

填埋场和污染场地 防污屏障设计与施工(下册)

■ 钱学德 朱伟 徐浩青等 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

(下册)

钱学德 朱 伟 徐浩青 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

为了能够给实际工程提供更有价值的支撑,本书力求全面、系统地介绍在填埋场和污染场地防污屏障工程建设与科研方面的成果、相关法规、国外先进技术,以及作者在该领域多年的实践和研究经验,还详细介绍了垂直防渗墙与覆盖系统的设计和施工方面的知识。垂直防污屏障方面着重介绍了目前国际上用于环境保护领域的土工膜复合防渗墙、塑性混凝土防渗墙、深层搅拌灌浆防渗墙、喷射灌浆防渗墙与板桩防渗墙。最后对常规型覆盖系统和非常规型覆盖系统也进行了介绍。

本书可以作为高等院校环境岩土工程研究生课程的教材,环境保护行业学会与设计 and 施工单位的培训教材,也可作为填埋场与污染场地治理工程设计、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和施工(下册)/钱学德等著. —北京:科学出版社, 2017.10

ISBN 978-7-03-054895-5

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 255969 号

责任编辑:周 丹 沈 旭 赵 晶/责任校对:王 瑞

责任印制:张克忠/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:100071
<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10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年10月第一次印刷 印张:20 1/2

字数:486 000

定价:198.00 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。在美国生活固体废弃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弃物和危险废物处置、填埋和管理的环境保护法和技術规范的制订和修改工作, 是密歇根州生活固体废弃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。



徐浩青

河海大学土木与交通学院岩土工程专业博士研究生，师从朱伟教授，主要从事岩土渗流和环境土工方面的研究工作，特别是在填埋场土-膨润土垂直屏障优化构建及防污性能研究方面取得了一定的突破。目前，已发表学术论文9篇（其中3篇SCI、3篇EI、3篇国内外会议论文），申请发明专利7项（其中3项授权、4项实质审查），负责江苏省研究生科研创新计划（省立省助）1项，同时还参与国家重点基础研究发展计划（“973”计划）——“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”和其他环境岩土方面的项目与课题，并获得河海大学“优秀研究生”、研究生数学建模

竞赛二等奖、博士生特等奖学金、优秀学术论文奖学金、徐芝纶力学奖学金、江苏省“优秀学生干部”及国家奖学金等。

《填埋场和污染场地防污屏障设计与施工（下册）》

作者名单

主要作者：

钱学德 朱 伟 徐浩青

参 编 者：

王升位 范惜辉 舒 实 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“城市固体废弃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、高温度、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类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 徐浩青

2017年4月20日

目 录

前言

第 11 章 土工膜复合防渗墙	1
11.1 概述	1
11.2 HDPE 土工膜的特性	3
11.3 土工膜复合防渗墙的施工方法	4
11.3.1 挖沟放置法	4
11.3.2 振动插入法	6
11.3.3 泥浆护壁沟槽法	8
11.3.4 分段式沟槽框架法	12
11.3.5 振动梁法	13
11.3.6 对 5 种施工方法的评价	14
11.4 施工导墙	16
11.5 土工膜膜片间锁扣	19
11.5.1 锁扣的种类	19
11.5.2 锁扣焊接和膜片间连接安装	22
11.5.3 锁扣的水力性能	26
11.6 与覆盖和衬垫的连接	29
11.7 土工膜垂直防渗墙的性能	30
11.7.1 HDPE 土工膜的耐久性	30
11.7.2 HDPE 土工膜的抗扩散性	31
11.8 工程应用及实例	32
参考文献	36
第 12 章 塑性混凝土防渗墙	39
12.1 塑性混凝土防渗墙应用	39
12.2 设计问题	41
12.2.1 设计试验	41
12.2.2 设计方法	41
12.2.3 塑性混凝土的力学与水力性能	46
12.2.4 实际应用	49
12.3 泥浆性质和泥浆配比设计	50
12.3.1 密度	50
12.3.2 含砂量	50
12.4 施工准备	51

