

 同济大学研究生教材

固体废物热处理技术

陈德珍 等 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

前 言

固体废物处理是目前环保的焦点,也是关系到居民生活的大事。固体废物既是污染源,又是资源,可以进行能源与资源的回收,利用生活垃圾焚烧发电是国家所鼓励,也是世界各国所践行的技术。但是焚烧过程中产生的二次污染物需要严格控制,由于这些二次污染危害被放大,导致社会上在建设垃圾焚烧设施时,常发生不必要的群体事件。随着技术的发展,除了传统的焚烧手段外,其他的热处理手段如气化技术和热解技术的发展也很迅速。而这些固体废物热处理手段之间的差异、适应的范围目前尚未见有系统的介绍。随着经济的发展、人民环保意识的增强,一方面有必要让人们了解固体废物热处理技术的实质、资源和能源回收的效果及潜在的二次污染风险,另一方面也必须培养专业的技术人员进行相关处理技术的设计和运行管理。现有的固体废物处理方面的教科书大多侧重资源回收方面的介绍,或者仅仅是焚烧炉的原理和运行案例介绍,在知识结构上不能满足培养相关专业人员进行固体废物热处理技术的选择和设计实践的教学要求。

本书是同济大学研究生院规划的教材(2014JCJS015),书稿在付梓之前已经多次在研究生教学中试用,并在试用中不断调整内容。

本书的作者还有胡雨燕、俞海森、尹丽洁、马晓波。第1章、第2章、第7章由陈德珍编写;第4章由胡雨燕编写;第5章由俞海森编写;第3章由尹丽洁编写;第6章由马晓波、陈德珍编写。全书由陈德珍统稿、主编。

本书在编写过程中始终遵循如下原则:已经掌握热力学、传热学、燃烧学和固体废物基本知识的研究生通过本课程的学习应掌握固体废物热处理的基本技术类型,包括焚烧、气化、热解处理的特点,掌握焚烧处理的工艺系统和焚烧炉工艺设计技能(包括焚烧炉本体、通风、垃圾输送、灰渣输送、环保等),掌握气化炉的原理和运行特点;掌握热解系统的基本热力计算方法(传热计算、热平衡计算、最基本的炉型设计计算),熟悉烟气净化工艺和设备选型,熟练掌握焚烧飞灰的处理技术,了解渗滤液的处理技术。为了让学生全面地了解固体废物的能源回收体系,还对生活垃圾填埋气发电进行了系统的介绍,使学生对此领域的关键工艺、关键设备有一个较为全面的了解。至于其他与固体废物处理相关的知识如填埋、堆肥、资源化回收,等等,都可以通过其他课程的学习来获得,而不作为本教材的内容,本教材只关注固体废物热处理技术相关的最直接和最基本的内容。

另外,由于固体废物热处理技术是一门实践性很强的课程,学生还需要完成大量的作业及设计练习;所有的知识点还涉及很多的标准与规范,这些标准与规范都在实时更新

中。本书着重于原理的讲述和基本的设计要点介绍,涉及具体技术指标时均以现行标准和规范为依据;所使用的参数、符号,也尽量与标准与规范相一致,便于学生学习后与工程实际尽快融合。

本书第3章热负荷部分的数据由上海环境卫生工程设计院有限公司周洪权、宋尧提供,在此表示感谢。

由于内容涉及面广,固体废物热处理技术更新很快,编者知识水平有限,不足之处,请予赐教。

编者

2019年10月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	1
1.1 固体废物的含义、分类及其污染特征	1
1.1.1 固体废物的含义	1
1.1.2 固体废物的特征	1
1.1.3 固体废物的分类	2
1.1.4 固体废物的污染	4
1.2 固体废物处理技术概述.....	5
1.2.1 填埋处理	5
1.2.2 生化处理	9
1.2.3 焚烧处理	11
1.2.4 综合处理.....	13
1.3 固体废物热转化利用概述	16
1.4 固体废物资源化技术	19
1.5 与固体废物处理有关的法律、法规和标准概述.....	23
1.5.1 与固体废物处理有关的法律和法规概述.....	23
1.5.2 与固体废物有关的环境保护标准和规范.....	26
第 2 章 城市固体废物的组成与特性	27
2.1 生活垃圾的组成与性质	27
2.1.1 生活垃圾的组成.....	27
2.1.2 生活垃圾的性质.....	28
2.2 污泥的组成与性质	35
2.2.1 污泥的来源与组成.....	35
2.2.2 污泥的处理与处置.....	37
2.2.3 污泥的分析.....	39
2.3 固体废物的产量及其影响因素	39
2.3.1 固体废物的产量.....	39
2.3.2 影响生活垃圾组成与产量的因素.....	39

