

# 填埋场和污染场地 防污屏障设计与施工 (上册)

■ 钱学德 朱伟 王升位 等著



# 填埋场和污染场地防污屏障设计与施工

**Design and Construction of Protective Barriers for  
Waste Containments and Contaminated Sites**

(上册)

钱学德 朱 伟 王升位 等 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书介绍了用于填埋场和污染场地修复工程中的各类防渗衬垫系统、垂直防渗墙和最终封场覆盖系统的设计和施工知识。防渗衬垫系统的介绍以目前国内外广泛推荐使用的复合衬垫系统为主。垂直防污屏障方面着重介绍目前国际上用于环保领域的八类垂直防渗墙。对用于最终封场的覆盖系统也进行了详细介绍,包括中国和美国规范规定的常规型覆盖系统、目前正在研究和推广使用的与常规型覆盖系统等效但是更经济的非常规型覆盖系统,如蒸腾型覆盖、暴露式土工膜覆盖和人工草皮覆盖。最后,本书较为全面地介绍了由“底部防渗衬垫-周围垂直防渗墙-顶部覆盖”形成的处理和修复各种非规范填埋场和污染场地的典型全封闭系统。

本书可以作为高等院校环境岩土工程研究生课程的教材,环境保护行业学会和设计与施工单位的培训教材,也可作为从事填埋场和污染场地整治工程设计、施工和运行的工程技术、管理、科研人员的技术参考书籍。

### 图书在版编目(CIP)数据

填埋场和污染场地防污屏障设计与施工(上册)/钱学德等著. —北京:科学出版社, 2017.7

ISBN 978-7-03-052860-5

I. ①填… II. ①钱… III. ①卫生填埋场-建筑设计 ②卫生填埋场-工程施工 IV. ①X705

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第110686号

责任编辑:周丹 沈旭 白丹/责任校对:刘亚琦  
责任印制:张倩/封面设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年9月第一次印刷 印张:19

字数:450 000

定价:149.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者介绍



钱学德

美国密歇根州政府环境保护厅环境岩土工程首席专家，河海大学岩土工程硕士，美国密歇根大学（University of Michigan）土木与环境工程系博士。多年从事环境岩土工程这一交叉学科的研究，已在国内外重点学术刊物发表上百篇论文。在美国生活固体废物和危险废物处置以及污染场地整治修复工程领域已有 25 年以上的工作经验，参与了美国 100 多个大型填埋场和超级基金项目（Superfund）的设计、施工、监理、事故处理和研究工作，以及污染场地的现场隔离、封闭、整治和再开发等工程和研究项目。参与密歇根州生活固体废物和危险废物处置、填埋和管理的环境保护法和规范技术的制订和修改工作，是密歇根州生活固体废物填埋场和危险废物填埋场建设立项的主要技术审批人和工程验收的主要鉴定人。并被聘为密歇根大学和密歇根州立大学兼职教授，讲授多门研究生课程。

1995 年在浙江大学、河海大学和同济大学向国内首次介绍有关美国环境岩土工程的发展情况和现代卫生填埋场的设计知识，启动了国内在环境岩土工程这一全新环境保护领域的研究和发展。2002 年，以第一作者身份与美国工程院院士 Robert M. Koerner 教授和著名的国际环境岩土工程研究领域的先驱 Donald H. Gray 教授合著、由美国最著名的教科书出版社 Prentice Hall 出版的专著“*Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*”（填埋场的岩土工程设计与施工）已被美国和国际上几十所大学作为研究生教材，也被工程界广泛地作为填埋场设计的主要技术参考书。该书无论是在教育界还是工程界都获得了很高的评价，并且被美国高校环境工程与科学教授协会的新闻通讯誉为“*A Great Engineering Book*”（一本伟大的工程技术参考书）。已被邀为国际上十多个岩土和环境工程领域 SCI 学术刊物的审稿人。2001 年，以第一作者身份与河海大学的教授编著了国内第一本《现代卫生填埋场的设计与施工》专著，由中国建筑工业出版社出版，在国内取得了开拓性影响。2012 年，对该书各章内容进行了大量的修改和扩充，已由中国建筑工业出版社出版了第二版。