12.4.1	规范要求	51
12.4.2	施工前塑性混凝土配比设计	51
12.5	施工方面	52
12.5.1	导墙的功能和建造	52
12.5.2	沟槽开挖	55
12.5.3	板块接缝	57
12.5.4	混凝土配比	59
12.5.5	混凝土浇筑	60
12.6	其他施工考虑事项	63
12.6.1	板块厚度、长度和施工次序	63
12.6.2	墙体垂直度与完整性	64
12.6.3	沟槽内膨润土泥浆的流失	65
12.7	现场质量控制	66
12.7.1	膨润土泥浆	66
12.7.2	板块沟槽开挖	68
12.7.3	施工前塑性混凝土的测试	68
12.7.4	塑性混凝土	69
12.7.5	现场试验段防渗墙	70
12.7.6	防渗墙中的验证钻孔	70
12.7.7	横向连接的验证钻孔	71
12.7.8	验证钻孔回填	72
	参考文献	72
第 13 章	深层搅拌灌浆防渗墙	74
13.1	概述	74
13.2	施工设备	75
13.3	材料选择	79
13.4	设计依据	80
13.4.1	强度	81
13.4.2	渗透性	82
13.5	搅拌灌浆方法与步骤	82
13.5.1	传统深层搅拌灌浆法	83
13.5.2	沟槽切割和深层混合法	87
13.5.3	切割土壤混合法	91
13.6	施工可行性	96
13.7	技术规格和技术要求	101
13.7.1	配比设计	101
13.7.2	材料	101
13.7.3	搅拌灌浆施工	102

13.7.4 设备	103
13.7.5 施工	104
13.7.6 施工表面的清理与处理	105
13.7.7 质量控制	105
13.8 技术改进与发展	107
13.8.1 改进的搅拌混合设备和工艺	107
13.8.2 分析与设计方法的发展	108
13.8.3 质量控制和质量保证方法的改进	108
13.9 结论与总结	109
参考文献	111
第 14 章 喷射灌浆防渗墙	113
14.1 喷射灌浆技术	113
14.1.1 喷射灌浆土柱与喷射灌浆墙	115
14.1.2 喷射灌浆系统	115
14.1.3 限制和注意事项	120
14.2 设计	120
14.2.1 试验段	121
14.2.2 强度	123
14.2.3 渗透性	125
14.3 施工能力	125
14.4 技术规范	126
14.4.1 材料	127
14.4.2 设备	128
14.4.3 现场试验程序	131
14.4.4 施工作业	134
14.5 施工质量控制	136
14.5.1 喷射灌浆施工运行	136
14.5.2 材料	137
14.5.3 现场试验	137
14.5.4 质量控制测试设备	137
14.5.5 渗透性测试	138
14.5.6 每日现场施工报告	139
14.6 验收标准	140
14.7 其他灌浆技术	141
14.7.1 渗透灌浆	141
14.7.2 振动梁技术	144
参考文献	145

第 15 章 板桩防渗墙	146
15.1 背景	146
15.2 板桩的形状种类	147
15.2.1 Z 形板桩	148
15.2.2 U 形板桩	150
15.2.3 一字形幅板式板桩	151
15.2.4 Ω 形板桩	152
15.2.5 组合板桩墙	154
15.3 板桩防渗墙的应用	156
15.3.1 隔离工程	157
15.3.2 防渗密封工程的应用	157
15.3.3 防洪工程	158
15.3.4 水控制工程	159
15.3.5 海洋工程结构	161
15.4 桩间锁扣渗漏的防治	161
15.4.1 锁扣的水密性	162
15.4.2 密封胶的相容性	163
15.4.3 滑铁卢(Waterloo)屏障的密封锁扣	163
15.4.4 “J”式接插型水密性板桩	166
15.5 腐蚀和抗腐蚀	170
15.5.1 钢板桩表面的腐蚀率	170
15.5.2 抗腐蚀措施	172
15.6 板桩施工方法	172
15.6.1 锤击法	172
15.6.2 振动法	178
15.6.3 压入法	181
15.6.4 导向架	184
15.7 非钢材板桩防渗墙	184
15.7.1 氯乙烯板桩	184
15.7.2 纤维加筋聚合物板桩	192
15.7.3 铝板桩	198
15.8 技术评估	202
15.8.1 优点	202
15.8.2 局限性	203
参考文献	203
第 16 章 常规型覆盖系统	206
16.1 覆盖系统的组成	207
16.1.1 基础层	208

