第三章　固体废物处理与处置工程基础

第一节　固体废物产生、危害及管理

《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》明确规定：固体废物，是指在生产、生活和其他活动中产生的丧失原有利用价值或者虽未丧失利用价值但被抛弃或者放弃的固态、半固态和置于容器中的气态的物品、物质以及法律、行政法规规定纳入固体废物管理的物品、物质。

这里所指的生产包括基本建设、工农业，以及矿山、交通运输、邮政电信等各种工矿企业的生产建设活动；所指的日常生活包括居民的日常生活活动，以及为保障居民生活所提供的各种社会服务及设施，如商业、医疗、园林等；其他活动则指国家各级事业及管理机关、各级学校、各种研究机构等非生产性单位的日常活动。

应当强调指出的是，固体废物的“废”具有时间和空间的相对性。在此生产过程可能是暂时无使用价值的，但并非在其他生产过程或其他方面无使用价值。在经济技术落后国家或地区抛弃的废物，在经济技术发达国家或地区可能是宝贵的资源。在当前经济技术条件下暂时无使用价值的废物，在发展了循环利用技术后可能就是资源。因此，固体废物常被看做是“放错地点的原料”。

一、固体废物的来源与分类

固体废物的种类繁多，性质各异。可按化学性质分为有机固体废物和无机固体废物；按照污染特性可分为一般固体废物、危险废物以及放射性固体废物。一般固体废物是不具有危险特性的固体废物；危险废物是指列入国家危险废物名录或者国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的、具有危险特性的废物。危险废物的主要特征并不在于它们的相态，而在于它们的危险特性，即具有毒性、腐蚀性、传染性、反应性、浸出毒性、易燃性、易爆性等独特性质，对环境和人体会带来危害，须加以特殊管理。我国1998年7月1日实施的《国家危险废物名录》中规定了47类危险废物，这些危险废物既有固态、半固态的废物也有具外包装的废气。此外，在国家《辐射防护规定》（GB 8703—88）中规定，凡放射性核素含量超过国家规定限值的固体、液体和气体废物，统称为放射性废物。由于放射性废物在管理方法和处置技术等方面与其他废物有着明显的差异，许多国家都不将其纳入危险废物范围内。《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》中也没有涉及放射性废物的管理问题。

二、固体废物的危害

固体废物特别是有害固体废物，能通过不同途径危害人体健康。固体废物露天存放或置于处置场，其中的有害成分可通过环境介质——大气、土壤、地表或地下水等间接传至人体，对人体健康造成极大的危害。通常，工矿业固体废物所含化学成分能形成化学物质型污染；人畜粪便和生活垃圾是各种病源微生物的滋生地和繁殖场，能形成病原体型污染。

固体废物污染与废水、废气和噪声污染不同，其呆滞性大、扩散性小，它对环境的污染主要是通过水、气和土壤等环境介质进行。气态污染物在净化过程中被富集成粉尘或废渣，水污染物净化过程中被以污泥的状态分离出，即以固体废物的状态存在。这些终态物质中的有害成分，在长期的自然因素作用下，

又会转入大气、水体和土壤，故又成为大气、水体和土壤环境的污染“源头”。因此固体废物既是污染源头也是终态物。固体废物这一污染“源头”和“终态”特性告诉我们，控制“源头”、处理好“终态物”是固体废物污染控制的关键。固体废物对环境的危害主要体现在以下几方面：

1. 对土壤环境的影响

固体废物任意露天堆放，必将占用大量的土地，破坏地貌和植被。据估算，每堆积 1×10^4 t 渣约占地 1 亩①。固体废物及其淋洗和渗滤液中所含有害物质会改变土壤的性质和结构，并对土壤中的微生物产生影响，这些有害成分的存在，不仅有碍植物根系的发育和生长，而且还会在植物有机体内积蓄，通过食物链危及人体健康。

土壤是许多细菌、真菌等微生物聚居的场所。这些微生物形成了一个生态系统，在大自然的物质循环中，担负着碳循环和氮循环的一部分重要任务。工业固体废物，特别是有害固体废物，经过风化、雨雪淋溶、地表径流的侵蚀，产生高温和毒水或其他反应，能杀灭土壤中的微生物，使土壤丧失腐解能力，导致草木不生。例如，我国内蒙古包头市的某尾矿堆积量已达 $1\ 500\times10^4$ t，使尾砂坝下游的一个乡的大片土地被污染，居民被迫搬迁。

2. 对大气环境的影响

堆放的固体废物中的细微颗粒、粉尘等可随风飞扬，从而对大气环境造成污染。据研究表明：当风力在 4 级以上时，在粉煤灰或尾矿堆表层的粒径小于 1.5 cm 的粉末将出现剥离，其飘扬的高度可达 20～50 m以上，在风季期间可使平均视程降低 30%～70%。而且堆积的废物中某些物质的化学反应，可以在不同程度上产生毒气或恶臭，造成地区性空气污染。例如煤矸石自燃会散发大量的二氧化硫。辽宁、山东、江苏三省的 112 座矸石堆中，自燃起火的有 42 座。美国有 3/4 的垃圾堆散发臭气造成大气污染。

废物填埋场中逸出的沼气也会对大气环境造成影响。固体废物在运输和处理过程中，也能产生有害气体和粉尘。

3. 对水环境的影响

在世界范围内，有不少国家直接将固体废物倾倒于河流、湖泊或海洋。应当指出，这是有违国际公约、理应严加管制的。固体废物随天然降水或地表径流进入河流、湖泊，或随风飘迁落入河流、湖泊，污染地表水，并随渗滤液渗透到土壤中，进入地下水，使地下水污染；废渣直接排入河流、湖泊或海洋，能造成更大的水体污染。

即使无害的固体废物排入河流、湖泊，也会造成水体污染，河床淤塞，水面减小，甚至导致水利工程设施的效益减少或废弃。我国沿河流、湖泊、海岸建立的许多企业，每年向附近水域排放大量灰渣。仅燃煤电厂每年向长江、黄河等水系排放灰渣就达 500×10^4 t 以上。有的电厂排污口的灰堆已延伸到航道中心，灰渣在河道中大量淤积，从长远看对其下游的大型水利工程是一种潜在的威胁。

生活垃圾未经无害化处理任意堆放，也已造成许多城市地下水污染。哈尔滨市韩家洼子垃圾填埋场的地下水色度和锰、铁、酚、汞含量及细菌总数、大肠杆菌数等都大大超标，锰含量超标 3 倍多，汞超标 20 多倍，细菌总数超标 4.3 倍，大肠杆菌超标 11 倍以上。

美国的 Love canal 事件是典型的固体废物污染地下水事件。1930—1953 年，美国胡克化学工业公司在纽约州尼亚加拉瀑布附近的 Love canal 废河谷填埋了 2 800 多吨桶装有害废物，1953 年填平覆土，在上面兴建了学校和住宅。1978 年大雨和融化的雪水造成有害废物外溢，而后就陆续发现该地区井水变臭，婴儿畸形，居民身患怪异疾病，大气中有害物质浓度超标 500 多倍，测出有毒物质 82 种，致癌物质 11 种，其中包括剧毒的 TCDD。

---

① 1 亩 = 666.7 m^2。

三、固体废物管理

（一）固体废物管理相关法规

美国1965年制定的《固体废物处置法》是第一个固体废物的专业性法规，该法1976年修改为《资源保护及回收法》（RCRA），并分别于1980年和1984年经美国国会加以修订，日臻完善，迄今已成为世界上最全面、最详尽的关于固体废物管理的法规之一。根据RCRA的要求，美国EPA又颁布了《有害固体废物修正案》（HSWA），其内容共包括九大部分及大量附录，每一部分都与RCRA的有关章节相对应，实际上是RCRA的实施细则。为了清除已废弃的固体废物处置场对环境造成的污染，美国又于1980年颁布了《综合环境对策保护法》（CERCLA），俗称“超级基金法”。日本关于固体废物管理的法规主要是1970年颁布并经多次修改的《废弃物处理及清扫法》，迄今已成为包括固体废物资源化、减量化、无害化以及危险废物管理在内的相当完善的法规体系。此外，日本还于1991年颁布了《促进再生资源利用法》，对促进固体废物的减量化和资源化起到了重要作用。

我国全面开展环境立法的工作始于20世纪70年代末期。在1978年的宪法中，首次提出了“国家保护环境和自然资源，防止污染和其他公害”的规定，1979年颁布了《中华人民共和国环境保护法（试行）》，1989年通过了《中华人民共和国环境保护法》，这是我国环境保护的基本法，对我国环境保护工作起着重要的指导作用。1995年我国颁布《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，并于2004年进行修订，修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》共分为六章，内容涉及总则、固体废物污染环境防治的监督管理、固体废物污染环境的防治、一般规定、工业固体废物污染环境的防治、生活垃圾污染环境的防治、危险废物污染环境防治的特别规定、法律责任及附则等，这些规定从2005年4月1日起正式成为我国固体废物污染环境防治及管理的法律依据。

（二）“三化”原则和“全过程”管理原则

《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》确立了废物污染防治的“三化”原则和“全过程”管理原则。

1. 固体废物污染防治的“三化”原则

在20世纪80年代中期我国提出了“资源化”、“无害化”、“减量化”作为控制固体废物污染的技术政策，并确定今后较长一段时间内以“无害化”为主。由于技术经济原因，我国固体废物处理利用的发展趋势必然是从“无害化”走向“资源化”，“资源化”是以“无害化”为前提的，“无害化”和“减量化”应以“资源化”为条件。

固体废物减量化是指通过实施适当的技术，一方面减少固体废物的排出量（例如在废物产生之前，采取改革生产工艺、产品设计、改变物资能源消费结构等措施）；另一方面减少固体废物容量（例如在废物排出之后，对废物进行分选、压缩、焚烧等加工工艺）。通过适当的手段减少和减小固体废物的数量和体积。

固体废物无害化是指通过采用适当的工程技术对废物进行处理（如热解技术、分离技术、焚烧技术、微生物好氧或厌氧分解技术等），使其不对环境产生污染，不致对人体健康产生影响。

固体废物资源化是指从固体废物中回收有用的物质和能源，加快物质循环以创造经济价值的广泛的技术和方法。它包括物质回收、物质转换和能量转换。

固体废物的资源化具有环境效益高、生产成本低、生产效率高、能耗低等特点。如用废钢炼钢代替铁矿石炼钢可节约能耗74%，减少空气污染85%，减少矿山垃圾97%；用铁矿石炼1t钢需8个工时，而废铁炼钢仅需2~3个工时。因此，固体废物资源化不仅可获得良好的经济效益，还可节约资源、能源，在资源化的同时除去某些潜在的毒性物质，减少废物堆置场地和废物贮放量。

固体废物资源化应遵循的原则是：技术上可行、经济效益好、就地利用产品、不产生二次污染、符合国家相应产品的质量标准。

2. 全过程管理原则

由于固体废物本身往往是污染的“源头”，故需对其产生—收集—运输—综合利用—处理—贮存—处置实行全过程管理，在每一环节都将其作为污染源进行严格的控制。因此，解决固体废物污染控制问题的基本对策是，避免产生（Clean）、综合利用（Cycle）、妥善处置（Control）的所谓“3C”原则。另外随着循环经济、生态工业园及清洁生产理论和实践的发展，有人提出了“3R”原则，即通过对固体废物实施减少产生（Reduce）、再利用（Reuse）、再循环（Recycle）策略实现节约资源、降低环境污染及资源永续利用的目的。

依据上述原则，可以将固体废物从产生到处置的全过程分为五个连续或不连续的环节进行控制。其中，各种产业活动中的清洁生产是第一阶段，在这一阶段，通过改变原材料、改进生产工艺和更换产品等来控制减少或避免固体废物的产生。在此基础上，对生产过程中产生的固体废物，尽量进行系统内的回收利用，这是管理体系的第二阶段。对于已产生的固体废物，则进入第三阶段（系统外的回收利用）、第四阶段（无害化、稳定化处理）、第五阶段（进行固体废物的最终处置）。

（三）固体废物管理标准

我国的固体废物管理国家标准基本由国家环境保护总局和建设部在各自的管理范围内制定。建设部主要制定有关垃圾清扫、运输、处理处置的标准。国家环境保护总局制定有关污染控制、环境保护、分类、检测方面的标准。

1. 分类标准

分类标准主要包括《国家危险废物名录》、《危险废物鉴别标准》、建设部颁布的《城市垃圾产生源分类及垃圾排放》以及《进口废物环境保护控制标准（试行）》等。

2. 方法标准

方法标准主要包括固体废物样品采样、处理及分析方法的标准。如：《固体废物浸出毒性测定方法》、《固体废物浸出毒性浸出方法》、《工业固体废物采样制样技术规范》、《固体废物检测技术规范》、《生活垃圾分拣技术规范》、《城市生活垃圾采样和物理分析方法》、《生活垃圾填埋场环境监测技术要求》等。

3. 污染控制标准

污染控制标准是固体废物管理标准中最重要的标准，是环境影响评价制度、“三同时”制度、限期治理和排污收费等一系列管理制度的基础。它可分为废物处置控制标准和设施控制标准两类。

（1）废物处置控制标准：它是对某种特定废物的处置标准、要求。如《含多氯联苯废物污染控制标准》即属此类标准。

（2）设施控制标准：目前已经颁布或正在制定的标准大多属于这类标准，如《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》、《生活垃圾填埋场污染控制标准》、《城镇生活垃圾焚烧污染控制标准》、《危险废物安全填埋污染控制标准》等。

4. 综合利用标准

为推进固体废物的资源化并避免在废物资源化过程中产生二次污染，国家环境保护总局将制定一系列有关固体废物综合利用的规范和标准，如电镀污泥、磷石膏等废物综合利用的规范和技术规定。

第二节 固体废物的预处理

一、城市垃圾的收集、贮存及运输

城市垃圾除包括居民生活垃圾外，还包括为城市居民生活服务的商业垃圾、建筑垃圾、园林垃圾、粪便等，这些垃圾的收集大都分别由某一个部门专门作为经常性工作加以管理。如商业垃圾与建筑垃圾由产

生单位自行清运，园林垃圾和粪便由环卫部门负责定期清运。而居民生活产生的生活垃圾，由于产生源分散、总产生量大、成分冗杂、收集工作十分复杂和困难。据统计，垃圾的收运费用占整个垃圾处理系统费用的 60% ~80%，因此必须科学地制定合理的收运计划并提高收运效率。

城市垃圾收运通常由三个阶段构成。第一阶段是从垃圾发生源到垃圾桶的过程，即搬运贮存（简称运贮）。第二阶段是垃圾的清除（简称清运），通常指垃圾的近距离运输，一般用清运车辆沿一定的路线收集清除容器和其他贮存设施中的垃圾，并运至垃圾中转站，有时也可就近直接送至垃圾处理厂和处置场。第三阶段为转运，特指垃圾的远途运输，即在中转站将垃圾装载至大容量运输工具上，运往远处的处理处置场。后两个阶段需要运用最优化技术，将垃圾根据垃圾源位置及垃圾性质分配到不同处置场，以使成本降到最低。

（一）收集容器设置数量

公共场所垃圾容器数量多少与服务范围面积大小、居民人数、垃圾类型、垃圾人均产量、垃圾容重、容器大小和收集频率等因素有关。

容器设置数量可以按照下面方法计算确定。

计算垃圾日产生体积：

$$V_{ave} = \frac{W}{QD_{ave}} \tag{5-3-1}$$

$$V_{max} = KV_{ave} \tag{5-3-2}$$

式中：V_{ave}——垃圾平均日产生体积，m^3/d；

W——垃圾日产生量，t/d；

Q——垃圾容重变动系数，一般取 0.7 ~0.9；

D_{ave}——垃圾平均容重，t/m^3；

K——垃圾产生高峰时体积的变动系数，取 1.5 ~1.8；

V_{max}——垃圾高峰时日产生最大体积，m^3/d。

按下式计算容器服务范围内的垃圾日产生量：

$$W = R \cdot C \cdot Y \cdot P \tag{5-3-3}$$

式中：R——服务范围内居住人口数，人；

C——实测的垃圾单位产量，t/（人·d）；

Y——垃圾日产量不均匀系数，通常取 1.1 ~1.15；

P——居住人口变动系数，取 1.02 ~1.05。

最后以式（5-3-4）和式（5-3-5）求出收集点所需设置的垃圾容器数量：

$$N_{ave} = \frac{AV_{ave}}{E \cdot f} \tag{5-3-4}$$

$$N_{max} = \frac{AV_{max}}{E \cdot f} \tag{5-3-5}$$

式中：N_{ave}——平时所需设置的垃圾容器数量，个；

E——单个垃圾容器的容积，m^3/个；

f——垃圾容器填充系数，取 0.75 ~0.9；

A——垃圾收集周期，d，当每日收集 1 次时，$A=1$，每二日收集 1 次时，$A=2$，依此类推；

N_{max}——垃圾高峰时所需设置的垃圾容器数量。

最后，使用垃圾高峰时所需设置的垃圾容器数量（N_{max}）来确定该服务区应设置垃圾贮存容器的数量，然后再合理地分配在各服务地点。容器最好集中于收集点附近，收集点的服务半径一般不超过 70 m。

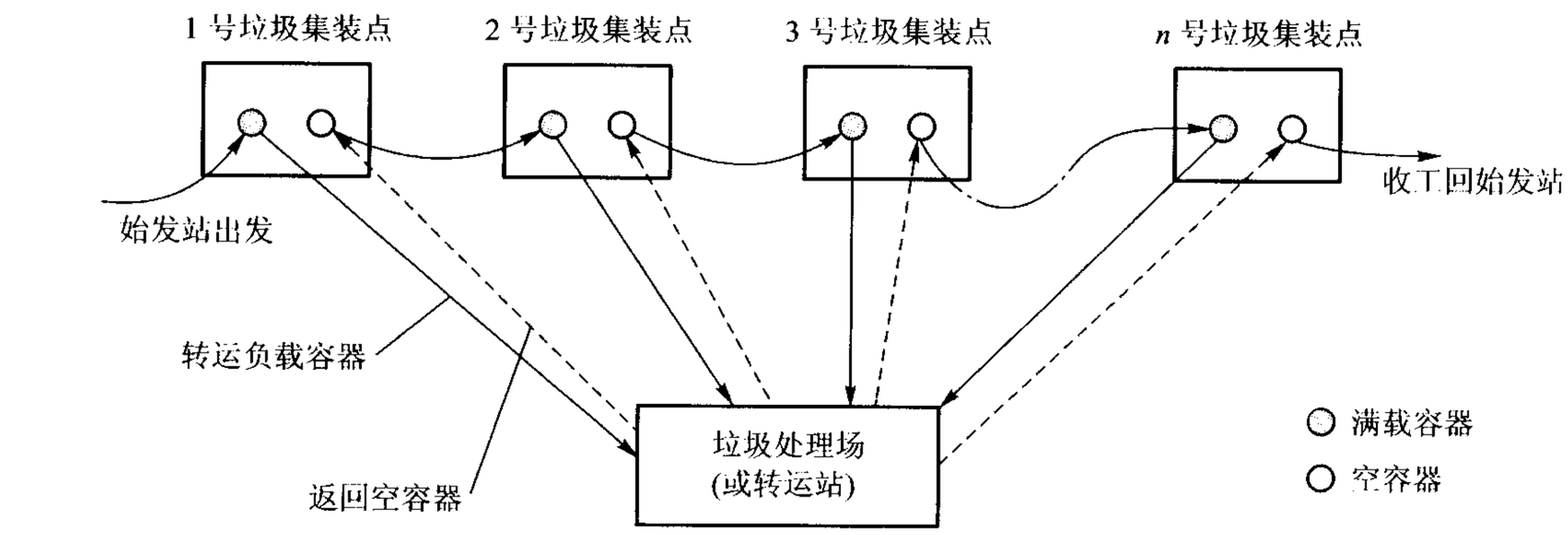
（二）清运操作方法

城市垃圾清运操作方法分移动式和固定式两种。

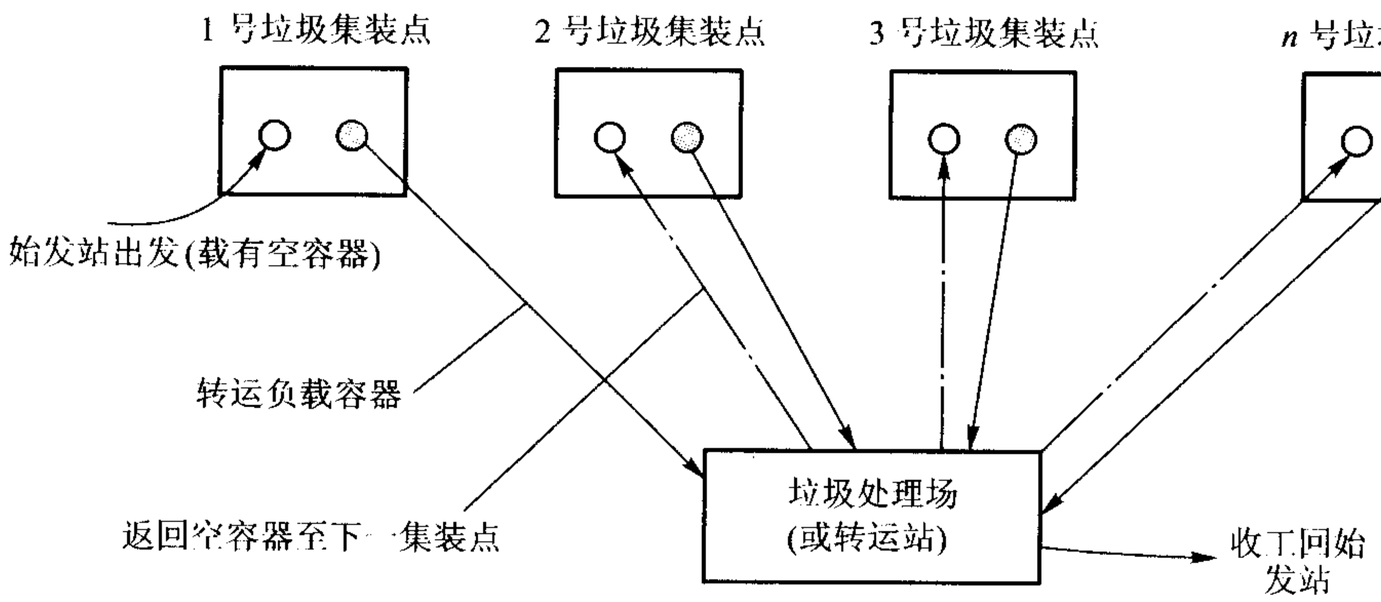
1. 移动容器操作方法（移动式）

移动容器操作方法是指将装满垃圾的容器使用垃圾运输工具（牵引车等）运往中转站或处理场，垃圾卸空后再将空容器送回原处［搬运容器方式，图 5-3-1(a)］或其他垃圾集装点［交换容器方式，图 5-3-1(b)］，如此重复循环进行垃圾清运。

收集成本的高低，主要取决于收集时间长短，因此对收集操作过程的不同单元时间进行分析，可以建立关系式，求出某区域垃圾收集耗费的人力和物力，从而计算收集成本。收集操作过程分为四个基本用时，即集装时间、清运时间、卸车时间和非生产性时间。



(a) 搬运容器方式



(b) 交换容器方式

图 5-3-1 移动容器清运方式

集装时间（t_{hcs}）为：

$$t_{hcs} = t_{pc} + t_{uc} + t_{dbc} \tag{5-3-6}$$

式中：t_{hcs}——每次行程集装时间，h/次；

t_{pc}——垃圾装车时间，h/次；

t_{uc}——卸空容器放回原处时间，h/次；

t_{dbc}——容器间行驶时间，h/次。

一次收集清运操作行程所需时间可用下式表示：

$$t'_{hcs} = \frac{(t_{hcs} + t_s + t)}{(1-\omega)} \tag{5-3-7}$$

式中：t'_{hcs}——一次收集清运操作行程所需时间，h/次；

t_s——卸车时间，专指垃圾收集车在终点（转运站或处理处置场）逗留时间，包括卸车及等待卸车时间，h/次；

t——运输时间，h/次；

ω——非生产性时间因子，即非收集时间占总时间百分数（表征收集操作全过程中非生产性活动所花费的时间），其数值一般在 0.1 ~ 0.25 之间变化，通常取 0.15。

当装车和卸车时间相对恒定时，则运输时间取决于运输距离和速度。对不同收集车的大量运输数据分析结果表明，运输时间可以用下式近似表示：

$$t = a + bx \tag{5-3-8}$$

式中：t——运输时间，h/次；

a——经验常数，h/次；

b——经验常数，h/km；

x——往返运输距离，km/次。

其中，a 和 b 的数值大小与运输车辆的速度极限有关，称为车辆速度常数，见表 5-3-1。

表 5-3-1　垃圾清运车辆速度常数数值

速度极限/(km·h^{-1})	a/(h·次$^{-1}$)	b/(h·km^{-1})	速度极限/(km·h^{-1})	a/(h·次$^{-1}$)	b/(h·km^{-1})
88	0.016	0.011 2	40	0.050	0.025
72	0.022	0.014	24	0.060	0.042
56	0.034	0.018			

将式（5-3-8）代入式（5-3-7）得到：

$$t'_{hcs} = \frac{t_{hcs} + t_s + a + bx}{1 - \omega} \tag{5-3-9}$$

当求出 t'_{hcs} 后，则每日每辆收集车的行程次数用下式求出：

$$N_d = \frac{t_h}{t'_{hcs}} \tag{5-3-10}$$

式中：N_d——每天行程次数，次/d；

t_h——每天工作时数，h/d。

每周所需收集的行程次数，即行程数，可根据收集范围的垃圾清除量和容器平均容量，用下式求出：

$$N_w = \frac{V_w}{cf} \tag{5-3-11}$$

式中：N_w——每周收集次数，即行程数，次/周（若计算值带小数时，需进值到整数值）；

V_w——每周清运垃圾产量，m^3/周；

c——容器平均容量，m^3/次；

f——容器平均填充系数。

由此，每周需作业时间 t_w(h/周) 为：

$$t_w = N_w t'_{hcs} \tag{5-3-12}$$

通过上面计算过程，可以得到每周工作时间和收集次数，近而可以制定科学合理的工作计划。

【例 5-3-1】 某住宅区生活垃圾量约 280 m^3/周，拟用一垃圾车负责清运工作，实行改良操作法的移动式清运。已知该车每次集装容积为 8 m^3/次，容积利用系数为 0.67，垃圾车采用 8 小时工作制。试求为及时清运该住宅垃圾，每周需出动清运多少次？累计工作多少小时？经调查已知：平均运输时间为 0.512 h/次，容器的装车时间为 0.033 h/次；容器放回原处时间为 0.033 h/次，卸车时间为 0.022 h/次；非生产时间占全部工作时间的 25%。

解：按式（5-3-6）：

$$t_{hcs} = t_{pc} + t_{uc} + t_{dbc} = (0.033 + 0.033 + 0)\,\text{h/次} = 0.066\ \text{h/次}$$

清运一次所需要的时间，按式（5-3-7）：

$$t'_{hcs}=\frac{(t_{hcs}+t_s+t)}{(1-\omega)}=\frac{(0.066+0.022+0.512)}{(1-0.25)}\ \text{h/次}=0.80\ \text{h/次}$$

收运车每日可以进行的集运次数，按式（5-3-10）：

$$N_d=\frac{t_h}{t'_{hcs}}=\frac{8}{0.8}\text{次/d}=10\ \text{次/d}$$

每周所需收集的行程数，按式（5-3-11）：

$$N_w=\frac{V_w}{(cf)}=\frac{280}{(8\times0.67)}\text{次/周}=53\ \text{次/周}$$

每周所需要的工作时间为：

$$t_w=N_w t'_{hcs}=53\times0.8\ \text{h/周}=42.4\ \text{h/周}$$

2. 固定容器操作方法（固定式）

垃圾的装车时间是该收集法一次行程所使用时间的主要影响因素。垃圾车辆装车一般有机械操作和人工操作两种方式，所以与移动容器法相比，计算方法有所不同。

（1）机械装车：一般使用压缩机进行自动装卸垃圾，每一收集行程所需时间为：

$$t'_{scs}=\frac{t_{scs}+t_s+a+bx}{1-\omega}\qquad(5-3-13)$$

式中：t'_{scs}——固定容器收集法每一行程所需时间，h/次；

t_{scs}——每次行程集装时间，h/次；

t_s——卸车时间，h/次。

此处，集装时间为：

$$t_{scs}=c_t\cdot t_{uc}+t_{dbc}\cdot(N_p-1)\qquad(5-3-14)$$

式中：c_t——每次行程倒空的容器数，个/次；

t_{uc}——卸空一个容器的平均时间，h/个；

N_p——每一行程经历的集装点数；

t_{dbc}——每一行程各集装点之间平均行驶时间。如果集装点平均行驶时间未知，也可用式（5-3-8）进行估算，但应以集装点间距离代替往返运输距离 x（km/次）。

每一行程能倒空的容器数（c_t）直接与收集车容积、压缩比及容器体积有关，其关系式为：

$$c_t=\frac{V\cdot r}{V_{rq}\cdot f}\qquad(5-3-15)$$

式中：V——垃圾收集车容积，m^3/次；

r——垃圾压缩比；

V_{rq}——垃圾容器的体积，m^3；

f——垃圾容器的平均填充系数。

每周需要的行程次数（N_w）可用下式求出：

$$N_w=\frac{V_w}{V\cdot r}\qquad(5-3-16)$$

式中：N_w——每周行程次数，次/周。

V_w——每周需运输的垃圾体积。

由此计算出每周需要的收集时间为：

$$t_w=\frac{N_w t_{scs}+N'_w\ (s+a+bx)}{t_h\ (1-\omega)}\qquad(5-3-17)$$

式中：t_w——每周收集时间，d/周；

N'_w——N_w值进到大整数值；

t_h——每天工作时数，h/d。

（2）人工装车：使用人工装车的工作方式，其原理同前，计算公式有所变化。如果每天进行的收集行程数为已知或保持不变，在这种情况下工作时间为：

$$t_{scs}=\frac{(1-\omega)\ t_h}{N_d}-(s+a+bx) \tag{5-3-18}$$

每一行程能够收集垃圾的集装点数目（N_p）可以由下式估算：

$$N_p=\frac{60t_{scs}n}{t_p} \tag{5-3-19}$$

式中：n——收集工人数，人；

t_p——每个集装点需要的集装时间，人·min。

t_p可由下式求得：

$$t_p=0.72+0.18c_n+0.014P_{rh} \tag{5-3-20}$$

式中：c_n——每一个集装点的垃圾容器数；

P_{rh}——服务到居民家的收集点占全部垃圾集装点的百分数，%。

每次行程的集装点数确定后，即可用下式估算收集车的大小（载重量）：

$$V=\frac{V_pN_p}{r} \tag{5-3-21}$$

式中：V_p——每一集装点收集的垃圾平均量，m^3/次。

每周的行程数，即收集次数 N_w：

$$N_w=\frac{N_TF}{N_p} \tag{5-3-22}$$

式中：N_T——集装点总数；

F——每周容器收集频率，次/周。

（三）收集车辆

1. 收集车类型

城市垃圾收集车一般配置专用垃圾集装、卸载设备，并且具有一定程度的机械化和自动化功能。城市垃圾收集车辆类型众多，各国还没有形成一个统一的分类标准。常用的分类方式有：按照装车形式可分为前装式、后装式、侧装式、顶装式、集装箱直接上车式等类型；按照车辆垃圾载重量分为 2 t、5 t、10 t、15 t、30 t 等类型；按照装载垃圾容积分为 6 m^3、10 m^3、20 m^3等类型。

2. 收集车数量配备

收集车数量的合理配备，直接影响到垃圾收集的效率和成本高低。在进行车辆配备时，应该考虑车辆的种类、满载量、垃圾输送量、输送距离、装卸自动化程度以及人员配备情况等因素。

各类收集车辆配备数量可参照下列公式计算：

$$\text{简易自卸车数}=\frac{\text{该车收集垃圾日平均产生量}}{\text{车额定吨位}\times\text{日单班收集次数定额}\times\text{完好率}}$$

式中：垃圾日平均产生量由式（5-3-1）计算；日单班收集次数定额按各地方环卫部门定额计算；完好率一般按 85% 计算。

$$\text{多功能车数}=\frac{\text{收集垃圾日平均产生量}}{\text{车箱额定容量}\times\text{箱容积利用率}\times\text{日单班收集次数定额}\times\text{完好率}}$$

式中：箱容积利用率按 50% ~70% 计，完好率按 80% 计，其余同前。

$$\text{侧装密封车数}=\frac{\text{该车收集垃圾日平均产生量}}{\text{桶额定容量}\times\text{桶容积利用率}\times\text{日单班装桶数}\times\text{日单班收集次数定额}\times\text{完好率}}$$

式中：日单班装桶数定额按各省、自治区环卫定额计算，完好率按 80% 计，桶容积利用率按 50% ~70% 计，其余同前。

在城市垃圾收集操作方法、收集车辆类型、收集劳力、收集次数和作业时间等确定以后，就应该着手

设计垃圾的收运路线，以便有效地使用车辆和劳力，提高工作效率。合理的收运路线在一定程度上可以非常有效地提高城市垃圾收运水平。传统的收集线路设计多采用尝试误差法，现也采用系统模拟的方法进行设计。

二、固体废物的压实

压实又称压缩，指用机械方法增加固体废物聚集程度，增大容重和减少固体废物表观体积，提高运输与管理效率的一种操作技术。

（一）固体废物压实的原理

大多数固体废物是由不同颗粒与颗粒间的空隙组成的集合体。自然堆放的固体废物，其表观体积是废物颗粒有效体积与空隙占有的体积之和：

$$V_m = V_s + V_v \tag{5-3-23}$$

式中：V_m——固体废物的表观体积；

V_s——固体颗粒体积（包括水分）；

V_v——空隙体积。

当对固体废物实施压实操作时，随压力的增大，孔隙体积减少，表观体积也随之减小，而容重增大。所谓容重就是固体废物的干密度，用 ρ 表示：

$$\rho = \frac{m_s}{V_m} \tag{5-3-24}$$

式中：m_s——固体废物中固体物质质量。

常用下述指标表示废物的压实程度。

1. 空隙比与空隙率

固体废物的空隙比定义为：

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{5-3-25}$$

空隙率比空隙比更常用，空隙率定义为：

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_m} \tag{5-3-26}$$

空隙比与空隙率越低，表明压实程度越高，相应的密度越大。

2. 湿密度与干密度

若忽略空隙中的气体质量，则固体废物总质量（m_m）等于固体物质质量（m_s）与水分质量（m_w）之和，即：

$$m_m = m_s + m_w \tag{5-3-27}$$

因而，固体废物湿密度定义为：

$$D_w = \frac{m_m}{V_m} \tag{5-3-28}$$

固体废物干密度定义为：

$$\rho = D_d = \frac{m_s}{V_m} \tag{5-3-29}$$

一般废物收运及处理过程中测定的物料质量都包括水分，因此，一般密度均是指湿密度。压实前后固体废物密度值及其变化率大小，容易测定，比较实用。

3. 体积减少百分比

体积减少百分比用式（5-3-30）表示：

$$R = \frac{(V_i - V_f)}{V_i} \times 100\% \tag{5-3-30}$$

式中：R——体积减少百分比；

V_i——压实前废物的体积，m^3；

V_f——压实后废物的体积，m^3。

4. 压缩比与压缩倍数

压缩比是固体废物经压实处理后体积减少的程度：

$$r = \frac{V_f}{V_i} \tag{5-3-31}$$

r 越小，压实效果越好。

压缩倍数是固体废物经压实处理后，体积压实的程度：

$$n = \frac{V_i}{V_f} \tag{5-3-32}$$

n 与 r 互为倒数，n 越大，压实效果越好，实际工程中，习惯上采用 n。

（二）固体废物压实的设备及选用

根据操作情况，固体废物的压实设备可分为固定式和移动式两大类。凡是采用人工或机械方法（液压方式为主）把废物送到压实机械里进行压实的设备称为固定式压实设备。各种家用小型压实器、废物收集车上配备的压实器及中转站配置的专用压实机等，均属固定式压实设备。移动式压实设备是指在填埋现场使用的轮胎式或履带式压土机、钢轮式布料压实机以及其他专门设计的压实机具。

压实器的选择主要针对固体废物的压实要求，选择合适的压缩比和使用压力。

其次，应针对不同的废物，采用不同的压实方式，选用不同的压实设备。

此外，应注意压实过程中的情况，如城市垃圾压缩过程中会出现水分，塑料热压时会粘在压头上等，应对不同废物采用不同的压缩设备。

最后，压实过程与后续处理过程有关，应当综合考虑是否选用压实设备。

三、固体废物的破碎

利用外力克服固体废物质点间的内聚力而使大块固体废物分裂成小块的过程称为破碎；使小块固体废物颗粒分裂成细粉的过程称为磨碎。破碎是所有固体废物处理方法的必不可少的预处理工艺，是后续处理与处置必须经过的过程。

（一）破碎方法

破碎方法可分为干式破碎、湿式破碎、半湿式破碎三类。其中，湿式破碎与半湿式破碎在破碎的同时兼具有分级分选的处理。

干式破碎即通常所说的破碎。按所用的外力即消耗能量形式的不同，干式破碎可分为机械能破碎和非机械能破碎两种方法。机械能破碎是利用工具对固体废物施力而将其破碎的；非机械能破碎则是利用电能、热能等对固体废物进行破碎的新方法，如低温破碎、热力破碎、低压破碎或超声波破碎等。

机械能破碎常用的方法有挤压、摩擦、剪切、冲击、劈裂、弯曲等破碎作用方式，前三种是破碎机常用的基本方式。冲击作用有重力冲击和动冲击：重力冲击是物体落到一个硬表面上，在自重作用下被撞碎的过程；动冲击是指供料碰到一个比它硬的快速旋转的表面时发生的作用。摩擦作用是在两个坚硬的物体表面的中间来碾碎废物的。挤压作用是将材料在挤压设备两个坚硬表面之间的挤压，这两个表面可以都是移动的，也可以是一个静止一个移动。剪切作用指切开或割裂废物，特别适合于二氧化硅含量低的松软物料。一般的破碎机同时兼有多种破碎方法，通常是破碎机的组件与要被破碎的物料间多种作用力在起混合作用。

（二）破碎比与破碎段

在破碎过程中，原废物粒度与破碎产物粒度的比值称为破碎比。破碎比表示废物被破碎的程度。破碎机的能量消耗和处理能力都与破碎比有关。

实际应用过程中，破碎比常采用废物破碎前的最大粒度与破碎后的最大粒度之比来计算，也称极限破碎比。常根据最大物料直径选择破碎机给料口宽度。

科研和理论研究中常采用废物破碎前的平均粒度与破碎后的平均粒度之比来计算，这一破碎比称为真实破碎比。

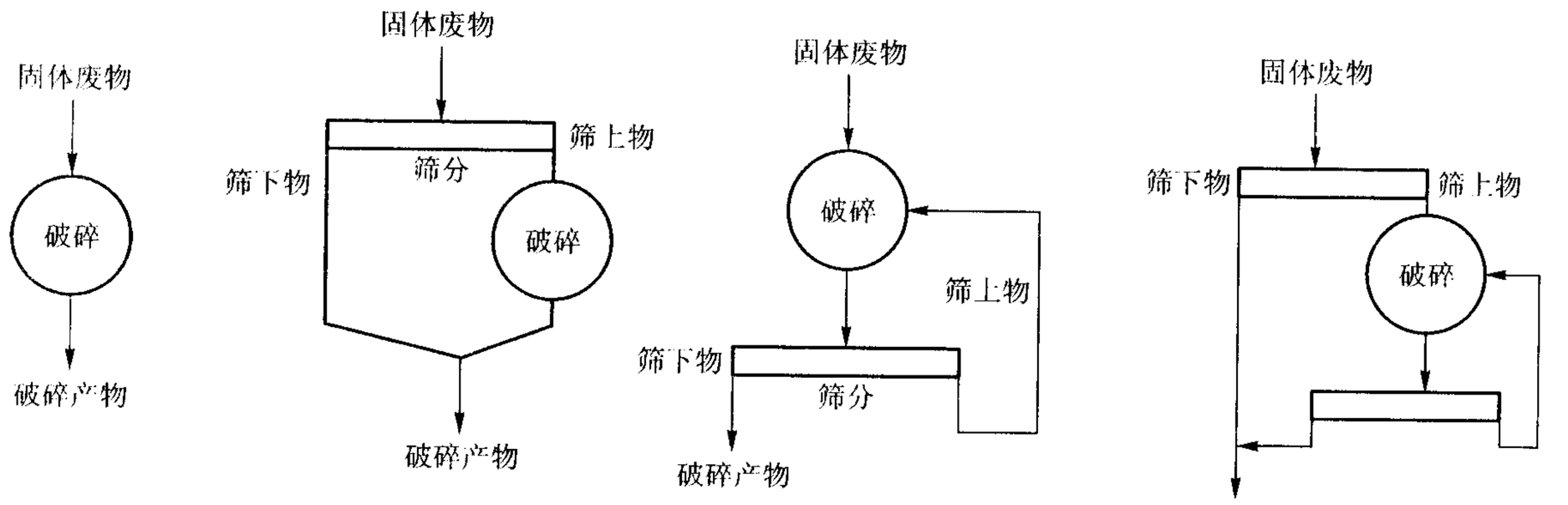
一般破碎机的平均破碎比在 3 ~ 30 之间。磨碎机破碎比可达 40 ~ 400 以上。固体废物每经过一次破碎机或磨碎机称为一个破碎段。若要求的破碎比不大，一段破碎即可。对有些固体废物的分选工艺要求入料的粒度很细，破碎比很大，可根据实际需要将几台破碎机或磨碎机依次串联起来组成破碎流程。对固体废物进行多次（段）破碎，总破碎比等于各段破碎比的乘积：

