

$$A(\text{灰分}) = b\mu_L - a \text{ 或 } A = -a + b\mu_L \qquad (7-8-10)$$

$$b = \mu_{md}/(\mu_2 - \mu_C)$$

$$a = \mu_C/(\mu_Z - \mu_C)$$

将 $\mu_L = K/I$ 代入式(7－8－10)中可获得：

$$A = a_1 + b/I \qquad (7-8-11)$$

此式表明煤灰分含量与反散射 γ 射线强度成反比例的关系。因此，在已确定放射源的 γ 射线强度的辐射下，只要测量其反散射强度，就可以知道煤的灰分含量。

旁线检测也叫分流检测，它既不同于离线检测，也不同于在线检测。它是通过特定的采样系统从主煤流中分流出具有代表性的少部分煤样进行检测，同样能起到实时监测的作用。下面就是某洗煤厂安装的一台旁线同位素灰分仪，参见图 7－8－11，它是按照低能 γ 射线反散射原理设计的。当从料槽来的精煤进入主管道后，少部分煤流就流人旁路管中。因精煤粒度小于 5mm，$M_t \approx 10.0\%$，且旁路管径不太大，使煤样能充实旁路管中不流出。这样就可利用 Am－241 低能 γ 射线(60keV)反散射原理检测灰分，经 3min 辐射后，启动振荡器让已检测过的煤样从旁路旁下方排到主管道中与主煤流汇合一起排出。同时每隔一定时间可自动打印出灰分。实践证明，这种反散射 γ 射线监测系统效果良好，满足了生产的要求。

旁路检测的另一例子是某大型选煤厂于 70 年代末随德国选煤机械设备一起引进的低能 γ 射线反散射测灰仪三套。其装置结构参见图 7－8－12，分别检测粒度不超过 30、15 和 0.5mm 的洗选煤，洗选煤的灰分约 10%，$M_t = 8\%$。该装置选用放射源强度较大约 300mm，且结构复杂，易堵煤，动态标定操作繁琐。

(二)电子质湮 γ 射线辐射法

(1)电子质湮 γ 射线辐射法检测灰分的基本原理与低能 γ 射线法不同，它是依据煤受到能量高于电子对生成阀 1.022MeV 的 γ 射线辐射时，就可能产生正负电子对，继则正电子和电子或离子发生碰撞，失去其大部分能量，失去能量的正电子又与电子碰撞、产生湮没辐射，正负电子消失，伴随着产生能量各为 0.511MeV 而方向相反的两个特征 γ 射线。我们就可利用电子对引起的正电子湮没辐射峰和康普顿反散射峰的强度来检测灰

分。正电子质湮 γ 射线既与体密度相关，又与物质的原子序数 Z 有关，而康普顿反散强度只与被测煤体密度有关。当光子能量超过电子对阀能(1.022MeV)时，康普顿反散射的几率可近似地认为正比于 $\sum Z_J / A_J$，电子对产生的几率正比于 $\sum_{w_J z_J} / A_J$，其中 Z_J、W_J 和 A_J 分别表征煤中第 J 个元素的原子质数，质量含量百分数和原子量。计算公式推导如下：

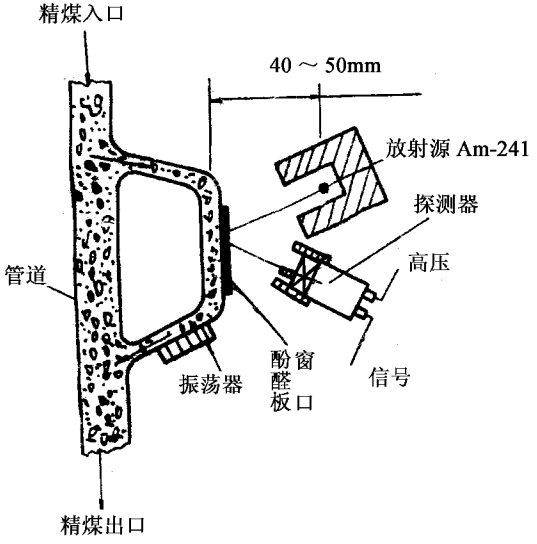


图 7－8－11　γ 反散射旁线检测灰分布置示意图

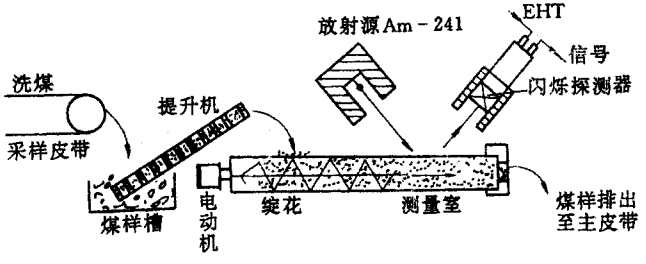


图 7－8－12　γ 反散射旁线检测灰分仪结构示意图

煤的质量衰减系数 μ_m 可用煤的有机质的质量衰减系数 μ_{cm}，矿物质的质量衰减系数 μ_{mm} 拟合。即

$$\mu_m = \mu_{cm} C_{cm} + \mu_{mm} C_{mm}$$

式中　C_{cm}、C_{mm} ——分别代表煤炭的有机质和矿物质的质量百分含量

对康普顿反散射效应：

$$\begin{aligned} dI_c / d_v &= dI_0 / d_v \times a \times \sum z_j / A_J \\ &= dI_0 / dv \times A \end{aligned} \qquad (7-8-12)$$

式中　A ——常数；

$\mathrm{d}I_c/d_v$——单位体积出射强度；

$\mathrm{d}I_0/d\mathrm{v}$——单位体积入射强度。

对应电子对效应：

$$\mathrm{d}I_e/\mathrm{d}v = \mathrm{d}I_0/\mathrm{d}v \times b \times (C_{mm} \cdot Z_{mm}^2/A_{mm} + C_{cm} \cdot Z_{cm}^2/A_{c,m}) \quad (7-8-13)$$

式中　b——常数；

$\mathrm{d}I_e/\mathrm{d}v$——单位体积出射强度；

$\mathrm{d}I_0/\mathrm{d}v$——单位体积入射强度。

今将式(7－8－12)代入式(7－8－13)中推得：

$$C_{mm} = [\mathrm{d}I_e/\mathrm{d}v \times A/b - \mathrm{d}I_e/\mathrm{d}v \times Z_{mm}^2/A_{cm}]/(Z_{mm}^2/A_{mm} - Z_{cm}/A_{cm}) \times \mathrm{d}I_e/\mathrm{d}v$$

上式中 Z(原子序数)、A(原子量)均为常数，故可简化为：

$$C_{mm} = (A \times I_e + BI_c)/I_c + C \quad (7-8-14)$$

式中　A、B 和 C 均为常数。

此式表明，只要测量正电子湮没产生的 γ 射线强度和康普顿效应产生的 γ 射线强度就可检测出煤中灰分，同时还能自动补偿堆密度变化的影响。这种测灰分仪用的反散射几何条件十分严格。为使康普顿反散射峰与正电子质湮辐射峰相分开，并使反散射 γ 射线的能量要低于 0.511MeV，则需反散射接收角度大于 100°，这样有利提高质湮辐射强度与康普顿反散射强度之比，图 7－8－13 为实验几何装置图。

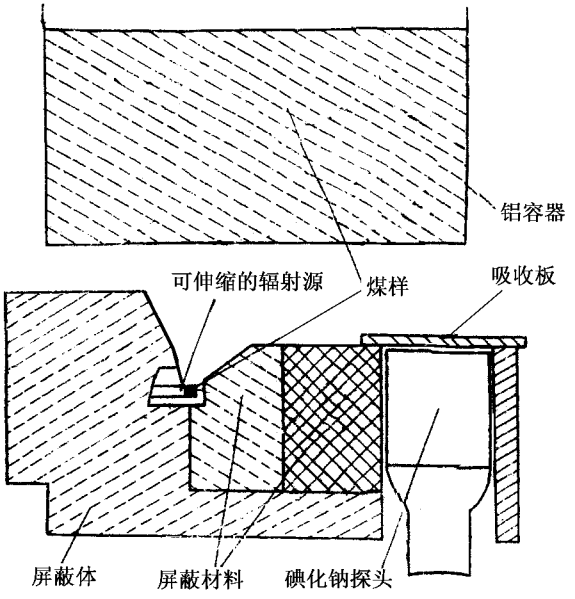


图 7－8－13　实验室几何装置图

(2)湮没辐射法检测灰分的旁路装置,一般采用 200mci Co－60γ 射线反散的方案。湮没辐射法有以下特点:

