

# 煤炭地下气化的过去与未来

余力

(中国矿业大学)

煤炭地下气化是一种融多学科为一体的综合性能源生产新技术，属第二代采煤方法，其任务是将地下煤炭资源原地转化为可燃气体。它将建井、采煤、气化三大工艺合而为一，将物理采煤转变为化学采煤，即把高分子固体煤转变为低分子结构的可燃气体，抛弃了全部庞大而笨重的采煤设备与地面气化设备，并大幅度减小了建井规模，具有安全好、投资少、效率高、成本低、见效快、污染少等优点，已引起人们的普遍关注。

目前许多产煤国家对这项新技术都先后进行试验与试用，尤其是那些煤炭采深超千米的国家，为了合理开发深部煤层，对这项技术更为重视。苏联和美国在该项技术上，已由工业试验进入工业生产阶段。

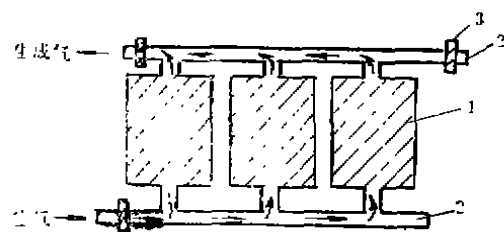
该项技术的发展状况，因各国政治、经济、资源和科技水平的差异而有所不同，现分别作如下介绍。

## 一、苏联

早在1888年著名化学家门捷列夫就曾预言：“随着时间的推移，这样的时代可能要实现，即煤不必从地下开采出来，而是在地下转化为可燃气体，再用管道输送至遥远的地方”。随后又提出在地面用钻孔工艺建立地下气化发生炉，并极力主张将地下气化站与电厂相结合，使电力输送到更遥远的用户。他的这些光辉论点，成为日后发展煤炭地下气化技术的指路明灯。

二十年后，英国化学家威廉·拉姆赛在都贺姆煤田进行地下气化获得成功，并用该煤气发了电。伟大导师列宁获悉这一消息后，在《真理报》上以“一个技术上的伟大胜利”为题，撰文赞扬了该技术对社会进步将产生的深远影响（见列宁全集19卷41页）。

在列宁的倡议下，1930年苏共中央和苏联人民委员会作出了对煤炭地下气化进行试验的决议，1932年终于在顿巴斯矿区建立了世界上第一座有井式地下气化站（见图1）。



1. 室内煤层被炸碎 2. 平巷 3. 隔墙

图 1 室式气化炉



图2 气流式气化炉

1934年,顿尼茨煤化工学院马特维夫教授提出了气流式地下气化方案(见图2),并取得试验成功。1938年对气流式U型地下气化炉进行的工业性试验也获得成功。在此基础

上,1942年苏联在莫斯科近郊煤田又试验成功无井式地下气化炉,同时还发展了各种贯通技术,大大提高了煤炭地下气化技术的水平,从而在苏联和世界各国得到推广。

1946~1965年是苏联煤炭地下气化高度发展时期,设立了地下气化管理总局,附属有研究院与设计院,出版了专业杂志。在总局领导下,全苏几个大矿区相继建成若干大型地下气化站,使煤气产量逐年大幅度上升,截止1965年已达25亿米<sup>3</sup>。

可是在本世纪六十年代,由于苏联大量开发石油与天然气,使煤炭地下气化站的发展停滞不前,遭到冷落。在此低潮期间,苏联地下气化专家总结国内外经验,围绕提高煤气热值,降低成本进行了大量研究,找到有效措施。加之,苏联许多矿井的采深都已接近千米,生产条件恶劣,生产成本上涨幅度较大,苏联能源管理部门又将希望寄托在地下气化技术上,宣布到2005年或2010年,使每年煤炭地下气化产量按热值折算为商品煤,等于全苏矿井法采煤总量的27%。计划用地下煤气每年发电2000亿度,生产化工原料2500万吨。