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot \cdots \cdot i_n \tag{5-3-33}$$

破碎段数主要决定于破碎废物的原始粒度和最终粒度。破碎段数越多，破碎流程就越复杂，工程投资相应增加。条件允许时应尽量减少破碎段数。

（三）破碎工艺

根据固体废物的性质、颗粒大小、要求达到的破碎比和选用的破碎机类型，每段破碎流程可以有不同的组合方式，基本的工艺流程如图 5 -3 -2 所示。



(a) 单纯破碎工艺　(b) 带预先筛分破碎工艺　(c) 带检查筛分破碎工艺　(d) 带预先筛分和检查筛分破碎工艺

图 5 -3 -2　破碎基本工艺流程

（四）破碎设备及选择

常用破碎机有：颚式破碎机、锤式破碎机、冲击式破碎机、剪切式破碎机、辊式破碎机和粉磨机等。

1. 颚式破碎机

颚式破碎机属于挤压型破碎机械，广泛应用于冶金、建材和化学工业部门，适于坚硬和中硬废物的破碎。根据可动颚板的运动特性分为简单摆动型、复杂摆动型和综合摆动型。复杂摆动型（复摆型）颚式破碎机破碎产品粒度较细，破碎比可达 4 ~ 8，简单摆动型（简摆型）只能达 3 ~ 6；规格相同时，复摆型比简摆型破碎机的生产率高 20% ~ 30% 。

2. 锤式破碎机

按转子数目不同可分为单转子和双转子锤式破碎机。单转子锤碎机根据转子的转动方向不同又可分为可逆式和不可逆式。

按破碎轴安装方式不同可分为卧轴和立轴锤式破碎机，常见的是卧轴锤式破碎机，即水平轴式破碎机。

破碎固体废物的锤式破碎机还有：Hammer Mills 型锤式破碎机、BJD 型锤式破碎机、Movorotor 型双转子锤式破碎机。

锤式破碎机主要用于破碎中等硬度且腐蚀性弱、体积较大的固体废物，还可用于破碎含水分及含油质的有机物、纤维结构物质、弹性和韧性较强的木块、石棉水泥废料，以及回收石棉纤维和金属切屑等。

3. 冲击式破碎机

冲击式破碎机大多是旋转式的利用冲击作用进行破碎的设备，主要有 Universa 型和 Hazemag 型，适用于破碎中等硬度、软质、脆性、韧性及纤维状等多种固体废物。

4. 剪切式破碎机

根据活动刀的运动方式，剪切式破碎机可分为往复式与回转式。广泛使用的主要有 Von Roll 型往复剪切式破碎机、Lincle-mann 型剪切式破碎机、旋转剪切式破碎机等。适用于处理松散状态的大型废物，剪切后的物料尺寸可达 30 mm；也适用于切碎强度较小的可燃性废物。

5. 辊式破碎机

根据辊子的特点，可将辊式破碎机分为光辊破碎机和齿辊破碎机。光辊破碎机可用于硬度较大的固体废物的中碎与细碎。齿辊破碎机可用于脆性或黏性较大的废物，也可用于堆肥物料的破碎。按齿辊数目的多少，可将齿辊破碎机分为单齿辊和双齿辊两种。

6. 粉磨机

为了对废物进行最后一段粉碎，使其中各种成分单体分离，为下一步分选创造条件，需进行粉磨。常用的粉磨机主要有球磨机和自磨机两种。自磨机又称无介质磨机，分干磨和湿磨两种。给料粒度一般 300 ~ 400 mm，一次磨细到 0.1 mm 以下，粉碎比可达 3 000 ~ 4 000，比球磨机等有介质磨机大数十倍。

综合以下因素选择固体废物破碎设备：所需破碎能力，固体废物性质（如破碎特性、硬度、密度、形状、含水率等）和颗粒的大小；对破碎产品粒径大小、粒度组成、形状的要求；供料方式；安装操作现场情况；有效控制所需产品尺寸并且使功率消耗达到最小。

（五）其他破碎方法

1. 低温破碎

低温破碎是利用物料在低温变脆的性能对一些在常温下难以破碎的固体废物进行有效破碎的过程，也可利用不同废物脆化温度的差异在低温下进行选择性破碎。

低温破碎与常温破碎相比，动力消耗可减至 1/4 以下，噪声降低 4 dB，振动减轻$\frac{1}{4}$ ~ $\frac{1}{5}$。

2. 湿式破碎

湿式破碎是利用特制的破碎机将投入机内的含纸垃圾和大量水流一起剧烈搅拌和破碎成为浆液的过程。

湿式破碎具有以下优点：①垃圾变成均质浆状物，可按流体处理法处理；②不会滋生蚊蝇和恶臭，符合卫生条件；③不会产生噪声、发热和爆炸的危险性；④脱水有机残渣，无论质量、粒度、水分等变化都小；⑤在化学物质、纸和纸浆、矿物等处理中均可使用，可以回收纸纤维、玻璃、铁和有色金属，剩余泥土等可做堆肥。

3. 半湿式破碎

利用不同物质在一定均匀湿度下由于强度、脆性（耐冲击性、耐压缩性、耐剪切力）不同而破碎成不同粒度的过程。

该技术具有以下特点：①在同一设备工序中同时实现破碎分选作业；②能充分有效地回收垃圾中的有用物质；③对进料适应性好，易破碎物及时排出，不会出现过破碎现象；④动力消耗低，磨损小，易维修；⑤当投入的垃圾在组成上有所变化及以后的处理系统另有要求时，可改变辊筒长度、破碎板段数、筛网孔径等，以适应其变化。

四、固体废物的分选

固体废物的分选就是将固体废物中各种可回收利用废物或不利于后续处理工艺要求的废物组分采用适当技术分离出来的过程。

固体废物的分选技术方法可概括为人工分选和机械分选。人工分选是最早采用的分选方法，适用于废物产源地、收集站、处理中心、转运站或处置场。

根据废物组成中各种物质的粒度、密度、磁性、电性、光电性、摩擦性及弹性的差异，将机械分选方法分为筛选（筛分）、重力分选、光电分选、磁力分选、静电分选和摩擦与弹跳分选。

（一）筛选

筛选是根据固体废物尺寸大小进行分选的一种方法，在城市生活垃圾和工业废物的处理上得到了广泛应用，包括湿式筛选和干式筛选两种操作类型。

筛分是利用筛子将物料中小于筛孔的细粒物料透过筛面，而大于筛孔的粗粒物料留在筛面上，完成粗、细粒物料分离的过程。该分离过程可看做是由物料分层和细粒透筛两个阶段组成的。

为了使粗细物料通过筛面而分离，必须使物料和筛面之间具有适当的相对运动，使筛面上的物料层处于松散状态，按颗粒大小分层，形成粗粒处于上层、细粒处于下层的规则排列，细粒到达筛面并透过筛孔。同时，物料和筛面的相对运动还可使堵在筛孔上的颗粒脱离筛孔，以利于细粒透过筛孔。粒度小子筛孔尺寸 3/4 的颗粒，很容易通过粗粒形成的间隙到达筛面而透筛，称为“易筛粒”；粒度大于筛孔尺寸3/4的颗粒，很难通过粗粒形成的间隙，而且粒度越接近筛孔尺寸就越难透筛，这种颗粒称为“难筛粒”。

1. 筛分分类

根据筛子的作用不同，将筛子分为四类。

（1）准备筛分：为了让某个操作过程的物料满足粒度要求，将固体废物按粒度分成几个级别，分别送往下一工序。

（2）预先筛分和检查筛分：通常与破碎工艺配合使用。预先筛分是将物料送入破碎机之前，将小于破碎机出料口宽度的颗粒预先筛分出去，以提高破碎机的效率；检查筛分则是对已经过破碎的物料进行筛分，将尚未达到要求粒度的物料返回破碎机的入口进行再破碎。

（3）选择筛分：废物经过某一个或某些筛分工序以后，将浓缩有用成分的部分与基本上无用成分的部分分开。筛孔必须调整到合适的大小。

（4）脱水或脱泥筛分：主要用于清洗或脱水操作。前者是得到较为清洁的筛上物；后者是去除废物中过多的含水量，以便下一步处理或处置，如焚烧或填埋。

2. 筛分效率

通常用筛分效率评定筛分设备的分离效率。

筛分效率是指实际得到的筛下产品质量与入筛废物中所含小于筛孔尺寸的细粒物料质量之比，用百分数表示，即：

$$E = \frac{m_1\beta}{m\alpha} \times 100\% \tag{5-3-34}$$

式中：E——筛分效率；

m_1——筛下产品质量；

m——入筛固体废物质量；

β——筛下产品中小于筛孔尺寸的细粒的质量分数；

α——入筛固体物料中小于筛孔的细粒的质量分数。

根据图 5-3-3 可知：

$$m = m_1 + m_2 \tag{5-3-35}$$

$$m\alpha = m_1\beta + m_2\theta \qquad (5-3-36)$$

式中：θ——筛上产品中小于筛孔尺寸的细粒的质量分数；

m_2——筛上产品质量。

联立式（5-3-34）、式（5-3-35）和式（5-3-36）得到：

$$E = \frac{\beta\ (\alpha - \theta)}{\alpha\ (\beta - \theta)} \times 100\% \qquad (5-3-37)$$

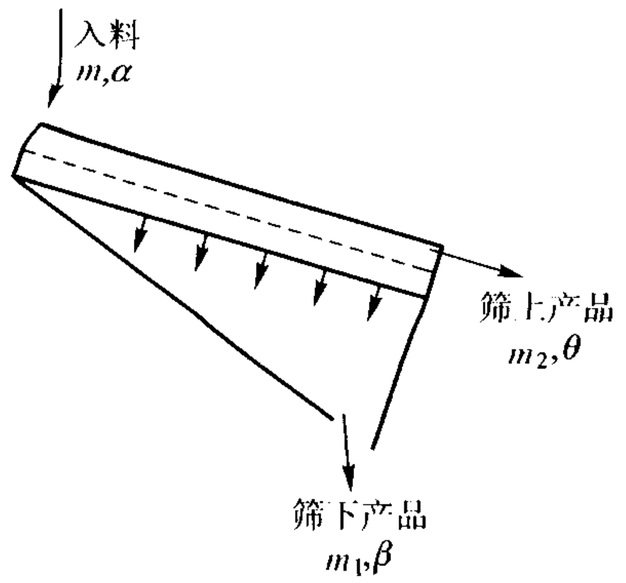


图 5-3-3　筛分效率的测定

3. 筛分设备的选择

通常筛分效率低于85%～95%。筛分效率主要受筛分物料性质、筛分设备特性和筛分操作条件的影响。

因此，选择筛分设备时应考虑如下因素：颗粒大小、形状、颗粒尺寸分布、整体密度、含水率、黏结或缠绕的可能；筛分器的构造材料，筛孔尺寸，形状，筛孔所占筛面比例，转筒筛的转速、长与直径，振动筛的振动频率、长与宽；筛分效率与总体效果要求；运行特征如能耗、日常维护，运行难易、可靠性、噪声、非正常振动与堵塞的可能等。

（二）重力分选

重力分选是根据固体废物中不同物质颗粒间的密度差异，在运动介质中利用重力、介质动力和机械力的作用，使颗粒群产生松散分层和迁移分离，从而得到不同密度产品的分选过程。重力分选的介质有空气、水、重液（密度比水大的液体）、重悬浮液等。

影响重力分选的因素主要是物料颗粒的尺寸、颗粒与介质的密度差以及介质的黏度。不同密度矿物分选的难易程度可大致地按其等降比（e）判断：

$$e = \frac{\rho_2 - \rho}{\rho_1 - \rho} \qquad (5-3-38)$$

式中：ρ_1——轻矿物的密度，kg/m^3；

ρ_2——重矿物的密度，kg/m^3；

ρ——分选介质的密度，kg/m^3。

$e>5$，属极易重选的物料，除极细（10～5μm）细泥外，各个粒度的物料都可用重选法选别；

$2.5<e<5$，属易选物料，按目前重选技术水平，有效选别粒度下限（采用一定的方法能够回收的固体废物的最小粒度）有可能达到19 μm，但37～19 μm级的选别效率也较低；

$1.75<e<2.5$，属较易选物料，目前有效选别粒度下限可达37 μm左右，但74～37 μm级的选别效率也较低；

$1.5<e<1.75$，属较难选物料，重选的有效选别粒度下限一般为0.5 mm左右；

$1.25<e<1.5$，属难选物料，重选法只能处理不小于数毫米的粗粒物料，分离效率一般不高；

$e<1.25$，属极难选物料，不宜采用重选。

按介质不同重力分选分为风力分选、跳汰分选、重介质分选、摇床分选和惯性分选等。各种重力分选过程具有共同工艺条件：①固体废物中颗粒间必须存在密度差异；②分选过程都是在运动介质中进行；③在重力、介质动力及机械力综合作用下，使颗粒群松散并按密度分层；④分好层的物料在运动介质流推动下互相迁移，彼此分离，获得不同密度的最终产品。

1. 重介质分选

（1）基本原理：重介质分选主要适用于几种固体的密度差别较小及难以用跳汰法等其他分离技术分选的场合。通常将密度大于水的介质称为重介质。重介质密度介于大密度和小密度颗粒之间。

如颗粒密度$\rho_s>\rho$，颗粒下沉；$\rho_s<\rho$，颗粒将悬浮，从而实现了物料的分选。重介质分选精度很高，入选物料颗粒粒度范围也可以很宽，很适合于各种固体废物的分选。

实际分离前应筛去细粒部分，大密度物料粒度下限为2～3 mm；小密度物料粒度下限为3～6 mm。采用重悬浮液时，粒度下限可降至0.5 mm。重介质分选不适于包含可溶性物质和成分复杂的城市垃圾的分

选，主要应用于矿业废物分选过程。

（2）重介质：重介质可以是重液和悬浮液两大类，重液价格昂贵，一般只在实验室中使用。在分选中主要使用重悬浮液。高密度固体微粒起着加大介质密度的作用，称为加重质。

重液是一些可溶性高密度的盐溶液（如 $CaCl_2$、$ZnCl_2$ 等）或高密度的有机液体（如 CCl_4、$CHCl_3$、$CHBr_3$、$C_2H_2Br_4$）。四溴乙烷（$C_2H_2Br_4$）与丙酮（C_3H_6O）的混合液密度约为 2.4 g/cm^3，可将铅从较重的物料中分离出来。另一种常用的重液是五氯乙烷（C_2HCl_5），密度为 1.67g/cm^3。重液不能根据需要迅速改变其密度，成本较高，损失较大。

重悬浮液是在水中添加高密度的固体颗粒而构成的固液两相分散体系，其密度可随固体颗粒的种类和含量而变。加重质的粒度约 200 目，占 60% ~80%，与水混合形成微细颗粒的重悬浮液。重悬浮液的加重质通常是硅铁，将硅铁与水按 85:15 的比例混合，相对密度可以达到 3.0 以上。另外还有方铅矿、磁铁矿和黄铁矿等。

重介质应具有密度高、黏度低，化学稳定性好、无毒、无腐蚀性、易回收等特点。

工业应用的一般分为鼓形重介质分选机和深槽式、浅槽式、振动式、离心式分选机，适于分离粒度较粗（40 ~60 mm）的固体废物。

【例 5-3-2】 采用相对密度为 4.4 的磁铁矿作为加重质，配制相对密度为 1.9 的重悬浮液 1 L，试估算加重质的质量、需水量及悬浮液的浓度（质量分数）。

解：加重质的质量：$m=\dfrac{\rho(\rho_c-1)}{\rho-1}\cdot V=\dfrac{4.4(1.9-1)}{4.4-1}\times 1\ \text{kg}=1.165\ \text{kg}$

水的质量：$m_w=\left(V-\dfrac{m}{\rho}\right)\times 1\ \text{kg}=\left(1-\dfrac{1.165}{4.44}\right)\times 1\ \text{kg}=0.738\ \text{kg}$

悬浮液的浓度（质量分数）：$w=\dfrac{m}{m+m_w}=\dfrac{1.165}{1.165+0.738}\times 100\%=61.2\%$

2. 跳汰分选

跳汰分选是在垂直脉冲介质中颗粒群反复交替地膨胀收缩，按密度分选固体废物的一种方法。跳汰分选的一个脉冲循环中包括两个过程：床面先是浮起，然后被压紧。在浮起状态，轻颗粒加速较快，运动到床面物上面；在压紧状态重颗粒比轻颗粒加速快，钻入床面物的下层中，脉冲作用使物料分层。物料分层后，密度大的重颗粒群集中于底层，小而重的颗粒会透筛成为筛下重产物，密度小的轻物料群进入上层，被水平水流带到机外成为轻产物。

按推动水流运动方式，分为隔膜跳汰机和无活塞跳汰机。隔膜跳汰机是利用偏心连杆机构带动橡胶隔膜做往复运动，借以推动水流在跳汰室内做脉冲运动。无活塞跳汰机采用压缩空气推动水流。跳汰分选主要用于混合金属的分离与回收。

3. 风力分选

风力分选又称气流分选，是以空气为分选介质，将轻物料从较重物料中分离出来的一种方法。风选实质上包含两个分离过程：分离出具有低密度、空气阻力大的轻质部分和具有高密度、空气阻力小的重质部分；进一步将轻颗粒从气流中分离出来。后一分离步骤常由旋流器完成，与除尘原理相似。

颗粒在水中的沉降规律也同样适用于在空气中的沉降。但由于空气密度较小，与颗粒密度相比可忽略不计，故颗粒在空气中的沉降末速（v_0）为：

$$v_0=\sqrt{\frac{\pi d\rho_s g}{6\phi\rho}} \tag{5-3-39}$$

式中：d——颗粒粒度，m；

ρ_s——颗粒密度，kg/m^3；

ρ——空气密度，kg/m^3；

ϕ——阻力系数；

g——重力加速度，m/s^2。

从式（5-3-39）中可看到，在同一介质中，密度、粒度和形状不同的颗粒在特定的条件下，可以具有相同的沉降速度。这样的相应颗粒称为等降颗粒。其中，密度小的颗粒粒度（d_{r1}）与密度大的颗粒粒度（d_{r2}）之比，称为等降比，以 e_0 表示：

$$e_0 = \frac{d_{r1}}{d_{r2}} = \frac{\phi_1 \rho_{s2}}{\phi_2 \rho_{s1}} \tag{5-3-40}$$

等降比将随两种颗粒的密度差（$\rho_{s2} - \rho_{s1}$）的增大而增大；而且 e_0 还是阻力系数的函数。理论与实践都表明，e_0 将随颗粒粒度变细而减小。颗粒在空气中的等降比远远小于在水中的等降比，大约为其 1/2 ~ 1/5。风选前需将废物进行窄分级，或经破碎使粒度均匀，按密度差异进行分选。

颗粒在静止空气中沉降到达末速所需的时间和沉降距离都较长。颗粒在上升气流中达到沉降末速时，颗粒的沉降速度等于颗粒对介质的相对速度和上升气流速度之差。所以，上升气流可以缩短颗粒达到沉降末速的时间和距离。在干涉条件下，上升气流速度远小于颗粒的自由沉降末速时，颗粒群呈悬浮状态。

在颗粒达到末速保持悬浮状态时，上升气流速度和颗粒的干涉末速相等。使颗粒群开始松散和悬浮的最小上升气流速度为：$u_{min} = 0.125 v_0$。

在干涉沉降条件下，颗粒群按密度分选时，上升气流速度的大小，应根据固体废物中各种物质的性质，通过实验确定。

风选中还应用水平气流。在水平气流分选器中，物料是在空气动压力 F 及本身重力 G 作用下按粒度或密度进行分选的。颗粒在水平气流下受力时，颗粒运动方向由合力与水平夹角 α 的正切值来确定：

$$\mathrm{tg}\ \alpha = \frac{G}{F} = \frac{\pi d^3 \rho_s g}{6\phi d^2 u^2 \rho} = \frac{\pi d \rho_s g}{6\phi u^2 \rho} \tag{5-3-41}$$

式中：d——颗粒粒度，m；

ρ_s——颗粒密度，kg/m^3；

ρ——空气密度，kg/m^3；

ϕ——阻力系数；

g——重力加速度，m/s^2；

u——水平气流速度，m/s。

由式（5-3-41）可知，当水平气流速度一定、颗粒粒度相同时，密度大的颗粒沿与水平夹角较大的方向运动；密度较小的颗粒则沿夹角较小的方向运动，从而达到按密度差异分选的目的。

在国外，风选方法主要用于城市垃圾的分选。

按气流吹入分选设备内的方向不同，风选设备可分为水平气流风选机（又称为卧式风力分选机）和上升气流风选机（又称为立式风力分选机）。

4. 摇床分选

摇床分选过程中，颗粒群在重力、水流冲力、床层摇动产生的惯性力和摩擦力等的综合作用下，按密度差异产生松散分层，并且不同密度与粒度的颗粒以不同的速度沿床面做纵向和横向运动。它们的合速度偏离方向各异，使不同密度颗粒在床面上呈扇形分布，达到分离的目的。摇床分选设备常用平面摇床。

5. 惯性分选

惯性分选是用高速传输带、旋流器或气流等水平方向抛射粒子，利用由于密度、粒度不同而形成的惯性差异，粒子沿抛物线运动轨迹不同的性质，从而实现分离的方法。普通的惯性分选器有弹道分选器、旋风分离器、振动板以及倾斜的传输带、反弹分选器。

（三）磁力分选

磁力分选有两种类型，一类是传统的磁选，它主要应用于供料中磁性杂质的提纯、净化以及磁性物料的精选；另一类是磁流体分选法，可应用于城市垃圾焚烧厂焚烧灰以及堆肥厂产品中铝、铁、铜、锌等金

属的提取与回收。

1. 磁选

（1）磁选原理：磁选是利用固体废物中各种物质的磁性差异在不均匀磁场中进行分选的一种处理方法。所有经过分选装置的颗粒，都受到磁场力、重力、流动阻力、摩擦力、静电力和惯性力等机械力的作用。若磁性颗粒受力满足以下条件，$f_{磁} > \sum f_{机}$（其中$f_{磁}$为作用于磁性颗粒的吸引力，$\sum f_{机}$为与磁性引力方向相反的各机械力的合力），则该颗粒就会沿磁场强度增加的方向移动直至被吸附在滚筒或带式收集器上，随着传输带运动而被排出。非磁性颗粒所受到的机械力占优势，对于粗粒，重力、摩擦力起主要作用；对于细粒，静电引力和流体阻力则较明显，在这些作用下，仍留在废物中被排出。这样各组分就实现了分选。

（2）磁选机的磁场：磁选机能使磁体产生磁力作用的空间，就是磁选机的磁场。磁场分为均匀磁场和非均匀磁场。均匀磁场中各点的磁场强度大小相等，方向一致。非均匀磁场中各点的磁场强度大小和方向都是变化的。磁场的非均匀性用磁场梯度来表示。磁场强度随空间位移的变化率称为磁场梯度。

根据磁场强度的大小，磁选设备分为弱磁场磁选机、中磁场磁选机、强磁场磁选机，分别适于不同磁性物质的分选。

（3）物质的磁性：根据物质比磁化系数的大小，可将各种物质分为三类：

强磁性物质：比磁化系数大于$38 \times 10^{-6} m^3/kg$，可用弱磁选方法选别；

弱磁性物质：比磁化系数在$(0.19 \sim 7.5) \times 10^{-6} m^3/kg$之间，可用强磁选方法选别；

非磁性物质：比磁化系数小于$0.19 \times 10^{-6} m^3/kg$。

（4）磁选设备：磁选机中使用的磁铁有用通电方式磁化或极化铁磁材料形成的电磁，和利用永磁材料形成磁区的永磁两类；磁铁的布置多种多样，常见的几种设备有磁力辊筒、永磁圆筒式磁选机、悬吊磁铁器等。

磁力辊筒：磁力辊筒又称磁滑轮，有永磁和电磁两种。应用较多的是永磁辊筒。磁力辊筒主要用于工业固体废物或城市垃圾的破碎设备或焚烧炉前，除去废物中的铁器，防止损坏破碎设备或焚烧炉。

湿式 CTN 型永磁圆筒式磁选机：CTN 型永磁圆筒式磁选机的构造形式常用的为逆流型。它的给料方向和圆筒旋转方向或磁性物质的移动方向相反，适于粒度小于 0.6 mm 强磁性颗粒的回收，从钢铁冶炼排出的含铁尘泥和氧化铁皮中回收铁，以及回收重介质分选产品中的加重质。

悬吊磁铁器：悬吊磁铁器有一般式除铁器和带式除铁器两种，主要用来去除城市垃圾中的铁器。铁物数量少时采用一般式，铁物数量多时采用带式。一般式除铁器是通过切断电磁铁的电流排除铁物，而带式除铁器则是通过胶带装置排除铁物。

（5）磁选装置的选择：在选择磁选装置时应考虑以下因素：供料传输带和产品传输带的位置关系，供料传输带的宽度、尺寸以及能否在整个传输带的宽度上有足够的磁场强度而有效地进行磁选，与磁性材料混杂在一起的非磁性材料的数量与形状，操作要求如电耗、空间要求、结构支撑要求、磁场强度、设备维护等。

2. 磁流体分选（MHS）

（1）磁流体分选原理：磁流体分选是利用磁流体作为分选介质，在磁场或磁场和电场的联合作用下产生“似加重”作用，按固体废物各组分的磁性和密度的差异或磁性、导电性和密度的差异，使不同组分分离的过程。磁流体是指某种能够在磁场或磁场和电场联合作用下磁化，呈现似加重现象，对颗粒产生磁浮力作用的稳定分散液。常用的磁流体有强电解质溶液、顺磁性溶液和铁磁性胶体悬浮液。根据分离原理与介质的不同，可分为磁流体动力分选和磁流体静力分选。

① 磁流体动力分选（MHDS）：磁流体动力分选是在磁场（包括均匀磁场或非均匀磁场）与电场的联合作用下，以强电解质溶液为分选介质，按固体废物中各组分间密度、比磁化率和电导率的差异使不同组分分离的过程。其优点是分选介质为导电的电解质溶液，来源广、价格便宜，黏度较低，分选设备简单，处理能力较大，处理粒度为 0.5 ~ 6 mm 的固体废物时，可达 50 t/h，最大可达 100 ~ 600 t/h。缺点是分离精度较低。

② 磁流体静力分选（MHSS）：磁流体静力分选是在非均匀磁场中，以顺磁性液体和铁磁性胶体悬浮液为分选介质，按固体废物中各组分间密度和比磁化率的差异进行分离的过程。其优点是介质黏度较小，分离精度较高。缺点是分选设备较复杂，介质价格较高、回收困难，处理能力较小。

要求精度较高时，采用静力分选；固体废物中各组分间电导率差异较大时，采用动力分选。

磁流体分选是一种重力分选和磁力分选联合作用的分选过程，可以分离各种工业废物和从城市垃圾中回收铝、铜、锌、铅等金属。

（2）分选介质：理想的分选介质应具有磁化率高、密度大、黏度低、稳定性好、无毒、无刺激味、无色透明、价廉易得等特殊条件。常用的有顺磁性盐溶液和铁磁性胶粒悬浮液两大类。

顺磁性盐溶液有 30 余种，Mn、Fe、Ni、Co 盐的水溶液均可作为分选介质。其中 $MnCl_2$ 和 $Mn(NO_3)_2$ 溶液是较理想的分选介质。$FeSO_4$、$MnSO_4$ 和 $CoSO_4$ 的水溶液价格便宜，适合分离固体废物（轻产物密度 $<3\ 000\ kg/m^3$）。

铁磁性胶粒悬浮液一般采用超细粒（10 nm）磁铁矿胶粒做分散质，用油酸、煤油等非极性液体介质，并添加表面活性剂为分散剂调制而成。一般每升该悬浮液中含 $10^7 \sim 10^{18}$ 个磁铁矿粒子。其真密度为 $1\ 050 \sim 2\ 000\ kg/m^3$，在外磁场及电场作用下，可使介质加重到 $20\ 000\ kg/m^3$。这种磁流体介质黏度高，稳定性差，介质回收再生困难。

（四）电力分选

电选是利用固体废物中各种组分在高压电场中电性的差异而实现分选的一种方法。根据导电性，物质分为导体、半导体和非导体三种。电选实际是分离半导体和非导体的固体废物的过程。

1. 电选原理

按电场特征电选机分为静电分选机和复合电场分选机。

（1）静电分选机电选原理：静电分选机中废物的带电方式为直接传导带电。废物直接与传导电极接触，导电性好的废物将获得和电极极性相同的电荷而被排斥，导电性差的废物或非导体与带电滚筒接触被极化，在靠近滚筒一端产生相反的束缚电荷被滚筒吸引，从而实现不同电性的废物分离。

静电分选可用于各种塑料、橡胶和纤维纸、合成皮革和胶卷等物质的分选，使塑料类回收率达到 99% 以上，纸类高达 100%。随含水率升高回收率增大。

（2）复合电场分选机电选原理：复合电场分选机电场为电晕－静电复合电场。目前大多数电选机应用的是电晕－静电复合电场。电晕电场是不均匀电场，在电场中有两个电极：电晕电极（带负电）和滚筒电极（带正电）。当两电极间的电位差达到某一数值时，负极发出大量电子，并在电场中以很高的速度运动。当它们与空气分子碰撞时，便使空气分子电离。空气的负离子飞向正极，形成体电荷。导电性不同的物质进入电场后，都获得负电荷，它们在电场中的表现行为不同。导电性好的物质将负电荷迅速传给正极而不受正极作用。导电性差的物质传递电荷速度很慢，而受到正极的吸引作用，从而完成电选分离过程。

2. 电选设备

常用的电选机有滚筒式静电分选机和 YD—4 型高压电选机。滚筒式静电分选机可实现废物中铝等金属导体与玻璃的分离。YD—4 型高压电选机可作为粉煤灰专用设备。

（五）其他分选方法

1. 摩擦与弹跳分选

摩擦与弹跳分选是根据固体废物中各组分的摩擦系数和碰撞系数的差异，在斜面上运动或与斜面碰撞弹跳时，产生不同的运动速度和弹跳轨迹而实现彼此分离的一种处理方法。

不同固体废物在斜面的运动方式随颗粒的性质或密度不同而不同。纤维状废物或片状废物几乎全靠滑动，球形颗粒有滑动、滚动和弹跳三种运动。当颗粒单体（不受干扰）在斜面上向下运动时，纤维体或片状体滑动运动的速度较小，它脱离斜面抛出的初速度较小；球形颗粒由于是滑动、滚动和弹跳相结合的运动，加速度较大，运动速度较快，它脱离斜面抛出的初速度也较大。因此固体废物中的纤维状废物与颗粒废物、片状废物与颗粒废物，因形状不同，在斜面上运动或弹跳时，产生不同的运动速度和运动轨迹，

实现了彼此分离。

摩擦与弹跳分选设备有带式筛、斜板运输分选机和反弹滚筒分选机三种。

2. 光电分选

光电分选是利用物质表面光反射特性的不同而分离物料的方法，可用于从城市垃圾中回收橡胶、塑料、金属、玻璃等物质。

固体废物经预先窄分级后进入料斗，由振动溜槽均匀地逐个落入高速沟槽进料皮带上，在皮带上拉开一定距离并排队前进，从皮带首端抛入光检箱受检。当颗粒通过光检测区时，受光源照射，背景板显示颗粒的颜色或色调，当欲选颗粒的颜色与背景颜色不同时，反射光经光电倍增管转换为电信号（此信号随反射光的强度变化），电子电路分析该信号后，产生控制信号驱动高频气阀，喷射出压缩空气，将电子电路分析出的异色颗粒（即欲选颗粒）吹离原来下落轨道，加以收集。而颜色符合要求的颗粒仍按原来的轨道自由下落加以收集，从而实现分离。

（六）分选效果的评价

利用分选设备分离回收某种固体废物中有价成分的分选效果，常用回收率（ε）和品位（β）两个指标来评价。回收率是指单位时间内从某一排料口中排出的某一组分的质量与进入分选机的这种组分的质量之比。品位则是指某一排料口中排出的某一组分的质量与从这一排料口中排出的所有组分质量之比，品位也即纯度。

品位是质量指标，通常经过化验确定。回收率是数量指标，可通过计算确定。

五、固体废物的水分及分离方法

按存在形式固体废物的水分分为：间隙水、毛细管结合水、表面吸附水和内部水。

间隙水：存在于颗粒间歇中的水，约占固体水分的70%左右，用浓缩法分离。

毛细管结合水：颗粒间形成一些小的毛细管，在毛细管中充满的水分，约占总水分的20%左右，采用高速离心机脱水、负压或正压过滤机脱水。

表面吸附水：吸附在颗粒表面的水，约占水分的7%，可用加热法脱除。

内部水：在颗粒内部或微生物细胞内的水，约占水分的3%，可采用生物法破坏细胞膜除去胞内水，或用高温加热法、冷冻法去除。

常见脱水设备的优缺点如表5-3-2所示。

表5-3-2 脱水设备的优缺点及适用范围

脱水设备类型	优　点	缺　点	适用范围
真空过滤机	能连续操作，运行平稳，可以自动控制，处理量较大，滤饼含水率较高	污泥脱水前需进行预处理，附属设备多，工序复杂，运行费用较高	适用于各种污泥的脱水
板框过滤机	制造较方便，适应性强，自动压滤剂进料、卸料，滤饼含水率较低	间歇操作，处理量较低	适用于各种污泥的脱水
辊压带式压滤机	可连续操作，设备构造简单，投资低，自动化程度高	操作麻烦，处理量较低	不适于黏性较大的污泥脱水
离心脱水机	占地面积小，附属设备少，投资低，自动化程度高	分离液不清，电耗量较大，机械部件磨损较大	不适于含沙量高的污泥
造粒脱水机	设备简单，电耗低，管理方便，处理量大	钢材消耗量大，混凝剂消耗量较高，污泥泥丸紧密性较差	适用于含油污泥的脱水

六、浮选

浮选是根据不同物质被水润湿程度的差异而对其进行分离的过程。物质被水润湿的程度，就是物质的润湿性。许多无机废物极易被水润湿，而有机废物则不易被水润湿。易被水润湿的物质，称为亲水性物质；不易被水润湿的物质，称为疏水性物质。

物质的天然可浮性差异均较小，仅利用它们的天然可浮性差异进行分选，分选效率很低。浮选是通过在固体废物与水调成的料浆中加入浮选药剂扩大不同组分可浮性的差异，再通入空气形成无数细小气泡，使目的颗粒黏附在气泡上，并随气泡上浮于料浆表面成为泡沫层后刮出，成为泡沫产品；不上浮的颗粒则仍留在料浆内，通过适当处理后废弃。

（一）浮选药剂

根据在浮选过程中的作用，浮选药剂分为捕收剂、起泡剂和调整剂三大类。

1. 捕收剂

能够选择性地吸附在欲选的颗粒上，使目的颗粒表面疏水，增加可浮性，使其易于向气泡附着的药剂称为捕收剂。常用的捕收剂主要有异极性捕收剂和非极性油类捕收剂两类。典型的异极性捕收剂分子由极性基（亲固基）和非极性基（疏水基）两部分组成。非极性油类捕收剂没有极性基。极性基活泼，能与废物表面发生作用而吸附于废物表面；非极性基起疏水作用，朝外排水而造成废物表面的“人为可浮性”。良好的捕收剂应具有以下特点：捕收作用强，具有足够的活性；有较高的选择性；易溶于水、无毒、无臭、成分稳定、不易变质；价廉易得。

典型的异极性捕收剂有黄药、油酸等。非极性油类捕收剂主要包括烷烃 C_nH_{2n+2}、脂环烃 C_nH_{2n}和芳香烃三类。

黄药对碱土金属的废物（如 $BaSO_4$、$CaCO_3$、CaF_2等）没有捕收作用，这是由于黄药与碱土金属（Ca^{2+}、Mg^{2+}、Ba^{2+}等）形成的黄原酸盐易溶于水。但黄药能与许多含重金属和贵金属离子的废物生成表面难溶盐化合物，如含 Hg、Au、Bi、Cu、Pb、Co、Ni 等的废物，它们与黄药生成的表面化合物的溶度积小于 10^{-10}。

油酸在水中不易溶解和分散，实践中常需加溶剂乳化或制成油酸钠使用。油酸主要用于浮选含碱土金属的碳酸盐、金属氧化物、萤石和重晶石（$BaSO_4$）等。

常用的非极性油类捕收剂有煤油、柴油、燃料油、变压器油、重油等。目前，单独使用非极性油类捕收剂的，只是一些可浮性很好的非极性废物颗粒，如粉煤灰中未燃尽碳的回收、废石墨的回收等。

2. 起泡剂

能够促进泡沫形成，增加分选界面的药剂为起泡剂，它与捕收剂有联合作用。常用的起泡剂有松醇油、脂肪醇等。起泡剂的共同结构特征是：①它是一种异极性的有机物质，极性基亲水，非极性基亲气，使起泡剂分子在空气和水的界面上产生定向排列；②大部分起泡剂是表面活性物质，能够强烈地降低水的表面张力；③起泡剂应有适当的溶解度。溶解度过小，起泡剂来不及溶解即随泡沫流失或起泡速度缓慢，延缓时间较长，难以控制；溶解度过大，则药耗大或迅速产生大量泡沫，但不耐久。

起泡剂分子的极性端朝外，对水偶极子有引力作用，使水膜稳定而不易流失。有些离子型表面活性起泡剂，带有电荷，于是各个气泡因同名电荷而相互排斥阻止兼并，增加了气泡的稳定性。

起泡剂与捕收剂不仅在气泡表面有联合作用，在废物表面也有联合作用，这种联合作用名为“共吸附”现象。由于废物表面和气泡表面都有起泡剂与捕收剂的共吸附，因而产生共吸附的界面“互相穿插”，这是颗粒向气泡附着的作用之一。

3. 调整剂

用于调整捕收剂的作用及介质条件的药剂就是调整剂。促进目的颗粒与捕收剂作用的称为活化剂；抑制非目的颗粒可浮性的称为抑制剂；调整介质 pH 的称为 pH 调整剂；促使料浆中目的细粒联合变成较大

团粒的称为絮凝剂；促使料浆中非目的细粒呈分散状态的药剂称为分散剂。表 5－3－3 所示为常用的调整剂种类。

表 5－3－3 常用的调整剂种类

调整剂系列	pH 调整剂	活 化 剂	抑 制 剂	絮 凝 剂	分 散 剂
典型代表	酸、碱	金属阳离子、阴离子 HS^-、$HSiO_3^-$	O_2、SO_2和淀粉、单宁等	腐殖酸、聚丙烯酰胺	水玻璃、磷酸盐

（二）浮选工艺过程

浮选工艺过程主要包括调浆、调药、调泡三个程序。

调浆即调节浮选前料浆浓度。浮选的料浆浓度必须适合浮选工艺的要求。一般浮选密度较大、粒度较粗的废物颗粒，往往用较浓的料浆；反之浮选密度较小的废物颗粒，可用较稀的料浆。

调整浮选药剂的过程为调药，包括提高药效、合理添加、混合用药、料浆中药剂浓度调节与控制等。对一些水溶性小或不溶的药剂，提高药效可采用配成悬浮液或乳浊液、皂化、乳化等措施。药剂合理添加主要是为了保证料浆中药剂的最佳浓度，一般先加调整剂，再加捕收剂，最后加起泡剂。所加药剂的种类和数量，应根据欲选废物颗粒的性质通过实验确定。

调节浮选气泡的过程为调泡。对机械搅拌式浮选机，当料浆中有适量起泡剂存在时，大多数气泡直径介于 0.4 ~ 0.8 mm，最小 0.05 mm，最大 1.5 mm，平均 0.9 mm 左右。

将有用物质浮入泡沫产物，无用或回收经济价值不大的物质仍留在料浆内的浮选法称为正浮选。将无用物质浮入泡沫产物中，将有用物质留在料浆中的浮选法称为反浮选。

固体废物中含有两种或两种以上的有用物质通常采用优先浮选或混合浮选方法。优先浮选是将固体废物中有用物质依次一种一种地浮出，成为单一物质产品的浮选方法。混合浮选是将固体废物中有用物质共同浮出为混合物，然后再把混合物中有用物质一种一种地分离的方法。