①对高 Z 元素如 Fe、Ca、Ti 等灵敏度低,因此它可适用于煤灰成分范围变化较大的情况下测灰分。

②对煤水分变化不灵敏,当水分变化小于 7%时,对灰分检测影响可忽略。

③使用的放射原能量高,可检测煤层较厚(30cm 左右)的煤灰分。

④测量是非接触式,不影响输煤系统的正常运行。

⑤检测时受煤样堆密度的影响可自行校正。

(3)应用实例。

对于燃用含 Fe 和 Ca 变化大的煤炭的火电厂或混煤比例变化大的火电厂,建议选用按电子对生成质湮的原理设计的旁线灰分检测系统,因为它对煤灰成分变化敏性比低能 γ 射线透射(或反散射)法低得多。图 7－8－14 为我国某核研灰分检测仪的结构示意图。该仪器采用 Co－60 放射源,源强为 200mcl,发出 γ 射线能量为 1.33MeV,高于产生电子对的阀能 1.022MeV。放射源置于可伸缩的螺杆上,可依据使用需要调节,便于屏蔽。康普顿反蔽射角大于 120°,这样可使得 1.33MeV 的 γ 射线康普顿反散射能量小于 0.27MeV。检测时煤样置于铝(或塑料)容器桶中,桶的直径为不少于 300mm 煤样量约 40kg。每次检测量煤样需辐射 5min 左右,用多道能谱仪测得能谱。用 Am—241(60keV)和 Cs—137(662keV)进行能量刻度。0.511MeV 质湮辐射峰的净计数(y)为感性区(475～569keV)的计数减去感性区(574～681keV)的计数的 1.2 倍,因子 1.2 是 0.511MeV 质湮辐射峰的本底斜率,康普顿计数为 170keV 以上的累积数 K。灰分 A 可通过下式得出:

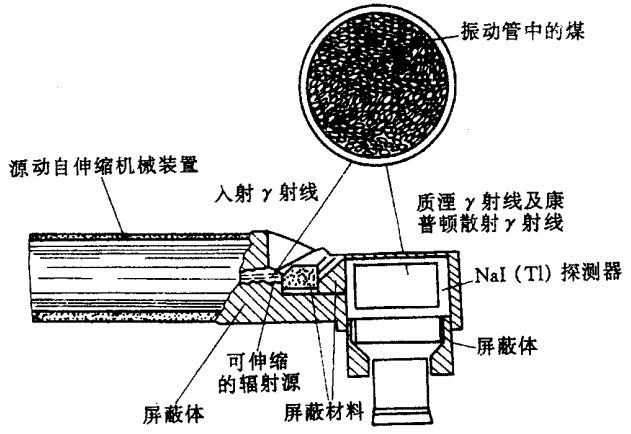


图 7－8－14　用电子对测灰仪对 ϕ360 桶内的煤样进行检测

$$A = ak + by + c \tag{7-8-15}$$

式中　a、b 和 c 为常数，可通过已知灰分的煤样标定义仪器而获得，而 k 和 y 值可实测未知灰分煤样时得到，这样就可通过式(7-8-15)获得的灰分。

在实验中，我们选择好 30 种不同矿区的煤，其灰分范围为 9% ~ 46%，煤样粒度小于 20mm。在用仪器检测的同时，缩分出部分煤样用燃烧法化验灰分(A_{ad})，而后进行对比。为便于比较 按灰分大小划分成 $>26\%$ 和 $\leqslant 26\%$ 两组并分别进行拟合。仪器法与燃烧法的试验结果列于表 7-8-3 和表 7-8-4，相对应的拟合曲线参见图 7-8-15 和图 7-8-16。

表 7-8-3　$A_d > 26\%$ 的试验结果

燃烧法 (%)	仪器法 (%)	误差 (%)
30.89	28.67	-2.22
40.48	39.18	-1.30
33.59	34.73	1.14
30.39	43.31	2.31
38.56	39.44	0.88
46.36	43.52	-2.84
27.27	26.09	-1.18
31.14	30.06	-1.08
34.48	36.02	1.54
38.71	29.60	0.89
44.44	45.78	1.34
35.43	34.45	-0.98
38.00	37.61	-0.39
36.34	36.89	0.55
28.50	29.07	0.57
32.85	33.09	0.24
27.52	26.69	-0.83

表 7-8-4　$A_d \leqslant 26\%$ 的试验结果

燃烧法 (%)	仪器法 (%)	误差 (%)
24.49	22.98	-1.51
23.77	22.47	-1.30
26.09	24.99	-1.10

燃烧法 (%)	仪器法 (%)	误差 (%)
13.06	15.29	2.23
9.43	10.38	0.95
18.36	17.79	-0.57
19.99	20.14	0.15
22.91	24.02	1.11
16.38	15.98	-0.40
14.83	16.09	1.26
13.82	11.13	-2.14
23.05	23.34	0.29
20.15	19.98	-0.17

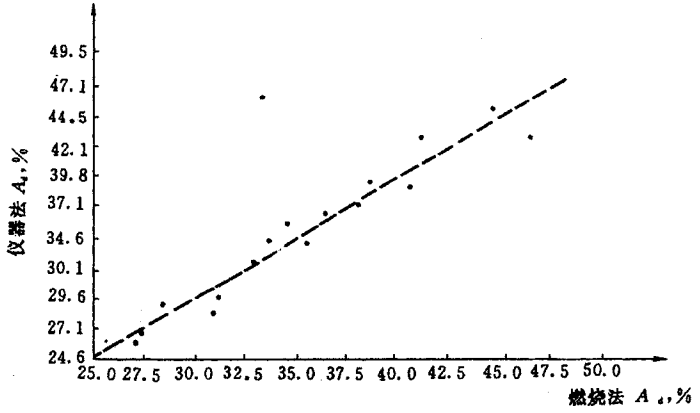


图 7－8－15　灰分大于 26%的煤的仪器法与燃烧法的比较

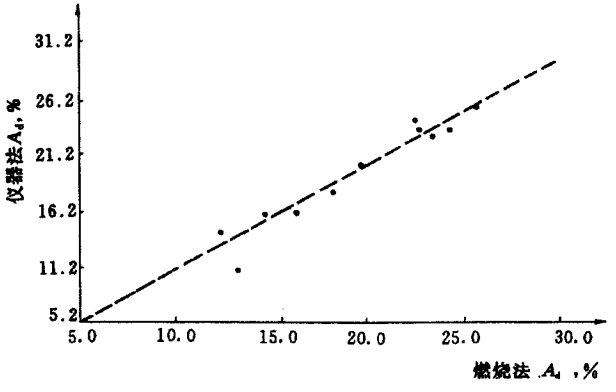


图 7－8－16　灰分小于 26%的煤的仪器法与燃烧法的比较

质湮辐射法受灰分变化影响相对于低能 γ 射线法(含双源)影响小,检测精密度比后者高出 1/2 左右。从对不同矿区 21 种含 $Fe_2O_3 > 10\%$ 的灶进行了双源 γ 射钱法与电子质湮辐射法的理论计算比较也充分证实了这一观点。因此,对燃用含 Fe_2O_3 高且波动范围大的燃煤应采用电子质湮辐射较好。但电子质湮辐射法也存在着不足之处。

①放射源 γ 射线强大,需要比低能 γ 射法更高要求的屏蔽保护。

②检测需要煤量多,且辐射时间较长。

③仪器设计相对比低能 γ 射线法仪器复杂得多,且台价也比它高出数倍。

(三)中子辐射 γ 射线法

(1)基本原理 :此法最近由美国 Gamma Metric 公司和澳大利来 MCI 公司相继推出的一种检测灰分的新方法。它同时可检测煤中从多成份(含间接计算)。其基本原理是:利用热中子和原子核之间的亚原子反应,当热化中子或慢化中子冲向煤样中各元素原子核附近时就被原子核吸收,此时原子核就成激发态(被活化),激发态原子核是极不稳定的,它立即又恢复到稳定态,并释放出表征该元素的特征 γ 射线,我们就可依据这一特征 γ 射线的强度来确定煤中各成分含量。整个演变过程参见图 7 – 8 – 17 示意图。煤样中主要元素经中子活化后释放出的 γ 射线能谱,参见图 7 – 8 – 18。

