

中华人民共和国行业标准

生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范

Technical code for geotechnical engineering of municipal solid
waste sanitary landfill

CJJ 176 - 2012

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2 0 1 2 年 6 月 1 日

中国建筑工业出版社

2012 北 京

中华人民共和国行业标准
生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范
Technical code for geotechnical engineering of municipal solid
waste sanitary landfill
CJJ 176 - 2012

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：4 字数：108 千字

2012年4月第一版 2012年4月第一次印刷

定价：20.00 元

统一书号：15112·21735

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

本社网址：<http://www.cabp.com.cn>

网上书店：<http://www.china-building.com.cn>

中华人民共和国住房和城乡建设部 公 告

第 1243 号

关于发布行业标准《生活垃圾卫生 填埋场岩土工程技术规范》的公告

现批准《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》为行业标准，编号为 CJJ 176 - 2012，自 2012 年 6 月 1 日起实施。其中，第 6.4.1、6.5.5 条为强制性条文，必须严格执行。

本规范由我部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2012 年 1 月 11 日

前 言

根据住房和城乡建设部《2009年工程建设标准规范制订、修订计划》（建标〔2009〕88号）的要求，规范编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了本规范。

本规范的主要技术内容是：1 总则；2 术语和符号；3 基本规定；4 填埋场渗流及渗沥液水位控制；5 填埋场沉降及容量；6 填埋场稳定；7 填埋场治理及扩建；8 压实黏土防渗层及垂直防渗帷幕；9 填埋场岩土工程安全监测。

本规范中以黑体字标志的条文为强制性条文，必须严格执行。

本规范由住房和城乡建设部负责管理和对强制性条文的解释，由浙江大学负责日常管理，由浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室负责具体技术内容解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室（地址：浙江省杭州市余杭塘路866号浙江大学紫金港校区安中大楼A425室；邮政编码：310058）。

本规范主编单位：浙江大学

本规范参编单位：上海环境卫生工程设计院

上海市政工程设计研究总院（集团）
有限公司

中国瑞林工程技术有限公司

中国市政工程华北设计研究总院

城市建设研究院

苏州市环境卫生管理处

深圳市下坪固体废弃物填埋场

浙江大学建筑设计研究院

本规范参加单位：北京环境卫生工程集团有限公司

杭州固体废弃物处理有限公司

成都市固体废弃物卫生处置场

宁波市鄞州区绿州能源利用有限公司

本规范主要起草人员：陈云敏 詹良通 杨新海 王艳明

袁永强 刘淑玲 屈志云 林伟岸

柯瀚 李育超 朱斌 兰吉武

朱水元 李智勤

本规范主要审查人员：张益 顾国荣 包承纲 钱学德

陈朱蕾 何品晶 朱伟 郭明田

齐长青 王志国 韩焯

目 次

| | | |
|-----|-----------------------|----|
| 1 | 总则 | 1 |
| 2 | 术语和符号 | 2 |
| 2.1 | 术语 | 2 |
| 2.2 | 符号 | 4 |
| 3 | 基本规定 | 6 |
| 4 | 填埋场渗流及渗沥液水位控制 | 7 |
| 4.1 | 一般规定 | 7 |
| 4.2 | 垃圾水气传导特性 | 7 |
| 4.3 | 填埋场渗沥液总量计算 | 9 |
| 4.4 | 场底渗沥液导排设计与水头控制 | 9 |
| 4.5 | 垃圾堆体水位及控制 | 11 |
| 4.6 | 填埋气收集及控制措施 | 12 |
| 5 | 填埋场沉降及容量 | 14 |
| 5.1 | 一般规定 | 14 |
| 5.2 | 垃圾堆体沉降计算 | 14 |
| 5.3 | 填埋量计算 | 16 |
| 5.4 | 填埋场库区设施不均匀沉降验算 | 17 |
| 5.5 | 填埋场不均匀沉降控制和增容措施 | 19 |
| 6 | 填埋场稳定 | 20 |
| 6.1 | 一般规定 | 20 |
| 6.2 | 垃圾抗剪强度指标 | 21 |
| 6.3 | 土工材料界面强度指标 | 22 |
| 6.4 | 填埋场边坡稳定验算 | 23 |
| 6.5 | 填埋场稳定控制措施 | 24 |
| 7 | 填埋场治理及扩建 | 26 |

| | | |
|------|----------------------|----|
| 7.1 | 一般规定 | 26 |
| 7.2 | 填埋场治理及扩建岩土工程勘察 | 26 |
| 7.3 | 扩建垃圾堆体的基层处理 | 30 |
| 7.4 | 中间衬垫系统 | 31 |
| 7.5 | 填埋场治理及污染控制措施 | 31 |
| 8 | 压实黏土防渗层及垂直防渗帷幕 | 34 |
| 8.1 | 一般规定 | 34 |
| 8.2 | 压实黏土防渗层的土料选择 | 34 |
| 8.3 | 压实黏土的含水率及干密度控制 | 34 |
| 8.4 | 压实黏土防渗层的施工质量控制 | 36 |
| 8.5 | 垂直防渗帷幕及选型 | 37 |
| 8.6 | 垂直防渗帷幕插入深度及厚度 | 37 |
| 8.7 | 垂直防渗帷幕的施工质量控制 | 39 |
| 9 | 填埋场岩土工程安全监测 | 40 |
| 9.1 | 一般规定 | 40 |
| 9.2 | 渗沥液水位监测 | 41 |
| 9.3 | 表面水平位移监测 | 41 |
| 9.4 | 深层水平位移监测 | 42 |
| 9.5 | 垃圾堆体沉降监测 | 42 |
| 9.6 | 填埋气压监测 | 43 |
| 附录 A | 填埋场堆体压缩量计算过程及参数确定 | 44 |
| 附录 B | 局部沉陷条件下土工膜应变计算及加筋层设计 | 47 |
| | 本规范用词说明 | 51 |
| | 引用标准名录 | 52 |
| | 附：条文说明 | 53 |

Contents

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | General Provisions | 1 |
| 2 | Terms and Symbols | 2 |
| 2.1 | Terms | 2 |
| 2.2 | Symbols | 4 |
| 3 | Basic Requirements | 6 |
| 4 | Seepage and Leachate Mound Control in Landfills | 7 |
| 4.1 | General Requirements | 7 |
| 4.2 | Leachate and Gas Conductivity Properties of Wastes | 7 |
| 4.3 | Calculations of Leachate Generation | 9 |
| 4.4 | Design of Bottom Leachate Drainage Systems and Control of Leachate Head | 9 |
| 4.5 | Leachate Level and Control of Leachate Mound within Waste Mass | 11 |
| 4.6 | Effective Collection of Landfill Gas and Control of Gas Pressure | 12 |
| 5 | Landfill Settlement and Landfill Storage Capacity | 14 |
| 5.1 | General Requirements | 14 |
| 5.2 | Calculation of Landfill Settlement | 14 |
| 5.3 | Calculation of Landfill Storage Capacity | 16 |
| 5.4 | Calculation of Differential Settlement for Landfill Structures | 17 |
| 5.5 | Control of Differential Settlement and Measures of Increasing Capacity for Landfills | 19 |
| 6 | Landfill Stability | 20 |
| 6.1 | General Requirements | 20 |

| | | |
|------------|--|----|
| 6.2 | Shear Strength Parameters of Wastes | 21 |
| 6.3 | Shear Strength Parameters of Interfaces in Composite Liners | 22 |
| 6.4 | Landfill Slope Stability Analysis | 23 |
| 6.5 | Control Measures for Landfill Slope Stability | 24 |
| 7 | Remediation and Expansion for Existing Landfills | 26 |
| 7.1 | General Requirements | 26 |
| 7.2 | Geotechnical Investigation of Waste Mass | 26 |
| 7.3 | Subbase Treatment for Expanded Landfills | 30 |
| 7.4 | Intermediate Liner System | 31 |
| 7.5 | Remediation of Existing Landfills and Pollution Control | 31 |
| 8 | Compacted Clay Liners and Vertical Barriers | 34 |
| 8.1 | General Requirements | 34 |
| 8.2 | Material Selection for Compacted Clay Liners | 34 |
| 8.3 | Control of Moisture Content and Dry Density for Compacted Clay Liners | 34 |
| 8.4 | Construction Quality Control for Compacted Clay Liners | 36 |
| 8.5 | Types of Vertical Barriers and Selection | 37 |
| 8.6 | Depth and Thickness of Vertical Barriers | 37 |
| 8.7 | Control of Construction Quality for Vertical Barriers | 39 |
| 9 | Monitoring for Safety of Landfills | 40 |
| 9.1 | General Requirements | 40 |
| 9.2 | Monitoring of Leachate Level | 41 |
| 9.3 | Monitoring of Surface Horizontal Displacement | 41 |
| 9.4 | Monitoring of Deep Horizontal Displacement | 42 |
| 9.5 | Monitoring of Landfill Settlement | 42 |
| 9.6 | Monitoring of Landfill Gas Pressure | 43 |
| Appendix A | Calculations of Landfill Compression and Parameter Compression | 44 |
| Appendix B | Calculations of Geomembrane Strain | |

| | |
|---|----|
| Due to Localized Subsidence and Design of Reinforcement Layers | 47 |
| Explanation of Wording in This Code | 51 |
| List of Quoted Standards | 52 |
| Addition; Explanation of Provisions | 53 |

1 总 则

1.0.1 为了防止和减少填埋场发生失稳滑坡、填埋气爆炸和火灾、渗沥液渗漏污染周边环境等危害，增加填埋场单位土地面积垃圾填埋量，节约填埋用地，减少渗沥液产量，提高填埋气收集及资源化利用水平，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于填埋场库区工程的岩土工程设计、施工与运行安全监测。

1.0.3 填埋场库区工程设计、施工与运行应充分考虑我国各地区城市生活垃圾特性差异、填埋场工程特点、建设及运行水平，借鉴相关工程经验，做到因地制宜、安全可靠、技术先进、经济合理。

1.0.4 填埋场岩土工程设计、施工与运行安全监测，除应符合本规范规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 垃圾含水率 water content of wastes

生活垃圾在 $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 条件下烘到恒量时所失去水分质量与原生活垃圾总质量的比值。

2.1.2 田间持水量 field capacity

饱和生活垃圾经长时间重力排水后所保持水的重量与总重量的比值。

2.1.3 水力渗透系数 hydraulic conductivity

单位水力梯度下垃圾中的渗流速度。

2.1.4 渗沥液导排层 leachate drainage layer

设置于填埋场底部、边坡或堆体中间，由天然材料或土工合成材料组成，用于导排渗沥液的层状设施。

2.1.5 最佳击实峰值曲线 peak line of optimum compaction

对同一种土料分别进行不同击实能量的击实试验，连接不同击实试验曲线顶点绘制形成的曲线。

2.1.6 排水单元 liquid drainage cell

填埋场内利用基底构建形成的，与周边区域相对分隔，内部地下水或渗沥液独立进行导排的区域。

2.1.7 渗沥液导排层水头 leachate head in leachate drainage layer

以导排层底面为基准面，导排层内渗沥液最大压力对应的水头。

2.1.8 垃圾堆体主水位 main leachate level

在填埋场深部低渗透性垃圾层以上渗沥液长期累积、壅高所形成的浸润面。

2.1.9 垃圾堆体滞水位 *perched leachate level*

垃圾堆体内局部低渗透材料以上独立且连续的饱和垃圾的浸润面。

2.1.10 中间水平导排盲沟 *intermediate horizontal drainage trench*

在填埋至一定高度的堆体表面挖槽建设，由颗粒导排材料、反滤材料、导排管等组成，利用重力流导排后续堆体产生渗沥液的设施，也可兼用于填埋气体收集。

2.1.11 淤堵 *clogging*

生物膜、化学沉积物、小颗粒材料（如粉粒或黏粒）沉积于渗沥液导排系统管道、颗粒材料或土工织物的过程，该过程降低渗沥液导排系统的导排能力。

2.1.12 主压缩 *primary compression*

生活垃圾在附加应力作用下短时间内产生的压缩变形。

2.1.13 次压缩 *secondary compression*

主压缩完成后，垃圾由于降解和蠕变所产生的缓慢而持久的压缩变形。

2.1.14 前期固结应力 *preconsolidation stress*

垃圾在填埋阶段受到的初始压缩应力，一般由初始压实引起。

2.1.15 土工合成材料允许应变特征值 *allowable strain for geosynthetics*

材料拉伸试验测得的最大拉力所对应的应变值，除以安全系数后所得的应变值。

2.1.16 土工材料界面 *interfaces between geosynthetics*

复合衬垫系统中相邻层材料之间的界面，一般包括：碎石/土工织物界面、土工织物/土工膜界面、土工膜/黏土界面、土工膜/土工复合膨润土垫界面、土工膜/土工复合排水网界面、土工复合膨润土垫/黏土界面等。

2.1.17 界面峰值抗剪强度 *peak shear strength of interfaces*

具有应变软化特性的土工材料界面所具有的最大抗剪强

度值。

2.1.18 界面残余抗剪强度 residual shear strength of interfaces

土工材料界面的抗剪强度随变形量增大达峰值后，逐渐软化后的最低值。

2.1.19 警戒水位 warning leachate level

填埋场渗沥液水位上涨到该水位时，填埋场可能发生滑坡。

2.1.20 气体收集率 landfill gas collection ratio

单位时间填埋气收集量与单位时间理论产气量的比值。

2.1.21 中间衬垫系统 intermediate liner system

填埋场扩建工程中以老垃圾堆体为基层的衬垫系统。

2.1.22 垂直防渗帷幕 vertical barriers

利用防渗材料在填埋场周边设置，用于阻止污染物向填埋场外渗漏与扩散的竖向防渗结构。

2.2 符 号

2.2.1 渗沥液产量及水头

F_c ——完全降解垃圾田间持水量；

k ——导排层渗透系数；

L ——允许最大水平排水距离；

M_d ——日均填埋规模；

Q ——渗沥液日均总量；

q_b ——导排层的渗沥液入渗量；

W_c ——垃圾初始含水率。

2.2.2 填埋气收集

C ——填埋气收集设施单位时间填埋气收集量；

χ_i ——对应于填埋场运行情况的填埋气收集率折减系数；

ξ ——对应于填埋场渗沥液水位高度的填埋气收集率折减系数；

η ——填埋气收集率；

β ——填埋气收集设施影响范围面积占已填埋垃圾面积的比例。

2.2.3 填埋场沉降及容量

c ——降解压缩速率；

C_c ——垃圾主压缩指数；

C_a ——垃圾次压缩指数；

C_∞ ——完全降解垃圾的主压缩指数；

S ——垃圾堆体压缩量；

ΔS ——垃圾堆体沉降；

V ——填埋场容量；

γ_0 ——填埋垃圾初始容重；

e_0 ——初始孔隙比；

σ_0 ——前期固结应力。

ϵ_n ——土工合成材料允许应变特征值；

ϵ_r ——土工合成材料最大拉力所对应的应变。

2.2.4 填埋场稳定

c' ——垃圾的有效黏聚力；

c'_p ——土工材料界面的峰值抗剪强度对应的有效黏聚力；

c'_r ——土工材料界面的残余抗剪强度对应的有效黏聚力；

u ——孔隙水压力；

ϕ'_p ——土工材料界面的峰值抗剪强度对应的有效摩擦角；

τ_r ——土工材料界面的残余抗剪强度；

σ ——法向总应力；

τ_f ——垃圾的抗剪强度；

ϕ' ——垃圾的有效内摩擦角；

τ_p ——土工材料界面的峰值抗剪强度；

ϕ'_r ——土工材料界面的残余抗剪强度对应的有效摩擦角。

2.2.5 其他

D_h ——水动力弥散系数；

R_d ——阻滞因子。

3 基本规定

3.0.1 生活垃圾卫生填埋场库区工程应包括：垃圾堆体、场底地基、水平与垂直防渗系统、场底渗沥液导排系统、中间渗沥液导排系统、填埋气收集系统、封场覆盖系统、扩建及治理工程。

