

固体废物处理与资源化技术

Treatment and recycling of solid wastes

赵由才 主编

国家环保部公益性科研项目(No.201309025)

国家科技支撑项目(2014BAL02B05-02)



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

国家环保部公益性科研项目(No. 201309025)

国家科技支撑项目(2014BAL02B05-02)

同济大学研究生教材

固体废物处理与资源化技术

赵由才 主编



同济大学出版社

TONGJI UNIVERSITY PRESS

同济书影 音视

固废处理与资源化

内 容 提 要

本书内容主要涵盖生活垃圾的卫生填埋与焚烧发电技术、填埋场稳定化表征和资源化、焚烧炉渣与飞灰表征与处理技术、深度分选及设备优化组合技术、渗滤液处理技术;以及医疗废物处理技术;污泥脱水与卫生填埋技术;含锌危险废物碱浸湿法冶金清洁工艺;含锌危险废物碱浸湿法冶金清洁工艺等。本书由国家环保部公益性科研项目(No. 201309025)和国家科技支撑项目(2014BAL02B05-02)提供资助。

本书供相关领域的研究生作教材使用,同时也可供环境领域固废研发、设计人员和教学人员参考,并作资料数据库使用。

图书在版编目(CIP)数据

固体废物处理与资源化技术 / 赵由才主编. -- 上海: 同济大学出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5608-6005-3

I. ①固… II. ①赵… III. ①固体废物处理—研究 ②固体废物利用—研究 IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 216580 号

固体废物处理与资源化技术

赵由才 主编

责任编辑 张智中 责任校对 徐春莲 封面设计 吴丙峰

出版发行 同济大学出版社 www.tongjiipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
印 刷 同济大学印刷厂
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 23.5
字 数 587 000
版 次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6005-3

定 价 68.00 元

前 言

固体废物是人类各种社会活动中,因无用或不需要而被弃置的固态物料,是人类利用物质资源满足自身生存和发展需要的必然伴生产物。固体废物的收集、处理及其相关产业的发展,是当代社会现代化的重要组成部分,也直接关系到城镇发展进程和居民生活质量。随着城镇发展规模的扩大与现代化程度的提高,生活垃圾的数量日益增加,处理难度也越来越大。目前,我国绝大部分地区仍存在诸多有待解决的固体废物及其衍生污染治理问题,因此,梳理固体废物处理处置与资源化利用技术最新进展,对于削减固体废物污染、改善环境质量具有重要的理论与实际应用价值。

固体废物有诸多的产生源,不同来源的固体废物有不同的组成特征。因此,应采用不同的处理技术和管理方法,这就使得对其分类具有重要的技术和管理意义。固体废物分类方法并不唯一,可从来源、性质与危害、处理处置方法等不同角度进行分类。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;按危害特性,可分为有毒有害固体废物和无毒无害固体废物两类,有毒有害废物又称为危险废物,包括医院垃圾,废树脂,药渣,含重金属污泥,酸和碱废物等,无毒无害废物指粉煤灰,建筑垃圾等;含放射性的固体废物一般单独列为一类,有专门的处理处置方法和措施。城镇废弃物和有毒有害废物是与环境保护密切相关的固体废物,这两类固体废物的任意排放会严重污染和破坏环境,其处理处置一直受到各级政府、科技界、产业界 and 环境保护企业界的重视。

城镇废弃物包括生产、生活过程中产生的生活垃圾、建筑废物、电子垃圾、污泥、粮油食品加工剩余物、城镇农林废物及工业废物等。随着我国经济的高速发展、城镇化水平的提升及世界制造大国地位的确立,近10年来,我国城镇废弃物产生量急剧膨胀,以每年8%~10%的速度快速增加,且面临垃圾输入性增长的挑战,年总量达到近20亿吨,已超过美国成为世界第一。大量产生的城镇固体废物与周边环境形成多相复合型交叉污染,控制极为复杂,进而导致围绕“废弃物管理和处置利用”产生的社会纷争不断出现,涉及土地占用、恶臭扩散、健康风险等社会生活多个方面,引发了政府、媒体及社会各界的广泛关注。

城镇废弃物在具有严重环境污染危害的同时,也蕴藏着巨大的资源和能量,通过科学合理的资源化利用,可消减污染物35%、减碳10%、补充资源供应15%、能源供应5%~7%,资源节约与节能减排效益巨大。废物资源化利用能催生不同的产业链,横跨能源、环境、生物、化工、材料、制造业等多领域,产业规模大、内涵跨度广、产业链条长、社会影响深、能显著增加就业,有助于刺激经济结构调整。因而,有效、高值与安全开发利用城镇固体废物这一重要资源具有重大的环境、社会、经济、资源及能源战略意义。

目前,我国固体废物污染控制与资源化利用的科技发展,主要面临四个重大挑战:一是废物循环利用过程污染物形态变化特征、迁移转化规律、二次合成机理不够明确,污染物多界面过程和复合介质中的传输机制、环境因子间的耦合作用机理、人体健康危害方式与评价方法等研究不足,支撑核心技术的物质转化机理和工艺过程认识不清;二是缺乏创新性技术,处理装备制造能力受制于发达国家,成套技术装备大多依靠进口,但许多进口装备不适用于我国固体废物的特点,先进技术的工程化应用面临巨大挑战;三是废物循环利用过程资源转化率不高(如我国废旧电器电子材料综合利用率不到40%,而发达国家大多超过75%),资源化产品附加值低,利用方式单一,二次污染和跨介质污染转移问题日益突出;四是我国开始进入新型城镇化加速、产业集聚增强、产城融合凸显的全新发展阶段,跨产业间废物/副产品的代谢利用、循环经济产业链条以及区域系统集成示范亟需构建,然而我国废物循环利用协同管理、技术集成示范和产业化应用与我国经济发展的科技需求存在较大差距。随着科学技术的不断发展进步,固体废物处理处置领域涌现出了大量创新性理论与技术研发成果,对于最新研发成果的总结与应用是应对固体废物处理技术问题的必要方式,对于提升我国固体废弃物处理处置技术现状具有重要价值。