第 3 章 生活垃圾焚烧	41
3.1 生活垃圾的热值及其计算	41
3.1.1 仪器测定法	41
3.1.2 经验公式估算法	43
3.2 生活垃圾焚烧的基本原理与计算	46
3.2.1 生活垃圾焚烧的基本原理	46
3.2.2 焚烧过程的物质平衡	48
3.2.3 焚烧过程的热平衡	52
3.3 垃圾焚烧炉的分类	55
3.3.1 炉排式焚烧炉	55
3.3.2 流化床焚烧炉	61
3.3.3 旋转窑焚烧炉	62
3.3.4 旋风式焚烧炉	63
3.4 炉排式垃圾焚烧炉的设计方法	64
3.4.1 焚烧炉的质量和热量平衡	64
3.4.2 风机的选型设计	67
3.4.3 燃烧器的设计	68
3.4.4 渗滤液系统的设计	68
3.4.5 灰渣系统的设计	68
3.4.6 炉膛尺寸和炉排面积设计计算方法	70
3.4.7 余热锅炉内受热面的计算	72
3.5 污泥焚烧简介	81
3.5.1 污泥干化	81
3.5.2 流化床焚烧炉	84
第 4 章 生活垃圾焚烧炉的污染物控制	86
4.1 生活垃圾焚烧烟气净化系统的组成	86
4.1.1 焚烧烟气中酸性气体的净化	88
4.1.2 焚烧烟气中 NO_x 的生成与防治	91
4.1.3 焚烧烟气颗粒物去除工艺	96
4.1.4 焚烧烟气中二噁英的生成与防治	102
4.1.5 焚烧烟气中重金属的控制	109
4.2 生活垃圾焚烧飞灰的性质与处理	110
4.2.1 飞灰的组成	110
4.2.2 生活垃圾焚烧飞灰的污染特征	113

4.2.3	生活垃圾焚烧飞灰处理处置技术	118
4.3	垃圾渗滤液的处理	128
4.3.1	渗滤液的来源与污染成分	128
4.3.2	渗滤液的处理技术	129
第5章	固体废物气化技术及利用	138
5.1	气化技术及其原理	138
5.1.1	气化技术简介	138
5.1.2	气化基本原理	138
5.1.3	气化指标	140
5.2	气化前预处理	141
5.2.1	固体废物的破碎	141
5.2.2	固体废物的分选	142
5.2.3	固体废物的筛分	143
5.2.4	干燥	144
5.3	气化炉型及其设计要点	145
5.3.1	典型气化炉类型	145
5.3.2	气化炉设计要点	147
5.4	气化熔融技术简介	148
5.4.1	气化熔融技术的原理	149
5.4.2	气化熔融技术的特点	150
5.4.3	我国气化熔融技术的发展	151
5.4.4	小结	152
5.5	气化气的成分与利用	153
5.5.1	气化气的成分	153
5.5.2	气化气的利用	153
5.6	气化过程中产生的污染物与控制	157
5.6.1	固体废物气化过程中污染物产生及其机理	157
5.6.2	污染物的危害	159
5.6.3	污染物的控制	160
5.7	生活垃圾、污泥气化简介	160
5.7.1	生活垃圾气化简介	160
5.7.2	污泥气化简介	162
第6章	固体废物的热解技术	164
6.1	热解的基本原理	164

6.1.1	生活垃圾热解原理	164
6.1.2	生活垃圾热解技术的特点	166
6.2	生活垃圾热解工艺与设备	166
6.2.1	热解工艺分类	166
6.2.2	热解设备	167
6.3	生活垃圾热解的影响因素与动力学分析	171
6.3.1	热解反应的影响因素	171
6.3.2	热解反应的动力学分析	175
6.4	热解产物的种类和特性分析	183
6.4.1	废纸的热解产物	184
6.4.2	废塑料的热解产物	184
6.4.3	木材和木质材料的热解产物	185
6.4.4	落叶和蔬菜的热解产物	186
6.4.5	垃圾衍生燃料(RDF)的热解产物	187
6.4.6	生活垃圾(MSW)的热解产物	187
6.5	常用热解炉型及其设计要点	189
6.5.1	回转窑设计要点	189
6.5.2	管式移动床反应器设计要点	193
6.6	微波热解简介	195
6.6.1	微波加热基础知识	195
6.6.2	微波加热原理及特点	196
6.6.3	微波热解	197
第7章	填埋气发电	201
7.1	填埋气的来源与组成	201
7.2	垃圾填埋气发电系统	202
7.2.1	气体收集系统	202
7.2.2	净化加压系统	204
7.3	发电机组的选定	213
7.3.1	填埋气用于内燃机发电	213
7.3.2	填埋气用于小型燃气轮机发电	214
7.4	垃圾填埋气发电的相关案例	215
7.4.1	杭州天子岭填埋气发电项目	215
7.4.2	北京市海淀区六里屯生活垃圾填埋场沼气发电项目	216
7.4.3	深圳下坪生活填埋场填埋气发电项目	217
7.4.4	天津双口生活垃圾填埋气发电项目	218
	参考文献	220

第 1 章 绪 论

1.1 固体废物的含义、分类及其污染特征

1.1.1 固体废物的含义

我国在 2004 年修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》明确提出: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。固体废物(Solid Waste),有时也称为废弃物,从宏观上讲,其来源于两个方面:一个是生产过程中产生的废物;另一个是社会产品使用消费过程中产生的生活废物。人类在开发资源和制造产品的过程中,必然产生废弃物料,这就是生产废物;而任何产品经过人类的使用和消耗后,最终也将变成废物,这就是生活废物。从分类上讲,其分为三类,分别是生活垃圾、工业固体废物和危险废物。

“固体废物”的定义有时间和空间的特点。从时间上讲,它表示相对于目前的科学技术和经济条件,一时无法利用,但是随着科学技术的发展,自然资源日益枯竭,无法满足人类需要,今日的固体废物必然将成为明日的资源;从空间上讲,固体废物仅仅相对于某一过程或某一方面没有使用价值,但也可能是另一过程的原料。例如高炉矿渣、煤矸石等,过去都是作为冶金废弃物,可是现在却成为重要的建筑材料,用来制砖;人畜粪便,从古到今,一直都是作为肥料的主要来源,而且肥效很好。所以,对环境工作者来说,固体废物不是无用之物,而是“放错了地方的资源”(曾现来,2011)。