3.0.2 填埋场库区工程应进行岩土工程设计和渗流、沉降、稳定验算，并应符合下列规定：

- 1 垃圾堆体设计应进行沉降及稳定验算；
- 2 水平防渗系统和封场覆盖系统设计应进行沉降及稳定验算；
- 3 场底渗沥液导排系统和垃圾堆体中间渗沥液导排系统设计应进行渗流及沉降验算。

3.0.3 填埋场库区治理和扩建工程中的基层处理、中间防渗系统、垂直防渗帷幕、中间渗沥液导排系统、扩建堆体等的岩土工程设计及验算应符合本规范第7章的相关规定。

3.0.4 填埋场库区工程设计前应进行岩土工程勘察，并应符合下列规定：

- 1 新建工程应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021的规定；
- 2 扩建和治理工程应符合本规范第7章的相关规定。

3.0.5 填埋场运行期间及封场后必须进行稳定安全控制，并应符合下列规定：

- 1 应按本规范第9章进行岩土工程安全监测；
- 2 填埋场稳定控制措施应符合本规范第6章的相关规定。

4 填埋场渗流及渗沥液水位控制

4.1 一般规定

4.1.1 填埋场设计和运行应采取措施控制渗沥液导排层水头，降低污染扩散风险；应控制垃圾堆体主水位和垃圾堆体滞水位，提高垃圾堆体边坡稳定性和填埋气收集率。

4.1.2 对于新建填埋场，应根据水位控制要求设计场底渗沥液导排系统、堆体中间渗沥液导排系统等设施；对于存在高水位问题的现有填埋场，应根据稳定控制要求建设抽排竖井、水平导排盲沟等应急和长期水位控制设施。

4.1.3 填埋场应设置有效的填埋气导排设施，控制垃圾堆体内气压，避免气压过大产生垃圾堆体失稳和爆炸。

4.1.4 建设填埋气收集利用工程时，应根据填埋场施工、运行和渗沥液水位评估填埋气收集量，并应采取有效措施提高填埋气收集率。

4.2 垃圾水气传导特性

4.2.1 填埋场渗沥液总量计算和渗沥液导排设计，应选用合理的初始含水率、田间持水量和渗透系数等水力特性参数。

4.2.2 垃圾水力特性参数宜根据当地或类似填埋场的测试数据选取。无测试数据时，垃圾初始含水率和田间持水量可根据表 4.2.2 选取。

4.2.3 I 类、II 类填埋场运行期间，宜定期测试垃圾初始含水率，I 类填埋场测试频率宜为 2 次/年，II 类填埋场测试频率宜为 1 次/年。

4.2.4 垃圾含水率测试方法应符合现行行业标准《生活垃圾采样和分析方法》CJ/T 313 的规定，烘干温度宜为 $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

表 4.2.2 垃圾初始含水率和田间持水量

| (<无机物含量<30%时取值) | | | | | | |
|-----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 所在地年降雨量 (mm) | 初始含水率 (%) | | | | | 田间持水量 (%) |
| | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | 全年 | |
| 年降雨量≥800 | 45~60 | 55~65 | 45~60 | 40~55 | 50~60 | 30~45 |
| 400≤年降雨量<800 | 35~50 | 50~65 | 35~50 | 30~45 | 40~55 | 30~45 |
| 年降雨量<400 | 20~35 | 35~50 | 20~35 | 15~30 | 20~40 | 30~45 |
| (<无机物含量≥30%时取值) | | | | | | |
| 所在地年降雨量 (mm) | 初始含水率 (%) | | | | | 田间持水量 (%) |
| | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | 全年 | |
| 年降雨量≥800 | 35~50 | 45~60 | 35~50 | 30~45 | 40~55 | 30~45 |
| 400≤年降雨量<800 | 20~35 | 35~50 | 20~35 | 15~30 | 20~40 | 30~45 |
| 年降雨量<400 | 15~25 | 25~40 | 15~25 | 15~25 | 15~30 | 30~45 |

注：1 垃圾无机物含量高或经中转脱水时，初始含水率取低值；

2 垃圾降解程度高或埋深大时，田间持水量取低值。

4.2.5 垃圾田间持水量宜采用压力板法测试，应以基质吸力 10kPa 对应的含水率作为田间持水量。

4.2.6 垃圾饱和和水力渗透系数宜采用现场抽水试验测定，试验方法应符合现行行业标准《水利水电工程钻孔抽水试验规程》SL 320 的规定；宜分层测试和计算不同埋深垃圾的渗透系数；抽水井成井直径不宜小于 800mm，井管直径不宜小于 200mm，井管宜外包反滤材料，井孔与井管之间宜充填洗净的粗砂或砾石。

4.2.7 垃圾饱和和水力渗透系数可采用室内渗透试验测定，试样直径不宜小于 10cm。当采用现场钻孔试样测试时，宜在现场实际应力水平下测试；当采用人工配制试样测试时，宜在不同的应力水平下测试。

4.2.8 垃圾的气体固有渗透系数取值范围宜为 $1 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \sim 1$

$\times 10^{-9} \text{m}^2$ ，饱和度较大时宜取小值。

4.3 填埋场渗沥液总量计算

4.3.1 填埋场渗沥液日均总量应按下列式计算：

$$Q = \frac{I}{1000} \times (C_{L1}A_1 + C_{L2}A_2 + C_{L3}A_3) + \frac{M_d \times (W_e - F_e)}{\rho_w} \quad (4.3.1)$$

式中：Q——渗沥液日均总量 (m^3/d)；

I——降雨量 (mm/d)，应采用最近不少于 20 年的日均降雨量数据；

A_1 ——填埋作业单元汇水面积 (m^2)；

C_{L1} ——填埋作业单元渗出系数，一般取 0.5~0.8；

A_2 ——中间覆盖单元汇水面积 (m^2)；

C_{L2} ——中间覆盖单元渗出系数，宜取 (0.4~0.6) C_{L1} ；

A_3 ——封场覆盖单元汇水面积 (m^2)；

C_{L3} ——封场覆盖单元渗出系数，一般取 0.1~0.2；

W_e ——垃圾初始含水率 (%)；

M_d ——日均填埋规模 (t/d)；

F_e ——完全降解垃圾田间持水量 (%)，应符合本规范表 4.2.2 的规定；

ρ_w ——水的密度 (t/m^3)。

4.4 场底渗沥液导排设计与水头控制

4.4.1 填埋场库底和边坡应建设有效的渗沥液导排系统，其结构形式应符合现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 的规定，填埋场渗沥液导排层水头不应大于 30cm。

4.4.2 填埋场场底应设置适宜的排水单元；排水单元中的渗沥液导排盲沟可设置为“直线形”或“树叉形”，有条件时宜采用“直线形”；排水单元内最大水平排水距离应小于允许最大水平排水距离 L。

4.4.3 允许最大水平排水距离 L 应按下列公式计算：

$$L = \frac{D_{\max}}{j \frac{\sqrt{\tan^2 \alpha + 4q_h/k} - \tan \alpha}{2 \cos \alpha}} \quad (4.4.3-1)$$

$$j = 1 - 0.12 \exp \left\{ - \left[0.625 \log \left(\frac{1.6q_h}{k \tan^2 \alpha} \right) \right]^2 \right\} \quad (4.4.3-2)$$

$$q_h = \frac{Q}{A \times 86400} \quad (4.4.3-3)$$

式中： L ——允许最大水平排水距离（m）；

D_{\max} ——渗沥液导排层允许的最大水头高度（m），取 0.3m；

k ——导排层渗透系数（m/s），宜取 1×10^{-3} m/s \sim 1×10^{-4} m/s；

α ——坡角（°）， $\alpha = \arctan s$ ， s 为底部衬垫系统的坡度（%）；

j ——无量纲修正系数；

q_h ——导排层的渗沥液入渗量（m/s）；

A ——场底渗沥液导排层面积（m²）。

4.4.4 填埋场所在地区年平均降雨量大于 800mm 时，填埋场场底渗沥液导排层厚度不应小于 500mm，其他情况下不应小于 300mm；渗沥液导排层与垃圾之间宜设置反滤层。

4.4.5 渗沥液导排层颗粒材料应符合下列要求：

1 应采用粒径 20mm \sim 60mm 的卵石、砾石、礧石或碎石等硬质材料；

2 初始渗透系数不应小于 1×10^{-3} m/s；

3 岩石抗压强度应符合现行国家标准《建筑用卵石、碎石》GB/T 14685 的规定，压碎指标宜达到 I 类指标要求；

4 碳酸钙含量不应大于 5%；

5 铺设前应洗净。

4.4.6 渗沥液导排系统采用土工复合排水网等材料时，宜验算其长期导排性能；库底边坡设置渗沥液导排层的上覆保护层不宜采用低渗透性材料。

4.4.7 渗沥液导排主管出口宜设置端头井等反冲洗维护通道。

4.5 垃圾堆体水位及控制

4.5.1 填埋场设计时，宜根据垃圾田间持水量、水力渗透系数和渗沥液导排层渗透系数等水力特性参数，采用水量平衡法或渗流分析法估算堆体水位；当垃圾堆体主水位的计算结果超过警戒水位时，应设置长期水位控制设施，包括中间渗沥液导排盲沟、抽排竖井等，警戒水位的确定应符合本规范第6.4.1条的规定。

4.5.2 现有高水位填埋场应设置长期水位控制设施，确保垃圾堆体主水位处于警戒水位以下。

4.5.3 垃圾堆体主水位接近警戒水位或存在堆体失稳隐患时，应及时采取应急降水措施，宜采用小口径抽排竖井。

4.5.4 中间渗沥液导排盲沟应符合下列要求：

1 宜随填埋堆高分层建设，竖向间距宜为10m~15m，横向间距宜为50m~60m；靠近堆体边坡50m范围内宜适当减小导排盲沟间距以加强渗沥液导排；

2 断面面积不宜小于1m×1m，沟周边宜设置反滤层，内宜铺洗净颗粒材料，沟中宜设导排管，管径不宜小于250mm；

3 应验算中间渗沥液导排盲沟沉降后排水坡度，避免产生倒坡；

4 宜设置端头井等反冲洗维护通道。

4.5.5 渗沥液抽排竖井应符合下列要求：

1 井间距不宜大于2倍单井影响半径，需强化降水效果时可适当加密布置；

2 成井直径宜为800mm~1000mm，井管直径宜为200mm，管外应包反滤材料，井管与井壁间宜充填洗净碎石；

3 宜在井壁内设置钢筋笼并宜采用高强度刚性井管，以减少堆体侧向位移和沉降的影响；

4 宜采用压缩空气排水。

4.5.6 建设中间渗沥液导排盲沟及抽排竖井等设施时，在垃圾堆体开槽和钻孔应避免塌方、火灾、爆炸、中毒等安全事故。

4.6 填埋气收集及控制措施

4.6.1 填埋气收集量宜根据填埋场运行情况与渗沥液水位高度按下式计算：

$$C = Q_t \eta \beta \quad (4.6.1-1)$$

$$\eta = 85\% - \sum_{i=1}^6 \chi_i - \xi \quad (4.6.1-2)$$

式中：C——填埋气收集设施单位时间填埋气收集量 (m³/a)；

Q_t——填埋场单位时间理论产气量 (m³/a)，计算方法应符合现行行业标准《生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术规范》CJJ 133 的规定；

η——填埋气收集率 (%)；

β——填埋气收集设施影响范围面积占已填埋垃圾面积的比例 (%)；

χ_i——对应于填埋场运行情况的填埋气收集率折减系数 (%)，按表 4.6.1 取值；

ξ——对应于填埋场渗沥液水位高度的填埋气收集率折减系数 (%)，按表 4.6.1 取值。

表 4.6.1 填埋气收集率折减系数

| 折减系数 | 填埋场运行情况和渗沥液水位高度 | 取值 (%) |
|----------------|--------------------------|--------|
| χ ₁ | 填埋垃圾未定期压实 | 2~4 |
| χ ₂ | 填埋场无集中垃圾倾倒区域 | 4~8 |
| χ ₃ | 垃圾平均填埋厚度 10m 以下 | 6~10 |
| χ ₄ | 新填埋垃圾未临时覆盖 | 6~10 |
| χ ₅ | 已填埋至中期或设计标高的区域未实施中期或封场覆盖 | 4~6 |
| χ ₆ | 填埋场底部未铺设土工膜或黏土防渗层 | 3~5 |

续表 4.6.1

| 折减系数 | 填埋场运行情况和渗沥液水位高度 | 取值 (%) |
|------------|--|--------|
| ϵ | 渗沥液水位高度与垃圾填埋厚度比值 $<30\%$ | 0 |
| | $30\% \leq$ 渗沥液水位高度与垃圾填埋厚度比值 $\leq 70\%$ | 0~25 |
| | 渗沥液水位高度与垃圾填埋厚度比值 $>70\%$ | 25~40 |

注：有配套渗沥液水位降低措施时， ϵ 取小值。

4.6.2 填埋气收集利用工程设计时，宜进行现场抽气试验，测定当前填埋气收集量，预测未来填埋气收集量。填埋场渗沥液水位较高时，宜进行不同渗沥液水位降幅条件下的现场抽气试验，提出渗沥液水位降低要求。

4.6.3 渗沥液水位过高的填埋场，宜采取水位降低措施，增强垃圾堆体导气性能，提高填埋气收集率。渗沥液水位降低措施应符合本规范第 4.5 节的规定。

4.6.4 填埋气抽排竖井宜符合下列要求：

1 深度不宜小于垃圾填埋厚度的 $2/3$ ，井底距场底的距离不宜小于 5m；

2 平面布置应根据抽排竖井影响半径等因素确定，井间距宜为井深的 (1.5~2.5) 倍，且不应大于 50m；

3 渗沥液水位较高时，宜采用兼具抽水和集气功能的竖井。

4.6.5 应加强填埋作业管理与覆盖，提高填埋气收集率。

5 填埋场沉降及容量

5.1 一般规定

5.1.1 填埋场库区工程设计时，应验算堆体和场底地基沉降对封场覆盖系统、衬垫系统、渗沥液导排系统、地下水导排设施及导气系统服役性能的影响。堆体和场底地基沉降完成后，渗沥液导排系统和地下水导排设施应满足排水坡度要求，衬垫系统、封场覆盖系统及排水、排气管道应满足抗拉要求。