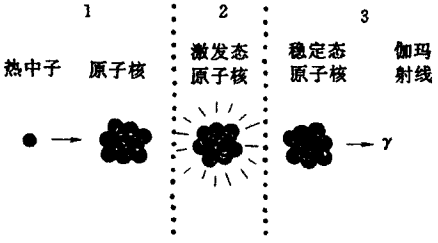


图 7 – 8 – 17　中子辐射物质产生 γ 射线过程示意图

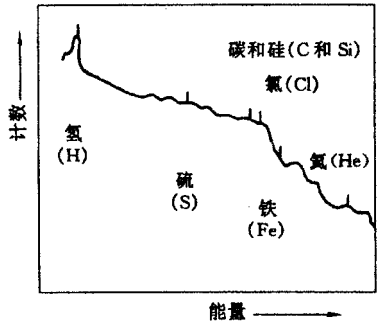


图 7 – 8 – 18　煤中某些元素中子活化后 γ 射线能谱示意图

图中表明各元素原子核子活化后发射出不同能量的 γ 射线，这种 γ 射线能量与元素本身的属性相关。因此可依据特征 γ 射线识别元素，再按 γ 射线峰高低检测出各元素在煤中所占的份额，同时，也可根据各元素与煤质间的相关性间接获得煤中某些成分和若干与成分相关性较好的物理特性如发热量、灰熔能和可磨性等。

(2)应用实例 我国某发电厂和某煤矿各安装一台中子辐射 γ 射线测灰仪。图 7－8－19 为该仪器检测的核心部分。它包括进料斗、方形槽、中子放射源装置，γ 射线检测装置、信号处理组件，重力式皮带排料机和封闭屏蔽外壳等。工作时，从机采装置采集的煤样，经过料斗进入方槽均匀向下移动，被中子源辐射产生亚原子反应，随后又立即发射出表征元素特征的 γ 射线，由辐射探测器闪烁光转换为相应的脉冲信号后，送入信号处理器，可计算获得：主要成分——硫分、灰分、水分和发热量；附带成分——碳、氢、氮、氯元素含量；灰分成分——硅、铝氧化物、氧化铁、氧化钙、氧化钾、氧化铁含量，此外，还有灰熔融性和可磨性等物理特性。

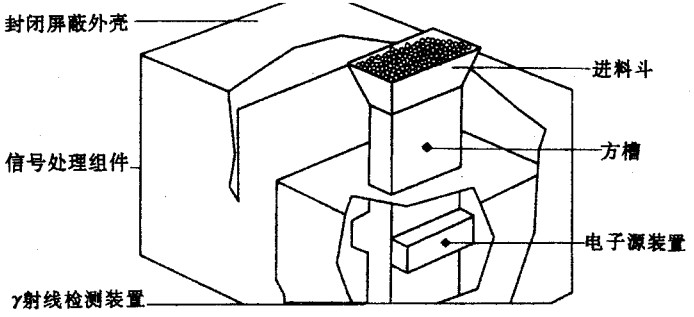


图 7－8－19　中子活化 γ 射线元素分析仪

(3)检测精密度，参见表 7－8－5。

表 7－8－5　中子辐射 γ 射线法检测元素的精密度

项　目	单　位	范　围	重复性	
			ASTM，STD	本分析仪
硫	W_t > 5%	0% ~ 2%	±0.05	±0.02
		> 2%	±0.10	
灰分	W_t > %	0% ~ 12%	±0.30	±0.24
		> 12%	±0.50	
水分	W_t > %	> 5%	±0.3	±0.10
热值	Btu/1b	不限	150	±31

项　目	单　位	范　围	重复性	
			ASTM,STD	本分析仪
CaO	W_t/%		±0.30	±0.18
SiO_1	W_t/%		±0.24	±0.16
Fe_2O_3	W_t/%		±0.15	±0.01
Al_2O_3	W_t/%		±0.30	±0.09
MgO	W_t/%		±0.24	±0.24

(四)天然 γ 射线辐射法

(1)基本原理:任何天然煤中都含有不同量的矿物质,而矿物质一般均含有微量的铀、钍和钾等元素,这些元素都具有极微弱的天然放射性强度。天然放射性强度取决于生成煤的周围岩层和地质历史。对于某地区或某矿区的岩层中所含的天然放射性元素的量的变化相对是很小的,天然放射性元素都伴有产生 γ 射线,但由其含量稀少,故放射性强度很低。利用天然放射性 γ 射线测定灰分,在美国、澳大利亚和新西兰,许多实验室都用这种方法测定灰分,其原理是依据 γ 射线与煤物质的作用,使其能量向低能方向聚集而形成低能峰,此峰的脉冲计数及其形状与煤中成分有关,即 γ 射线辐射不同煤后形成低能谱的谱峰的脉冲计数及其形状是不相同的。参见图 7－8－20。随着煤中元素原子序数的减小,能谱峰的峰位向低能方向移动,相对脉冲计数则升高,因此,有可能利用煤中矿物质含量和其中天然 γ 射线的能谱之间的相关性来实现煤灰分的在线检测,澳大利亚 MCI 公司有在线检测仪出售。近几年来,研究表明:灰分的线性方程主要由 K－40 放射性元素的 γ 射线强度和总的 γ 射线强度来决定。而钍和铀的 γ 射线强度及水分对灰分的影响很小。最近有资报导,煤中天然放射性强度(计数率)与灰分之间的相关性很差,且不存在普遍规律,因此仅能作为半定量测定灰分用的。

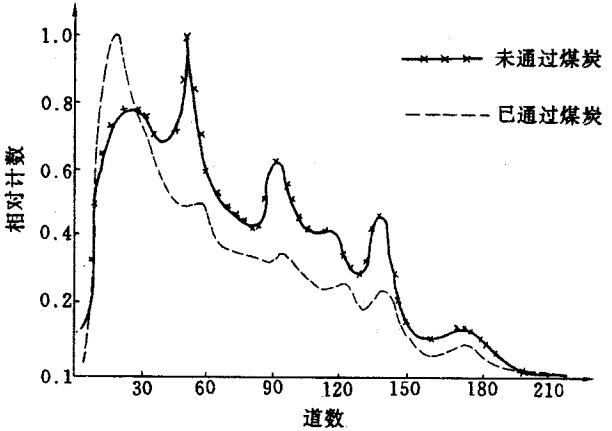


图 7－8－20　γ 射线前后煤通过的能谱曲线

(2)为实现利用煤中天然放射元素发射 γ 射线检测灰分,需要有一台便携式快速 γ 射线全能谱分析的能谱仪,该仪器的工作原理框图参见图 7－8－21,要精确检测灰分须具备下列两个条件：

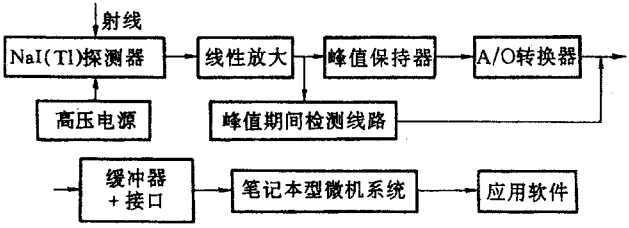


图 7－8－21　微机多道 γ 能谱仪原理框图

①必须有一台灵敏度很高的能谱仪。

②在检测过程中要绝对屏蔽周围环境中 γ 射线的影响(主要来自太空)。

(五)利用核技术检测灰分的影响因素

核技术检测煤中灰分属于物理测定方法,与其他物理测定方法一样会受到许多因素影响,既有煤本身属性有关因素,也有与测定环境条件有关的因素。今分述于下：

(1)煤中有机质的变化 煤中有机质成分的多少,对于同品种煤只简单地假设它与标定时煤中有机质成分按比例增减,这样使得煤的质量衰减系统是相同。实际上煤中有机质成分是十分复杂的,其中 C、H、N、O 各元素的相对比并不是固定值。若这个相对固定值在测定时与标定时相差大,则对测定结果影响就大。

(2)煤层厚度的变化 带式输送机送煤时,皮带上的煤层一般不是均匀的,尤其利用往复式给煤机给煤,煤层厚度变化尤大。另外,皮带本身单位面积的重量也不尽相同,通常皮带的标准厚度平均为 $14kg/cm^2$,这都会影响测定的精密度。下表就是皮带上煤层厚度引起的灰分误差：

表 7－8－6　皮带上煤层厚度变化引起灰分误差(%)