1982年莫斯科矿业学院的教授们总结以往地下气化经验,提出用煤炭地下燃烧工艺,回收被以往采煤工艺所遗弃的资源——煤柱。目前正在顿巴斯、莫斯科近郊和库兹巴斯等煤田进行工业性试验,欲将煤的热值转化为热能(热水与蒸汽),以供民用或工业使用,使煤炭资源利用率提高到90%,同时还可获得化学能( $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ )。所采用的煤炭地下燃烧工艺示于图3。该工艺主要是采用抽风机造成负压,将燃烧产生的高温气体(300~600℃)通过热交换器变为蒸汽。

为了更充分利用地下煤炭资源,苏联今后的煤炭开发方向是将预抽瓦斯、采煤、气化三大工艺结合起来进行设计与生产。

## 二、美国

美国地下气化试验始于1946年。首先在亚拉巴马州高加斯城附近的浅部煤层中进行

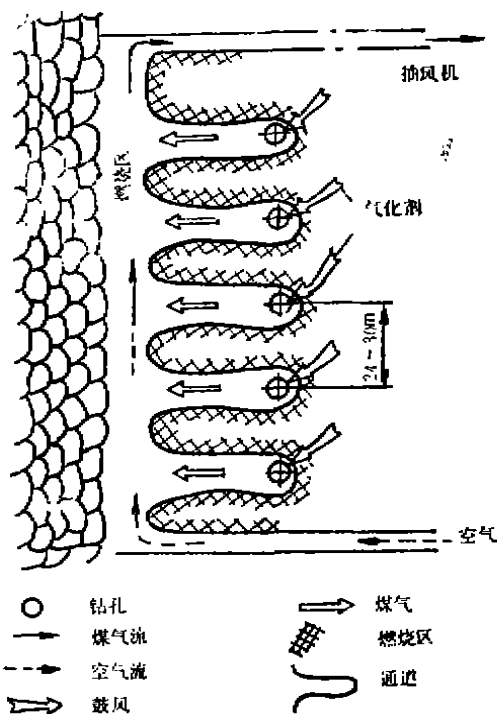


图3 煤炭地下燃烧工艺

试验,利用有井式施工,采用空气、水蒸汽、富氧空气等不同气化剂作了试验,煤气热值为0.9~5.4兆焦耳/米<sup>3</sup>,但因煤气漏失严重而告终。1953年试验成功电力贯通无井法地下气化工艺。1968年海湾研究与开发公司在美国东部与西部各选一处,作了地下气化经济技术对比性试验,最后结论建议首先开发西部煤田。所以在七十年代石油禁运危机期间,美国能源部组织若干大学与科研机构,在美国西部怀俄明州进行了大规模有计划的科学试验,开发出四种不同类型的地下气化炉(见图4)。与此同时,各私人企业也在该领域进行了开发,如得克萨斯公共事业公司曾于1974年向苏联购买专利,雇用苏联专家,并吸收得克萨斯州工业大学和另外八家公司共同进行了煤炭地下气化的开发。