影响浮选效果的主要因素有：物料性质（如颗粒的润湿性、颗粒的大小等）；药剂条件（如药剂的种类、用量、药剂的组合等）；操作条件（如充气量大小、液面高低等）等。

（三）浮选设备

浮选机是实现浮选过程的重要设备。对浮选机的基本要求是：①良好的充气作用；②搅拌作用；③能形成比较平稳的泡沫区；④能连续工作及便于调节。

浮选机种类很多，按充气和搅拌方式的不同，目前生产中使用的浮选机主要有机械搅拌式浮选机、充气搅拌式浮选机、充气式浮选机和气体析出式浮选机四类。机械搅拌式浮选机根据搅拌器结构不同分为 XJK 型浮选机、维姆科（Wemco）大型浮选机、棒型浮选机等，其中 XJK 型浮选机是我国使用最广的浮选机。

七、固体废物固化处理

固化是指在危险废物中添加固化剂，使其转变为不可流动固体或形成紧密固体的过程。固化的产物是结构完整的整块密实固体，这种固体可以方便地按尺寸大小进行运输，而无需任何辅助容器。

（一）固化处理效果的评价指标

1. 浸出速率

浸出速率是指固化体浸于水或其他溶液中时，其中危险物质浸出的速率。国际原子能机构（IAEA）将其表示为标准比表面积的样品每日浸出放射性（即污染物质量），即：

$$R_n = \frac{\frac{m_n}{m_0}}{\left(\frac{F}{V}\right)t_n} \tag{5-3-42}$$

式中：R_n——浸出速率，cm/d；

m_n——第 n 个浸提剂更换期内浸出的污染物质量，g；

m_0——样品中原有的污染物质量，g；

F——样品暴露出来的表面积，cm^2；

V——样品的体积，cm^3；

t_n——第 n 个浸提剂更换期的时间历时，d。

固化体在浸泡时的溶解性能，是鉴别固化体产品性能的最重要的一项指标。R_n 实际上是“递减浸出速率”，它反映出固化体中污染物质的浸出速率通常不是恒定的。而是固化体开始与水接触时浸出速率最大，然后逐渐降低，最后几乎趋于恒定。

2. 增容比

增容比也称体积变化因数，是指危险废物在固化处理前后的体积比，即：

$$C_R = \frac{V_1}{V_2} \tag{5-3-43}$$

式中：C_R——体积变化因数；

V_1——固化前危险废物的体积；

V_2——固化体的体积。

3. 抗压强度

危险废物固化体必须具有一定的抗压强度才能安全贮存；否则一旦其出现破碎和散裂，就会增加暴露的表面积和污染环境的可能性。当危险废物固化体采用不同处置或利用方式时，对其抗压强度的要求也不同。如装桶贮存或进行处置，其抗压强度控制在 0.1 ~ 0.5 MPa 即可；如用做建筑材料，其抗压强度应大于10 MPa。放射性废物固化体的抗压强度，前苏联要求大于 5 MPa，英国要求达到 20 MPa。

（二）固体废物固化处理方法

根据固化基材及固化过程，目前常用的固化处理方法主要包括：水泥固化、石灰固化、沥青固化、塑性材料固化、有机聚合物固化、自胶结固化、熔融固化（玻璃固化）和陶瓷固化等。

1. 水泥固化

水泥固化是以水泥为固化剂将危险废物固化的一种处理方法。在用水泥稳定化时，废物被掺入水泥的基质中，水泥与废物中的水分或另外添加的水分，发生水化反应后生成坚硬的水泥固化体。

（1）水泥固化基材及添加剂：水泥是一种无机胶结材料，其主要成分为 SiO_2、CaO、Al_2O_3 和 Fe_2O_3，水化反应后可形成坚硬的水泥石块，从而把分散的固体添料（如砂石）牢固地黏结为一个整体。水泥的品种很多，如普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰硅酸盐水泥、矾土水泥、沸石水泥等都可以作为废物固化处理的基材。

为了改善固化产品的性能，根据废物的性质和对产品质量的要求，添加适量的添加剂。添加剂分为无机添加剂和有机添加剂两大类，前者有蛭石、沸石、多种黏土矿物、水玻璃、无机缓凝剂、无机速凝剂和骨料等；后者有硬脂肪酸丁酯、δ - 糖酸内酯、柠檬酸等。

水泥固化工艺通常是把危险废物、水泥和其他添加剂一起与水混合，经过一定的养护时间而形成坚硬的固化体。固化工艺的配方是根据水泥的种类处理要求以及废物的处理要求制定的。影响水泥固化的因素主要有：①pH；②水、水泥和废物的质量比；③凝固时间；④添加剂，常常根据废物的性质掺入适量的添加剂，就是为了改善固化条件，提高固化体质量。常用的添加剂有吸附剂如投加适量的沸石或蛭石于含有大量硫酸盐的废物中，可以防止硫酸盐与水泥成分发生化学反应，生成水化硫酸铝钙而导致固化体膨胀

和破裂；采用蛭石作添加剂，还可以起到骨料和吸收的作用。

（2）应用及特点：水泥固化处理技术适用于无机类型的废物，如多氯联苯、油和油泥、含有氯乙烯和二氯乙烷的废物、硫化物等，尤其是含有重金属污染物的废物，也被应用于低、中放废物以及垃圾焚烧厂产生的焚烧飞灰等危险废物的固化处理。

水泥固化具有以下优点：①设备和工艺过程简单，无需特殊的设备，设备投资、动力消耗和运行费用都比较低；②水泥和添加剂价廉易得；③对含水率较低的废物可直接固化，无需前处理；④在常温下就可操作；⑤处理技术已相当成熟，对放射性固体废物的固化容易实现安全运输和自动控制等。但水泥固化也存在一些缺点：①水泥固化体的浸出速率较高，通常为 $10^{-5} \sim 10^{-4} g/(cm^2 \cdot d)$，主要是由于它的空隙率较高所致，因此需作涂覆处理；②水泥固化体的增容比较高，达 1.5～2；③有的废物需进行预处理和投加添加剂，使处理费用增高；④水泥的碱性易使铵离子转变为氨气逸出；⑤处理化学泥渣时，由于生成胶状物，使混合器的排料较困难，需加入适量的锯末予以克服。

2. 石灰固化

（1）原理：石灰固化是指以石灰和具有火山灰活性的物质（如粉煤灰、垃圾焚烧灰渣、水泥窑灰等）为固化基材对危险废物进行稳定化与固化处理的方法。在有水存在的条件下，这些基材物质发生反应，将污泥中的重金属成分吸附于所产生的胶状微晶中。而石灰与凝硬性物料结合会产生能通过化学及物理方法将废物包裹起来的黏结性物质。石灰固化利用一些很少有或者没有商业价值的废物对废物处理者来说是非常有利的，因为两种废物可以同时得到处理。

石灰固化技术常以加入氢氧化钙（熟石灰）的方法稳定污泥。石灰中的钙与废物中的硅铝酸根会产生硅酸钙、铝酸钙的水化物或者硅铝酸钙。为了使固化体更稳定，可以同时投加少量的添加剂。

（2）应用及特点：石灰固化技术适用于稳定石油冶炼污泥、重金属污泥、氧化物、废酸等无机污染物。总的来说，石灰固化方法简单，物料来源方便，操作不需特殊设备及技术，比水泥固化法便宜，并在适当的处置环境，可维持波索来反应的持续进行。但石灰固化处理得到固化体的强度较低，所需养护时间较长，并且体积膨胀较大，增加清运和处置的困难，因而较少单独使用。

3. 沥青固化

（1）原理：沥青固化是以沥青类材料作为固化剂，与危险废物在一定的温度、配料比、碱度和搅拌作用下发生皂化反应，使有害物质包容在沥青中并形成稳定固化体的过程。沥青属于憎水性物质，具有良好的黏结性和化学稳定性，而且对于大多数酸和碱有较高的耐腐蚀性。目前我国所使用的沥青大部分来自石油蒸馏的残渣，其化学成分包括沥青质、油分、游离碳、胶质、沥青酸和石蜡等。从固化的要求出发，较理想的沥青组分是含有较高的沥青质和胶质以及较低的石蜡性物质。完整的沥青固化体具有优良的防水性能。

（2）工艺：沥青固化的工艺主要包括三个部分，即固体废物的预处理、废物与沥青的热混合以及二次蒸汽的净化处理，其中关键的部分为热混合环节。

放射性废物沥青固化的基本方法有高温熔化混合蒸发法、暂时乳化法和化学乳化法。

（3）应用及特点：沥青固化一般被用来处理中、低放射性蒸发残液、废物化学处理产生的污泥、焚烧炉产生的灰分，以及毒性较大的电镀污泥和砷渣等危险废物。

沥青固化与水泥固化技术相比较，二者所处理的废物对象基本上相同，除可处理低、中放射性废物外，还可以处理浓缩废液或污泥、焚烧炉的残渣、废离子交换树脂等。但在固化技术方面，沥青固化具有如下特点：①固化体的空隙率和固化体中污染物的浸出速率均大大降低。另外，由于固化过程中干废物与固化剂之间的质量比通常为 1:1～2:1，因而固化体的增容较小。②固化剂具有一定的危险性，固化过程中容易造成二次污染，需采取措施加以避免。另外，对于含有大量水分的废物，由于沥青不具备水泥的水化作用和吸水性，所以需预先对废物进行浓缩脱水处理。因此，沥青固化工艺流程和装置往往较为复杂，一次性投资与运行费用均高于水泥固化法。③固化操作需在高温下完成，不宜处理在高温下易分解的废物、有机溶剂以及强氧化性废物。

4. 塑性材料固化法

塑性材料固化是以塑料为固化剂，与危险废物按一定的比例配料，并加入适量催化剂和填料进行搅拌混合，使其共聚合固化，将危险废物包容形成具有一定强度和稳定性固化体的过程。根据所用材料的性能不同可以分为热固性塑性固化和热塑性固化两种方法。

（1）热固性塑料固化：热固性塑料固化法是用热固性有机单体（如脲醛）和已经过粉碎处理的废物充分地混合，在助凝剂和催化剂的作用下产生聚合以形成海绵状的聚合物质，从而在每个废物颗粒的周围形成一层不透水的保护膜。但是经常有一部分液体废物遗留下来，所以一般在最终处置以前还需干化。目前使用较多的材料是脲醛树脂、聚酯和聚丁二烯等，有时也可使用酚醛树脂或环氧树脂。由于在绝大多数这种过程中废物与包封材料之间不进行化学反应，所以包封的效果仅分别取决于废物自身的形态（颗粒度、含水量等）以及进行聚合的条件。

（2）热塑性材料固化：热塑性材料固化是用熔融的热塑性物质在高温下与危险废物混合，以达到废物稳定化的目的。可使用的热塑性物质如沥青、石蜡、聚乙烯、聚丙烯等。在操作时，通常是先将废物干燥脱水，然后将聚合物与废物在适当的高温下混合，并在升温的条件下将水分蒸发掉。

（3）应用及特点：热固性塑料固化法在过去曾是固化低水平有机放射性废物（如放射性离子交换树脂）的重要方法，同时也可用于稳定非蒸发性的、液体状态的有机危险废物。由于需要对所有废物颗粒进行包封，在适当选择包容物质的条件下，可以达到十分理想的包容效果。该法的主要优点是引入密度较低的物质，所需要的添加剂数量也较少，固化体密度小。主要缺点是操作过程复杂，热固性材料自身价格高昂。由于操作中有机物的挥发，容易引起燃烧起火，所以通常不能在现场大规模应用。

热塑性材料固化与水泥等无机材料的固化工艺相比，除污染物的浸出速率低得多外，由于需要的包容材料少，又在高温下蒸发了大量的水分，它的增容率也就较低。该法的主要缺点是在高温下进行操作，耗能较多；操作时会产生大量的挥发性物质，其中有些是有害的物质；有时在废物中含有热塑性物质或者某些溶剂，影响稳定剂和最终的稳定效果。

5. 玻璃固化技术

玻璃固化是以玻璃原料为固化剂，将其与危险废物以一定的配料比混合后，在 1 000 ~ 1 500 ℃的高温下熔融，经退火后形成稳定的玻璃固化体。

玻璃固化主要用于高放射性废物的固化处理。尽管可用于玻璃固化的玻璃种类繁多，但是，普通钠钾玻璃在水中的溶解度较高，不能用于高放射性废液的固化；硅酸盐玻璃熔点高，制造困难，也难以使用。通常，采用较多的是磷酸盐和硼酸盐玻璃。

磷酸盐玻璃固化法最适于处理含盐量低、放射性极高的危险废物，如普雷克斯废液。

硼酸盐玻璃固化是半连续操作。将高放射性废物与固化剂（硼硅玻璃原料）以一定的配料比混合后，加入装有感应炉装置的金属固化罐中加热煅烧至干，然后升温至 1 100 ~ 1 150 ℃，保温数小时。熔融玻璃从玻璃固化罐流入接收容器，经退火后便得到含有高放射性废物的玻璃固化体。

近年来，重金属污泥的玻璃固化处理也逐步引起重视和研究。许多试验表明，在含有各种重金属的电镀污泥中添加锌和二氧化硅进行玻璃固化处理时，不但可以抑制铬的析出，其他金属也不会溶出。

玻璃固化在所有固化方法中效果最好，固化体中有害组分的浸出速率最低，固化体的增容比最小；但由于烧结过程需要在 1 200 ℃左右的高温下进行，会有大量有害气体产生，可能挥发金属物质，因此要求配备尾气处理系统。同时，由于在高温下操作，会给工艺带来一系列困难，增加处理成本。另外，由于玻璃是非晶态物质，稳定性和耐久性较差，经一定时间会发霉长花、晶化，特别是含硼玻璃易被微生物降解。

6. 自胶结固化技术

（1）原理：自胶结固化是利用废物自身的胶结特性来达到固化目的的方法。该技术主要用来处理含有大量硫酸钙和亚硫酸钙的废物，如磷石膏、烟道气脱硫废渣等。

将含有大量硫酸钙和亚硫酸钙的废物在控制的温度下煅烧，然后与特制的添加剂和填料混合成为稀浆，经过凝结硬化过程即可形成自胶结固化体。其原理是因废物中的硫酸钙与亚硫酸钙均以二水化物（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 与 $CaSO_3 \cdot 2H_2O$）的形式存在。当将它们加热到脱水温度 107 ~ 170 ℃时，二水化物会脱

水而逐渐生成具有自胶结作用的硫酸钙和亚硫酸钙的半水化物（$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ 和 $CaSO_3 \cdot 1/2H_2O$），当它们在遇到水以后，会重新恢复为二水化物，并迅速凝固和硬化。

（2）应用及特点：自胶结固化法的主要优点是工艺简单，不需要加入大量添加剂，废物也不需要完全脱水。固化体化学性质稳定，具有抗渗透性高、抗微生物降解和污染物浸出速率低的特点，并且结构强度高。缺点是这种方法只限于含有大量硫酸钙的废物，应用面较为狭窄。此外还要求熟练的操作和比较复杂的设备，煅烧泥渣也需要消耗一定的热量。

自胶结固化法已在美国大规模应用。美国泥渣固化技术公司（SFT）开发了一种名为 Terra-Crete 的技术，用以处理烟道气脱硫泥渣。

第三节 固体废物的生物处理

固体废物的生物处理是指直接或间接利用生物或生物体的机能，对固体废物的某些组成进行转化以建立降低或消除污染物产生的生产工艺；或者能够高效净化环境污染，同时又生产有用物质的工程技术。采用生物处理技术，利用微生物（细菌、放线菌、真菌）、动物（蚯蚓等）或植物的新陈代谢作用，固体废物可通过各种工艺转换成有用的物质和能源（如提取各种有价金属、生产肥料、产生沼气、生产单细胞蛋白等），既能实现减量化、资源化和无害化，又能解决环境污染问题。

一、固体废物的好氧堆肥处理

堆肥化（composting）就是在人工控制的条件下，依靠自然界中广泛分布的细菌、放线菌、真菌等微生物，人为地促进可生物降解的有机物向稳定的腐殖质转化的微生物学过程。堆肥化的产物称为堆肥（compost），也可以说堆肥即人工腐殖质。依据堆肥过程中微生物对氧气的不同需求情况，可把堆肥分为好氧堆肥和厌氧堆肥。通常所指堆肥为好氧堆肥。

（一）堆肥化的基本原理与影响因素

1. 好氧堆肥的基本原理

好氧堆肥是好氧微生物在与空气充分接触的条件下，使堆肥原料中的有机物发生一系列放热分解反应，最终使有机物转化为简单而稳定的腐殖质的过程。在堆肥过程中，微生物通过同化和异化作用，把一部分有机物氧化成简单的无机物，并释放出能量，把另一部分有机物转化合成新的细胞物质，供微生物生长繁殖。

下列方程式反映了堆肥过程中有机物的氧化和分解：

（1）有机物的氧化：

① 不含氮有机物（$C_xH_yO_z$）的氧化：

$$C_xH_yO_z + \left(x + \frac{1}{4}y - \frac{1}{2}z\right)O_2 \longrightarrow xCO_2 + \frac{1}{2}yH_2O + 能量$$

② 含氮有机物（$C_sH_tN_uO_v \cdot aH_2O$）的氧化：

$$C_sH_tN_uO_v \cdot aH_2O + bO_2 \longrightarrow C_wH_xN_yO_z \cdot cH_2O + dH_2O(g) + eH_2O(l) + fCO_2 + gNH_3 + 能量$$

通常情况，堆肥产品 $C_wH_xN_yO_z \cdot cH_2O$ 与堆肥原料 $C_sH_tN_uO_v \cdot aH_2O$ 质量之比为 0.3～0.5，这是由于氧化分解后减量化的结果。一般情况，w、x、y、z 可取值范围为 $w=5\sim10$，$x=7\sim17$，$y=1$，$z=2\sim8$。

（2）细胞物质的合成（包括有机物的氧化，并以 NH_3 为氮源）：

$$nC_xH_yO_z + NH_3 + \left(nx + \frac{ny}{4} - \frac{nz}{2} - 5\right)O_2 \longrightarrow$$

$$C_5H_7NO_2(细胞物质) + (nx-5)CO_2 + \frac{1}{2}(ny-4)H_2O + 能量$$

（3）细胞物质的氧化：

$$C_5H_7NO_2(\text{细胞物质}) + 5O_2 \longrightarrow 5CO_2 + 2H_2O + NH_3 + \text{能量}$$

以纤维素为例，好氧堆肥中纤维素的分解反应如下：

$$(C_6H_{12}O_6)_n \xrightarrow{\text{纤维素酶}} n(C_6H_{12}O_6)(\text{葡萄糖})$$

$$n(C_6H_{12}O_6) + 6nO_2 \xrightarrow{\text{微生物}} 6nH_2O + 6nCO_2 + \text{能量}$$

或：

$$(C_6H_{12}O_6)_n + 6nO_2 \longrightarrow 6nH_2O + 6nCO_2 + \text{能量}$$

2. 好氧堆肥化过程

堆肥是一系列微生物活动的复杂过程，包含着堆肥原料的矿质化和腐殖化过程。在该过程中，堆内的有机物、无机物发生着复杂的分解与合成的变化，微生物的组成也发生着相应的变化。

好氧堆肥化从废物堆积到腐熟的微生物生化过程比较复杂。

（1）潜伏阶段（亦称驯化阶段）：是指堆肥化开始时微生物适应新环境的过程，即驯化过程。

（2）中温阶段（亦称产热阶段）：在此阶段，嗜温性细菌、酵母菌和放线菌等嗜温性微生物利用堆肥中最容易分解的可溶性物质，如淀粉、糖类等而迅速增殖，并释放热量，使堆肥温度不断升高。当堆肥温度升到 45 ℃以上时，即进入高温阶段。

（3）高温阶段：在此阶段，嗜热性微生物逐渐代替了嗜温性微生物的活动，堆肥中残留和新形成的可溶性有机物质继续分解转化，复杂的有机化合物如半纤维素、纤维素和蛋白质等开始被强烈分解。通常，在 50 ℃左右进行活动的主要是嗜热性真菌和放线菌；温度上升到 60 ℃时，真菌几乎完全停止活动，仅有嗜热性放线菌与细菌活动；温度升到 70 ℃以上时，对大多数嗜热性微生物已不适宜，微生物大量死亡或进入休眠状态。

（4）腐熟阶段：当高温持续一段时间后，易分解的有机物（包括纤维素等）已大部分分解，只剩下部分较难分解的有机物和新形成的腐殖质，此时微生物活性下降，发热量减少，温度下降。在此阶段嗜温性微生物又占优势，对残余的较难分解的有机物进行进一步分解，腐殖质不断增多且稳定化，此时堆肥即进入腐熟阶段，堆肥可施用。

3. 影响因素

（1）供氧量：通风可使堆层内的水分以水蒸气的形式散失掉，达到调节堆温和堆内水分含量的双重目的，可避免后期堆肥温度过高。但在高温堆肥后期，主发酵排除的废气温度较高，会从堆肥中带走大量水分，从而使物料干化，因此需考虑通风与干化间的关系。

【例 5-3-3】 用一种成分为 $C_{31}H_{50}NO_{26}$ 的堆肥物料进行实验室规模的好氧堆肥试验。试验结果，每 1 000 kg堆料在完成堆肥化后仅剩下 200 kg，测定产品成分为 $C_{11}H_{14}NO_4$，试求每 1 000 kg 物料的化学计算理论需氧量。

解：计算出堆肥物料 $C_{31}H_{50}NO_{26}$ 千摩尔质量为 852 kg，可算出每 1 000 kg 物料中参加堆肥过程的有机物物质的量，即：

$$\left(\frac{1\,000}{852}\right)\text{kmol} = 1.174\ \text{kmol}$$

堆肥产品 $C_{11}H_{14}NO_4$ 的千摩尔质量为 224 kg，可算出每千摩尔参加反应的有机物的残余物质中有机物物质的量，即：

$$n = \frac{200}{1.174 \times 224} = 0.76$$

若堆肥过程可表示为：

$$C_aH_bN_cO_d + \frac{nz + 2s + r - d}{2}O_2 \longrightarrow nC_wH_xN_yO_z + sCO_2 + rH_2O + (c - ny)NH_3$$

由已知条件：$a = 31$，$b = 50$，$c = 1$，$d = 26$，$w = 11$，$x = 14$，$y = 1$，$z = 4$，可以算出：

$$r = 0.5[50 - 0.76 \times 14 - 3 \times (1 - 0.76 \times 1)] = 19.32$$

$$s = 31 - 0.76 \times 11 = 22.64$$

堆肥过程所需的氧量为：

$$m = 0.5 \times (0.76 \times 4 + 2 \times 22.64 + 19.32 - 26) \times 1.174 \times 32\ \text{kg} = 782.166\ \text{kg}$$

（2）含水率：堆肥的最适含水率为50%～60%（按质量分数计），此时微生物分解速率最快；当物料含水率在40%～50%之间时，微生物的活性开始下降，堆肥温度随之降低；当含水率小于20%时，微生物的活动就基本停止。当水分超过70%时，温度难以上升，有机物分解速率降低，由于堆肥物料之间充满水，有碍于通风，从而造成厌氧状态，不利于好氧微生物生长，并会产生H_2S等恶臭气体。

（3）温度和有机物含量：堆肥初期，堆体温度一般与环境温度相一致，经过中温菌的作用，堆体温度逐渐上升。随着堆体温度的升高，它一方面加速分解消化过程；另一方面也可杀灭虫卵、致病菌以及杂草籽等，使得堆肥产品可以安全地用于农田。堆体最佳温度为55～60 ℃。

有机质含量过低，分解产生的热量不足以维持堆肥所需要的温度，会影响无害化处理，且产生的堆肥成品由于肥效低而影响其使用价值。如果有机质含量过高，则给通风供氧带来困难，有可能产生厌氧状态。

（4）颗粒度：堆肥过程中供给的氧气是通过颗粒间的空隙分布到物料内部的，因此，颗粒度的大小对通风供氧有重要影响。从理论上说，堆肥物颗粒应尽可能小，才能使空气有较大的接触面积，并使得好氧微生物更易更快将其分解。但如果太小，易造成厌氧条件，不利于好氧微生物的生长繁殖。因此堆肥前需要通过破碎、分选等方法去除不可堆肥化物质，使堆肥物料粒度达到一定程度的均匀化。

（5）C/N比和C/P比：堆肥原料中的C/N比是影响堆肥微生物对有机物分解的最重要因子之一。碳是堆肥化反应的能量来源，是生物发酵过程中的动力和热源；氮是微生物的营养来源，主要用于合成微生物体，是控制生物合成的重要因素，也是过程速度的控制因素。如果C/N比值过小，容易引起菌体衰老和自溶，造成氮源浪费和酶产量下降；如果C/N比值过高，容易引起杂菌感染，同时由于没有足够量的微生物来产酶，会造成碳源浪费和酶产量下降，也会导致成品堆肥的C/N比过高，这样堆肥施入土壤后，将夺取土壤中的氮素，使土壤陷入“氮饥饿”状态，影响作物生长。因此，应根据各种微生物的特性，恰当地选择适宜的C/N比值。调整的方法是加入人粪尿、牲畜粪尿以及城市污泥等。

除碳和氮之外，磷也是微生物必需的营养之一，它是磷酸和细胞核的重要组成元素，也是生物能ATP的重要组成部分，对微生物的生长也有重要的影响。有时，在垃圾中会添加一些污泥进行混合堆肥，就是利用污泥中丰富的磷来调整堆肥原料的C/P比。一般要求堆肥原料的C/P比为75～150。

（6）pH：pH是微生物生长的一个重要环境条件。一般情况下，在堆肥过程中，pH有足够的缓冲作用，能使pH稳定在可以保证好氧分解的酸碱度水平。适宜的pH可使微生物发挥有效作用，一般来说，pH在7.5～8.5之间，可获得最佳的堆肥效果。

（二）好氧堆肥工艺

传统的堆肥化技术采用厌氧野外堆肥法，这种方法占地面积大、时间长。现代化的堆肥生产一般采用好氧堆肥工艺，它通常由前（预）处理、主发酵（亦称一级发酵或初级发酵）、后发酵（亦称二级发酵或次级发酵）、后处理、脱臭及贮存等工序组成。

前处理往往包括分选、破碎、筛分和混合等预处理工序。主要是去除大块和非堆肥化物料如石块、金属物等。此外，前处理还应包括养分和水分的调节，如添加氮、磷以调节碳氮比和碳磷比。

主发酵主要在发酵仓内进行，也可露天堆积，靠强制通风或翻堆搅拌来供给氧气。在堆肥时，由于原料和土壤中存在微生物的作用开始发酵，首先是易分解的物质分解，产生二氧化碳和水，同时产生热量，使堆温上升。微生物吸收有机物的碳氮营养成分，在细菌自身繁殖的同时，将细胞中吸收的物质分解而产生热量。发酵初期物质的分解作用是靠中温菌（也称嗜温菌）进行的。随着堆温的升高，最适宜温度为45～60 ℃的高温菌（也称嗜热菌）代替了中温菌，在60～70 ℃或更高温度下能进行高效率的分解（高温分解比低温分解速率快得多）。然后将进入降温阶段，通常将温度升高到开始降低为止的阶段，称为主发酵期。以生活垃圾和家禽粪尿为主体的好氧堆肥，主发酵期约4～12天。

后发酵是将主发酵工序尚未分解的易分解有机物和较难分解的有机物进一步分解，使之变成腐殖酸、氨基酸等比较稳定的有机物，得到完全腐熟的堆肥制品。后发酵可在封闭的反应器内进行，但在敞开的场

地、料仓内进行得较多。此时，通常采用条堆或静态堆肥的方式，物料堆积高度一般为 1 ~ 2 m。有时还需要翻堆或通气，但通常采用每周进行一次翻堆。后发酵时间的长短取决于堆肥的使用情况，通常在 20 ~ 30 天。

经过后发酵的物料中，几乎所有的有机物都被稳定化和减量化。但在前处理工序中还没有完全去除的塑料、玻璃、金属、小石块等杂物还要经过一道分选工序去除。可以用回转式振动筛、磁选机、风选机等预处理设备分离去除上述杂质，并根据需要进行再破碎（如生产精肥）。也可根据土壤的情况，在散装堆肥中加入 N、P、K 等添加剂后生产复合肥。

在堆肥化工艺过程中，因微生物的分解，会有臭味产生，必须进行脱臭。常见的产生臭味的物质有氨、硫化氢、甲基硫醇、胺类等。去除臭气的方法主要有化学除臭剂除臭，碱水和水溶液过滤，熟堆肥或活性炭、沸石等吸附剂吸附法等。其中，经济而实用的方法是熟堆肥吸附的生物除臭法。

堆肥一般在春秋两季使用，在夏冬两季就需贮存，所以一般的堆肥化工厂有必要设置至少能容纳 6 个月产量的贮存设备。贮存方式可直接堆存在发酵池中或装袋，要求干燥透气，闭气和受潮会影响堆肥产品的质量。

二、固体废物的厌氧消化处理

厌氧消化处理是指在厌氧状态下利用厌氧微生物使固体废物中的有机物转化为 CH_4 和 CO_2 的过程。由于厌氧消化可以产生以 CH_4 为主要成分的沼气，故又称之为甲烷发酵。厌氧消化可以去除废物中 30% ~ 50% 的有机物并使之稳定化。

（一）厌氧消化原理

参与厌氧分解的微生物可以分为两类，一类是由一个十分复杂的混合发酵细菌群将复杂的有机物水解，并进一步分解为以有机酸为主的简单产物，通常称之为水解菌。在中温沼气发酵中，水解菌主要属于厌氧细菌，包括梭菌属、拟杆菌属、真细菌属、双歧杆菌属等。在高温厌氧发酵中，有梭菌属、无芽孢的革兰氏阴性杆菌、链球菌和肠道菌等兼性厌氧细菌。另一类微生物为绝对厌氧细菌，其功能是将有机酸转变为甲烷，被称之为产甲烷细菌。产甲烷细菌的繁殖速率相当缓慢，且对于温度、抑制物的存在等外界条件的变化相当敏感。产甲烷阶段在厌氧消化过程中是十分重要的环节，产甲烷细菌除了产生甲烷外，还起到分解脂肪酸调节 pH 的作用。同时，通过将氢气转化为甲烷，可以减小氢的分压，有利于产酸菌的活动。

有机物厌氧消化的生物化学反应过程与堆肥过程同样都是非常复杂的，中间反应及中间产物有数百种，每种反应都是在酶或其他物质的催化下进行的，总的反应式为：

$$\text{有机物} + H_2O + \text{营养物} \xrightarrow{\text{厌氧微生物}} \text{细胞物质} + CH_4 + CO_2 + NH_3 + H_2 + H_2S + \cdots + \text{抗性物质} + \text{热量}$$

厌氧发酵是有机物在无氧条件下被微生物分解、转化成甲烷和二氧化碳等，并合成自身细胞物质的生物学过程。由于厌氧发酵的原料来源复杂，参加反应的微生物种类繁多，使得厌氧发酵过程变得非常复杂。一些学者对厌氧发酵过程中物质的代谢、转化和各种菌群的作用等进行了大量的研究，但仍有许多问题有待进一步的探讨。目前，对厌氧发酵的生化过程有两段理论、三段理论和四段理论。我们这里主要介绍三段理论。

厌氧发酵一般可以分为三个阶段，即水解阶段、产酸阶段和产甲烷阶段，每一阶段各有其独特的微生物种群起作用。水解阶段起作用的细菌称为发酵细菌，包括纤维素分解菌、蛋白质水解菌。产酸阶段起作用的细菌是乙酸分解菌。这两个阶段起作用的细菌统称为不产甲烷细菌。产甲烷阶段起作用的细菌是产甲烷细菌。

（1）水解阶段：发酵细菌利用胞外酶对有机物进行体外酶解，使固体物质变成可溶于水的物质，然后，细菌再吸收可溶于水的物质，并将其分解成为不同产物。高分子有机物的水解速率很慢，它取决于物料的性质、微生物的浓度，以及温度、pH 等环境条件。纤维素、淀粉等碳水化合物水解成单糖类，蛋白

质水解成氨基酸，再经脱氨基作用形成有机酸和氨，脂肪水解后形成甘油和脂肪酸。

（2）产酸阶段：水解阶段产生的简单的可溶性有机物在产氢和产酸细菌的作用下，进一步分解成挥发性脂肪酸（如丙酸、乙酸、丁酸等）、醇、酮、醛、二氧化碳和氢气等。

（3）产甲烷阶段：产甲烷细菌将第二阶段的产物进一步降解成甲烷和二氧化碳，同时利用产酸阶段所产生的 H_2 将 CO_2 再转变为 CH_4。产甲烷阶段的生化反应相当复杂，其中 72% 的甲烷来自乙酸，目前已经得到验证的主要反应有：

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 \uparrow + CO_2 \uparrow$$

$$4HCOOH \longrightarrow CH_4 \uparrow + 3CO_2 \uparrow + 2H_2O$$

$$4(CH_3)_3N + 6H_2O \longrightarrow 9CH_4 \uparrow + 3CO_2 \uparrow + 4NH_3 \uparrow$$

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

$$4CH_3OH \longrightarrow 3CH_4 \uparrow + CO_2 \uparrow + 2H_2O$$

$$4CO + 2H_2O \longrightarrow CH_4 + 3CO_2$$

由式中可见，除乙酸外，CO_2 和 H_2 的反应也能产生一部分 CH_4，少量 CH_4 来自其他一些物质的转化。产甲烷细菌的活性大小取决于在水解和产酸阶段所提供的营养物质。对于以可溶性有机物为主的有机废物来说，由于产甲烷细菌的生长速率慢，对环境和底物要求苛刻，产甲烷阶段是整个反应过程的控制步骤；而对于以不溶性高分子有机物为主的污泥、垃圾等废物，水解阶段是整个厌氧消化过程的控制步骤。

（二）厌氧消化的影响因素

1. 厌氧条件

厌氧消化最显著的一个特点是有机物在无氧的条件下被某些微生物分解，最终转化成 CH_4 和 CO_2。产酸阶段微生物大多数是厌氧菌，需要在厌氧的条件下才能把复杂的有机质分解成简单的有机酸等。而产气阶段的细菌是专性厌氧菌，氧对产甲烷细菌有毒害作用，因而需要严格的厌氧环境。判断厌氧程度可用氧化还原电位（E_h）表示。当厌氧消化正常进行时，E_h 应维持在 -300 mV 左右。

2. 原料配比

厌氧消化原料的碳氮比以（20～30）:1 为宜。碳氮比过小，细菌增殖量降低，氮不能被充分利用，过剩的氮变成游离的 NH_3，抑制了甲烷细菌的活动，厌氧消化不易进行。但碳氮比过高，反应速率降低，产气量明显下降。磷含量（以磷酸盐计）一般为有机物量的 1/1 000 为宜。

3. 温度

温度是影响产气量的重要因素，厌氧消化可在较为广泛的温度范围内进行（40～65 ℃）。温度过低，厌氧消化的速率低、产气量低，不易达到卫生上杀灭病原菌的目的；温度过高，微生物处于休眠状态，不利于消化。研究发现，厌氧微生物的代谢速率在 35～38 ℃ 和 50～65 ℃ 时各有一个高峰。因此，一般厌氧消化常把温度控制在这两个范围内，以获得尽可能高的消化效率和降解速率。

4. pH

产甲烷细菌的细胞质 pH 一般呈中性。但对于产甲烷细菌来说，维持弱碱性环境是十分必要的，当 pH 低于 6.2 时，它就会失去活性。因此，在产酸菌和产甲烷细菌共存的厌氧消化过程中，系统的 pH 应控制在 6.5～7.5 之间，最佳 pH 范围是 7.0～7.2。为提高系统对 pH 的缓冲能力，需要维持一定的碱度，可通过投加石灰或含氮物料的办法进行调节。

5. 添加物和抑制物

在发酵液中添加少量的硫酸锌、磷矿粉、炼钢渣、碳酸钙、炉灰等，有助于促进厌氧发酵，提高产气量和原料利用率，其中以添加磷矿粉的效果最佳。同时添加少量钾、钠、镁、锌、磷等元素也能提高产气率。但是也有些化学物质能抑制发酵菌的生命活力，当原料中含氮化合物过多，如蛋白质、氨基酸、尿素等被分解成铵盐，从而抑制甲烷发酵。因此当原料中氮化合物比较高的时候应适当添加碳源，调节 C/N 比在（20～30）:1 范围内。此外，如铜、锌、铬等重金属及氰化物等含量过高时，也会不同程度地抑制厌氧消化。因此在厌氧消化过程中应尽量避免这些物质的混入。

6. 接种物

厌氧消化中细菌数量和种群会直接影响甲烷的生成。不同来源的厌氧发酵接种物，对产气数量和质量有不同的影响。添加接种物可有效提高消化液中微生物的种类和数量，从而提高反应器的消化处理能力，

加快有机物的分解速率，提高产气量，还可使开始产气的时间提前。用添加接种物的方法，开始发酵时，一般要求菌种量达到料液量的5%以上。

7. 搅拌

搅拌可使消化原料分布均匀，增加微生物与消化基质的接触，使消化产物及时分离，也可防止局部出现酸积累，并排除抑制厌氧菌活动的气体，从而提高产气量。

（三）厌氧消化工艺

一个完整的厌氧消化系统包括预处理、厌氧消化反应器、消化气净化与贮存、消化液与污泥的分离、处理和利用。厌氧消化工艺类型较多，按消化温度、消化方式、消化级差的不同划分成几种类型。通常是按消化温度划分厌氧消化工艺类型。

根据消化温度，厌氧消化工艺可分为高温消化工艺和自然消化工艺两种。

1. 高温消化工艺

高温消化工艺的最佳温度范围是47～55 ℃，此时有机物分解旺盛，消化快，物料在厌氧池内停留时间短，非常适用于城市垃圾、粪便和有机污泥的处理。其程序如下：

（1）高温消化菌的培养：高温消化菌种的来源一般是将污水池或地下水道有气泡产生的中性偏碱的污泥加到备好的培养基上，进行逐级扩大培养，直到消化稳定后即可作为接种用的菌种。

（2）高温的维持：通常是在消化池内布设盘管，通入蒸汽加热料浆。我国有城市利用余热和废热作为高温消化的热源，是一种技术上十分经济的方法。

（3）原料投入与排出：在高温消化过程中，原料的消化速率快，要求连续投入新料与排出消化液。

（4）消化物料的搅拌：高温厌氧消化过程要求对物料进行搅拌，以迅速消除邻近蒸汽管道区域的高温状态和保持全池温度的均一。

2. 自然消化工艺

自然温度厌氧消化是指在自然温度影响下消化温度发生变化的厌氧消化。目前我国农村都采用这种消化类型。

这种工艺的消化池结构简单、成本低廉、施工容易、便于推广。但该工艺的消化温度不受人为控制，基本上是随气温变化而不断变化，通常夏季产气率较高，冬季产气率较低，故其消化周期须视季节和地区的不同加以控制。

另外，根据投料运转方式，厌氧消化还可分为连续消化、半连续消化、两步消化等。

（四）厌氧消化装置

厌氧消化池亦称厌氧消化器。消化罐是整套装置的核心部分，附属设备有气压表、导气管、出料机、预处理设备（粉碎、升温、预处理池等）、搅拌器等。附属设备可以进行原料的处理，产气的控制、监测，以提高沼气的质量。

厌氧消化池的种类很多，按消化间的结构形式，有圆形池、长方形池；按贮气方式有气袋式、水压式和浮罩式。

第四节　固体废物的热处理

一、焚烧处理

（一）焚烧原理

1. 燃烧

通常把具有强烈放热效应、有基态和电子激发态的自由基出现、并伴有光辐射的化学反应现象称为燃

烧。燃烧过程可以产生火焰，而燃烧火焰又能在一定条件和适当可燃介质中自行传播。人们常说的燃烧一般都是指这种有焰燃烧。生活垃圾和危险废物的燃烧，即焚烧，是包括蒸发、挥发、分解、烧结、熔融和氧化还原等一系列复杂的物理变化和化学反应，以及相应传质和传热的综合过程。

进行燃烧必须满足三个基本条件：可燃物质、助燃物质和引燃火源，并在着火条件和温度下才会着火燃烧。着火是可燃物质与助燃物质由缓慢放热反应转变为强烈放热反应的过程。也就是可燃物质与助燃物质从缓慢的无焰反应变为剧烈的有焰氧化反应的过程。反之，从剧烈的有焰氧化反应向无焰反应状态过渡的过程就叫熄火。可燃物质着火必须满足一定的初始条件或边界条件，即着火条件。可燃物质着火实际是燃烧系统的热力学、动力学、流体力学等有关的各种因素共同作用的综合结果。

常见的燃烧着火方式有化学自燃燃烧、热燃烧、强迫点燃燃烧三种。生活垃圾和危险废物的焚烧处理，属于强迫点燃燃烧。当焚烧炉在启动点火时，可用电火花、火焰、炽热物体或热气流等引燃炉内的可燃物质。而在正常焚烧过程中，高温炉料和火焰自行传播就可正常点燃可燃物质，维持正常燃烧过程。