本书由赵由才主持编写工作,周家珍、周涛协助统稿。本书主要内容来源于赵由才指导的硕士和博士论文。参加本书编写的人员包括曹学新、戴伟华、柴晓利、周家珍、周涛、陈善平、武博然(第一章),赵由才、杨玉江、吴军、楼紫阳、周家珍、周涛、赵敏(第二章),张瑞娜、宋立杰、张海英、周涛、王琦、赵由才、张琚婷(第三章),李兵、阳小霜、赵由才、周家珍、薛一帆(第四章),赵由才、吴军、浦燕新、朱卫兵、何晟、黄仁华、周海燕、张美兰、陈浩泉、周家珍、周涛、张杰、黄海宁(第五章),史昕龙、晏振辉、蒲敏、赵由才、顾敏燕(第六章),甄广印、赵由才、周海燕、郭广寨、张美兰、周家珍、周涛、王琪、卜凡(第七章),赵由才、李强、刘清、张承龙、蒋家超、张星冉(第八章),黄晟、高小峰、谢田、孙艳秋、张骏、简德武、赵由才、徐晋(第九章)。

本书得到2014年同济大学研究生教育改革与创新项目建设、国家环保部公益性科研项目(No. 201309025)和国家科技支撑项目(2014BAL02B05-02)的资助。

赵由才

2015年8月

目 录

前言

第一章 生活垃圾卫生填埋与焚烧发电技术	1
第一节 生活垃圾卫生填埋关键技术	1
第二节 固体废物焚烧系统	13
习题	32
第二章 生活垃圾填埋场稳定化表征和资源化	33
第一节 填埋垃圾稳定化进程表征	33
第二节 填埋垃圾腐殖质结构	34
第三节 填埋垃圾的稳定化过程	41
第四节 矿化垃圾开采筛分方案 and 环境影响	56
第五节 填埋垃圾组成和资源化方案	61
第六节 填埋场降解残留物基本性质变化过程	71
第七节 历年垃圾基本性质变化过程研究	81
习题	93
第三章 生活垃圾焚烧炉渣与飞灰表征与处理技术	94
第一节 焚烧炉渣物理化学性质	94
第二节 生活垃圾焚烧发电厂飞灰固化稳定化与安全填埋技术	131
习题	166
第四章 生活垃圾深度分选及设备优化组合技术	167
第一节 生活垃圾中可资源化物质评价	167
第二节 生活垃圾滚筒筛分选特性	170
第三节 填埋场矿化垃圾的滚筒筛分选特性	179
第四节 生活垃圾卧式气流分选机分选特性	182
习题	191
第五章 生活垃圾渗滤液处理技术	192
第一节 矿化垃圾反应床处理渗滤液工艺单元详述	192
第二节 矿化垃圾反应床处理渗滤液技术集成	198
第三节 矿化垃圾反应床渗流变化模型	212

第四节	矿化垃圾处理渗滤液的运行管理	222
第五节	生活垃圾填埋场调节池调节与厌氧发酵降解技术	223
第六节	生活垃圾渗滤液膜处理技术	226
	习题	255
第六章	医疗废物处理技术	256
第一节	医疗废物的定义、种类及发生量	256
第二节	医疗废物的收集与处理	258
第三节	国内医疗废物处置及其存在问题	270
第四节	医疗废物的管理	272
第五节	我国医疗废物的处置管理模式构想	274
	习题	276
第七章	污泥脱水与卫生填埋技术	277
第一节	十二烷基苯磺酸钠-氢氧化钠耦合调理强化污泥脱水	277
第二节	(Fe(II)/S ₂ O ₈ ²⁻)氧化脱水技术新体系的构建	279
第三节	基于铝基胶凝固化驱水剂的污泥固化/稳定化技术	288
第四节	铝酸钙-波特兰水泥复合型污泥固化驱水技术	291
第五节	镁基固化调理及压滤深度脱水技术	298
第六节	污泥卫生填埋场设计优化与工程示范	303
第七节	污泥雨天卫生填埋技术	310
	习题	316
第八章	含锌危险废物碱浸湿法冶金清洁工艺	317
第一节	锌的碱浸工艺	317
第二节	机械活化强化转化浸出	324
第三节	碱浸-电解法生产锌粉技术工业化应用	327
第四节	碱浸-电解生产锌粉新工艺的生命周期评价	344
	习题	350
第九章	建筑废物污染控制技术	351
第一节	受重金属污染建筑废物基本修复技术	351
第二节	含锌铅工业建筑废物的锌铅富集技术	353
第三节	受重金属污染建筑废物的氯脱除工艺	357
第四节	建筑废物中石油污染洁净技术	360
第五节	受污染建筑废物的管理建议	362
	习题	366
	参考文献	367

第一章

生活垃圾卫生填埋与焚烧发电技术

我国城市生活垃圾清运量约为 1.58 亿吨/年。1984 年前,绝大部分生活垃圾还田利用,之后,随着生活垃圾组分的日益复杂化,亟需发展符合“两高”(“高含水率、高混杂性”)特性的处置新方式,开发符合国情的生活垃圾产业化技术,成为解决垃圾量急剧增长、实现生活垃圾处理可持续发展的重要民生问题。近 20 年来,通过一系列重大技术难题的攻关,进行了我国生活垃圾处理处置产业化道路的探索和实践,实现了从生活垃圾随意丢弃到源头减量与资源回收利用、从简易堆填到安全可控卫生填埋和填埋气发电、从露天堆烧到大型炉排清洁焚烧发电的重大变革,并分别于 1991 年和 2002 年在上海建设和运行了当时标准最高的全国第一个填埋场和国内规模最大的生活垃圾现代化焚烧发电厂,并持续性地坚持研发与应用,使卫生填埋和焚烧发电逐步成为我国生活垃圾大规模、快速消纳处置的两大主流技术。据此提出和发展的生活垃圾产业化技术路线,有力保证了生活垃圾处置的无害化要求,并促进了资源化与源化的协同发展。