5.1.2 填埋场库区填埋量和运行年限计算时，应考虑垃圾堆体压缩的影响。

5.1.3 当填埋场位于可压缩地基上或现有填埋场竖向扩建时，应验算基层的沉降。

5.1.4 填埋场地基沉降计算方法应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的规定。

5.2 垃圾堆体沉降计算

5.2.1 垃圾堆体压缩量应按下式计算，计算过程应符合本规范附录 A 的规定：

$$S = \sum_{i=1}^n (S_{pi} + S_{si}) \quad (5.2.1)$$

式中：S——垃圾堆体压缩量 (m)；

n——垃圾分层总数，分层厚度宜为 2m~5m，堆体内浸润面应作为分层界面；

S_{pi} ——第 i 层垃圾的主压缩量 (m)；

S_{si} ——第 i 层垃圾的次压缩量 (m)。

5.2.2 垃圾主压缩量应按下列公式计算：

$$S_{pi} = H_i \frac{C_c}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right) \quad (5.2.2-1)$$

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log(1000/\sigma_0)} \quad (5.2.2-2)$$

式中： H_i ——第 i 层垃圾填埋时的初始厚度 (m)；

σ_0 ——垃圾前期固结应力 (kPa)，无试验数据时取 30kPa；

σ_i ——第 i 层垃圾所受上覆有效应力 (kPa)，即第 i 层及以上垃圾有效自重应力，计算应符合本规范附录 A 的规定；

C_c ——垃圾主压缩指数，宜采用室内大尺寸新鲜垃圾压缩试验测定，无试验数据时，主压缩指数可采用式 (5.2.2-2) 计算；

e_1 ——在 1000kPa 压力下垃圾孔隙比，宜为 0.8~1.2，有机质含量高的垃圾取高值；

e_0 ——初始孔隙比，应符合本规范附录 A 的规定。

5.2.3 垃圾次压缩量应采用应力-降解压缩模型或 Sowers 次压缩模型计算。填埋场库区设施的不均匀沉降验算时，宜采用应力-降解压缩模型。

1 采用应力-降解压缩模型时，垃圾次压缩量应按下列公式计算：

$$S_{si} = H_i \epsilon_{dc}(\sigma_i)(1 - e^{-\alpha t}) \quad (5.2.3-1)$$

$$\epsilon_{dc}(\sigma_i) = \begin{cases} \epsilon_{dc}(\sigma_0) & \text{当 } \sigma_i \leq \sigma_0 \\ \epsilon_{dc}(\sigma_0) - \frac{C_c - C_{\infty}}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0}\right) & \text{当 } \sigma_i > \sigma_0 \end{cases} \quad (5.2.3-2)$$

式中： $\epsilon_{dc}(\sigma_i)$ ——上覆应力 σ_i 长期作用下垃圾降解压缩应变与蠕变应变之和；

$\epsilon_{dc}(\sigma_0)$ ——前期固结应力 σ_0 长期作用下垃圾降解压缩应变与蠕变应变之和，宜采用室内压缩试验测定，无试验数据时宜取 20%~30%，有机质含量高的垃圾取高值；

C_{∞} ——完全降解垃圾的主压缩指数，宜采用室内压缩试验确定，无试验数据时 $C_{\infty}/(1+e_0)$ 宜取 0.15；

c ——降解压缩速率(1/月)，宜取 0.005/月~0.015/月，有机物含量高的垃圾及适宜降解环境取高值；

t_i ——第 i 层垃圾的填埋龄期(月)。

2 采用 Sowers 次压缩模型时，垃圾次压缩量应按下式计算：

$$S_{si} = H_i \frac{C_a}{1+e_0} \log(t_i/t_0) \quad (5.2.3-3)$$

式中： C_a ——垃圾次压缩指数，无试验数据时修正次压缩指数 $C_a/(1+e_0)$ 可取：新鲜垃圾 0.04~0.08，已填埋垃圾 0.02~0.05，有机质含量高的垃圾取高值；

t_0 ——垃圾主压缩完成时间(月)，宜为 1 个月。

5.2.4 垃圾堆体沉降应按下式计算：

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad (5.2.4)$$

式中： ΔS ——垃圾堆体沉降(m)；

S_2 ——计算时刻下卧垃圾总压缩量(m)，应按式(5.2.1)计算；

S_1 ——填埋至该点时下卧垃圾总压缩量(m)，应按式(5.2.1)计算。

5.3 填埋量计算

5.3.1 填埋场的填埋量确定应考虑垃圾堆体的压缩量，并按下列公式计算：

$$W = \sum_{i=1}^n (A_i \sum_{j=1}^m \gamma_{0ij} H_{ij}) \quad (5.3.1-1)$$

$$\sum_{j=1}^m (H_{ij} - S_{ij}) = D_i \quad (5.3.1-2)$$

式中： W ——填埋场填埋量 (t)；
 n ——填埋场被划分的区域总数；
 A_i ——区域 i 的平面面积 (m^2)；
 m ——区域 i 分层填埋的总层数；
 γ_{0ij} ——区域 i 第 j 层填埋垃圾初始容重 (kN/m^3)，应符合本规范附录 A 的规定；
 H_{ij} ——不考虑压缩时区域 i 第 j 层垃圾的初始填埋厚度 (m)；
 D_i ——区域 i 堆体的平均设计有效填埋高度 (m)， $D_i = V'_i / A_i$ ，其中 V'_i 为区域 i 的有效库容；
 S_{ij} ——区域 i 填埋至 D_i 高度时第 j 层垃圾的压缩量 (m)，计算应符合本规范附录 A 的规定。

5.3.2 填埋场平均单位库容填埋量宜按下式计算：

$$Q_w = \frac{W}{V'} \quad (5.3.2)$$

式中： Q_w ——填埋场平均单位库容填埋量 (t/m^3)；
 V' ——填埋场有效库容 (m^3)。

5.4 填埋场库区设施不均匀沉降验算

5.4.1 下列填埋场库区设施应进行不均匀沉降验算：

- 1 可压缩地基上填埋场底部渗沥液导排系统和防渗系统；
- 2 垃圾堆体内部的水平集气井、渗沥液导排系统和中间衬垫系统；
- 3 封场覆盖系统。

5.4.2 不均匀沉降计算应沿若干条选定的沉降线进行，沉降线应沿填埋场库区设施布置，并应考虑下列位置：

- 1 填埋场底部高程及表面高程剧烈变化的位置；
- 2 填埋场基层下存在回填土、污泥库等特殊区域；
- 3 两个相邻填埋分区交界线附近。

5.4.3 沉降线上沉降点应符合下列布置要求：

- 1 宜均匀布置；
 - 2 沉降点间距不宜大于 20m，总数不宜少于 5 个；
 - 3 复杂地形处应增加沉降点。
- 5.4.4 沉降后两个相邻沉降点之间的最终坡度宜按下式计算：

$$\tan\alpha_{Fn1} = \frac{X \cdot \tan\alpha_{In1} - \Delta S'}{X} \quad (5.4.4-1)$$

式中： α_{Fn1} ——沉降后两个相邻沉降点之间的最终坡度（°）；

α_{In1} ——两个相邻沉降点之间的初始坡度（°）；

X ——两个相邻沉降点之间的水平距离（m）；

$\Delta S'$ ——两个相邻沉降点之间的沉降差（m）。

沉降后两个相邻沉降点之间的拉伸应变宜按下列公式计算：

$$\epsilon = \frac{L_{Fn1} - L_{In1}}{L_{In1}} \cdot 100\% \quad (5.4.4-2)$$

$$L_{In1} = (X^2 + X^2 \cdot \tan^2\alpha_{In1})^{1/2} \quad (5.4.4-3)$$

$$L_{Fn1} = [X^2 + (X \cdot \tan\alpha_{In1} - \Delta S')^2]^{1/2} \quad (5.4.4-4)$$

式中： ϵ ——沉降后两个相邻沉降点之间的拉伸应变（%）；

L_{In1} ——两个相邻沉降点之间的初始距离（m）；

L_{Fn1} ——沉降后两个相邻沉降点之间的最终距离（m）。

5.4.5 土工膜由不均匀沉降引起的拉伸应变应小于其允许应变特征值，允许应变特征值应按本规范附录 B 中的式（B.0.1）确定。土工膜还应进行由下卧堆体局部沉陷引起的拉伸应变验算，并应符合本规范附录 B 的规定。

5.4.6 填埋场库区设施初始坡度和沉降完成后的最终坡度应符合下列规定：

1 底部渗沥液导排管的初始坡度不宜小于 2%，沉降完成后的最终坡度不宜小于 1%；

2 地下水导排设施的最终坡度不宜小于 1%；

3 垃圾堆体内渗沥液导排管的最终坡度不宜小于 1%；

4 封场覆盖系统的最终坡度不宜小于 2%。

5.5 填埋场不均匀沉降控制和增容措施

5.5.1 当填埋场地基沉降导致底部渗沥液导排系统和防渗系统的坡度和拉伸应变不符合本规范第 5.4.5 条及第 5.4.6 条规定时，应对其地基进行处理以满足要求。

5.5.2 垃圾填埋应经过充分压实，压实后的容重不宜小于 9kN/m^3 。

5.5.3 填埋场运行期间应尽量降低填埋场内渗沥液水位，其控制措施应符合本规范第 4.5 节的规定。

5.5.4 填埋场运行期间宜采取措施加速垃圾堆体的降解，以增加填埋量和减小封场后沉降。

5.5.5 垃圾堆体应控制填埋分区界面处的不均匀沉降，宜合理分区填埋。

5.5.6 堆体内部和表面的管线宜选取高密度聚乙烯管材。

6 填埋场稳定

6.1 一般规定

6.1.1 应对填埋场施工、运行期间及封场后的下列边坡类型进行稳定验算：

- 1 地基及库区边坡；
- 2 垃圾坝；
- 3 垃圾堆体；
- 4 封场覆盖系统；
- 5 其他可能出现失稳隐患的边坡。

6.1.2 垃圾堆体边坡工程应根据坡高及失稳后可能造成后果的严重性等因素，按照表 6.1.2 的规定确定安全等级。

表 6.1.2 垃圾堆体边坡工程安全等级

| 安全等级 | 堆体边坡坡高 (m) |
|------|------------------|
| 一级 | $H \geq 60$ |
| 二级 | $30 \leq H < 60$ |
| 三级 | $H < 30$ |

注：1 山谷形填埋场的垃圾堆体边坡坡高是以垃圾坝底部为基准的边坡高度，平原形填埋场的垃圾堆体边坡坡高是指以原始地面为基准的边坡高度；

- 2 针对下列情况安全等级应提高一级：垃圾堆体失稳将使下游重要城镇、企业或交通干线遭受严重灾害；填埋场地基为软弱土或其他特殊土；山谷形填埋场库区顺坡向边坡坡度大于 10° 。

6.1.3 垃圾堆体边坡的运用条件应根据其工作状况、作用力出现的概率和持续时间的长短，分为正常运用条件、非常运用条件 I 和非常运用条件 II 三种：

- 1 正常运用条件为填埋场工程投入运行后，经常发生或长时间持续的情况，包括：(1) 填埋场填埋过程；(2) 填埋场封场

后；(3) 填埋场渗沥液水位处于正常水位；

2 非常运用条件 I 为遭遇强降雨等引起的渗沥液水位显著上升；

3 非常运用条件 II 为正常运用条件下遭遇地震。

6.1.4 填埋场边坡抗滑稳定最小安全系数应符合表 6.1.4 的规定。

表 6.1.4 垃圾堆体边坡抗滑稳定最小安全系数

| 运用条件 | 安全等级 | | |
|-----------|------|------|------|
| | 一级 | 二级 | 三级 |
| 正常运用条件 | 1.35 | 1.30 | 1.25 |
| 非常运用条件 I | 1.30 | 1.25 | 1.20 |
| 非常运用条件 II | 1.15 | 1.10 | 1.05 |

注：1 运用条件应符合本规范第 6.1.3 条的规定；

2 除垃圾堆体边坡外其他类型边坡的安全系数控制标准应符合现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》GB 50330 的相关规定；

3 当垃圾堆体边坡等级为一级且符合表 6.1.2 中提级条件时，安全系数应根据表 6.1.4 相应的安全系数提高 10%。

6.1.5 垃圾堆体边坡应防止由于垃圾堆体气压过高引起的失稳。

6.2 垃圾抗剪强度指标

6.2.1 垃圾的抗剪强度指标应采用现场试验、室内直剪试验、室内三轴试验、工程类比或反演分析等方法确定。无试验条件时，一级垃圾堆体边坡的垃圾抗剪强度指标可同时采用工程类比、反演分析等方法综合确定，二级和三级垃圾堆体边坡的垃圾抗剪强度指标可按工程类比等方法确定。

6.2.2 垃圾抗剪强度试验时，试样宜现场钻孔取样或人工配制；直剪试验的试样平面尺寸不宜小于 30cm×30cm，三轴试验的试样直径不宜小于 8cm；试验所施加的应力范围应根据边坡的实际受力确定。

6.2.3 垃圾抗剪强度宜采用有效黏聚力和有效内摩擦角表示，

直按下式计算：

$$\tau_t = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (6.2.3)$$

式中： τ_t ——垃圾的抗剪强度 (kPa)；

σ ——法向总应力 (kPa)；

u ——孔隙水压力 (kPa)；

c' ——垃圾的有效黏聚力 (kPa)；

ϕ' ——垃圾的有效内摩擦角 ($^{\circ}$)。

6.3 土工材料界面强度指标

6.3.1 土工材料界面的抗剪强度指标应采用大尺寸界面直剪试验或斜坡试验及工程类比等方法确定。一级垃圾堆体边坡的土工材料界面抗剪强度指标宜采用试验方法确定，二级和三级垃圾堆体边坡的土工材料界面抗剪强度指标可按工程类比确定。

6.3.2 试样应采用在填埋场工程中实际使用的土工材料，试样平面尺寸不宜小于 30cm×30cm，试验所施加的应力范围应根据土工材料界面的实际受力确定。

6.3.3 土工材料界面的抗剪强度指标应包括峰值抗剪强度指标及残余抗剪强度指标。

1 峰值抗剪强度可按下式计算：

$$\tau_p = c'_p + (\sigma - u) \tan \phi'_p \quad (6.3.3-1)$$

式中： τ_p ——土工材料界面的峰值抗剪强度 (kPa)；

c'_p ——土工材料界面的峰值抗剪强度对应的有效黏聚力 (kPa)；

ϕ'_p ——土工材料界面的峰值抗剪强度对应的有效摩擦角 ($^{\circ}$)。

2 残余抗剪强度可按下式计算：

$$\tau_r = c'_r + (\sigma - u) \tan \phi'_r \quad (6.3.3-2)$$

式中： τ_r ——土工材料界面的残余抗剪强度 (kPa)；

c'_r ——土工材料界面的残余抗剪强度对应的有效黏聚力 (kPa)；

ϕ'_r ——土工材料界面的残余抗剪强度对应的有效摩擦角(°)。

6.3.4 稳定分析时,复合衬垫系统中土工材料界面强度指标取值宜符合下列要求:宜取最小峰值强度界面对应的强度指标,库区基底坡度大于 10° 区域宜采用其残余强度指标,库区基底坡度小于 10° 区域宜采用其峰值强度指标。