至今为止，参与了国内大量的各种类型的填埋场和污染场地整治修复项目的研究、设计、施工和整改。目前在国内与多所高校合作参与由国家资助的多个国家自然科学基金面上项目和重点项目及国家重点基础研究发展计划（973）项目，担任国家教育部长江学者通信评审专家，参与国内多个环保法规的修改和审阅工作，并担任世界银行在中国的辽宁城市固废战略规划项目（TF057757\_CHA）的国际专家，被河海大学、浙江大学、东南大学、华侨大学、扬州大学、南昌大学等多所高校聘为特聘教授、兼任教授和客座教授。



朱伟

河海大学教授，环境工程、土木工程博士生导师，“十五”“863”首席科学家。1982年毕业于兰州大学，同年到中国有色工业总公司兰州有色金属建筑研究所（现名为“甘肃土木工程科学研究院”）工作，1989年在日本留学，1994年和1997年分别获得日本大学硕士和博士学位，后留日本大学任教，1999年回国任河海大学教授。

主要在环境土工和水环境工程的交叉领域开展研究工作，其中的一个研究领域是固体废弃物的处理处置及资源化利用，具体研究对象主要为河湖清淤淤泥和污水处理厂污泥。在淤泥固化、泥水分离以及淤泥多途径资源化利用技术，污水处理厂污泥固化/稳定化、深度脱水、超临界水气化技术方面开展了长期、面向实际应用的研究工作。另一个研究领域主要是盾构隧道施工中土力学问题的研究，在舱土改良、泥膜控制、带压开舱等方面开展了理论性的研究，为解决南京长江隧道、扬子江隧道的带压开舱以及扬州瘦西湖隧道排泥问题提供了技术支撑。另外，在河流湖泊流域治理中涉及的各种问题也开展了较为广泛的研究。

作为首席科学家承担了国家“863”项目，负责了“973”课题，以及重大科技专项课题、国家自然科学基金、国家海洋公益项目、国家水利公益项目、江苏省重点基金、江苏省科技厅社会发展等60余项科研课题。近五年来，在所属领域的重要刊物上发表SCI/EI论文100余篇，出版专著1本，译著2本，参加编写教材2部，申请发明专利32项、实用新型专利7项。

中国水利学会理事及其疏浚与泥处理利用专业委员会主任，中国土木工程学会环境土工专业委员会副主任，江苏省太湖富营养化对策技术委员会委员，全国优秀归侨先进个人，江苏省优秀回国人员，江苏省青蓝工程学术带头人，日本琵琶湖博物馆特别研究员。



王升位

黑龙江海林人，工学博士、讲师。于2016年获得河海大学岩土工程博士学位，现于扬州大学建筑科学与工程学院任教。主要从事岩土渗流和环境土工方面的研究工作，针对垃圾填埋场防污屏障渗透特性及防污性能方面开展了大量的研究，其中基于黏土颗粒间水分形态，揭示压实黏土产生起始水力梯度的机理，提出了一种长寿命的屏障制作方法，为研发高性能防污屏障提供了新思路。

目前，在岩土和环境岩土工程领域的重要刊物上发表SCI论文5篇、EI论文5篇，授权发明专利5项。多次参加国内外环境岩土相关的会议，并参与国家重点基础研究发展计划（973）项目——“城市固体废弃物填埋孕育环境灾害与可持续防控的基础研究”和其他岩土工程方面的研究项目，曾获得第七届国际环境土工会议最佳展报奖。

《**填埋场和污染场地防污屏障设计与施工（上册）**》  
作者名单

主要作者：

钱学德 朱 伟 王升位

参 编 者：

徐浩青 舒 实 范惜辉 邵燕华

# 前 言

2011年我们参加了浙江大学陈云敏教授作为首席科学家的“973”项目“城市固体废物填埋孕育环境灾害与可持续防控的基础研究”，负责第四课题“填埋场渗沥液污染地下环境及防污屏障”的研究工作。课题针对垃圾填埋场复杂成分渗沥液在高水位、高温、高浓度下的渗透、击穿问题开展了基础性研究，对于防污屏障的寿命考虑了一些计算方法。同时，由于我国存在较多早期建设时未能按标准设置底部防污屏障的垃圾填埋场，本书就如何保证这一类填埋场的环境安全开展了垂直防污屏障的研究。