第一节 生活垃圾卫生填埋关键技术

一、生活垃圾卫生填埋场底防渗系统

1. 防渗系统概念及结构

填埋场场底防渗系统是垃圾填埋场最重要的组成部分,通过在填埋场底部和周边铺设低渗透性材料建立衬层系统以阻隔填埋气体和渗滤液进入周围的土壤和水体产生污染,并防止地下水 and 地表水进入填埋场,有效控制渗滤液产生量。

填埋场主要是通过 在填埋场的底部和周边建立衬层系统来达到密封防渗的目的。图 1-1 是我国生活垃圾填埋场防渗系统推荐结构,典型的填埋场防渗系统通常从上至下可依次包括过滤层、排水层(包括渗滤液收排系统)、保护层和防渗层等。

防渗层的功能是通过铺设渗透性低的材料来阻隔渗滤液于填埋场中,防止其迁移到填埋场之外的环境中,同时也可以防止外部的地表水和地下水进入填埋场中,其主要材料有天然黏土矿物如改性黏土、膨润土,人工合成材料如柔性膜,天然与有机复合材料如聚合物水泥混凝土(PCC)等;保护层的功能是对防渗层提供合适的保护,防止防渗层受到外界影响而被破坏,如石料或垃圾对其上表面的刺穿,应力集中造成膜破损,黏土等矿物质受侵

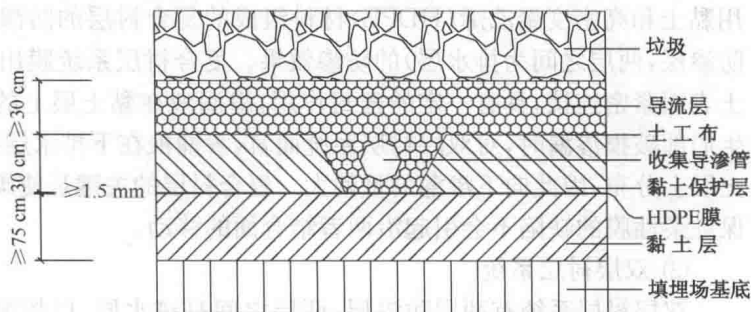


图 1-1 我国生活垃圾填埋场防渗系统推荐结构

蚀等;排水层的作用是及时将被阻隔的渗滤液排出,减轻对防渗层的压力,减少渗滤液的外渗可能性;过滤层的作用是保护排水层,过滤掉渗滤液中的悬浮物和其他固态、半固态物质,否则这些物质在排水层中积聚,造成排水系统堵塞,使排水系统效率降低或完全失效。

为保证防渗系统的质量,为避免填埋场库区地基在垃圾堆积后产生不均匀沉降,保护复合防渗层中的防渗膜,应根据场底的工程地质和水文地质等条件选择合适的防渗材料,同时在铺设场底防渗系统之前应进行场地处理,包括土地平整以及石块等坚硬物体的清除等。为防止水土流失和避免二次清基、平整,填埋场的场地平基(主要是山坡开挖与平整)不宜一次性完成,而是应与膜的分期铺设同步,采用分层实施的方式,原因是在南方地区,裸露的土层会自然长出杂草,且容易受山洪水的冲刷,造成水土流失。

2. 防渗系统种类及材料

(1) 防渗系统种类

防渗系统通常采用人工合成有机材料(柔性膜)与黏土结合作防渗衬层的防渗方法,根据填埋场渗滤液收集系统、防渗层、保护层、过滤层的不同组合,一般可分为单层衬层防渗系统、单复合衬层防渗系统、双层衬层防渗系统和双复合衬层防渗系统。

① 单层衬里防渗结构

单层衬里防渗结构适用于地下水比较贫乏地区的填埋场底部防渗,只要地下水流入速率不致造成渗滤液量过多或地下水的上升压力不致破坏衬垫系统,则可采用此系统。其主要结构层(从下至上)为:基础层(基层)、地下水收集导排层(当库区有浅层地下水,泉水出露时应设置)、膜下保护层、防渗层、膜上保护层、渗滤液收集导排层、土工织物层、垃圾层。单层衬里防渗结构见图 1-2。

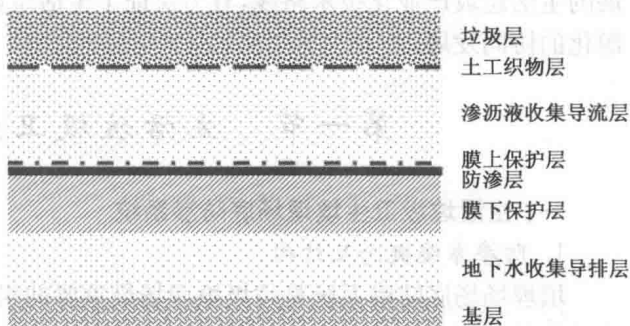


图 1-2 生活垃圾卫生填埋场单层衬里防渗结构

② 单复合衬层防渗系统

单复合衬层防渗系统是采用复合防渗层,即由两种防渗材料相贴而形成的防渗层。两种防渗材料相互紧密地排列,提供综合效力。比较典型的复合结构是上层为柔性膜,其下为渗透性低的黏土矿物层。与单层衬垫系统相似,复合防渗层的上方为渗滤液收集系统,下方为地下水收集系统。

复合衬层系统综合了物理、水力特点不同的两种材料的优点,因此具有很好的防渗效果。用黏土和高密度聚乙烯(HDPE)材料组成的复合衬层的防渗效果优于双层衬层(有上下两层防渗层,两层之间为排水层)的防渗效果。复合衬层系统膜出现局部破损渗漏时,由于膜与黏土表面紧密连接,具有一定的密封作用,渗漏液在黏土层上的分布面积很小。当 HDPE 膜发生局部破损渗漏时,对双层衬层系统而言,渗漏液在下排水层中的流动可使其在较大面积的黏土层上分布,因此向下渗漏的量就大。复合衬层的关键是使柔性膜与黏土矿物层紧密接触,以保证柔性膜的缺陷不会引起沿两者结合面的移动。