6.4 填埋场边坡稳定验算

6.4.1 填埋场库区垃圾堆体必须进行边坡稳定验算,并应符合下列规定:

1 应验算每填高20m后垃圾堆体边坡和封场后垃圾堆体边坡的稳定性;

2 应验算的破坏模式包括通过垃圾堆体内部的滑动破坏、通过垃圾堆体内部与下卧地基的滑动破坏、部分或全部沿土工材料界面的滑动破坏;

3 应采用摩根斯坦-普赖斯法验算,稳定最小安全系数应符合本规范第6.1.4条的规定;

4 应确定每填高20m后垃圾堆体边坡和封场后垃圾堆体边坡的警戒水位,其所对应的边坡稳定最小安全系数应取表6.1.4中非正常运用条件I相应的值。

6.4.2 稳定计算方法应根据边坡类型确定,并应符合下列要求:

1 填埋场地基边坡稳定的计算方法应符合现行行业标准《水利水电工程边坡设计规范》SL 386的相关规定;

2 垃圾坝的稳定计算方法应针对坝型采用相应的规范,坝后水压力和土压力取值应根据填埋场的实际运行情况和可能出现的最不利情况确定;

3 垃圾堆体边坡稳定计算方法应符合本规范第6.4.1条的规定;

4 封场覆盖系统的稳定分析宜采用无限边坡稳定分析法或双楔体法,验算无渗透水流和完全饱和时的安全系数;

5 当边坡破坏机制复杂时，宜采用有限元法或上述合适的方法分析。

6.4.3 当填埋场存在垃圾堆体滞水位时，应验算滞水位引起的局部失稳。

6.4.4 当填埋场存在污泥库时，应对污泥库及其周边和上覆垃圾堆体边坡进行稳定分析。

6.4.5 处于设计地震水平加速度 $0.1g$ 及其以上地区的一级、二级垃圾堆体边坡和处于 $0.2g$ 及其以上地区的三级垃圾堆体边坡，应进行抗震稳定计算，宜采用拟静力法，并应符合现行行业标准《水利水电工程边坡设计规范》SL 386 的有关规定。

6.5 填埋场稳定控制措施

6.5.1 填埋场地基的稳定控制措施应符合现行行业标准《水利水电工程边坡设计规范》SL 386 的规定；存在软基、泉眼和岩溶等不良地质条件时，应采用有效措施进行地基处理。

6.5.2 垃圾堆体最大边坡坡度不应大于 $1:3$ ，中间平台设置应符合现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 的规定，当不满足稳定安全要求时可调整中间平台的间隔及宽度。

6.5.3 当沿土工材料界面滑移的垃圾堆体边坡稳定验算不满足要求时，应优化基底形状、垃圾堆体体型及衬垫系统材料和结构。

6.5.4 填埋场运行过程中应选择合理的填埋次序，宜先填埋库区底部再填埋斜坡区，避免出现易失稳的边坡形式。

6.5.5 填埋场运行期间和封场后，必须监测垃圾堆体主水位并控制其在警戒水位之下。

6.5.6 当填埋场垃圾堆体主水位接近或超过警戒水位时，应采取下列降低渗沥液水位、提高边坡稳定性的措施：

- 1 应应急降水，实施方法应符合本规范第 4.5 节的规定；

- 2 转移坡体表面应铺膜防渗及导排地表水；
 - 3 应坡顶减载与坡脚反压。
- 6.5.7 应采取有效措施降低垃圾堆体内的气体压力以减少垃圾堆体边坡失稳风险。

7 填埋场治理及扩建

7.1 一般规定

7.1.1 当填埋场存在安全隐患或未达到现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 规定的污染控制要求时，应进行治理。

7.1.2 现有填埋场可进行水平向、竖向或两者兼有的扩建，扩建时应应对现有填埋场进行治理和改造，扩建后的填埋场应符合现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 的规定。

7.1.3 填埋场治理及扩建工程设计前，应对现有垃圾堆体进行岩土工程勘察。

7.2 填埋场治理及扩建岩土工程勘察

7.2.1 填埋场治理及扩建岩土工程勘察除应符合本规范的规定外，尚应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的规定。

7.2.2 填埋场治理及扩建岩土工程勘察等级应根据本规范表 6.1.2 的堆体边坡工程安全等级划分为三个等级：一级垃圾堆体边坡工程对应甲级，二级垃圾堆体边坡工程对应乙级，三级垃圾堆体边坡工程对应丙级。

7.2.3 填埋场治理及扩建岩土工程勘察的范围应包括垃圾堆体、垃圾坝、防渗系统、渗沥液导排系统、相关的管线、竖井等填埋场库区设施。当填埋场的原勘察报告不能满足治理及扩建工程设计要求时，应开展必要的补充勘察。

7.2.4 工程勘察前，应搜集下列技术资料：

1 现有填埋场原勘察、设计、施工相关资料，包括场底地基、垃圾坝、防渗系统、渗沥液导排系统、雨污分流系统、填埋

气收集系统等勘察、设计与施工资料；

2 现有填埋场运行相关资料，包括填埋总量、填埋分区、填埋作业方式、堆体填埋过程及后期发展规划；

3 填埋场运行期间城市生活垃圾组分和填埋量及其变化，填埋的其他废弃物种类及填埋量；

4 填埋场垃圾降解环境和条件，填埋场各系统工作状况，填埋场环境监测结果和其他填埋场监测资料；

5 当地气候、气象条件，包括多年平均降雨量、年最大降雨量、月最大降雨量；

6 山谷形填埋场的汇水面积、地表径流和地下补给量、多年一遇洪峰流量；

7 活动断层和抗震设防烈度；

8 邻近的水源地保护区、水源开采情况和环境保护要求。

7.2.5 垃圾堆体的岩土工程勘察，应着重查明下列内容：

1 堆体地形、地貌特征、厚度、体积、下卧地基或基岩的埋藏条件；

2 堆体垃圾的组分、密实程度、堆积规律和成层条件；

3 填埋垃圾的工程特性和生化降解特性；

4 堆体内渗沥液水位分布形式及其变化规律；

5 当场内填埋了污泥、垃圾焚烧灰等废弃物时，应查明其体量、埋深及工程特性；

6 现状堆体的稳定性，继续扩建至设计高度的适宜性和稳定性；

7 堆体在地震作用下的稳定性；

8 堆体沉降及侧向变形，导致中间衬垫系统、封场覆盖系统及其他设施失效的可能性；

9 垃圾渗沥液产量、填埋气产量及压力；

10 填埋场扩建工程可能产生的环境影响。

7.2.6 垃圾堆体岩土工程勘察应配合工程建设分阶段进行，可分为初步勘察和详细勘察：

1 初步勘察应以工程地质测绘为主，并应进行必要的勘探工作，对拟扩建和治理工程的总平面布置、场地的稳定性、变形、废弃物对环境的影响等进行初步评价，并应提出建议；

2 详细勘察应采用勘探、原位测试和室内试验等手段进行，地质条件复杂地段应进行工程地质测绘，获取工程设计所需的参数，提出设计、施工和监测工作的建议，应评价不稳定地段和环境影响，应提出治理建议。

7.2.7 垃圾堆体工程地质测绘的比例尺，初步勘察宜为 1 : 2000~1 : 5000,详细勘察不应小于 1 : 1000。

7.2.8 初步勘察的勘探线、勘探点间距可按表 7.2.8 确定，局部异常地段应加密。

表 7.2.8 初步勘察的勘探线、勘探点间距

| 垃圾堆体复杂程度等级 | 勘探线间距 | 勘探点间距 |
|------------|------------|-----------|
| 复杂 | 100m | 50m~100m |
| 中等复杂 | 200m | 100m~200m |
| 简单 | 不少于 5 个勘探点 | |

- 注：1 简单垃圾堆体：填埋物为比较单一的城市生活垃圾且其组分变化不显著；
 2 复杂垃圾堆体：填埋物种类较多，除城市生活垃圾以外还有城市污水污泥等废弃物，或垃圾填埋过程大量采用低渗透性的中间覆土；
 3 中等复杂垃圾堆体：除 1 和 2 以外的情况。

7.2.9 垃圾堆体详细勘察应符合下列规定：

1 勘探线宜平行于现有堆体边坡走向、扩建堆体及其他关键填埋场库区设施的轴线布置，详细勘察勘探点间距可按表 7.2.9 确定，局部地形、地质条件异常地段应加密；

表 7.2.9 详细勘察勘探点间距

| 垃圾堆体复杂程度等级 | 勘探点间距 |
|------------|----------|
| 复杂 | 30m~50m |
| 中等复杂 | 50m~100m |
| 简单 | 不少于 5 个 |

注：垃圾堆体复杂程度等级应符合本规范第 7.2.8 条的规定。

2 勘探孔的深度应满足稳定、变形和渗漏分析的要求。对于场底无衬垫系统的填埋场，勘探孔的深度应穿透堆体；对于场底有衬垫系统的填埋场，勘探孔的最深处距离衬垫系统不应小于5m；

3 与稳定、渗漏有关的关键地段，应加密加深勘探孔或专门布置勘探工作；

4 垃圾堆体的查明内容应符合本规范第7.2.5条的规定，垃圾堆体的水文地质勘察应符合本规范第7.2.10条的规定。

7.2.10 详细勘察应对垃圾堆体进行专门的水文地质勘察，应包括下列内容：

1 查明堆体中含水层和隔水层的埋藏条件，包括渗沥液水位、承压情况、流向及这些条件的变化幅度，当堆体含多层滞水位时，必要时分层测量滞水位，并查明互相之间的补给关系；

2 查明垃圾填埋、覆土及渗沥液导排系统淤堵等对渗沥液赋存和渗流状态的影响；必要时应设置观测孔，或在不同深度处埋设孔隙水压力计，量测水头随深度的变化；

3 查明堆体可能存在碎石盲沟、粗粒料堆积体等形成的优势透水通道，以及渗沥液导排设施淤堵程度；

4 通过现场试验，测定不同埋深垃圾的水力渗透系数等水文地质参数。

7.2.11 勘探方法应根据填埋垃圾及覆盖层土的性质确定。对于含有建筑垃圾和杂填土的垃圾堆体，宜采用钻探取样和重型动力触探相结合的方法。勘探时应采取措施避免填埋气发生爆炸或火灾事故。

7.2.12 填埋场治理及扩建岩土工程勘察的工程评价应包括下列内容：

1 现有堆体及扩建堆体整体稳定性和局部稳定性；

2 现有堆体沉降及侧向变形，及其导致中间衬垫系统、封场覆盖系统及其他设施失效的可能性；

3 堆体渗沥液水位升高、填埋气产量及气压、渗沥液与场

底岩土体相互作用、斜坡上衬垫系统土工材料界面抗剪强度软化、污泥库等不良地质作用及其影响；

4 渗沥液污染物的渗漏与扩散及其对水源、农业、岩土和生态环境的影响；

5 治理工程及扩建工程的适宜性。

7.2.13 填埋场治理及扩建岩土工程勘察报告，除应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的规定外，尚应符合下列规定：

1 应按本规范第 7.2.12 条的要求进行岩土工程评价；

2 应提出保证堆体稳定安全控制措施的建议；

3 应提出减少堆体沉降和侧向变形的工程措施的建议；

4 应提出防渗系统改造及其他防止渗沥液渗漏和保护环境措施的建议；

5 应提出渗沥液导排系统改造及淤堵疏通措施的建议；

6 应提出避免填埋气爆炸、污泥涌出措施的建议；

7 应提出有关稳定、变形、水位、渗漏等监测工作的建议。

7.3 扩建垃圾堆体的基层处理

7.3.1 填埋场扩建时，应对扩建场地进行基层处理，主要包括扩建场底基层和四周边坡。

7.3.2 基层面地形构建及标高设计应基于垃圾堆体的沉降验算结果，堆体沉降验算应符合本规范第 5 章的规定。

7.3.3 应采取有效措施防止现有垃圾堆体中的竖向刚性设施破坏中间衬垫系统。

7.3.4 应对现有垃圾堆体中的污泥库进行处理。

7.3.5 现有垃圾堆体宜设置填埋气导排及收集设施，包括竖井、横管、盲沟等。

7.3.6 基层整形和处理还应符合现行行业标准《生活垃圾卫生填埋场封场技术规程》CJJ 112 的规定。

7.4 中间衬垫系统

7.4.1 现有填埋场防渗系统未达到现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 的规定时，应在现有填埋场和扩建填埋场交界面处增设中间衬垫系统。

7.4.2 中间衬垫系统从上至下宜包括渗沥液导排层、防渗层及其保护层、加筋层和导气层，并可在防渗层下设置压实土缓冲层。

7.4.3 渗沥液导排层应符合本规范第 4.4 节的规定。

7.4.4 中间衬垫系统防渗层及其保护层的结构形式应符合现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 的规定，其中高密度聚乙烯土工膜宜替换为线性低密度聚乙烯或极低密度聚乙烯等柔性土工膜。

7.4.5 中间衬垫系统加筋层宜采用双向土工格栅抵抗下卧堆体局部沉陷，并宜按本规范附录 B 计算和设计。

7.4.6 中间衬垫系统锚固沟设计应符合现行行业标准《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范》CJJ 113 的规定；基层坡度或堆体厚度变化较大处及中间衬垫系统与天然边坡交界处的锚固沟宜采用柔性锚固方式；加筋层应锚固在锚固沟内。

7.5 填埋场治理及污染控制措施

7.5.1 现有未达标填埋场治理内容应包括：垃圾堆体、渗沥液收集系统、防渗系统、填埋气收集系统、封场覆盖系统、地表水导排系统等，治理后应符合下列技术要求：

1 填埋场边坡稳定性应达到本规范第 6.1.4 条规定的稳定安全控制标准；

2 渗沥液收集与导排系统应具有长期服役性能，堆体内渗沥液水位应低于本规范第 6.4.1 条规定的警戒水位；

3 防渗系统应达到与现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 规定的水平防渗系统同等的防污效果；

4 填埋气收集系统应能有效收集填埋气，避免发生火灾、爆炸等安全事故，并应符合本规范第 4.6 节的相关规定；

5 封场覆盖与地表水导排系统应能有效控制降雨入渗，减少渗沥液产量及温室气体排放。

7.5.2 填埋场边坡稳定控制措施应符合本规范第 6.5 节的规定。

7.5.3 防渗系统未达标填埋场宜采用导排盲沟、抽排竖井等方式排出堆体中渗沥液，降低防渗系统上渗沥液水头，渗沥液导排方法应符合本规范第 4.5 节的规定；宜采用垂直防渗帷幕控制渗沥液污染物的渗漏与扩散，垂直防渗帷幕设计与施工应符合本规范第 8.5~第 8.7 节的规定。