美国在取得上述成功试验基础上,为了用气化法开采其 1000 余亿吨急倾斜煤层资源,于 1981 年曾投资 2 亿余美元进行了以富

氧水蒸汽为气化剂的试验,获得了管道煤气和天然气,并用于发电和制氨。

在此期间,最引人注目的成就是 1987 年

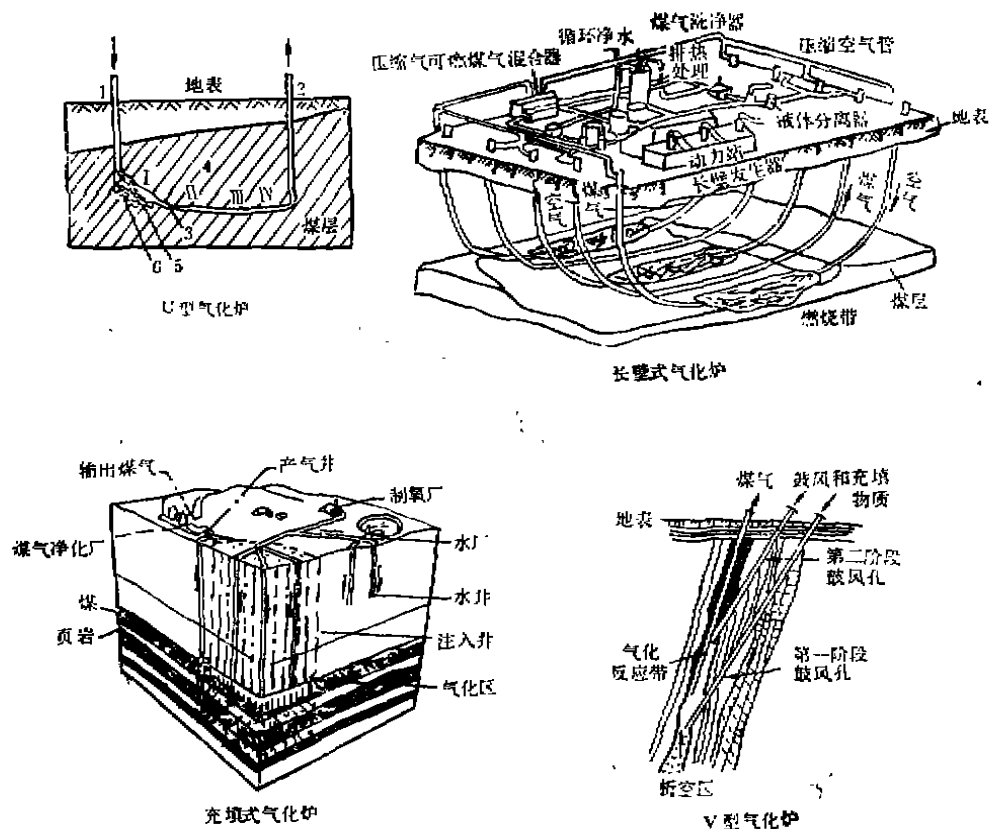


图 4 美国不同类型地下气化炉

### 三、英国

11月至1988年2月在怀俄明州汉纳试验基地,就深110米、厚7米的煤层进行的代号为洛基山-1号的试验,为煤炭地下气化技术走上商品化道路创造了条件,因为该项试验解决了加大炉型、提高生产能力、降低成本、提高煤气热值的问题。

总之,由于美国在过去二十余年投入了巨额资金,进行了大量试验,获得了丰富的经验,使煤炭地下气化技术已日臻完善,美国能源部才得已宣称,一旦再发生能源危机,将广泛使用该技术生产高热值(已达11兆焦耳/米<sup>3</sup>)地下煤气,以解决国家之急需。

1912年英国化学家威廉·拉姆赛在都贺姆煤田进行了世界上首次现场试验,并取得了成功。1914年他去世后,较长一段时期没有进行过试验。1949年又开始恢复试验。截止1956年,先后共进行过60次试验,燃烧了5千万吨煤。煤层厚度一般为1米左右,深度从4米到50米。最初是在牛曼·斯平尼露天煤矿进行,后又在巴通煤田进行。曾进行了U型炉火力、电力和定向钻孔等贯通试验。对不同气化剂也进行了燃烧试验,还进行了单孔炉、盲孔炉、多角形(四角、六角)炉的试验。积累了丰富的资料。英国认为,无井式不经济,仍转向有井式地下气化试验。曾

在巴通煤田沿煤层走向开凿了2个井筒，相距19米，在深25米处遇着煤层，并沿其倾斜方向在二个井底部开凿了互相平行的煤巷，并在煤巷中每隔9米开凿一个钻场，在各钻场利用钻机沿煤层走向分别钻4个水平孔，又在各水平孔两端各打1个垂直孔，共8个孔作为进排气孔与水平孔相通。最后将水平孔与煤巷相通处用混凝土密封，这就建成了四条直线式复合炉（见图5），取得了较为满意的成果。在此基础上又建了一所用盲孔炉组成的复合炉，盲孔炉在斜巷二侧布置，炉长90米，沿煤层走向钻盲孔，盲孔之间距为9米，整个地下气化炉所占面积为61720米<sup>2</sup>，气化煤20万吨，产出煤气已直接用于一个5000kW电厂发电。