16.1.2 排气层	208
16.1.3 防渗层	210
16.1.4 排水层	214
16.1.5 保护层	217
16.1.6 土壤侵蚀控制层	218
16.2 生活垃圾填埋场覆盖系统设计标准	221
16.2.1 中国标准	221
16.2.2 美国标准	223
16.3 危险废物填埋场覆盖系统设计标准	224
16.3.1 中国标准	224
16.3.2 美国标准	226
16.4 土工复合膨润土衬垫在覆盖系统中的应用	227
16.5 覆盖系统的稳定性分析	228
16.5.1 不考虑渗透力的稳定计算分析	229
16.5.2 考虑砂土排水层中渗透力的稳定计算分析	230
16.5.3 考虑土工复合排水网中渗透力的稳定计算分析	232
16.5.4 小结	234
16.6 覆盖系统中最大渗流水头的计算	234
16.6.1 计算方法	234
16.6.2 多层排水介质内无压渗流的等效水力渗透系数	237
16.6.3 多层排水介质内最大饱和深度的计算	240
16.7 覆盖系统的后续养护和管理	242
参考文献	242
第 17 章 非常规新型覆盖系统	245
17.1 蒸腾型覆盖系统	245
17.1.1 概念描述	245
17.1.2 设计依据	253
17.1.3 计算毛细屏障蒸腾型覆盖厚度的方法	257
17.1.4 性能监测	260
17.1.5 蒸腾型覆盖的优点和局限性	264
17.1.6 案例介绍	266
17.1.7 蒸腾型覆盖设计方法总结	270
17.2 暴露式土工膜覆盖系统	271
17.2.1 常规型覆盖系统的关注点	271
17.2.2 暴露式土工膜覆盖系统的应用问题	273
17.2.3 暴露式土工膜覆盖的设计与安装	275
17.2.4 暴露式土工膜覆盖和常规型最终覆盖的成本比较	279
17.2.5 结论	283

17.3	ClosureTurf 人工草皮覆盖系统	283
17.3.1	ClosureTurf 覆盖系统的配置	284
17.3.2	ClosureTurf 的性能和耐久性	286
17.3.3	ClosureTurf 覆盖系统的施工安装	290
17.3.4	使用 ClosureTurf 覆盖系统的特点和效益	301
17.3.5	案例介绍	302
	参考文献	308

第 11 章 土工膜复合防渗墙

土工膜复合防渗墙是通过结合使用土工合成材料与常规的泥浆沟垂直屏障技术建造的(图 11.1)。土工膜复合防渗墙是将土工膜插入土-膨润土或者水泥-膨润土防渗墙沟槽中组合而成的,也可以把单个土工膜插入地面以下形成土工膜防渗墙。土工膜防渗墙主要在软土或松土地基中建造,而土工膜复合防渗墙在所有的地基类型中均可建造。在常规的泥浆沟防渗墙中使用土工膜[通常是高密度聚乙烯(HDPE)土工膜],其主要目的是建立阻滞污染物运移与控制可能产生气体迁移的低渗透性屏障。

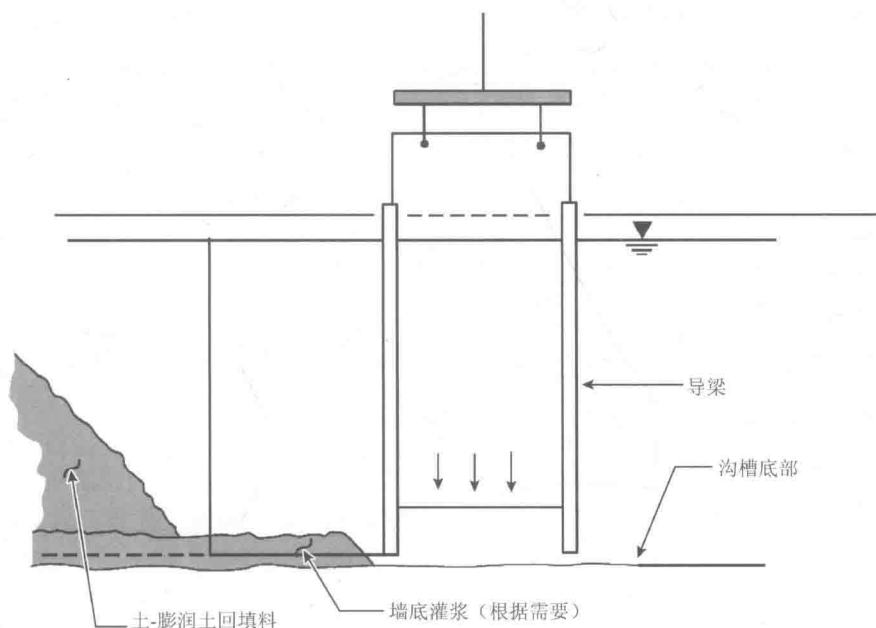


图 11.1 在土-膨润土防渗墙的沟槽中垂直插入土工膜, 然后回填土-膨润土混合料形成土工膜复合防渗墙 (USEPA, 1998)