2. 燃烧机理

可燃物质燃烧，特别是生活垃圾的焚烧过程，是一系列十分复杂的物理变化和化学反应过程，通常可将焚烧过程划分为干燥、热分解、燃烧三个阶段。焚烧过程实际上是干燥脱水、热化学分解、氧化还原反应的综合作用过程。

（1）干燥：干燥是利用焚烧系统热能，使入炉固体废物水分汽化、蒸发的过程。按热量传递的方式，可将干燥分为传导干燥、对流干燥和辐射干燥三种方式。进入焚烧炉的固体废物，通过高温烟气、火焰、高温炉料的热辐射、热传导，首先进行加温蒸发、干燥脱水，以改善固体废物的着火条件和燃烧效果。因此，干燥过程需要消耗较多的热能。固体废物含水率的高低，决定了干燥阶段所需时间的长短，这在很大程度上也影响着固体废物焚烧过程。对于高水分固体废物，特别是污泥、废水等，为了蒸发、干燥、脱水和保证焚烧过程的正常运行，常常不得不加入辅助燃料。

（2）热分解：热分解是固体废物中的有机可燃物质，在高温作用下进行化学分解和聚合反应的过程。热分解既有放热反应，也可能有吸热反应。热分解的转化率，取决于热分解反应的热力学特性和动力学行为。通常热分解的温度越高，有机可燃物质的热分解越彻底，热分解速率就越快。热分解动力学服从Arrhenius规律。

（3）燃烧：燃烧是可燃物质的快速分解和高温氧化过程。根据可燃物质种类和性质的不同，燃烧过程亦不同，一般可分为蒸发燃烧、分解燃烧和表面燃烧三种机理。当可燃物质受热融化、形成蒸汽后进行燃烧反应，就属于蒸发燃烧；若可燃物质中的碳氢化合物等，受热分解、挥发为较小分子可燃气体后再进行燃烧，就是分解燃烧；而当可燃物质在未发生明显的蒸发、分解反应时，与空气接触就直接进行燃烧反应，这种燃烧则称为表面燃烧。在生活垃圾焚烧过程中，垃圾中的纸、木材类固体废物的燃烧属于较典型的分解燃烧过程；腊质类固体废物的燃烧可视为蒸发燃烧过程；而垃圾中的木炭、焦炭类物质燃烧，则属于较典型的表面燃烧过程。

完全燃烧或理论燃烧反应，可用如下反应式表示：

$$C_xH_yO_zN_uS_vCl_w+\left(x+v+\frac{y}{4}-\frac{w}{4}-\frac{z}{2}\right)O_2\longrightarrow xCO_2+wHCl+0.5uN_2+vSO_2+\frac{y-w}{2}H_2O$$

式中：$C_xH_yO_zN_uS_vCl_w$——可燃物质化学组成式。

经过焚烧处理，生活垃圾、危险废物和辅助燃料中的碳、氢、氧、氮、硫、氯等元素，分别转化成为碳氧化物、氮氧化物、硫氧化物、氯化物及水等物质组成的烟气，不可燃物质、灰分等成为炉渣。

焚烧炉烟气和炉渣是固体废物焚烧处理的最主要污染物。焚烧炉烟气由颗粒污染物和气态污染物组成。颗粒污染物主要是由于燃烧气体带出的颗粒物和不完全燃烧形成的灰分颗粒，包括粉尘和烟雾；粉尘是悬浮于气体介质中的微小固体颗粒、黑烟颗粒等，粒度多为 1 ~ 200 mm；烟雾是指粒度为 0.01 ~ 1 μm 的气溶胶。吸入的细小粉尘会深入人体肺部，引起各种肺部疾病。尤其是具有很大表面和吸附活性的黑烟颗粒、微细颗粒等，吸附有苯并芘等高毒性、强致癌物质，对人体健康具有很大危害性。

焚烧炉烟气的气态污染物种类很多，如 SO_x，CO_x，NO_x，HCl、HF、二噁英（PCDDs）类物质等。其

中，SO_x 主要来源于废纸和厨余垃圾，HCl 主要来源于废塑料。烟气中一部分 NO_x（热力型 NO_x）主要来源于空气中的氮，另一部分 NO_x（燃料型 NO_x）主要来源于厨余垃圾。而二噁英类物质，可能来源于固体废物中的废塑料、废药品等，或由其前驱体物质在焚烧炉内的焚烧过程中生成，也可能于特定条件下在炉外生成。

固体废物焚烧处理的产渣量及残渣性质，与固体废物种类、焚烧技术、管理水平等有关。通常固体废物焚烧处理的产渣量较小，如生活垃圾焚烧处理产渣率一般为 7% ~ 15%。固体废物焚烧残渣的化学组成主要是钙、硅、铁、铝、镁氧化物及重金属氧化物，物理性质和化学性质较为稳定。

3. 主要影响因素

固体废物焚烧处理过程是一个包括一系列物理变化和化学反应的过程，是一个复杂的系统工程。固体废物的焚烧效果，受许多因素的影响，如焚烧炉类型、固体废物性质、物料停留时间、焚烧温度、供氧量、物料的混合程度等。其中停留时间、温度、湍流度和空气过剩率就是人们常说的“3T + 1E”，它们既是影响固体废物焚烧效果的主要因素，也是反映焚烧炉工况的重要技术指标。

（1）固体废物性质：在很大程度上，固体废物性质是影响其是否适合于进行焚烧处理以及焚烧处理效果好坏的决定性因素。如固体废物中可燃成分、毒害物质、水分等物质的种类和含量，决定这种固体废物的热值、可燃性和焚烧污染物治理的难易程度，也就决定了这种固体废物焚烧处理的技术经济可行性。

进行固体废物焚烧处理，要求固体废物具有一定热值。固体废物热值越高，就越有利于焚烧过程的进行，越有利于回收利用固体废物焚烧热能或进行发电。一般城市生活垃圾的含水量≤50%，低位发热值多在3 350 ~ 8 374 kJ/kg 的范围。生活垃圾的组成具有非均质性和多变性，不同地区、不同季节、不同能源结构、不同经济发展水平等条件下，其生活垃圾的组成和性质有很大差异，这就给生活垃圾的焚烧处理造成一定困难。此外，固体废物的尺寸、形状、均匀程度等，在焚烧时也会表现出不同的热力学、动力学、物理变化和化学反应行为，对焚烧过程产生重要影响。

（2）焚烧温度：焚烧温度对焚烧处理的减量化程度和无害化程度有决定性的影响。焚烧温度对焚烧处理的影响，主要表现在温度的高低和焚烧炉内温度分布的均匀程度。在焚烧炉里的不同位置、不同高度，温度也可能不同。所以固体废物的焚烧效果也有差异。固体废物中的不少有毒、有害物质，必须在一定温度以上才能有效地进行分解、焚毁。焚烧温度越高，越有利于固体废物中有机污染物的分解和破坏，焚烧速率也就越快。因此，随着环保排放要求的提高，近年来固体废物的焚烧温度也有明显提高。

目前一般要求生活垃圾焚烧温度在 850 ~ 950 ℃，医疗垃圾、危险固体废物的焚烧温度要达到1 150 ℃。而对于危险废物中的某些较难氧化分解的物质，甚至需要在更高温度和催化剂作用下进行焚烧。

（3）停留时间：物料停留时间主要是指固体废物在焚烧炉内的停留时间和烟气在焚烧炉内的停留时间。固体废物停留时间取决于固体废物在焚烧过程中蒸发、热分解、化学反应速率的大小。烟气停留时间取决于烟气中颗粒状污染物和气态分子的分解、氧化、还原反应速率。当然在其他条件不变时，固体废物和烟气的停留时间越长，焚烧反应越彻底，焚烧效果就越好。但停留时间过长会使焚烧炉处理量减少，在经济上也不合理。反之，停留时间过短会造成固体废物和其他可燃成分的不完全燃烧。进行生活垃圾焚烧处理时，通常要求垃圾停留时间能达到 1.5 ~ 2 h 以上，烟气停留时间能达到 2 s 以上。

（4）供氧量和物料混合程度：焚烧过程的氧气是由空气提供的。空气不仅能够起到助燃的作用，同时也起到冷却炉排、搅动炉气以及控制焚烧炉气氛等作用。显然，供给焚烧系统的空气越多，越有利于提高炉内氧气的浓度，越有利于炉排的冷却、炉内烟气的湍流混合。但控制过大的过剩空气系数，可能会导致炉温降低、烟气量增大，对焚烧过程产生副作用，给烟气的净化处理带来不利影响，最终会提高固体废物焚烧处理的运行成本。

除固体废物性质、物料停留时间、焚烧温度、供氧量、物料的混合、炉气的湍流程度外，诸如固体废物料层厚度、运动方式、空气预热温度、进气方式、燃烧器性能、烟气净化系统阻力等，也会影响固体废物焚烧过程的进行，也是在实际生产中必须严格控制的基本工艺参数。

（二）固体废物热值

热值是指单位质量固体废物在完全燃烧时释放出来的热量。热值有两种表示方式，即高位热值（粗

热值）和低位热值（净热值）。若热值包含烟气中水的潜热，则该热值是高位热值（粗热值）。反之，若不包括烟气中水的潜热，则该热值就是低位热值（净热值）。

要使固体废物能维持正常焚烧过程，就要求其具有足够的热值。即在进行焚烧时，垃圾焚烧释放出来的热量足以加热垃圾，并使之到达燃烧温度所需要的热量或者发生燃烧所必需的活化能。否则，便需要添加辅助燃料才能维持正常燃烧。

计算热值有许多方法，如热量衡算法（精确法）、工程算法、经验公式法、半经验公式法。工程上常用下列公式近似计算燃烧物料的热值：

Dulong 公式：

$$HHV = 34\ 000w_C + 143\ 000\left(w_H - \frac{1}{8}w_O\right) + 10\ 500w_S \tag{5-3-44}$$

$$HHV = 2.32[14\ 000x_C + 45\ 000\left(x_H - \frac{1}{8}x_O\right) - 760\ x_{Cl} + 4\ 500\ x_S] \tag{5-3-45}$$

Steuer 公式：

$$HHV = 34\ 000\left(w_C - \frac{3}{8}w_O\right) + 23\ 800 \times \frac{3}{8}w_O + 144\ 200\left(w_H - \frac{1}{16}w_O\right) + 10\ 500w_S \tag{5-3-46}$$

化学工业便览公式：

$$HHV = 34\ 000w_C + 143\ 000\left(w_H - \frac{w_O}{2}\right) + 9\ 300w_S \tag{5-3-47}$$

式中：HHV——可燃物质的高位热值，kJ/kg；

w_C、w_H、w_S、w_O——分别为可燃物质中元素碳、氢、硫、氧的质量分数；

x_C、x_S、x_O、x_H、x_{Cl}——分别表示可燃物质中元素碳、硫、氧、氢、氯的摩尔分数。

高位热值（HHV）、低位热值（LHV）之间的相互关系，可用以下公式表示和近似计算：

$$HHV = LHV + Q_s \tag{5-3-48}$$

$$LHV = HHV - 2\ 420\left[w_{H_2O} + 9\left(w_H - \frac{w_{Cl}}{35.5} - \frac{w_F}{19}\right)\right] \tag{5-3-49}$$

式中：Q_s——烟气中水的潜热，kJ/kg（水）；

w_{H_2O}——可燃物质中水的质量分数；

w_{Cl}——可燃物质中元素氯的质量分数；

w_F——可燃物质中元素氟的质量分数。

干基热值、高位热值与低位热值之间的相互关系可用如下公式进行计算：

$$HHV_{(湿)} = HHV_{(干)} \times \frac{100 - w_{H_2O}}{100} \tag{5-3-50}$$

$$LHV_{(湿)} = HHV_{(湿)} - 24.4\left[w_{H_2O} + 9w_{H(干)} \times \frac{100 - w_{H_2O}}{100}\right] \tag{5-3-51}$$

式中：$HHV_{(干)}$——可燃物质的干基高位热值，kJ/kg；

$HHV_{(湿)}$——可燃物质的湿基高位热值，kJ/kg；

$LHV_{(湿)}$——可燃物质的湿基低位热值，kJ/kg；

$w_{H(干)}$——干基物料中元素氢的质量分数。

焚烧过程进行着一系列能量转换和能量传递，是一个热能和化学能的转换过程。固体废物和辅助燃料的热值、燃烧效率、机械热损失及各物料的潜热和显热等，决定了系统的有用热，最终也决定了焚烧炉的火焰温度和烟气温度。

在整个焚烧系统中，能量是守恒的，即：

$$Q_w + Q_f + Q_a = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \tag{5-3-52}$$

式中：Q_w——固体废物的热量，kJ；

Q_1——辅助燃料的热量，kJ；

Q_2——助燃空气的热量，kJ；

Q_3——有用热量，kJ；

Q_4——化学不完全燃烧热损失，kJ；

Q_5——机械热损失，kJ；

Q_6——烟气显热（含热量），kJ；

Q_7——灰渣显热（含热量），kJ。

（三）燃烧温度

许多有毒、有害可燃污染物质，只有在高温和一定条件下才能有效分解和破坏。维持足够高的焚烧温度和时间是确保固体废物焚烧减量化和无害化的基本前提。假如焚烧系统处于衡压、绝热状态，则焚烧系统所有能量都用于提高系统温度和物料的含热。该系统的最终温度称为理论燃烧温度或绝热燃烧温度。

实际燃烧温度可以通过系统能量平衡精确计算，也可利用经验公式进行近似计算：

$$LHV = \sum_{i=1}^{n} \int_{T_1}^{T_2} w_i c_{pi} \mathrm{d}T \approx \sum_{i=1}^{n} w_i c_{pi} (T_2 - T_1) \tag{5-3-53}$$

式中：LHV——系统的有用热量，kJ；

T_1——室温，K；

T_2——焚烧炉火焰温度，K；

w_i——烟气中第 i 种成分的质量分数；

c_{pi}——烟气各成分衡压热容，kJ/(kg·K)。

烟气组成往往十分复杂，给上式的应用造成困难。若以烃类化合物替代固体废物，并设 25 ℃烃类化合物燃烧时每产生 4.18 kJ 低位热值约需 1.5×10^{-3}kg 理论空气，则：

$$m_{理空} = 1.5 \times 10^{-3} \times \frac{LHV}{4.18} = 3.59 \times 10^{-4} LHV \tag{5-3-54}$$

式中：$m_{理空}$——理论空气量，kg。

如果烃类化合物和辅助燃料完全燃烧、总量以 1 kg 计。烟气各组成成分在燃烧温度范围内的衡压热容均为 1.254 kJ/(kg·K)，并且假设低位热值就等于有用热，则低位热值与焚烧火焰温度之间的关系可进行简化为：

$$LHV = m_{烟}\, c_p (T_2 - T_1)$$

或：

$$LHV = m_{理烟} c_p (T_2 - T_1) + m_{过空} c_p (T_2 - T_1) \tag{5-3-55}$$

式中：$m_{烟}$——烟气质量；

$m_{理烟}$——理论烟气质量；

c_p——近似热容，4.18 kJ/(kg·K)；

$m_{过空}$——过剩空气质量。

如果空气过剩率为 $EA = \dfrac{m_{过空}}{m_{理空}}$，即可用下式近似计算焚烧炉火焰温度 T：

$$T = \frac{LHV}{1.254[1 + 3.59 \times 10^{-4} LHV(1 + EA)]} + 298\mathrm{K} \tag{5-3-56}$$

【例 5-3-4】 某含萘、甲苯和氯苯的混合物，用 50% 过量空气在 1 120 ℃焚烧。最终主要有害有机物的去除率合格。试利用近似计算法计算当空气过量率为 0%、50%、100% 时的绝热火焰温度。

解：以 1 kg 废物为基准，产生的 $LHV = 9\,832$ kJ

$EA = 0\%$

$$T = \frac{9\,832}{1.254[1 + (1+0)(3.59 \times 10^{-4} \times 9\,832)]}\ \mathrm{K} + 298\ \mathrm{K} = 2\,029\ \mathrm{K} = 1\,755\ ℃$$

$EA = 50\%$

$$T = \frac{9\ 832}{1.254[1 + (1 + 50\%)(3.59 \times 10^{-4} \times 9\ 832)]}\ \mathrm{K} + 298\ \mathrm{K} = 1\ 544\ \mathrm{K} = 1\ 271\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

$EA = 100\%$

$$T = \frac{9\ 832}{1.254[1 + (1 + 100\%)(3.59 \times 10^{-4} \times 9\ 832)]}\ \mathrm{K} + 298\ \mathrm{K} = 1\ 271\ \mathrm{K} = 998\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

（四）空气和烟气量计算

1. 空气量

空气中氧是助燃物质，它与固体废物中可燃成分反应后形成烟气。完成燃烧反应的最少空气量就是理论空气量，即化学计量的空气量。计算理论空气量和实际空气量有许多公式，如先利用可燃物料中碳、氢、硫、氧等元素的含量来计算焚烧需要的理论空气量，然后再通过空气过剩系数计算出实际空气量，即空气量。计算公式如下：

$$V_{理氧} = (1.866w_C + 5.56w_H + 0.7w_S - 0.7w_O) \times \frac{1}{100} \tag{5-3-57}$$

$$V_{理空} = \frac{V_{理氧}}{0.21} = 0.088\ 9w_C + 0.265w_H + 0.033\ 3w_S - 0.033\ 3w_O \tag{5-3-58}$$

式中：$V_{理氧}$——焚烧理论氧气量，m^3/kg；

$V_{理空}$——焚烧理论空气（干）量，m^3/kg；

w_C、w_H、w_S、w_O——分别为可燃物质中元素碳、氢、硫、氧的质量分数。

若过剩空气系数为：$\lambda = \frac{V_{空}}{V_{理空}}$，

则实际空气为：$V_{空} = \lambda \cdot V_{理空}$

2. 烟气量

计算焚烧烟气量，常常是首先利用烟气的成分和经验公式计算出理论烟气量，然后再通过过剩空气系数计算烟气量。计算公式如下：

$$V_{理烟} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} \tag{5-3-59}$$

其中：$V_{CO_2} = 0.001\ 866w_C$

$V_{SO_2} = 0.007w_S$

$c_{pg} = 0.333\ \mathrm{kcal}$①$/(m^3 \cdot ^{\circ}\mathrm{C})$

式中：V_{CO_2}——烟气 CO_2 理论量，m^3/kg；

V_{SO_2}——烟气 SO_2 理论量，m^3/kg；

V_{N_2}——烟气 N_2 理论量，m^3/kg；

V_{H_2O}——烟气 H_2O 理论量，m^3/kg；

w_C、w_H、w_S、w_N、w_{H_2O}——分别为可燃物质中元素碳、氢、硫、氮及水的质量分数。

由理论烟气量和过剩空气系数可求得烟气量：

$$V = (\lambda - 0.21)V_{理空} + 1.867w_C + 11.2w_H + 0.7w_S + 0.8w_N + 1.244w_{H_2O} \tag{5-3-60}$$

或：

$$V = V_{理烟} + (\lambda - 1)V_{理空} + 0.016(\lambda - 1)V_{理空}$$

式中：V——湿烟气量，m^3/kg；

$V_{理烟}$——理论烟气量，m^3/kg；

$V_{理空}$——理论空气量，m^3/kg；

---

① 1 cal = 4.184 J。

λ——过剩空气系数，$\lambda = \frac{V_{空}}{V_{理空}}$。

（五）焚烧工艺

就不同时期、不同炉型，以及不同的固体废物种类和处理要求而言，固体废物焚烧技术和工艺流程也各不相同，如间歇焚烧、连续焚烧、固定炉排焚烧、流化床焚烧、回转窑焚烧、机械炉排焚烧、单室焚烧、多室焚烧等。不同焚烧技术和工艺流程，有着各自不同的特点。

目前大型现代化生活垃圾焚烧技术的基本过程大体相同，现代化生活垃圾焚烧工艺流程主要由前处理系统、进料系统、焚烧炉系统、空气系统、烟气系统、灰渣系统、余热利用系统及自动化控制系统组成。

1. 工艺过程

（1）前处理系统：固体废物焚烧的前处理系统，主要包括固体废物的接受、贮存、分选或破碎，如固体废物运输、计量、登记、进场、卸料、混料、破碎、手选、磁选、筛分等。前处理系统的设备、设施和构筑物，主要包括车辆、地衡、控制间、垃圾池、吊车、抓斗、破碎和筛分设备、磁选机，以及臭气和渗滤液收集、处理设施等。

（2）进料系统：进料系统的主要作用是向焚烧炉定量给料，同时要将垃圾池中的垃圾与焚烧炉的高温火焰和高温烟气隔开、密闭，以防止焚烧炉火焰通过进料口向垃圾池垃圾反烧和高温烟气反窜。

目前应用较广的进料方法有炉排进料、螺旋给料、推料器给料几种形式。

（3）焚烧炉系统：焚烧炉系统是整个工艺的核心系统，是固体废物进行蒸发、干燥、热分解和燃烧的场所。焚烧炉系统的核心装置就是焚烧炉。焚烧炉有多种炉型，如固定炉排焚烧炉、水平链条炉排焚烧炉、倾斜机械炉排焚烧炉、回转式焚烧炉、流化床焚烧炉、立式焚烧炉、气化热解炉、气化熔融炉、电子束焚烧炉、离子焚烧炉、催化焚烧炉等。

在现代生活垃圾焚烧工艺中，应用最多的是水平链条炉排焚烧炉和倾斜机械炉排焚烧炉。

焚烧炉炉排有效面积和燃烧室有效容积可分别按以下公式计算：

$$A = \max\left\{\frac{Q}{Q_{热}}, \frac{m}{Q_{质}}\right\} \tag{5-3-61}$$

$$V = \max\left\{\frac{Q}{Q_{体热}}, G\theta_{烟}\right\} \tag{5-3-62}$$

式中：A——炉排有效面积，m^2；

$Q_{质}$——炉排机械负荷，$kg/(m^2 \cdot h)$；

$Q_{热}$——炉排热力负荷，$kJ/(m^2 \cdot h)$；

Q——单位时间固体废物和燃料低位发热值，kJ/h；

$Q_{体热}$——燃烧室容积热力负荷，$kJ/(m^3 \cdot h)$；

m——单位时间垃圾和燃料质量，kg/h；

V——燃烧室有效容积，m^3；

G——烟气体积流量，$G = \frac{\gamma m}{3\,600\rho}$，$m^3/s$（其中 γ 为烟气产率，kg/kg，ρ 为烟气密度，kg/m^3）；

$\theta_{烟}$——烟气停留时间，s。

焚烧炉系统的固体废物和烟气停留时间，可用下式计算：

$$\theta_{烟} = \int_0^V \mathrm{d}\left(\frac{V}{q_{V空}}\right) \tag{5-3-63}$$

$$\theta_{固} = \frac{Q'm'}{Q_{体热}V} \tag{5-3-64}$$

式中：$q_{V空}$——空气量，m^3/s；

m'——垃圾和燃料质量，kg；

$\theta_{固}$——固体停留时间，$\theta_{固} \geqslant 1.5 \sim 2$ h；

$\theta_{烟}$——烟气停留时间，$\theta_{烟} \geq 2$ s；

Q'——单位质量固体废物和燃料热值，kJ/kg。

不同类型生活垃圾焚烧炉的典型热负荷及过剩空气系数，可参见表5-3-4。

现代生活垃圾焚烧工艺的焚烧炉火焰温度一般为850～1 050 ℃，焚烧炉炉排的机械负荷和热负荷分别在150～400 kg/(m^2 · h)和(1.25～3.75)×10^6kJ/(m^2 · h)范围，焚烧炉允许的负荷变化范围一般为60%～110%，燃烧室出口烟气CO浓度小于60 mg/m^3_N，燃烧室出口烟气O_2的体积分数为8%～16%。

表5-3-4 焚烧炉典型热负荷及过剩空气系数

炉　型	热　负　荷	过剩空气系数/%
机械炉	150 000～400 000 kJ/(m^2 · h)	150～200
流化床炉	350 000～500 000 kJ/(m^2 · h)	40～60
气体废物	3 000 000～10 000 000 kJ/(m^3 · h)	10～15
液体废物	1 000 000～3 000 000 kJ/(m^3 · h)	15～30
多室焚烧炉	300 000～400 000 kJ/(m^3 · h)	100～200
滚筒炉	500 000～1 500 000 kJ/(m^3 · h)	100

(4) 空气系统：空气系统，即助燃空气系统，是焚烧炉非常重要组成部分。空气系统除了为固体废物的正常焚烧提供必需的助燃氧气外，还有冷却炉排、混合炉料和控制烟气气流等作用。

助燃空气可分为一次助燃空气和二次助燃空气。一次助燃空气是指由炉排下送入焚烧炉的助燃空气，即火焰下空气。一次助燃空气约占助燃空气总量的60%～80%，主要起助燃、冷却炉排搅动炉料的作用。一次助燃空气分别从炉排的干燥段（着火段）、燃烧段（主燃烧段）和燃烬段（后燃烧段）送入炉内，气量分配大致约为15%、75%和10%。火焰上空气和二次燃烧室的空气属于二次助燃空气。二次助燃空气主要是为了助燃和控制气量的湍流程度。二次助燃空气一般约为助燃空气总量的20%～40%。

部分一次助燃空气可从垃圾池上方抽取，以防治垃圾池臭气对环境的污染。为了提高助燃空气的温度，常常将助燃空气通过设置在余热锅炉之后的换热器进行预热。预热助燃空气不仅能够改善焚烧效果，而且能够提高焚烧系统的有用热，有利于系统的余热回收。预热空气温度的高低主要取决于生活垃圾的热值和烟气余热利用的要求，通常要求预热空气的温度为200～280 ℃。

空气系统的主要设施是通风管道、进气系统、风机和空气预热器等。

(5) 烟气系统：焚烧炉烟气是固体废物焚烧炉系统的主要污染源。焚烧炉烟气含有大量颗粒状污染物质和气态污染物质。烟气系统的目的就是去除烟气中的这些污染物质，并使之达到国家有关排放标准的要求，最终排入大气。

烟气中的颗粒状污染物质，即各种烟尘，主要可通过重力沉降、离心分离、静电除尘、袋式过滤等技术手段去除；而烟气中的气态污染物质，如SO_x、NO_x、HCl及有机气体物质等，则主要是利用吸收、吸附、氧化还原等技术途径净化。

烟气净化处理是防治固体废物焚烧二次环境污染的关键。国家现行有关标准对焚烧烟气排放作出了明确规定。

氯化物、硫氧化物、氟化氢的去除工艺可分为干法、半干法和湿法工艺三类。干法工艺是将石灰粉喷入烟气净化反应器，使之与氯化物、硫氧化物、氟化氢等酸性气体接触反应而生成固态物质，干法工艺对氯化氢的去除率一般为80%～90%；半干法工艺是将限量的一定浓度的石灰浆喷入烟气净化反应器，使之与酸性气体接触反应而去除，同时石灰浆的水分被烟气加热蒸发，该法对氯化氢的去除率可高达98%～99%以上；而湿法工艺是将过量的石灰浆喷入烟气净化反应器，净化烟气中酸性气体。

湿法工艺通常对烟气中污染物有很高的去除率，但经过湿法处理的烟气往往温度较低、湿度较高，这可能会给后续的布袋过滤处理造成困难。此外，湿法净化工艺不可避免地存在废水处理问题。目前，由于半干法烟气净化工艺具有对酸性气体去除率高、系统简单、设备成熟、零废水排放等特点，在生活垃圾焚

烧处理中得到了广泛应用。

二噁英类物质（PCDDs）是已知的毒性最大的物质之一。二噁英类物质主要有两类，第一类是氯苯并二噁英（TCDDs），有 75 种化合物，其中毒性最大的是 2，3，7，8－四氯二苯并二噁英（2，3，7，8－TCDDs）；第二类是二苯呋喃类物质（PCDFs），共有 135 种物质。在生活垃圾焚烧过程中，特定条件下有可能生成二噁英类物质，对大气环境造成污染。

虽然二噁英类物质生成的机理非常复杂，但就生活垃圾焚烧而言，二噁英类物质生成的可能途径主要有三个：一是在生活垃圾中可能含有微量二噁英类物质或其前驱体物质，当焚烧不完全时这些物质会进入焚烧烟气；二是在垃圾焚烧过程中，一些二噁英类物质的前驱体物质等可能会反应生成二噁英类物质，在焚烧不完全时进入烟气；三是炉外生成二噁英类物质，即二噁英类物质前驱体物质和分解的二噁英类物质的化合物，在适当温度（300～500 ℃）和催化剂（如烟尘中的铜等过渡金属物质）存在的条件下，可能会重新反应合成二噁英类物质。

根据二噁英类物质生成的机理和可能途径，通常控制二噁英类物质可采用以下三种措施：一是严格控制焚烧炉燃烧室温度和固体废物、烟气的停留时间，确保固体废物及烟气中有机气体，包括二噁英类物质前驱体物质的有效焚毁率；二是减少烟气在 200～500 ℃温度段的停留时间，以避免或减少二噁英类物质的炉外生成；三是对烟气进行有效的净化处理，以去除可能存在的微量二噁英类物质，如利用活性炭或多孔性吸附剂等净化去除二噁英类物质。

根据焚烧炉烟气成分和处理要求，常用的烟气处理技术有旋风除尘、静电除尘、湿式洗涤、半干式洗涤、干式洗涤、布袋过滤、活性炭吸附等。有时还设有催化脱销、烟气再加热和减振降噪等设施。

焚烧炉烟气处理系统的主要设备、设施有沉降室、旋风除尘器、静电除尘器、洗涤塔、布袋过滤器等。

（6）其他工艺系统：除以上工艺系统外，固体废物焚烧系统还包括灰渣系统、废水处理系统、余热系统、发电系统、自动化控制系统等。

灰渣系统的主要作用有灰渣收集、冷却、加湿处理、贮运、处理处置和资源化。灰渣系统的主要设备、设施有灰渣漏斗、渣池、排渣机械、滑槽、水池或喷水器、抓提设备、输送机械、磁选机等。

2. 焚烧炉系统

焚烧炉系统的主体设备是焚烧炉，包括受料斗、饲料器、炉体、炉排、助燃器、出渣和进风装置等设备、设施。目前在垃圾焚烧中应用最广的生活垃圾焚烧炉，主要有机械炉排焚烧炉、流化床焚烧炉和回转窑焚烧炉三种类型。另外，还有多种不同种类的其他焚烧炉，适合于处理不同性质的固体废物和不同的技术、经济要求。

部分焚烧炉的优缺点比较如表 5－3－5 所示。

表 5－3－5　部分焚烧炉的特点

炉　型	优　点	缺　点
机械焚烧炉	容量大（单炉容量达 100～500 t/d）、效率高、焚烧彻底、公害易处理、燃烧稳定、控管容易、余热利用高	造价高、技术复杂、维修费高，需连续运转、运行管理要求高
回转式焚烧炉	垃圾搅拌及干燥性好、可适用中小容量（单炉容100～400 t/d）、可高温安全燃烧，残灰颗粒小	连续传动装置复杂、炉内的耐火材料易损坏
控气式焚烧炉	适用中小容量（单炉容量 150 t/d）、构造简单、装置可移动、机动性强	燃烧不完全、燃烧效率低、使用年限短、平均建造成本较高
流化床焚烧炉	容量适中（单炉容量 50～200 t/d）、燃烧温度较低（750～850 ℃）、热传导好、公害低、燃烧效率高	操作技术高、燃料种类受到限制、进料颗粒较小、单位处理量所需动力高、炉床材料易冲蚀损坏
垃圾衍生燃料焚烧炉	适用大容量（单炉容 200～750 t/d）焚烧、余热利用率高、可资源回收	造价昂贵、设备构造复杂、技术复杂、不适合高水分垃圾

（六）焚烧效果评价

在实际固体废物焚烧处理过程中，焚烧效果是否达到设计要求和有关规定要求，是人们最关心的问题。因此，焚烧效果是焚烧处理最基本、最重要的技术指标之一。

评价焚烧效果的方法很多，如热灼减量法、二氧化碳法及有害有机物破坏去除率等。

1. 热灼减量法

在固体废物焚烧过程中，可燃物质氧化、焚毁越彻底，焚烧灰渣中残留的可燃成分也就会越少，即灰渣的热灼减量就越小。因此，可以用焚烧灰渣的热灼减量来评价固体废物焚烧效果：

$$MRC = \frac{m - m_{灰}}{m - m_{渣}} \tag{5-3-65}$$

或：

$$R_c = \frac{m_{渣} - m_{灰}}{m_{渣}} \times 100\% \tag{5-3-66}$$

式中：MRC——热灼减量比；

R_c——热灼减量率；

m——固体废物的质量，kg；

$m_{灰}$——固体废物焚烧灰渣经 600 ℃ ±25 ℃，3 h 灼烧后的质量，kg；

$m_{渣}$——固体废物焚烧灰渣的质量，kg。

通常，生活垃圾焚烧炉设计时的炉渣热灼减量为 5% 以下，大型连续化作业机械焚烧炉的炉渣热灼减量设计为 3% 以下。

2. 二氧化碳法

在固体废物焚烧烟气中，物料中的碳会转化为一氧化碳或二氧化碳。固体废物焚烧得越完全，二氧化碳的相对浓度就越高，即焚烧效率就越高。因此，可以利用一氧化碳和二氧化碳浓度或分压的相对比例，反映固体废物中可燃物质在焚烧过程的氧化、焚毁程度：

$$E = \frac{C_{CO_2}}{C_{CO_2} + C_{CO}} \times 100\% \tag{5-3-67}$$

式中：E——焚烧效率；

C_{CO}，C_{CO2}——分别为焚烧烟气中 CO、CO_2的含量。

3. 有害有机物破坏去除率

对于生活垃圾和危险废物的焚烧处理，也可以用烟气、灰渣中的有害有机物含量的多少来评价焚烧效果，如有害有机物破坏去除率：

$$DRE = \frac{m_{in} - m_{out}}{m_{in}} \times 100\% \tag{5-3-68}$$

式中：DRE——有害有机物破坏去除率；

m_{in}——固体废物中某种有害有机物的质量；

m_{out}——焚烧灰渣中某种有害有机物的质量。

【例 5-3-5】 试计算在 800 ℃的焚烧炉中焚烧氯苯，当 DRE 为 99% 的停留时间（氯苯的 A 和 E 分别为：$A = 1.34 \times 10^{17} s^{-1}$；$E = 320\ 188\ kJ \cdot mol^{-1}$）。

解： 视焚烧炉中氯苯的焚烧过程为一级反应。

在 800 ℃的反应速率常数 k 为：

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} = 1.34 \times 10^{17} \cdot e^{-\frac{320\ 188}{8.314 \times 1\ 073}} s^{-1} = 34.633\ s^{-1}$$

$$t_{99\%} = -\frac{1}{34.633} \ln\left(\frac{0.01}{1}\right) s = 0.13\ s$$

二、固体废物的热解处理

（一）热解原理

1. 热解的定义和特点

所谓热解，是将有机物在无氧或缺氧状态下加热，使之成为气态、液态或固态可燃物质的化学分解过程。

热解与焚烧二者的区别是：焚烧是需氧氧化反应过程，热解是无氧或缺氧反应过程；焚烧是放热的，热解是吸热的；焚烧的主要产物是二氧化碳和水，热解的产物主要是可燃的低分子化合物；焚烧产生的热能一般就近直接利用，而热解生成的产物诸如可燃气、油及炭黑等则可以储存及远距离输送。

与焚烧相比，固体废物热解的主要特点是：

（1）可将固体废物中的有机物转化为以燃料气、燃料油和炭黑为主的储存性能源；

（2）由于是缺氧分解，排气量少，因此，采用热解工艺有利于减轻对大气环境的二次污染；

（3）废物中的硫、重金属等有害成分大部分被固定在炭黑中；

（4）由于保持还原条件，Cr^{3+} 不会转化为 Cr^{6+}；

（5）NO_x 的产生量少。

2. 热解的过程及产物

固体废物的热解是一个非常复杂的化学反应过程，其包含了大分子键的断裂，异构化和小分子的聚合等反应，最后生成较小的分子。热解反应过程可用下述通式表示：

$$\text{有机固体废物} \xrightarrow{\triangle} \text{气体}(H_2、CH_4、CO、CO_2) + \text{有机液体}(\text{有机酸、芳烃、焦油}) + \text{固体}(\text{炭黑、灰渣})$$

以纤维素分子为例，其热解产物如下：

$$3(C_6H_{10}O_5) \longrightarrow 8H_2O + C_6H_8O(\text{可燃油}) + 2CO\uparrow + 2CO_2\uparrow + CH_4\uparrow + H_2\uparrow + 7C$$

固体废物热解能否获得高能量产物，取决于废物中氢转化为可燃气体与水的比例。对一般固体燃料，所有的氧与氢结合成水以后，所余氢元素与碳元素的比值（H/C 值）约在 0～0.5 之间。美国城市垃圾的 H/C 值位于泥煤和褐煤之间；而日本城市垃圾的 H/C 值则高于固体燃料，这主要是由于日本城市垃圾中的塑料含量相对较高的原因。

由于热解残留物中含有 H、O 和其他元素，同时热解过程还会发生一氧化碳、二氧化碳等生成反应，所以碳的含量大小视不同的热解过程而定，不能简单地以 H/C 值来评价城市垃圾的热解效果。如果热解的残留物中含有卤素、硫、氮等，随着温度升高，这些成分更趋于表现为挥发分，使固体废物热解产生更多的挥发性物质；反之，降低温度则会增加碳的比例。

当有机物的成分不同时，整个热解过程的起始温度也不同。例如，纤维素开始热解的温度大约在 180～200 ℃，而煤热解的起始温度随煤质的不同约在 200～400 ℃之间。

废物热解是一个非常复杂、同时且连续的物理化学反应过程，不同的温度区间进行的反应过程有所不同，生成的产物组成也不相同。在这个反应中将出现有机物断链、异构等反应。其热解的中间产物一方面进行大分子裂解成小分子直至气体的过程，另一方面又使小分子聚合成较大的分子。

（二）热解工艺

固体废物的热分解过程，由于供热方式、产品状态、热解炉结构等方面的不同，其热解方式也各不相同。

热解工艺的主要分类方法如下：

1. 按供热方式分

热解工艺可分为直接加热法和间接加热法。

（1）直接加热法：热解反应所需的热量是被热解物直接燃烧或向热解反应器提供的补充燃料燃烧产

生的热。

（2）间接加热法：将被热解物料与直接供热介质在热解反应器中分离开的一种热解方法。

2. 按热解温度的不同分

热解工艺可分为高温热解、中温热解和低温热解。

（1）高温热解：热解温度一般在1 000 ℃以上，其加热方式一般采用直接加热法。

（2）中温热解：其热解温度一般在600～700 ℃之间，主要用在比较单一的物料进行能源和资源回收的工艺上，如废橡胶、废塑料热解为类重油物质的工艺。

（3）低温热解：热解温度一般在600 ℃以下，农林产品加工后的废物生产低硫低灰炭时就可采用这种方法，其产品可用作不同等级的活性炭和水煤气原料。

3. 按热解炉的结构分

热解工艺可分为固定床、移动床、流化床和旋转炉等。

4. 按热解产物的物理形态分

热解工艺可分为气化方式、液化方式和炭化方式。

5. 按热分解与燃烧反应是否在同一设备中进行分

热解工艺可分为单塔式和双塔式。

6. 按热解过程是否生成炉渣分

热解工艺可分为造渣型和非造渣型。

（三）典型固体废物的热解

1. 城市垃圾的热解

目前，用于城市垃圾的热解技术主要有：移动床熔融炉方式、回转窑方式、流化床方式、多段炉方式及 Flush Pyrolysis 方式等。在这些热解方式中，回转窑方式和 Flush Pyrolysis 方式是最早开发的城市垃圾热解技术，代表系统有 Landgard 系统和 Occidental 系统。多段炉方式主要用于含水率较高的有机污泥的处理。流化床方式有单塔式和双塔式两种，其中双塔式流化床已经达到了工业化生产的规模。在上述热解方式中，移动床熔融炉方式是城市垃圾热解技术中最成熟的方法，其代表性系统有新日铁系统、Purox 系统和 Torrax 系统等。

2. 废塑料的热解

塑料种类繁多，不同塑料的热解过程和生成物因塑料的种类不同而有较大差异。有研究发现，对 PE、PP、PS、PVC 4 种塑料进行直接热解，在500 ℃左右可获得较高比率的液态烃或苯乙烯单体，而低于或高于该温度都会发生分解不完全或液态烃产生率低的现象。

催化剂是影响热解的关键因素，绝大多数废塑料的热解过程均加入了催化剂。目前使用的催化剂种类主要有硅铝类化合物和 H—Y、ZSM—5、REY、Ni/REY 等各种沸石催化剂。

目前国内外废塑料热解反应器种类较多，主要有槽式（聚合浴、分解槽）、管式（管式蒸馏、螺旋式）、流化床式等。

槽式反应器的特点是在槽内的分解过程中进行混合搅拌，物料混合均匀，采用外部加热，靠温度来控制成油形状。该法物料的停留时间较长，加热管表面析出炭后会造成传热不良，须定期清理排出。