③ 双层衬层系统

双层衬层系统有两层防渗层,两层之间是排水层,以控制和收集防渗层之间的液体或气体。衬层上方为渗滤液收集系统,下方可有地下水收集系统。透过上部防渗层的渗滤液或者

气体受到下部防渗层的阻挡而在中间的排水层中得到控制和收集,在这一点上它优于单层衬垫系统。主要结构层(从下至上)为:基层、地下水收集导排层(当库区有浅层地下水,泉水出露时应设置)、膜下保护层、防渗层、渗滤液导流检测层、膜上保护层、防渗层、膜上保护层、渗滤液收集导排层、土工织物层、垃圾层。双层衬里防渗结构见图 1-3。

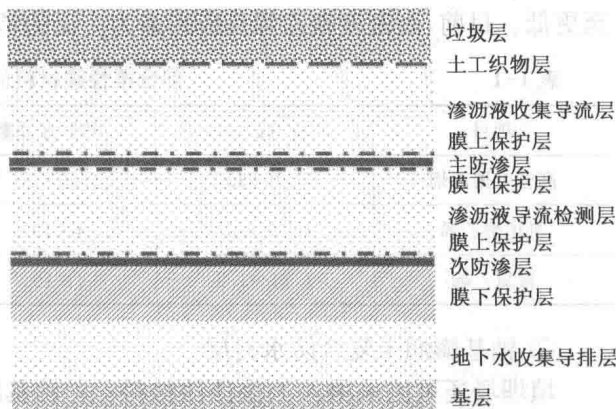


图 1-3 生活垃圾卫生填埋场双层衬里防渗结构

双层衬里防渗系统主要在下列条件下使用:a. 基础天然土层很差(渗透系数大于 10^{-5} cm/s)、地下水位又较高;b. 土方工程费用很高,而采用 HDPE 膜费用低于土方工程费用;c. 建设混合型填埋场,即生活垃圾与危险废物共同处置的填埋场。

④ 双复合衬层防渗系统

双复合衬层防渗系统原理与双层衬里防渗系统类似,即在两层防渗层之间设排水层,用于控制和收集从填埋场渗出的液体;不同之处在于上部防渗层采用的是复合防渗层。防渗层之上为渗滤液收集系统,下方为地下水收集系统。其主要结构层(从下至上)为:基层、地下水收集导排层(当库区有浅层地下水,泉水出露时应设置)、膜下保护层、防渗层、膜上保护层、渗滤液收集导排层、土工织物层、垃圾层。复合衬里防渗结构见图 1-4。双复合衬层防渗系统综合了单复合衬层防渗系统和双层衬里防渗系统的优点,具有抗损坏能力强、坚固性好、防渗效果好等优点,但其造价比较高。

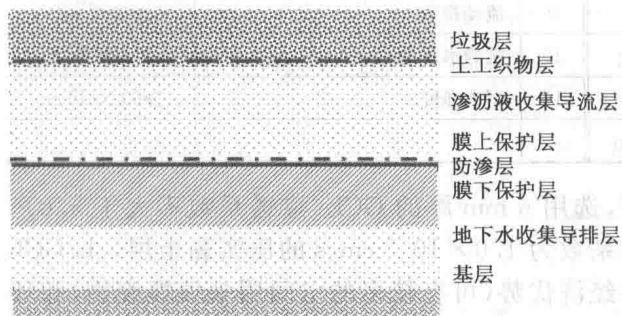


图 1-4 生活垃圾卫生填埋场复合衬里防渗结构

在美国,根据新环保法的要求,具有主、次两层渗滤液收集系统的双复合衬层防渗系统已在城市固体废物填埋场得到广泛应用。双复合衬层底层为厚度大于 3 m 的天然黏土衬层或 0.9 m 厚的第二层压实黏土衬层,然后依次向上为第二层合成材料衬层、二次渗滤液收集系统、0.9 m 厚的第一层压实黏土衬层、第一层合成材料衬层、首次渗滤液收集系统,顶部是 0.6 m 厚的砂砾铺盖保护层。渗滤液收集系统由一层土工网和土工织物组成。合成材料衬层的厚度应大于 1.5 mm,底层和压实黏土衬层的渗透系数应小于 10^{-7} cm/s。

(2) 防渗系统人工合成材料

① 防渗系统有机膜材料

填埋场底层防渗系统有机膜材料主要是塑料卷材、橡胶、沥青涂层等,这类人工合成有机材料通常称为柔性膜。常用的柔性膜主要有高密度聚乙烯(HDPE)、低密度聚乙烯(LDPE)、聚氯乙烯(PVC)、氯化聚乙烯(CPE)、氯磺聚乙烯(CSPE)、塑化聚烯烃(ELPO)、乙烯-丙烯橡胶(EPDM)、氯丁橡胶(CBR)、丁烯橡胶(PBR)、热塑性合成橡胶、氯醇橡胶。柔性膜防渗材料通常有极低的渗透性,其渗透系数均可达 10^{-11} cm/s,高密度聚乙烯的渗透系数达到 10^{-12} cm/s,甚

至更低。目前,高密度聚乙烯是应用最为广泛的填埋场防渗柔性膜材料(表 1-1)。

表 1-1 部分柔性膜材料的物理特性

项目	密度/(g/cm ³)	热膨胀系数	抗拉强度/MPa	抗穿刺强度/Pa
高密度聚乙烯	>0.935	1.25×10^{-5}	33.08	245
氯化聚乙烯	1.3~1.37	4×10^{-5}	12.41	98
聚氯乙烯	1.24~1.3	4×10^{-5}	15.16	1932

② 钠基膨润土复合防水衬层

填埋场还可以采用人工改良性材料——钠基膨润土复合防渗衬层(GCL),GCL是一种施工简单、效果好的人工改良性材料。钠基膨润土复合防渗衬层是将钠基膨润土夹在两层土工织物中间,并采用针织方法将其连接为一个整体。生活垃圾填埋场一般用GCL作为防渗土工膜(HDPE膜)的保护层,取代压实黏土保护层。国外也用GCL作为封场防渗层。膨润土复合防水垫的技术指标应符合表1-2的规定,还应符合国家相关标准的规定。