ΔA_d(%)　Δd(mm)煤层厚度变化 / D(mm)平均煤层厚度	0	10	20	30	40
100	0	－0.2	－0.7	－1.5	－2.8
150	0	－0.1	－0.5	－1.0	－1.8
200	0	－0.1	－0.3	－0.8	－1.3

(3)煤的堆密度：属于散状物料的煤炭在充填容器时，由于操作不同而各不相同，同一品种煤的粒级不同，即使操作相同，其堆密度也不尽相同。在这种情况下，γ 射线衰减程度也表现不一样，因而影响了测定的结果。

(4)辐射时间的长短：线性对数转换时，统计涨落效应导致的附加误差，存在着有时间 ΔT 的最小限值，每个时间间隔必须累积有起码的脉冲计数值才能保持最小的误差(统计误差)，在煤层厚度一定的情况下，对应于某一给定的计数的灰分的误差如下，它随着累积计数的增加而减少。

累积计数(脉冲数)	100	200	400	800
灰分误差(%)	+0.7	+0.26	+0.18	+0.09

(5)矿物质中铁含量的变化：铁的原子序数为 26 远大于一般灰分的平均原子序数 12，因此增加测定灰分的误差。据有关资料报导，当灰分为 8%时，若其中 Fe_2O_3，含量变化 0.4%时，则会产生 0.1%灰分误差。

(6)水分含量的变化：对同一品种煤水分含量每变化 1.7%，则会使灰分测定误差变化 0.1%。

(7)探测器的温度变化和控制柜中电气线路的温度变化等都会引起测定结果的变化。

(六)各种同位素测灰仪的比较

(1)单源 γ 射线透射法：单源透射法通常多选用低能的镅 Am－24、钚 Pu－239 或锎 Cf－258 作为放射源的，低能 γ 射线测灰灵敏度高，易于屏蔽防护，且结构较简单，但单源低能 γ 射线透射法对于被测煤层的质量厚度变化影响不能修正，因此一般只能用于粒度小、均匀性好且被测煤层厚度变化不大的在线检测或者粒度较大，均匀性较差但被测煤层厚度能保持一致的旁线检测。这种透射法在应用核技术检测灰分的最初阶段使用较广泛，但由于存在着上述的局限性，现在逐渐被双源透射法代替了。

(2)双源 γ 射对透射法：双能透射法是在单源透射法实践的基础上开展起来的。单源透射法应用于带式输送机上时，受皮带上质量厚度的变化影响大，故增加一个中能 γ 射线同位素如 Cs－137 或 Ba－133 给予修正，因中能 γ 射线的衰减与原子序数高低(灰分大小)无关，而与质量厚度有关。双源透射法目前较多应用于带式输送机上煤流的在线检测，收到很好的效果，特别是对于单一品种且粒度较小的煤。

(3)单源 γ 射线反散射法：单源反散射法所用放射源通常有低能如镅、钚、锎等和中能如钴、镭等两种。反散射法要求被测物料厚度大于 γ 射线饱和厚度，堆密度要保持与标定仪器时相一致，. 被测煤层表面要均一平整等才能获得较好的结果。在同样放射源

能量强度下检测精度比透射法低,为了提高测定精密度、通常选用较大的源强,较长的时间。因此,它较适用于旁线检测,就当指出:利用 γ 射线能量大于阀能 1.022keV 盼放射源如 Co－60 时,不需象双源透射法那样另设一个放射源以消除质量厚度的影响。但屏蔽防护要求高,整机体积大,且现场安装地点的选择也较严格。

(4)天然 γ 射线法:天然 γ 射线辐射法,最近几年来有所发展,可用于带式输送机上的在线检测,据报导效果好。它的最大优点是:不用任何放射源,因此也就没有屏蔽防护的技术措施要求,避免了环境污染和可能引发,对人身不安全事故。但由于天然放射性物质含量很低,γ 射线强度很弱,因此需要灵敏度很高的探测器进行检测。应用于天然性 γ 射线检测煤中灰分时要有两个前提,一是产煤地区的岩层中的放射性强度要基本稳定,二是要有特殊的屏蔽措施以阻绝宇宙太空来的 γ 射线的影响,否则,不易测准。因此它只适用—于半定量测定。

几种在线测灰技术性能指标如下表所示。

表 7－8－7　几种在线测灰仪技术性能的比较

项　　目	双能源 γ 射线透射法	60keV 射线散射法	电子对法	天然辐射法
应用方式	传送带上在线	传送带上在线	旁线	传送带上在线
要求煤层厚度(cm)	5～30	>10 或 15	30(固定值)	>5
是否需对传送带	否	稍加调整	否	应调整
上煤层进行调整测定时间	<10s	10s	5min	1min
典型精度(W_t%)：	0.3～0.5	1	0.2～0.35	0.4～0.5
低灰分煤(<10%)				
高灰分煤(10%～30%)	0.7～1.5	1～2	0.3～0.7	12

(七)仪器标定法

仪器标定法也叫仪器刻度。任何核技术仪器检测灰分都是相对值的,因此要用实物进行标定。仪器标定要坚持一个原则:标定条件与检测条件要完全相同,即在什么条件下使用,就在什么条件下标定:反之,在什么条件下标定,也只限于在其相同条件使用。由于仪器使用的场合不同,仪器标定可分为实验室标定和现场(在线、旁线)标定,前者标定受其客观影响相对少些,故其标定精密度通常要较后者高,但实用性不如后者。今将 γ 射线测灰仪的现场标定步骤分述如下:

(1)在带式输送机运行正常的情况下,于皮带上的煤流的中心,每 30 秒采取一个子样,假设煤流横断面的煤质量基本相同,连续采取 20min,共取 40 个子样。将奇数次采取的子样 1、3、5…、37、39 放入容器 A 中,偶数次采取的子样 2、4、6…、40 放入容器 B 中。这样,每个容器内务有 20 个子样,并分别记作煤样 A 和煤样 B。。(2)在采取煤样 A 和煤样 B 的同时,每 30 秒记一次仪器显示的灰分值,共计 4 个灰分值。

(3)将煤样 A 和煤样 B 用二分器,分为 A_1、A_2 和 B_1、B_2 四个样品,然后分别按 GB474 方法制备成 0.2mm 粒度的分析样品。

(4)将 A_1、A_2、B_1、和 B_2 样品各测定其 M_{ad}、A_{ad},并换算成 A_d。当四个样品测定结果的极差不超过 0.5%时,则算出其平均值,记作 $\overline{A}_L$。否则,应重新采样。采样时要增加子样数。

(5)将相应 20min 内仪器的灰分读数值(40 个)算出其平均值,记作 $\overline{A}_L$。

(6)将得到的 A_L 和相应的 A_I 在坐标纸上组成数点,当数据坐标点达到 30 ~ 60 个时,就可进行回归。由此可得到回归方程:

$$a = \overline{A}_L - b\overline{A}_I \qquad (7-8-16)$$

$$b = [n\sum A_L \cdot A_I - \sum A_L \cdot \sum A_I]/[n\sum A_I^2 - (\sum A_I)^2] \qquad (7-8-17)$$

b 值求出后可代入式(7-8-16)可得出 a 值。

式中　$\overline{A}_L$——燃烧法测得灰分的平均值,%;

$\overline{A}_I$——仪器法显示灰分的平均值,%。。

将求出的 a、b 代入燃烧法与仪器法相关的线性方程,就可得到灰分的回归方程式,按此公式由 A_I 计算出的 A_L 值最为准确。

示例:

表 7-8-8　灰分仪标定试验结果(A_d%)

序号	A_L% (燃烧法)	A_I% (仪器法)	ΔA_d% ($A_I - A_L$ 差值)
1	25.16	28.50	-0.64
2	28.27	27.00	-1.27
3	24.46	25.01	0.55
4	24.42	23.40	-1.02
5	25.58	27.61	2.03
6	28.35	26.95	1.31
7	28.27	29.58	1.31

序号	A_L% (燃烧法)	A_I% (仪器法)	ΔA_d% ($A_I - A_L$ 差值)
8	27.21	26,00	-1.21
9	26.66	24.95	-1.71
10	28.59	29.08	0.49
11	26.91	27.50	0.59
12	22.50	21.60	-0.90
13	22.85	21.05	-1.80
14	27.19	27.85	0.66
15	17.85	16.95	-0.90
16	21.74	23.00	1.26
17	27.84	28.50	0.71
18	23.75	22.60	-1.15
19	23.75	22.60	-1.15
20	22.17	23.10	0.98
	$A_L = 25.176$		
	$A_I = 25.006$		
	$n = 20$		
	$r = 0.9304$		