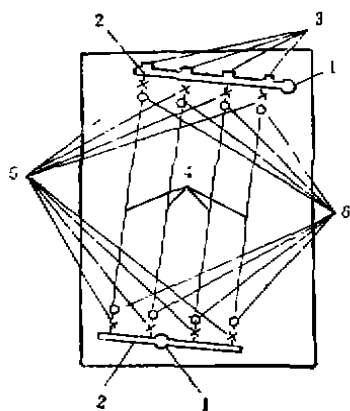


图5 直线式复合炉

1. 竖井 2. 煤巷 3. 钻场 4. 长通道  
5. 密封墙 6. 进排气孔

由于英国现有煤矿的采深大多已超千米，工作条件恶劣，已开始向煤炭地下气化转变。另外，由于北海与本国沿海附近蕴藏有极为丰富的煤炭资源，且水深仅25米左右，已计划利用海上采油技术进行海下煤炭气化开发，为缓解其能源不足找到新路。

#### 四、法国、西德和比利时

自七十年代石油危机开始，法国、比利时、西德、西班牙和东欧国家也开始重视煤炭地下气化技术的研究与开发。

法国于1976年由煤炭部、气化公司、石油研究所、地质矿山研究局共同组成煤炭地下气化研究组织，并于1979~1980年在法国北部的布津阿特瓦进行了首次深度为1170米的气化试验。1981年又在福尔克芒进行了1300米深的地下气化试验，并在南部的勒舒也进行了试验。

西德与比利时于1976年10月，签定了关于共同开发煤炭地下气化技术协定。对西德和比利时来说，大于1000米的深部都埋藏着大量煤炭。初步估计，西德煤炭埋深按2000米计算（煤层厚度1.0米以上），其储量可达2870亿吨。5000米深处为5000亿吨。这样深度的煤层，不可能沿用现行开采方法，而只能采用地下气化方式开采。因此，西德阿亨工业大学与比利时林堡大学，从1979年起在比法两国交界处的图林进行了深部煤层地下气化试验。

图林试验是成功的，探索了进行深部煤层地下气化的途径，取得不少宝贵的经验与教训，但距实现工业性生产，尚有许多问题需要解决。因此，1989年在荷兰集尔夫特市由英、法、西德、比利时、意大利、西班牙和荷兰等国组成欧洲煤炭地下气化研究协会，并制定了日后计划。所选用的地下气化炉的型式见图6。

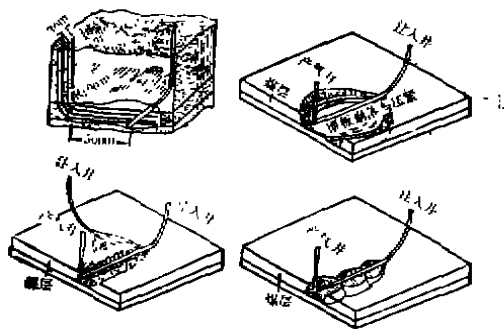


图6 欧共体地下气化炉型式

这些国家其所以要联合研究开发深部煤层地下气化技术，是因为它们的浅部煤层已开发殆尽，只能转向千米以外深度的煤层，

这就遇到了不少难以克服的困难,如地温高、地压大等,而采用地下气化法开采是最适宜、最经济、最有发展前途的路径。

### 五、波兰

波兰没有石油与天然气资源,唯一的能源资源是煤炭,虽无其它能源与其竞争,但为了更合理、更经济地开发煤炭资源,对作为第二代采煤方法的煤炭地下气化是十分重视的。

早在1949年,波兰就与比利时、法国在比利时索柯德矿共同进行过地下气化试验。1951年设立地下气化研究所,并成立了地下气化学会。1955年在卡拉维辛城郊建立了第一座试验站,气化煤层埋深超过100米,煤热值16~20兆焦耳/公斤,煤层中水含量达46%。