表 1-2 GCL 技术指标

序号	项 目	指 标	序号	项 目	指 标
1	上层土工布重量	220 g/m ²	7	厚度	5 mm/6 mm
2	单位面积钠型膨润混合物重量	≥4 500 g/m ²	8	渗透系数	≤ 5×10^{-11} m/s
3	下层土工布重量	110 g/m ²	9	流动指数	5×10^{-9} m ³ /s
4	体积膨胀度	≥24 ml/2 g	10	抗静水压力	0.6 MPa/h
5	单位面积总质量	≥4 800 g/m ²	11	剥离强度	≥60 N/10 cm
6	最大拉伸强度	800 N/10 cm			

GCL具有以下优点:a.根据计算分析,选用6mm厚的GCL(渗透系数不大于 5.0×10^{-9} cm/s)防渗效果优于0.55m厚、渗透系数为 1.0×10^{-6} cm/s的压实黏土层。b.GCL衬垫较薄,可以减少填埋库容的消耗,具有经济优势(可有较多的空间用来填埋废物)和环境优势(减少堆置废物的土地消耗)。对场地平整边坡要求没有土工膜(HDPE膜)高。c.任何可能的渗漏点因钠基膨润土与非织造土工织物纤维充分缠绕,止水性强,耐冲刷,不会被地下水流动而流失,有效性和可靠性增强。d.施工简单方便,无须特别的安装设备,施工工期短,GCL衬垫的质量保证步骤比压实黏土衬垫要简单得多。e.GCL是在工厂制造的,其完整性和均匀性能得到保证,并可以承受较大差异沉降,其承受能力比压实黏土衬垫大很多。

GCL具有以下缺点:a.与《生活垃圾填埋污染控制标准》中防渗膜下的防渗保护层的要求不符。b.GCL采用重叠撒膨润土搭接,如不均匀沉降可能会造成GCL拉裂。c.GCL在国内外应用于填埋场还没有成熟的经验,国际上仅作为特殊条件下膜的防渗保护层使用。

3. 防渗系统设计施工要点

填埋场人工防渗系统中最常用的防渗材料是HDPE膜。在填埋场衬层设计中,HDPE膜通常用于单复合衬层防渗系统、双层衬层防渗系统和双复合衬层防渗系统的防渗层设计,除特殊情况外,HDPE膜一般不单独使用,原因是HDPE膜的使用需要较好的基础铺垫,才能保证

其稳定、安全而可靠地工作。

(1) HDPE 膜性能要求

对 HDPE 膜的性能要求包括原材料性能和成品膜性能两个方面,主要指标包括密度、熔流指数、炭黑含量、HDPE 原料、膜厚度、抗穿能力、抗拉强度和渗透系数等。

a. 密度:密度反映材料的分子结构和结晶度,与材料的物理性能和强度、变形等有关。用于填埋场的 HDPE 膜的密度为 $0.932\sim 0.940\text{ g/cm}^3$,最佳值为 0.95 g/cm^3 。我国自行生产的 HDPE 膜的密度可达到这一要求。

b. 熔流指数:熔流指数反应材料的流变特性。熔流指数低,材料脆,但刚性增强;反之,则材料弹性增强,刚性减弱。熔流指数的最佳值为 0.22 g/10 min ,一般熔流指数在 $0.05\sim 0.3\text{ g/10 min}$ 即可满足要求。

c. 炭黑含量:炭黑含量反映了材料抗紫外线辐射的能力。一般炭黑添加量为 $2\%\sim 3\%$ 。不含炭黑的 HDPE 膜不能用在露天填埋场。

d. 原料要求:聚乙烯原材料必须是一级纯品,不含杂质,不能用废聚乙烯再生产品。

e. 厚度:选择膜厚度应主要考虑三个方面的因素:第一,膜的抗紫外线辐射能力。紫外线辐射对膜的强度有很大影响,如果填埋场衬层从施工至运行全过程膜不暴露,则可选择较薄的膜,否则应选择厚度较大的膜。美国环保局提出不暴露 HDPE 膜的最小厚度为 0.75 mm ;如果暴露时间大于 30 天,则最小膜厚度定为 1.0 mm 。第二,膜的抗穿透能力。第三,抗不均匀沉降能力。膜厚对后两者有利,但是膜厚度增加将使膜的造价成比例增加,因此应综合考虑。根据我国的实际情况,推荐的膜厚度为 $0.5\sim 2.5\text{ mm}$ 。

f. 抗穿能力:HDPE 膜的抗穿能力与其厚度有关。HDPE 膜的抗穿能力比较强,但仍然不能防止一些针状物或者由于生物作用对膜的穿透。由于填埋场施工条件比较复杂,存在膜穿透的条件,因此在施工中要特别注意。

g. 抗拉强度:不同膜厚度对膜的抗拉强度有不同要求。膜厚 1.0 mm 时其抗拉强度不得小于 20 MPa 。膜的抗拉强度是膜设计应用的基本条件之一。在填埋场 HDPE 膜有时处于受拉状态,其主要原因有:第一,边坡铺设和长时间运行过程中,上面的膜与下面的垫层可能产生滑动,当拉力超过设计安全系数时,膜可能破坏;第二,底部局部不均匀沉降将对膜产生拉力。试验结果显示,HDPE 膜的单向抗拉强度较大,可以在发生较大变形时不产生破裂,但其抗双轴向拉力的能力很低,因此要尽量避免产生双轴拉力的可能性。

h. 渗透系数:HDPE 膜的渗透系数小于 10^{-12} cm/s 。质量合格的 HDPE 膜的抗渗能力很强,渗透系数比优质黏土低 $4\sim 5$ 个数量级。

(2) HDPE 防渗层铺设要求

a. HDPE 防渗膜的铺设必须平坦、无皱折。

b. HDPE 防渗膜的搭接应尽量使其焊缝减少。

c. 在斜坡上铺设 HDPE 防渗膜时,其接缝方向应平行斜坡面,不允许出现斜坡上有水平方向接缝,以避免斜坡上由于滑动力可能在焊缝处出现应力集中。

d. 基础底部的 HDPE 防渗膜应尽量避免埋设垂直穿孔的管道或其他构筑物。

e. 边坡必须锚固,推荐采用矩型槽覆土锚固法。

f. 边坡与底面交界处不能设焊缝,焊缝不在跨过交界处之内。

(3) HDPE 复合衬层下垫层要求

HDPE 防渗膜不能铺设在一般的天然地基上,必须铺设在平整、稳定的支撑层上,即在

HDPE 膜之下必须提供一个科学的下垫层,一般是以天然防渗材料作为下垫层,对下垫层的具体要求如下:

a. 基础最低层距地下水位的距离:填埋场基底距地下水高水位的距离推荐值列于表 1-3。我国东部和东南沿海的发达地区水网密布,地下水位较高,所以在这些地区选址,地下水位可允许距填埋场基础 2 m 以上。