1.1.2 固体废物的特征

固体废物与废水和废气相比,主要有以下几个特点:

(1) 成分的多样性和复杂性。现代社会产生的固体废物,其成分十分复杂,品种繁多,从大到小,从单一物质到聚物质;从简单到复杂,从边角料到设备配件,从有机到无机,从金属到非金属,从无毒到有毒,从无味到有味,这样构成了五花八门的“垃圾世界”。

(2) 环境与资源的双重价值。人类对固体废物的处理与利用,关系到人类对资源的有效利用,变无用为有用,变一用为多用,使自然资源能够永远地循环利用,实现资源和生态环境的可持续发展,以及经济和社会的可持续发展。当然,对固体废物进行资源化利用是有代价的。

(3) 生产性固体废物的减少,消费性固体废物的增多。随着社会的发展,社会生产力水平的不断提高,人类对物质需求的不断膨胀,以及消费水平的不断提高,使得生产过程中产生的固体废

物不断减少,而消费性固体废物会不断增多。含塑料、纸张等组分的生活垃圾就是典型的消费性固体废物。

(4) 有用与无用的集合体。从字面上理解,固体废物是人类废弃之物,但是,如前所述,固体废物这一概念具有明显的时间和空间的特征,废弃或不废弃是相对于人们的观念意识和利用能力而言的。某些单位或个人所产生的固体废物,是以其生产能力和消费水平来说的,而对其他单位或个人来看,就不一定是废弃物了。因此,从更宽泛的产业角度看,固体废物本身都具有一定的资源价值。

(5) 持久的危害性。固体废物是呈固态、半固态的物质,不具有流动性;因此,它不可能像废水、废气那样可以迁移到大容量的水体(如湖泊、江河、海洋)或溶入大气中,通过自然界中物理、化学、生物等多种途径进行稀释、降解和净化。部分固体废物可能通过释放渗滤液和气体进行“自我消化”处理,而这个过程是非常漫长、复杂和难以控制的,例如,堆放场中的生活垃圾不经任何处理,一般需要 10~30 年的时间才可以趋于稳定。而废旧塑料和橡胶则需要更长的时间才能降解,在这样一个漫长的时间段内,会对环境造成持续的危害。

1.1.3 固体废物的分类

对固体废物进行分类是处理和利用固体废物的基础。固体废物的科学分类对其进行深入研究,以及处理、处置和资源化利用具有举足轻重的意义。我国固体废物管理分类标准主要包括《国家危险废物名录》《放射性废物分类标准》《危险废物鉴别标准》,住建部颁布的《生活垃圾产生源分类及其排放》以及国家环境保护部颁布的《进口可用作原料的固体废物环境保护控制标准(征求意见稿)》等。按其形态可分为固态(粉状、粒状、块状)和半固态(污泥);按其危险性可分为一般性固体废物和危险废物;按其化学组成可分为有机废物和无机废物;按其来源可分为矿业废物、工业废物、生活垃圾、农业废物和放射性废物等。2016 年修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》(以下称《固废法》)将固体废物分为生活垃圾、工业固体废物和危险废物三大类,而没有把农业废物纳入其中。但是,我国是世界上最大的农业国家,农业废物的产生量已超过工业固体废物,并对环境造成越来越严重的污染,所以,农业固体废物也是不可忽视的一大类。《固废法》对废物的分类如表 1-1 所示。

按危险性也可将固体废物分为两大类:一般性固体废物和危险固体废物。而一般性废物又分为以下几个大类:生活垃圾、污水污泥、废旧电子电器、工业固体废物、农业固体废物和矿业固体废物。

表 1-1 固体废物分类

废物分类	定义	常见来源	常见废物
生活垃圾	在日常生活中或者为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律、行政法规规定视为生活垃圾的固体废物	可回收物	纸类、塑料、金属、玻璃、织物
		大件垃圾	废家用电器和家具等
		可堆肥垃圾	剩余饭菜等易腐食物类厨余垃圾,树枝花草等可堆沤植物类垃圾等
		可燃垃圾	植物类垃圾,不适宜回收的废纸类、废塑料橡胶、旧织物用品、废木等
		有害垃圾	废日用小电子产品、废油漆、废灯管、废日用化学品和过期药品等

(续表)

废物分类	定义	常见来源	常见废物
工业固体废物	在工业生产活动中产生的固体废物	冶金工业固体废物	各种金属冶炼或加工过程中所产生的废渣
		能源工业固体废物	燃煤电厂产生的粉煤灰、炉渣、烟道灰、采煤及洗煤过程中产生的煤矸石等
		石油化学工业固体废物	油及加工工业产生的油泥、焦油页岩渣、废催化剂、废有机溶剂等
		矿业固体废物	矿山开采和矿石冶炼生产过程中产生的废物。矿山所产生的固体废物又分为废石(包括煤矸石)和尾矿两大类。矿石在选矿过程中选出目的精矿后,剩余的含有目的金属很少的矿渣称为尾矿
		轻工业固体废物	食品工业、造纸印刷工业等工业加工过程中产生的污泥、动物残物、废酸、废碱以及其他废物
		其他工业固体废物	加工过程产生的金属碎屑、电镀污泥、建筑废料等
危险废物	列入《国家危险废物名录》或者根据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固体废物	医疗废物	一次性使用卫生用品、一次性使用医疗用品及一次性医疗器械等
		农药废物	农药生产、配制过程中产生的过期原料及报废药品等
		有机溶剂废物	有机溶剂的生产、配制、使用过程中产生的含有有机溶剂的清洗杂物等
		热处理含氰废物	使用氰化物进行金属热处理产生的淬火池残渣等
		染料、涂料废物	使用溶剂、光漆进行光漆涂布、喷漆工艺过程中产生的染料和涂料废物等
		废矿物油	石油开采和炼制产生的油泥和油脚等
		……	