从1955年开始进行有井式地下气化试验,与此同时,对电力法贯通煤层也进行了研究。实践证明,后者的经济效益尚不理想。用有井式气化工艺,以富氧鼓风,可稳定得到高达8.3兆焦耳/米<sup>3</sup>热值的煤气,化学利用系数达70%,气化过程连续不断,而该气化煤层的厚度仅1.1米左右,氧气送入量为200米<sup>3</sup>/小时。

波兰的有井式煤气发生炉,有其独特之处,其费用比英国有井式煤气发生炉还低。因此,波兰对有井式气化法给予很高评价。此后,波兰的试验大多采用有井式煤气发生炉。

波兰还对烟煤与褐煤的气化进行了对比试验。发现每公斤褐煤能回收16兆焦耳的热量,而烟煤为38.4兆焦耳,并且认为用富氧鼓风,不仅在技术上可行,而且在经济上也是合算的,已列为今后波兰地下气化试验的方向之一。

值得注意的是在斯扎煤矿,对开采后遗留煤柱进行了气化试验。该项工作始于1960年,煤层埋深为40~110米。用无井式法准备煤层,进行了火力渗透及电力贯通试验,

获得热值9.6~12.8兆焦耳/米<sup>3</sup>的煤气。研究结果还发现,应用钻60时,可使煤气热值提高0.15~0.4兆焦耳/米<sup>3</sup>。

### 六、捷克

煤炭地下气化的试验于1955年开始,先在捷克北部布什兹诺褐煤层进行。该煤层厚1.4米,储量100万吨,煤的平均发热量为11.5兆焦耳/公斤,湿度40%,灰分18%,顶板为4~8米厚的玄武岩及粘土质细砂岩层。采用无井式火力渗透法准备煤层。试验完成后解剖了地下煤气发生炉,发现如下情况:

1. 煤层垂直厚度全部被烧空;
2. 煤层燃烧后留下的空间被部分矿渣及从顶板陷落的岩石所充填;
3. 当气化钻孔直线排列时,燃烧煤宽达10米,有时可达13~14米;
4. 顶板变形;
5. 钻孔发生显著变形,说明不能用加深钻孔方法同时气化多个煤层;
6. 煤层顶板可钻性起了变化,原来的粘土顶板的可钻性属3级,气化后变为9级;
7. 气化结束6个月后,发生炉的温度没有完全降下来。

试验于1959年结束,其结果符合预期要求。1960~1962年先后在魁塔和维尔撒赤地区进行了二次试验,随后建立了半工业性试验站。被试煤的热值为11~11.6兆焦耳/公斤,取得煤气热值为3~4.3兆焦耳/米<sup>3</sup>,平均为3.5兆焦耳/米<sup>3</sup>。气化炉每排6个孔,共24排,采用侧面排气的气化方式,因为矿床被水淹没,必须进行疏干。生产的煤气供二台锅炉用,蒸气带动一台1500千瓦的发电机。此外,还在布拉第斯利与南马拉维煤田的含水率较高的煤层中,用6~7大气压空气阻止地下水流入气化区,获得成功并取得专利。

### 七、日本

日本由于煤的储量少,而且地质条件又极其恶劣,难以用传统工艺开采,因此对煤

炭地下气化也十分重视。

1953年先在实验室进行基础研究。1961年又在自然条件下进行气化试验,在赤平住友矿进行了三次规模较大的现场试验。煤层倾角 $52^{\circ}$ 埋深13米用电力法在煤层中建立气化通道,以形成煤气发生炉。1962年第一次气化200小时,试验基本成功。第二次试验,气化126小时,气化煤135吨,得到 $67\text{万米}^3$ 煤气,其热值为 $2.6\sim 4$ 兆焦耳/ $\text{米}^3$ 。

