



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等教育“十二五”规划教材

固体废物处理与资源化

第二版

赵由才 牛冬杰 柴晓利 编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十二五”规划教材

固体废物处理与资源化

第二版

赵由才 牛冬杰 柴晓利 编



化学工业出版社

·北京·

第二版前言

“固体废物处理与资源化”是高等学校环境工程和环境科学专业的一门必修或选修课程。由赵由才、牛冬杰、柴晓利等编的高等学校教材《固体废物处理与资源化》(第一版)(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)自2006年2月出版以来,深受读者欢迎。六年来,固体废物处理与资源化应用技术发生了许多变化,科学技术研发取得了重要进展,建设与运行了成千上万座大中型生活垃圾和工业固体废物处理设施,为实现资源与环境的可持续发展奠定了初步基础,急需对第一版的内容进行修订。

本书第二版对第一版的内容进行了适当压缩,增加了六年来固体废物方面的研发和工程应用进展,以生活垃圾和工业废物为主线,力求全面完整地描述固体废物处理与资源化新技术、新方法、新理论;删除了有关固体废物实验的内容。本书配套电子教案,请发信到 cipedu@163.com 免费索取;或到化学工业出版社教学资源网 <http://www.cipedu.com.cn> 免费下载。

参加本书编写的人员主要有赵由才(第1章、第3章、第4章)、牛冬杰(第6章、第8章、第9章)、柴晓利(第2章、第5章、第7章)。《固体废物处理与资源化实验》已经由化学工业出版社出版(2008年1月)。本书可与《固体废物处理与资源化实验》配合使用。崔亚伟参与了书稿部分内容的整理和编排,朱英参与了污泥卫生填埋部分的编写工作。

由于作者时间和水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者多提宝贵意见。

赵由才

2012年3月于同济大学

第一版前言

固体废物是固态或半固态废弃物的总称，包括城市生活垃圾（亦称城市固体废物）、工业垃圾等。固体废物的任意排放会严重污染和破坏环境，其处理与处置一直受到各级政府、科技界、产业界和环境保护企业界的重视。

固体废物处理与资源化涵盖了城市生活垃圾的减量化、资源化和无害化，工业固体废物的末端处理与综合利用及以削减固体废物产生量、提高劳动生产率为目的的清洁生产与管理等内容。目前我国城市生活垃圾每年的收集量达 1.4 亿吨以上，并仍以较快的速度在增长。根据我国目前的经济和社会发展水平，在当前和今后相当长的时期内，城市生活垃圾仍然以填埋为主，辅之以焚烧、堆肥等其它处理方法。垃圾的分类收集是必然趋势，但必须开发分类后各种废物经济可行的处理与资源化技术。

工业固体废物种类繁多，成分复杂，其污染控制与资源化方法包括填埋、焚烧、综合利用等。有些工业固体废物中，有害有毒物质的含量并不高，如铬渣、汞渣等，但处理难度相当大。因此，对于工业固体废物来讲，也必须遵循减量化、资源化和无害化的原则，即清洁生产。清洁生产是通过产品设计、原料选择、工艺改革等途径，使工业生产以全新的工业生产方法和管理模式，最终产生最少的污染物，改变原来的末端治理为过程治理，具有巨大的经济效益和环境效益。

固体废物处理与资源化既是一门科学，也是一种行业，必须有相应的法律法规加以规范和约束。因此，有必要对固体废物处理与资源化所涉及的法律法规进行论述，使读者了解相关的知识，这对于防止和消除固体废物污染环境具有重要意义。

近年来，固体废物处理与资源化领域发生了许多变化。在城市生活垃圾方面，人们更强调源头分类收集，同时在垃圾收集运输工具、固体废物预处理、填埋、焚烧、裂解、气化和综合利用等处理技术方面有了长足的进步。另外，垃圾分类收集技术与管理也进一步完善，并得到社会的共识。但新问题也出现了，就是分类后各类垃圾的出路比较困难，处理技术不完善，这使垃圾分类收集遇到了很大障碍。

在工业固体废物处理与资源化方面，清洁生产和绿色技术已经越来越受到重视。单纯的末端治理已无法适应时代的要求。随着科学技术的发展，原来无法解决的末端治理问题通过清洁生产就可顺利解决。例如铬渣的处理是一个长期未能解决的难题，近几年来，人们采用烧碱法，以烧碱代替纯碱，使矿石中铬的提取率明显提高，铬渣中含铬量下降，才有可能从根本上解决铬渣处理难的问题。

目前固体废物处理与资源化领域面临的新问题包括废汽车、废机电和废家电（工业设备、计算机、手机、CD、VCD、冰箱等）、泔脚、医疗垃圾、包装品废物等。某些固体废物问题在我国刚刚出现，对其处理与资源化的管理研究、技术开发还未引起注意。另外，我国的固体废物处理处置行业近年来才逐步被重视，而发达国家已经走过了几十年的历史。因此，有必要对发达国家的固体废物处理与资源化的历史进程进行总结，供国内借鉴。

“固体废物处理与资源化”是高等学校环境工程和环境科学专业的一门必修或选修课程。本书的编写是以固体废物的处理和资源化为两条主线，重点论述生活垃圾、危险废物和一般工业固体废物的处理与资源化，涉及卫生填埋、安全填埋、生物处理、焚烧和热解、循环利

用等，全面描述各种方法的原理、工艺、管理、法律和法规，力求全面完整地描述固体废物处理与资源化新技术、新方法、新理论。本书主要适合作为大中专院校环境工程等专业的教材，也可供从事固体废物处理的工程技术人员、管理人员等阅读和参考。