下面对表 1-1 中未详细介绍的污泥、废旧电子电器和农业固体废物作简单介绍:

1. 污泥

污泥是指介于液体和固体之间的一种半固态的浓稠物,主要是废水处理中产生的沉淀物、颗粒物和漂浮物的集合体。它可以用泵输送,但它很难通过沉降进行固液分离。悬浮物浓度一般在 1%~10%,低于此浓度称为泥浆。之所以将污泥单独划为一类,是因为随着国家对水处理治理的加大,污泥的产生量也将加大,对污泥资源化研究也将逐渐加强。污泥的来源不同及因水处理方法不同,产生的污泥性质也不一。

污泥的种类很多,分类也比较复杂,一般有以下几种分类:

(1) 按来源分——污泥主要有生活污水污泥、工业废水污泥和给水污泥。

(2) 按处理方法和分离过程分——污泥可分为沉淀污泥(包括物理沉淀污泥、混凝沉淀污泥、化学沉淀污泥)及生物处理污泥(包括剩余污泥、生物膜法污泥),目前一般都是沉淀污泥和生物处理污泥的混合污泥。

(3) 按污泥的成分分——污泥可分为有机污泥和无机污泥,如生活污水处理产生的混合污泥和工业废水产生的生物污泥,都是典型的有机污泥,其特征是有机质含量高(60%~80%)、颗粒小(0.02~0.2 μm)、密度小(1.002~1.006 g/cm³);化学沉淀污泥及沉砂池产生的污泥属于典型的无机污泥,特征是有机物含量少、颗粒粗、密度大、含水率低等。

(4) 按污泥性质分——亲水性污泥和疏水性污泥。

2. 废旧电子电器

废旧电子电器就是报废的电子产品、电器产品。主要包括废旧的家用电器、电脑、各种电子仪表、电子仪器、通信器材、报废汽车等。废旧电子电器处理不好,不但造成资源浪费,还会污染环境。目前一般是经过拆解后进行分类回收处理。

3. 农业固体废物

农业固体废物是指在农业生产及产品加工过程中产生的固体废物。农业固体废物主要来自植物种植业、动物饲养业和农副产品加工业。常见的农业固体废物有稻草、麦秸、玉米秸、稻壳、落叶、果核、畜禽粪便、死禽死畜、羽毛、皮毛等。

1.1.4 固体废物的污染

固体废物污染环境的途径多、污染形式复杂,可间接或直接污染环境,既有即时性污染,又有潜伏性和长期性的污染。一旦固体废物造成环境污染或潜在的污染变成现实,消除这些污染就往往需要复杂的技术和大量的资金投入,花费较大的代价进行治理,并且很难使环境恢复。总体上讲,固体废物对环境和人类的危害主要表现在如下几个方面:

1. 侵占土地资源

固体废物产生之后,需要土地堆放。产生废物的处理量越少,堆积量也就越大,占用的土地也就越多。据估计,每堆积1万吨废渣需要占用一亩土地。据报道,美国有200万 hm^2 的土地被固体废物侵占,英国为60万 hm^2 。由于我国过去对固体废物的处理和利用不够重视,导致固体废物的大量堆积。随着我国经济的发展和人们生活水平的提高,固体废物的产生量会越来越大,如不进行有效的处理与利用,固体废物侵占土地的问题会变得更加严重。

2. 污染土壤

废物堆放过程中,其中的有害组分容易污染土壤。如果直接利用来自医院、肉类联合厂、生物制品的废渣作为废料施入农田,其中的病菌、寄生虫等就会使土壤污染。人与污染的土地直接接触,或生吃此类土壤上种植的蔬菜、瓜果就会致病。当污染土壤中的病原微生物与其他有害物质随天然降水径流或渗流进入水体后就可能进一步危害人的健康。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,能杀死土壤中的微生物,破坏土壤内的生态平衡,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就曾达1500万吨,使尾砂坝下游一个乡的大面积土地被污染,居民被迫迁移。

此外废弃物的渗滤液携带着大量的有毒有害物质,如排入地下会对土壤造成污染。例如,废铅蓄电池是一种固体废物,它如果得不到合理的处理,就会造成环境污染,还会危害人体健康(胡小芳,2014)。固体废物中的有害物质进入土壤后,还可能在土壤中发生积累。我国西南某市郊因农田长期施用垃圾肥,土壤中的汞浓度超过本底8倍,对农作物的生长带来了很大危害。来自大气层核爆炸实验产生的散落物,以及来自工业或科研单位的放射性固体废物,也能在土壤中积累,并被植物吸收,进而通过食物进入人体,危害人类健康。

3. 污染水体

固体废物随天然降水或地表径流进入河流、湖泊,或随风飘落入河流、湖泊,能污染地面水,并随渗沥水渗透到土壤中,进入地下水,使地下水被污染;废渣直接排入河流、湖泊或海洋,