下面是某发电厂按照上述仪器标走操作要求进行试验的，在读取仪器（FJ－2821 灰分仪）的同时，由安装在带式输送机上的机采装置采样，共采 20 个煤样，分别制备和化验（燃燃法），其化验结果和相应的仪器读取的平均值示于表 7－8－8。

依据表中燃烧法与仪器法试验结果先计算出 $A_L = 25.176$，$A_I = 25.006$

然后，按式（7－8－17）计算出斜率 b 值

$$b = 0.8280$$

b 值代入式（7－8－16），可得 $a = 4.740$。

第二节　水分的微波检测技术

一、概述

水分是燃煤质量的重要参数之一，既影响煤的质量，也涉及煤的数量。因此，它是入

厂煤验收、计价和入炉煤耗计算的必不可少的检测项目。实验室通常采用加热干燥法，这种方法测定时间长，但准确可靠，常被作为物理方法检测水分的参比法。用于燃煤在线检测水分较常见的有电容法和微波法两种。后者较前者相对抗干扰能力强、稳定性好，检测速度快，同时还具有不接触、不破坏被测煤样的优点，所以近年来被广泛应用在线实时检测，收到很好的效果。电力能源的发展，促使了微波检测水分技术的进步，例如采用多频微波技术和抑制微波多次反射产生的谐振现象，应用 Cs 放射源补偿了由于煤层厚度和堆密度的影响，特别是采用微波衰减和相移相结合设计的微波法，检测性能大为提高，它不受煤粒度和湿度变化的影响，提高了检测精密度，天津某煤建厂曾应用微波仪于带式输送机上监测煤蜂窝混合原料的水分；某两个火电厂也于 1994 年末从德国柏托公司引进了在线微波测水仪，据了解使用情况较好。至于应用微波技术检测散装物料如泥沙、水泥、粮食和棉花等的水分就更普遍了。此外，在火电厂还采用微波技术检测管道中煤粉水分，飞灰中含碳量等。特别是后者，使用电厂多，效果也较显著。

现在我国某些研究部门，高等院校正开发研制检测煤中水分的专用微波仪，不日即将问市。

利用微波包括纳米微波技术检测煤质有关参数，这是一个新开拓的领域，预计其发展前景是十分广阔的。

二、应用微波技术的基础知识

微波：微波是频率很高、波长很短的一种波。通常认为波长从 1m 至 1mm（即频率 300MHz～300GHz）。

波长按波段划分可分为分米波（波长范围 100～10cm、频率范围 300～3000MHz）；厘米波（波长范围 10～1cm，频率范围 3～30GHz）；毫米波（波长 10～1mm，频率范围 30～300GHz）；亚毫米波（波长范围 1～0.75mm，频率范围 300～400GHz）。

辐射：发生电磁波的过程。

天线：用来辐射电磁波的物体，所以也叫辐射体，通常作成喇叭形。

衰减器：它是一种由纯电阻组成的具有衰减作用的四端网络，用于调节信号大小，进行阻抗匹配以及实现阻抗缓冲等。

滤波器：它是一种具有频率选择性的四端网络，其作用是允许需要的频率范围通过，而不允许不需要的频率通过。

衰减均衡器：它的作用是用来校正传输系统对信号产生的幅度畸变。

波导管：它实际上是一种由紫铜或黄铜良导体制成的空心导管。通常为矩形，其作

用是用来输送厘米波或微米波。它的优点是减少集肤效应所产生的热损耗、避免电磁能量的辐射损失和有利于均匀传输。

喇叭天线：为使波导管与自由空间的特性相匹配，通常将波导尺寸逐渐均匀扩展形成所谓喇叭天线。

微波的传播：微波也是一种电磁波。所谓电磁波是指传播着的变化电磁场，即变化的磁场与电场互相激发闭开磁力线与电力线象链条那样一环套一环，彼此交替，由近及远向外传播从而形成电磁波。

微波频率源：它的作用就是产生具有一定的频率和能量的微波信号。

隔音器：隔音器的作用是为防止负载对频率源产生的影响。

可变衰减器：它的作用是为控制输出微波能量的大小。

传感器：它是用来发射或接收微波能量。

受测煤流皮带(或容器)：它是用来输送被测煤流或装盛被测煤样，所用材料必须保证对微波传输影响最小。

检波器：它的作用是将交变的微波信号变为慢变的直流信号。

电子线路(指微波系统)：它的作用是把测得的随水分含量变化的信号幅值进行统计平均并与标准水分曲线进行比较，而后显示或打印机输出所得到的物料水分值。

相移器：它的作用是改变波在传播途中的相位，以调整基准支路和检测支路的信号的相位相一致。

双 T 器：它的作用是把一路信号分为同相位且等幅的两路信号，也可以将两路信号按矢量关系进行迭加输出一个合成的微波信号。

环行器：顾名思义，它的作用是微波信号在其中的运行是一环行线路。

三、微波技术检测物料水分的方法

煤炭是一种不良导体，其介电常数(ε)大致在 2～3 的范围内，随着煤的变质程度而各不相同，而水的介电常数却高达 80 左右。因此，当煤中含有水分时，其煤的介电常数发生很大的变化。通常按水在煤中的赋存状态分为三种：一是存在于煤的外表面及其裂缝间的水分通常叫做表面水分或自由水分；二是与其他矿物质相结合形成含水化合物称为结晶水；再者就是存在于煤中细微毛细管中的水分，由于这种水分子具有双极性，极易被煤中的最活跃的中心——固体饱和配位的原子所吸附而成为物质分子内的部分叫做内在水，但这种水与煤结合脆弱，很容易受到微波作用而被检测到。表面水分和内在水分之和俗称为全水分。从理论上讲，微波检测的水分，只包括表面水和内在水而不包括

结晶水，因为它和冰一样受微波照射后，其中水分子不能按照介电场结构发生旋转，因而也就不会产生微波能量的衰减或相位移现象：

从上面，分析可得出：

(1)干煤掺水后，其介电常数发生变化。同品种煤含水分不同，其介电常数也有所不同。

(2)当微波照射含有不同水分的煤时，其输送的能量和相位，随之发生变化、含水分愈多，则其变化愈大。

这就是说微波有一种特性，在传输过程中遇到任何介质都要产生(电磁)场能量的衰减，即任何介质对微波电磁场能量都有吸收。微波能量的吸收(衰减)值，可按下式计算：

$$L = 8.686\beta_B M\rho Kl + |r| \qquad (7-8-18)$$

式中　L——微波能量的衰减值，dB；

$|r|$——空气一煤炭间界面成反射系数的膜；

β_B——水的衰减常数；

M——煤炭含水量；

ρ——含水煤炭的密度；

K——煤炭结构的经验常数。

对于某已确定的煤炭和微波测水仪来说，空气—煤炭间界面反散射系数的膜，水的衰减常数，含水煤炭的密度和煤炭结构常数等均可视为不变，且在煤炭含水分范围变化不太大的情况下，上式可写成：

$$L = km\rho l$$

$$k = 8.686\beta_B K \qquad (7-8-19)$$

从式(7-8-19)看出，微波能量的衰减不仅与煤炭含水量多少相关，而且还与煤炭的密度和厚度有关。因此，在线微波测水仪需采用宽带的不同频率的微波，一则可抑制多次反射的引起的谐振干扰现象，二则可利用附加的辐射吸收测量以补偿由于被测煤炭层厚度和堆密度的变化而引起的误差。从而提高了测定水分的精密度。

四、各种微波测水方法比较

利用微波技术测定水分大致分为能量衰减(吸收)法、相移法、反散射法和谐振法以及由这些方法之间的组合如衰减——相位法、衰减反散射法等，今将前三种方法分述如下：

(一)衰减(吸收)法

衰减法测水系统的主要构成，参见图 7-8-22 方框图，由微波频率源产生的微波能

量经隔离器、衰减器传输到第一个传感器——发射天线上，而后经过被测的煤炭后，被第二个传感器——接收天线接收并输送检波器，检波器将微波能量转变为直流信号送入电子线路，经过统计运行之后将检测的结果输出到显示器和打印机。这种方法灵敏度高，测定误差小，测水范围大（理论上可测从 0% ~ 100% 的含水量），技术上易于实现，常用 3cm 波长的微波器件，价格适中，并有一套完善的检测仪器对系统各项指标进行测定，同时适合于衰减法的传感器种类繁多，可满足各种水分仪测量的需要。因此成为应用最广的传统微波测水方法，世界上约有 80% 的微波水分仪都是依据衰减法原理设计生产的。但是衰减法的检测结果受煤炭粒度、温度影响很大，对含不同水分的煤炭，微波能量的衰减与煤炭温度的关系没有明显规律性。因此给准确测定水分带来了困难。