表 1-3 基础层底标高距地下水水位距离推荐值

基础性质	推荐值
黏土(渗透系数 $K \leq 10^{-7}$ cm/s)	>2 m
黏土(10^{-7} cm/s < 渗透系数, $K \leq 10^{-6}$ cm/s)	>2.5 m
黏土(渗透系数 $K < 10^{-5}$ cm/s)	>3 m

b. 下垫黏土层厚度:下垫黏土层的厚度直接影响工程土方量,从而影响工程造价,因此从工程投资角度来说,在选址时,对地下水要求严格一点,而适当放宽 HDPE 膜下垫层人工防渗层厚度的要求,在保证同样安全度的情况下,工程费用可降低。下垫黏土层的厚度一般为 0.6~1.0 m。

c. 基础承重要求:为使基础能够均匀承重,黏土下垫层的压实度不得低于 90%。

d. 对下垫层的特殊要求:下垫层不能含有直径大于 0.5 cm 的颗粒物,黏土层不能出现脱水、裂开;为杜绝下垫层植物生长,需均匀施放化学除莠剂;如有预埋的管、渠、孔洞等,要严格按黏土衬层要求施工,并使 HDPE 与下垫层衔接紧密。

(4) 单 HDPE 复合衬层的结构设计

a. 边坡压实黏土层厚度:边坡的防渗要比底层防渗更为困难,原因是边坡的施工压实难度更大;边坡下垫层与其上的 HDPE 膜之间易产生滑动,使下层或上层膜受到破坏,因此边坡土层厚度通常大于底层的厚度,一般大 10%。

b. 底层压实黏土层厚度:一般取 0.6~1.0 m。

c. 排水层厚度:与排水层材料有关,如果使用砂或者砾石,其厚度通常大于 30 cm。

d. 排水层渗透系数:为了提高排水层的排水效率,要提高排水材料的渗透率,降低毛细管张力。推荐使用清洁砾石,其透水系数大,而毛细上升高度较小。

e. 边坡坡度:边坡坡度的设计应考虑地形条件、土层条件、填埋场容量、施工难易程度、工程造价等因素。边坡越陡,工程量越小,但施工越难,而且下垫层与上层 HDPE 膜的摩擦力越小,容易产生上、下层之间的滑动破损。边坡坡度推荐值为 1:3。

f. 底部坡度:底部坡度的设计要满足集水排水需要,同时也要考虑场地条件和施工难易条件。例如,当填埋单元较大时,底部坡度大将造成两端高差增大,开挖深度增加,低点距地下水面距离减小,堆填废物易滑动等问题;坡度太小又不利于渗滤液的集排。一般 2% 的排水坡度就可以满足集水要求,在特殊情况下,也可以采用 3%~4% 的坡度。

(5) HDPE 双衬层构造设计技术要求

a. 双衬层可由单层排水系统和双层排水系统构成,一般情况下可只设一层排水系统。

b. 双排水系统的次级排水系统一般只在防渗层渗漏监测时使用。

c. 双衬层基本设计参数见表 1-4。

表 1-4 HDPE 双衬层复合防渗系统设计参数

名称	厚度及边坡技术要求	土壤性质技术要求
人工黏土层边坡	100 cm	$K \leq 10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/s
人工黏土层基础	≤ 100 cm	$K \leq 10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/s
排水层	30 cm	
过滤层	15 cm	
上层 HDPE 膜	0.6~2.0 mm	
基底 HDPE 膜	1.0~1.5 mm	
边坡	1:3	
底坡	2%~4%	

(6) HDPE 膜的锚固设计

HDPE 膜应与下垫层构成一个整体,其外缘要拉出,在护道处加以锚固,防止膜被拉出和撕裂破坏。膜锚固的基础方法是在护道上开挖锚固槽,将膜置于槽中,然后用土填槽,并盖上覆土。通常的锚固方法有水平覆土锚固、“V”型槽覆土锚固、矩形覆土锚固和混凝土锚固等。水平覆土锚固法是将膜拉到护道上,然后用土覆盖,这种方法通常不够牢固;“V”型槽覆土锚固法是先从护道一侧开挖一“V”字型的槽,然后将膜拉过护道并铺入槽中,填土覆盖,这种方法对开挖空间要求略大;矩形覆土锚固法是先从护道一侧开挖一矩形的槽,然后将膜拉过护道并铺入槽中,填土覆盖;混凝土锚固法施工比较麻烦,目前使用较少;矩形槽锚固法安全性更好,应用较多,为了保证安全,应通过膜的最大允许拉力计算,确定槽深、槽宽、水平覆盖距离及覆土厚度等参数。

(7) 无纺土工织物(土工布)性能要求

无纺土工织物(土工布)可分聚酯长丝纺粘针刺非织造土工布和聚酯短丝纺粘针刺非织造土工布两种。聚酯长丝纺粘针刺非织造土工布的技术指标应符合 GB/T17639 中的有关规定,见表 1-5。

表 1-5 聚酯长丝纺粘针刺非织造土工布技术指标

序号	项目	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	800	备注
1	单位面积质量偏差	-6%	-6%	-6%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	-4%	-4%	-4%	
2	厚度,mm \geq	0.8	1.2	1.6	1.9	2.2	2.5	2.8	3.1	3.4	4.2	5.5	
3	幅宽偏差	-0.5%											
4	断裂强力,kN/m \geq	4.5	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.5	22.5	25.0	30.0	40.0	纵横向
5	断裂伸长	40%~80%											
6	CBR 顶破强力,kN \geq	0.8	1.4	1.8	2.2	2.6	3.0	3.5	4.0	4.7	5.5	7.0	
7	等效孔径 $O_{90}(O_{95})/mm$	0.07~0.2											
8	垂直渗透系数/(cm/s)	$K \times (10^{-1} \sim 10^{-3})$, $K=1.0 \sim 9.9$											
9	撕破强力,kN \geq	0.14	0.21	0.28	0.35	0.42	0.49	0.56	0.63	0.70	0.82	1.10	纵横向