7.5.4 封场覆盖系统结构选型与设计应符合现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 的有关规定，对于干旱及半干旱地区且封场坡度大于 10% 的斜坡区可选用毛细阻滞型覆盖层。

7.5.5 毛细阻滞型覆盖层宜采用图 7.5.5 规定的结构形式，并应满足下列要求：

- 1 植被层土质宜适合植物生长，厚度不应小于 15cm；

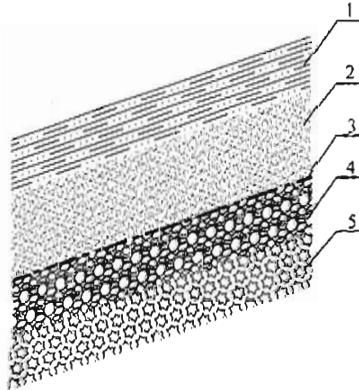


图 7.5.5 毛细阻滞型覆盖层结构形式

1—植被层；2—细粒土层；3—无纺土工布；
4—粗粒土层；5—垃圾

2 细粒土层应采用储水性能良好的粉土、粉质黏土、细砂等，厚度宜为 50cm~150cm；

3 粗粒土层应采用导气性能良好的粗砂、碎石等，厚度宜为 20cm~30cm。

8 压实黏土防渗层及垂直防渗帷幕

8.1 一般规定

8.1.1 当压实黏土防渗层用于填埋场的底部防渗系统时，其饱和渗透系数不应大于 1.0×10^{-7} cm/s。

8.1.2 垂直防渗帷幕可用于生活垃圾填埋场治理及扩建工程。

8.2 压实黏土防渗层的土料选择

8.2.1 压实黏土防渗层施工所用的土料应符合下列要求：

1 粒径小于 0.075mm 的土粒干重应大于土粒总干重的 25%；

2 粒径大于 5mm 的土粒干重不宜超过土粒总干重的 20%；

3 塑性指数范围宜为 15~30。

8.2.2 宜先在填埋场当地查勘满足本规范第 8.2.1 条的土料场，料场查勘应符合下列规定：

1 应采用试坑和钻孔确定黏土料场的垂直和水平分布范围，宜选择厚度不小于 1.5m 的黏土料场；

2 拟采用的黏土料场中宜每 100m² 设置 1 个取样点，取样点总数不应少于 5 个。每个取样点的土样应进行颗粒分析和界限含水率试验，试验方法应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的规定。

8.3 压实黏土的含水率及干密度控制

8.3.1 压实黏土防渗层施工时应严格控制含水率和干密度，以达到防渗和抗剪强度的要求。

8.3.2 应对选用的土料分别进行修正普氏击实试验、标准普氏击实试验和折减普氏击实试验，在含水率和干密度图中应分别绘

出以上三种试验的击实曲线，并应按照图 8.3.2 中三条击实曲线的顶点确定最佳击实峰值曲线。

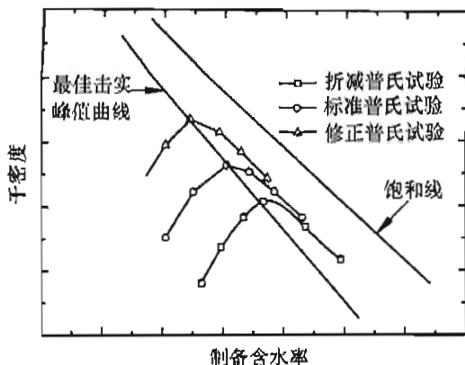


图 8.3.2 土样的最佳击实峰值曲线

8.3.3 应采用位于最佳击实峰值曲线湿边的每个击实试样进行渗透试验，试验方法应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的规定。应按图 8.3.3 的要求绘制含水率和干密度图，确定所有满足饱和和渗透系数要求的区域。

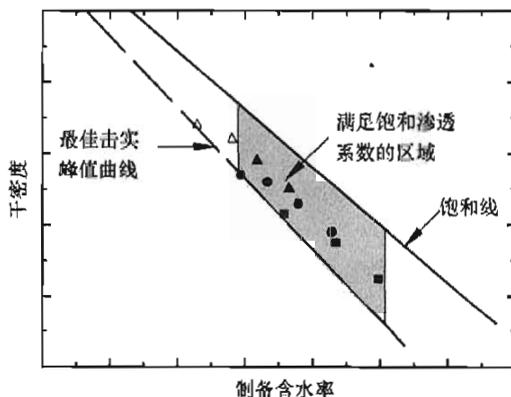


图 8.3.3 满足渗透系数设计标准的区域

- 注，1 实心符号表示满足饱和和渗透系数的试样；
 2 空心符号表示不满足饱和和渗透系数的试样；
 3 浅色阴影表示满足饱和和渗透系数的区域。

8.3.4 对满足饱和和渗透系数区域中的试样应进行无侧限抗压强度试验，无侧限抗压强度不应小于 150kPa，试验方法应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的规定。应按图 8.3.4 的要求绘制含水率和干密度图，确定满足饱和和渗透系数和抗剪强度的含水率和干密度控制指标。

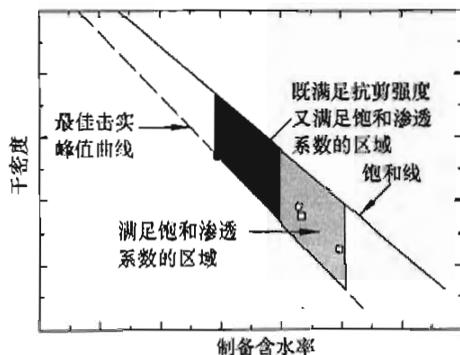


图 8.3.4 同时满足渗透系数和抗剪强度设计标准的控制区域

- 注：1 实心符号表示满足抗剪强度的试样；
 2 空心符号表示不满足抗剪强度的试样；
 3 浅色阴影表示满足饱和和渗透系数的区域；
 4 深色阴影表示既满足抗剪强度又满足饱和和渗透系数的区域。

8.3.5 经改性土料满足本规范第 8.3.4 条的规定时，可用作压实黏土防渗层材料。

8.4 压实黏土防渗层的施工质量控制

8.4.1 压实黏土防渗层的含水率与干密度施工控制指标应符合本规范第 8.3.4 条的规定。

8.4.2 填筑施工前应通过碾压试验确定达到施工控制指标的压实方法和碾压参数，包括含水率、压实机械类型和型号、压实遍数、速度及松土厚度等。

8.4.3 当压实黏土防渗层位于自然地基上时，基础层应符合现

行行业标准《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范》CJJ 113 的规定。

8.4.4 当压实黏土防渗层铺于土工合成材料之上时，下卧土工合成材料应平展，并应避免碾压时被压实机械破坏。

8.4.5 压实黏土防渗层施工应符合下列要求：

1 应主要采用无振动的羊足碾分层压实，表层应采用滚筒式碾压机压实；

2 松土厚度宜为 200mm~300mm，压实后的填土层厚度不应超过 150mm；

3 各层应每 500m²取 (3~5) 个样进行含水率和干密度测试，应满足本规范第 8.4.1 条的规定；

4 在后续层施工前，应将前一压实层表面拉毛，拉毛深度宜为 25mm，可计入下一层松土厚度。

8.5 垂直防渗帷幕及选型

8.5.1 用于生活垃圾填埋场渗沥液污染控制的垂直防渗帷幕的渗透系数宜在 10^{-7} cm/s 量级，其类型可选用水泥-膨润土墙、土-膨润土墙、塑性混凝土墙、HDPE 土工膜-膨润土复合墙等。

8.5.2 垂直防渗帷幕选型应综合考虑下列因素：

1 场地隔水层条件、地形及稳定情况；

2 渗沥液水质；帷幕需达到的渗透系数、深度及刚度；

3 材料供应、施工技术与设备等。

8.5.3 当垂直帷幕顶部需承受上覆荷载时，宜采用水泥-膨润土墙或塑性混凝土墙；在特殊地质和环境要求非常高的场地，宜采用 HDPE 土工膜-膨润土复合墙。

8.5.4 当垂直防渗帷幕底部岩石裂隙发育，或存在断层、破碎带等强透水性的地质条件，宜采取帷幕灌浆等措施处理。

8.6 垂直防渗帷幕插入深度及厚度

8.6.1 垂直防渗帷幕的厚度不宜小于 60cm，不宜大于 150cm。

当帷幕渗透系数不大于 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 时，厚度可按下式计算：

$$\Delta L = F_r \times A \times H^B \quad (8.6.1)$$

式中： F_r ——安全系数，考虑渗透破坏、机械侵蚀、化学溶蚀、施工因素等，宜取 1.5；

H ——垂直防渗帷幕上下游水头差 (m)，上游水头取与帷幕上游面接触的渗沥液水位，下游水头取与帷幕下游面接触的多年平均地下水位；

A ——与帷幕材料阻滞因子有关的系数，可按图 8.6.1-1 取值；

B ——与帷幕材料扩散系数有关的系数，可按图 8.6.1-2 取值。

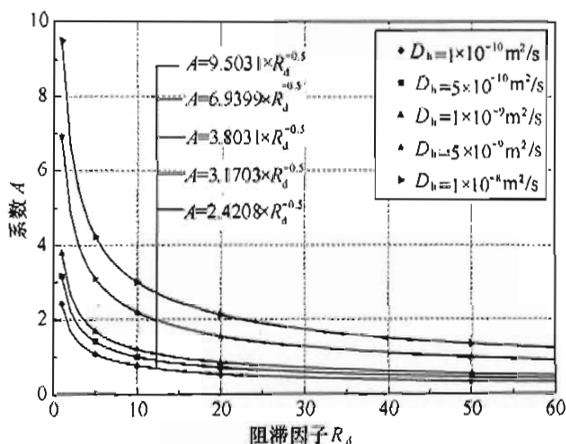


图 8.6.1-1 系数 A 取值

注：阻滞因子 R_d ，重金属污染物可取 3~40；如无经验数据，宜通过试验测定。

8.6.2 垂直防渗帷幕宜嵌入渗透系数不大于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的隔水层中，嵌入深度不宜小于 1m；当隔水层埋深很大而无法嵌入时，可采用悬挂式帷幕，其深度不应小于临界插入深度。

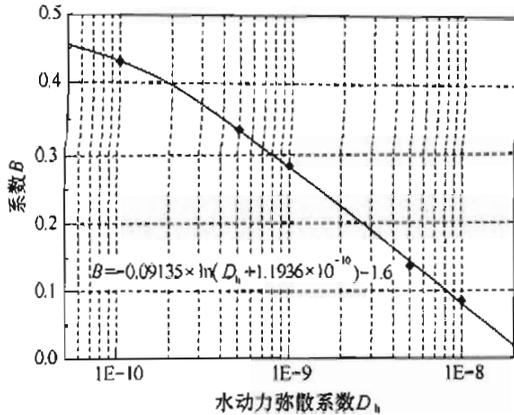


图 8.6.1-2 系数 B 的取值

注：水力弥散系数 D_h ，取值范围宜为 $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ，如防渗帷幕两侧水头差较大时取大值；无经验数据时，宜通过试验测定。

8.7 垂直防渗帷幕的施工质量控制

8.7.1 垂直防渗帷幕的施工包括沟槽开挖、泥浆护壁、回填防渗材料、盖帽等环节，施工过程中应采取有效的质量保证及控制措施。塑性混凝土防渗帷幕施工应符合现行行业标准《水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范》SL 174 的规定，帷幕底部注浆施工应符合现行行业标准《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》DL/T 5148 的规定。

8.7.2 沟槽开挖应避免塌孔，开挖过程中护壁泥浆的比重宜保持在 1.10~1.25 之间，浆液顶面应至少高出地下水位面 1m，施工过程中应避免浆液顶面发生明显下降，应避免泥浆静置 24h。

8.7.3 开挖过程中应检测沟槽宽度、垂直度和深度，确保沟槽进入设定的地层。

9 填埋场岩土工程安全监测

9.1 一般规定

9.1.1 填埋场岩土工程安全监测项目设置应符合表 9.1.1 的规定。

表 9.1.1 填埋场岩土工程安全监测项目表

| 监测项目 | | 安全等级 | | | 监测频率 (次/月) |
|-------------|-----------|------|----|----|---------------|
| | | 一级 | 二级 | 三级 | |
| 渗沥液 水位监测 | 渗沥液导排层水头 | ● | ● | ● | 1 |
| | 垃圾堆体主水位 | ★ | ★ | ★ | 1 |
| | 垃圾堆体滞水位 | ● | ● | ● | 1 |
| 变形监测 | 表面水平位移 | ● | ● | ● | 1 |
| | 深层水平位移 | ● | ● | ○ | 1 |
| | 垃圾堆体表面沉降 | ● | ○ | ○ | 1 |
| | 软弱地基沉降 | ● | ○ | ○ | 0.5 |
| | 中间衬垫系统沉降 | ● | ○ | ○ | 0.5 |
| | 竖井等刚性设施沉降 | ○ | ○ | ○ | 0.5 |
| 气压监测 | 导气层气压 | ○ | ○ | ○ | 0.5 |

注：1 ★为必设项目，●为应设项目，●为宜设项目，○为可设项目；

2 0.5 次/月表示 2 月一次；

3 安全等级应符合本规范第 6.1.2 条的规定；

4 当渗沥液水位超过警戒水位或垃圾堆体出现失稳征兆时，宜增设深层水平位移和垃圾堆体表面沉降监测；

5 遇暴雨等恶劣天气或其他紧急情况时，垃圾堆体主水位、滞水位、表面水平位移及深层水平位移的监测频次应当适当提高。

9.1.2 填埋场位于软弱地基上时，地基土体中孔隙水压力和变形等监测应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》

GB 50007 的规定。

9.1.3 填埋场安全稳定状态应根据渗沥液水位、地表水平位移速率及现场踏勘等因素综合确定，必要时根据深层水平位移、沉降速率进一步判别安全稳定状态。

9.2 渗沥液水位监测

9.2.1 渗沥液水位监测方法应符合下列要求：

1 渗沥液导排层水头监测宜在导排层埋设水平水位管，采用剖面沉降仪与水位计联合测定的测试方法；

2 当堆体内无滞水位时，宜埋设竖向水位管采用水位计测量垃圾堆体主水位；当垃圾堆体内存在滞水位时，宜埋设分层竖向水位管，应采用水位计测量主水位和滞水位。

9.2.2 监测点布置应符合下列要求：

1 渗沥液导排层水头监测点在每个排水单元宜至少布置两个，宜布置在每个排水单元最大坡度方向的中间位置；

2 渗沥液主水位和滞水位应沿垃圾堆体边坡走向布置监测点，平面间距 30m~60m，应保证管底离衬垫系统不应小于 5m，总数不宜少于 3 个；分层竖向水位管底部宜埋至隔水层上方，各支管之间应密闭隔绝。