管式反应器也采用外加热方式。管式蒸馏先用重油溶解或分解废塑料，然后再进入分解炉；螺旋式反应器则采用螺旋搅拌，传热均匀，分解速率快，但对分解速率较慢的聚合物不能完全实现轻质化。

流化床反应器一般是通过螺旋加料器定量加入废塑料，使其与固体小颗粒热载体（如石英砂）和下部进入的流化气体（如空气）混合在一起形成流态化，分解成分与上升气流一起导出反应器，经除尘冷却后制成燃料油。此类反应器采用部分塑料燃烧的内部加热方式，具有原料不需熔融、热效率高、分解速率快等优点。

废塑料热解的基本工艺有两种，一种是将废塑料加热熔融，通过热解生成简单的碳氢化合物，然后在催化剂的作用下生成可燃油品。另一种则将热解与催化热解分为两段。

一般而言，废塑料热解工艺主要由前处理—熔融—热解—油品回收—残渣处理—中和处理—排气处理7道工序组成。其中合理确定废塑料热解温度范围是工艺设计的关键。

目前，流化床热分解技术有待解决的问题是：热解原料的分散不够均匀，颗粒与气体的热交换效率低，管线容易结焦等。

3. 污泥的热解

（1）污泥热解的特点：与目前常用的污泥焚烧工艺相比，污泥热解的主要优点是操作系统封闭，污泥减容率高，无污染气体排放，几乎所有的重金属颗粒都残留在固体剩余物中，在热解的同时还可实现能量的自给和资源的回收，因而是一种非常有前途的污泥处理方法和资源化技术。

将干燥污泥放入保持一定温度的反应管中，最终可得到可燃性气体、常温下为液态的燃料油和焦油、包括炭黑在内的残渣等。

（2）污泥热解工艺：污泥热解的炉型通常采用竖式多段炉，为了提高热解炉的热效率，在能够控制二次污染物（Cr^{6+}、NO_x）的产生的范围内，尽可能采用较高的燃烧率（空燃比0.6～0.8）。此外，热解产生的可燃气体及NH_3、HCN等有害气体组分必须经过二次燃烧以实现无害化。对二燃室排放的高温气体还应进行预热回收，回收的热量应主要用于脱水泥饼的干燥。

污泥热解的主要工序包括：污泥脱水—干燥—热解—炭灰分离—油气冷凝—热量回收—二次污染防治等过程。在该系统中，泥饼首先通过蒸汽干燥装置将含水率降至30%，然后直接投入竖式多段热解炉内，通过控制助燃空气量（部分燃烧方式），使污泥发生热解反应。将热解产生的可燃气体和干燥器排气混合后进入二燃室高温燃烧，使二燃室后部的余热锅炉产生蒸汽，作为泥饼干燥的热源。该系统的处理能力为5 t/d（含水率75%的泥饼）。

（3）污泥的低温热解：目前正在发展一种新的热能利用技术——低温热解。即在400～500 ℃、常压和缺氧条件下，借助污泥中所含的硅酸铝和重金属（尤其是铜）的催化作用，将污泥中的脂类和蛋白质转变成碳氢化合物，最终产物为燃料油、气和炭。热解生成的油还可用来发电。

4. 废橡胶的高温热解

（1）橡胶热解的基本过程：废橡胶的热解依靠外部加热打开化学键，使有机物分解、汽化和液化。橡胶的热解温度一般在250～500 ℃之间。当温度高于250 ℃后，废橡胶分解出的液态油和气体随温度的升高而增加；温度超过400 ℃后，根据热解方法的不同，液态油和固态炭黑逐步减少，而气态物质则逐步增加。

典型废轮胎的热解工艺如下：轮胎破碎—分（磁）选—干燥预热—橡胶热解—油气冷凝—热量回收—废气净化。

（2）废橡胶的热解产物：废橡胶（如废轮胎）的热解产物非常复杂，根据德国汉堡大学的研究，轮胎热解得到的产物中，按质量计，气体占22%、液体占27%、炭灰占39%、钢丝占12%。

气体组成中主要为甲烷（15.13%）、乙烷（2.95%）、乙烯（3.99%）、丙烯（2.5%）、一氧化碳(3.8%)，水、二氧化碳、氢气和丁二烯也占一定比例。液体组成中主要是苯（4.75%）、甲苯（3.62%）和其他芳香族化合物（8.5%）。在气体和液体中还有微量的硫化氢和噻吩，但硫含量都低于相关标准值。

热解产品组成随热解温度的不同而略有变化，温度增加时，气体和固态碳含量增加，而油品则在逐步减少。

第五节　典型固体废物的资源化与综合利用

一、冶金及电力工业废渣的利用

（一）冶金及电力工业废渣种类及其性质

冶金工业废渣主要包括高炉矿渣、钢渣、铁合金渣、赤泥等固体废物；电力工业废渣则主要包括粉煤

灰及燃煤炉渣等。

1. 高炉矿渣

高炉矿渣是指冶炼生铁时从高炉中排放出来的废物。

(1) 高炉矿渣的分类：目前，高炉矿渣主要按下属两种方法进行分类。按照冶炼生铁的品种分类：①铸造生铁矿渣，指冶炼铸造生铁时排出的矿渣；②炼钢生铁矿渣，指冶炼炼钢生铁时排出的矿渣。

按照矿渣的碱度进行分类：高炉矿渣的化学成分中，碱性氧化物与酸性氧化物的比值，称为高炉矿渣的碱度或碱性率，一般用 Mo 表示，即：

$$Mo = \frac{w_{CaO} + w_{MgO}}{w_{SiO_2} + w_{Al_2O_3}}$$

在冶炼炼钢生铁和铸造生铁中，当炉渣中的 $w_{Al_2O_3}$ 和 w_{MgO} 含量变化不大时，炉渣碱度用 w_{CaO} 与 w_{SiO_2} 的比值表示，并将其表示为下述三类：

①碱性矿渣 $Mo > 1$；②酸性矿渣 $Mo < 1$；③中性矿渣 $Mo = 1$

(2) 高炉矿渣的化学组成：高炉矿渣的化学成分包括二氧化硅、三氧化二铝、氧化钙、氧化镁、氧化锰、氧化铁等 15 种以上的化学成分。其中氧化钙、二氧化硅、三氧化二铝便占到了大约 90% 以上。表 5-3-6 所示为我国高炉矿渣的化学成分统计表。

表 5-3-6 我国高炉矿渣的化学成分

单位：%

名称	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	Fe_2O_3	TiO_2	V_2O_5	S	F
普通渣	38 ~ 49	26 ~ 42	6 ~ 17	1 ~ 13	0.1 ~ 1	0.15 ~ 2			0.2 ~ 1.5	
高钛渣	23 ~ 46	20 ~ 35	9 ~ 15	2 ~ 10	< 1		20 ~ 29	0.1 ~ 0.6	< 1	
锰钛渣	28 ~ 47	21 ~ 37	11 ~ 24	2 ~ 8	5 ~ 23	0.1 ~ 1.7			0.3 ~ 3	
含氟渣	35 ~ 45	22 ~ 29	6 ~ 8	3 ~ 7.8	0.15 ~ 0.19					7 ~ 8

2. 钢渣

钢渣是炼钢过程中排出的废渣，主要由铁水和废钢中的元素氧化后生成的氧化物、金属炉料带入的杂质、加入的造渣剂和氧化剂、被侵蚀的炉衬及补炉材料等组成。钢渣的产生量一般约占粗钢产量的 15% ~ 20%。

(1) 钢渣的分类：按炼钢炉型分：可分为转炉钢渣、平炉钢渣、电炉钢渣。按生产阶段分：可分为电炉渣——氧化渣、还原渣；平炉渣——初期渣、后期渣。按化学性质分：可分为碱性渣、酸性渣。

(2) 钢渣的化学及矿物组成：钢渣的化学成分主要为铁、钙、硅、镁、铝、锰、磷等元素的氧化物，其中钙、铁、硅的氧化物占绝大部分。

钢渣呈黑色，外观像水泥熟料，其中夹带部分铁粒，硬度较大，密度为 1 700 ~ 2 000 kg/m^3，其成分组成基本稳定。钢渣的主要矿物组成为橄榄石（$2FeO \cdot SiO_2$）、硅酸二钙（$2CaO \cdot SiO_2$）硅酸三钙（$3CaO \cdot SiO_2$）、铁酸二钙（$2CaO \cdot Fe_2O_3$）及游离氧化钙 fCaO 等。

(3) 钢渣的主要化学性质：碱度是指钢渣中 CaO 与 SiO_2 和 P_2O_5 的含量比，即 $R = \frac{w_{CaO}}{w_{SiO_2} + w_{P_2O_5}}$。根据碱度的高低，可将钢渣分为低碱度渣（$R = 0.78 \sim 1.8$），中碱度渣（$R = 1.8 \sim 2.5$）和高碱度渣（$R > 2.5$）。如表5-3-7 所示，随着碱度的不同，钢渣中主体矿物相亦有所差别。钢渣利用主要以中高碱度钢渣为主。

表 5-3-7 不同碱度钢渣的主体矿物相

碱　度	主体矿物相	碱　度	主体矿物相
0.9 ~ 1.4	钙镁橄榄石	1.6 ~ 2.4	硅酸三钙
1.4 ~ 1.6	镁辉石	> 2.4	硅酸三钙

活性是指钢渣中$3CaO \cdot SiO_2$（C_3S）、$2CaO \cdot SiO_2$（C_2S）等具有水硬胶凝性活性矿物的含量。当钢渣碱度R为1.8～2.5时，其中的C_3S和C_2S的含量之和为60%～80%；$R>2.5$时，钢渣中的主要矿物为C_3S。但活性矿物的水硬性需很长时间才能表现出来。研究表明，由钢渣水泥制成的水泥或混凝土在几年、十几年甚至更长时间内其强度仍有较大幅度的增长。为利用钢渣的活性矿物，可采用细磨的方式降低其粒度，并采用外加剂激发其活性。

稳定性是指钢渣中fCaO、MgO、C_2S、C_3S等不稳定组分的含量。这些组分在一定条件下都具有体积不稳定性，碱度高的熔融炉渣缓慢冷却时，C_3S在1 250～1 100 ℃温度区域会分解出C_2S和fCaO；C_2S在675 ℃发生相变，由$\beta-C_2S$转变为活性很低的$\gamma-C_2S$，体积膨胀10%；fCaO水化消解为$Ca(OH)_2$，体积成倍增大；MgO消解为$Mg(OH)_2$，体积膨胀77%。只有等基本消解完毕后，体积才会趋于稳定。

钢渣的耐磨程度与其矿物组成和结构有关，钢渣结构致密，含铁量高，因此较耐磨。钢渣比矿渣耐磨，所以宜作路面材料。易磨性可用相对易磨系数表示，将物料与标准砂在相同条件下粉磨，所得比表面积之比即为相对易磨系数。

3. 铁合金渣

铁合金渣是冶炼铁合金过程中排出的废渣。由于铁合金产品种类很多，原料工艺各不相同，产生的铁合金渣也不同。

（1）铁合金渣的分类：按冶炼工艺分，可分为火法冶炼废渣、浸出渣。按铁合金品种分，可分为锰系铁合金渣、铬铁渣、硅铁渣、钨铁渣、钼铁渣、磷铁渣等。

（2）铁合金渣的化学成分：我国一些铁合金渣的化学成分见表5－3－8。

4. 有色金属渣

有色金属渣是指冶炼有色金属过程中产生的废渣。按生产工艺分，可分为火法冶炼形成的熔融矿渣、湿法冶炼生成的残渣、冶炼过程排出的烟尘和污泥；按金属矿物的性质分，可分为重金属渣、轻金属渣和稀有金属渣。

我国几种有色金属废渣的化学成分见表5－3－9。

表5－3－8　我国铁合金废渣的主要成分　　单位：%

名　称	MnO	SiO_2	Cr_2O_3	CaO	MgO	Al_2O_3	FeO、Fe_2O_3[①]	V_2O_5	TiO_2	Na_2CO_3	NaO
高炉锰铁渣	5～10	25～30		33～37	2～7	1.4～1.9	1～2				
碳素锰铁渣	8～15	25～30		30～42	4～6	0.7～1	0.4～1.2				
硅锰合金渣	5～10	35～40		20～25	1.5～6	1～2	0.2～2				
碳素铬铁渣		27～30	24～3	2.5～3.5	26～46	1.6～1.8	0.5～1.2				
硅铁渣		30～35		11～16	1	13～30	3～7				
钨铁渣	20～25	35～50		5～16		5～15	3～9				
钼铁渣		48～60		6～7	2～4	10～13	13～15				
磷铁渣		37～40		37～44		2	1.2				
钒浸出渣	2～4	20～28		0.9～1.7	1.5～2.8	0.8～3	8～10[①]	1.1～1.4			
钒铁冶炼渣		25～28		50～55	5～10	8～10		0.35～5			
金属铬浸出渣		5～10	2～7	23～30	24～30	3.7～8				3.5～7	
金属铬冶炼渣		1.5～2.5	11～14	0～1	1.5～2.5	72～78					3～4
钛铁渣	0.2～0.5	0～1		9.5～10.5	0.2～0.5	73～75	0～1		13～15		
硼铁渣		1.13		4.63	17.09	65.35	0.24[①]				

注：①代表Fe_2O_3的含量。

表 5-3-9 我国几种有色金属废渣的化学成分 单位:%

种 类	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe	Cu	Pb	Zn	Ag	Sb	As	Ge
铜渣	30 ~ 40	4 ~ 15	1 ~ 5	2 ~ 4	25 ~ 38	0.2 ~ 1	<2	2 ~ 3	0.5	0.2		
铅渣	20 ~ 30	14 ~ 22	1 ~ 5	10 ~ 24	20 ~ 40	0.3	0.2 ~ 0.4	2				
锌渣	12 ~ 14				33	0.7	0.5	2			0.03	0.004

5. 粉煤灰

粉煤灰是煤粉经高温燃烧后形成的一种类似火山灰质的混合材料，是冶炼、化工、燃煤电厂等企业排出的固体废物。现在我国每年粉煤灰的排放量已达到 1.6×10^8 t，大量的粉煤灰长期堆放既占用农田又造成了大量的环境污染，粉煤灰的资源化已成为我国亟待解决的问题。

（1）粉煤灰的化学及矿物组成：粉煤灰的化学成分是评价粉煤灰质量优劣的重要技术基础。粉煤灰的化学组成与黏土类似，主要成分为二氧化硅（40% ~60%）、三氧化二铝（17% ~35%）、三氧化二铁（2% ~15%）、氧化钙（1% ~10%）和未燃炭。其余为少量 K、P、S、Mg 等和微量 As、Cu、Zn 等元素的化合物。

粉煤灰的矿物组成非常复杂，主要有无定形相和结晶相两大类。无定性相主要为玻璃体，约占粉煤灰总量的 50% ~80%，此外，未燃尽的炭粒也属于无定形相。结晶相主要有石英、莫来石、云母、长石、赤铁矿等。

（2）物理性质：粉煤灰外观是灰色或灰白色的粉状物，含炭量大的粉煤灰呈灰黑色。粉煤灰颗粒多半呈玻璃状态，在形成过程中，由于表面张力的作用，部分呈球形，表面光滑，微孔较小。小部分因熔融状态下互相碰撞而粘连，形成表面粗糙、棱角较多的组合颗粒。

粉煤灰的密度与化学成分相关，低钙灰的密度一般为 1 800 ~2 800 kg/m^3，高钙灰一般为 2 500 ~2 800 kg/m^3。空隙率一般为 60% ~75%；粒度一般为 45μm；比表面积为 2 000 ~4 000 cm^2/g。

（3）活性：粉煤灰的活性是指粉煤灰与石灰、水混合后显示的凝结硬化性能。粉煤灰含有较多的活性氧化物，如二氧化硅、三氧化二铝等。它们分别与氢氧化钙在常温下起化学反应生成较稳定的水化硅铝酸钙[$Ca(Al_2Si_5O_8) \cdot 4H_2O$]，与石灰、水泥熟料等碱性物质混合加水拌和后，能凝结、硬化并具有一定的强度。

粉煤灰的活性不仅取决于它的化学组成，而且与它的物相组成和结构特征有密切关系。高温熔融并经过骤冷的粉煤灰，含大量的表面光滑的玻璃微珠，具有较高的化学潜能，是粉煤灰活性的主要来源。玻璃体中活性二氧化硅和三氧化二铝含量越高，粉煤灰的活性越强。

（二）冶金及电力工业废渣的加工与处理

1. 高炉矿渣的加工处理

我国通常把高炉矿渣加工成水渣、矿渣碎石等形式后加以利用。

（1）高炉矿渣水淬处理工艺：高炉矿渣水淬处理工艺是将熔融状态的高炉矿渣置于水中急速冷却，限制其结晶，并使其粒化。目前常用的水淬方法有渣池水淬和炉前水淬两种。

① 渣池水淬：渣池水淬是用渣罐将熔渣拉到距离高炉较远的地方，直接倒入水池中，熔渣遇水后急剧冷却成水渣。此法优点是节约用水，主要缺点是易产生大量渣棉和硫化氢气体，污染环境，属逐渐淘汰的处理工艺。

② 炉前水淬：炉前水淬是利用高压水使高炉渣在炉前冲渣沟内淬冷成粒状，并输送到沉渣池形成水渣。根据过滤方式的不同，炉前水淬可分为炉前渣池式、炉前渣车式、水利输送式、沉淀池过滤式、旋转滚筒式及脱水仓式等。

（2）高炉重矿渣碎石工艺：高炉重矿渣碎石是高炉熔渣在渣坑或渣场自然冷却或淋水冷却，形成结构较为致密的矿渣后，经破碎、磁选、筛分等工序加工成的一种碎石材料。重矿渣碎石处理工艺主要有热

泼法和渣场堆存开采法两种。

（3）膨胀矿渣珠（膨珠）生产工艺：高温熔渣经渣沟流到膨胀槽上，与高压水接触后，即开始膨胀，并流至滚筒上，被高速旋转的滚筒击碎并抛甩出去，冷却成珠落入膨胀池内。膨珠具有多孔、质轻、表面光滑的特点，既可同水渣一样利用，又可作轻骨料。

该工艺的优点是比水淬法用水量少，环境污染小，可抑制 H_2S 气体的产生；比热泼法占地面积小，处理效率高；投资省，成本低。

2. 钢渣的加工处理

钢渣处理工艺主要有下列几种：

（1）热泼法：热熔钢渣倒入渣罐后，用车辆运到钢渣热泼车间，利用吊车将渣罐的液态渣分层泼倒在渣床上（或渣坑内），喷淋适量的水，使高温炉渣急冷碎裂并加速冷却，然后再运至弃渣场。需要加工利用的，则运至钢渣处理间进行粉碎、筛分、磁选等工艺处理。

（2）盘泼水冷（ISC）法：在钢渣车间设置高架泼渣盘，利用吊车将渣罐内液态钢渣泼在渣盘内。渣层一般为 30 ~ 120 mm 厚，然后喷以适量的水促使急冷破裂。再将渣运卸至水池内进一步降温冷却。钢渣粒度一般为 5 ~ 100 mm，最后送至钢渣处理车间，进行磁选、破碎、筛分、精加工。

（3）水淬法：热熔钢渣在流出、下降过程中，被压力水分割、击碎；再加上熔渣遇水急冷收缩产生应力集中而破裂，使熔渣粒化。由于钢渣比高炉矿渣碱度高、黏度大，其水淬难度也大。为防止爆炸，有的采用渣罐打孔在水渣沟水淬的方法，并通过渣罐孔径限制最大渣流量。

（4）风淬法：渣罐接渣后，运到风淬装置处，倾翻渣罐，熔渣经过中间罐流出，被一种特殊喷嘴喷出的空气吹散，破碎成微粒，在罩式锅炉内回收高温空气和微粒渣中所散发的热量，并捕集渣粒。经过风淬而成微粒的转炉渣，可作建筑材料。

（5）粉化处理：由于钢渣中含有未化合的游离氧化钙（fCaO），用压力 0.2 ~ 0.3 MPa、100 ℃的蒸汽处理转炉钢渣时，其体积增加 23% ~87%，小于 0.3 mm 的钢渣粉化率达 50% ~ 80%。在渣中主要矿相组成基本不变的情况下，消除了 fCaO，提高了钢渣的稳定性。此种处理工艺可显著减少钢渣破碎加工量并减少设备磨损。

（三）冶金及电力工业废渣的应用

1. 高炉矿渣的综合利用

根据高炉矿渣的化学组成和矿物组成可知，高炉矿渣属硅酸盐材料的范畴，适于加工制作水泥、碎石、骨料等建筑材料。

（1）水淬矿渣作建筑材料：利用水淬矿渣作水泥混合材料是国内外普遍采用的技术。我国 75% 的水泥中掺有高炉水淬渣。在水泥生产中，高炉渣已成为改进性能、扩大品种、调节标号、增加产量和保证水泥安定性的重要原材料。目前使用最多的主要有以下几种：

① 矿渣硅酸盐水泥：简称矿渣水泥，是我国产量最大的水泥品种。其是用硅酸盐水泥熟料和粒化高炉渣加 3% ~5% 的石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，水渣加入量一般为 20% ~70%。

与普通硅酸盐水泥相比，矿渣水泥的主要特点是：具有较强的抗溶出性及抗硫酸盐侵蚀的性能，故可适用于海上工程及地下工程等；水化热较低，可用于浇筑大体积混凝土工程；耐热性好，用于高温车间及容易受热的地方比普通水泥好。但在干湿、冷热变动较为频繁的场合，其性能不如普通硅酸盐水泥，故不宜用于水位经常变动的水工混凝土建筑中。

② 石膏矿渣水泥：由 80% 左右的高炉渣，加 15% 左右的石膏和少量硅酸盐水泥熟料或石灰，混合磨细后得到的水硬性胶凝材料。石膏矿渣水泥成本较低，有较好的抗硫酸盐侵蚀和抗渗透性能。但周期强度低，易风化起沙，一般适用于水工建筑混凝土和各种预制砌块。

③ 矿渣混凝土：以矿渣为原料，加入激发剂（水泥熟料、石灰、石膏等），加水碾磨后与骨料拌和。其配合比见表 5 - 3 - 10。

矿渣混凝土的各种物理性能，如抗拉强度，弹性模量、耐疲劳性能和钢筋的黏结力等均与普通混凝土

相似，其优点在于具有良好的抗水渗透性能，可制成性能良好的防水混凝土；耐热性好，可用于工作温度在600 ℃以下的热工工程，能制成强度达50 MPa的混凝土。

表5-3-10 矿渣混凝土配合比 单位:%

项目	不同标号混凝土配合比			
	C15	C20	C30	C40
水泥（32.5级）			≤15	20
石灰	5~10	5~10	≤5	≤5
石膏	1~3	1~3	0~3	0~3
水	17~20	16~18	15~17	15~17
水灰比	0.5~0.6	0.45~0.55	0.35~0.45	0.35~0.4
浆:矿渣（质量比）	(1:1) ~ (1:1.2)	(1:0.75) ~ (1:1)	(1:0.75) ~ (1:1)	(1:0.5) ~ (1:1)

④ 矿渣砖：用水渣加入适量水泥等胶凝材料，经过搅拌、轮碾、成型、蒸汽养护等工序而成。一般配比为水渣85%~90%，磨细生石灰10%~15%。矿渣砖的抗压强度一般可达10 MPa以上，适用于上下水或水中建筑，不适用于高于250 ℃的环境下使用。矿渣砖性能如表5-3-11所示。

表5-3-11 矿渣砖性能

规格 mm	抗压强度 MPa	抗折强度 MPa	密度 kg/m^3	吸水率 %	导热系数 W/(m·K)	磨损系数
240×115×53	9.8~19.6	24~30	2 000~2 100	7~10	0.5~0.6	0.94

（2）矿渣碎石作基建材料：未经水淬的矿渣碎石，其物理性能与天然岩石相近，其稳定性、坚固性、耐磨性及韧性等均满足基建工程的要求。在我国一般用于公路、机场、地基工程、铁路道渣、混凝土骨料和沥青路面等。

① 配制矿渣碎石混凝土：矿渣混凝土是指用矿渣碎石作为骨料配制的混凝土，其不仅具有与普通碎石混凝土相似的物理力学性能，而且还具有较好的保温、隔热、耐热、抗渗和耐久性能。现已广泛应用于500号以下的混凝土、钢筋混凝土及预应力混凝土工程中。

② 用于地基工程：矿渣碎石的极限抗压强度一般都超过了50 MPa，因此完全满足地基处理的要求，一般可用高炉渣作为软弱地基的处理材料。

③ 修筑道路：矿渣碎石具有较为缓慢的水硬性，对光线的漫射性能好，摩擦系数大，适宜用作各种道路的基层和面层。实践表明，利用矿渣铺路，其路面强度、材料耐久性及耐磨性方面都有较好的效果。且矿渣碎石摩擦系数大，用其铺筑的矿渣沥青路面具有良好的防滑效果，可缩短车辆的制动距离。

④ 用作铁路道渣：高炉矿渣具有良好的坚固性、抗冲击性、抗冻性，且具有一定的减振和吸收噪声的功能，承受循环载荷的能力较强。目前各大钢铁公司几乎都在使用高炉矿渣作为专用铁路的道渣。

（3）膨珠作轻骨料：膨珠具有质轻、面光、自然级配好、吸音隔热性能强的特点。用作混凝土骨料可节省20%左右的水泥，一般用来制作内墙板、楼板等。

用膨珠配制的轻质混凝土容重为1 400~2 000 kg/m^3，抗压强度为9.8~29.4 MPa，导热系数为0.407~0.582 W/(m·K)。具有良好的抗冻性、抗渗性和耐久性。

（4）高炉渣的其他应用：高炉渣除用于建材生产外，还可以用来生产一些具有特殊性能的矿渣产品，如矿渣棉、微晶玻璃、热铸矿渣及矿渣铸石等。

2. 钢渣的综合利用

钢渣利用的研究始于20世纪初，由于成分复杂多变，其利用率一直不高。20世纪70年代以后，随着资源的日趋紧张及炼钢和综合利用技术的日益发展，各国钢渣的利用率迅速提高。我国每年产生钢渣1000×10^4 t以上，利用率达60%左右。目前钢渣利用的主要途径是用作冶金原料、建筑材料以及农业应用等。

（1）用作冶金原料：

① 作烧结熔剂：烧结矿的生产一般需加石灰作熔剂。转炉钢渣一般含40%～50%的CaO，1 t钢渣相当于0.7～0.9 t石灰石。把钢渣加工到小于10 mm的钢渣粉，便可替代部分石灰石直接作烧结配料用。钢渣作烧结熔剂不仅可回收利用钢渣中的钙、镁、锰、铁等元素，还可提高烧结机的利用系数和烧结矿的质量，降低燃料消耗。

② 作高炉炼铁溶剂：钢渣中除CaO外，还含有10%～30%的Fe，2%左右的Mn，若将其直接返回高炉作熔剂，不仅可回收钢渣中的铁，还可把CaO、MgO等作为助熔剂，从而节省大量的石灰石、白云石资源。

③ 回收废钢铁：钢渣一般含有7%～10%的废钢铁，加工磁选后，可回收其中约90%的废钢铁。

（2）用作建筑材料：

① 生产钢渣水泥：高碱度钢渣含有大量的C_3S和C_2S等活性矿物，水硬性好，因此可成为生产无熟料及少熟料水泥的原料，也可作为水泥掺和料。钢渣水泥具有水化热低、后期强度高、抗腐蚀、耐磨性好等特点，是理想的道路水泥和大坝水泥。且其具有投资省、成本低、设备少、节省能源和生产简便等优点。缺点是早期强度低、性能不够稳定。

② 作筑路及回填材料：钢渣碎石具有密度大、抗压强度高、稳定性好、表面粗糙、与沥青结合牢固等特点。因而广泛应用于铁路、公路及工程回填。因钢渣具有活性，易板结成大块，因此特别适宜在沼泽、海滩筑路造地。钢渣用作公路碎石，能够耐磨防滑，且具有良好的渗水及排水性能。

但钢渣具有体积膨胀的特点，故必须陈化后才能使用，一般要洒水堆放半年，且粉化率不得超过5%。要有合理级配，最大块直径不能超过300 mm。最好与适量粉煤灰、炉渣或黏土混合使用，同时严禁将钢渣碎石用作混凝土骨料。

③ 生产建材制品：把具有活性的钢渣与粉煤灰或炉渣按一定比例混合、磨细、成型、养护，即可生产出不同规格的砖、瓦、砌块等建筑材料，其生产的钢渣砖与黏土制成的红砖的强度和质量差不多。

但生产建材制品的钢渣一定要控制好fCaO的含量和碱度。

（3）用于农业：

钢渣是一种以钙、硅为主，含多种养分的、具有速效又有后劲的复合矿物质肥料。除硅、钙外，钢渣中还含有微量的锌、锰、铁、铜等元素，对作物生长起一定促进作用。由于在冶炼过程中经高温煅烧，其溶解度已大大改变，所含主要成分易溶量达全量的1/3～1/2，容易被植物吸收。

① 作钢渣磷肥：含P_2O_5超过4%的钢渣，可直接作为低磷肥料用，相当于等量磷的效果。钢渣磷肥不仅适用于酸性土壤，对缺磷碱性土壤也可增产；实践表明，施加钢渣磷肥后，一般可增产5%～10%。

② 作硅肥：硅是水稻生产需求量较大的元素，含SiO_2超过15%的钢渣，磨细至60目以下，即可作硅肥用于水稻田，一般每亩使用100 kg，可增产水稻10%左右。

③ 作土壤改良剂：钙、镁含量高的钢渣，磨细后，可作为酸性土壤改良剂，并且也利用了磷和其他微量元素。用于农业生产，还可增强农作物的抗病虫害能力。

3. 粉煤灰的综合利用

目前，我国粉煤灰的主要利用途径是生产建筑材料、筑路和回填；此外，还可用作农业肥料和土壤改良剂，回收工业原料和制作环保材料等。

（1）回收煤炭：一般粉煤灰中含炭量约5%～16%左右。粉煤灰中含炭量太多，对粉煤灰建材（尤其是蒸养制品）的质量和从粉煤灰中提取漂珠的质量有不良影响，同时也浪费了宝贵的炭资源。回收煤炭的方法主要有两种，一种是用浮选法回收湿排粉煤灰中的煤炭，回收率约为85%～94%，尾灰含炭量小

于5%。浮选回收的精煤灰具有一定的吸附性，可直接作吸附剂，也可用于制作粒状活性炭；另一种是干灰静电分选煤炭，静电分选工艺的炭回收率一般在85%～90%之间。

（2）回收金属物质：粉煤灰中含有Fe_2O_3、Al_2O_3和大量稀有金属，在一定条件下，这些金属物质都可回收。粉煤灰中的Fe_2O_3一般在4%～20%之间，最高达43%。粉煤灰中的铁可通过磁选法进行回收，其回收率可达40%以上。粉煤灰中含Al_2O_3一般为7%～35%，一般要求Al_2O_3含量大于25%时方可回收。目前铝回收的方法主要有高温熔融法、热酸淋洗法、直接熔解法等。

（3）分选空心微珠：空心微珠的密度一般只有粉煤灰的1/3，粒度为0.3～300 μm。目前，国内主要用干法机械分选和湿法分选两种方法来分选空心微珠。空心微珠具有质量小、强度高、耐高温和绝缘性能好等多种优异性能，现已成为一种多功能的无机材料，主要用作塑料的填料、轻质耐火材料，高效保温材料，以及石化工业的催化剂、填充剂、吸附剂和过滤剂等。

（4）用作环保材料：

① 环保材料开发：粉煤灰因其独特的理化性能而被广泛用于环保产业，如用于垃圾卫生填埋填料，用于制造人造沸石和分子筛，利用粉煤灰制絮凝剂，另外用作吸附剂等。

② 用于废水处理：粉煤灰可用于处理含氟废水、电镀废水及含重金属离子废水和含油废水。粉煤灰中含沸石、莫来石、炭粒和硅胶等，具有无机离子交换特性和吸附脱色作用。粉煤灰处理电镀废水，其对铬等重金属离子具有很好的去处效果。去除率一般在90%以上。若用$FeSO_4$处理含铬废水，铬离子去除率可达99%以上。

二、化学工业废渣的处理与利用

（一）化学工业废渣的种类

按行业和工艺过程分，化学工业废渣可分为无机盐工业废物（铬渣、氰渣、磷泥等），氯碱工业废物（盐泥、电石渣等），氮肥工业废物（主要是炉渣），硫酸工业废物（主要是硫铁矿烧渣），纯碱工业废物等。

按废物主要组成分，化学工业废渣可分为废催化剂、硫铁矿烧渣、铬渣、氰渣、盐泥、各类炉渣、碱渣等。

（二）化工废渣的处理与回收

1. 铬渣的综合利用

（1）铬渣的来源与组成：铬渣即铬浸出渣，是冶金和化工企业在金属铬和铬盐生产过程中，由浸滤工序滤出的不溶于水的固体废物。

铬浸出渣为浅黄绿色的粉状固体，呈碱性。每生产1 t重铬酸钠约产生1.8～3 t铬渣，每生产1 t金属铬约产生12～13 t铬渣。根据有关统计，我国每年的铬渣产出量约为200 kt/a。铬渣的化学组成见表5－3－12。

表5－3－12 铬渣的化学组成 单位：%

化学组成	Cr_2O_3	六价铬	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3
质量分数	3～7	0.3～1.5	8～11	23～36	20～33	5～8	7～11

（2）铬渣的综合利用：含铬废渣在被排放或综合利用之前，一般需要进行解毒处理。由于铬的化合物具有较强的氧化作用，所以铬渣解毒的基本原理就是在铬渣中加入还原剂，在一定的温度和气氛条件下，将有毒的六价铬还原成无毒的三价铬，从而达到消除铬污染的目的。

① 铬渣作玻璃着色剂：在高温熔融状态下，铬渣中的六价铬与玻璃原料中的酸性氧化物、二氧化硅作用，转化为三价铬而分散在玻璃体中，达到解毒和消除污染的目的，同时铬渣中的氧化镁、氧化钙等组

分可替代玻璃配料中的白云石和石灰石原料，大大降低原材料的消耗量。

② 铬渣制钙镁磷肥：将铬渣与磷矿石、白云石、焦炭、蛇纹石等按一定比例加入电炉或高炉中，经高温熔融还原，将铬渣中的六价铬还原成三价铬，以 Cr_2O_3 形式进入磷肥半成品玻璃体中固定下来；其余六价铬被还原成金属铬元素进入副产品磷铁中，从而达到解毒的目的。

生产钙镁磷肥的主要原料是铬渣和磷矿石，其化学成分如表 5－3－13 所示。

表 5－3－13　生产钙镁磷肥原料的化学成分　　单位：%

原　料	Cr_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	P_2O_5	Al_2O_3	Fe_2O_3
铬渣	2～7	28～33	26～33	5～8	—	6～11	7～12
磷矿石	—	40～50	—	7～15	28～35	—	—

用铬渣替代蛇纹石生产钙镁磷肥，为铬渣的综合利用找到了一条经济且适用的出路。由于工艺过程有 CO 和 C 等还原剂的存在，而且温度高达 1 350～1 450 ℃，使铬的高温熔融还原反应得以充分进行。生成的 Cr_2O_3 进入磷肥玻璃体中被固定下来，使用中不会再发生氧化反应生成六价铬。该工艺所用设备简单，易在小炼铁厂及磷肥厂中推广应用。

③ 铬渣炼铁：用铬渣代替白云石、石灰石作为生铁冶炼过程的添加剂。在高炉冶炼过程中，铬渣中的六价铬可以完全还原，脱除率达 97% 以上，同时使用铬渣炼铁，还原后的金属进入生铁中，使铁中的铬含量增加，其机械性能、硬度、耐磨性、耐腐蚀性等均有所提高。

2. 工业废石膏的回收利用

（1）工业废石膏的来源及组成：工业废石膏主要包括磷酸、磷肥工业中产生的废磷石膏、烟气脱硫过程中产生的二水石膏、其他无机化学部门用硫酸浸蚀各类钙盐所产生的废石膏。我国以磷石膏为主，由于每生产 1 t 磷酸要产生 5 t 废磷石膏，因此其产生量非常大。在许多国家，磷石膏排放量已超过天然石膏的开采量。

磷石膏的主要杂质及含量见表 5－3－14。

表 5－3－14　磷石膏的主要杂质及含量　　单位：%

成　分	可溶性 P_2O_5	不溶性 P_2O_5	氟化物	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	Na_2O	有机碳
含量	<0.25	<0.1	0.1～0.4	0.1～0.5	0.05～0.25	0.5～6	0.002～0.01	0.000 4～0.002 5

（2）磷石膏的提纯处理：在一般情况下，必须对磷石膏进行提纯处理，才能实现回收利用的目的。提纯是为了清除硫酸钙饱和溶液中的杂质，避免影响产品质量。磷石膏提纯处理的基本工艺是：先用水洗涤提取出磷石膏中的可溶杂质；然后通过湿法过筛清除其中的大颗粒；再通过旋风分离法和过筛，清除磷石膏中的细粉；最后经过分解、活化得到可以应用的熟石膏。

（3）磷石膏的综合利用：

① 磷石膏生产纸面石膏板：用经过提纯处理过的磷石膏和护面纸为主要原料，掺加适量纤维、胶黏剂、促凝剂、缓凝剂等，经过料浆培植、成型、切割、烘干等工艺流程即可制得纸面石膏板。

② 磷石膏生产水泥：将提纯处理后的磷石膏破碎后，经过计量，与水泥熟料、混合材料等一起送入水泥磨，粉磨后即得成品水泥。

③ 磷石膏用于改良土壤：磷石膏呈酸性，pH 一般在 1～4.5，可以代替石膏改良碱土、花碱土和盐土，改善土壤理化性状及微生物活动条件，提高土壤肥力。

3. 硫铁矿烧渣的综合利用

（1）硫铁矿烧渣的来源及组成：硫铁矿烧渣是生产硫酸时焙烧硫铁矿产生的废渣，硫铁矿是我国生

产硫酸的主要原料，目前采用硫铁矿或含硫尾砂生产的硫酸，约占我国硫酸总产量的80%以上。

硫铁矿烧渣的组成与矿石来源有很大关系，不同硫铁矿焙烧生成的矿渣成分不同，但基本成分主要包括三氧化二铁、四氧化三铁、金属硫酸盐、硅酸盐、氧化物及少量的铜、铅、锌、金、银等有色金属。表5-3-15为较典型的硫铁矿烧渣化学组成。

表5-3-15 我国部分硫酸企业硫铁矿烧渣的化学组成 单位:%

企业	Fe	FeO	Cu	Pb	S	SiO_2	Zn
大化公司化肥厂	35				0.25		
铜陵化工总厂	55~75	4~6	0.2~0.35	0.015~0.04	0.43	10.06	0.043~0.083
吴泾化工厂	52		0.24	0.054	0.31	15.96	0.19
四川硫酸厂	46.73	6.94		0.05	0.51	18.50	
杭州硫酸厂	48.83		0.25	0.074	0.33		0.72
衢州硫酸厂	41.99		0.23	0.078 1	0.16		0.095 2

(2) 硫铁矿烧渣的综合利用：

① 制矿渣砖：将消石灰粉（或水泥）与硫铁矿烧渣（约占84%）混合，经过成型和养护即可制成矿渣砖。硫铁矿烧渣制砖方法分为蒸养制砖和自然养护制砖两种，主要取决于原料烧渣和辅料的特性。

② 磁选铁精矿：硫铁矿烧渣中含有丰富的铁元素，利用磁选法回收其中的铁是硫铁矿烧渣综合利用的有效方法之一。磁选后的成品铁精矿中含铁量约为55%~60%，硫铁矿烧渣铁回收率大于60%。

③ 制作铁系颜料：硫铁矿烧渣中含有丰富的铁元素，因此可利用硫酸与硫铁矿烧渣反应制取硫酸亚铁，再经过一定工艺生产铁系颜料，这也是硫铁矿烧渣回收利用的有效途径之一。

将硫铁矿烧渣及适量浓度的硫酸加入反应桶，反应后静置沉淀，经过滤后，得到硫酸亚铁溶液。向部分硫酸亚铁溶液加入氢氧化钠溶液，控制温度、pH和空气通入量，获得FeOOH晶种。将制备好的晶种投入氧化桶，加入硫酸亚铁溶液进行反应。氧化过程结束后，将料浆过滤除去杂质，然后经过滤、结晶、干燥、粉碎等过程，即可得到铁黄颜料。铁黄颜料经600~700 ℃煅烧脱水，即制得铁红颜料。

三、矿业固体废物的综合利用

所谓矿业固体废物，实际指的是在矿石开采和选矿过程中产生的围岩、废石和尾矿等。

(一) 矿业固体废物的种类与性质

1. 矿业废渣的种类

(1) 按原矿的矿床学分类：根据矿体赋存的主岩及围岩类型，并考虑到矿业废渣的矿物组成情况，可将其分为基性岩浆岩、白变质花岗岩、金伯利岩、玄武-安山岩等28个基本类型。