课题研究历经5年，结题前作者决定将研究成果整理，出版一本能够全面和系统地介绍填埋场和污染场地防污屏障工程设计和施工方面的著作，作为科技、施工设计参考和教学用书。经过反复讨论和斟酌，为了能够为具体工程提供更有价值的支撑，本书除反映作者的研究成果以外，力求全面、系统和详细地介绍围绕垃圾填埋场水平和垂直防污屏障设计及施工方面的内容，因此，将内容扩展到近十年来我国在填埋场和污染场地整治方面防污屏障工程建设和科研方面的成果、相关法规、国外先进技术，尤其是对目前国内外常用的八种垂直防渗墙进行了详细的介绍。

2016年5月28日，国务院印发了《土壤污染防治行动计划》，简称“土十条”。这一计划的发布大力推动了我国土壤环境保护和污染场地修复工作。鉴于污染场地修复和治理工程中垂直防污屏障是不可或缺的技术，为了适应这一新的技术要求，作者又根据污染场地修复中防污屏障的特点对本书内容进行了审视和修改。希望本书的出版能够对我国正在大力开展的污染场地修复和治理工程发挥技术支撑的作用。

本书共分17章，前6章以试验和研究为基础，主要对填埋场和其他防渗结构物的底部水平防污屏障的工作环境、构成与基本性质、劣化与老化、击穿及服役年限、可持续防控措施进行了介绍，并列有典型填埋场服役寿命预测的计算分析算例，以便于实际应用。第7章~第15章以作者多年在美国实际工程方面的实践和研究经验为基础，对国内外用于环境保护工程的各种垂直防渗墙的设计和施工进行了全面、系统的介绍，为污染物隔离、阻断污染扩散和各种污染场地的整治修复措施提供了可靠的环境风险管控技术。第16章和第17章介绍了常规型和非常规型两种类型的顶部覆盖系统的设计和施工。因此，本书较为全面地将由“底部防渗衬垫—周围垂直防渗墙—顶部覆盖”形成的处理污染场地的典型全封闭系统进行了全面和系统的介绍。为了让本书尽快与读者见面，本书分为上、下两册出版。其中，第1章~第10章为上册，第11章~第17章为下册。

本书第1章由徐浩青执笔，第2章和第3章由王升位执笔，第4章由徐浩青、邵燕华和王升位执笔，第5章由舒实执笔，第6章由王升位和徐浩青执笔。第1章~第6章都是在朱伟的统一指导下进行编著，并且由朱伟和钱学德进行多次修改和校核。第7章~第17章由钱学德编著，徐浩青、王升位和范惜辉在第7章~第17章英文原

稿的翻译上做了大量的工作。本书的最终稿由朱伟和钱学德进行通校，出版事务由王升位负责。

本书出版得到国家重点基础研究发展规划（973）项目“城市固体废弃物填埋孕育环境灾害与可持续防控的基础研究”（2012CB719804）第四课题“填埋场渗沥液污染地下环境及防污屏障”的资助。