参加本书编写人员的分工如下：赵由才、祝优珍编写第一章，赵由才编写第三章、第四章，牛冬杰编写第六章、第八章、第九章、第十章部分内容，柴晓利编写第二章、第五章、第七章、第十章部分内容。

周莉菊编写了部分习题，宋玉、楼紫阳、石磊、郭强、魏俊等参与了校对、修改和部分内容编写工作，在此谨向他们表示感谢。

由于时间及编者水平所限，书中疏漏之处在所难免，欢迎专家、学者及广大读者批评指正。

赵由才
2005年12月于同济大学

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2.1 填埋场工程	22
1.1 固体废物的定义、性质和分类	1	3.2.2 规划布局	23
1.1.1 固体废物的定义	1	3.2.3 填埋区构造及填埋方式	23
1.1.2 固体废物的性质	1	3.2.4 地表水排水设施	24
1.1.3 固体废物的分类	1	3.2.5 环境监测设施	24
1.2 固体废物产生量预测	1	3.2.6 基础设施	24
1.3 典型固体废物处理与资源化展望	2	3.2.7 终场规划	24
1.3.1 城市生活垃圾	2	3.3 填埋工艺	24
1.3.2 化工冶金废渣	2	3.4 场底防渗系统	25
1.3.3 医疗废物	2	3.4.1 场地处理	25
1.3.4 餐厨垃圾	3	3.4.2 场底防渗系统	26
1.3.5 废机电和废家电	3	3.4.3 人工水平防渗系统	26
1.3.6 废橡胶	3	3.4.4 渗滤液收集系统	28
1.3.7 建筑垃圾	3	3.5 渗滤液产生与处理	31
1.3.8 危险废物	4	3.5.1 渗滤液的来源与特性	31
1.3.9 填埋场温室气体减排与控制	4	3.5.2 渗滤液处理方法	32
本章主要内容	5	3.6 填埋气体的导排及综合利用	35
习题与思考题	5	3.6.1 填埋场气体的组成与性质	35
第 2 章 固体废物的收集、运输和预		3.6.2 产气量的确定	35
处理	6	3.6.3 填埋气体的主动导排方式及系统	
2.1 生活垃圾的收集与运输	6	组成	36
2.2 生活垃圾清运	6	3.6.4 填埋气的利用	38
2.2.1 拖曳容器操作方法	6	3.6.5 填埋场温室气体减排与控制	38
2.2.2 固定容器收集操作法	8	3.7 终场覆盖、封场与土地利用	39
2.2.3 收集车辆	9	3.8 城镇污水处理厂污泥改性与卫生填埋	
2.2.4 收集次数与作业时间	9	操作技术	40
2.2.5 生活垃圾收运路线	11	3.8.1 污泥改性与卫生填埋	40
2.2.6 生活垃圾转运站	12	3.8.2 污泥调理固化压滤深度脱水	
2.2.7 集装化转运系统中转运站	12	处理	42
2.3 固体废物分选	13	3.8.3 污泥在填埋场内的稳定化	42
2.3.1 固体废物筛分	13	3.8.4 污泥填埋场气体产生量	43
2.3.2 风力分选	15	3.8.5 污泥填埋场渗滤液产生量	43
2.3.3 磁选	16	3.9 可持续生活垃圾填埋技术	43
2.3.4 电力分选	19	本章主要内容	44
本章主要内容	20	习题与思考题	44
习题与思考题	20	第 4 章 危险废物安全填埋场	46
第 3 章 生活垃圾卫生填埋场	21	4.1 概述	46
3.1 生活垃圾卫生填埋技术	21	4.2 危险废物的判别方法	46
3.2 填埋场总体设计	22	4.3 危险废物预处理	47
		4.3.1 水泥固化/稳定化	48

4.3.2	石灰固化	49	5.6.1	炉型	86
4.3.3	熔融固化技术	49	5.6.2	送风方式	87
4.3.4	药剂稳定化处理技术	50	5.6.3	炉膛尺寸的确定	87
4.4	安全填埋场	51	5.6.4	设计参数	87
4.4.1	建设框架	51	5.6.5	机械炉排焚烧炉的设计	89
4.4.2	选址	52	5.7	焚烧烟气控制技术	90
4.4.3	总体设计	54	5.7.1	湿法净化工艺	91
4.4.4	填埋区构造及填埋方式	55	5.7.2	半干法净化工艺	91
4.4.5	终场规划	56	5.7.3	干法净化工艺	92
4.4.6	填埋工艺	57	5.7.4	NO _x 净化工艺	93
4.4.7	水平防渗系统	57	5.8	垃圾焚烧厂选址原则	95
4.4.8	填埋气体的导排	58	本章主要内容	96	
4.4.9	渗滤液产生与处理	58	习题与思考题	96	
4.4.10	终场覆盖与封场	58	第6章 有机固体废物堆肥与厌氧		
4.4.11	环境监测	59	发酵	97	
4.4.12	现场运行管理	59	6.1	堆肥原理及影响因素	97
本章主要内容	60	6.1.1	定义与分类	97	
习题与思考题	60	6.1.2	好氧堆肥原理	97	
第5章 固体废物焚烧技术	62	6.1.3	影响堆肥的因素	99	
5.1	概论	62	6.1.4	堆肥的腐熟度及其判定	101
5.2	焚烧过程及焚烧产物	63	6.2	有机废物堆肥工艺	102
5.2.1	焚烧的产物	63	6.2.1	好氧堆肥的基本工艺	102
5.2.2	焚烧技术的指标和标准	65	6.2.2	典型好氧堆肥工艺	103
5.2.3	影响焚烧的主要因素	66	6.3	好氧堆肥设备	103
5.2.4	四个控制参数的关系	68	6.3.1	进料供料设备	104
5.3	焚烧过程平衡分析	69	6.3.2	发酵设备	106
5.3.1	物质平衡分析	69	6.4	有机固体废物的厌氧发酵原理	110
5.3.2	热平衡分析	70	6.4.1	有机固体废物厌氧发酵定义	110
5.3.3	主要焚烧参数计算	72	6.4.2	厌氧发酵原理	110
5.4	固体废物焚烧系统	74	6.4.3	厌氧发酵过程中的微生物群落	111
5.4.1	垃圾接受系统	75	6.4.4	甲烷形成理论及计算	113
5.4.2	焚烧系统	76	6.4.5	厌氧发酵的反应热力学与动力学	116
5.4.3	助燃空气系统	76	6.5	厌氧发酵设备与工艺	118
5.4.4	余热利用系统	76	6.5.1	传统发酵系统	118
5.4.5	蒸汽及冷凝水系统	79	6.5.2	现代大型工业化沼气发酵设备	121
5.4.6	烟气净化系统	79	6.5.3	发酵工艺	123
5.4.7	灰渣处理系统	79	6.6	沼气与沼渣的综合利用	124
5.4.8	焚烧飞灰处理技术	80	6.6.1	沼气的利用	124
5.4.9	自动控制系统	80	6.6.2	沼液与沼渣的利用	125
5.5	固体废物焚烧炉	82	本章主要内容	125	
5.5.1	炉排型焚烧炉	82	习题与思考题	126	
5.5.2	流化床焚烧炉	84	第7章 生物质热解技术	127	
5.5.3	回转窑焚烧炉	84	7.1	热解原理	127
5.5.4	各种焚烧炉的综合性能对比	85	7.1.1	热解定义	127
5.6	废物焚烧炉设计	86	7.1.2	热解特点	127