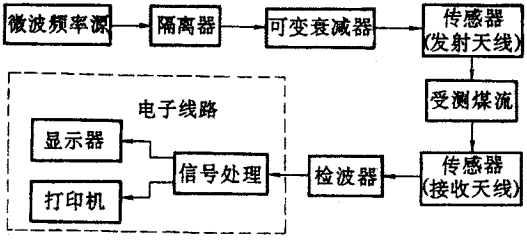


图 7 - 8 - 22　衰减法检测物料水分系统方框图

（二）相移法

微波相移法测定水分是在衰减法基础上发展起来的。它的优点是煤炭温度对相位移的影响很少，因而大大地简化了测量中的温度校正曲线。相移法对煤炭水溶液中的含盐量的浓度不敏感，与煤炭的导电性和颗粒大小基本无关。只要解决相位移的精确测量问题，在大多数情况下都可得到高精密度的测量结果。该方法也存在如下的不足之处。

（1）为获相位移的精确测量，微波振荡源的频率的稳定性要求很高，而且相位计的精密度也必须相应提高，这就增加了设计、制造的难度。

（2）测定中容易出现多相位性，若无正确的判断或相位变化范围的限制，就会得出煤炭含水量或高或低的错误结论。

（3）相移法的检测水分系统比衰减法复杂得多，因而提高了相移法水分成的台价。

近几年来，随着微波技术的迅速发展，上述诸多不足之处逐步得到了克服。

图 7 - 8 - 23 为相位法测水装置的系统方框图。图 7 - 8 - 23 中的电子线路部分和上述衰减法完全相同，但微波部分却有很大的差异。微波频率源发出固定频率的微波，相继经隔离器和衰减器到双 T_1 后分为两路，一路被称为基准支路，它包括可变衰减器和精密相移器；另一路称为检测支路包括有传感器 1（发射天线）和受测煤流皮带，当皮带上

无物料时，调节基准支路的衰减器和相移器，使到达双 T_2 的两路信号合成为零；当皮带上有物料时，随着物料中含水量的不同，检测支路中信号将产生不同的相移，在双 T_2 的两路信号合成为零；当皮带上有物料时，随着物料中含水量的不同，检测支路中信号将产生不同的相移，在双 T_2 中与基准支路信号合成，遂产生随物料水分而变化的微波信号，经检波后到计算机进行数字处理。由终端输出水分数据。

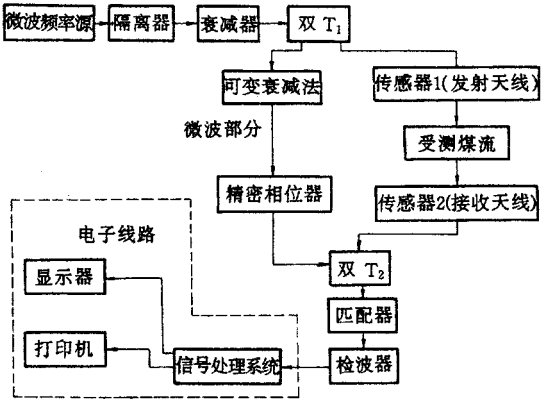


图 7－8－23　相位法检测物料水分系统方框图

（三）反射法

反射法系利用不同水分的煤炭对射入的微波能量有不同的反射值为依据来进行物料含水量的测定。图 7－8－24 为反射法装置的系统方框图。它的优点是同一方向布置微波发射天线和微波接收天线，也可借助于环形器只用一只天线实现微波能量的发射和接收。这可大大地简化水分仪的结构，其缺点是测定低水分煤炭时精密度低，因此该法使用范围局限性较大。

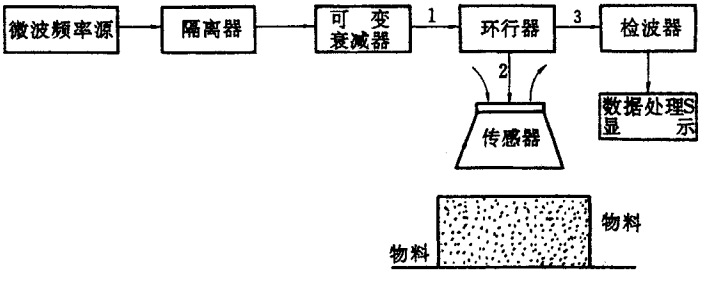


图 7－8－24　反射法检测物料水分系统方框图

此测水装置的系统较简单。由微波频率源产生的微波经隔离器和可变衰减器后，从

环行器射入天线，经受测物料反射的微波（能量）被同一天线接收后经过环行器送到检波器，最后经微机处理显示、打印出物料含水量的百分数。需要说明的是环行器的作用，顾名思义，信号在其中的运行是一个环行线路，即由 1 端口入，2 端口出；2 端口入，3 端口出。

五、应用实例

微波技术应用于煤炭水分的测定起始于 60～70 年代，并已有多种产品供应市场。今介绍国内已有的两种微波水分仪的情况。

（一）LB345 微波水分仪

它是德国 Berthod 公司生产的，在我国某两个发电厂各安一台以监测燃煤水分。

（1）测定基本原理：基于宽频带微波透射含有水分的燃煤后，微波能量发生衰减和相位迁移变化，其衰减和相位移的大小与水分含量多少成比例，可用下式表达：

$$M = A \cdot \phi / \rho d + B \cdot D / \rho d \qquad (7-8-20)$$

式中　M——燃煤中含水量，%；

ϕ——相位迁移；

ρ——燃煤堆密度；

d——燃煤层厚度；

A、B——常数；

D——微波能量衰减。

（2）仪器结构：该水分仪主要由含有微处理控制的主机、微波发射、接收天线、Cs－137 放射源及其屏蔽体、闪烁探测器等组成（参见图 7－8－25）。

（3）应用范围：它可应用于入炉煤或入厂煤的在线水分监测，若燃煤的均匀性很差，特别在皮带横向上，可以采用 2～3 组微波传感器和 2～3 组的 γ 射线来进行测定和补偿，以提高测定精密度。

（4）仪器特点：

①稳定性好：对组分复杂的煤炭具有长期稳定性，因为微波测水仪的稳定性，在某种意义上讲要比精密度更为重要。

②由于采用了微波衰减与相位移相结合的原理进行测定水分，所以具有较高的精密度。

③采用了非接触式测定方式，排除了由于传感器与煤炭接触带来的问题。

④采用了 Cs－137 放射源 γ 射线透射被测煤炭层，借以补偿由于煤炭厚度和堆密度

带来的影响。

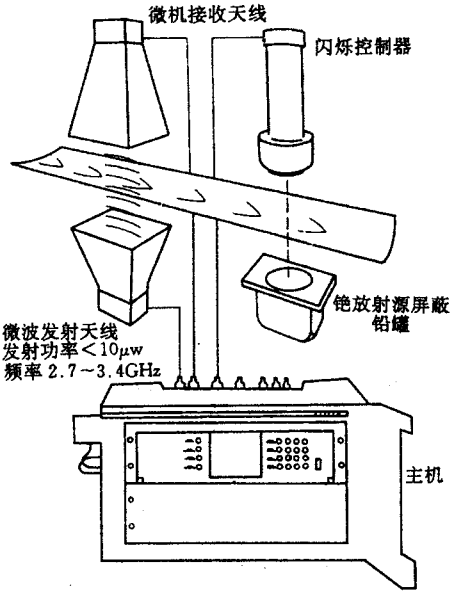


图 7－8－25　微波法测定水分系统示意图

5)测定水分范围广 对煤炭可达到单位面积水分质量 $5g/cm^2$,但必须是没有或略有导电性的。

6)水分测定精密度 在通常测定的情况下精密(单位$\%H_2O$)可根据下式估算：

(5)测定精密度($\%H_2O$) = 0.1 + 1/单位面积水分质量(g/cm^2)

例如对煤粉可达到 $\pm 0.2\%H_2O$,对焦碳可达到 $\pm 0.3\%H_2O$。

(二)MCU－1 型微波(原煤)水分仪

该微波水分仪是某电力设备厂制造的,可用于输煤皮带上原煤的水分实时监测。它的测定基本原理：

(1)微波水分仪系统采用微波衰减——反散射法的原理设计的。当微波射入含有水分的平整物料表面时,水分变化引起介质特性的变化远比干态物料大,且某介质的变化与水分含量相关。利用这一相关性就可以测定物料中的水分。