(2) 按选矿工艺分类：根据选矿工艺的不同，矿业废渣可分为手选、重选、磁选、电选及光电选、浮选、化学选矿等矿业废渣。

(3) 按主要矿物成分：根据矿物成分的不同，矿业废渣可分成以石英为主的高硅型、以长石及石英为主的高硅型、以方解石为主的富钙型以及成分复杂性矿业废渣。

2. 矿业废渣的成分与性质

无论何种类型的矿业废渣，其主要化学组成元素是O、Si、Al、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K、P等；但在不同类型的矿业废渣中，含量差别较大，且具有不同的结晶化学行为。

（二）冶金矿山固体废物的综合利用

冶金矿山固体废物包括矿石开采过程中剥离的表土、围岩及产生的废石，及选矿过程中排出的尾矿。

矿山废料可用于各种矿山工程中，如铺路、筑尾矿坝、填露天采场、筑挡墙等，每年可消耗废石总量的20%～30%。

利用尾矿作建筑材料，即可防止因开发建筑材料而造成对土地的破坏，又可使尾矿得到有效的利用，减少土地占用，消除对环境的危害。但用尾矿作建筑材料，要根据尾矿的物理化学性质来决定其用途。

有色金属尾矿按其主要成分可分为三类：

1. 以石英为主的尾矿

该类尾矿可用于生产蒸压硅酸盐矿砖，石英含量达到99.9%，含铁、铬、钛、氧化物等杂质低的尾矿可用作生产玻璃、碳化硅等的原料。

2. 以含方解石、石灰石为主的尾矿

该类尾矿主要用作生产水泥的原料。

3. 以含氧化铝为主的尾矿

含二氧化硅和氧化铝高的尾矿可用作耐火材料。

近年来由于技术进步及普遍对综合回收利用资源的重视，各矿山开展了从尾矿回收有价金属的试验研究工作，许多已在工业规模上得到了应用。目前，从矿山尾矿中回收的有价元素主要有：从锡尾矿中回收锡和铜及其他一些伴生元素；从铅锌尾矿中回收铅、锌、钨、银等元素；从铜矿中回收萤石精矿、硫铁精矿；从其他一些尾矿中回收锂云母和金等矿物和元素。

（三）煤矸石的综合利用

煤矸石是采煤和洗煤过程中排出的固体废物，是一种在成煤过程中与煤伴生的含碳量较低、比煤坚硬的黑色岩石。煤矸石是由多种矿岩组成的混合物，属沉积岩。主要岩石种类有黏土岩类、砂岩类、碳酸岩类和铝质岩类。

煤矸石的化学成分见表5－3－16，表中显示为煤矸石煅烧后灰渣的成分。

表5－3－16　煤矸石的化学组成　　单位：%

组成	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	其他氧化物	烧失量
含量	40～65	15～35	1～7	1～4	2～9	1～2.5	2～17

煤矸石的岩石种类和矿物组成直接影响煤矸石的化学成分，如砂岩矸石 SiO_2 含量最高可达70%，铝质岩矸石 Al_2O_3 含量大于40%，钙质岩矸石 CaO 含量大于30%。

煤矸石的活性大小与其矿物相组成和煅烧温度有关。黏土类煤矸石一般加热到700～900 ℃时，结晶相分解破坏，变成无定形非晶体，使煤矸石具有活性。

我国煤矸石的发热量多在6 300 kJ/kg以下，各地煤矸石的热值差异很大，其合理利用途径与其热值直接相关。不同热值煤矸石的合理利用途径见表5－3－17。

表5－3－17　不同热值煤矸石的合理利用途径

热值/(kJ·kg^{-1})	合理用途	说　明
<2 095	回填、筑路、造地、制骨料	制骨料以砂岩类未燃煤矸石为宜
2 095～4 190	烧内燃砖	CaO 含量 <5%
4 190～6 285	烧石灰	渣可作骨料和水泥混合料
6 285～8 380	烧混合材、制骨料、代煤、节煤烧水泥	用小型沸腾炉供热产汽
8 380～10 475	烧混合材、制骨料、代煤、烧水泥	用大型沸腾炉供发电

1. 利用煤矸石生产建筑材料

目前，技术较为成熟，利用量较大的煤矸石资源化途径是生产建筑材料。

（1）生产水泥：用煤矸石生产水泥，是由于煤矸石和黏土的化学成分相近，可以代替黏土提供硅质和铝质成分；煤矸石能释放一定热量，可以代替部分燃料。煤矸石中的可燃物有利于硅酸盐等矿物的熔解和形成。此外煤矸石配的生料表面能高，硅铝等酸性氧化物易于吸收氧化钙，可加速硅酸钙等矿物的形成。

（2）煤矸石制砖：包括用煤矸石生产烧结砖和作烧砖内燃料。煤矸石砖以煤矸石为主要原料，一般占坯料质量的80%以上，有的全部以煤矸石为原料，有的外掺少量黏土，焙烧时基本无需再外加燃料。煤矸石砖规格与性能和普通黏土砖相同。用煤矸石作烧砖内燃料，节能效果明显。用煤矸石作烧砖内燃料制砖工艺与用煤作内燃料基本相同，只是增加了煤矸石的粉碎工序。

（3）生产轻骨料：轻骨料和用轻骨料配制的砼是一种轻质、保温性能较好的新型建筑材料，可用于建造大跨度桥梁和高层建筑。适宜烧制轻骨料的煤矸石主要是碳质页岩和选矿厂排出的洗矸，矸石的含碳量不宜过大，一般应低于13%。

2. 生产化工产品

（1）制结晶氯化铝：结晶氯化铝是以煤矸石和盐酸为主要原料加工而成的，其分子式为$AlCl_3 \cdot 6H_2O$。外观为浅黄色结晶颗粒，易溶于水，是一种新型净水剂，也可作精密铸造型壳硬化剂和新型造纸凝胶沉淀剂。其可广泛应用于石油、冶金、造纸、铸造、印染、医药等行业。

（2）制水玻璃：将浓度为42%的液体烧碱、水和酸浸后的煤矸石（酸浸后的煤矸石中主要含氧化硅），按一定比例混合制浆进行碱解，再用蒸汽间接加热物料，当达到预定压力0.2~0.25 MPa，反应1 h后，放入沉降槽沉降，清液经真空抽滤即可得到水玻璃。水玻璃可广泛应用于造纸、建筑等行业。

（3）生产硫酸铵化学肥料：由于煤矸石内的硫化铁在高温下生成二氧化硫，再氧化生成三氧化硫，三氧化硫遇水生成硫酸，并与氨的化合物生成硫酸铵。其方法是：将未经自燃的煤矸石堆成堆，放入木柴和煤，点燃后闷烧10~20天，待堆表面出现白色结晶时，焙烧即告完成。选择那些已燃烧过但未烧透、表面成黑色的煤矸石，其表面凝结了白色的硫酸铵结晶。将所选的原料破碎至25 mm以下，放入水池中浸泡，浸泡时间约4~8 h，经过滤、澄清、中和后，将浸泡澄清液进行蒸发、浓缩，结晶、烘干后，即可得到成品硫酸铵。

四、农林固体废物的综合利用

（一）农林固体废物的成分、性质

由于农作物品种和产地的不同，农业固体废物的物质组成、理化性质和工艺技术特性均存在着很大差异，如表5-3-18所列。

表5-3-18 几种作物秸秆的元素成分 单位：%（质量分数）

种 类	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Si
水稻	0.60	0.09	1.00	0.14	0.12	0.02	7.99
小麦	0.50	0.03	0.73	0.14	0.02	0.003	3.65
大豆	1.93	0.03	1.55	0.84	0.07		
油菜	0.52	0.03	0.65	0.42	0.05	0.004	0.18

农业固体废物也有其共性：①在组成元素上，主要为碳水化合物，其中C、O、H的总含量达70%~90%，其次含有丰富的N、P、K、S、Si等常量元素，以及多种微量元素，属于典型的有机物质；②从组成化合物看，这类有机废料均不同程度地含有纤维素、木质素、淀粉、蛋白质、戊聚糖等营养成分，以及生

物碱、植物甾醇、单宁质、胶质或蜡质、酚基和醛基化合物等生物有机体，在灰分中含有大量无机矿物；③在构造形式上，该类有机废料内存在着大量由坚固细胞壁构成的植物纤维，细胞内腔和细胞之间有大量的微细孔隙；④在物理技术性质上，普遍具有表面密度小、韧性大、抗拉、抗弯、抗冲击能力强的特点，干燥前对热、电的绝缘性和对声音的吸收能力较好；⑤干燥后的农业固体废物具有较好的可燃性，并能产生一定的热量，热值一般为$(1.2\sim1.6)\times10^4$ kJ/kg，虽较煤低，但因含硫量极少，燃烧清洁，灰分用途广泛。

（二）农业固体废物的利用途径

农业固体废物利用就是根据其物质组成、结构构造或物理技术特性的某种特点，通过一定的加工而得到充分利用，以满足人们的某一特殊需求。根据利用目的的不同，其价值主要有：①利用其含热量和可燃性作为能源使用；②利用其营养成分制作肥料和饲料，以及加工生产淀粉、糖、酒、醋、酱油、食品等生化制品；③提取其有机化合物和无机化合物，生产化工原料和化学制品；④利用其物理技术特性，生产质轻、绝热、吸声的植物纤维增强材料；⑤利用其特殊的结构构造，生产吸附脱色材料、保温材料、吸声材料、催化剂载体等。

（三）秸秆利用

秸秆利用的方式很多，当前我国主要以还田利用、饲料化处理和作为能源使用。

1. 秸秆还田利用

秸秆中不仅含有丰富的钾、硅等有效肥力元素，而且含有大量的有机物。这些有机物腐烂后形成腐殖质，不仅为作物提供了营养，而且可以降低土壤容重，增加土壤孔隙度，更加有利于涵养水分。同时，秸秆还田还为土壤微生物提供了充足的碳源，促进微生物的生长、繁殖，提高土壤的生物活性。秸秆覆盖地面，干旱期可减少土壤水分的地面蒸发量，保持耕田的蓄水量；雨季可缓冲雨水对土壤的侵蚀，抑制杂草生长，改善地－空热交换状况。

秸秆还田具有增加土壤养分、改善土壤结构、保墒、调温、抑制杂草生长、减轻盐碱程度等作用。由于改善了土壤的水分、养分、通气和温度状况，优化了农田生态环境，从而可为农作物的高产、稳产、优质打下基础。

2. 秸秆饲料化利用

随着人们生活水平的提高，动物食品的需求量进而扩大，而畜牧业的发展往往受到饲料的制约。一些植物残体由于营养价值不高或者可消化性较低，直接用作饲料往往效果欠佳，需要进一步加工处理。目前，较常用的秸秆饲料化加工方法主要有简单加工和微生物处理两类。

（1）简单加工：主要是指利用薯类藤蔓、玉米秸、豆类秸秆、甜菜叶、稻草、花生壳等加工制成氨化、青贮饲料。目前，全国的加工处理量约$1\ 000\times10^4$ t，其主要工艺流程包括：粉碎→氨化→青贮→热喷→揉搓→压饼等工序。通过加工处理，可使秸秆的营养状况得到改善，并且有利于运输与贮存。

（2）微生物处理：一般来讲，农作物残体中都含有碳水化合物、蛋白质、脂肪、木质素、醇类、醛、酮和有机酸等。但原始的秸秆，其特点是纤维素含量高，而粗蛋白质和矿物质含量低，并缺乏动物生长所必需的维生素A、维生素D、维生素E等以及钴、铜、硫、钠、硒和碘等矿物元素。利用微生物处理，可以将纤维素转化为淀粉、粗蛋白、糖类、氨基酸等营养成分，如果加工时再人为地加入一些添加剂，即可大大提高秸秆的营养价值。目前应用比较广泛而且作用明显的办法是采用酶制剂发酵处理。

3. 秸秆用作农村能源

农作物秸秆的柴灶直接燃烧，仍然是当前农村能源的主要来源。但这种方式不仅热能利用率低，而且污染环境。积极发展农作物秸秆的气化技术，应当是今后的发展方向。广义地讲，一切农林固体废物都可以气化。农林固体废物气化作能源，具有挥发组分高、碳的活性高、硫含量低等优点。秸秆的气化技术主要有沼气化和干煤气化两种。

（四）农林固体废物的工业利用

1. 农林固体废物生产化工原料

农林固体废物生产化工原料包括热解生产化工原料和水解生产化工原料。

热解生产化工原料是指在隔绝空气的条件下，将农林固体废物加热至 270 ~ 400 ℃，可分解形成固体的草炭，液体的糠醛、乙酸、焦油，气体的草煤气等多种燃料与化工原料。

农林固体废物中含有丰富的纤维素、淀粉和蛋白质，但因受木质素的约束，不能显示其自身的特性。当农林固体废物受到碱腐蚀时木质素发生溶解，然后再通过一定的工艺流程分别分离出淀粉、纤维素、蛋白质及其衍生物，这一过程称为农林固体废物的水解。如果将农林固体废物在酸性溶液中水解，可得到葡萄糖、半乳糖、木糖、糠醛、乙酸等化工原料。

2. 处理农林固体废物灰烬生产化工原料

农林固体废物经燃烧后产生的炉灰，含有大量的 Si、C、K 等无机组分。将炉灰按炉灰:30% 的 NaOH = 1:0.92的比例投入蒸压釜内，在 0.2 MPa 的蒸气压下沸煮 4 h，至料液的相对密度为 1.16（20 波美度）时停止加热，冷却至零压力时倒出、过滤，滤渣用清水煮洗 3 次后用盐酸中和至洗液呈中性，然后将滤渣晒干、磨细，即成为活性炭；将滤液和洗液置于浓缩锅内加热蒸发，至相对密度达到 1.38（40 波美度）时，即成为水玻璃。当采用稻壳时，一般活性炭的收率为 35% 左右，水玻璃的收率可达 200%。

此外，炉灰经浸泡、洗涤、浓缩、结晶，可以制得硫酸钾、氯化钾、碳酸钾等；也可以直接作为钾肥使用。

3. 农林固体废物用作建筑材料

（1）生产轻质保温内燃砖：在生产黏土烧结砖的泥坯中，掺入一定量的农林固体废物碎屑，如草糠、锯末、稻壳、麦壳等，在烧砖时，由于这些碎屑发生内燃，原占体积遗留为孔隙，不仅可以节省黏土原料和化石燃料，而且可以降低砖块的体积密度，提高隔热保温性能。

（2）生产轻质建筑板材：基于农林固体废物质轻、多孔、抗拉与抗弯强度较高的特性，可作为轻骨料或增强纤维，用于生产各种轻质建筑墙板、装饰板、保温板、吸声板等新型建筑材料。

五、城市污泥的综合利用

污泥是污水处理厂对污水进行处理过程中产生的沉淀物质以及污水表面漂出的浮沫所得的残渣。

（一）污泥的分类

污泥的种类很多，按来源分有给水污泥、生活污水污泥、工业废水污泥。

按分离过程可分为沉淀污泥（包括初沉污泥、混凝沉淀污泥、化学沉淀污泥），生物处理污泥（包括腐殖污泥、剩余活性污泥）。

按污泥成分及性质可分为有机污泥和无机污泥，亲水性污泥和疏水性污泥。

按不同处理阶段可分为生污泥、浓缩污泥、消化污泥、脱水干化污泥、干燥污泥、污泥焚烧灰等。

（二）污泥的性质和成分

污泥性质是选择污泥处理、处置及利用技术的重要基础资料。污泥性质取决于污水水质、处理工艺和工业废水密度等多种因素。一般说来，污泥具有以下性质：

（1）有机物含量高（一般为固体量的 60% ~ 80%），容易腐化发臭，颗粒较细，密度较小，含水率高且不易脱水，是呈胶状结构的亲水性物质。

（2）污泥中含有植物营养素、蛋白质、脂肪及腐殖质等，营养素主要包括氮、磷（P_2O_5）、钾（K_2O）。

（3）污泥的碳氮比（C/N）比较为适宜，对消化有利。污泥中的有机物是消化处理的对象，其中一部分是能被消化分解的，分解产物主要是水、甲烷和二氧化碳；另一部分是不易或不能被消化分解的，如纤维素、乙烯类、橡胶制品及其他人工合成的有机物等。

（4）污泥具有燃料价值，污泥的主要成分是有机物，可以燃烧。

（5）由于城市污水中混有医院排水及某些工业废水（如屠宰场废水），所以污泥中常含有大量的细菌和寄生虫卵。

（6）由于工业废水进入城市污水处理系统，污泥中含有多种重金属离子。污泥中各种水溶性重金属

中，Cd、Cu、Pb 浓度较高，酸溶性以 Cd 居首，其浓度顺序为 Cd > Cu > Pb > Hg。

（三）污泥的处理

污泥的处理包括污泥的浓缩、污泥的消化和污泥的脱水。

1. 污泥的浓缩

污泥中所含水分大致分为四类：颗粒间的空隙水，约占污泥水分的 70%；毛细水，污泥颗粒间的毛细管水，约占 20%；颗粒的吸附水及颗粒内部水约占 1%。污泥脱水的对象是颗粒间的空隙水。

污泥浓缩的目的就是降低污泥中水分，缩小污泥的体积，减少消化池的容积和加温污泥所需热量，为脱水、利用与处置创造条件，但仍保持其流体性质。浓缩后污泥含水率仍高达 90% 以上，可以用泵输送。污泥浓缩的方法主要有重力浓缩、气浮浓缩和离心浓缩三种。

2. 污泥的消化

污泥的消化是在人工控制条件下，通过微生物的代谢作用使污泥中的有机物稳定化。污泥中有机物含量很高，宜采用厌氧法处理，即在无氧的条件下，污泥中的有机物被微生物分解为较低分子有机物，最终转化成为甲烷、氨、二氧化碳和水等无机物和气体。通过厌氧消化，既分解了有机物，还获得了一种很好的燃料——沼气。

厌氧消化工艺流程主要有标准消化法、高负荷消化法、两级消化法和厌氧接触消化法等。详见污泥的综合利用——利用污泥生产沼气部分。

3. 污泥的脱水

污泥经浓缩处理后，含水率约为 90%，体积还很大，为了满足卫生标准，综合利用或进一步处置的要求，必须充分地脱水而减量化，将污泥当作固态物质来处理。

污泥脱水包括自然干化与机械脱水。在机械脱水时，为了改善污泥的脱水性能，常采用污泥消化法或化学调理等方法对污泥进行处理后再脱水。

机械脱水的主要方法有：

（1）采取加压或抽真空将滤层内的液体用空气或蒸汽排除的通气脱水法，常用设备为真空过滤机，有间歇式、连续式、转鼓式等形式。

（2）靠机械压缩作用的压榨法，加压过滤设备主要分为板框压滤机、叶片压滤机、辊压带式压滤机等类型；

（3）用离心力作为推动力除去料层内液体的离心脱水法，常用转筒离心机有圆筒形、圆锥形、锥筒形三种，典型形式为锥筒形。

目前，污泥处置的主要方式有填埋、投海、焚烧、土地利用。这些方法都能容纳大量的污泥，是污泥处置的有效途径，但其中也存在诸多问题。

（四）污泥的综合利用

污泥是一种很有利用价值的潜在资源，随着工业和城市的发展，污水处理率的提高，其产生量必然越来越大。为了充分利用这种资源，减轻环境公害，世界上许多国家都在大力发展污泥处理处置和资源化利用的各种技术，取得了良好的经济效益和社会效益。

1. 污泥的农田林地利用

污泥中含有的氮、磷、钾、微量元素等是农作物生长所需的营养成分；有机腐殖质（初沉池污泥含 33%，消化污泥含 35%，活性污泥含 41%，腐殖污泥含 47%）是良好的土壤改良剂；蛋白质、脂肪、维生素是动物有价值的饲料成分。

（1）生产堆肥：将污泥与调理剂及膨胀剂在一定的条件下进行好氧堆沤，即是污泥的堆肥化。现代堆肥化大多指好氧快速堆肥过程，污泥堆肥过程的主要技术措施比较复杂，主要包括：①调解堆料的含水率和适当的 C/N 比；②选择填充料改变污泥的物理性状；③建立合适的通风系统；④控制适宜的温度和 pH。

堆肥的一般工艺流程主要分为前处理、一次发酵、二次发酵和后处理四个阶段。

（2）生产复混肥：污泥堆肥产品可与市售的无机氮、磷、钾化肥配合生产有机无机复混肥。它集生物肥料的长效、化肥的速效和微量元素的增效于一体，在向农作物提供速效肥源的同时，还能向农作物根系引入有益微生物，充分利用土壤潜在肥力，并提高化肥利用率；另外，还可根据不同土壤的肥力和不同作物的营养需求，合理设计复混肥各组分的比例，生产通用复混肥及针对不同作物的专用复混肥。

2. 回收能源

污泥的主要成分是有机物，其中一部分能够被微生物分解，产物是水、甲烷和二氧化碳；另外干污泥具有热值，可以燃烧，所以通过制沼气、燃烧及制成燃料等方法，可以回收污泥中的能量。

（1）利用污泥生产沼气：沼气是有机物在厌氧细菌的分解作用下产生的以甲烷为主的可燃性气体，是一种比较清洁的燃料。沼气中甲烷的含量约 50% ~60%，二氧化碳的含量 30% 左右，另外还有一氧化碳、氢气、氮气、硫化氢和极少量的氧气。1 m^3 沼气燃烧发热量相当于 1 kg 煤或是 0.7 kg 汽油。污泥进行厌氧消化即可制得沼气。

（2）通过焚烧回收热量：污泥中含有大量的有机物和一定的纤维木质素，脱水后有一定的热值。污泥的燃烧热值与污泥的性质有关，如表 5 -3 -19 所示。

表 5 -3 -19　不同污泥的燃烧热值

污 泥 种 类	干污泥热值/(kJ/kg)	污 泥 种 类	干污泥热值/(kJ/kg)
初次沉淀污泥		初沉污泥与腐殖质污泥混合	
新鲜的	15 826 ~18 190	新鲜的	14 900
经消化	7 200	经消化	6 740 ~8 120
新鲜活性污泥	14 900 ~15 210	初沉污泥与活性污泥混合	
		新鲜的	16 950
		经消化	7 450

可以看出，干化污泥作为燃料，开发潜力大。通过焚烧既可以达到最大限度的减容，又可以利用热交换装置回收热量，用来供热发电。但在焚烧过程中会产生二次污染问题，如废气中含 SO_x、NO_x、HCl、残渣含重金属等。

脱水污泥的含水率高于 75 %，如此高的含水率不能维持燃烧过程的进行，所以焚烧前对污泥应进行干燥处理，使污泥的含水量符合不同焚烧设备的要求。

焚烧设备最主要的有立式多层炉、回转窑炉、喷射焚烧炉等，应用最广泛的是流化床焚烧炉。流化床焚烧炉的优点是焚烧时固体颗粒激烈运动，颗粒与气体间的传热、传质速率快，所以处理能力大；结构简单，造价便宜。缺点是废物破碎后才能入炉。

污泥焚烧的热量可以用来生产蒸汽，供热采暖或发电。另外还可用污泥与煤混合，制成污泥煤球等混合燃料。

（3）低温热解：低温热解是目前正在发展的一种新的热能利用技术。即在 400 ~500 ℃，常压或缺氧条件下，借助污泥中所含的硅酸铝和重金属（尤其是铜）的催化作用将污泥中的脂类和蛋白质转变成碳氢化合物，最终产物为燃料油、气和碳。热解前的污泥干燥就可利用这些低级燃料的燃烧来提供能量，实现能量循环；热解生成的油还可以用来发电。

3. 建材利用

污泥中的无机成分与有机成分可用来制造建筑材料。

（1）污泥制砖：污泥制砖的方法有两种，一种是干污泥直接制砖；另一种是用污泥焚烧灰渣制砖。

用干污泥直接制砖时，应该在成分上做适当调整，使其成分与制砖黏土的化学成分相当。当污泥与黏土按质量比 1∶10 配料时，污泥砖基本上与普通红砖的强度相当。

将污泥干燥后，粉碎成制砖的粒度要求，掺入黏土与水，混合搅拌均匀，制坯成形焙烧。污泥砖的物

理性能见表 5 -3 -20。

表 5 -3 -20　污泥砖的物理性能

污泥:黏土（质量比）	平均抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	成品率/%
0.5:10	8.2	2.1	83
1:10	10.6	4.5	90

利用污泥焚烧灰制砖，其烧灰的化学组成与制砖黏土的化学组成比较见表 5 -3 -21。

表 5 -3 -21　污泥焚烧灰与制砖黏土的化学组成比较（质量分数%）

项　　目	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	灼烧减重	其他
制砖黏土	56.8 ~ 88.7	4 ~ 20.6	2 ~ 6.6	0.3 ~ 13.1	0.1 ~ 0.6		0 ~ 6.0
焚烧灰甲	13	13.7	9.6	38.0	1.5	15.1	
焚烧灰乙	50.6	12.0	16.5	4.6		10.9	
焚烧灰丙	52.0	15.0	4.8	10.6	1.6	1.6	4.8

由表 5 -3 -21 可知，污泥的性质不同，焚烧灰的成分差别很大。在污泥脱水时，加入石灰作为助凝剂，会使焚烧灰的 CaO 含量增高（如焚烧灰甲）。一般情况下，焚烧灰的成分与制砖黏土成分接近（如焚烧灰乙、丙）。制坯时只需添加适量黏土与硅砂，比较适宜的配料质量比为焚烧灰:黏土:硅砂 =100:50:(15 ~20)。

（2）生产水泥：水泥熟料的煅烧温度为 1 450 ℃左右。生产水泥时，污泥中的可燃物在煅烧过程中产生的热量，可以在煅烧水泥熟料时得到充分利用；污泥灰烬的成分与水泥原料相近，可作为生产水泥原料加以利用；污泥中的重金属元素在熟料烧成过程中参与了熟料矿物的形成反应，被结合进熟料晶格中。因此，用污泥作为原料生产水泥，除可实现资源、能源的充分利用，还可将其中的有毒有害物质中和吸收，使危害减到最少，近年来受到广泛关注。

污泥生产水泥有两种方式：生产生态水泥和代替黏土质原料生产水泥。用污泥焚烧灰、下水道污泥、石灰石及适量黏土为原料生产的水泥叫生态水泥。污泥具有较高的烧失量，扣除烧失量后其化学成分与黏土原料相近，进行生料配料计算，理论上可以替代 30% 的黏土质原料。

（3）制生化纤维板：活性污泥中的有机成分粗蛋白（约占 30% ~40%）与酶等属于球蛋白，能溶解于水及稀酸、稀碱、中性盐的水溶液。在碱性条件下，加热、干燥、加压后会发生一系列的物理、化学性质的改变，称为蛋白质的变性作用。利用这种变性作用能制成活性污泥树脂（又称蛋白胶），与纤维合起来，压制成板材。

生化纤维的物理力学性能，可达到国家的三级硬质纤维板的标准，能用来作建筑材料或制造家具。利用活性污泥制造生化纤维板，在技术上是可行的。但在制造过程中有气味，需要脱臭措施；板材成品仍还有一些气味；板材的强度有待提高；当污泥的性质不同时，配方需研究调整。

（4）生产陶粒：污泥制陶粒的方法按原料不同可以分为两种，一是用生污泥或厌氧发酵污泥的焚烧灰造粒后烧结。这种方法在 20 世纪 80 年代已趋成熟，并投入使用。利用焚烧灰制陶粒需要单独建设焚烧炉，污泥中的有机成分没有得到有效利用，近年来开发了直接从脱水污泥制陶粒的新技术。

轻质陶粒一般可作路基材料、混凝土骨料或花卉覆盖材料使用，但由于成本和商品流通上的问题，还没有得到广泛的应用。近年来日本将其作为污水处理厂快速滤池的滤料，代替目前常用的硅砂、无烟煤，取得良好的效果。轻质陶粒作快速滤池填料时，空隙率大，不易堵塞，反冲次数少。其相对密度大，反冲洗时流失量少，滤料补充量和更换次数也比用普通滤料少。

第六节 固体废物的最终处置

固体废物无论采用何种减量化和资源化处理方法，如焚烧、热解、堆肥等处理后，剩余下来的无再利用价值的残渣，都需要对其进行最终处置。固体废物处置的基本方法是通过多重屏障（如天然屏障或人工屏障）实现有害物质同生物圈的隔离。

概括说来，固体废物的处置可分为海洋处置和陆地处置两大类。海洋处置是利用海洋具有的巨大稀释能力，在海洋上选择适宜的洋面作为固体废物处置场所的处理方法。其主要包括传统的海洋倾倒和近年发展起来的远洋焚烧；而陆地处置根据废物的种类及其处置底层位置（地上、地表、地下和深底层），陆地处置可分为土地耕作、工程库或贮留池贮存、土地填埋（卫生土地填埋和安全土地填埋）、浅地层埋藏以及深井灌注处置等几种。

土地填埋处置具有工艺简单、成本较低、适于处理多种类型固体废物的优点。目前，土地填埋处置已经成为固体废物最终处置的主要方法之一。

一、填埋场的规划和设计

（一）填埋场选址

填埋场址选择是其设计和建设的第一步。它涉及诸如政策、法规、经济、环境、工程和社会等因素，必须慎之又慎。通常废物填埋场的选址要满足以下基本条件：

（1）应服从城市发展总体规划。

（2）场址应有足够的库容量，现代填埋场建设必须满足一定的服务年限，否则其单位库容的投资将大大增高，造成经济上的不合理。

（3）场址应具有良好的自然条件，包括：①场地的地质条件要稳定，应尽量避开构造断裂带、塌陷带、地下岩溶发育带、滑坡、泥石流、崩塌等不良地质地带，同时场地地基要有一定承载力（通常不低于0.15 MPa）；②场址的竖向标高应不低于城市防排洪标准，使其免受洪涝灾害的威胁；③场区周围500 m范围内应无居（村）民居住点，以避免因填埋场诱发的安全事故和传染疾病的发生；④场址宜位于城市常年主导风的下风向和城市取水水源的下游，以减轻可能出现的大气污染危害程度以及避免对城市给水系统造成的潜在威胁；⑤场址就近应有相当数量的覆土土源，以用于填埋场的日覆土、中间覆土和终场覆土。

（4）场址运距应适中。

（5）场址应具有较好的外部建设条件。

填埋场场址的科学确定应遵循以下几个步骤：首先根据有效的运输距离确定选址区域，然后与当地有关主管部门（国土、规划、环保等）讨论可能的场址名单，进而排除掉那些有可能遇到较大麻烦的场址，提出初选场址名单（3～5个）；对场址进行踏勘，并通过对场地自然环境、地质－水文地质、交通运输、覆土来源、人口分布等的分析对比，确定两个以上的备选场址；在对备选场址进行初步勘探基础上，对其进行技术、经济和环境方面的综合比较，提出首选方案，完成选址报告，提交政府主管部门决策。根据这一报告，有关决策部门在专家论证的基础上，最终确定填埋场场址。

（二）计划填埋量与填埋年限

在填埋场服务年限中拟填埋的废物总量与使用的覆土量之和即为计划填埋量。对城市固体废物而言，填埋量既受填埋场库容条件和具体设施容量的制约，也受到因城市经济的发展和居民生活水平提高而造成城市固体废物（MSW）成分变化的影响。通常计划填埋量是填埋场的理论容量，较之废物的实际填埋量要大10%以上。填埋场的理论容量可根据加和各个填埋层体积（每个填埋层的平均面积与该填埋层高度之乘积）进行估算。而填埋场的总填埋容量可按下式来计算确定，即：

$$V_t = 365 \times \frac{mPt}{\rho} + V_s \tag{5-3-69}$$

式中：V_t——总库容，m^3；

P——预测人口，人；

m——人均废物产量，kg/(人·d)；

ρ——压实密度，kg/m^3；

V_s——覆土量，m^3；

t——填埋年限，a。

通常我国人均城市固体废物产量可按0.8～1.2 kg/(人·d)考虑。

计划填埋场的填埋年限在受到场址特性、服务区域 MSW 产量和组分以及覆盖材料数量和性质制约的同时，对废物填埋场的投资效率和建设规模有明显的影响。填埋场年限过短，将增大单位填埋投资，减小投资效率；而填埋年限过长，势必导致一次投资过高，设施维护和保养费用加大。一般情况下，填埋年限以10～20年为宜。

二、填埋场的防渗

填埋场防渗是现代填埋场区别于简易填埋场和堆放场的一个重要标志，也是选址、设计、施工、运行管理和终场维护中至关重要的内容。填埋场防渗的主要目的，是阻止渗滤液和填埋气体外泄污染周围的土壤和地下水，同时还要防止外来水，包括地下水、地表水和降水等大量进入填埋场，增大渗滤液产生量。

（一）防渗方式

按照填埋场防渗设施铺设时间的不同，可分为场区防渗和终场防渗。后者是指当填埋场的填埋容量使用完毕后，对整个填埋场进行的最终覆盖，故亦称其为终场覆盖；前者是填埋场运行作业前施作的主体工程之一，根据防渗设施设置方向的不同，又可分为水平防渗和垂直防渗。

1. 水平防渗

水平防渗指防渗层向水平方向铺设，防止渗滤液向周围及垂直方向渗透而污染土壤和地下水，根据所用防渗材料的来源不同又可将该类防渗分为自然防渗和人工防渗两种。

2. 垂直防渗

垂直防渗指防渗层竖向布置，防止废物渗滤液横向渗透迁移污染周围土壤和地下水。

因垂直防渗单独应用相对有限，通常是作为辅助防渗措施，故本节仅论述水平防渗和终场防渗。

（二）防渗材料

我国批准颁布的《城市生活垃圾卫生填埋技术规范》（CJJ 17—2004）中规定，天然黏土类防渗衬里，其场底及四壁衬里厚度要大于2 m，渗透系数小于 1×10^{-7} cm/s；改良土衬里的防渗性能应达到黏土类防渗性能。

1. 天然防渗

天然防渗材料主要有黏土、亚黏土、膨润土等。因其渗透性低、较经济，过去曾被视为填埋场唯一可供选择的防渗材料，目前仍为一些国家或地区广泛采用。它们是岩石风化后产生的次生矿物，颗粒极小，多由蒙脱石、伊利石和高岭石组成。作为防渗材料，一般应满足以下条件：

（1）分布均匀，厚度至少大于2 m，其渗透系数不大于 1×10^{-7} cm/s。

（2）要求其颗粒的30%能通过200号的筛子，液限大于30%，塑性大于1.5，pH 大于7。

（3）能抵抗渗滤液的侵蚀，不因渗滤液的接触而使其渗透性增加。

在天然防渗中，黏土使用最多，可分自然黏土衬里和人工压实黏土衬里。但不论哪种类型，都必须满足渗透系数不大于 1×10^{-7} cm/s 的基本要求。

天然防渗衬里的主要优点是其造价低廉，施工简单，我国目前相当一部分城市的垃圾填埋场和部分工

业固体废物填埋场仍采用当地天然黏土或改性土壤作为防渗衬里。由于土地资源的日益紧缺和防渗要求的不断提高，使天然衬里的使用受到了很大限制。

2. 改良型衬里

改良型衬里是指将性能不达标的亚黏土、亚砂土等天然地质材料通过人工添加物质改善其性质，以达到防渗要求的衬里。人工改性的添加剂分为有机、无机两种。无机添加剂相对而言费用较低，效果好，比较适合发展中国家推广应用。常用的两种改良型衬里如下：

（1）黏土－膨润土改良型衬里：在天然黏土中添加适量（如3%～15%）膨润土矿物，使改良后的黏土达到防渗材料的要求。已有的研究成果和工程应用实践表明，膨润土因其具有吸水膨胀和巨大的阳离子交换容量，添加在黏土中，不仅可以减少黏土的孔隙，降低其渗透性，而且能增强衬里吸附污染物的能力，同时还可以大幅度提高衬里的力学强度，因此，在填埋场防渗工程中具有广阔的推广前景。

（2）黏土－石灰、水泥改良型衬里：在天然黏土中添加适量的石灰、水泥改善黏土性质，从而大大提高黏土的吸附能力、酸碱缓冲能力。掺和添加剂再经压实，黏土的孔隙明显减小，抗渗能力增强。改良后黏土的渗透系数可以达到 1×10^{-9}cm/s，完全符合填埋场衬里对防渗性能的要求。

3. 人工合成膜防渗

严格地说，黏土型防渗衬里并不能完全阻止渗滤液向地下渗透，除非黏土的渗透性极低且厚度足够大。此外优质黏土的形成有一定的地质要求，不是每个场址都具有这种得天独厚的条件。因此，开发出可以替代并且优于黏土型衬里的人工合成有机材料是十分必要的。人工衬里材料通常要满足以下要求：

（1）必须与渗滤液相容，不因与渗滤液的接触而使其结构完整性和渗透性发生变化。

（2）渗透系数小于 1×10^{-7}cm/s；具有适宜的强度和厚度，可铺设在稳定的基础之上。

（3）抗臭氧、紫外线、土壤细菌及真菌的侵蚀。

（4）具有适当的耐候性，能承受急剧的冷热变化。

（5）具有足够的抗拉强度，能够经得起填埋体的压力和填埋机械与设备的压力。

（6）有一定的抗尖锐物质的刺破、刺划和磨损能力；厚薄均匀、无薄点、气泡及裂痕。

（7）便于施工及维护。

常见人工合成防渗膜性能如表5－3－22所示。其中HDPE因其耐化学腐蚀能力强、制造工艺成熟、易于现场焊接、并积累了比较成熟的工程施工经验，而被广泛应用于填埋场的水平防渗中。

表5－3－22 常用人工合成防渗膜的性能

材料名称	合成方法及价格	优　点	缺　点
高密度聚乙烯（HDPE）	由聚乙烯树脂聚合而成，价格中等	好的防渗性能； 对大部分化学物质具有抗腐蚀能力； 良好的机械和焊接性能； 低温下具有良好的工作特性； 可制成0.5～3 mm不等的各种厚度； 不易老化	耐不均匀沉降能力较差； 耐穿刺性能力较差
聚氯乙烯（PVC）	聚乙烯单体聚合物，热塑性塑料，价格低	耐无机物腐蚀； 良好可塑性； 高强度，尤其抗穿刺能力强； 易焊接	易被许多有机物腐蚀； 耐紫外辐射能力差； 气候适应性不强； 易受微生物侵蚀
氯化聚乙烯（CPE）	由氯气与高密度聚乙烯经化学反应而成，热塑性合成橡胶，价格中等	良好的强度特性； 易焊接； 对紫外线和气候因素有较强的适应性； 低温下良好工作特性； 耐渗性能好	耐有机物腐蚀能力差； 焊接质量不强； 易老化

续表

材料名称	合成方法及价格	优　　点	缺　　点
异丁橡胶（EDPM）	异丁烯与少量的异戊二烯共聚而成，合成橡胶，价格中等	耐高低温； 耐紫外辐射能力强； 氧化性和极性溶剂对其影响不大； 胀缩性强	对碳氢化合物抵抗能力差； 接缝难； 强度不高
氯磺化聚乙烯（CSPE）	由聚乙烯、氯气、二氧化硫反应生成的聚合物，热塑性合成橡胶，价格中等	防渗性能好； 耐化学腐蚀能力强； 耐紫外辐射及适应气候变化能力强； 耐细菌能力强； 易焊接	易受油污染； 强度较低
乙丙橡胶（EPDM）	乙烯、丙烯和二烯烃的三元共聚物，合成橡胶，价格中等	防渗性能好； 耐紫外辐射； 气候适应能力强	强度较低； 耐油、耐卤代溶剂腐蚀能力差； 焊接质量不高
氯丁橡胶（CDR）	以氯丁二烯为基础的合成橡胶，价格较高	防渗性能好； 耐紫外辐射； 耐油腐蚀、耐老化； 耐磨损、不易穿孔	难焊接和修补
热塑性合成橡胶	极性范围从极性到无极性的新型聚合物，价格中等	防渗性能好； 耐紫外辐射； 耐油腐蚀、耐老化； 拉伸强度高	焊接质量仍需提高
氯醇橡胶	饱和的强极性聚醚型橡胶，价格中等	耐拉伸强度较高； 热稳定性好； 耐老化； 不受烃类溶剂、燃料、油类等影响	难于现场焊接和修补

【例5-3-6】 某填埋场底部黏土衬层厚度为1.0 m，渗透系数 $K_s = 1 \times 10^{-7}$ cm/s。计算渗滤液穿透防渗层所需的时间。设防渗层的有效孔隙率 $\eta_e = 6\%$。

解：渗滤液排水系统有效作用时，$-\dfrac{dH}{dZ} = 1$

$$Q = K_s = 1 \times 10^{-7}\ \text{cm/s}$$

$$v_p = \frac{Q}{\eta_e}$$

穿透时间：$t = \dfrac{L}{v_p} = \dfrac{100 \times 0.06}{1 \times 10^{-7}}\ \text{s} = 6 \times 10^{7}\ \text{s} = 1.9\ \text{a}$