钱学德 朱 伟 王升位

2017年4月20日



# 目 录

## 前言

第 1 章 填埋场与污染场地防污屏障	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 水平防污屏障	1
1.1.2 垂直防污屏障	3
1.2 功能定位	10
1.3 常见问题	11
1.3.1 防污屏障的性能	11
1.3.2 防污屏障性能的评价方法	11
参考文献	12
第 2 章 防污屏障的工作环境	14
2.1 渗沥液的性质	14
2.1.1 渗沥液的来源	14
2.1.2 渗沥液的特性	15
2.2 渗沥液的水头高度和变化	16
2.3 工作的压力和温度	17
2.4 影响衬垫质量的其他因素	18
参考文献	20
第 3 章 防污屏障构成与基本性质	21
3.1 填埋场衬垫系统	21
3.1.1 填埋场衬垫的组成材料	21
3.1.2 填埋场衬垫结构的发展概况	22
3.1.3 生活垃圾填埋场衬垫系统设计标准	24
3.2 黏土的防渗和防污性能	30
3.2.1 渗透性试验	30
3.2.2 渗透性的影响因素	31
3.3 土工膜的防渗和防污性能	39
3.3.1 土工膜的组成和厚度	40
3.3.2 各种土工膜在填埋场中的使用	40
3.4 复合衬垫(土工膜+黏土)接触面对防渗和防污性能的影响	42
参考文献	43
第 4 章 防污屏障的劣化与老化	45
4.1 黏土材料与渗沥液的化学相容性	45

4.1.1	渗沥液对黏土材料渗透系数的影响	45
4.1.2	化学相容性的机理	50
4.1.3	渗沥液作用下黏土材料渗透系数的计算	55
4.2	黏土裂隙对防污性能的影响	56
4.2.1	黏土裂隙在上覆垃圾体压力下的闭合规律	57
4.2.2	黏土裂隙的闭合对防污性能的影响	63
4.3	土工膜的老化	66
4.3.1	HDPE 土工膜降解过程	67
4.3.2	影响氧化降解的因素	68
4.3.3	模拟衬垫老化试验	69
4.3.4	HDPE 土工膜老化的评价	71
4.3.5	国产 HDPE 土工膜情况	71
	参考文献	74
<b>第 5 章</b>	<b>防污屏障的击穿及服役年限</b>	<b>78</b>
5.1	污染物迁移规律	78
5.1.1	对流作用	78
5.1.2	分子扩散作用	79
5.1.3	机械弥散作用	79
5.1.4	吸附作用	80
5.2	防污屏障的击穿问题	81
5.2.1	渗沥液的污染过程	81
5.2.2	防污屏障击穿问题的研究现状	83
5.3	击穿的概念	84
5.4	指示污染物及判断标准	85
5.4.1	多种污染物击穿过程的比较计算	86
5.4.2	多种污染物击穿过程的土工离心机试验	92
5.5	不同类型防污屏障的服役年限	97
5.5.1	压实黏土单层防污屏障服役年限计算	99
5.5.2	HDPE 土工膜单层防污屏障服役年限计算	101
5.5.3	HDPE 土工膜双层防污屏障服役年限计算	102
5.6	防污屏障服役年限的简化计算方法	103
5.6.1	污染物运移解析解	103
5.6.2	压实黏土单层防污屏障服役年限的简化计算公式	104
5.6.3	复合防污屏障服役年限的简化计算公式	105
	参考文献	109
<b>第 6 章</b>	<b>防污屏障可持续防控措施</b>	<b>112</b>
6.1	基于起始水力梯度的长寿命防渗系统	112

6.1.1	基于有效孔径探讨饱和黏土起始水力梯度机理	112
6.1.2	起始水力梯度对填埋场长期服役性的影响	121
6.2	土-膨润土垂直防渗墙和优化构建技术	124
6.2.1	回填材料的渗透系数随掺量的变化	128
6.2.2	回填材料的渗透系数随孔隙率的变化	129
6.2.3	回填材料的孔隙率随掺量的变化	130
6.2.4	回填材料的压缩系数随掺量的变化	130
6.2.5	最优掺量概念的提出及其理论分析	131
6.3	工程应用和实例	137
	参考文献	144
第7章	土-膨润土防渗墙设计	148
7.1	设计要点	149
7.2	现场调查和地下水模型	151
7.2.1	水文地质调查	152
7.2.2	岩土工程勘察	152
7.2.3	地下水模型	154
7.3	防渗墙设计	154
7.3.1	防渗墙几何尺寸的确定	156
7.3.2	防渗墙建设引发的周围地表变形和回填应力影响	162
7.3.3	施工中泥浆沟槽的稳定性	165
7.4	护壁膨润土泥浆配比设计	169
7.4.1	泥浆密度	170
7.4.2	泥浆黏度	171
7.4.3	泥浆凝胶强度	171
7.4.4	泥浆滤液损失	172
7.4.5	膨润土泥浆用水	172
7.4.6	护壁泥浆的相容性	173
7.5	填筑材料配比设计	173
7.5.1	填筑材料制备	173
7.5.2	填筑材料渗透性测试	175
7.5.3	填筑材料的长期相容性	175
7.6	泥浆沟防渗墙的总体渗透性	176
7.7	其他设计考虑事项	177
7.7.1	墙体贯穿	177
7.7.2	防渗墙和覆盖的交界面处理	177
7.7.3	防止脱水	179
7.7.4	防止表面荷载	179