(2)仪器结构 水分仪包括有主机(由有微波控制器等)、微波发射天线、微波接收天线和煤整形机构等。当微波照射煤炭时,微波控制器将检测到煤样的水分变化转换成电压信号的变化,经放大后,再经 A/D 变换器输入到数据处理单元,最终显示出煤炭中的水分含量。

(3)应用范围 此种水分仪可用作在线监测煤的水分。因采用微波反射方式测定水

分,故其受测煤表面要保持平整,以提高测定的精密度。

(4)仪器特点:

①由于采用微波衰减——反射方式测定水分,故可适用于受测煤层厚的水分的测定。

②设计有煤整形机构,可使受测煤表面保持一致。

③可自动计算 8h、16h、24h 水分的平均值,并能显示其变化曲线。

(5)测定水分范围:3%~20%。

(6)测定精密度:

水分		精密度
	3%~8%	≤0.5%
	8%~14%	≤0.8%
	14%~20%	≤1.0%

此外,微波水分仪还可用于离线(实验室)快速测定水分,例如:

西安某学院研制的 SWD—B 智能快速测水仪,该仪器系统用微波透射衰减原理,测定煤中水分的。首先将煤样与无水乙醇混合萃取,最后测定萃取液中的水分。测定水分范围 0.3%~30%,绝对误差为 0.5%。

某大学和某分析仪器厂共同研制的 WB 一 2 型数字式水分快速测定仪。该仪器也是采用微波透射衰减测定原理进行设计的。测定时只将装有粒度≤5mm 煤样的塑料杯置于微波发射天线与微波接收天线之间,就可测出煤样中水分含量。测定水分范围:对精煤为 5%~16%,对煤泥为 25%~30%。测定精密度不会优于 1%。

六、应用微波测水要注意的问题

微波检测水分时要注意下列问题:

(1)堆密度。对同一品种而含水分相同的煤,密度大的对微波的衰减要比密度小的大,因此,在检测中要求密度要保持一致。

(2)煤层距离。被测煤样层在发射天线和接收天线之间的距离要保持固定,且煤样表面要平整规范,且保持一致。

(3)煤样容器材质。煤样容器要采用非金属材质,如工程塑料、玻璃钢等,不可采用金属材质。

(4)频率源。微波频率源性能要稳定,它是影响检测结果的主要原因之一。

(5)电源稳压。用于微波仪的电源必须保持高度稳压,否则,检测结果会发生严重波动。

(6)水分极限值。任何煤炭都含有不同数量的矿物质,当水分增加到一定时,有可能产生电导性,导致水分继续增加而微波能量不再衰减,即任一品种煤用微波衰减法检测水分时都有一个极限值,这一极限值大约在水分 14%。在这极限值以上,即使水分增加很多,相应的微波衰减值增加极少或不再增加。同时还存在一个水分极小值,这个极小值约在水分 2% ~ 3%,低于极小值就测不出来了。

最后介绍一种核技术和微波技术联合的在线检测系统,参见图 7 - 8 - 26。它能连续检测灰分水分,同时还可提供相应发热量。

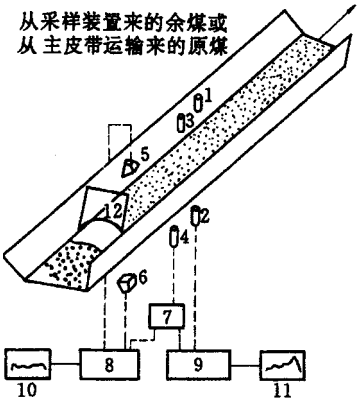


图 7 - 8 - 26　在线监测灰分、水分的分析系统

1—Am - 241 放射源;2—Am - 241 射线探测器;3—Cs - 137 放射源;
4—Cs - 137 γ 射线探测器;5—微波发射天线;6—微波接线天线;7—厚度和堆密度信号处理;
8—水分含量信号处理;9—灰分产率信号处理;10—水分 M_t% ;11—灰分 A%,12—整形装置

第九章　动力煤优质化范例分析

第一节　电厂燃用洗选煤代替原煤双方受益

山东黄台发电厂采用西山原煤经太原选煤厂选后的优质动力煤代替原设计的西山原煤取得良好效果，使双方受益，社会和环境效益均佳。

该电厂 7 号炉系日本三菱重工长崎造船生产的三菱 CE 辐射再热强制循环锅炉，最大蒸发量为 1025t/h，配 30 万 kW 汽轮发电机组。制粉设备采用 5 台 RP863 中速磨煤机。原设计煤种为 30% 的山东淄博埠村矿原煤和 70% 的西山原煤，低位发热量为 5026kJ/kg，年耗煤量为 111.6 万 t（按年运行 8000h 计算）。试运行阶段，由于受煤场和配煤条件的限制，改烧西山原煤。由于煤质差带来了一系列问题：

(1)锅炉燃烧不稳定，常灭火，常借助喷烧原油助燃，油耗增加。由于煤质差，造成锅炉灭火，次数不断上升，1991 年 6 次；1993 年 3 次；1994 年 10 次；1995 年 1～6 月 6 次。燃料油消耗量 1990 年为 3273t；1991 年为 2370t；1992 年为 1289t；1993 年为 1956t，1994 年为 5073t。

(2)矸石量大，造成磨煤机部件磨损加快。其中刮板和衬板使用寿命缩短一半，制粉系统维护工作量增加，维护费用高达 92 万元/a。

(3)煤质差，降低机组负荷，1995 年 1～6 月少发电 5875.9 万 kW·h。

(4)由于煤质差，炉膛出口各受热面的磨损速度增加 2 倍，寿命缩短；除尘设备运行不稳电耗增加，严重威胁锅炉安全运行。

为了扭转被动局面电厂与太原选煤厂协商，改西山原煤为洗后优质动力煤。为此太原选煤厂对原洗选工艺流程进行了改造。原煤在入洗前经过筛孔为 3mm 的筛子筛分后，大于 3mm 粒级，进入跳汰机洗选，选后精煤灰分控制在 10.5% ~ 11%，水分控制在 10%以下，与小于 3mm 的粉煤混合，使优质动力煤灰分控制在 14%左右，水分 8%，硫分 1%左右。西山太原选煤厂每吨原煤可获得利润约 8.72 元。每年供应山东黄台发电厂 7 号机组约 80 万 t 优质动力煤，折合原煤约 100 万 t，年经济效益约 872 万元。

电厂得到的好处有：

(1) 采用优质动力煤后，由于煤炭质量提高，由 $Q_{net,ar}$ = 21.087MJ/kg 提高到 26955kJ/kg，年用煤量由 97.8663 万 t，减至 79.3541 万 t，减少煤量 18.5122 万 t，节约车辆 3085，减少了运输费用。

(2) 由于煤质提高，风机和制粉电耗减少，一年可节约自用电 352 万 kW·h。

(3) 电厂每年可以少排灰渣 18.0043 万 t。

(4) 原来必须开 5 台磨煤机，现在只开 4 台就够用了，提高了设备运行安全性。设备负荷增加了，一年可多发电 1 亿多 kW·h。

(5) 设备磨损减少，设备维护费用由原来 92 万元/a，降低到 30 万元/a。节省了 62 万元/a。

(6) 由于煤质提高，炉内燃烧稳定，不用喷油助燃，一年可以节省原油 5073t。

由于原煤硫分为 2.11%，洗后优质动力煤硫分为 1.15%，每年电厂少排二氧化硫为 $2(978\ 663 \times 2.11\% - 793541 \times 1.15\%) = 23048.2$t。

据估计，治理 1t 二氧化硫需 1500 元，国家一年少支出治理费用 3456.75 万元。

电厂虽然由于使用优质动力煤而每年多支付燃料费用 2870 万元，但它得到的经济效益在抵消此费用后仍有几千万元的入账。所以使用洗后优质动力煤，煤矿、电厂和国家均受益。

第二节　动力煤选煤厂满足不同用户需求

动力煤选煤厂一般都采用筛选、洗选生产出不同规格、不同品种的煤炭产品，以满足不同用户的不同用途。例如铁法晓明矿选煤厂采用比较简单的工艺流程，生产 7 ~ 8 个品种、规格的煤炭产品。其中，选大块，粒度 + 50mm，供民用 混块，粒度 - 50 + 20mm，供