能造成更大的水体污染。美国腊夫运河(Love Canal)事件就是典型的固体废物污染地下水事件。1930—1935年,美国胡可化学工业公司在纽约州尼亚加拉瀑布附近的腊夫运河废河谷填埋了2 800多吨桶装有害物质,然后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,然后陆续出现井水变臭,婴儿畸形,居民身患怪病,大气中的有害物质浓度超标500多倍,造成了非常严重的后果。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。如管理不当的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,造成了极大的污染。

即使是无直接危害的固体废物排入河流、湖泊,也会造成河床淤塞,水面减小,水体污染,甚至导致水利工程设施的效益减少或废弃。

4. 污染大气

一些有机固体废物在适宜的温度和湿度下被微生物分解,能释放出有害气体;以细颗粒状存在的废渣和垃圾,在大风吹动下会随风飘逸,扩散到远处;固体废物运输和处理过程中,也能产生有害气体和粉尘。

煤矸石会自然散发大量的二氧化硫。在垃圾露天堆场,有大量的氨、硫化物等污染物向大气中释放,其中仅有机挥发性气体就多达100多种,其中含有许多致癌、致畸物。

5. 影响市容和环境卫生

过去我国工业固体废物的综合利用率较低,生活垃圾的清运能力不高,相当部分未经处理的工业废渣、垃圾常露天堆放在厂区、城市街区角落等地,它们除了导致直接的环境污染外,还严重影响了厂区、城市的容貌和景观。其中“白色垃圾”对环境和市容的污染是最明显的例子。如水体中漂浮的和树枝上悬挂的塑料袋就严重影响了城市景观,形成“视觉污染”。经过“十一五”和“十二五”期间近十年的努力,这种景象已经得到了很大的改观,目前大中型城市的垃圾已经可以做到日产日清。

1.2 固体废物处理技术概述

固体废物处理都是以无害化、资源化、减量化为处理目标。本书着重生活垃圾的处理,所以主要讨论生活垃圾的处理方法,由于垃圾成分复杂,并受经济发展水平、能源结构、自然条件及传统习惯等因素的影响,所以国外对生活垃圾的处理一般是随国情而不同,往往一个国家中各地区也采用不同的处理方式。从应用技术看,国外主要在填埋、焚烧、堆肥、综合利用等方式,机械化程度较高,已形成系统及成套设备。从国外多种处理方式的情况看,有以下趋势:①工业发达国家由于能源、土地资源日益紧张,焚烧等热处理比例逐渐增多;②填埋法作为垃圾的最终处置手段一直占有较大比例;③不分类的堆肥逐渐消失;④其他一些新技术,如热解法、填海、堆山造景等技术,正不断取得进展。

现行的处理方法介绍如下。

1.2.1 填埋处理

填埋(Landfill)是从传统的堆放和土地处置发展起来的一种最终处理技术,不是单纯的堆、填、埋,而是一种按工程理论、土地标准,对固体废物处理技术进行有效管理的综合性科学

工程方法。在填埋方式上,它已从堆、填、埋、覆盖向包容、屏蔽、隔离的工程贮存方向发展。土地填埋处置,首先需要进行科学地选址,在设计规划的基础上对场地进行防护、防渗处理,然后按严格的操作程序进行填埋操作和封场,要制定全面管理制度,定期对场地进行维护和监测。填埋技术主要应用于生活垃圾的卫生填埋。

当代生活垃圾卫生填埋处置的基本概念是运用各种天然屏障和工程屏障,尽可能地将其与生活环境相隔离。对于垃圾卫生填埋处置而言,由于生活垃圾中有机物具有可生物降解性,因此,为了保证被填埋的固体废物的稳定化过程不致延长,容许一定量的大气降水进入填埋场和渗滤液少量的泄漏。通过填埋场底部衬层渗漏少量渗滤液,它的有机污染物在通过包气带土壤向下运移的过程中会因吸附、生物降解等原因而得到净化。

生活垃圾卫生填埋场的目的,就是保护生活环境和自然环境,防止由于生活垃圾产生各种可能的环境污染。生活垃圾填埋场的作用大致可以分为三类:贮存作用、隔断生活垃圾与外界环境的水力联系、以及水、气和生活垃圾的处理作用。

填埋场的贮存功能,即利用自然地形或人工修筑形成的一定空间,将一定年限内产生的生活垃圾贮留在内,待空间充满后封闭,恢复这一地区的原貌。这是填埋场的基本功能,但不是主要功能,随着技术的进步和环境保护要求的提高,这一功能在整个功能中所占的比重越来越小。

隔水功能是填埋场的主要功能,一方面,要防止由于生活垃圾本身所带来的水分以及降水与生活垃圾接触产生的渗滤液对地下水和地面水的污染,必须将渗滤液与外界的联系切断,同时收集后引出处理。这就要求填埋场必须设有防渗层、渗滤液集排系统;另一方面,还要防止外界降水和地表径流、地下水进入填埋场,以减少渗滤液的产生。这样,就要求填埋场还要有必要的场内雨水集排系统、周边雨水排泄系统、地下水集排系统和每日封闭系统、封顶层等。

填埋场处理功能表现在两方面:一方面,填埋场要对渗滤液以及排出的填埋气进行必要的处理;另一方面,生活垃圾在填埋层中的生物和其他物理化学作用下达到稳定的过程,这实际上也是一种生活垃圾的处理过程。在这一过程中,微生物的作用最大。如生活垃圾中的厨余物、纸类、纤维、草木类、有机污泥等可分解有机物质,在微生物的作用下,逐步分解为气态物质(CO_2 、 H_2S 等)、水和无机盐类等,达到减容和稳定的目的。有人提出“生物反应器”(Bio-reactor)的概念,即利用填埋层作为有机物降解的生物反应器,处理填埋场产生的含高浓度有机物的渗滤液和使生活垃圾中的有机物迅速降解。这实际上也是充分利用了填埋场的“处理”功能。