土工合成材料,如 HDPE,可以改善传统泥浆沟防渗墙的性能,包括:①将防渗墙的渗透系数降低两个数量级;②提高防渗墙的耐化学性。通过开发和改进土工膜的幅间锁扣,可以提高土工膜幅间连接处的密封性。遇水膨胀的水膨型止水锁扣可用于土工膜幅间接插锁扣(USEPA, 1998)。

11.1 概 述

使用土工膜作为垂直屏障的重要原因是通过采用极低的渗透性材料来确保防渗屏障的完全连续性。而对于土-膨润土防渗墙、水泥-膨润土防渗墙、土-水泥-膨润土防渗墙和

其他相关的垂直防渗屏障而言,由于施工期间存在难以发现的缺陷等因素,所以并不能保证防渗屏障的连续性与不渗透性,举例如下(Koerner and Guglielmetti, 1995)。

- (1) 施工或回填期间沟槽侧壁的坍塌;
- (2) 回填中暂停施工期间砂的沉积;
- (3) 泥浆支护的沟槽底部存在砂或其他杂物,导致墙底嵌入深度无效;
- (4) 不适当地混合回填材料,即其中掺有砂土或大的杂物(如岩石或建筑垃圾)。

此外,土-膨润土防渗墙、水泥-膨润土防渗墙、土-水泥-膨润土防渗墙和其他相关类型的垂直防渗墙的低渗透性可能由于以下因素变得难以保证。

- (1) 现场混合期间,回填材料质量的变化;
- (2) 回填过程中,连接和停工处的墙体不连续;
- (3) 地下水位以上或水位波动部位材料的干燥和开裂;
- (4) 防渗墙上部材料受冻融循环的影响;
- (5) 墙体材料与场地渗沥液的化学不相容性。

土工膜被用作垂直屏障,或单独使用,或与其他相对不渗透的材料结合使用,已经有近 20 年的历史了。土工膜的技术应用包括以下几种(Koerner and Guglielmetti, 1995)。

- (1) 土工膜单独使用;
- (2) 土工膜与土-膨润土、水泥-膨润土或土-水泥-膨润土回填料组合成复合垂直屏障;
- (3) 双层土工膜中间夹砂层作为渗漏检测层。

垂直防渗墙的土工膜几乎总是使用 HDPE 土工膜;然而,也可以使用其他聚合物土工膜。土工膜片材是连续的,但是使用时通常通过多种可能的连接互锁制成有限长度的膜片(片幅, panel)。理论上,最终的防渗墙深度可以是无限的,不过其设计深度受到施工方法的限制。现阶段有多种不同的施工方法可供选择。

如图 11.2 (a) 所示,垂直防渗墙中土工膜的顶部可与围封区域的覆盖中的土工膜连接起来。这样的系统可以使用传统的施工质量控制(CQC)和施工质量保证(CQA)程序进行监测。或者,覆盖层中的土工膜可以水平延伸或垂直下垂,从而与垂直防渗墙中的土工膜形成重叠密封,如图 11.2 (b) 所示。

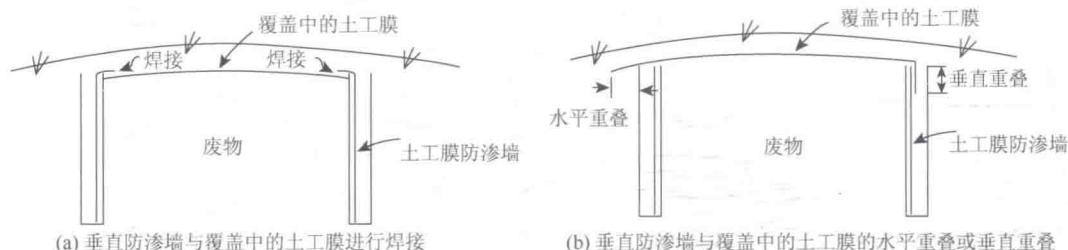


图 11.2 土工膜垂直防渗墙的顶部处理(Koerner and Guglielmetti, 1995)