7.7.5	防止可能的地下破坏	179
7.7.6	施工泥沙侵入和冲刷控制	179
	参考文献	179
<b>第8章</b>	<b>土-膨润土防渗墙施工</b>	<b>182</b>
8.1	施工材料	183
8.1.1	膨润土	183
8.1.2	水	183
8.1.3	膨润土泥浆	183
8.1.4	添加剂	187
8.1.5	回填料	187
8.2	施工设备	189
8.2.1	泥浆沟开挖设备	189
8.2.2	泥浆搅拌站	191
8.2.3	回填料混合和回填	193
8.3	泥浆沟防渗墙施工	193
8.3.1	泥浆沟开挖	193
8.3.2	护壁泥浆放置	194
8.3.3	防渗墙墙底嵌入深度	196
8.3.4	沟底清理	197
8.3.5	回填料混合	197
8.3.6	回填料回填	198
8.4	施工质量控制和质量保证	201
8.4.1	膨润土	201
8.4.2	水	201
8.4.3	泥浆性质	201
8.4.4	沟槽连续性和墙底嵌入深度	202
8.4.5	回填料制备	203
8.4.6	开挖深度和回填剖面量测	203
8.4.7	竣工图和竣工文档	205
8.5	质量控制测试仪器	206
8.6	试样采集与测试	206
8.6.1	试样采集	206
8.6.2	湿体试样采集	206
8.6.3	湿体试样渗透试验	207
8.7	临时和永久顶盖	208
8.8	文档和防渗墙验收	212
	参考文献	214

第 9 章 水泥-膨润土防渗墙	216
9.1 水泥-膨润土防渗墙概况	217
9.2 水泥-膨润土防渗墙施工所需的材料	218
9.2.1 材料选择	218
9.2.2 材料规范书	223
9.3 设计依据	227
9.3.1 水泥-膨润土混合料配比设计	227
9.3.2 水泥-膨润土混合料的渗透性	228
9.3.3 水泥-膨润土混合料的强度	229
9.3.4 实践意义	229
9.4 施工考虑	230
9.4.1 混合料制备	230
9.4.2 沟槽开挖	231
9.4.3 墙体连续性	231
9.4.4 板块分段施工	233
9.4.5 板块段或沟槽中的浆料损失	235
9.4.6 干燥与收缩	236
9.5 施工实施规范	237
9.5.1 水泥-膨润土防渗墙施工顺序	237
9.5.2 设备要求	238
9.5.3 施工工作平台	238
9.5.4 沟槽开挖	238
9.5.5 开挖沟槽的底部处理	240
9.5.6 水泥-膨润土防渗墙的顶部处理	242
9.5.7 清场	242
9.6 施工质量控制	243
9.7 水泥-膨润土防渗墙的现场性能	245
9.7.1 美国的现场性能经验	245
9.7.2 英国的现场性能经验	246
9.7.3 影响防渗墙现场性能的因素	246
9.8 土-膨润土与水泥-膨润土防渗墙的比较	248
9.8.1 两种方法的一般描述	248
9.8.2 设计考虑	249
9.8.3 施工材料与方法	250
9.8.4 防渗墙性能	251
9.8.5 目前趋势	252
9.8.6 总结与结论	254