7.1.3 热解过程	127	8.7.3 生态产业园	156
7.1.4 热解产物	127	本章主要内容	157
7.2 热解工艺	128	习题和思考题	157
7.2.1 按供热方式分类	128	第9章 典型固体废物资源化技术	158
7.2.2 按热解温度分类	128	9.1 废橡胶的回收处理方法	158
7.2.3 影响热解的主要参数	129	9.1.1 整体再用或翻新再用	158
7.3 热解动力学模型	131	9.1.2 生产胶粉	158
7.3.1 热解动力学方程	131	9.1.3 制造再生胶	159
7.3.2 热解动力学模型	131	9.1.4 热解与焚烧	160
7.4 生活垃圾的热解	133	9.2 废汽车的回收与处理	160
7.4.1 新日铁系统	134	9.2.1 废汽车材料回收的工艺流程	161
7.4.2 Purox 系统	135	9.2.2 部分配件的再生	161
7.4.3 流化床系统	136	9.2.3 金属材料回收	161
本章主要内容	136	9.2.4 废汽车中铝金属的回收	162
习题与思考题	136	9.2.5 废汽车镁合金的再生工艺	163
第8章 工业固体废物处理与资源化	137	9.2.6 废汽车的热解与焚烧处理	163
8.1 工业固体废物的处理原则与技术	137	9.3 电子废弃物的处理与利用	164
8.2 矿业固体废物的处理与资源化	138	9.3.1 电路板的机械处理方法	164
8.2.1 矿业固体废物的产生、特点和 危害	138	9.3.2 电子废弃物的火法冶金技术	167
8.2.2 矿山废石与尾矿	138	9.3.3 热解法	167
8.2.3 冶炼渣	139	9.4 废塑料的回收利用和处理	167
8.3 煤矸石的处理与资源化	141	9.4.1 废塑料基本分类	167
8.3.1 煤矸石的产生与分类	141	9.4.2 废塑料来源	169
8.3.2 煤矸石的组成与危害	142	9.4.3 废塑料回收利用及处理技术	169
8.3.3 煤矸石的资源属性与利用途径	143	9.5 废电池的回收与综合利用	173
8.4 粉煤灰的处理与资源化	143	9.5.1 废电池再生利用技术	173
8.4.1 概况	143	9.5.2 废旧干电池的综合处理技术	173
8.4.2 粉煤灰在建材工业中的应用	144	9.5.3 废旧镉镍电池的综合处理技术	175
8.4.3 粉煤灰在环保上的应用	144	9.5.4 混合电池的处理技术	177
8.4.4 粉煤灰的工程填筑应用	145	9.5.5 铅酸蓄电池的回收利用技术	178
8.4.5 从粉煤灰中回收有用物质	145	9.6 大宗碱溶性金属废物碱介质提取技术	179
8.4.6 生产功能性新型材料	145	9.6.1 废物和尾矿中碱溶性金属碱介质 浸出过程	180
8.5 钢铁工业固体废物的处理与资源化	146	9.6.2 浸出工艺及动力学	180
8.5.1 钢铁工业固体废物概况	146	9.6.3 碱溶性金属废物碱介质中金属提 取技术	181
8.5.2 高炉渣	146	9.7 污泥厌氧消化	182
8.5.3 钢渣	148	9.7.1 污泥厌氧消化的影响因素	182
8.6 化学工业固体废物的处理与资源化	149	9.7.2 消化池设计	183
8.6.1 概况	149	9.8 餐厨垃圾处理	183
8.6.2 硫铁矿渣	150	9.8.1 堆肥处理	184
8.6.3 磷石膏	152	9.8.2 餐厨垃圾的厌氧发酵处理	185
8.6.4 铬渣	154	本章主要内容	187
8.7 清洁生产与工业产业园	155	习题与思考题	187
8.7.1 清洁生产的定义和原则	155	参考文献	188
8.7.2 清洁生产技术及其实施途径	156	课外读物	190