（三）防渗结构

1. 水平防渗系统

根据填埋场场区的地形、地质及水文地质条件和填埋废物的性质特征，以及填埋场渗滤液收集系统、保护层和过滤层的不同组合，填埋场的水平防渗系统结构可以分为单层衬里、单复合衬里、双层衬里、双复合衬里系统，如图5-3-4～图5-3-7所示。

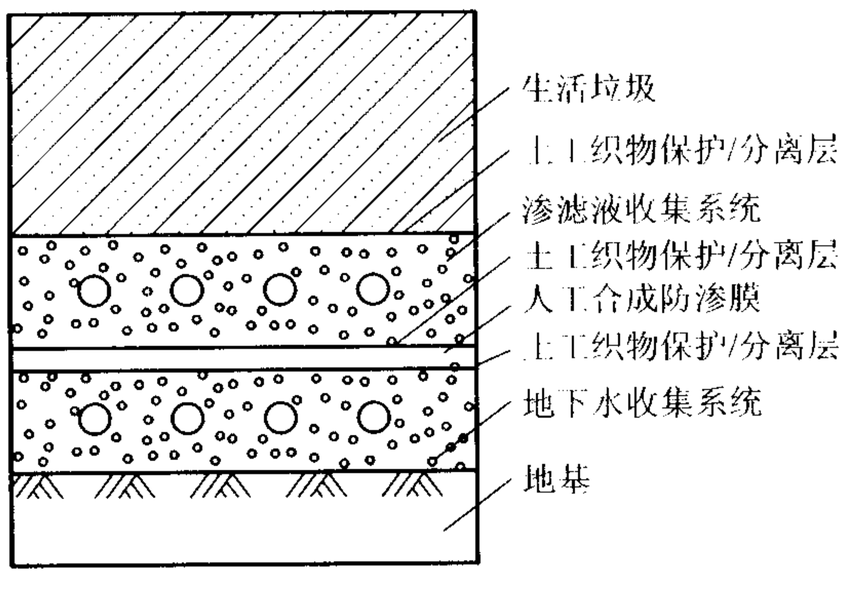


图 5-3-4 单层衬里系统

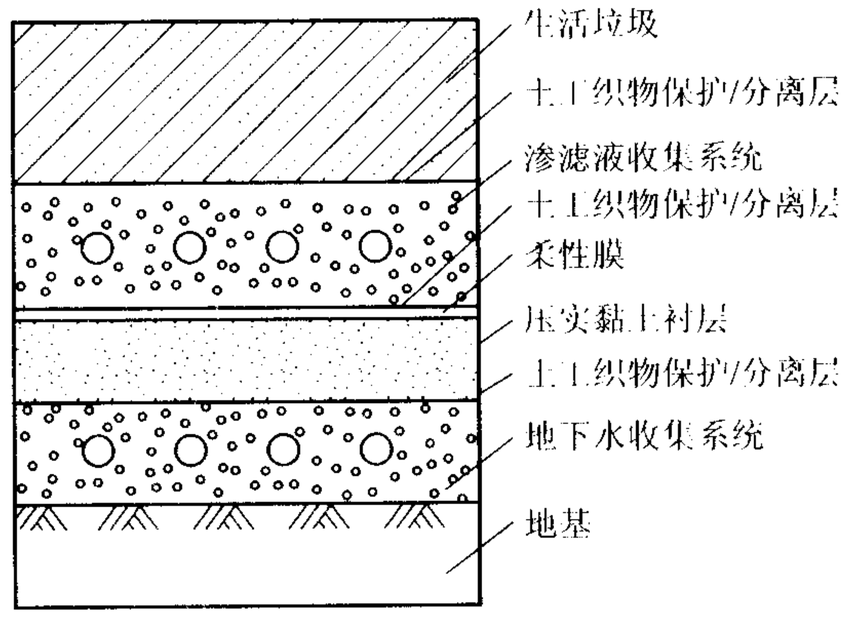


图 5-3-5 单复合衬里系统

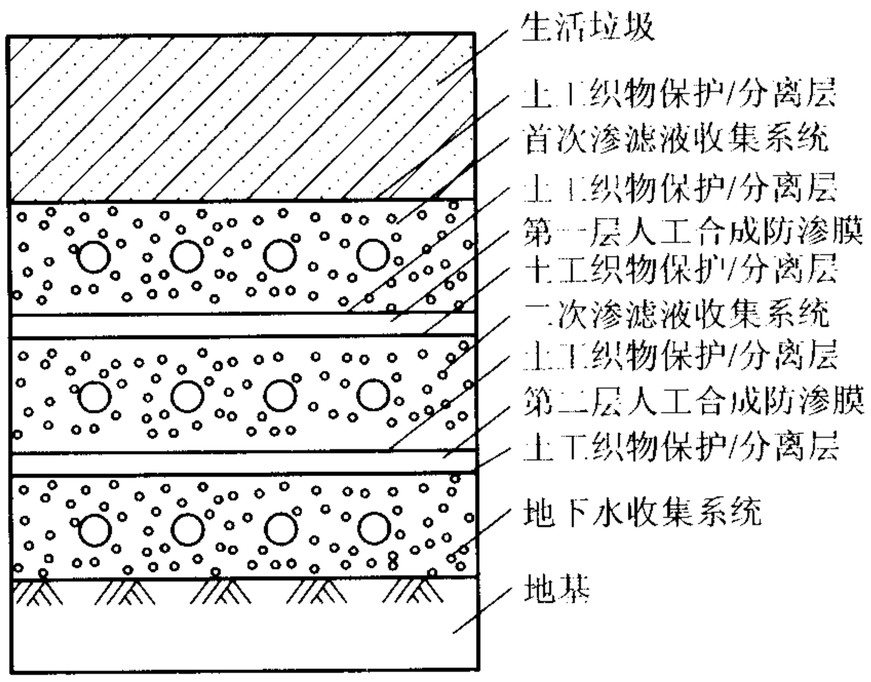


图 5-3-6 双层衬里系统

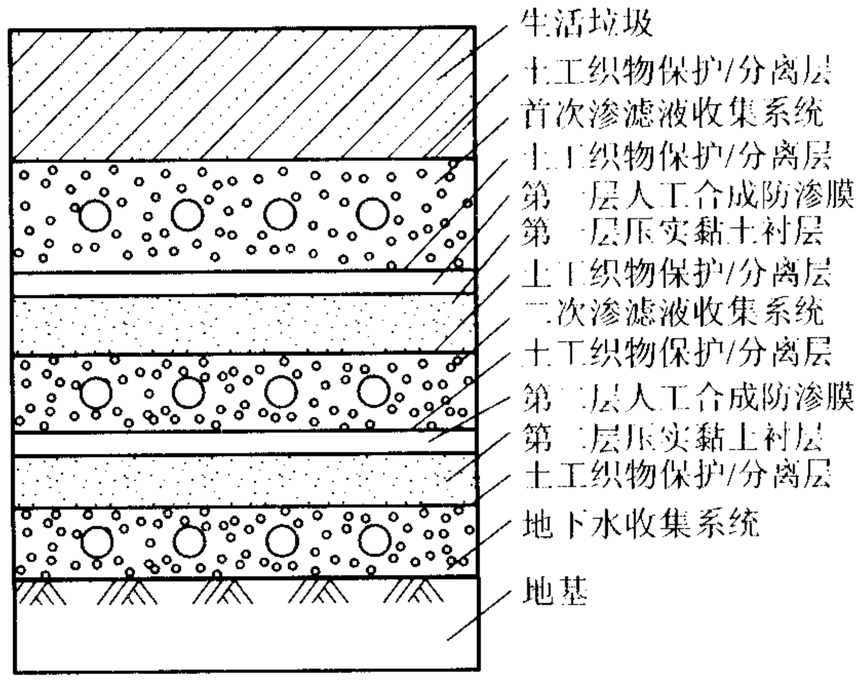


图 5-3-7 双复合衬里系统

(1) 结构类型:

① 单层衬里系统:

此种防渗系统只有一层防渗层，可由黏土或 HDPE 膜构成，其上是渗滤液收集系统和保护层，必要时其下有一个地下水收集系统和保护层。该系统适用于抗损性低、场址区地质条件良好、渗透性差，地下水较贫乏的条件。

② 单复合衬里系统:

此种防渗系统的防渗层由两种防渗材料相互紧密贴合而成，提供综合防渗效力。较典型的单复合结构是上层为柔性膜，其下为低渗透性的黏土矿物。该系统的其余部分与单层衬里系统类同。单复合衬里系统综合了两种材料的优点，具有很好的防渗效果，多用于抗损性较高、地下水位高、水量较丰富的条件。其使用的关键是使柔性膜与黏土层紧密贴合，以保证当柔性膜破损时渗滤液不会引起沿两者结合面的移动。

③ 双层衬里系统:

此种衬里防渗系统有两层防渗衬里，上衬里之上为渗滤液收集系统，下衬里之下为地下水收集系统。两衬里之间是排水层（次要），以控制并收集通过上衬里渗漏下来的渗滤液或填埋气体。该系统在防渗的可靠性上优于单衬里系统，但在施工和衬里的坚固性及防渗效果等方面不如单复合衬里系统，其适用条件类同于单复合衬里系统。

④ 双复合衬里系统:

与双层衬里系统的结构类似，仅其上衬里采用的是单复合衬里。该系统综合了单复合衬里系统和双层衬里系统的优点，具有抗损害能力强、坚固性好、防渗可靠性高等特点，但其造价高昂。双复合衬里系统适用于废物危险性大、对环境质量要求很高的条件。

(2) 水平防渗系统的选择：填埋场场区水平防渗系统的选择应根据环境标准要求、场址的地质、水

文地质与工程地质条件、衬里材料来源、填埋废物性质及其与衬里兼容性、施工条件、经济可行性等因素进行综合考虑。

一般而言，天然防渗系统造价较人工防渗系统低，单层衬里、单复合衬里、双层衬里、双复合衬里防渗系统的造价依次递增。因此，若在场区及其就近有合乎要求的黏土，宜使用黏土作衬里系统的防渗垫层及保护层，以降低工程投资；若无高质量的黏土，但有粉质黏土，可考虑采用优质膨润土对粉质黏土进行人工改性，以使衬里达到防渗设计要求；若场址区不具备天然防渗的条件，则应采用柔性膜或天然与人工材料组成的人工防渗系统。

如果场址区地下水贫乏，且底部高于地下水水位或虽低于地下水水位，但地下水的水头压力尚不致破坏衬里时，可采用单层衬里防渗系统；如果填埋场的水文地质和工程地质条件不理想，且对场区周边环境质量要求严格，应选择复合衬里系统或双层衬里系统。双复合衬里系统则多用于填埋废物危害性更大、环境质量要求更苛刻的安全填埋场。目前，我国大部分地区的城市固体废物卫生填埋场多采用单层衬里和单复合衬里防渗系统。

2. 终场防渗系统

（1）系统的功能：终场防渗系统是指当填埋场的填埋容量用尽、运行终止后，对整个填埋场进行的最终覆盖，故又称最终覆盖系统。其主要功能是削减渗滤液的产生量；控制填埋场气体从填埋场上部无序释放；避免废物的扩散，抑制病原菌的繁殖以及提供一个可供景观美化和填埋土地再用的表面等。我国大多数已停运的填埋场，其终场防渗系统的设计和施作过于粗略，往往都是简单覆盖一层土层，这既给填埋场底部防渗及渗滤液的处理带来极大的压力，又难以有效保护周围公众健康和生态环境，进而引发社会矛盾，这类教训是值得认真吸取的。

（2）系统的构成与设计：一个完整的填埋场终场覆盖系统由多层组成，可分为两大部分：第一部分是土地恢复层，即为表土层；第二部分是密封层（系统），从上至下由保护层、排水层、防渗层和调整层（或基础层）组成（图 5－3－8）。其中防渗层、保护层和表土层是该系统的基本组成，其余两层宜视废物的性质和填埋场所在地的气候等条件考虑增减。

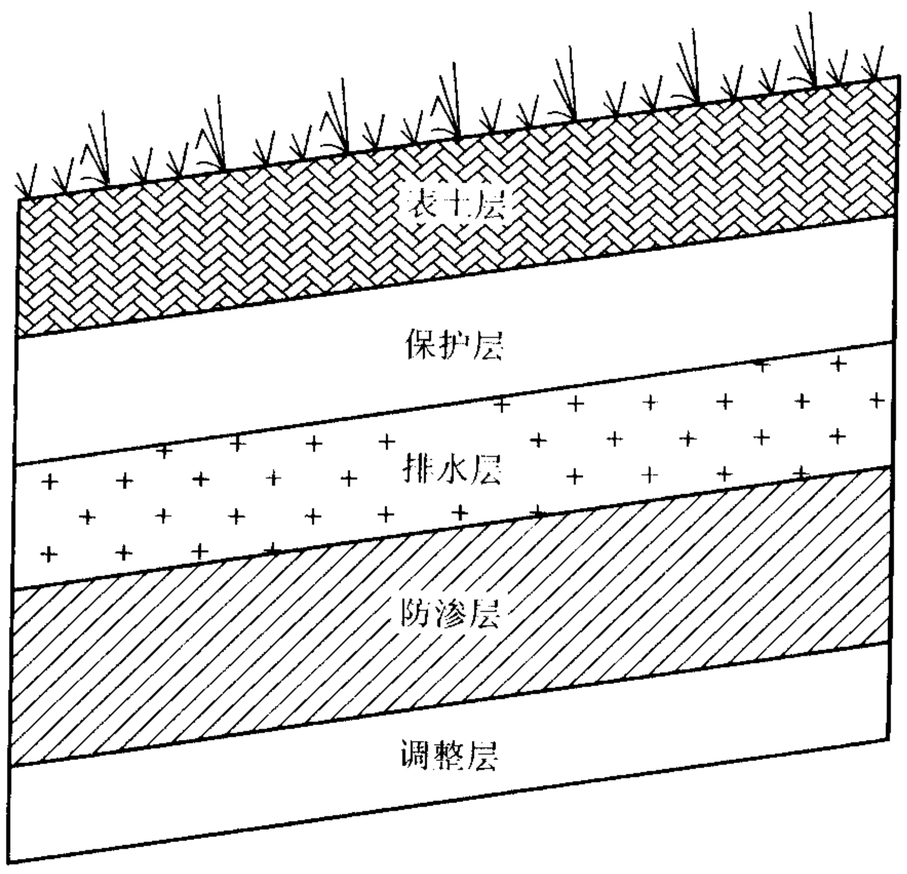


图 5－3－8　终场防渗系统的构成

表土层的设计取决于填埋场封场后的土地利用规划，通常要能生长植物。表层土壤层的厚度要保证植物根系不造成下部密封层的破坏。此外，在冻结区表层土壤层的厚度必须保证防渗层位于霜冻带以下。表层的最小厚度不应小于 30 cm。

保护层的设置是为了防止上部植物根系以及挖洞动物对下层的破坏，保护防渗层不受干燥收缩、冻结解冻等的破坏，防止排水层的堵塞，维持稳定等。

排水层的设置旨在排泄通过保护层的降雨下渗水等，降低入渗水对下部防渗层的水压力。当通过保护层入渗的水量过多，对防渗层构成较大渗透压力时，该层的设置才是必要的。排水层设计的最小渗透系数为 10^{-3} cm/s，坡度一般≥3%。

防渗层是终场覆盖系统中最为重要的部分。其主要功能是阻止入渗水进入填埋废物中，防止填埋场气体逸出填埋场。防渗材料有压实黏土、柔性膜、人工改性防渗材料和复合材料等。防渗层的渗透系数要求 $K \geq 10^{-7}$ cm/s，铺设坡度≥2%。

调整层用于控制填埋场气体（land fill gas，LFG），将其导入填埋气体收集设施进行处理或利用，同时也起到支撑上述各层的作用。通常是在填埋废物降解产生较大量的 LFG 时才需要。

覆盖材料包括自然土、工业渣土、建筑渣土和陈垃圾等。自然土是最常用的覆盖材料，它的渗透系数小，能较好地阻止渗滤液和填埋气体的扩散，但除了掘埋法外，其他类型的填埋场都存在着大量取土而导致的占地和破坏植被问题。工业渣土和建筑渣土作为覆盖，不仅能解决自然土取用问题，而且能为废弃渣土的处理提供出路。陈垃圾筛分后的细小颗粒作为覆盖土也能有效地延长填埋场的使用年限，增加填埋容量，因此陈垃圾可以作为废物填埋覆盖材料的来源。

三、渗滤液的收集与处理

（一）渗滤液的产生及其特征

废物渗滤液是指废物在填埋或堆放过程中因其有机物分解产生的水或废物中的游离水、降水、径流及地下水入渗而淋滤废物形成的成分复杂的高浓度有机废水。大量资料表明，降水、地表径流和地下水入渗是废物渗滤液产生的主要原因。渗滤液的水质取决于废物组分、气候条件、水文地质、填埋时间及填埋方式等因素。

由该表并结合其他资料可知，渗滤液具有以下基本特征：①有机污染物浓度高，尤以5年内的“年轻”填埋场的渗滤液为最；②氨氮含量较高，在“中老年”填埋场渗滤液中尤为突出；③磷含量普遍偏低，尤其是溶解性的磷酸盐含量更低；④金属离子含量较高，其含量与所填埋的废物组分及时间密切相关；⑤溶解性固体含量较高，在填埋初期（0.5～2.5年）呈上升趋势，直至达到峰值，然后随填埋时间增加逐年下降直至最终稳定；⑥色度高，以淡茶色、暗褐色或黑色为主，具较浓的腐败臭味；⑦水质历时变化大，废物填埋初期，其渗滤液的pH较低，而COD、BOD_5、TOC、SS、硬度、金属离子含量较高；而后期，上述组分浓度则明显下降。

（二）渗滤液产量估算

目前常用的渗滤液产量估算方法有以下两种：

1. 经验公式法

日本的《指南解说》推荐的主因素相关法：

$$Q = (C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2) \cdot I \times 10^{-3} \tag{5-3-70}$$

式中：Q——渗滤液产生量，m^3/d；

A_1，A_2——分别为正在填埋区和已完成填埋区的面积，m^2；

C_1，C_2——分别为正在填埋区和已完成填埋区的渗出系数，其值一般在0.2～0.8之间，且$C_1 > C_2$；

I——填埋场所在区域的最大年或月降水量的日换算值，mm/d。

2. 水量均衡法

以填埋场为主体，根据进出水量平衡原理，可得渗滤液产量的估算式：

$$L = P + W + Q_1 + Q_2 - E_1 - E_2 - Q_3 - Q_4 - H \tag{5-3-71}$$

式中：L——渗滤液产生量；

P——填埋场作业区域的降水量；

W——废物中的含水量；

Q_1——作业区域的地下水入渗量；

Q_2——地表径流流入量；

E_1——填埋场地表自然蒸发量；

E_2——填埋场地表植被叶面蒸发量；

Q_3——填埋场地表流失量；

Q_4——作业单元底部衬层渗出量；

H——填埋场持水量。

上述各项指标中，降水量和蒸发量可以从当地气象部门获得；外部渗入的水和从填埋场地表流失的水

可以通过径流系数来计算。

对多数设计完善的填埋场而言，场外地表径流、地下水对渗滤液的增加量、渗滤液穿透衬层的外泄量和填埋场地表流失量均可忽略不计，即 $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0$，则：

$$L \approx P + W - E_1 - E_2 - H \tag{5-3-72}$$

对一些特定气象条件下的填埋场和填埋废物而言，相对于降雨量和蒸发量（E），废物中的含水量和填埋场持水量是很小的，故上式还可进一步简化为：

$$L \approx P - E \tag{5-3-73}$$

水量均衡法和经验公式法的主要区别在于对降水量的不同处理上。从气象部门获得的一年中最大月降水量，其平均日降水量远比最大日降水量小得多，因此从理论上用多项代数和来估算渗滤液产量，会使暴雨期间渗滤液大量积存，影响填埋场的正常运行。当然，由于设计流量减少，渗滤液处理设施环节相应减少，使得基建投资降低。因此，若在处理设施前有足够大体积的调节池调节容纳暴雨期间的渗滤液，就会避免积水问题，同时也降低了造价。

（三）渗滤液的收集系统

1. 收集系统的功能

渗滤液收集系统的主要功能是将填埋场内产生的渗滤液迅速汇聚收集，并通过输水管、集水池等输送至指定地点，如渗滤液处理站或城市污水处理厂进行处理，避免渗滤液在填埋场内的长时间蓄积。

2. 收集系统的构成

渗滤液收集系统主要由汇流系统和输送系统两部分组成。汇流系统的主体是一位于场底防渗衬层上的、由砾卵石或碎（渣）石构成的导流层。该层内设有导流沟和穿孔收集管等。导流层设置的目的是把场内的渗滤液通畅、及时地导入导流沟内的收集管中。渗滤液的输送系统多由集水槽（池）、提升多孔管、潜水泵、输送管道和调节池等组成。有条件时，可利用地形条件以重力流形式让渗滤液自流到储存或处理设施，此时可省掉集液池和提升系统。典型的填埋场渗滤液收集系统由以下几部分构成：

（1）导流（排水）层：主要由厚度等于或大于 30 cm 粗沙砾或卵石组成，必须覆盖整个填埋场底部衬里上，其水平渗透系数应大于 1×10^{-3} cm/s，纵、横坡度大于 2%。导流层与废物之间宜设土工织物等人工过滤层，以免细粒物质堵塞导流层，影响其正常排水功能的发挥。

（2）导流（盲）沟与导流管：导流盲沟设置在导流层的底部，并贯穿整个场底，其断面常为等腰梯形。山谷形填埋场有主、支沟之分，位于场底中轴线上的为主沟，在主沟上按间距 30 ~ 50 m 设置支沟，两者夹角多采用 15°的倍数（60°为佳）。盲沟中填充卵砾石或碎石，粒径上大下小形成反滤，通常颗粒粒径上部为 40 ~ 60 mm，下部为 25 ~ 40 mm。导流管按照敷设位置分为干管和支管，分别埋设在导流盲沟的主沟和支沟中。导流管的管径需根据填埋场的具体条件按水力学计算确定，通常主管管径不应小于 250 mm，支管管径不应小于 200 mm；管材目前多采用高密度聚乙烯（HDPE）。导流管须预先制孔，孔径 15 ~ 20 mm，孔距 50 ~ 100 mm，开孔率应保证其刚度和强度要求，以 2% ~ 5% 为常见。同时在管道安装和初期填埋作业时，应注意避免管道受到挤压破坏。典型的渗滤液导流系统断面如图 5 - 3 - 9 所示。

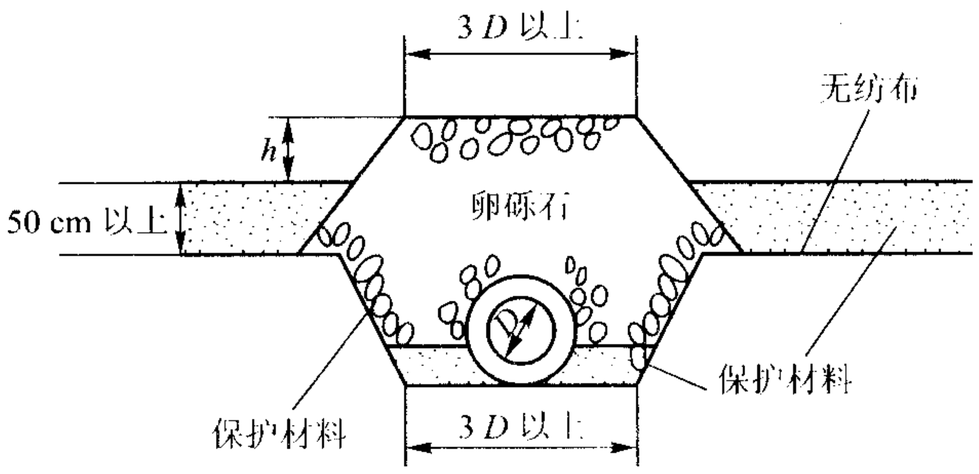


图 5 - 3 - 9　典型渗滤液收集系统断面

（3）集液池及提升系统：平原型填埋场因渗滤液无法借助于重力流从场内导出，需采用集液池和提升系统。集液池多在废物坝前最低洼处下凹形成，其容积视对应的填埋单元面积而定。一般为 5 m × 5 m × 1.5 m，池坡 1∶2，池内用卵砾石堆填以支撑上覆废物等荷载，卵砾石的空隙率介于 30% ~ 40% 之间。提升系统包括提升多孔管和提升泵。提升管按安装形式可分为竖管和斜管，后者因能大大减小负摩擦力的作用，且可避免竖管带来的诸多操作问题，故采用较普遍。斜

管常采用高密度聚乙烯管，半圆开孔，管径一般为 800 mm，以便于潜水泵的放入和取出。潜水泵通过提升斜管安放于贴近池底部位，其作用是将渗滤液抽送入调节池。典型斜管提升系统断面见图 5－3－10。

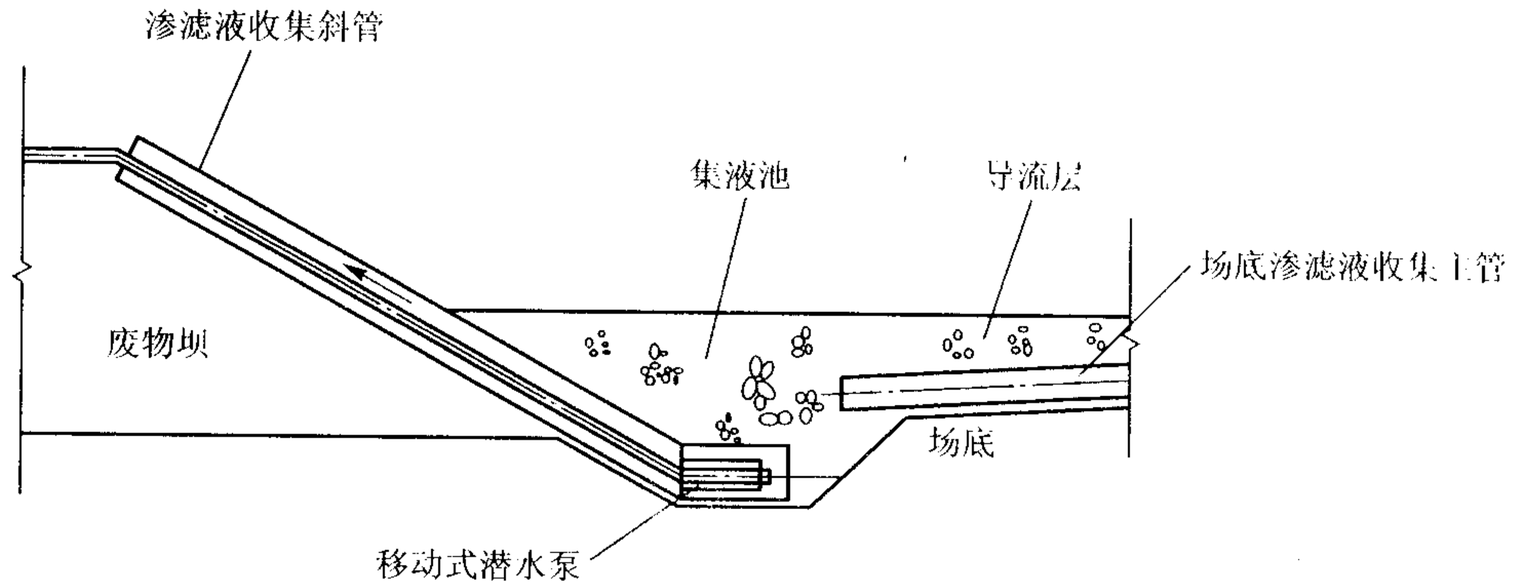


图 5－3－10 典型斜管提升断面

对于山谷型填埋场，通常可利用自然地形坡降采用渗滤液收集管直接穿过废物坝的方式将渗滤液导出坝外，此时可将集液池和提升系统省略。

（4）调节池：是渗滤液收集系统的最后一个环节。它既可作为渗滤液的初步处理设施，又起到渗滤液水质和水量调节的作用，从而保证渗滤液后续处理设施的稳定运行和减小暴雨期间渗滤液外泄污染环境的风险。调节池常采用地下式或半地下式，其池底和池壁多用 HDPE 膜进行防渗，膜上采用预制混凝土板保护。

调节池容积可按以下步骤确定：

① 求每月渗滤液产量，按下式计算：

$$Q_m = I_i \times C \times \frac{A}{1\,000} \tag{5-3-74}$$

式中：Q_m——渗滤液月产量，m^3/月；

I_i——多年（一般采用 20 年）逐月平均降雨量，mm；

C——渗出系数，其值随填埋场覆土性质及坡度不同而异，一般介于 0.2～0.8 之间，运行的填埋场（区）C 值常取 0.35～0.5，而封场的填埋场（区）可取 0.1～0.3；

A——填埋场汇水面积，m^2。

② 求每月渗滤液剩余量，按下式计算：

$$Q_r = Q_m - Q_t \tag{5-3-75}$$

式中：Q_r——每月渗滤液剩余量，m^3/月；

Q_t——渗滤液的月处理量，m^3/月。

③ 求需调节的渗滤液体积 V_a，可将每月渗滤液剩余量为正值者（多在 6～9 月的雨季）求和，即：

$$V_a = \sum Q_r \tag{5-3-76}$$

为设计的安全起见，可选择多年（如 20 年）降雨资料中最大暴雨的降雨季节，用上述方法计算出该期间需调节的渗滤液体积 V_s。则调节池的容积 V 可通过 V_a 与 V_s 比较确定，取大者设计。

（四）渗滤液的处理

由于渗滤液的水量水质波动大、组分复杂和污染强度高等特点，渗滤液处理一直是填埋场运行管理最突出的难题，也是制约卫生填埋场进一步推广应用的重要因素。

归纳起来，国内外渗滤液处理的主要工艺方案有二：即合并处理和单独处理。

合并处理是指将渗滤液直接或预处理后引入填埋场就近的城市生活污水处理厂进行处理。该方案利用了污水处理厂对渗滤液的缓冲、稀释和调节营养等作用，可以减少填埋场投资和运行费用，最具经济性。但该方案的应用有一定的前提条件：其一，必须有城市生活污水处理厂，且距填埋场较近，否则，由于填

埋场远离污水处理厂，渗滤液的输送将造成较大的经济负担；其二，由于渗滤液特有的水质及其变化特点，如果不加控制地采用此法，易造成对污水处理厂的冲击负荷，影响污水处理厂的正常运行。国内研究认为当加入渗滤液的体积不超过生活污水体积的0.5%是比较安全的，而国外研究表明视不同的渗滤液浓度该比例可以提高到4%～10%，最终的控制标准取决于处理系统的污泥负荷，只要加入渗滤液后污泥负荷不超过10%就是可以接受的。

一般情况下，由于污水管道的纳管标准远远低于渗滤液原水的污染物指标，因此渗滤液往往需要先在现场进行预处理，降低渗滤液中的COD、BOD和SS等，以避免对污水处理厂的冲击。现场预处理宜采用生物处理为主的工艺，最好采用生物脱氮工艺。

渗滤液单独处理方案按工艺特点又可分为生物法、物化法和土地法等，利用一种或几种组合工艺（常以生物法为主），在填埋场区处理渗滤液，达标后直接排放。该方案的应用较广。

1. 土地处理

土地处理法是人类最早采用的污水处理技术，其原理是利用土壤中的微生物降解作用使渗滤液中的有机物和氨氮发生转化，通过土壤中有机物和无机胶体的吸附、络合、螯合、颗粒的过滤、离子交换吸附和沉淀等作用去除渗滤液中悬浮固体和溶解成分，通过蒸发作用减少渗滤液的产生量。用于渗滤液处理的土地法主要有填埋场回灌处理系统和土壤植物处理（S－P）系统两种形式。

废物填埋场渗滤液的回灌处理是主要利用填埋废物层类似于“生物滤床”的吸附、降解作用以及填埋场覆盖层的土壤净化作用、最终覆盖后填埋场地表植物的吸收作用和蒸发作用将渗滤液减质减量化。回灌法的主要优点是能减少渗滤液的处理量、降低其污染物浓度；加速填埋场的稳定化进程、缩短其维护监管期，并能产生明显的环境效益和较大的间接经济效益，尤其适用于干旱和半干旱地区。据估计，英国约50%的填埋场进行了回灌处理。但回灌法往往不能完全消除渗滤液，通常只能作为预处理方式与其他处理方式相结合。此外，反复回灌易造成厌氧填埋场渗滤液中氨氮的不断积累，影响其后续处理。

近年来土壤植物处理系统发展迅速，其处理过程和机理有三：①通过吸附、离子交换和沉淀等作用，土壤颗粒从渗滤液中将悬浮固体过滤掉，并将溶解性固体组分吸附在颗粒上；②土壤中微生物将渗滤液中的有机物转化和稳定，并转化有机氮；③植物利用渗滤液的各种营养物生长，以保持和增加土壤的渗入容量，并通过蒸腾作用减少渗滤液量。

瑞典某填埋场在现场建立了大规模的S－P系统进行试验。该系统占用填埋场面积4 hm^2，其中1.2 hm^2种植柳树，2.8 hm^2种植各种草本植物，渗滤液从收集池经过喷水器提升到土壤植物处理系统中。试验表明，该法不仅能减少渗滤液量，而且能降低渗滤液的浓度，例如氨氮浓度平均下降了60%，从194 mg/L降低到83 mg/L。

2. 生物处理

生物处理是废物渗滤液的主要处理方式。生物法包括好氧生物处理、厌氧生物处理及两者的结合。

（1）好氧生物处理：好氧生物处理包括活性污泥法、稳定塘法、生物转盘和滴滤池等方法。好氧生物处理法可有效地降低BOD、COD和氨氮，还可除去铁、锰等金属，因而得到较多的应用，尤以活性污泥法和生物转盘法为最。活性污泥法对易降解有机物具有较高的去除率，对新鲜的废物渗滤液，保持泥龄为一般城市污水的2倍，负荷减半，可达到较好的去除效果。但是活性污泥法处理废物渗滤液的效果受温度影响较大，对“中老龄”渗滤液的去除效果不理想。低氧、好氧两段活性污泥法及SBR法等改进型活性污泥流程因其能保持较高的运转负荷，而且停留时间短，处理效果好，比常规活性污泥法更有效。然而改进型活性污泥法的工程投资大，运行管理费用高，常成为其应用的限制因素。

与活性污泥法相比，尽管稳定塘降解速率慢，停留时间长，占地面积大，但由于其工艺较简单，投资省，管理方便，且能够把好氧塘和厌氧塘相结合，分别发挥好氧微生物和厌氧微生物的优势，在土地允许的条件下，是最经济的废物渗滤液好氧生物处理方法，因而宜优先考虑。

与活性污泥法相比，生物膜法具有抗水量和水质冲击负荷的优点，而且生物膜上能生长世代较长的硝化菌，有利于渗滤液中氨氮的硝化。

（2）厌氧生物处理：用于渗滤液处理的厌氧生物处理包括上流式厌氧污泥床、厌氧淹没式生物滤池、混合反应器等。厌氧生物处理的优点是投资及运行费用低，能耗少，产生污泥量少，一些复杂的有机物可在厌氧条件下被细菌胞外酶水解生成小分子可溶性有机物，再进一步降解。它的缺点主要是水力停留时间长，污染物的去除率相对较低，对温度的变化较敏感；但已有的研究表明厌氧系统产生的气体可以满足系统的能量要求，若能将该部分能量加以合理利用，可保证厌氧工艺稳定的处理效果。近20年，厌氧技术有了较快的发展，不断开发出新的厌氧处理工艺，例如厌氧接触法、分段厌氧消化及上流式厌氧污泥床，这些工艺克服了传统工艺有机负荷低等缺点，使其在处理高浓度（$BOD_5 \geq 2\ 000\ mg/L$）有机废水方面取得了良好的效果，是一种宜优选的生物预处理工艺。

（3）厌氧与好氧结合方式：在生物法处理渗滤液的工程中，由于渗滤液中的COD和BOD较高，单纯采用好氧法或单纯采用厌氧法处理渗滤液均较为少见，也很难使渗滤液处理后达标排放。实践表明，采用厌氧－好氧处理工艺既经济合理，处理效率又高。A/O、A^2/O和SBR等具有脱氮功能的组合工艺具有较好的效果。这些技术用于处理废物渗滤液与常规污水处理技术的不同主要体现在有机负荷、污泥浓度和停留时间等参数的选取以及处理工艺的运行效果上。此外，由于渗滤液中磷含量偏低，在生化处理时应投加一定量的磷盐，以保证$BOD_5 : P = 100 : 1$。

3. 物化处理

物化法尽管也用来处理新鲜渗滤液，但更多的是用来处理老龄渗滤液，是渗滤液后处理中最常用的方法。物化处理包括混凝沉淀、化学氧化、吸附、膜分离、氨氮吹脱、过滤等方法。

物化法是对生化法和土地处理法的必要而有益的补充，可以去除渗滤液中难以生化降解的污染物，使渗滤液达标排放。但是由于物化方法操作较复杂，运行费用较高，目前国内填埋场使用较少。

四、垃圾填埋气体的收集与利用

（一）垃圾填埋气体的产生过程及其对环境的影响

垃圾填埋气体又称填埋气（LFG）。填埋气的产生过程是一个复杂的生物、化学、物理的综合过程，其中生物降解是最重要的。目前普遍认为填埋气产生过程可分为以下5个阶段，见图5－3－11。

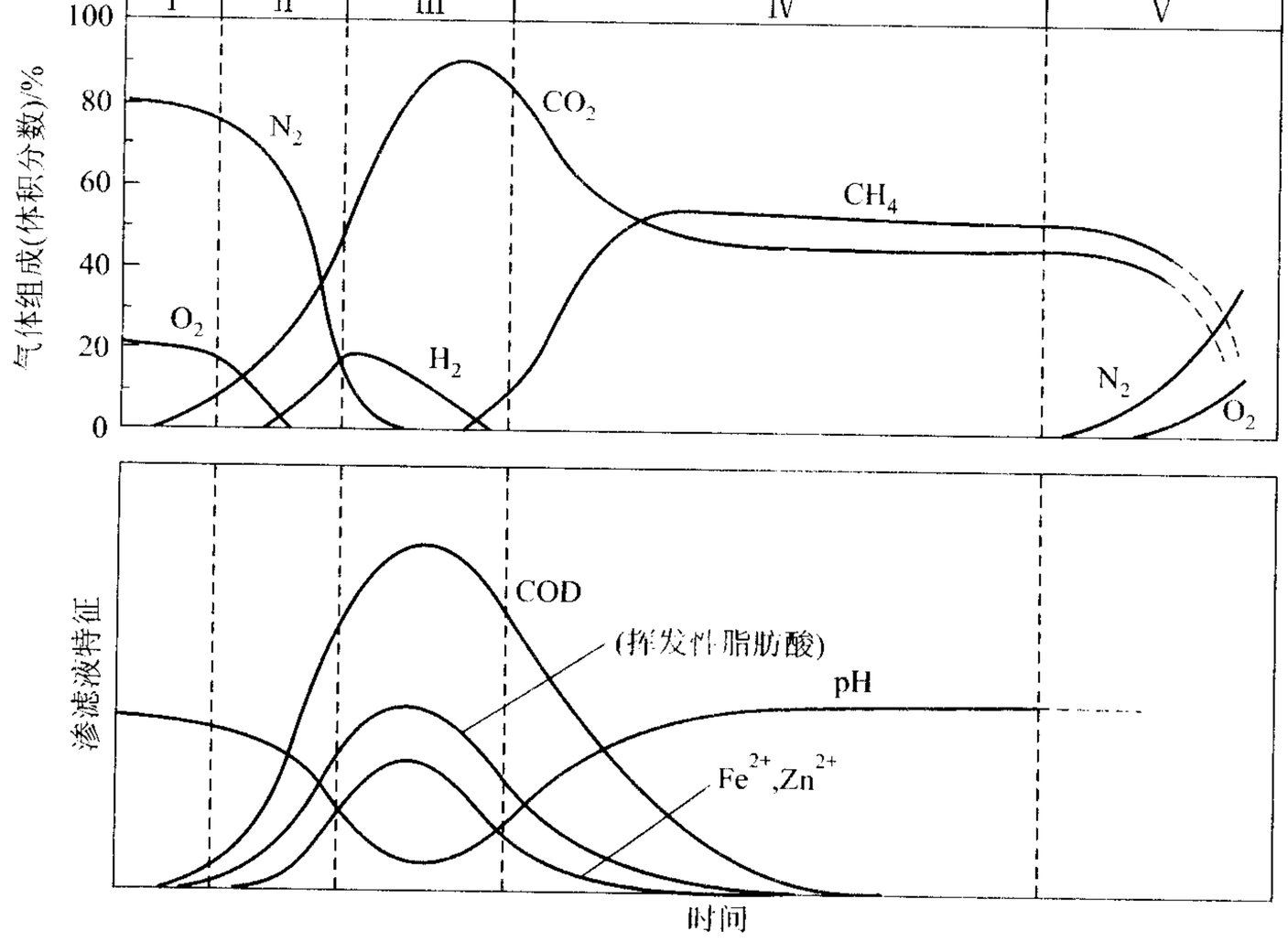


图5－3－11 填埋场产气阶段

1. 第一阶段——好氧分解阶段

废物进入填埋场后首先经历好氧分解阶段，它的持续时间比较短。复杂的有机物通过微生物胞外酶分解成简单有机物，并进一步转化为小分子物质和 CO_2。这一阶段由于微生物进行好氧呼吸、有机质被彻底氧化分解而释放热能，垃圾的温度可能升高 10 ~ 15 ℃。