参考文献 .....	255
<b>第 10 章 土-水泥-膨润土防渗墙 .....</b>	<b>257</b>
10.1 施工方法介绍 .....	257
10.1.1 开挖和回填 .....	257
10.1.2 土-水泥-膨润土回填料混合 .....	259
10.2 设计考虑要点 .....	261
10.2.1 土-水泥-膨润土配比设计 .....	261
10.2.2 土-水泥-膨润土防渗墙材料的取样与测试 .....	262
10.2.3 土-水泥-膨润土防渗墙的强度 .....	264
10.2.4 土-水泥-膨润土防渗墙的渗透性 .....	266
10.3 施工考虑事项 .....	269
10.3.1 沟槽开挖 .....	269
10.3.2 回填料混合 .....	271
10.3.3 回填料放置 .....	271
10.3.4 回填料性质 .....	272
10.4 实际工程应用 .....	274
10.5 工程案例分析——一个大深度土-水泥-膨润土防渗墙项目 .....	276
10.5.1 场地介绍 .....	276
10.5.2 防渗墙设计 .....	277
10.5.3 施工前的模拟性研究 .....	277
10.5.4 施工 .....	279
10.5.5 土-水泥-膨润土回填料湿试样的室内测试 .....	281
10.5.6 对系统渗透性的评估 .....	282
10.5.7 案例小结 .....	285
10.6 土-水泥-膨润土防渗墙总结 .....	286
参考文献 .....	286

# 第1章 填埋场与污染场地防污屏障

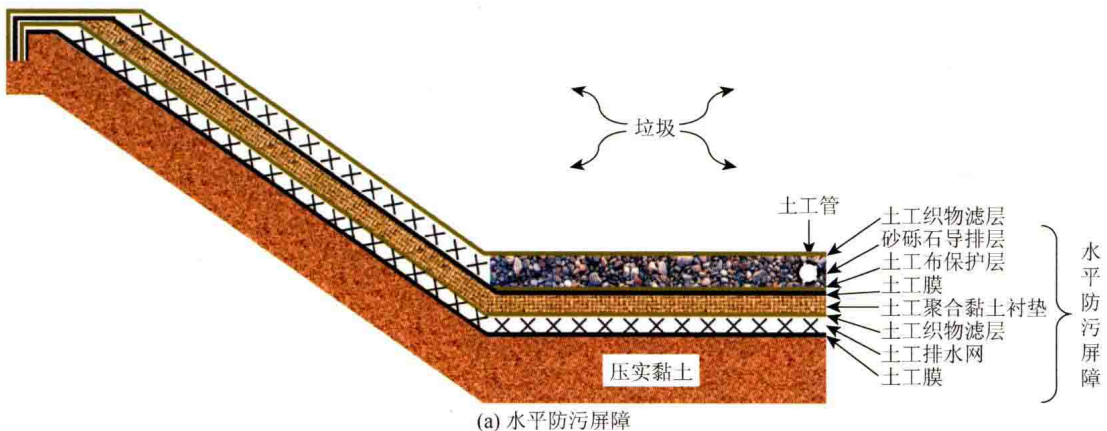
为了保护地下水土资源不受垃圾填埋场和污染场地潜在污染的影响，通常需要在垃圾填埋场与污染场地的四周构建防污屏障。而垃圾填埋场和污染场地防污屏障的正常运行对于其中污染物的拦蓄有着十分重要的作用。它与导排设施相互补充、协同工作，因此，防污屏障是防止垃圾填埋场及污染场地污染地下水和土壤或控制污染物扩散的重要组成部分。

## 1.1 基本概念

防污屏障是垃圾填埋场或污染场地修复系统中防止污染液（渗沥液或污水）污染地下水或土壤的重要结构之一。基于场地的地质、水文、工程等条件，考虑污染液的性质，以及在场地和屏障中的运移规律，选择合适的隔离结构和隔离材料，通过预先设置或后续施工形成能够隔离污染物或减少、延缓污染物运移的土工结构。按照其布置形式与功能分为水平防污屏障和垂直防污屏障。通常的做法是预先在垃圾填埋场底部设置水平防污屏障，或者事后在污染场地周边设置垂直防污屏障，两种形式的防污屏障的示意图如图 1.1 所示。