铁路机车或民用 混煤,50 ~ 0mm,供电厂 ;末煤,6 ~ 0mm,供电厂 ;干粒煤 13 ~ 6mm,供电厂 洗中块,50 ~ 20nun,供鞍钢、本钢、辽源化工厂 洗粒煤,13 ~ 6mm,供鞍钢、本钢 洗末煤,6 ~ 0mm,供水泥厂,供应产品的质量和数量见表 7 – 9 – 1。

表 7 – 9 – 1　铁法晓明矿选煤厂产品质量

品种	粒度 /mm	数量 /万 t	产率 /%	灰分 /%	水分 /%	发热量 (MJ.kg^{-1})	硫分/%	限下率 /%
原煤	50 ~ 0	141.28	100.00					
商品煤	50 ~ 0	121.24	85.82	30.53				
洗中块	50 ~ 20	24.23	1	19.65	10.7	11.4	0.45	22.09
洗粒煤	13 ~ 6	1.61		20.42	13.0	21.13	0.46	20.00
洗末煤	6 ~ 0	1.50		19.32	20.9	19.35	0.36	—
干粒煤	13 ~ 6	41.11		33.22	10.8	17.86	0.39	22.7
干末	6 ~ 0	31.56		34.36	11.8	17.27	0.38	—
混煤	50 ~ 0	20.21		33.93	10.9	17.61	0.48	—
混块	50 ~ 20	0.23		33.35	10.5	18.41	0.43	10.2
大块	+ 50	0.79		26.59	9.7	19.64	0.43	8.9

该厂入洗晓明矿的长焰煤,设计入洗能力 135 万 t/a,1997 年 1 ~ 10 月入洗原煤 141 万 t,产出商品煤 121 万 t,利润 6080 万元。

第三节　白杨河电厂燃用水煤浆替代重油

华能白杨河电厂总装机容量为 300 × 5000 万 kW,三台机组均按照燃用淄博贫煤设计,但投产后不久即改为燃油发电。1985 年以后由于油价不断上涨,依靠燃油发电前景暗淡,国家也出台了一系列压缩燃油的政策,并决定选择一个电厂进行水煤浆代油试验。因此,白杨河电厂 3 号炉改烧水煤浆工程初步设计于 1992 年得到国务院煤代油办公室

批复,同时也被列入国家‘八五’科技攻关计划。

1995 年完成 3 号锅炉改烧水煤浆专用系统土建、设备安装及锅炉本体改造,并对 3 号锅炉燃用‘八一’浆厂水煤浆进行了各种详细的试验。1999 年 6 月通过由国家电力公司主持的国家级科技成果鉴定。

在水煤浆燃用技术顺利通过鉴定的基础上,为进一步降低发电成本,华能白杨河电厂进行了 1 号炉水煤浆技改工程,2000 年 1 月 27 日 1 号机组投浆、接带负荷一次成功。白杨河电力实业总公司年产 15 万 t 的水煤浆厂一期工程于 1999 年 9 月中旬投产运营;年产 30 万 t 水煤浆的二期工程于 2000 年元月 20 日投产 2 条生产线;目前又扩建一条生产线,形成了年产 60 万 t 水煤浆的总生产能力,基本满足已改造的 3 × 230t/h 锅炉运行的需要,使华能白杨河电厂发展成为集水煤浆制备、燃烧为一体的系统示范基地。

白杨河水煤浆厂制浆的基本工艺流程为水煤浆厂主要分原煤储运及制浆两大分场,原料煤经缓冲仓下定量给料机通过胶带输送机送至反击式破碎机,然后由单螺旋输送机向磨浆机人料端送料,与此同时定量加入分散剂药液和适量的水,使磨浆机实现高浓度湿式制浆。磨浆机出料用单螺杆泵送至煤浆过滤器后,再用泵直接打入搅拌桶,同时定量加入稳定剂充分搅拌,入储浆罐。分散剂采用磺甲基化腐植酸木质素,稳定剂采用聚羧盐酸。

白杨河水煤浆厂自 1999 年 9 月投入生产至 2000 年 4 月底,已共生产煤浆 14.3 万 t,经华能白杨河电厂 1 号、3 号锅炉使用状况良好。白杨河水煤浆厂制备的水煤浆产品特性如下:

重量浓度:66% ± 1%

表观粘度:< 1000cp100s^{-1},20℃

灰分 A_d:< 11%

低位发热量 $Q_{net,ar}$:17.961MJ/kg

挥发份 V_{daf}:38.5%

煤浆粒径:最大粒径:3μm

平均粒径:50μm

200 目以下的 > 75%

煤浆比重:1.23

稳定期:30d

3 号炉经过一年多生产运行,证明改烧水煤浆是成功的。

(1)3 号炉燃用水煤浆时锅炉效率达到 90%以上。

(2)水煤浆燃烧效率达到98%以上。

(3)3号炉全部燃用水煤浆时,负荷在40%~100%(2~5万kW)区间内变动时,水煤浆均能稳定燃烧,且具有较强的调峰能力。

(4)燃用水煤浆的浓度在60%~68%范围内变化均能稳定燃烧。

(5)3号炉已可用水煤浆直接将负荷滑至1.5~1.7万kW,仍可在有稳定燃烧火焰时停炉。

(6)3号炉可在30%负荷(1.5万kW)燃油工况下(主汽温度380℃,主汽压力3.8MPa)即可切换到水煤浆系统。

1号锅炉水煤浆技改工程在设计、施工、调试等方面较3号炉做了进一步改进。2000年1月27日,1号锅炉水煤浆改造后,华能白杨河电厂进行了各种试验和测试,1号锅炉全燃浆带满负荷时,灰渣含碳量稳定在5%以内,飞灰含碳量稳定在10%,锅炉效率为91%,燃烧效率为99%,各项指标均优于3号锅炉。

白杨厂电厂3号锅炉燃用水煤浆投入商业运行以来,1999年全年燃浆16.3万吨,降低发电成本1490万元。

改烧水煤浆后经济分析主要指标见表7-9-2。经济分析主要指标

表7-9-2　经济分析主要指标

序号	名　　称	单位	数据
1	建设期	年	0.2
2	供电标煤耗	g/h·h	396
3	厂用电率	%	5.6
4	改造前单位燃料成本	元/MW·h	358.54
5	改造后单位燃料成本	元/MW·h	205.52
6	改造前单位发电成本	元/MW·h	434.58
7	改造后单位发电成本	元/MW·h	311.56
8	改造后可降低发电成本	元/MW·h	123.02

水煤浆容易实现炉内脱硫和低氮氧化物燃烧。从淄博市环境监测中心对华能白杨河电厂3号炉燃用水煤浆的主要环保指标监测结果看,外排烟气中的烟尘、二氧化硫、氮氧化物均符合排放标准要求,见表7-9-3。

表 7－9－3　燃用水煤浆污染排放监测结果

名　　称	单　　位	数　　据
烟尘排放浓度	mg/dm^3	135.2
烟尘排放量	kg/h	67.27
二氧化硫排放浓度	mg/dm^3	627.4
二氧化硫排放量	kg/h	257.0
氮氧化物捧放浓度	mg/dm^3	495.1
氮氧化物排放量	kg/h	202.8

水煤浆中的含硫量仅为 0.5%左右，而且在水煤浆中加入 3% ~ 5%的石灰乳，通过燃烧实现炉内脱硫，其直接脱硫效果可达 50%左右。1999 年 10 月白杨河电厂曾做过水煤浆脱硫试验，经山东电力研究院检测，在水煤浆中添加石灰乳，可使二氧化硫排放浓度降低到 255.37mg/dm^3（国家排放标准≤1200mg/dm^3）。由于水煤浆中含有 30%的水分，燃浆的火焰温度比煤粉低 150℃左右，可实现低氮氧化物燃烧。随着国家环保政策的逐步深化，对二氧化硫、氮氧化物的排放将加大限制力度，目前燃煤电厂已经从环保角度进行控制，限期整改，加装脱硫装置，但一般的烟气脱硫装置价格比较贵，受到资金投入大及锅炉尾部预留空间不足的限制。

燃油电厂改烧水煤浆是一条可行之路。华能白杨河电厂 230t/h 电站锅炉燃用水煤浆技术的成功对其他燃油电厂的改造具有重要的示范作用。石化、冶金等行业的燃油锅炉总容量更大，进行燃用水煤浆改造所产生的社会、经济效益尤为显著。