如果条件允许,土工膜的底部应该嵌入弱透水层中,如图 11.3 (a) 所示,或者土工膜的深度达到足够深,以至绕过土工膜底部的渗流量对于特定地点的设计可以忽略不计,如图 11.3 (b) 所示。后一种情况通常被称为“悬挂式防渗墙”。

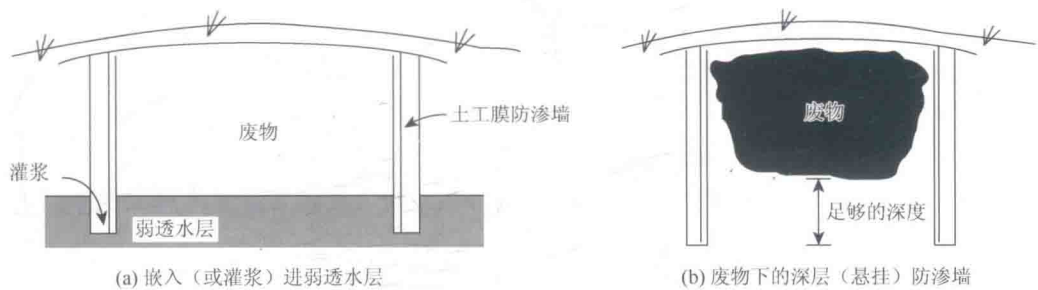


图 11.3 土工膜垂直防渗墙的底部处理 (Koerner and Guglielmetti, 1995)

具有土工膜的垂直防渗屏障可以有多种不同的形式, 并且其技术可行性已经被充分确定。施工期间的施工质量控制和施工质量保证程序已经规范化。

11.2 HDPE 土工膜的特性

到目前为止, 采用土工膜建造的垂直防渗屏障基本上由 HDPE 土工膜组成。HDPE 能成为最适合的聚合物 (polymer) 材料, 主要是由于以下原因 (Koerner and Guglielmetti, 1995)。

- (1) HDPE 对很多种类的化学物质具有耐腐蚀性, 包括有机溶剂;
- (2) HDPE 挤压成片材和接插件, 用于将片材连接在一起;
- (3) 土工膜片材和接插件可以在工厂或施工现场使用现成的焊接设备进行焊接, 然后称其为“膜片”;
- (4) 可根据需要定制不同的土工膜厚度、膜片宽度和长度;
- (5) 目前, HDPE 的成本很低, 传统上是所有聚合物土工膜种类中最便宜的;
- (6) 具有足够数量的商业系统可供选择, 并且已经形成通用的土工膜行业规范。

HDPE 土工膜由表 11.1 所示的 3 种成分组成。土工膜最终的密度一般为 0.941~0.943g/cm³, 属于高密度线性聚乙烯类 (linear polyethylene) 材料, 因此定义其为 HDPE。

表 11.1 典型 HDPE 的成分 (Koerner and Guglielmetti, 1995)

成分	密度/(g/cm ³)	比例(按重量)/%	备注
树脂	0.934~0.940	97~97.5	纯树脂, 即非回收树脂
炭黑	2.5~2.8	2.0~2.5	用于抗紫外线, 保持稳定和耐久性
抗氧化剂	1.5~2.5	1.0~0.5	用于便于加工和长期耐久性

HDPE 土工膜具有极低的“渗透性”。需要注意的是, 土工膜的渗透性并非是土-膨润土、水泥-膨润土或土-水泥-膨润土垂直防渗墙的水力渗透系数, 而是与扩散 (diffusion) 有关的迁移特性。测定土工膜渗透性的标准试验是参照美国 ASTM E96 进行的水蒸气扩散试验。对于 2.5mm (约 100mil^①) 厚的 HDPE 土工膜, 渗透性试验的典型值约为 0.006g/(m²·d) [约 0.006gal^②/(acre^③·d)]。这个值转换为等效的达西 (Darcy) 渗透系数约为 (1.0×10⁻¹³) cm/s

① 1mil = 0.0254mm。
② 1gal 水 = 3.785×10³g 水。
③ 1acre = 4047m²。