第 1 章 绪 论

1.1 固体废物的定义、性质和分类

1.1.1 固体废物的定义

固体废物是指在生产、生活和其它活动中产生的丧失原有利用价值或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。

固体废物一般具有如下特点。①无主性：被丢弃后，不再属于谁，找不到具体负责人，特别是城市固体废物。②分散性：丢弃、分散在各地，需要收集。③危害性：给人们的生产和生活带来不便，危害人体健康。④错位性：一个时空领域的废物在另一个时空领域是宝贵的资源，又被称为“在时空上错位的资源”。

固体废物对环境的危害与固体废物的性质和数量有关，其处理的依据主要是当地的环境污染控制标准，对环境污染的控制程度与经济发展和人民生活水平有密切的关系。

1.1.2 固体废物的性质

(1) 物理性质 包括物理组成、色、臭、温度、含水率、空隙率、渗透性、粒度、密度、磁性、电性、光电性、摩擦性、弹性等。生活垃圾的压实、破碎、分选等处理方法主要与其物理性质有关，其中色、臭等感官特性可以通过视觉或嗅觉直接加以判断。

(2) 化学性质 包括元素组成、重金属含量、pH 值、植物营养元素、有机物污染含量、碳氮比 (C/N)、生化需氧量与化学需氧量之比 (BOD_5/COD)、垃圾中生物呼吸所需的耗氧量 DO、热值、灰分熔点、闪点与燃点、挥发分、灰分和固定碳、表面润湿性等。固体废物的堆肥、发酵、焚烧、热解、浮选等处理方法主要与其化学性质有关。

(3) 生物化学性质 包括病毒、细菌、原生及后生动物、寄生虫卵等生物性污染物质的组成、有机组分的生物可降解性等。固体废物的堆肥、发酵、填埋等生化处理方法主要与其生物化学性质有关。

1.1.3 固体废物的分类

固体废物可按来源、性质与危害、处理处置方法等，从不同的角度进行分类。按化学成分，可分为有机废物和无机废物；按热值，可分为高热值废物和低热值废物；按处理处置方法，可分为可资源化废物、可堆肥废物、可燃废物和无机废物等。按来源，固体废物可分为城市生活垃圾和工农业生产中所产生的废弃物。按危害特性，固体废物可分为有毒有害固体废物和无毒无害固体废物两类。

为方便起见，一般把生活垃圾简称为垃圾，其它固体废物则以全称描述之。本书中，垃圾就是指生活垃圾（特定情况下主要指城市生活垃圾）。

1.2 固体废物产生量预测

固体废物产生量预测可采用灰色模型、多元线性回归模型、类比法、指数平滑法、

TCE 模型、ARIMA 模型、变权重组合模型、SVM 回归预测等。各种不同的预测方法各有其优缺点。灰色系统模型预测法会产生正误差。利用增长率公式预测城市垃圾的方法对参数要求少，数据也简单易得，故一般来说较易掌握，但因为没有考虑垃圾的产生及影响的主要因素，其预测精度较差，因而只适用于粗略的预测。而线性回归分析法虽然充分考虑了各种影响因素，但对各个因素对结果的影响程度缺乏识别。因此，过多的次要因素不仅增加计算量，而且无助于预测精度的提高，甚至有时会产生虚假回归的情况。支持向量机（SVM 回归预测）能够根据结构风险最小化准则取得最小的实际风险，其拓扑结构由支持向量决定，较好地解决了小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题，因此，支持向量机在短期负荷预测问题上有着显著的优越性。

1.3 典型固体废物处理与资源化展望

1.3.1 城市生活垃圾

目前，我国城市生活垃圾仍以卫生填埋为主，焚烧处理技术应用发展较快，堆肥处理市场逐渐萎缩。然而，生活垃圾处理方面还存在许多问题。生活垃圾卫生填埋场存在的恶臭、渗沥液未达标、温室气体未加有效控制、新填埋场选址极端困难等问题已经严重影响卫生填埋技术的应用与发展。焚烧厂烟气中污染物特别是二噁英等的排放、恶臭等已经引起周边居民的普遍担忧，每年二氧化硫、烟尘排放总量仍相当大，PM₁₀、PM_{2.5}等污染物还未列入控制指标，大量焚烧飞灰未能妥善处置，新建焚烧厂的选址越来越困难。生活垃圾的高混杂、高无机物含量严重限制了堆肥技术的发展，急需解决生活垃圾源头混合收集问题，发展相应的收集运输设备。

1.3.2 化工冶金废渣

我国大多数金属资源矿产品位较低，伴生元素多，再加上选冶的生产技术水平不高，绝大部分冶炼厂一般仅只提取所用矿产的一种或两种元素，使得选冶过程的单位产品固体废物产量大。总体来说，冶金废渣的数量巨大，成分相对复杂。除了一些特殊的废渣，如神渣、硼渣、盐泥、铬渣、汞渣以及含钡废渣外，化工废渣中主要以铁、铝及镁等的氧化物形式存在。这些废渣中所含主价金属的总量为：Fe（以 Fe₂O₃ 计）大约为 903 万~1056 万吨/年，Al（以 Al₂O₃ 计）为 338 万~428 万吨/年，Ba（以 BaSO₄ 计）为 25 万~38 万吨/年，Mg（以 MgO 计）则为 191 万~277 万吨/年，同时还含有少量的铬、硼、砷等化合物。目前，我国对这些数量极其庞大的化工冶金废渣基本上未加无害化处置，已经引起严重的环境问题。