### 1.1.1 水平防污屏障

水平防污屏障是指在水平方向设置隔离层的屏障，即在填埋场底部及其侧壁基础表面铺设隔离材料，将产生的渗沥液隔离于填埋场之中进行有效导排，防止垃圾渗沥液向下渗透污染地下水，同时也能阻止填埋场气体进入地下环境，有些情况下还能阻止周围地下水渗入填埋场内 [图 1.1 (a)]。



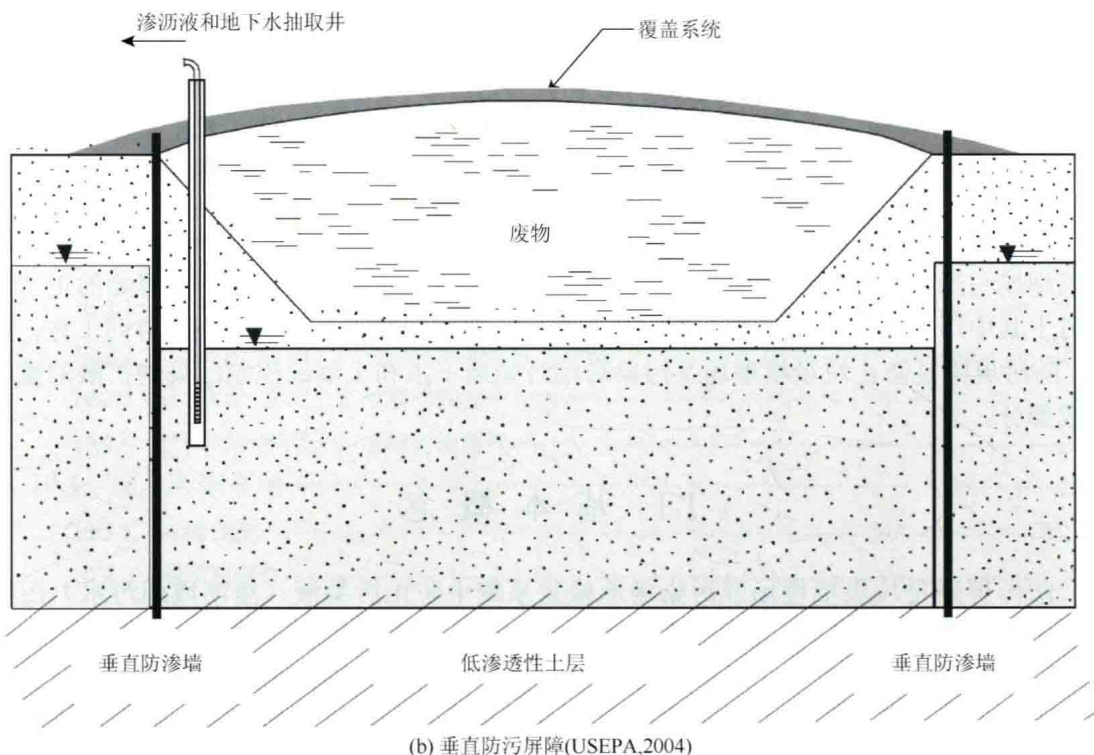


图 1.1 垃圾填埋场与污染场地防污屏障

垃圾填埋场的水平防污屏障由渗沥液导排层和防渗层共同组成,其中,渗沥液导排层的作用是收集和排出渗沥液,控制垃圾填埋场内的渗沥液水位;防渗层的主要功能是防止未能及时排走的渗沥液发生渗漏。水平防污屏障包括压实黏土衬垫(compact clay liner, CCL)、土工膜(geomembrane, GM)、土工复合膨润土衬垫(geosynthetic clay liner, GCL)等(陈云敏等,2016)。根据防污屏障材料来源的不同,可将水平防污屏障分为天然防污屏障和人工防污屏障。天然防污屏障指利用黏土类土层或改良土做防污屏障的防污方法。人工防污屏障指采用人工合成材料(土工膜)与黏土结合做防污屏障的防污方法。