(8) 穿孔和竖井的防渗设计

填埋场 HDPE 膜防渗系统内常有竖管、横管或斜管穿出或穿入,此时穿管与 HDPE 膜的接口必须防止渗漏。穿管与边界连接有刚性防渗连接与弹性防渗连接两种,在设计中应注意:

a. 穿管与废物接触时,可在管外用 HDPE 膜包裹,便于与防渗层衔接处的密封连接,同时也减少管边界与废物的摩擦,减小穿管的受力。b. 穿管与边界的刚性连接采用混凝土锚固块作连接基座,但混凝土锚固应建在连接管后,穿管和 HDPE 膜固定在混凝土中。c. 穿管与防渗膜边界的弹性连接必须注意管子不能直接焊在 HDPE 防渗膜上,以防膜的损坏。

为了防止渗漏,填埋场中的有些竖井需要穿过排水层座于 HDPE 防渗膜之上,如渗滤液提升竖井、检修竖井等。由于竖井直接座落在 HDPE 防渗膜之上容易造成膜的破坏,因此在井底和 HDPE 膜之间必须设置衬垫层。通常在竖井的底部专门设计一个被 HDPE 膜包裹的钢板衬垫,混凝土支座位于钢板衬垫上,其目的是既保护 HDPE 防渗膜,又增强了基础的弹性,使接触压力变得平缓,基础不易损坏。

(9) 复合排水网设计

复合排水网的技术指标应符合表 1-6 的规定,还应符合国家相关标准的规定。

表 1-6 复合排水网技术指标

序号	项 目	单 位	DLF800/2	DLF1000/2	DLF1300/2	DLF1600/2
1	抗拉强度	kN/m	14	18	26	28
2	抗压强度	kPa	>1 500	>2 000	>2 200	>2 500
3	延伸率		60%	60%	60%	60%
4	导水率	1/(m/s ⁻¹)	0.7	0.75	0.8	0.9
5	厚 度	Mm	5.5	6.3	7.5	8
6	单位面积质量	g/m ²	1 200	1 400	1 700	2 000
7	幅 度	M	1.25, 2	1.25, 2	1.25, 2	1.25, 2
8	卷 长	M	30, 50	30, 50	30, 50	30, 50

注:① 卷长可根据要求加工;

② 以上参数为两面土工布复合后数据(两面土工布均为 200 g/m²)。

4. 水平防渗与垂直防渗的联合应用

在地下水位较高的地区,水平防渗材料的铺设会有很大的困难。若将水平防渗系统和垂直防渗系统两种防渗方式联合起来,将填埋场内形成两个独立水文地质单元:一个是填埋体内渗滤液形成的,一个是填埋体地下水形成的,从而彻底把渗滤液与地下水隔绝开来。上海老港填埋场作为我国最具代表性的特大规模滩涂型填埋场,其四期工程即采用水平防渗和垂直防渗相结合的防渗方式,在填埋场内构筑了“人工的”独立水文地质单元,成功解决特大型库区的地下水和渗沥水的收集与导排;同时通过合理的基层构建与沉降观测信息反馈控制技术,全方位确保防渗衬垫系统的结构安全。

老港四期工程的方案设计中,采用 1.5 mm 的 HDPE 土工膜防渗系统,取代低渗透性的土层。该土工膜因其本质的不渗透性,会比被取代的土层提供更有效的防渗屏障。同时,主土工防渗膜与次土工防渗膜间,会有一层的由 5 mm 厚土工复合材料组成的渗滤液收集系统,它们一起组成一个整体。

填埋场方案设计的基底防渗系统由以下部分组成,从上而下为:

- (1) 轻质有纺土工布;
- (2) 600 mm 碎石渗滤液收集层;
- (3) 重质无纺土工布衬垫;
- (4) 1.5 mm HDPE 土工防渗膜;

- (5) 5 mm 厚土工复合材料组成的次渗滤液收集层；
- (6) 1.5 mm HDPE 土工防渗膜；
- (7) 无纺土工布过滤层；
- (8) 150 mm 碎石地下水管理層；
- (9) 有纺土工布。

在老港填埋场现场地质条件和目前国内施工技术条件下，置换法水泥—膨润土地下连续墙的防渗效果和工艺性能较好。

二、缺陷地基土上高维卫生填埋技术

高维卫生填埋技术是在上海老港填埋场四期工程设计时提出的，故本节主要以老港填埋场四期工程为例来阐明高维卫生填埋的含义及技术。老港填埋场的前三期工程垃圾填埋高度均为 4 m，这是基于老港填埋场所在地的地质条件和工程地质条件及当时的经济条件决定的。由于上海土地面积紧缺，在经济条件许可的情况下，若能增大垃圾填埋体的高度，将大大增加单位面积填埋场的填埋容量，从而节省大量的土地，这将给经济快速发展的上海带来巨大效益，但是老港四期工程的地质条件存在着缺陷——软弱土层（淤泥质黏土），这极大地限制了填埋场的填埋高度。若通过一定的人为措施，对天然条件下存在缺陷的地基土进行改造，就可以解决矛盾，由此产生了高维卫生填埋的概念。

所谓高维卫生填埋是指采取一定工程措施，通过对卫生填埋场场址天然条件下存在着的缺陷进行人为改造，采取系列工程措施防止与控制渗滤液和场址区地下水间的交换，从而提高卫生填埋场的垃圾填埋高度，实现以最小的填埋面积获得最大的填埋库容，并保证填埋场的卫生安全与稳定，达到节省土地的目的。高维填埋技术对老港四期工程的实际意义体现在以下两个方面：