1.3.3 医疗废物

医疗废物主要指城市、乡镇中各类医院、卫生防疫、病员疗养、畜禽防治、医学研究及生物制品等单位产生的垃圾，包括医院临床废物，如手术和包扎残余物，生物培养、动物试验残余物，化验检查残余物，传染性废物，废水处理污泥，废药物、药品，感光材料废物（如医疗院所的 X 光和 CT 检查中产生的废显影液及胶片）。医疗废物含有大量的病原微生物（如 SARS 病毒等）、寄生虫，还含有其它的有害物质，必须严格处理与管理，应该控制包装、贮存和处理过程中可能发生的传染性物质、有害化学物质的流散等，以确保居民健康和环境安全。医疗废物带有大量有毒有害致病菌，危害极大，未经严格处理的废物是根本不能循环使用的。

1.3.4 餐厨垃圾

餐厨垃圾即残羹剩饭，是居民在生活消费过程中形成的一种有机废物。主要包括：米和面粉类食品残余、蔬菜、植物油、动物油、肉骨、鱼刺等。其化学组成有淀粉、纤维素、蛋白质、脂类和无机盐。其中以有机组分为主，含有大量的淀粉和纤维素等，无机盐中 NaCl 的含量较高，同时含有一定量的钙、镁、钾、铁等微量元素。节约是餐厨垃圾源头管理的根本措施之一。除了经济发展的原因以外，人为因素也是餐厨垃圾大量产生的重要原因。餐厨垃圾与城市垃圾相比，其组成较简单，有毒有害物质（如重金属等）含量少，有利于餐厨垃圾的处理和再利用。常用的处理方法有堆肥和厌氧发酵处理；因同源性污染；餐厨垃圾不能用于家畜喂养。

1.3.5 废机电和废家电

废机电和废家电包括报废的汽车、自行车、电动车及其它交通工具、电视、计算机、手机、影碟、医疗器械、软磁盘以及废电池等含有金属并且需要能源驱动的任何物品和化学能源系统。废机电和废家电的处理与管理已经成为世界各国共同关注的问题。中国每年约 2 千万吨钢铁用于机电和家电的生产，加上与之配套的辅助材料，如塑料、橡胶制品，总质量在 3 千万吨/年以上。若干年后，这些机电和家电就成为废物。废机电和废家电在很大程度上有别于一般城市生活垃圾。前者在干燥的环境中不会像后者那样发生腐烂，产生渗滤水和气体。电子废弃物也有别于量大面广、价值低的工业有害有毒固体废物，不加适当处理的废机电和废家电会对环境造成严重污染。当这些废弃物任意丢弃在野外时，由于风吹雨淋，电子废弃物中的有害有毒物质如重金属就会被淋溶出来，随地表水流入地下水或侵入土壤，使地下水和土壤受到一定的污染。因此，在考虑电子废弃物的技术与管理时，应该针对电子废弃物的特点，制定切实可行的措施。我国在废机电和废家电处理方面还处于起步阶段，绝大部分废机电和废家电随意堆放或根本未做合理和有效处理，造成了严重的环境污染和资源浪费。

1.3.6 废橡胶

废橡胶的处理应遵循“3R 原则”，即减少废物来源、再使用、循环回收。从资源利用和环境保护出发，应首先考虑减少废物来源和材料的循环，然后考虑化学循环和能量回收。本着上述原则及对轮胎进行的 LCA 分析，轮胎从生产到最终的处理处置要经历四大阶段：科学管理、合理使用、适时翻修、报废解体。回收利用中可首先考虑在橡胶生产的工厂中减少废胶料的产生，尽量减少废品的产生率。出厂后的轮胎则尽量延长其使用寿命，可采用的措施有：保养好轮胎；改进轮胎测压装置；改善路面状况，降低胎面磨损等。废轮胎的处理处置方法大致可分为材料回收（包括整体再用、加工成其它原料再用）和能源回收、处置三大类。具体来看，主要包括整体翻新再用、生产胶粉、制造再生胶、焚烧转化成能源热解和填埋处置等方法。目前我国废橡胶回收处理已受到各方面的普遍重视，各级管理部门、科研单位、轮胎回收部门、轮胎翻修厂以及再生橡胶厂等都已做了大量的研究工作，也取得了很多成果，但在管理和技术等方面还有很多不尽如人意的地方，如有的地方将废橡胶和煤直接掺烧、将废轮胎高温加热裂解制作拖鞋和面盆等，这些土工艺会释放出大量有毒有害的烟尘和烟气，造成严重的二次污染。而且现在废旧橡胶的回收率很低（最多不超过 50%），利用方式主要是生产再生胶（占总利用率的 95%），废橡胶的回收利用形势很严峻，任务很艰巨。

1.3.7 建筑垃圾

绝大多数建筑垃圾是可以作为再生资源重新利用的，如：废金属可重新回炉加工制成各

种规格的钢材；废竹木、木屑等可用于制造各种人造板材；碎砖、混凝土块等废料经破碎后可代替砂直接在施工现场利用，如用于砌筑砂浆、抹灰砂浆、浇捣混凝土等，也用以制作砌块等建材产品等。在建筑垃圾综合利用方面，近年来国内外有很多突破性的成果，如孔内深层强夯桩技术就是一种综合利用碎砖瓦和混凝土块的途径。由于配套管理政策不完善，绝大部分建筑垃圾未经任何处理便被施工单位运往郊外或乡村，采用露天堆放或填埋的方式进行处理，占用大量的土地，同时，清运和堆放过程中的遗撒和粉尘、灰砂飞扬等问题又造成了严重的环境污染。随着我国对于保护耕地和环境保护的各项法律法规的颁布和实施，如何处理和排放建筑垃圾已经成为我国建筑施工企业和环境保护部门面临的一个重要课题。在此方面，美国、德国及日本等工业发达国家的先进经验值得借鉴，这些国家大多实行的是“建筑垃圾源头削减策略”，即在建筑垃圾形成之前就通过科学管理和有效的控制措施将其减量化，对于产生的建筑垃圾则采用科学方法使其资源化。