9.2.3 当垃圾堆体水位接近或达到按照本规范第 6.4.1 条所确定的警戒水位时应提高监测频次，并应立即采取应急措施。

9.3 表面水平位移监测

9.3.1 表面水平位移应设置标志点，采用测量平面坐标的方法监测。

9.3.2 监测点宜结合作业分区呈网格状布置，随垃圾堆体填埋高度发展逐步设置，平面间距宜为 30m~60m，在不稳定区域适当加密。

9.3.3 表面水平位移监测的警戒值宜为连续两天的位移速率超过 10mm/d。

9.4 深层水平位移监测

9.4.1 当渗沥液水位超过警戒水位或垃圾堆体出现失稳征兆时，应监测深层水平位移。

9.4.2 垃圾堆体深层水平位移可通过在堆体中埋设测斜管，采用测斜仪测量。

9.4.3 监测点宜沿垃圾堆体边坡倾向布置，间距宜为 30m~60m，总监测点数量不宜少于 2 个；当垃圾堆体出现失稳征兆时，应在失稳区域设置监测点，监测点数量可根据边坡的具体情况确定；测斜管的埋设深度应足够深，且应保证管底离衬垫系统不应小于 5 米。

9.5 垃圾堆体沉降监测

9.5.1 当渗沥液水位超过警戒水位或垃圾堆体出现失稳征兆时，应监测垃圾堆体表面沉降；软弱地基沉降、中间衬垫系统沉降和竖井等刚性设施沉降宜根据具体情况进行监测。监测方法应符合下列要求：

1 垃圾堆体表面沉降应设置标志点，并通过测量标志点的高程监测；

2 软弱地基和中间衬垫系统沉降应埋设沉降管或沉降板，通过测量沉降管沿线或沉降板的高程监测；

3 竖井等刚性设施沉降应埋设沉降板，通过测量沉降板的高程监测。

9.5.2 监测点布设应符合下列要求：

1 地表沉降监测点宜布置成网格状，平面间距宜为 30m~60m，不均匀沉降大的区域宜适当加密。

2 软弱地基和中间衬垫系统监测的沉降管宜沿垃圾堆体主剖面方向布置，长度不宜小于 100m；若采用沉降板，间距宜为 50m~80m。

9.6 填埋气压监测

9.6.1 当覆盖系统发生土工膜鼓出或有失稳迹象时，宜进行气压监测。

9.6.2 气压预警值应符合现行行业标准《生活垃圾卫生填埋场封场技术规程》CJJ 112 的规定。

附录 A 填埋场堆体压缩量计算过程及参数确定

A. 0. 1 填埋场堆体压缩量应采用土柱法计算，应按图 A. 0. 1-1 将土柱分为 n 层，在 t 时刻第 i 层垃圾的压缩量应按图 A. 0. 1-2 的流程计算。

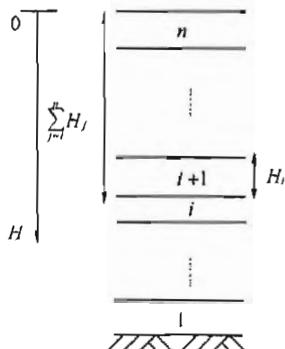


图 A. 0. 1-1 垃圾土柱
分层示意图



图 A. 0. 1-2 t 时刻第 i 层垃圾压
缩量的计算流程

1 确定第 i 层垃圾的埋龄期

根据填埋规划确定在 t 时刻第 i 层垃圾的龄期 t_i ，第 n 层垃圾的龄期 t_n 。

2 计算第 i 层垃圾的上覆应力

第 i 层垃圾的上覆应力应按下式计算：

$$\sigma_i = \sum_{j=i}^n \gamma_j H_j \quad (\text{A. 0. 1-1})$$

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_0 + \frac{13.5 - \gamma_0}{30} H & (H \leq 30\text{m}) \\ 13.5 + 0.1(H - 30) & (H > 30\text{m}) \end{cases} \quad (\text{A. 0. 1-2})$$

式中： H_j ——第 j 层垃圾厚度 (m)；

γ_j ——第 j 层垃圾容重 (kN/m^3)，宜现场钻取大直径试样测定，无试验数据时，可按式 (A.0.1-2) 计算；

γ_0 ——填埋垃圾初始容重 (kN/m^3)，压实程度不良宜为 $5\text{kN/m}^3 \sim 7\text{kN/m}^3$ ；压实程度中等宜为 $7\text{kN/m}^3 \sim 9\text{kN/m}^3$ ；压实程度良好宜为 $9\text{kN/m}^3 \sim 12\text{kN/m}^3$ ；

H ——填埋垃圾埋深 (m)。

3 计算第 i 层垃圾的主压缩量

第 i 层垃圾的主压缩量应按本规范式 (5.2.2-1) 计算，初始孔隙比应按下式计算：

$$e_0 = \frac{d_s \gamma_w}{(1 - W_c) \gamma_0} - 1 \quad (\text{A.0.1-3})$$

式中： W_c ——垃圾初始含水率 (%)；

d_s ——垃圾平均颗粒比重，可将垃圾各组分的颗粒比重按重量含量加权平均计算或针对现场取样采用虹吸筒法测定。无试验数据时，垃圾颗粒比重可为 $1.3 \sim 2.2$ ，有机质含量高、降解程度低的垃圾取低值；

γ_w ——水容重 (kN/m^3)。

4 计算第 i 层垃圾的次压缩量

t 时刻第 i 层垃圾的次压缩量，采用应力-降解压缩模型计算时，应按本规范式 (5.2.3-1) 计算；采用 Sowers 次压缩模型计算时，应按本规范式 (5.2.3-3) 计算。

5 计算 t 时刻第 i 层垃圾的压缩量与压缩后的厚度

第 i 层垃圾的压缩量按下式计算：

$$S_i = S_{pi} + S_{si} \quad (\text{A.0.1-4})$$

第 i 层垃圾压缩后厚度 H'_i 按下式计算：

$$H'_i = H_i - S_i \quad (\text{A. 0. 1-5})$$

A. 0. 2 t 时刻填埋场垃圾堆体压缩量应按下式计算：

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (\text{A. 0. 2})$$

附录 B 局部沉陷条件下土工膜应变 计算及加筋层设计

B.0.1 土工合成材料的允许应变特征值应根据现行行业标准《土工合成材料测试规程》SL/T 235 的规定进行拉伸试验，试验曲线如图 B.0.1 所示，并按下式计算：

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_r}{F_R} \quad (\text{B.0.1})$$

式中： ϵ_a ——土工合成材料允许应变特征值（%）；

ϵ_r ——土工合成材料最大拉力所对应的应变（%）；

F_R ——安全系数，取值不宜小于 1.5。

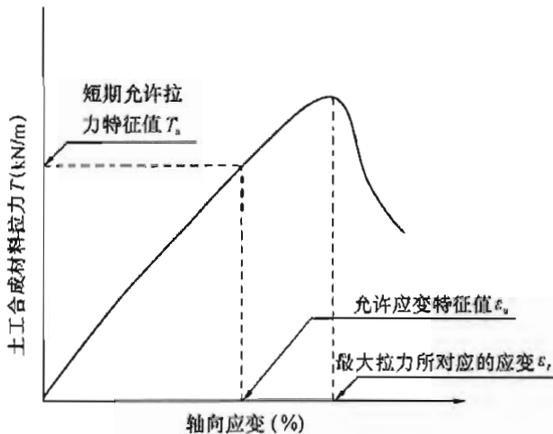


图 B.0.1 土工合成材料拉应力-应变关系示意图

B.0.2 土工合成材料短期允许拉力特征值应为土工合成材料允许应变特征值对应的拉力，土工合成材料长期允许拉力特征值应按下式计算：

$$T_l = T_a / (RF_{CR} \times RF_{ID} \times RF_{CBD}) \quad (\text{B.0.2})$$

式中： T_l ——土工合成材料长期允许拉力特征值 (kN/m)；

T_s ——土工合成材料短期允许拉力特征值 (kN/m)；

RF_{CR} ——蠕变折减系数，应按表 B. 0. 2-1 取值；

RF_{ID} ——施工损伤折减系数，应按表 B. 0. 2-2 取值；

RF_{CBD} ——生物或化学降解折减系数，可为 1.1~1.2。

表 B. 0. 2-1 蠕变折减系数 RF_{CR}

| 材料类型 | HDPE | PVC | VLDPE | LLDPE |
|------|------|-----|-------|-------|
| 取值 | 2.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |

表 B. 0. 2-2 施工损伤折减系数 RF_{ID}

| 衬垫系统下卧和 上覆土层类型 | 施工机械类型 (回填和压实) | | |
|-------------------|----------------|------|-----|
| | 轻型 | 中等重量 | 重型 |
| 光滑 (无石子) | 1.1 | 1.2 | 1.3 |
| 中等光滑 | 1.2 | 1.3 | 1.4 |
| 粗糙 (含石子) | 1.3 | 1.4 | 1.5 |

B. 0. 3 下卧堆体局部沉陷条件 (图 B. 0. 3) 作用下土工合成材料设计拉力 T 与拉伸应变之间的关系可按 Giroud (1990) 公式和浙大简化公式计算：

1 Giroud (1990) 公式：

$$T = 2\gamma_s r^2 (1 - e^{-0.5H/r}) \Omega \quad (\text{B. 0. 3})$$

式中： T ——土工合成材料设计拉力 (kN/m)；

H ——上覆土体的厚度 (m)；

γ_s ——上覆土体的平均容重 (kN/m³)；

r ——圆形沉陷区域半径 (m)，宜为 0.9m；

Ω ——与土工合成材料拉伸应变 ϵ 对应的无量纲参数，按表 B. 0. 3-1 线性插值计算。

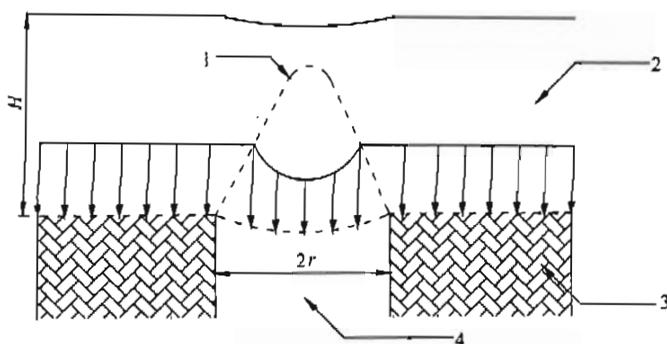


图 B. 0. 3 下卧垃圾堆体局部沉陷条件下土工膜和加筋层受力及变形示意图

1—土拱；2—上覆土；3—下卧土体；4—局部沉陷区域

表 B. 0. 3-1 无量纲参数 Ω 与拉伸应变关系表

| 拉伸应变 ϵ (%) | Ω | 拉伸应变 ϵ (%) | Ω |
|---------------------|----------|---------------------|----------|
| 6.00 | 0.90 | 8.43 | 0.78 |
| 6.69 | 0.86 | 9.00 | 0.76 |
| 7.00 | 0.84 | 9.36 | 0.75 |
| 7.54 | 0.82 | 10.00 | 0.73 |
| 8.00 | 0.80 | 10.35 | 0.72 |

2 浙大简化公式如表 B. 0. 3-2 所示，通过线性插值计算。

表 B. 0. 3-2 设计拉力与拉伸应变关系表

| 拉伸应变 ϵ (%) | 设计拉力 T |
|---------------------|---------------------------------|
| 7 | $T = (-2.376 + 0.146H)\gamma_s$ |
| 8 | $T = (-3.716 + 0.140H)\gamma_s$ |
| 9 | $T = (-2.743 + 0.095H)\gamma_s$ |
| 10 | $T = (-2.771 + 0.080H)\gamma_s$ |

B. 0. 4 下卧垃圾堆体局部沉陷引起土工膜拉伸应变的验算过程为：假定土工膜设计拉力 $T = T_l$ ，然后按 Giroud (1990) 公式计算土工膜的拉伸应变 ϵ ，应小于其允许应变特征值 ϵ_s 。

B. 0. 5 对于用于抵抗下卧堆体局部沉陷的土工格栅加筋层，其设计层数的计算过程为：按式（B. 0. 1）确定中间衬垫系统中各种土工合成材料的最小允许应变特征值 ϵ_0 ，根据土工格栅拉伸试验曲线确定与 ϵ_0 相对应的短期允许拉力特征值 T_0 ，按式（B. 0. 2）计算单层土工格栅的长期允许拉力特征值 T_l ；假定土工格栅拉伸应变 $\epsilon = \epsilon_0$ ，然后分别按 Giroud（1990）公式和浙大简化公式计算土工格栅的设计拉力 T ，并取较大值；土工格栅加筋层的设计层数 n ，应按下式计算：

$$n \geq T/T_l \quad (\text{B. 0. 5})$$

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 2 《岩土工程勘察规范》GB 50021
- 3 《土工试验方法标准》GB/T 50123
- 4 《建筑边坡工程技术规范》GB 50330
- 5 《建筑用卵石、碎石》GB/T 14685
- 6 《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17
- 7 《生活垃圾卫生填埋场封场技术规程》CJJ 112
- 8 《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范》CJJ 113
- 9 《生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术规范》CJJ 133
- 10 《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》DL/T 5148
- 11 《水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范》SL 174
- 12 《土工合成材料测试规程》SL/T 235
- 13 《水利水电工程钻孔抽水试验规程》SL 320
- 14 《水利水电工程边坡设计规范》SL 386
- 15 《生活垃圾采样和分析方法》CJ/T 313

中华人民共和国行业标准

生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范

CJJ 176 - 2012

条文说明

制定说明

《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》CJJ 176 - 2012, 经住房和城乡建设部 2012 年 1 月 11 日以第 1243 号公告批准、发布。

本规范制定过程中, 编制组进行了广泛深入的调查研究, 总结了我国生活垃圾卫生填埋场岩土工程建设的实践经验, 同时参考了国外先进技术法规、技术标准, 通过编制组系统的室内试验、现场测试和理论分析, 在垃圾基本特性、渗沥液产量及填埋场沉降和稳定等方面取得了一批重要的技术参数。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定, 《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明, 对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。还着重对强制性条文的强制性理由作了解释。但是, 本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力, 仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

| | | |
|-----|-----------------|----|
| 1 | 总则 | 57 |
| 4 | 填埋场渗流及渗沥液水位控制 | 58 |
| 4.1 | 一般规定 | 58 |
| 4.2 | 垃圾水气传导特性 | 61 |
| 4.3 | 填埋场渗沥液总量计算 | 65 |
| 4.4 | 场底渗沥液导排设计与水头控制 | 67 |
| 4.5 | 垃圾堆体水位及控制 | 71 |
| 4.6 | 填埋气收集及控制措施 | 72 |
| 5 | 填埋场沉降及容量 | 76 |
| 5.1 | 一般规定 | 76 |
| 5.2 | 垃圾堆体沉降计算 | 76 |
| 5.3 | 填埋量计算 | 78 |
| 5.4 | 填埋场库区设施不均匀沉降验算 | 80 |
| 5.5 | 填埋场不均匀沉降控制和增容措施 | 80 |
| 6 | 填埋场稳定 | 81 |
| 6.1 | 一般规定 | 81 |
| 6.2 | 垃圾抗剪强度指标 | 84 |
| 6.3 | 土工材料界面强度指标 | 85 |
| 6.4 | 填埋场边坡稳定验算 | 90 |
| 6.5 | 填埋场稳定控制措施 | 92 |
| 7 | 填埋场治理及扩建 | 95 |
| 7.1 | 一般规定 | 95 |
| 7.2 | 填埋场治理及扩建岩土工程勘察 | 95 |
| 7.3 | 扩建垃圾堆体的基层处理 | 95 |
| 7.4 | 中间衬垫系统 | 96 |

| | | |
|------|-------------------|-----|
| 7.5 | 填埋场治理及污染控制措施 | 97 |
| 8 | 压实黏土防渗层及垂直防渗帷幕 | 100 |
| 8.1 | 一般规定 | 100 |
| 8.2 | 压实黏土防渗层的土料选择 | 100 |
| 8.3 | 压实黏土的含水率及干密度控制 | 101 |
| 8.4 | 压实黏土防渗层的施工质量控制 | 103 |
| 8.5 | 垂直防渗帷幕及选型 | 104 |
| 8.6 | 垂直防渗帷幕插入深度及厚度 | 105 |
| 9 | 填埋场岩土工程安全监测 | 106 |
| 9.1 | 一般规定 | 106 |
| 9.2 | 渗沥液水位监测 | 107 |
| 9.3 | 表面水平位移监测 | 110 |
| 9.4 | 深层水平位移监测 | 110 |
| 9.5 | 垃圾堆体沉降监测 | 110 |
| 附录 A | 填埋场堆体压缩量计算过程及参数确定 | 112 |