国内外生活垃圾填埋量逐渐减少,其原因主要为:

(1) 填埋处理未考虑其潜在的资源利用,被认为是一种不负责任的短视行为。提倡首先利用生活垃圾中的可回收物,而后通过智能化设施,焚烧其余部分成分进行发电或生产蒸汽。

(2) 填埋处理是一种日益费钱的处置方法,比如1992年,美国每填埋1吨生活垃圾的费用为30美元。但在填埋场关闭后的30年内,其检验费用也同样高昂。在护堤、渠道和管理工程方面还要花费数百万美元,以便于填埋场渗滤液的收集和处理。不少城市的填埋场已经填满或接近饱和,城市附近又很难找到适宜的填埋场地,若到更远的地方填埋生活垃圾,将造成收运费用的增加。

(3) 生活垃圾填埋产生的甲烷气体是温室气体,直接排入大气会引起全球变暖。当填埋场空气中甲烷浓度在5%~15%时,遇到明火会发生爆炸。

(4) 填埋场会产生大量的渗滤液,其中含有镉、铅、汞、锌等重金属,如不对其收集、处理,而直接排放到土壤、水体中,将会通过饮用水或食物链影响人类健康。

但填埋场为一切不能再利用物质的最终消纳场,这个作用目前还无法替代。

填埋场的种类很多,采用的名称也不尽相同,一般可以按如下几个方面分类:

(1) 构造分类

按构造通常可以分为三种:自然衰减型填埋场、全封闭型填埋场和半封闭型填埋场。

① 自然衰减型填埋场。不设防渗层和渗滤液收集设施,其主要理念是可以允许部分渗滤液渗入地下黏土层,并向填埋场周围慢慢扩散,同时借助渗滤液在垃圾场内及填埋场底部地层的非饱和区内所发生的各种衰减作用,包括稀释、扩散等,使渗滤液逐步得到净化,并减少对填埋场周围水域的影响。它的主要设计指标是黏土不饱和区的最小厚度,即距基岩的深度与取水井间的最小距离等。

② 全封闭型填埋场。顾名思义,全封闭型填埋场就是从填埋场设计启用开始到填埋场结束封场,利用地层结构的低渗透性或工程型密封系统,将生活垃圾与周围环境完全隔离开,减少渗滤液产生量和渗入蓄水层中的渗滤液量,并对场区内的渗滤液收集和处理,使填埋场对地下水及周围的环境污染降低到最低限度。全封闭型填埋场的底部、边坡和顶部均须设置由黏土、人工衬层等一种或几种防渗材料组合而成的防渗系统,并设有渗滤水的收集、导排和检测系统。

③ 半封闭型填埋场。半封闭型填埋场介于自然衰减型填埋场和全封闭填埋场之间。

一般而言,半封闭型填埋场与外界隔离的程度没有全封闭型填埋场程度高,处于“准封闭状态”。一般它的底部也设有单密封系统,并设有渗滤液收集和导排设施,但由于它的顶部密封没有严格采用防渗衬层,因此,仍可能有部分降水进入填埋作业区,以至扩散到周边环境。

(2) 地质分类

填埋场的类别很大程度上取决于用作填埋场的地质类型,如使用空地,也选择沼泽、荒地和沿海地区。不同性质的土地对填埋场的建设影响很大。

① 包容性场地。包容性场地指周围都被滞水层包围的填埋场,填埋场产生的渗滤液滞留其中,不会对地下水造成污染。

② 衰减性场地。衰减性场地指被渗透率低的地层所包围的填埋场,填埋场中形成的渗滤液迁移速度很慢,当其到达地下水位时,已经被很大程度地稀释了。当最后进入地下水时,对水质的影响较小。填埋场底部与地下水位之间的距离越长,稀释程度越高。

③ 快速迁移场地。快速迁移场地指被渗透率高的地层包围的填埋场,渗滤液在没有经过充分稀释之前,就进入了地下水系。

按照卫生填埋要求,必须防止渗滤液对地下水的污染,所以现在一般都要求对填埋场的底部进行防渗处理。对包容性场地,可以将砾石层铺在场地的底部和四周,这可以使渗滤液得到稀释,对衰减性场地和快速迁移场地则必须在场地的底部及四周铺设不透水的衬层,防止渗滤液污染地下水,衬层的材质可选用胶质性黏土及土工布等。

(3) 地形分类

填埋场的构筑方式和填埋方式还与地形地貌有关,可以分为山谷型卫生填埋场、滩涂型卫生填埋场和平地型卫生填埋场。平地型卫生填埋场又称为平原型,可以分为地上式和地下式两种。

① 山谷型卫生填埋场。它是一种利用天然沟壑、山谷对生活垃圾进行处理的方式。这种类型填埋场的高差比一般较大,而且地质属于稀释性与渗透性之间,因此,雨污水的分流与导

排及防渗系统的设计是此类填埋场安全运营的关键。

② 滩涂型卫生填埋场。主要是指位于海滩附近、经过长期冲击淤积而成的滩地。它的场地标高低于正常地面。设计此类填埋场时,首先要在规划填埋区域建造人工防渗堤坝。由于这类填埋场的地下水位较高,因此,其关键点在于地下水防渗系统的设计。