1.3.8 危险废物

危险废物是固体废物的一种，亦称有害有毒废物，包括医疗垃圾、废树脂、药渣、含重金属污泥、酸和碱废物等。清洁生产是降低危险废物数量的最佳途径之一。发达国家基本上对含镉和砷的废物均列为危险废物，并且凡是被列为危险废物的废物，其处理费用与一般废物相比将高几倍至几百上千倍。在生产过程中不采用或少用有毒有害原料或可能产生有毒有害废物的原料，可以大幅度降低危险废物的产量。把有毒有害废物与一般废物分开收集与运输，也是降低危险废物产量的有效途径。已经产生的、必须单独处理的危险废物，其处理优先程序是通过物理、化学和生物方法，把危险废物中的有毒有害成分分离出来并加以利用，使之转化为无毒无害废物；其次是减容化，尽可能降低危险废物体积，如采用焚烧方法；第三是把危险废物中的有毒有害成分通过固化或稳定化，降低这些有毒有害成分的迁移能力，同时采取永久性措施加以储存，如在安全填埋场中填埋，但是安全填埋场造价非常高昂。将危险废物纳入法制管理轨道，以固体废物申报登记为基础，以废物交换为突破口，与总量控制相结合，综合运用各项环境管理制度和措施，广泛开展危险废物的综合利用，实现危险废物最大程度的资源化，妥善处理危险废物，走可持续发展的道路是危险废物管理的基本思路。坚持“预防为主、交换互补、以大带小、集中控制”的技术指导原则。

1.3.9 填埋场温室气体减排与控制

人类活动排放的温室气体引发的气候变暖已成为全球关注的重大环境问题，其中，生活垃圾衍生温室气体是主要人为源之一。目前，全世界年产城市生活垃圾 7.2 亿吨（中国 1.5 亿吨），大约 80% 以上以卫生填埋或简易堆放进行处置（包括中国），产生的 CH_4 占全球释放总量的 12% 以上，而 CH_4 对温室效应的贡献率约为 26%，是导致全球气候变暖的重要原因。其中，我国生活垃圾填埋场产生的 CH_4 量大约为 8.1×10^6 吨/年，相当于 $1.7 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ 当量/年温室效应，约占全球 20%。然而，因填埋场中的生活垃圾成分复杂，产量因季节和填埋龄而异，温室气体（填埋气）中微量杂质（如硅氧烷）的存在严重影响其高值化利用；其次，温室气体可在产气高峰期间通过收集系统进行收集利用，但发展中国家（包括中国）的绝大多数填埋场均未安装收集系统，所有温室气体直排大气，即使安装了温室气体收集系统，也只能在产气高峰期间实施，其收集利用效率不超过 30%，其余的 70% 因浓度偏低或收集费用偏高，无法利用而只能直排大气。因此，必须重视生活垃圾填埋场温室气体的控制。

本章主要内容

固体废物的定义、特性、性质等，重点是生活垃圾和工业废物处理与资源化发展方向。

习题与思考题

1. 简述生活垃圾特性和组分，对比生活垃圾各种处理处置方法的优缺点。
2. 试论各种固体废物资源化优势与存在的问题。
3. 描述温室气体排放与固体废物处理处置的关系，提出基于温室气体减排的固体废物最佳处理处置方法。

第 2 章 固体废物的收集、运输和预处理

2.1 生活垃圾的收集与运输

生活垃圾收运是垃圾处理系统中重要的一个环节，其费用占整个垃圾处理系统的 60%~80%。生活垃圾收运并非单一阶段操作过程，通常需包括三个阶段：第一阶段是从垃圾发生源到垃圾桶的过程，即搬运与贮存（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。清运车辆沿一定路线收集清除贮存设施（容器）中的垃圾，并运至垃圾转运站，有时也可就近直接送至垃圾处理处置场；第三阶段为转运，特指垃圾的远距离运输，即在转运站将垃圾转载至大容量运输工具并运往远处的处理处置场。后两个阶段需应用最优化技术，将垃圾源分配到不同的处置场，使成本降到最低。

对生活垃圾的短途运输要求做到封闭化、无污水渗漏运输、低噪声作业，外形清洁、美观，提高车辆的装载量，以实现满载、清洁、无污染的垃圾收集运输。现行的生活垃圾收集方式主要分为混合收集和分类收集两种类型。

① 混合收集。指未经任何处理的原生固体废物混杂在一起的收集方式，应用广泛，历史悠久。它的优点是比较简单易行，运行费用低。但这种收集方式将全部生活垃圾混合在一起收集运输，增大了生活垃圾资源化、无害化的难度。首先垃圾混合收集容易混入危险废物如废电池、日光灯管和废油等，不利于对危险废物的特别环境管理，并增大了垃圾无害化处理的难度。其次，混合收集造成极大的资源浪费和能源浪费，各种废物相互混杂、黏结，降低了废物中有效物质的纯度和再利用价值，降低了可用于生化处理和焚烧的有机物资源化和能源化价值，混合收集后再利用（分选）又浪费人、财、物力。因此，混合收集被分类收集所取代是收运方式发展的趋势。

② 分类收集（细化）。分类收集是生活垃圾收集方式的重要内容之一，其定义为根据垃圾的不同成分及处理方式，在源头对生活垃圾进行分类收集。这种方式可以提高回收物资的纯度和数量，减少需要处理的垃圾量，有利于生活垃圾的资源化和减量化，可以减少垃圾运输车辆、优化运输线路，从而提高生活垃圾的收运效率，并有效降低管理成本及处理费用。