1 总 则

1.0.1 我国垃圾填埋场目前仍存在较为严重的环境岩土工程问题，包括垃圾堆体的失稳滑坡、填埋气体的爆炸与火灾、气体收集井等填埋场库区设施在垃圾堆体不均匀沉降作用下的失效和破坏、渗沥液渗漏造成的周边环境污染、填埋气收集率低等。本标准将有助于提高我国垃圾填埋场的设计、施工及运行水平。

1.0.3 我国城市生活垃圾的组分以厨余垃圾为主，有机质含量和含水率明显高于欧美发达国家。因此我国填埋场的设计、施工和运行不宜直接套用欧美国家的经验。我国幅员辽阔，各地气候、生活水平、地质条件差异较大，填埋场工程设计和建设应做到因地制宜。

埋场污染扩散风险相对较低；较高的垃圾堆体主水位和滞水位显著影响垃圾堆体稳定和填埋气收集率。

图 2 为填埋场中另一种可能的渗沥液存在形式：当渗沥液导排层淤堵时，导排层中渗沥液水位壅高，与堆体中主水位连通，从场底渗沥液导排层至一定高度堆体完全饱和，防渗层上渗沥液水头很高，填埋场渗沥液污染扩散及堆体失稳风险高，填埋气收集难度大。

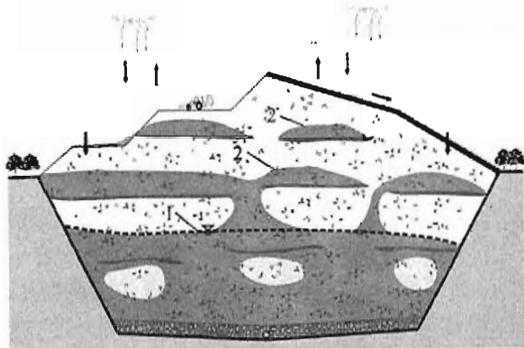


图 2 垃圾填埋场渗沥液存在形式二
1—垃圾堆体主水位；2—垃圾堆体滞水位

编制组研究了垃圾堆体主水位对堆体稳定影响规律，如图 3

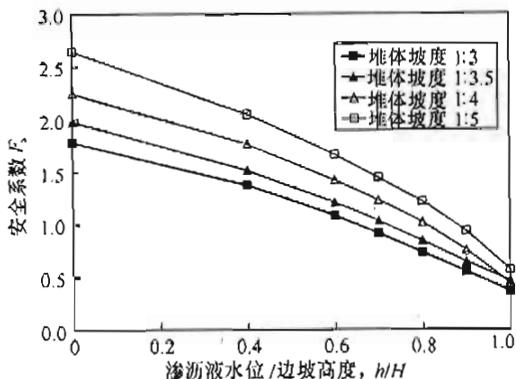


图 3 堆体坡度、堆体主水位相对高度与安全系数的关系

所示。在堆体坡度一定时，主水位越高，堆体稳定安全系数越小。编制组研究表明，渗沥液导排层水头增加会显著提高污染物渗漏率。如表 1 所示，渗沥液导排层水头 h_w 由 0.3m 提高至 10m，污染渗漏率提高了（5~30）倍。

表 1 不同渗沥液导排层水头下计算得到的渗漏率

| 衬垫系统 结构 | 分配系数 θ (m^2/s) | 渗漏率 (m/年) | | | |
|-------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | $h_w=0.3m$ | $h_w=1.0m$ | $h_w=3.0m$ | $h_w=10.0m$ |
| 1.5mmGM+750mmCCL | 1.6×10^{-8} | 3.8×10^{-4} | 1.2×10^{-3} | 3.2×10^{-3} | 1.0×10^{-2} |
| 1.5mmGM+750mmAL | 1.6×10^{-8} | 6.5×10^{-4} | 1.9×10^{-3} | 5.0×10^{-3} | 1.6×10^{-2} |
| 1.5mmGM+13.8mmGCL | 6.0×10^{-12} | 3.5×10^{-7} | 1.1×10^{-6} | 3.4×10^{-6} | 1.1×10^{-5} |
| 2mCCL | / | 3.6×10^{-2} | 4.7×10^{-2} | 7.9×10^{-2} | 1.9×10^{-1} |

注：GM—土工膜；CCL—压实黏土防渗层；AL—压实黏土替代层；GCL—土工复合膨润土垫。

4.1.2 我国大多数渗沥液产量大、堆填高的填埋场运行实践证明，因深部垃圾渗透能力差、场底渗沥液导排系统淤堵等原因，易造成渗沥液导排不畅和堆体中渗沥液水位壅高（图 2）。此时除设置场底渗沥液导排系统外，还应考虑设置中间渗沥液导排设施。中间渗沥液导排设施在垃圾堆体内分层设置，可有效降低垃圾堆体主水位和滞水位。当垃圾堆体主水位较高，可能导致垃圾堆体发生失稳时，应采取应急措施进行水位迫降；采取应急降水措施缓解堆体滑坡险情后，应采取长期水位控制措施，使后续运行过程中堆体水位长期处于警戒水位以下。

4.1.3 填埋垃圾在生化降解作用下产生大量填埋气（主要成分为 CH_4 和 CO_2 ），易造成垃圾堆体内部气压过大，降低垃圾堆体稳定性可能导致物理爆炸。

4.1.4 我国大多数地区填埋场渗沥液水位普遍较高，导致垃圾堆体的导气性能低下，阻碍填埋气导排和收集。多个填埋场实测数据表明：填埋气收集率普遍低于 40%，严重影响填埋气收集利用工程的效益。填埋气收集利用工程设计时，应评估渗沥液水位高度对填埋气收集潜力的影响，采取合理作业方式和有效工程

措施控制渗沥液水位高度，提高填埋气收集率。

4.2 垃圾水气传导特性

4.2.1 填埋场渗沥液总量计算及渗沥液导排系统设计与垃圾初始含水率、田间持水量及水力渗透系数等水力特性参数密切相关，应选取合适的参数。

4.2.2 如图 4 所示，生活垃圾中水分的存在形式与土体有所区别，除部分以结合水、自由水的形式存在外，还有大部分存在于有机质的细胞内部，以胞内水的形式存在。垃圾的有机质含量越高，胞内水的含量越大，初始含水率也越高。表 2 为编制组现场调研获得的我国垃圾初始含水率数据，我国城市生活垃圾有机质含量和初始含水率显著高于美国垃圾，如表 3 所示。垃圾填埋后胞内水由于生物降解逐渐析出形成渗沥液，垃圾的持水能力逐渐降低。如图 5 所示，我国经长期降解后垃圾的田间持水量与欧美国家的接近。

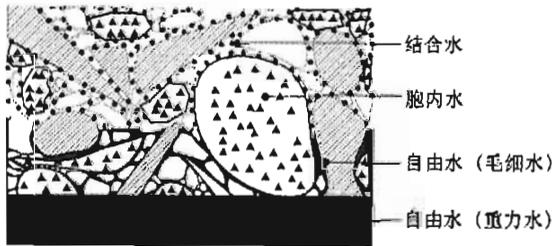


图 4 垃圾中水分存在形式

表 2 现场调研中国垃圾初始含水率数据

| 所在地年降雨量 (mm) | 初始含水率 (%) | | | | | 样本数 (个) |
|-------------------------|-----------|------|------|------|------|---------|
| | 春 | 夏 | 秋 | 冬 | 全年 | |
| 年降雨量 ≥ 800 | 55.1 | 57.2 | 53.9 | 53.9 | 51.1 | 49 |
| $400 \leq$ 年降雨量 < 800 | 50.1 | 60.6 | 48.3 | 43.8 | 44.3 | 22 |
| 年降雨量 < 400 | — | — | — | — | 25.5 | 2 |

表 3 中美垃圾典型组分及初始含水率对比 (%)

| 地区 | 厨余垃圾 | 无机渣土 | 纸类 | 塑料 | 其他 | 初始含水率 |
|----|-------|-------|------|------|----|-------|
| 中国 | 45~50 | 10~25 | 5~12 | 5~15 | 35 | 50 |
| 美国 | 22 | 5 | 47 | 5 | 21 | 27 |

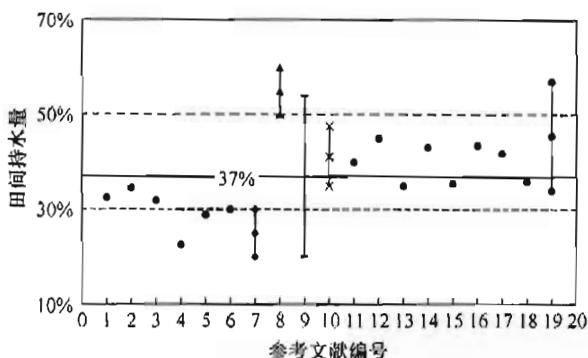


图 5 降解后垃圾的田间持水量

根据以上文献资料和现场调研资料，本规范推荐了表 4.2.2 中初始含水率和田间持水量取值。

4.2.3 填埋场的类别按《生活垃圾卫生填埋处理工程建设标准》建标 124-2009 划分，填埋场运行阶段，宜定期测试垃圾水力特性指标，积累数据，指导填埋场运行，并为以后新建填埋场设计提供基础数据。

4.2.4 现行行业标准《生活垃圾采样和分析方法》CJ/T 313 中规定的烘干温度为 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ；现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 规定烘干温度为 $105^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$ ，但只适用有机质含量不大于 10% 的土，不适用于生活垃圾；国外资料中推荐的烘干温度包括 55°C 、 85°C 或 105°C (Zekkos, 2005)。进一步征求了国内测试部门的意见，最终确定烘干温度为 $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

4.2.5 一般土壤取 30kPa 基质吸力对应的含水率作为田间持水

量；砂性土壤常取基质吸力 10kPa 对应的含水率；黏粒含量高的土壤宜取基质吸力 50kPa 对应的含水率。考虑到生活垃圾大孔隙的特点，结合相关研究资料，故取基质吸力 10kPa 对应的含水率作为田间持水量取值。

4.2.6 苏州七子山填埋场现场抽水试验表明，随抽水井降深增加，抽水流量逐渐减小，由最初的 $1.9\text{m}^3/\text{h}$ 逐渐减小至 $1.0\text{m}^3/\text{h}$ 。根据抽水试验结果计算的垃圾饱和和水力渗透系数，如图 6 所示，可见，垃圾饱和和渗透系数随埋深增加明显减小。对于填埋厚度大的垃圾堆体，宜分层测试垃圾的渗透系数。

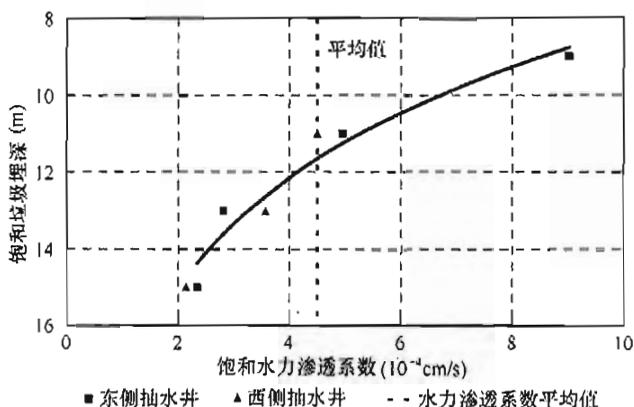


图 6 不同埋深垃圾饱和和水力渗透系数现场测试结果

4.2.7 垃圾是非均质、大孔隙介质材料，室内渗透试验时应尽可能选用较大直径的渗透室。垃圾饱和和水力渗透系数与孔隙比或应力状态相关，为保障实验数据的合理性，测试时应施加与现场应力水平相当的应力；如需更为全面的结果，也可在不同应力条件下进行测试。以苏州七子山填埋场为例，采用四种不同埋深度的试样，分别为 2.5m、7.5m、12.5m、17.5m，饱和和水力渗透系数随有效应力的变化规律如图 7 所示。根据上述数据及国内外文献报道的实测数据，浙江大学推荐了垃圾饱和和水力渗透系数随深度的变化关系，如图 8 所示。

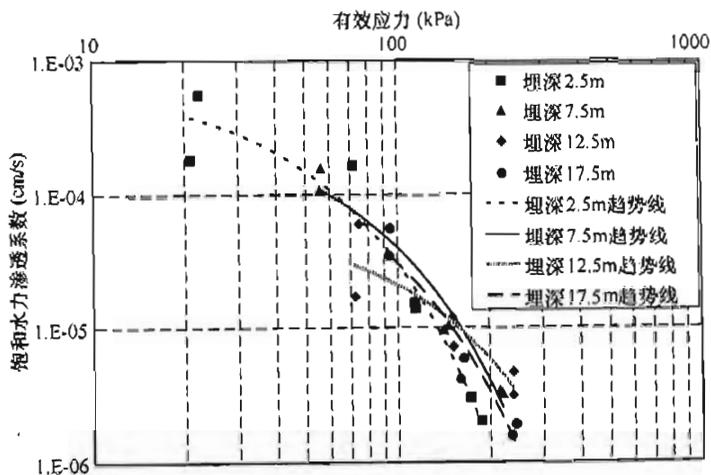


图7 苏州七子山填埋场现场取样垃圾室内渗透试验结果

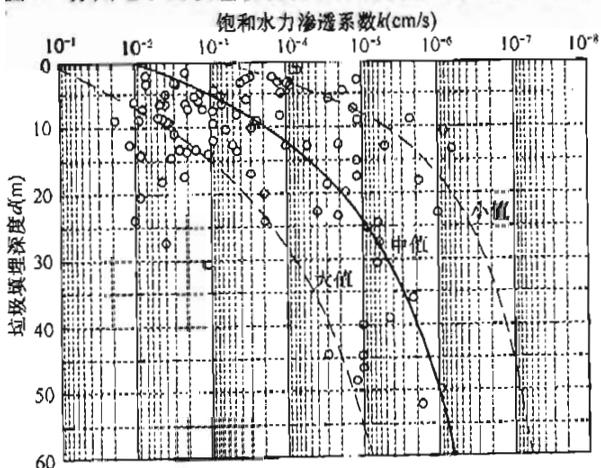


图8 垃圾饱和水力渗透系数与填埋深度

4.2.8 浙江大学的室内试验结果表明：垃圾中填埋气渗透系数随饱和度或含水率增加而减少（图9）。垃圾含水率对填埋气渗透系数影响较大，当含水率大于一定数值（约为田间持水量）填埋气渗透系数随含水率增大而急剧减小。渗沥液水位以下垃圾处于接近饱和或饱和状态，填埋气渗透系数小，阻碍了填埋气导排