③ 平地型卫生填埋场。常适用于地形比较平坦且地下水较浅的地区。一般采取高层堆放垃圾的方式,确定高于地平面的填埋高度时,必须充分考虑作业的边坡比。填埋场顶部的面积能保证垃圾车和推铺压实机械设备在上面安全工作,但是存在覆盖土源短缺的突出问题,所以过去使用在填埋场的底部开挖基坑的土的方法来保证覆盖土的供应。

(4) 反应机制的分类

生活垃圾填埋处理、处置过程可以看成是一个“最大限度的利用自然循环和分解机制”的过程。从这种观点出发,填埋场可以被分为厌氧性填埋、好氧性填埋和准好氧性填埋。

① 厌氧性填埋。在水浸渍的状态下填埋,空气无法进入,在填埋体内部形成厌氧状态,生活垃圾中的有机物分解缓慢。厌氧分解分为两步:首先是有机物被分解为有机酸或乙醇,然后进一步分解为甲烷和二氧化碳。从生活垃圾填埋开始到填埋物稳定需要一个很长的时间。在一些地域宽阔的国家,填埋场地无需恢复利用,较多采用厌氧填埋方式,同时收集甲烷气体用于发电。可是近年来由于甲烷气体破坏臭氧层,使得厌氧性填埋受到一定限制,好氧性填埋成了研究的重点。

② 好氧性填埋。好氧性填埋也有两种:一种是用鼓风机直接向填埋场中鼓风的“好氧填埋”;另一种是在集水管末端利用自然通风达到填埋体中空气流通的“准好氧填埋”。这两种都有早期稳定有机物的效果,但是“好氧填埋”需要动力,费用是一个制约因素。

③ 准好氧性填埋。它的结构是集水井末端敞开,利用自然通风,空气通过集水管向填埋体中流通。填埋体中的有机物与空气接触,好氧分解,产生二氧化碳气体,气体经过排气设备放出。随着堆积的生活垃圾越来越多,空气被上层的生活垃圾和覆盖土挡住无法进入下层,下层生成的气体穿过生活垃圾间的空隙,由排气设施放出。这样,在填埋体中形成一定的负压,空气就可以从开放的集水管中吸入,向填埋体扩散,扩大好氧范围,促进有机物的分解,但是,空气无法到达整个填埋体,当生活垃圾层变厚以后,填埋地表层、集水管附近、立渠和排气设施周围成为好氧状态,而空气接近不了的填埋体中部则处于厌氧状态。在厌氧状态区域,部分有机物被分解,硫化物被还原成硫化氢,生活垃圾中含有的镉、汞和铅等重金属与硫化氢反应,生成不溶于水的硫化物,存留在填埋体中。这种好氧厌氧共存的方式,称为“准好氧填埋”。准好氧填埋在费用上与厌氧填埋相差不大,而在有机物管理方面不比好氧填埋差,因此其应用也是很普遍的。

(5) 其他分类方式

除了上述几种主要的和典型的分类方式外,还有其他的分类方式,如:按废物填埋的深度可以划分为浅地层填埋和深地层填埋;按处置对象的性质和填埋场的结构形式可以分为卫生填埋、安全填埋和惰性填埋等;按固体废物污染防治法规,可以分为一般固体废物填埋和工业固体废物填埋,其中工业固体废物填埋又可以分为遮断型、管理型和安定型三种;还有按填埋场建设规模和处理能力分类的。

目前被普遍承认的分类法是将其分为卫生填埋和安全填埋两种。前者主要处置生活垃圾等一般固体废物,而后者则主要以危险废物为处置对象。这两种处置方式的基本原则相同,事

实上安全填埋在技术上完全可以包含卫生填埋的内容,但更严格,费用也更贵。所谓卫生填埋,就是对生活垃圾填埋场按环境卫生工程技术进行施工,使填埋的生活垃圾对地下水、地表水、土地、空气及周边环境不至于造成污染(朱能武,2006)。

1.2.2 生化处理

生物化学方法在固体废物资源化和处理中具有重要意义。它不仅可以使有机固体废物变成能源、食品、饲料和肥料,而且可以用来从废品和废渣中提取金属。可以说,生物化学方法是各种固体废物处理方法中高效而又经济的方法,但仅适合处理有机质。

目前,国内外利用生物化学方法处理固体废物在以下几个方面比较成熟。

- (1) 有机垃圾的堆肥化,主要用于生活垃圾、农林牧渔业和食品加工工业废物。
- (2) 纤维素糖化,各种废纤维素糖化生产食品和饲料。
- (3) 沼气化,生活垃圾、粪便、有机污泥、农林牧渔和食品加工废物制取沼气。
- (4) 提取金属,从废品和废渣中提取铜、铀、镍、锰、锌、钼以及若干种稀有元素。

1. 堆肥化定义

堆肥化(Composting)是在人工控制的条件下,使来源于生物的有机固体废物进行生物稳定作用的过程。这个定义有三层含义,首先,强调作为堆肥化的原料是来自生物质的固体废物;第二,强调这一过程是在人工控制条件下进行,即是采取有效措施促进生物分解,说明它不同于卫生填埋、废物的自然腐烂与腐化等形式的分解;第三,强调这一过程发生“生物稳定”作用,既讲明了堆肥化的实质是生物化学过程,又讲明了实现无害化的条件。所谓稳定是相对的,是指堆肥产品对环境无害,并不是废物达到完全稳定。固体废物经过堆肥化处理,制得的产品叫作堆肥(Compost)。