2. 第二阶段——好氧至厌氧的过渡阶段

这一阶段，随着氧气的逐渐消耗，厌氧条件逐步形成。作为电子受体的硝酸盐和硫酸盐开始被还原为氮气和硫化氢。

3. 第三阶段——酸发酵阶段

复杂有机物，如碳水化合物、脂肪、蛋白质等在微生物作用下水解至基本结构单位（比如单糖、氨基酸），并进一步在产酸细菌的作用下转化成挥发性脂肪酸（VFA）和醇。

4. 第四阶段——产甲烷阶段

在产甲烷细菌的作用下，VFA 转化成 CH_4 和 CO_2。该阶段是能源回用的黄金时期。一般废物填埋 180 ~ 500 天后进入稳定产甲烷阶段。该阶段的主要特征是：①产生大量的 CH_4；②H_2 和 CO_2 的量逐渐减少；③浸出液 COD 下降，pH 维持在 6.8 ~ 8.0。

5. 第五阶段——填埋场稳定阶段

当第四阶段中大部分可降解有机物转化成 CH_4 和 CO_2 后，填埋场释放气体的速率显著减小，填埋场处于相对稳定阶段。该阶段几乎没有气体产生，浸出液及废物的性质稳定。

干填埋气主要由 CH_4、CO_2、N_2、O_2、NH_3、H_2、CO 组成，见表 5 - 3 - 23。通常 CH_4 的体积分数为 45% ~ 60%，CO_2 体积分数为 40% ~ 50%。此外还有不少于 1% 的其他挥发性有机物，主要是包括烷烃、环烷烃、芳香烃、卤代化合物等在内的挥发性有机物（VOCs）。填埋气体是在多种微生物代谢作用下形成的，因而不同的填埋场构造、不同的填埋废物和气候条件，所产生的释放气体的组成也会有一定的差别。

表 5 - 3 - 23　干填埋气组成

组分	浓度/%（体积分数）
CH_4	45 ~ 60
CO_2	40 ~ 50
N_2	0 ~ 10
O_2	0 ~ 2
硫化物	0 ~ 1
NH_3	0.1 ~ 1.0
H_2	0 ~ 0.2
CO	0 ~ 0.2
微量化合物	0.01 ~ 0.6

如果不采用适当的方式进行填埋气收集，填埋气则会在填埋场中累积并透过覆土层和侧壁向场外释放，可能对地下水、大气环境造成污染，也可能造成爆炸和火灾。

此外，填埋气中的一氯甲烷、四氯化碳、氯仿、二氯乙烯等微量气体会对人体的肾、肝、肺和中枢神经系统造成损害。

（二）填埋气体的收集

为了控制填埋气对环境的不利影响并对其进行资源化利用，需要改变填埋气的散排状态并加以人为收集。填埋气体的收集系统分为被动收集系统和主动收集系统两种。前者是在填埋场内靠填埋气体自身的压力沿着设计的管道流动而收集，而后者是利用抽真空的办法来收集气体。填埋气体的被动收集系统适用于垃圾填埋量不大、填埋深度浅、产气量较低的小型城市垃圾填埋场（$<40\ 000\ m^3$），被动收集系统包括被动排放井和管道、水泥墙和截留管等。在大型填埋场中往往采用主动收集系统来收集填埋气体，系统包括抽气井、集气/输送管道、抽风机、冷凝液收集装置、气体净化设备及填埋气利用系统（如发电系统）。

1. 集气系统

通常填埋气收集系统有两类：竖井集气系统和水平集气系统。一般垃圾厚度大于 3 m 时，竖井间距为 30 ~ 70 m，一般选择 50 m。竖井分边井和中部井两大类，边井井间距较小，而中部井井间距适当大一些。一般认为，距填埋区边缘 20 m 以内的井为边井，边井的主要作用在于控制沼气不外溢，以保护环境为主，因而抽气量较大，填埋气中的甲烷含量较低。从纵面上，中部井也分为浅层和深层井，浅层井的作用和边井相同，用以控制边层填埋气的扩散，深层竖井的气体质量较边井和浅层井好，甲烷含量较

高。这样分区、分层的设置将产生富甲烷填埋气和贫甲烷填埋气。利用集气管道收集后，送往不同的利用系统。

为了优化竖井的布置和确定有效的产气范围，抽气井的布置按照等边三角形的形式来布置，井间距离要根据抽气井的影响半径（R）按照相互重叠的原则设计，即其间隔要使其影响区相互交叠。即：

$$D = 2R\cos 30° \tag{5-3-77}$$

式中：D——三角形布局的井间距离，m；

R——抽气井的影响半径，m。

影响半径与填埋垃圾的类型、压实程度、填埋深度和覆盖层类型等因素有关，应该通过现场试验来确定。在缺少试验数据的情况下，影响半径可以采用 45 m。对于深度大并有人工薄膜的混合覆盖层的填埋场，常用的井距为 45～60 m；对于使用黏土和天然土壤作为覆盖层材料的填埋场，可以采用较小的井间距，如 30 m，来防止空气抽进填埋场系统。

水平集气系统主要适用于新建的和正在运行的垃圾填埋场，其特点是填埋垃圾的同时收集沼气。适用于垃圾的有机物是以易降解成分为主的填埋场。水平集气系统的集气速率是竖井的 5～35 倍，由于采用边填埋边集气，因而水平集气系统的收集效率较竖井更高。但垃圾腐熟造成的不均匀沉降对集气系统影响较大。美国洛杉矶市卫生局在 20 世纪 80 年代初率先采用水平集气系统，Puente Hills 填埋场就是其中的典型代表。在填埋 2 层垃圾后开始安装水平集气管，各个集气支管之间在垂直方向相距 24.4 m，在水平方向相距 61.0 m。

水平管网采用分层设置，集气管设置在盲沟中，从而得到有效保护。水平集气管有两种：一种是穿孔管；另一种是套管。后者由于采用不同管径 PVC 管互相嵌套，对垃圾的不均匀沉降适应能力较强，且不易脱落，因此应用较多。

2. 输送系统

为了使 LFG 收集系统达到稳定运行状态，管道布置通常采用干路和支路的形式，干路互相联系或形成一个“闭合回路”，从而可以得到一个比较均匀的真空分布，使系统运行更加容易、灵活。通常用 ϕ150～200 mm 的 PVC 管（或 PE 管）将抽气井与引风机连接起来，管道的铺设应有沉降，在填埋场的沉降比应该大于 1:40，以适应不同的沉降变化。应控制管道大小以保证 LFG 输送速度小于 6 m/s。这样防止冷凝水被带走，允许冷凝水沿管道回流，返回井里。此外还减少管内摩擦损失，降低对风机功率的要求，以节约能源。

由于垃圾填埋场内部的填埋气的温度通常在 16～52 ℃变化，集气管道内的填埋气温度接近周围的环境温度。在输送过程中，填埋气会逐渐变凉而冷凝。因此冷凝液的收集和排放是 LFG 输送系统设计时考虑的重点。为了排除冷凝液，集气管的安装应该保持一定的坡度（一般大于 5%），并在集气管道的最低处安装冷凝液收集排放装置。冷凝液收集器包括分离器、冷凝管、泵站和贮存罐。

输送管道的末端需要安装风机来保证集气系统和输送系统压力的相对稳定和 LFG 流量的相对恒定。在选择风机时，首先要根据预期的最坏的操作条件来确定系统需要的总压力差。风机功率大小需要根据总的负压头和填埋气体积来设计。目前填埋场中离心式引风机最常采用。在运行过程中，要求风机具有良好的密封性能，尤其是风机的轴，如果密封类型不适当或者效果不佳，LFG 会泄漏到空气中从而引起异味，并产生安全隐患。

（三）填埋气净化及利用

自由排放的填埋气体会对环境和人类健康造成危害，若能加以收集则可以作为能源来利用。填埋气的热值与城市煤气的热值接近，每立方米填埋气的能量相当于 0.45 L 柴油或 0.6 L 汽油的能量，热值约为 4 500～5 500 kcal/m^3_N。然而填埋场所收集的填埋气组分复杂，在利用之前需要进行净化预处理。填埋气中主要含有 CH_4、CO_2、N_2、O_2、NH_3、H_2、CO 等组分。在对填埋气利用之前尽可能提高甲烷的含量，增加气体的热值，并降低微量气体比例以防止危害。

由于填埋场中的填埋气温度较高，水蒸气接近饱和，压力略高于大气压，因此，当气体被抽吸到收集

站后，在填埋气体输送和利用前必须进行脱水处理。一般采用冷凝器、沉降器、旋风分离或过滤器等物理单元来除掉气体中的水分和颗粒物，也可以通过分子筛吸附、低温冷冻、脱水剂甘二醇等进行脱水，使填埋气体中水分含量小于后续操作条件的露点以下。在实际脱水过程中，低温冷冻比较常用。脱水后填埋气的热值提高 10% 左右。填埋气还含有少量的硫化氢，容易引起工程设备腐蚀，因此需要去除填埋气中的硫化氢。尤其当垃圾含有石膏板之类的建筑材料和硫酸盐污泥时，填埋气体中的硫化氢会大量增加。脱硫技术主要有湿式吸收工艺和吸附工艺两大类，包括催化吸收法，链烷醇胺选择吸收法，碱液吸收法，活性炭吸附和海绵铁吸附法，其中活性炭吸附法最常用。

甲烷、二氧化碳、氮气和氧气是填埋气体中 4 种最主要的组分，其中甲烷和二氧化碳共占了填埋气体体积分数的 90% 以上，因此填埋气体的提纯是甲烷、二氧化碳、氮气和氧气的混合气体的分离过程，而关键则是甲烷和二氧化碳的气体分离。目前分离二氧化碳的主要方法有：吸收分离、吸附分离和膜分离。

对填埋气体进行收集控制和资源化利用，已成为城市垃圾填埋处置的重要部分。1977 年世界第一个垃圾填埋气回收系统在美国加利福尼亚南部建立，填埋气作为燃料用于锅炉燃烧。目前填埋气体的主要利用方式包括：直接燃烧产生蒸汽，用于生活或工业供热；通过内燃机燃烧发电；作为运输工具（如汽车）的动力燃料；脱水净化处理后用作城市民用管道燃气；用作二氧化碳和甲醇工业原料。

习　题

5-3-1　2004 年 12 月 29 日，中华人民共和国第十届全国人民代表大会常务委员会第十三次会议对 1995 年 10 月 30 日第八届全国人民代表大会常务委员会第十六次会议制定通过的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（1996 年 4 月 1 日施行）予以修订通过，并于（　　）开始实施。

A　2004 年 12 月 29 日　　B　2005 年 1 月 1 日

C　2005 年 4 月 1 日　　D　2005 年 6 月 5 日

5-3-2　根据 2004 年制定通过的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》中对固体废物的界定，以下说法错误的有：（　　）

A　固体废物没有使用价值

B　固体废物可能呈固态、半固态或置于容器中呈气态

C　固体废物也可成为宝贵的资源

D　固体废物可能来源生产、生活和其他活动中

5-3-3　我国 1998 年 7 月 1 日实施的《国家危险废物名录》中规定了（　　）类危险废物。

A　27　　B　37　　C　47　　D　57

5-3-4　以下哪类废物没有纳入 2004 年制定通过的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的管理范畴：（　　）

A　工业固体废物　　B　放射性固体废物

C　粉尘　　D　污水处理厂污泥

5-3-5　以下哪类废物会形成病原体型污染：（　　）

A　尾矿　　B　生活垃圾　　C　赤泥　　D　铬渣

5-3-6　第一个关于固体废物的专业性法规《固体废物处置法》是由哪个国家于 1965 年制定的：（　　）

A　日本　　B　德国　　C　美国　　D　中国

5-3-7　以下属于日本制定的固体废物相关法规有：（　　）

A　1976 年修改的《资源保护及回收法》（RCRA）

B　1980 年颁布的《综合环境对策保护法》（CERCLA）

C 1965 年制定的《固体废物处置法》

D 1991 年颁布的《促进再生资源利用法》

5-3-8 以下说法错误的有：（ ）

A 固体废物管理的“三化原则”指的是“资源化”、“无害化”、“无毒化”

B 固体废物的全过程管理原则是对固体废物产生—收集—运输—综合利用—处理—贮存—处置，在每一环节都将其作为污染源进行严格的控制

C 固体废物污染控制的“3C”原则是指避免产生原则、综合利用原则、妥善处置原则

D 固体废物管理的“3R”原则是指减少产生原则、再利用原则、再循环原则

5-3-9 下列不属于危险废物的有：（ ）

A 医疗垃圾　　B 含高浓度重金属污泥

C 浸出液 pH = 14 的固体废物　　D 园林垃圾

5-3-10 拖曳容器系统分析。从一新建工业园区收集垃圾，根据经验从车库到第一个容器放置点的时间（t_1）以及从最后一个容器放置点到车库的时间 t_2 分别为 15 min 和 20 min。假设装载时间为 30 min，每趟运输在填埋场逗留时间为 8 min，工业园到垃圾处置场的单程距离为 25 km（垃圾收集车最高行驶速度为 88 km/h），试计算每天能够清运垃圾的次数及每天实际工作时间（每天工作时间 8 h，非生产性时间因子为 0.15）：（ ）

A 每天清运 5.14 次，每天实际工作时间 6 h

B 每天清运 5.14 次，每天实际工作时间 7.8 h

C 每天清运 5 次，每天实际工作时间 7.8 h

D 每天清运 5 次，每天实际工作时间 6 h

5-3-11 以下关于等降比（e）的说法不正确的有：（ ）

A $e>5$，属极易重选的物料，除极细（$<10\sim5\mu m$）细泥外，各个粒度的物料都可用重选法选别

B $2.5<e<5$，属易选物料，按目前重选技术水平，有效选别粒度下限有可能达到 19 μm，但 37~19 μm级的选别效率也较低

C $1.5<e<1.75$，属较难选物料，重选的有效选别粒度下限一般为 0.5 mm 左右

D $e<1.25$，属极难选的物料，宜采用重选法选别

5-3-12 下列关于磁流体分选的说法错误的有：（ ）

A 磁流体动力分选优点是分选介质为导电的电解质溶液，来源广、价格便宜，黏度较低，分选设备简单，处理能力较大，处理粒度为 0.5~6 mm 的固体废物时，可达 50 t/h，最大可达 100~600 t/h

B 磁流体静力分选优点是分选介质为导电的电解质溶液，来源广、价格便宜，黏度较低，分选设备简单，处理能力较大，处理粒度为 0.5~6 mm 的固体废物时，可达 50 t/h，最大可达 100~600 t/h

C 磁流体动力分选优点是介质黏度较小，分离精度较高，缺点是分选设备较复杂，介质价格较高、回收困难，处理能力较小

D 磁流体分选是一种重力分选和磁力分选联合作用的分选过程，可以分离各种工业废物和从城市垃圾中回收铝、铜、锌、铅等金属

5-3-13 关于污泥中水的说法错误的有：（ ）

A 表面吸附水是吸附在颗粒表面的水，约占水分的 70%，可用浓缩法分离

B 毛细管结合水是颗粒间形成一些小的毛细管，在毛细管中充满的水分约占总水分的 20% 左右，采用高速离心机脱水、负压或正压过滤机脱水

C 间隙水是存在颗粒间歇中的水，约占固体水分的 70% 左右，用浓缩法分离

D 内部水是在颗粒内部或微生物细胞内的水，约占总水分的 3%，可采用生物法破坏细胞膜除去胞内水，或用高温加热法、冷冻法去除

5-3-14 污泥含水率从 95% 降至 90% 时，求污泥体积的变化：（ ）

A　污泥体积减少 5%　　B　污泥体积减少 58%

C　污泥体积增大 5%　　D　污泥体积减少 30%

5-3-15　筛分效率是指：(　　)

A　筛下产品与入筛产品质量的比值

B　筛下产品与筛中所剩产品质量的比值

C　筛下产品与入筛产品中小于筛孔尺寸物质质量的比值

D　入筛产品中小于筛孔尺寸物质质量与筛下产品质量的比值

5-3-16　下列常见筛分设备筛面筛分效率排序正确的是：(　　)

A　编织筛网 < 冲孔筛面 < 棒条筛面

B　棒条筛面 < 冲孔筛面 < 编织筛网

C　冲孔筛面 < 棒条筛面 < 编织筛网

D　冲孔筛面 < 编织筛网 < 棒条筛面

5-3-17　以下说法错误的有：(　　)

A　堆肥化是在人工控制的条件下，依靠自然界中广泛分布的细菌、放线菌、真菌等微生物，人为地促进可生物降解的有机物向稳定的腐殖质转化的微生物学过程，其最终产物是人工腐殖质

B　堆肥化可分为厌氧堆肥化和好氧堆肥化，厌氧堆肥化释放的热量比好氧堆肥化的多

C　好氧堆肥具有温度高，堆肥周期短等优点

D　堆肥的最适含水率为 50% ~60% (质量分数)，此时微生物分解速率最快

5-3-18　好氧堆肥与沼气发酵的说法错误的有：(　　)

A　好氧堆肥化过程释放出的热量会比厌氧堆肥化多

B　好氧堆肥的气体产物主要有 CO_2、H_2O、NO_x

C　沼气发酵是在厌氧条件下进行，可分为潜伏阶段、中温阶段、高温阶段、腐熟阶段

D　沼气发酵过程可发生如下反应：$4CO + 2H_2O \longrightarrow CH_4 + 3CO_2$

5-3-19　固体废物的微生物处理对象为：(　　)

A　仅限于农业固体废物

B　仅限于生活垃圾

C　仅限于生活垃圾、农业固体废物等有机固体废物

D　可以是有机固体废物，也可以是无机固体废物

5-3-20　以下关于影响沼气发酵和好氧堆肥的因素说法错误的有：(　　)

A　堆肥物料的颗粒度越小，越有利于好氧堆肥化的进行

B　一般来说，pH 在 7.5 ~8.5 之间，可获得最佳的堆肥效果

C　厌氧消化原料的碳氮比以 (20 ~30):1 为宜

D　一般来说，在 35 ~38 ℃和 50 ~65 ℃温度范围有机物沼气发酵过程能获得较高消化效率和降解速率

5-3-21　树叶的 C/N 比为 50，与来自污水处理厂的活性污泥混合，活性污泥的 C/N 比为 6.3。计算各组分的比例使混合 C/N 比达到 25。假定条件如下：污泥含水率为 75%；树叶含水率为 50%；污泥含氮率为 5.6%；树叶含氮率为 0.7%。则污泥与树叶质量比为：(　　)

A　污泥与树叶质量比为 0.33:1

B　污泥与树叶质量比为 1:0.3

C　污泥与树叶质量比为 0.5:1

D　污泥与树叶质量比为 2:1

5-3-22　固体废物好氧反应需氧量的计算。试计算氧化 1 000 kg 有机固体废物的需氧量。已知：有机废物的化学组成式为 $[C_6H_7O_2(OH)_3]_5$，反应后的残留物为 400 kg，残留有机物的化学组成式为

$[C_6H_7O_2(OH)_3]_2$。则需氧量为：（　　）

A 需氧量为 70.8 kg　　B 需氧量为 708 kg

C 需氧量为 542 kg　　D 需氧量为 54.2 kg

5－3－23 动态密闭型堆肥法的通风量计算。试计算用动态密闭型堆肥法对 1 t 生活垃圾进行好氧堆肥所需的通风量。已知：该生活垃圾中有机组分的化学组成式为 $C_{60.0}H_{94.3}O_{37.8}N$；该生活垃圾中有机组分的含水率为 25%；挥发性固体占总固体的比例为 0.93；可降解挥发性固体占挥发性固体的比例为 0.60；可降解挥发性固体的降解率为 95%；堆肥时间为 5 d；这 5 天中每天需氧量占总需氧量的比例分别为 20%、35%、25%、15%、5%；在堆肥过程中产生的氨气全部进入大气；空气中氧气的质量分数为 23%，空气的密度为 1.2 kg/m^3；通风装置的安全系数为 2。则通风量为：（　　）

A 1 t 生活垃圾进行好氧堆肥所需要的通风量为 4 060 m^3

B 1 t 生活垃圾进行好氧堆肥所需要的通风量为 3 060 m^3

C 1 t 生活垃圾进行好氧堆肥所需要的通风量为 2 060 m^3

D 1 t 生活垃圾进行好氧堆肥所需要的通风量为 1 060 m^3

5－3－24 生活垃圾厌氧消化的产气量计算。试计算在生活垃圾卫生填埋场中，单位质量填埋废物的理论产气量。假定：生活垃圾中有机组分的化学组成为 $C_{60.0}H_{94.3}O_{36.8}N$，有机物的含量为 79.5%（包括水分）。则产气量为：（　　）

A 单位质量的填埋废物理论产气量为 2.4 m^3/kg

B 单位质量的填埋废物理论产气量为 5.2 m^3/kg

C 单位质量的填埋废物理论产气量为 0.52 m^3/kg

D 单位质量的填埋废物理论产气量为 15.3 m^3/kg

5－3－25 使用一台封闭式发酵仓设备，以固体含量为 50% 的垃圾生产堆肥，待干至 90% 固体后用作调节剂，环境空气温度为 20 ℃，饱和湿度（水/干空气）为 0.015 g/g，相对湿度为 75%，试估算使用环境空气进行干化时的空气需要量：（　　）

A 当采用 20 ℃的环境空气时，理论上的空气需要量为 483 000 m^3/t（干空气/干堆肥）

B 当采用 20 ℃的环境空气时，理论上的空气需要量为 583 000 m^3/t（干空气/干堆肥）

C 当采用 20 ℃的环境空气时，理论上的空气需要量为 83 000 m^3/t（干空气/干堆肥）

D 当采用 20 ℃的环境空气时，理论上的空气需要量为 183 000 m^3/t（干空气/干堆肥）

5－3－26 拟采用堆肥方法处理脱水污泥滤饼，其固体含量为 30%，每天处理量为 10 t（以干物料基计算），采用回流堆肥（回流堆肥的固体含量为 70%）起干化作用，要求进入发酵仓的混合物料的固体含量为 40%，计算回流比及每天需要处理的物料总量：（　　）

A 干基回流比为 0.777，干基物料总量为 44.4 t/d

B 干基回流比为 0.856，干基物料总量为 35.4 t/d

C 湿基回流比为 0.567，湿基物料总量为 44.4 t/d

D 湿基回流比为 0.333，湿基物料总量为 84.4 t/d

5－3－27 有 100 kg 混合垃圾，其物理组成是食品垃圾 25 kg、废纸 40 kg、废塑料 13 kg、破布 5 kg、废木材 2 kg，其余为土、灰、砖等，求混合垃圾的热值。（食品垃圾热值：4 650 kJ/kg；废纸热值：16 750 kJ/kg；废塑料热值：32 570 kJ/kg；破布热值：17 450 kJ/kg；废木材热值：18 610 kJ/kg；土、灰、砖热值：6 980 kJ/kg。）混合垃圾热值为：（　　）

A 混合垃圾热值为 24 388 kJ/kg　　B 混合垃圾热值为 14 388 kJ/kg

C 混合垃圾热值为 4 388 kJ/kg　　D 混合垃圾热值为 8 388 kJ/kg

5－3－28 某废液的化学组成为含摩尔分数 30% 的甲醇与 70% 己烷，且由相关手册查得有关成分的生成热为：$CH_3OH(l) = -57.04$ kcal/mol；$C_6H_{14}(l) = -47.52$ kcal/mol；$H_2O(g) = -57.80$ kcal/mol；$CO_2(g) = -94.05$ kcal/mol。试估算该废液于 25 ℃时的燃烧热（或热值）：（　　）

A　该废液的高位热值为 5 896 kcal/kg

B　该废液的高位热值为 9 896 kcal/kg

C　该废液的低位热值为 5 896 kcal/kg

D　该废液的低位热值为 9 896 kcal/kg

5－3－29　设某城市垃圾元素组成分析结果如下：碳 15.6%（其中含有机碳为 12.4%、无机碳为 3.2%），氢 6.5%，氧 14.7%，氮 0.4%，硫 0.2%，氯 0.2%，水分 39.9%，灰分 22.5%。试根据其元素组成估算该废物的高位热值和低位热值：（　　）

A　高位热值为 3 712.3 kcal/kg，低位热值为 2 139 kcal/kg

B　高位热值为 2 712.3 kcal/kg，低位热值为 1 739 kcal/kg

C　高位热值为 2 712.3 kcal/kg，低位热值为 2 139 kcal/kg

D　高位热值为 3 712.3 kcal/kg，低位热值为 2 139 kcal/kg

5－3－30　若已知某垃圾样品的三成分分析及元素分析资料如习题 5－3－30 表 a 和习题 5－3－30 表 b，试求可燃分为 37.5% 时的单位质量垃圾的理论需空气量及燃烧后总烟气量：（　　）

习题 5－3－30 表 a　垃圾样品三成分分析

指标	可燃分 B/%	灰分 A/%	水分 W/%	低位热值/(kcal·kg^{-1})
高	42.3	16.0	41.0	1 942
中	37.5	15.9	49.1	1 672
低	33.7	12.7	50.4	1 405

习题 5－3－30 表 b　垃圾样品元素分析

元素	C	H	N	S	Cl	O	总计
全样品/%	20.33	2.80	0.45	0.02	0.34	13.76	37.5
可燃分/%	53.9	7.4	1.2	0.1	0.9	36.5	100

A　理论空气量为 8.14 m^3/kg，燃烧后总烟气量为 12.55 m^3/kg

B　理论空气量为 2.14 m^3/kg，燃烧后总烟气量大于等于 2.55 m^3/kg

C　理论空气量为 2.14 m^3/kg，燃烧后总烟气量为 12.55 m^3/kg

D　理论空气量为 2.14 m^3/kg，燃烧后总烟气量为 8.55 m^3/kg

5－3－31　若采用以下假设：$\lambda=2$；废气平均比热（标准状态下）$c_{pg}=0.333$ kcal/（m^3·℃）；大气温度 =20 ℃；$H_1=1\ 488$ kcal/kg，及化学元素分析资料为 C 为 0.194 kg/kg、H 为 0.027 kg/kg、S 为 0.000 4 kg/kg、O 为 0.131 kg/kg、水分为 0.5 kg/kg、N 为 0.004 kg/kg。试求标准状态下的烟气量及理论燃烧温度：（　　）

A　标准状态下的烟气量为 4.89 m^3/kg，理论燃烧温度为 659 ℃

B　标准状态下的烟气量为 14.89 m^3/kg，理论燃烧温度为 934 ℃

C　标准状态下的烟气量为 4.89 m^3/kg，理论燃烧温度为 934 ℃

D　标准状态下的烟气量为 14.89 m^3/kg，理论燃烧温度为 659 ℃

5－3－32　已知垃圾样品的元素分析及三成分分析数据列于习题 5－3－32 表 a 中。焚烧系统中重要数据列于习题 5－3－32 表 b 中。假设焚烧厂内没有废热回收及冷却设备，试求各种热损失的大小：（　　）

习题 5－3－32 表 a 垃圾成分分析

热值/(kcal·kg^{-1})	元素质量分数/%						可燃分/%	灰分/%	水分/%
	C	O	H	N	S	Cl			
1 400	47.04	43.65	6.95	1.35	0.12	0.89	38	10	52

习题 5－3－32 表 b 焚烧系统的重要设计及操作参数

项　　目	单　　位	数　　值
进料速率	t/h	8
空气预热温度（标准状态）	m^3/kg	180
空气比		2.2
燃烧温度	m^3/kg	900
灰烬中残碳量	%	1.00
理论需空气量（标准状态）	m^3/kg	1.74
废气产率（标准状态）	m^3/kg	4.74
废气的平均定压比热	kcal/（kg·℃）	0.35
灰烬温度	℃	300
灰烬产量比例	%	10
灰烬比热	kcal/（kg·℃）	0.2

A 废气余热排放所带走的焓为：944 800 kcal/h

B 灰烬余热所带走的焓为：7 900 kcal/h

C 残碳所带走的焓为 6 648 000 kcal/h

D 废气中 CO 排放所带走的焓为 56 kcal/h

5－3－33 如果已知垃圾的低位热值为 1 500 kcal/kg，预热空气带来的焓为未知数，但辐射热损失比率为 5%，损失热量为 90 kcal/kg。假设该厂没有废热回收，预热空气温度为 200 ℃。假设主要热损失为辐射热，并假设大气温度为 20 ℃及废热平均比定压热容（标准状态下）为 0.35 kcal/(m^3·℃)，废气产生量为 5 m^3/kg，试推求预热空气带来的焓及燃烧温度：(　　)

A 预热空气带来的焓为 300 kcal/kg，燃烧温度为 996 ℃

B 预热空气带来的焓为 3 000 kcal/kg，燃烧温度为 996 ℃

C 预热空气带来的焓为 300 kcal/kg，燃烧温度为 754 ℃

D 预热空气带来的焓为 3 000 kcal/kg，燃烧温度为 1 996 ℃

5－3－34 若已知空气比为 $\lambda=2$。烟气平均比定压热容（标准状态下）为 0.333 kcal/（m^3·℃），各种热损失共约为 145 kcal/kg，助燃空气温度为 20 ℃，垃圾样品的元素分析及成分分析资料如习题 5－3－34表，试求垃圾的低位热值，废气量及燃烧温度：(　　)

习题 5－3－34 表　垃圾组成成分

元素质量分数/%					可燃分/%	水分/%
C	H	O	N	S		
17.89	2.57	12.11	0.55	0.04	34.54	49.97

A　低位热值为 1 451 kcal/kg，废气量 4.78 m^3/kg，燃烧温度 840 ℃

B　低位热值为 1 451 kcal/kg，废气量 4.78 m^3/kg，燃烧温度 630 ℃

C　低位热值为 1 451 kcal/kg，废气量 4.78 m^3/kg，燃烧温度 1 840 ℃

D　低位热值为 11 451 kcal/kg，废气量 4.78 m^3/kg，燃烧温度 840 ℃

5－3－35　热解污泥技术利用热化学作用，在（　　）下，将有机物质转换。

A　厌氧环境　　B　好氧环境

C　缺氧环境或无氧环境　　D　常温下

5－3－36　废塑料的热解一般温度越（　　），气态的（低级的）碳氢化合物的比例越高，液态和固态的产物比例越低。

A　低　　B　高　　C　稳定　　D　变化剧烈

5－3－37　一些发达国家早已把生物质资源利用作为 21 世纪科技发展的战略重点，我国也在（　　）中明确指出："中国要实现经济的快速发展，就必须将开发新资源和新能源放到国家能源发展战略的优先地位，加强生物质能源的开发。"

A《中国二十一世纪人口、环境与发展白皮书》

B《中国二十一世纪人口与发展白皮书》

C《中国二十一世纪环境与发展白皮书》

D《中国二十一世纪经济与发展白皮书》

5－3－38　某黄磷厂生产 1 t 黄磷需要磷矿石 9.339 t、焦炭 1.551 t、硅石 1.557 t，除得到 0.356 t 的副产品磷铁外，还产生 2.824 t 气体和 0.135 t 粉尘，其余均以废渣形式排出。求黄磷的产渣率：（　　）

A　黄磷的产渣率为 18.132 t/t（产品）　　B　黄磷的产渣率为 15.132 t/t（产品）

C　黄磷的产渣率为 8.132 t/t（产品）　　D　黄磷的产渣率为 4.132 t/t（产品）

5－3－39　下列说法错误的有：（　　）

A　一般每生产 1 t 磷酸会产生 5 t 左右的磷石膏

B　磷石膏的主要成分是磷

C　铁渣、电石渣、磷石膏、粉煤灰等都可用作生产水泥的原料

D　煤矸石、粉煤灰、尾矿等主要成分一般都是 SiO_2、Al_2O_3、CaO 等

5－3－40　以下关于"碱度"的说法正确的有：（　　）

A　高炉渣的碱度是高炉矿渣的化学成分中碱性氧化物与酸性氧化物的比值

B　钢渣的碱度是钢渣中 P_2O_5 的含量和 CaO 与 SiO_2 比值

C　高炉矿渣浸出液的碱度即为高炉矿渣碱度

D　如用 Mo 表示碱度则高炉渣的碱度为：$Mo = \dfrac{w_{SiO_2} + w_{Al_2O_3}}{w_{CaO} + w_{MgO}}$

5－3－41　以下关于铬渣的说法错误的有：（　　）

A　每生产 1 t 重铬酸钠约产生 1.8～3 t 铬渣，每生产 1 t 金属铬约产生 1.2～1.3 t 铬渣

B　铬渣的化学组成主要有硅、钙、镁、铝、铁等的氧化物

C　铬渣可作为玻璃着色剂，也可代替白云石、石灰石作为生铁冶炼过程的添加剂

D　铬渣即铬浸出渣，是冶金和化工企业在金属铬和铬盐生产过程中，由浸滤工序滤出的不溶于水的固体废物

5－3－42　磷石膏 pH 一般为：（　　）

A　<1　　B　1～4.5　　C　4.5～9　　D　9～14

5－3－43　热化学方法进行固体废物处理时，处理的对象为：（　　）

A　限于生活垃圾

B　限于有机固体废物

C 可以是有机固体废物，也可以是无机固体废物

D 可以是生活垃圾、废塑料、废橡胶等有机固体废物，但不能处理热值较低的无机固体废物

5-3-44 以下关于焚烧和热裂的说法错误的有：（ ）

A 焚烧是在有氧状态下进行的，热裂解是在无氧或缺氧状态下进行的

B 焚烧产物主要是二氧化碳、水等，而热裂解的主要产物为裂解油、裂解气及固定碳

C 焚烧是放热的过程，裂解也是放热的过程

D 焚烧产生的二次污染一般比热裂解过程的难控制

5-3-45 设某废物经检测单位采样分析后得知其物理组成及含水率如习题5-3-45表所示。

习题5-3-45表 物理组成及含水率

成 分	质量分数/%	含水率/%	成 分	质量分数/%	含水率/%
食品废物	18.13	85	玻璃	8.69	2
纸张	12.15	20	金属罐头	5.34	3
塑料类	26.35	3	泥土、灰渣等	7.99	9
木材	21.35	25			

试计算此废物的水分和容积密度：（ ）

A 水分约为85%，容积密度为105.3 kg/m^3

B 水分约为25%，容积密度为105.3 kg/m^3

C 水分约为85%，容积密度为1 105.3 kg/m^3

D 水分约为5%，容积密度为105.3 kg/m^3

5-3-46 有1 000 kg猪粪，从中称取10 g样品，在105 ℃±2 ℃烘至恒重后的量为1.95 g，①求其总固体质量分数和总固体量；②如将这些猪粪中的10 g样品的总固体在550 ℃±20 ℃灼烧至恒重后为0.39 g，求猪粪原料总固体中挥发性固体的质量分数：（ ）

A 总固体质量分数19.5%，总固体量195 kg，总固体中挥发性固体质量分数为80%

B 总固体质量分数19.5%，总固体量195 kg，总固体中挥发性固体质量分数为15.6%

C 总固体质量分数19.5%，总固体量1.95 kg，总固体中挥发性固体质量分数为80%

D 总固体质量分数19.5%，总固体量1.95kg，总固体中挥发性固体质量分数为15.6%

5-3-47 某填埋场总面积为3.0 hm^2，分三个区进行填埋。目前已有两个区填埋完毕，其面积为$A_2=2.0$ hm^2，浸出系数$C_2=0.2$。另有一个区正在进行填埋施工，填埋面积为$A_1=1.0$ hm^2，浸出系数$C_1=0.5$。当地的年平均降雨量为3.3 mm/d，最大月降雨量的日换算值为6.5 mm/d。求污水处理设施的处理能力：（ ）

A 20 m^3/d B 45 m^3/d C 90 m^3/d D 320 m^3/d

5-3-48 一个100 000人口的城市，平均每人每天产生垃圾2.0 kg，如果采用卫生土地填埋处置，覆土与垃圾之比为1:4，填埋后废物压实密度为600 kg/m^3。如果不考虑该城市垃圾产生量随着时间的变化，试求1年填埋废物的体积；如果填埋高度为7.5 m，一个服务期为20年的填埋场占地面积及总容量为：（ ）

A 填埋废物的体积为152 082 m^3，占地面积4×10^5m^2，总容量为3.0×10^9m^3

B 填埋废物的体积为15 208 m^3，占地面积4×10^4m^2，总容量为3.0×10^6m^3

C 填埋废物的体积为152 082 m^3，占地面积4×10^4m^2，总容量为3.0×10^9m^3

D 填埋废物的体积为152 082 m^3，占地面积4×10^5m^2，总容量为3.0×10^6m^3

5-3-49 卫生填埋场每天的日覆盖土厚度大约在（ ）为宜。

A 40~75 cm B 90~120 cm C 15~30 cm D 5~10 cm

5-3-50　填埋场应至少位于居民区（　　）以外。

A　100 m　　B　200 m　　C　400 m　　D　500 m

5-3-51　卫生填埋场的终场覆盖的表层是：（　　）

A　保护层　　B　土地恢复层　　C　排水层　　D　排气层

5-3-52　填埋场所选场地必须在（　　）一遇的地表水域的洪水标高泛滥区之外。

A　10 年　　B　20 年　　C　50 年　　D　100 年

5-3-53　如果填埋场场地高于地下水水位或场地低于地下水水位，但地下水的上升压力不至于破坏衬垫层时，应采用（　　）。

A　单层衬层防渗系统　　B　单复合衬层防渗系统

C　双层衬层防渗系统　　C　双复合衬层防渗系统

5-3-54　垃圾填埋气中甲烷体积分数一般为：（　　）

A　45%～60%　　B　65%～80%　　C　80%～90%　　D　超过 90%

5-3-55　卫生填埋场防渗层的渗透系数要求：（　　）

A　$K \leqslant 10^{-7}$ cm/s　　B　$K \leqslant 10^{-8}$ cm/s　　C　$K \leqslant 10^{-9}$ cm/s　　D　$K \leqslant 10^{-10}$ cm/s

第四章　物理性污染防治工程基础

第一节　噪声污染防治技术基础

一、概述

（一）噪声和噪声污染

噪声是声波的一种，具有声波的一切特性，主要来源于物体（固体、液体、气体）的振动。从心理学出发，噪声定义为：凡是人们不需要的，使人烦躁的声音。从物理学观点来看，噪声是指声波的频率和强度变化毫无规律、杂乱无章的声音。从环境保护的角度，凡是干扰人们正常工作、学习和休息的声音统称为噪声。

噪声污染是指所产生的环境噪声超过国家规定的环境噪声排放标准，并干扰他人正常工作、学习、生活的现象。日常生活中的噪声强度虽然不会致人或其他动物于死地，却能危害人的健康。噪声可能由偶然的自然现象产生，但绝大多数情况下，噪声是由人类各种各样的活动所产生。世界各国都把噪声污染列为主要的环境污染公害之一。

1. 噪声的分类

作为感觉公害，噪声大致可分为四类：

（1）过响声，如喷气发动机发出的轰隆声；

（2）妨碍声，此种声音虽不太响，但它妨碍人的交谈、思考、学习和休息；

（3）不愉快声，如摩擦声、刹车声等；

（4）无影响声，日常生活中人们习以为常的声音。

按照声源不同，噪声可分为交通噪声、工业噪声、建筑施工噪声和社会生活噪声。根据噪声源的发生机理，噪声可分为机械噪声、空气动力性噪声和电磁噪声。通常声源不是单一的，即使是一种机械设备，也可能是由几种不同的噪声组成。

2. 噪声污染的特点

声学系统一般是由声源、传播途径和接受者三要素组成。通常把能够发声的物体称为声源，产生噪声的物体或机械设备称为噪声源。噪声源、噪声的传播途径、接受者是发生噪声污染的三个要素，只有这三个要素同时存在，才会构成噪声污染。

噪声污染具有以下特点：①噪声是人们不需要的声音总称，所以可以说任何声音都可能成为噪声；②噪声只会造成局部性污染，一般不会造成区域性和全球性污染；③噪声污染没有残余污染物，不会积累；④噪声一般不直接致命或致病，它的危害是慢性或间接的。

（二）噪声的危害

归纳起来，噪声的危害主要表现在：

1. 噪声会损伤听力

当人初进入噪声环境中，会感到烦恼、难受、耳鸣，甚至出现听觉器官的敏感性下降，听不清一般说话声，但这种情况持续时间并不长，几分钟就会恢复原状，这种现象称为听觉适应。如上述情况重复出现，且症状随接触次数增加及时间延长而加重，逐渐出现听觉疲劳，时间一久就引起听力损失，最后导致