推行分类收集，是一个相当复杂艰难的工作，要在具有一定经济实力的前提下，依靠有效的宣传教育、立法以及提供必要的垃圾分类收集的条件，积极鼓励城市居民主动将垃圾分类存放，仔细地组织分类收集工作，才能使垃圾分类收集的推广坚持发展下去。对垃圾分类收集在一些试点城市推行的经验总结表明，要在全国范围内开展垃圾分类收集，需要因地制宜，增强政策扶持和升入配套措施执行，完善垃圾处理系统，加大教育宣传，提高市民的垃圾分类收集意识和积极性等。

2.2 生活垃圾清运

2.2.1 拖曳容器操作方法

拖曳容器操作方法是指出将某集装点装满的垃圾连容器一起运往转运站或处理处置场，卸

空后再将空容器送回原处或下一个集装点，其中前者称为一般操作法，后者称为修改工作法。其收集过程见图 2-1。

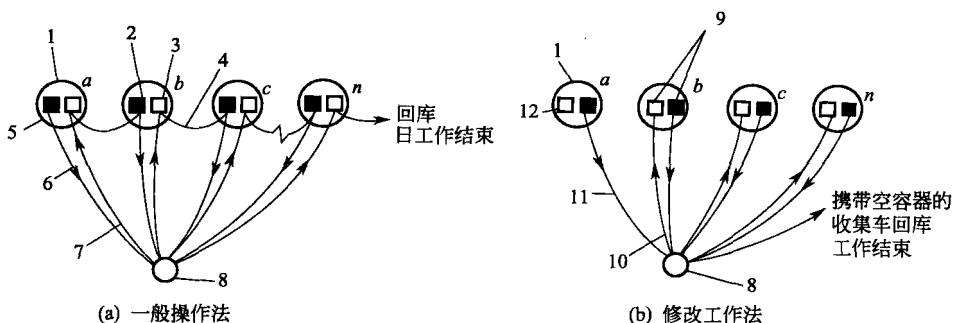


图 2-1 拖曳容器收集操作图

- 1—容器点；2—容器装车；3，7—空容器放还原处；4—驶向下个容器；5—车库来的车行程开始；
6，11—满容器运往转运台；8—转运站、加工站或处置场；9—*a*点的容器放在*b*点，
*b*点容器运往转运站；10—空容器放在*b*点；12—携带空容器的收集车自车库来，行程开始

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，可以建立设计数据和关系式，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。可以将收集操作过程分为四个基本用时，即集装时间、运输时间、卸车时间和非收集时间（其它用时）。

(1) 集装时间 对常规法，每次行程集装时间包括容器点之间的行驶时间、满容器装车时间、卸空容器放回原处的时间三部分，用公式表示为：

$$P_{hcs} = t_{pc} + t_{uc} + t_{dbc} \quad (2-1)$$

式中， P_{hcs} 为每次行程集装时间，h/次； t_{pc} 为满容器装车时间，h/次； t_{uc} 为空容器放回原处时间，h/次； t_{dbc} 为容器间行驶时间，h/次。

如果容器行驶时间未知，可用下面的运输时间公式 [式(2-2)] 估算。

(2) 运输时间 指收集车从集装点行驶至终点所需时间加上离开终点驶回原处或下一个集装点的时间，不包括停在终点的时间。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。从大量的不同收集车的运输数据分析，发现运输时间可以用下式近似表示：

$$h = a + bx \quad (2-2)$$

式中， h 为运输时间，h/次； a 为经验常数，h/次； b 为经验常数，h/km； x 为往返运输距离，km/次。

(3) 卸车时间 专指垃圾收集车在终点（转运站或处理处置场）逗留的时间，包括卸车及等待卸车时间。每一行程卸车时间用符号 S (h/次) 表示。

(4) 非收集时间 指在收集操作全过程中非生产性活动所花费的时间。常用符号 ω (%) 表示非收集时间占总时间的百分数。

因此，一次收集清运操作行程所需时间 (T_{hcs}) 可用下式表示：

$$T_{hcs} = (P_{hcs} + S + h) / (1 - \omega) \quad (2-3)$$

也可用下式表示：

$$T_{hcs} = (P_{hcs} + S + a + bx) / (1 - \omega) \quad (2-4)$$

当求出 T_{hcs} 后, 则每日每辆收集车的行程次数用下式求出:

$$N_d = H/T_{hcs} \quad (2-5)$$

式中, N_d 为每天行程次数, 次/d; H 为每天工作时数, 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:

$$N_w = V_w/(cf) \quad (2-6)$$

式中, N_w 为每周收集次数, 即行程数, 次/周 (若计算值带小数时, 需进位到整数); V_w 为每周清运垃圾产量, m^3 /周; c 为容器平均容量, m^3 /次; f 为容器平均充填系数。

由此, 每周所需作业时间 D_w (d/周) 为:

$$D_w = t_w P_{hcs} \quad (2-7)$$

应用上述公式, 即可计算出拖曳容器收集操作条件下的工作时间和收集次数, 并合理编制作业计划。

2.2.2 固定容器收集操作法

固定容器收集操作法是指用垃圾车到各容器集装点装载垃圾, 容器倒空后固定在原地不动, 车装满后运往转运站或处理处置场。固定容器收集法的一次行程中, 装车时间是关键因素, 分机械操作和人工操作。固定容器收集过程见图 2-2。