(1) 由于实现高维卫生填埋，大大提高了地基承载力，可将原填 20 m 以内高度的地基承载能力提高到可填 45 m 高。由此原定填埋寿命 20 年的垃圾容量，仅用 100 公顷土地即可满足，即 20 年所用土地仅占原定土地面积 336 公顷的 30%。加上预留的取土区（挖深仅 2 m）120 公顷，用地面积 220 公顷，也仅占原定面积的 66%。大量节约土地资源（或用作未来扩建），这在寸土寸金的上海，无异对垃圾处理处置的可持续发展很有利。

(2) 仅在占四区 25% 的面积内铺设水、气管线和进行水平防渗，减少了铺设面积和减少了管材用量，也减少了土方工程，从而降低了建设成本。

三、生活垃圾卫生填埋场渗滤液收集系统

渗滤液收集系统的主要功能是将填埋库区内产生的渗滤液收集起来，并通过调节池输送至渗滤液处理系统进行处理，同时向填埋堆体供给空气，以利于垃圾体的稳定化。为了避免因液位升高、水头变大而增加对库区地下水的污染，美国要求该系统应保证使衬垫或场底以上渗滤液的水头不超过 30 cm。设计的收集导出系统层要求能够迅速地将渗滤液从垃圾体中排出，这一点十分重要，其原因是：①垃圾中出现壅水会使垃圾长时间淹没在水中，不同垃圾中的有害物质浸润出来，从而增加了渗滤液净化处理的难度；②壅水会对下部水平衬垫层增加荷载，有使水平防渗系统因超负荷而受到破坏的危险。

渗滤液收集系统通常由导流层、收集沟、多孔收集管、集水池、提升多孔管、潜水泵和调节池等组成，如果渗滤液收集管直接穿过垃圾主坝接入调节池，则集水池、提升多孔管和潜水泵可省略。按照《城市生活垃圾卫生填埋处理工程项目建设标准》的要求，所有这些组成部分要按填埋场多年逐月平均降雨量（一般为 20 年）产生的渗滤液产出量设计，并保证该套系统能在初始运行期较大流量和长期水流作用的情况下运转而功能不受到损坏。典型的渗滤液导排系

统断面及其和水平衬垫系统、地下水导排系统的相对关系见图 1-5。

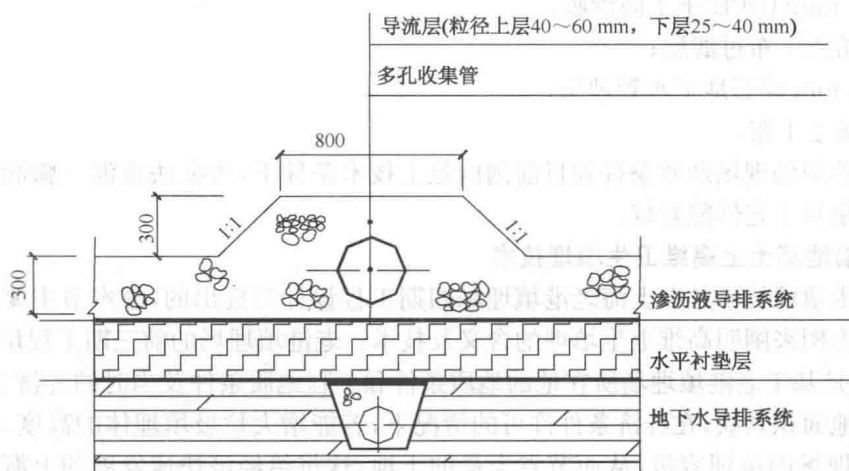


图 1-5 典型渗滤液导排系统断面图

1. 导流层

为了防止渗滤液在填埋库区场底积蓄,填埋场底应形成一系列坡度的阶地,填埋场底的轮廓边界必须能使重力水流始终流向垃圾主坝前的最低点。如果设计不合理,出现低洼反坡、场底下沉或施工质量得不到有效控制和保证等现象,渗滤液将一直滞留在水平衬垫层的低洼处,并逐渐渗出,对周围环境产生影响。导流层的目的是将全场的渗滤液顺利地导入收集沟内的渗滤液收集管内(包括主管和支管)。

在导流层工程建设之前,需要对填埋库区范围内进行场底的清理。在导流层铺设的范围内将植被清除,并按照设计好的纵横坡度进行平整,根据《城市生活垃圾卫生填埋处理项目建设标准》的要求,渗滤液在垂直方向上进入导流层的最小底面坡降应不小于 2%,以利于渗滤液的排放和防止在水平衬垫层上的积蓄。在场底清基的时候因为对表面土地扰动而需要对场地进行机械或人工压实,特别是已经开挖了渗滤液收集沟的位置,通常要求压实度要达到 85% 以上。如果在清基时遇到了淤泥区等不良地质情况,需要根据现场的实际情况(淤泥区深度、范围大小等)进行基础处理,如果土方量不大的情况下可直接采取换土的方式解决。

导流层铺设在经过清理后的场基上,厚度不小于 300 mm,由粒径 40~60 mm 的卵石铺设而成,在卵石来源困难的地区,可考虑用碎石代替,但碎石因表面较粗糙,易使渗滤液中的细颗粒物沉积下来,长时间情况下有可能堵塞碎石之间的空隙,对渗滤液的下渗有不利影响。

2. 收集沟和多孔收集管

收集沟设置于导流层的最低标高处,并贯穿整个场底,断面通常采用等腰梯形或菱形,铺设于场底中轴线上的为主沟,在主沟上依间距 30~50 m 设置支沟,支沟与主沟的夹角宜采用 15 的倍数(通常采用 60),以利于将来渗滤液收集管的弯头加工与安装,同时在设计时应当尽量把收集管道设置成直管段,中间不要出现反弯折点。收集沟中填充卵石或碎石,粒径按照上大下小形成反滤,一般上部卵石粒径采用 40~60 mm,下部采用 25~40 mm。

多孔收集管按照埋设位置分为主管和支管,分别埋设在收集主沟和支沟中,管道需要进行水力和静力作用测定或计算以确定管径和材质,其公称直径应不小于 100 mm,最小坡度应不小于 2%。选择材质时,考虑到垃圾渗滤液有可能对混凝土产生的侵蚀作用,通常采用高密度