1959年5月14日成立煤炭地下气化委员会,由日本著名煤化学家马场有政任委员长。整个研究工作由资源试验所、东京大学、九州大学等共同承担。1963年日本政府制定十年规划,把煤炭地下气化列为煤炭工业三大发展方向之一。1969年设立地下气化调查委员会,对外国地下气化技术进行了调查,开展了地下气化基础研究与现场试验站的选址工作。

1969年决定建立两座地下气化试验站。一在北海道的奈井江地区(初期投资9.5亿日元,年产5000万 $\text{米}^3$ 煤气)。一在九州市高松地区(初期投资4.0亿日元)。

日本进行地下气化试验的目的,在于开发采掘条件恶劣的煤炭资源,以补充能源之不足。因此,日本地下气化开发的重点是已报废的矿区,以及遗留的煤柱。整个地下气化的发展目标是建立气化电站联合企业。

综上所述,煤炭地下气化技术在浅部煤层中的应用,苏联已积累有四十余年的经验。若采用加大的长通道炉型,则可达到既增加产气量,又降低成本的目的,从而可望大范围推广。由此可见,苏联欲将地下气化所产出的煤气作为国家能源结构中的一部分是可以实现的。煤炭地下气化技术在深部煤层中的推广应用,目前在欧洲已具备良好条件,建立了机构,科研经费在近七年内已增加到39.9百万欧洲货币单位。可以预言,到2005或2010年将会全面实现伟大化学家门捷列夫的理想。

• 6 •

## 八、我国的现状与对策

我国是产煤大国,但受目前采煤工艺水平所限,资源回收率只有50%,尚有50%被遗弃在地下。据不完全统计,全国约有200亿吨以上的煤炭资源被遗弃在井下,不能加以利用,被遗弃的煤炭资源日后还会增多,所以我们主张利用煤炭地下气化技术回收这些被遗弃的资源(包括废矿井或废水平中的一切煤柱,以及薄煤层、急倾斜煤层、低热值煤和三下煤等,还有超千米深的煤层)。

1985年我们曾在徐州马庄矿进行了长达3个月的验证性试验,产气16万 $\text{米}^3$ ,煤气热值为4兆焦耳/ $\text{米}^3$ ,这表明在生产矿进行气化是可行的,当时因经费所限,未能将产生之煤气应用在工业上。今年,在新河矿将进行1~3个月的地下气化试验,预计日产煤气20万 $\text{米}^3$ ,热值为 $3.2\sim 5.6$ 兆焦耳/ $\text{米}^3$ ,可直接供附近焦化厂使用。新河矿试验所设计的气化炉示于图7,其进排气孔之间的距离为300米左右,也就是通道的长度为300米,这在世界上是首创,也是最合理的设计,是总结近年来国外经验所得。只有长通道才能满足气化过程中氧化、还原和干燥干馏区长度不断变化的要求,又可按气化过程变化需要调整进排气孔位置。目前,国外主张工人不下井,一切工作都在地上进行。这样,通道长度往往受贯通技术的限制(一般为30~40米)。美国现已认识到长度的重要性,利用定向钻井技术使通道可达百米左右。我们主张利用井下原巷道进行施工,通道长度就可达500~1000米。一旦这次试验成功,就可在全国推广,而且无需国家投资,各大矿务局可自筹资金进行开发。因为报废的矿井或水平都已具备煤炭地下气化的必备条件(如煤炭资源勘探、地下水疏干、供水、供电、交通运输、办公楼与住房等的投资都可省去)。按照这条路线搞地下气化,其利润是很高的。初步估算,每立方米煤气成本为2分钱,按市价出售每立方米煤气可获利2~3分