2. 堆肥化分类

堆肥化系统有3种分类方法。按需氧程度区分,有好氧堆肥和厌氧堆肥;按温度区分,有中温堆肥和高温堆肥;按技术区分,有露天堆肥和机械密封堆肥。习惯上都按好氧堆肥与厌氧堆肥区分。现代化堆肥工艺,基本上都是好氧堆肥,这是因为好氧堆肥温度高、基质分解比较彻底、堆制周期短、异味小、可以大规模采用机械处理等。厌氧堆肥是利用厌氧微生物完成分解反应,空气与堆肥相隔绝,温度低,工艺比较简单,产品中氮保存量比较多;但堆制周期太长、异味浓烈、产品中掺杂有分解不充分的物质。

3. 堆肥基质

堆肥基质是指固体废物中来源于生物本身的可以作为微生物的营养物的各种有机物质。生活垃圾、粪便、有机污泥、农林业产生的废物中都有这种基质。

(1) 生活垃圾。生活垃圾是指城市居民日常生活、商业活动、机关办公、市政维护过程产生的固体废物,其中包括厨房废物、废纸、废织物、废旧家具、玻璃陶瓷碎物、废旧塑料制品、废交通工具、煤灰渣、脏土及粪便等。生活垃圾中金属、陶瓷、塑料等物质需要经过分选回收,只有剩余有机质才能用于生产堆肥。

(2) 粪便。粪便的C/N比较低,是微生物的良好营养物质,非常适于作堆肥原料。

(3) 污泥。污泥是指来自城市生活污水及某些工业废水处理过程产生的污泥。来自城市污水处理后的污泥含有机物30%~50%,含氮2%~6%,含磷为1%~4%,含钾为0.2%~0.4%,来自食品、制革、造纸、炼油等行业的工业废水处理污泥中也含有大量有机物,都适于用

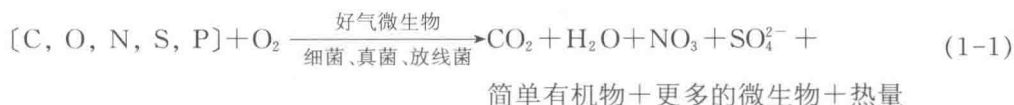
来堆肥。

(4) 农林废物。农林废物是指农、林、牧、渔各业生产及农民日常生活过程产生的植物秸秆、牲畜粪便，都是微生物的良好营养物质，适于进行堆肥。

4. 堆肥化原理

(1) 好氧过程

固体废物好氧堆肥化。有基质的微生物发酵过程，可用下式表示：



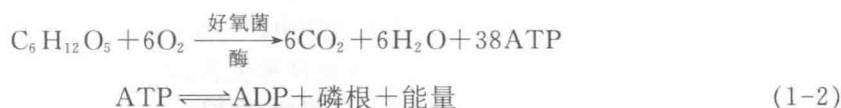
① 中温发酵和高温发酵

好氧性堆肥包括中温和高温两个阶段。中温范围是 15℃~45℃，高温范围是 45℃~80℃。现代化堆肥生产全部过程，以高温时间持续最长，故称为高温堆肥化。在中温范围和高温范围活动的微生物，主要分为嗜温性微生物和嗜热性微生物两类。嗜温性微生物包括细菌和真菌，所利用的基质有糖类和淀粉；嗜热性微生物主要包括细菌、真菌和放线菌，所利用的基质有脂类、蛋白质、纤维素等。各种嗜温性微生物适于在中温发酵阶段活动。各种嗜热性微生物适于在高温发酵阶段活动，现代化堆肥生产的最低温度确定为 55℃，这是因为大多数微生物在 45℃~80℃ 范围内最活跃，最易分解有机物。其中的病原菌和寄生虫大多可被杀死。

② 前期发酵和后期发酵

堆肥化开始，温度慢慢上升，嗜温菌较为活跃，大量增殖，在转换和利用有机物的化学过程中，有一部分变成热能，加上堆肥物料具有良好的保温作用，温度不断上升，可达到 65℃~70℃ 或者更高。到达此温度时，嗜温细菌受到抑制，甚至死亡。除残留的和新形成的可溶性有机物质继续分解转化外，复杂的有机物像半纤维素、纤维素和蛋白质也受到分解。在好氧堆肥化过程中，固体废物中各种有机物分解的难易程度不同，糖分、淀粉最容易被微生物分解利用；脂类物质抗微生物分解的能力不大，能够被分解；木质素抗微生物分解的能力最强。在好氧性堆肥化过程中，由于好气微生物赖以生存的氧气有限，一旦耗尽，好气微生物便濒于死亡，故需采用通风或翻堆以供给氧气。

生态动力学研究表明，好氧分解中发挥主要作用的是菌体硕大、性能活泼的嗜热细菌群。这类菌群分解有机物的作用是在大量氧分子存在下将有机物氧化，其氧化作用一定要在细胞线粒体中进行，并且伴随着大量的能量产生。



这里，ATP 是三磷酸腺苷，是储存细胞能量的物质；ADP 是二磷酸腺苷。

(2) 厌氧过程

固体废物厌氧堆肥化，实际上也是基质的微生物发酵过程。

这个发酵过程共分为两个阶段：

第一阶段主要是产酸菌将大分子有机物降解为小分子有机酸和乙醇、丙酮等物质，并提供部分能量因子 ATP。以乳酸菌分解有机物为例：