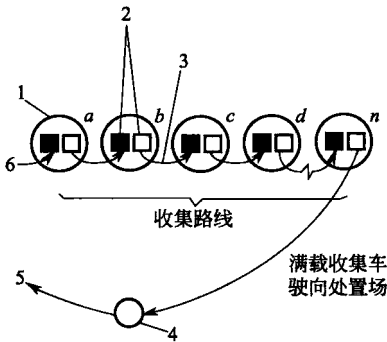


图 2-2 固定容器收集操作图

- 1—垃圾集装点; 2—将容器内的垃圾装入收集车; 3—驶向下一个集装点;
- 4—中转站、加工站或处置场;
- 5—卸空的收集车进行新的行程或回库;
- 6—车库来的空车行程开始

(1) 机械装车 每一收集行程时间用下式表示:

$$T_{scs} = (P_{scs} + S + a + bx)/(1 - \omega) \quad (2-8)$$

式中, T_{scs} 为固定容器收集法每一行程时间, h/次; P_{scs} 为每次行程集装时间, h/次。

此处, 集装时间为:

$$P_{scs} = c_t(t_{uc}) + (N_p - 1)(t_{dbc}) \quad (2-9)$$

式中, c_t 为每次行程倒空的容器数, 个/次; t_{uc} 为卸空一个容器的平均时间, h/个; N_p 为每一行程经历的集装点数; t_{dbc} 为每一行程各集装点之间的平均行驶时间。

如果集装点平均行驶时间未知, 也可用公式(2-2)进行估算, 但以集装点间的距离代替往返运输距离 x (km/次)。

每一行程能倒空的容器数直接与收集车容积、压缩比以及容器体积有关, 其关系式:

$$c_t = Vr/(cf) \quad (2-10)$$

式中, V 为收集车容积, m^3 /次; r 为收集车压缩比。

每周需要的行程次数可用下式求出:

$$N_w = V_w/(Vr) \quad (2-11)$$

式中, N_w 为每周行程次数, 次/周。

由此每周需要的收集时间为:

$$D_w = [N_w P_{scs} + t_w(S + a + bx)]/[(1 - \omega)H] \quad (2-12)$$

式中, D_w 为每周收集时间, d/周; t_w 为 N_w 值进到大整数。

(2) 人工装车 使用人工装车, 每天进行的收集行程数为已知值或保持不变, 这种情况

下日工作时间为：

$$P_{scs} = (1 - \omega)H / N_d - (S + a + bx) \quad (2-13)$$

每一行程能够收集垃圾的集装点可以由下式估算：

$$N_r = 60P_{scs}n / t_p \quad (2-14)$$

式中， n 为收集工人数，人； t_p 为每个集装点需要的集装时间；人·min/点。

每次行程的集装点数确定后，即可用下式估算收集车的合适车型尺寸（载重量）：

$$V = V_p N_p / r \quad (2-15)$$

式中， V_p 为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：

$$N_w = T_p F / N_p \quad (2-16)$$

式中， T_p 为集装点总数，点； F 为周容器收集频率，次/周。

2.2.3 收集车辆

按装车形式大致可分为前装式、侧装式、后装式、顶装式、集装箱直接上车等形式。车身大小按载重量分，额定量 10~30t，装载垃圾有效容积为 6~25 m^3 （有效载重量 4~15t）。为了清运狭小里弄小巷内的垃圾，还有数量甚多的人力手推车、人力三轮车和小型机动车作为清运工具。在美国，用于居民的和商业部门的废物收集卡车都装有叫做装填器的压紧装置，液压压紧机可把松散的废物由容重 35kg/ m^3 压实到 200~240kg/ m^3 ，常规的装载量为 12 m^3 和 15 m^3 。下面简要介绍几种国内常使用的垃圾收集车。

(1) 简易自卸式收集车 这是国内最常用的收集车，一般是在解放牌或东风牌货车底盘上加装液压倾卸机构和垃圾车改装而成（载重量 3~5t）。常见的有两种形式。一是单盖式自卸收集车，为了防止运输途中垃圾飞散，在原敞口的货车上加装防水帆布盖或框架式玻璃钢罩盖，后者可通过液压装置在装入垃圾前启动罩盖，要求密封程度较高；二是密封式自卸车，即车厢为带盖的整体容器，顶部开有数个垃圾投入口。简易自卸式垃圾车一般配以叉车或铲车，便于在车厢上方机械装车，适宜于固定容器收集法作业。

(2) 活动斗式收集车 这种收集车的车厢作为活动敞开式贮存容器，平时放置在垃圾收集点。因车厢贴地且容量大，适宜贮存装载大件垃圾，故亦称为多功能车，用于拖曳容器收集法作业。

(3) 侧装式密封收集车 这种车型为车辆内侧装有液压驱动提升机构，提升配套圆形垃圾桶，可将地面上的垃圾桶提升至车厢顶部，由倒入口倾翻，空桶复位至地面。倒入口有顶盖，随桶倾翻动作而启闭。国外这类车的机械化程度高，改进形式很多，一个垃圾桶的卸料周期不超过 10s，保证较高的工作效率。另外提升架悬臂长、旋转角度大，可以在相当大的作业区内抓取垃圾桶，故车辆不必对准垃圾桶停放。

(4) 后装式压缩收集车 这种车是在车厢后部开设投入口，装配有压缩推板装置。通常投入口高度较低，能适应居民中老年人和小孩倒垃圾，同时由于有压缩推板，适应体积大、密度小的垃圾收集。这种车与手推车收集垃圾相比，工效提高 6 倍以上，大大减轻了环卫工人的劳动强度，缩短了工作时间，另外还减少了二次污染，方便了群众。

2.2.4 收集次数与作业时间

垃圾收集次数，在我国各城市住宅区、商业区基本上要求及时收集，即日产日清。在欧美各国则划分较细，一般情形，对于住宅区厨房垃圾，冬季每周二三次，夏季至少三次；对旅馆酒家、食品工厂、商业区等，不论夏冬每日至少收集一次；煤灰夏季每月收集二次，冬