钱。若每天出煤气为24万米<sup>3</sup>，则每天可获利4800元左右。我们这次气化试验可燃烧220天，估计能获纯利100万元左右。与国外由国家拨款进行试验相比，我们的路子是最经济的，而且对国家来说也没有任何困难。

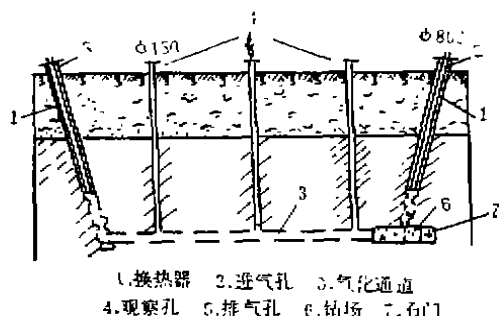


图7 新河矿地下气化炉

目前苏联等国家虽然能源不紧张，但对煤炭地下气化的发展都制定了规划，使其为国民经济服务，更何况我国能源是紧张的，尤其是沿海一带，能源更加紧张。因此，我们建议政府有关部门应对煤炭地下气化技术的发展给予关心，制定规划，加强领导，使其为我国能源建设做出贡献。

在我国推广应用煤炭地下气化技术的意义重大，我国的煤炭产量与用量在世界上居首位，估计在未来的二十年内，仍不会有根本性的改变。因此，始终面临着如何提高开采率、利用率和防污染问题。

这三大问题也是有史以来强烈地引导各国从事煤炭事业的人们不断发展煤炭科学技术的原动力。例如，露天采煤工艺比重增大，矿井开采由人工到机械化，使开采率不断提高。煤炭的燃烧由火床燃烧改进为悬浮与沸腾燃烧及水煤浆燃烧等都是为了提高其利用率，燃烧净化技术也有很大提高与发展，在燃烧前、中、后期，分别采取脱硫、去氮、除尘等措施以求改善与防止对环境的污染与公害。

我国在这三方面的情况，目前是非常严峻的。例如，北京的年烟雾日已从过去的不到

50天，增加到现在的200天，不但危害人民健康，而且影响市容。在我国南方，由于二氧化硫和氮氧化合物的增加，常形成酸雨雪等现象。最严重的贵阳与重庆地区，雨水中pH值已超过3.1，使大桥、汽车及地面上一切金属设备受到严重腐蚀，使设备的寿命大大缩短，还严重影响农作物生长，使大面积农田减产，破坏了生态平衡。今年3月4日，江苏省西部南北长160余公里的地区下了一场罕见的黑雨。经化验，雨中成分为细小煤灰、粉末、纤维状物质、有机杂质、细砂等，氮的含量也较高。目前世界人们普遍关心的温室效应，臭氧层破坏与酸雨雪等等环境问题，都与煤炭燃烧直接有关。我国每年将有十亿吨煤在燃烧，不能不引起严重关注。

我国燃烧技术相当落后，煤炭的利用率很低，全国平均约为30%，若能提高到45%，则每年可为国家节约1.5亿吨煤。目前，我国的用煤大多数靠矿井法开采，露天开采率虽较高，但只占总产量的4~5%，今后可能提高到10%。因而，我国煤炭的开采率大约为50%，被遗弃的煤炭也为50%，采得多遗弃得也多。

苏联四十余年地下气化生产的经历，充分说明煤炭地下气化的开采方法，在上述三个方面的优势是非常突出的。它的开采率与利用率均可达90%左右，而且不存在对环境的污染，所以在我国推广应用煤炭地下气化技术有着深远的现实意义。

我国是产煤燃煤大国，煤炭地下气化技术的应用领域相当广泛，但归纳起来，今后应着手从以下四个方面进行开发：

1. 回收被传统采煤工艺所遗弃的煤炭资源，如工业广场、护巷、防水等各种煤柱、薄煤层、急倾斜煤层等；
2. 开发城市、江河、交通线下的煤炭资源（初步统计约有160亿吨）；
3. 开发油页岩（全国已探明储量为311.7亿吨）；

（下转第12页）