按照我国《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范》(CJJ 113—2007)<sup>①</sup>、《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)<sup>②</sup>和《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》(GB 50869—2013)<sup>③</sup>的规定,垃圾填埋场水平防污屏障可采用以下几种形式:①单层压实黏土衬垫;②单层土工膜衬垫;③土工膜和压实黏土复合衬垫;④土工膜和土工复合膨润土(GCL)复合衬垫;⑤双层土工膜衬垫。美国1982年前主要使用单层压实黏土衬垫,1982

① 建设部. 2007. 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范(CJJ 113—2007). 中华人民共和国行业标准, 中华人民共和国建设部, 2007年6月1日实施。

② 环境保护部. 2008. 生活垃圾填埋污染控制标准(GB 16889—2008). 国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国国家标准, 2008年4月2日发布, 2008年7月1日实施。

③ 住房和城乡建设部. 2013. 生活垃圾卫生填埋处理技术规范(GB 50869—2013). 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家标准, 2013年8月8日发布, 2014年3月1日实施。



年开始使用单层土工膜衬垫, 1983年改用双层土工膜衬垫, 1984年又改用单复合衬垫, 1987年后则广泛使用双复合衬垫(钱学德和郭志平, 1997)。目前在美国所有的危险废弃物填埋场和近三分之一州的生活垃圾填埋场设计中已规定必须使用双复合衬垫(Qian et al., 2002; 钱学德等, 2011)。

### 1.1.2 垂直防污屏障

垂直防污屏障指隔离层竖向布置的屏障, 即根据垃圾填埋场或污染场地的地质、水文、工程等条件, 利用场地下方存在的不透水、弱透水层和相对独立的水文地质单元等条件, 在场地四周或一边使用防渗、防污性能良好的材料施工形成垂向的帷幕或墙体将污染源封闭, 使污染源与外界环境隔绝, 以阻隔污染液进入周围的土壤和水体, 也可以防止气体外泄, 并防止地下水和地表水进入场地内, 达到控制污染物扩散的效果[图1.1(b)]。

在几乎所有已泄漏的填埋场修复和污染场地修复工程中, 都需要构建垂直防污屏障形成完整的隔离系统。由于内部没有导排系统, 垂直防污屏障通常会与内部污染液的抽提-处理系统(pump and treat remediation)相结合。目前建造的绝大多数垂直防污屏障为土基或水泥基土-膨润土防渗墙。美国常用的垂直防污屏障形式一般为土-膨润土防渗墙, 而欧洲经常选择水泥-膨润土防渗墙, 有时也会利用细粒状高炉炉渣(ground granulated blast furnace slag)或粉煤灰(fly ash)作为水泥-膨润土的添加剂。

垂直防污屏障通常要求具有低渗透系数(一般要求屏障墙体的渗透系数 $\leq 1.0 \times 10^{-7}$  cm/s), 并能保证隔离性能的耐久性和足够的强度。由于大多数情况下会遭受垃圾渗沥液、场地污染物以及地下水中化学活性物质[例如, 高可溶性硫酸盐(high soluble sulfates)]的入侵。在耐久性不足的情况下可以通过选择适当的添加剂来增强防渗墙墙体材料的抗腐蚀性能。

#### 1. 垂直防污屏障的种类

目前国际上环境保护领域用于填埋场修复和污染场地修复工程中的各类垂直防污屏障主要包括以下几个。

- (1) 土-膨润土防渗墙;
- (2) 水泥-膨润土防渗墙;
- (3) 土-水泥-膨润土防渗墙;
- (4) 土工膜复合防渗墙;
- (5) 塑性混凝土防渗墙;
- (6) 深层搅拌灌浆土防渗墙;
- (7) 喷射灌浆防渗墙;
- (8) 板桩防渗墙。

防止被污染的地下水从各类填埋场场区和污染场地修复的隔离区域逸出的最常用的垂直防污屏障是土-膨润土防渗墙(USEPA, 1992; Evans, 1993; USACE, 1996)。常见