和收集，这也是高渗沥液水位填埋场填埋气收集率低下的的重要原因。根据浙江大学的室内试验结果和国内外相关文献资料，本条推荐了填埋垃圾气体固有渗透系数取值范围。

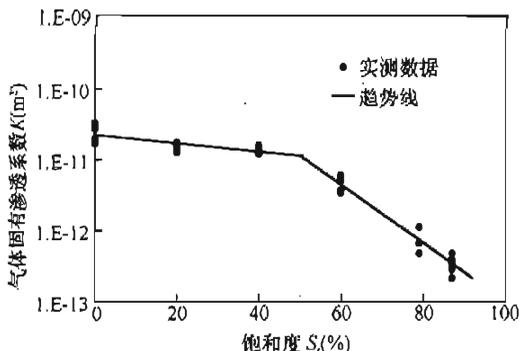


图9 垃圾气体固有渗透系数与饱和度的关系曲线

4.3 填埋场渗沥液总量计算

4.3.1 填埋场渗沥液日均总量主要由降雨入渗量和垃圾自身降解或压缩产生渗沥液量两部分组成。降雨入渗量通常采用现行行业标准《生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范》HJ 564 中的浸出系数法计算。垃圾自身降解或压缩产生的渗沥液量取决于垃圾初始含水率与在填埋场降解及压缩后田间持水量之间的差值。当填埋垃圾初始含水率不大于降解后田间持水量时，垃圾自身渗沥液产量较低，可忽略，渗沥液产量可采用浸出系数法计算；而当填埋垃圾初始含水率较高时，垃圾自身降解或压缩产生渗沥液产量大，甚至超过降雨入渗量，不能忽略。

填埋场渗沥液总量的一部分留在填埋场内形成填埋场的水位，其他的通过导排系统进入渗沥液调节池形成渗沥液产量（实测渗沥液产量）。后者的量一般情况下远大于前者。

编制组“垃圾渗沥液产量和调节池容积计算”专题研究对广州兴丰和上海老港四期填埋场渗沥液的各种计算量及实测量

进行了比较,如图 10、图 11 所示。可见,对于垃圾初始含水率较高的填埋场,浸出系数法得到的渗沥液产量明显偏小;采用本规范公式,使用实际逐月降雨量资料,在考虑了垃圾自身降解或压缩产生渗沥液产量后,可获得与实测数据比较接近的结果。

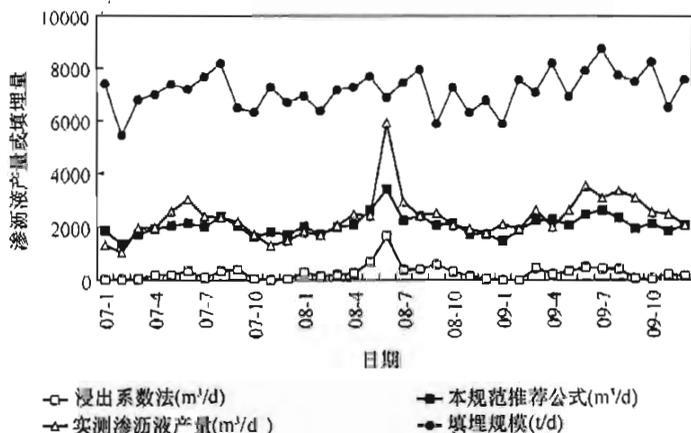


图 10 广州兴丰填埋场渗沥液产量计算值与实测值对比

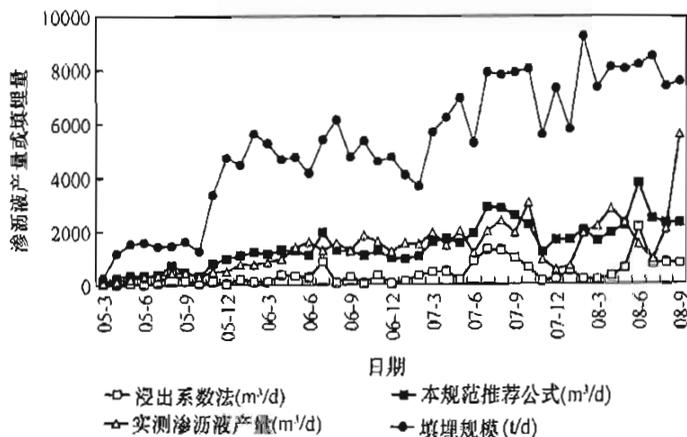


图 11 上海老港四期填埋场渗沥液产量计算值与实测值对比

4.4 场底渗沥液导排设计与水头控制

4.4.1 根据住房和城乡建设部《关于印发〈2008年工程建设标准规范制订、修订计划（第一批）〉的通知》（建标〔2008〕102号）的要求，现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17-2004通过修定升级为国家标准，其送审稿已通过审查会专家组的审查。由于本规范在该国家标准前颁布，因此本规范目前条文中仍引用其CJJ 17-2004版本，一旦该标准作为国家标准发布，则按最新发布的标准执行。

4.4.2 根据实践，排水单元中的渗沥液导排盲沟可设置为“直线形”或“树叉形”。为使渗沥液导排层内最大水头小于30cm，不论采取何种设置形式，应保证最大水平排水距离 L' 不大于按本规范第4.4.3条中所示方法计算出的允许最大水平排水距离 L 。

最大水平排水距离 L' 是导排单元内最大坡度方向上排水起点（最高点）至排水终点（导排管或其他泄水点）水平投影的最大值。库底“直线形”和“树叉形”排水单元设置形式及其对应的最大水平排水距离 L' 分别如图12、图13所示。边坡排水单元的设置形式及其对应的 L' 如图14所示。

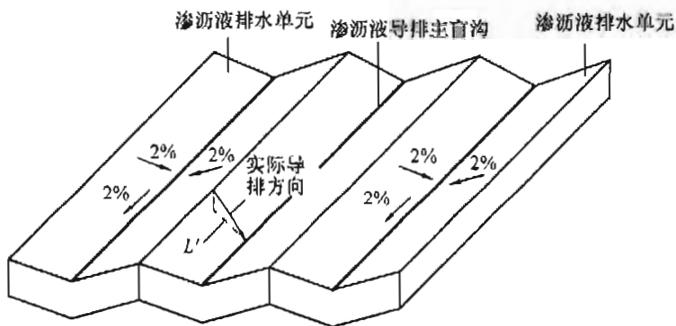


图12 库底“直线形”排水单元最大水平排水距离 L' 示意图

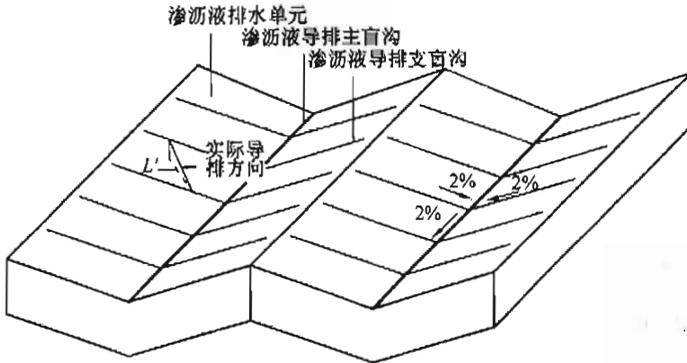


图 13 库底“树叉形”排水单元最大水平排水距离 L' 示意图

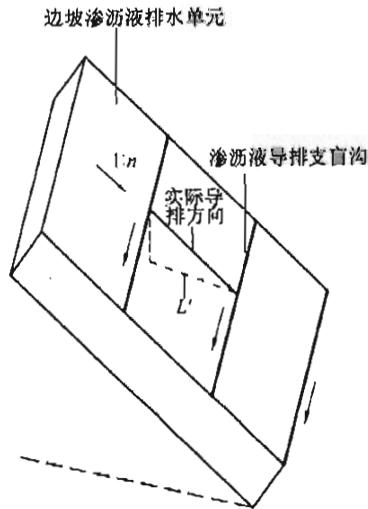


图 14 边坡排水单元最大水平排水距离 L' 示意图

4.4.3 本公式为通用的 Giroud 公式，即根据导排层的渗沥液入渗量 q_h 、导排层渗透系数 k 、库底坡度、导排层最大允许渗沥液水头，可计算允许最大水平排水距离 L ；若已知 L ，也可反算导排层最大渗沥液水头。计算示意图见图 15。

L 计算的关键是合理确定 q_h 和导排层渗透系数 k 两个参数的取值。

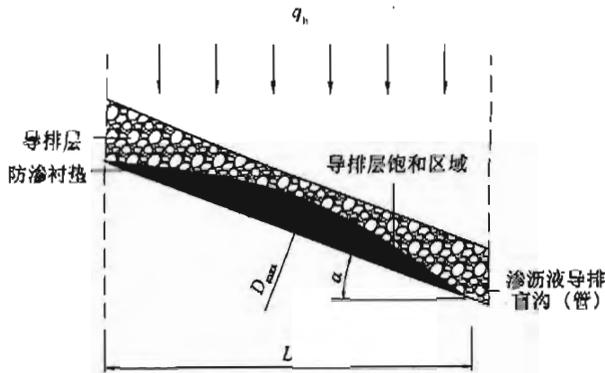


图 15 允许最大水平排水距离 L 计算示意图

德国规范推荐 q_h 取 10mm/d ，美国规范推荐采用 HELP 模型计算结果或日均降雨量，取值一般不超过 5mm/d 。根据类似填埋场的比较，我国渗沥液产量高于美国及德国， q_h 取值应更大。如果 q_h 取值参照德国取 10mm/d 或更大，计算出的 L 一般小于 15m ，导排管设置间距将远小于目前国内常采用的间距。根据排水单元渗沥液产生和导排机理，提出了 q_h 的计算公式 (4.4.3-3)。验算表明，该公式计算结果一般比 HELP 模型计算结果大，比德国规范小。

渗沥液导排层初始渗透不小于 $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ，但导排层在使用中会发生淤堵，渗透系数降低。Koerner (1995) 研究表明，填埋场使用 1 年后，砾石孔隙减少很多，渗透系数从 $2.5 \times 10^{-1} \text{m/s}$ 降至 $1.2 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 。Fleming (1999) 研究表明，填埋场使用 4 年后，导排层渗透系数从 $1 \times 10^{-1} \text{m/s}$ 降低到 $1 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ；土工布、导排管开口等局部位置等淤堵更严重。Craven (1999) 研究表明，填埋场使用 6 年后，排水砂层渗透系数从 $1.85 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 降低到 $1.23 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 。因此，建议计算 L 时，渗透系数 k 取 $1 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ，当有很好的防淤堵措施时，可适当提高。

以我国填埋容量较大的上海某填埋场和广州某填埋场为例，验算导排层的渗沥液入渗量 q_h 及允许最大水平排水距离 L 。

一 上海某填埋场

上海某填埋场场底排水面积 800000m^2 ，日填埋作业规模 8000t/d ，填埋作业单元面积 50000m^2 ；中间覆盖面积 650000m^2 ，封场覆盖面积 100000m^2 ；20 年日均降雨量 1116mm/年 ，初始填埋作业时垃圾含水率为 55% ，完全降解后垃圾田间持水量为 38% 。计算 q_h 及 L 。

1 导排层的渗沥液入渗量 q_h

1) 渗沥液日均总量 Q 计算

按式 (4.3.1)， $I = 1116\text{mm/年} = 3.06\text{mm/d}$ ， $A_1 = 50000\text{m}^2$ ， $A_2 = 650000\text{m}^2$ ， $A_3 = 100000\text{m}^2$ ， $C_{1,1} = 0.8$ ， $C_{1,2} = 0.48$ ， $C_{1,3} = 0.1$ ， $M_d = 8000\text{t/d}$ ， $W_c = 55\%$ ， $F_c = 38\%$ ，计算得 $Q = 2467\text{m}^3/\text{d}$ 。

2) 导排层的渗沥液入渗量 q_h 计算

按式 (4.4.3-3)， $Q = 2467\text{m}^3/\text{d}$ ， $A = 800000\text{m}^2$ ，计算得 $q_h = 3.57 \times 10^{-8}\text{m/s}$ ，即 3.1mm/d 。

2 允许最大水平排水距离 L

按式 (4.4.3-1)， $q_h = 3.57 \times 10^{-8}\text{m/s}$ ，导排层渗透系数 k 取 $1 \times 10^{-4}\text{m/s}$ ，计算得 $j = 0.881$ ， $L = 35.6\text{m}$ 。

二 广州某填埋场

广州某填埋场场底排水面积 470000m^2 ，日填埋作业规模 10000t/d ，填埋作业单元面积 50000m^2 ；中间覆盖面积 320000m^2 ，封场覆盖面积 100000m^2 ；20 年日均降雨量 1735mm/年 ，初始填埋作业时垃圾含水率为 58% ，完全降解后垃圾田间持水量为 38% 。计算 q_h 及 L 。

1 导排层的渗沥液入渗量 q_h

1) 渗沥液日均总量 Q 计算

按式 (4.3.1)， $I = 1735\text{mm/年} = 4.75\text{mm/d}$ ， $A_1 = 50000\text{m}^2$ ， $A_2 = 320000\text{m}^2$ ， $A_3 = 100000\text{m}^2$ ， $C_{L,1} = 0.8$ ， $C_{1,2} = 0.48$ ， $C_{1,3} = 0.1$ ， $M_d = 10000\text{t/d}$ ， $W_c = 58\%$ ， $F_c = 38\%$ ，计算得 $Q = 2968\text{m}^3/\text{d}$ 。

2) 导排层的渗沥液入渗量 q_h 计算

按式 (4.4.3-3), $Q = 2968\text{m}^3/\text{d}$, $A = 470000\text{m}^2$, 计算得 $q_h = 7.31 \times 10^{-8}\text{m/s}$, 即 6.3mm/d 。

2 允许最大水平排水距离 L

按式 (4.4.3-1), $q_h = 7.31 \times 10^{-8}\text{m/s}$, 导排层渗透系数 k 取 $1 \times 10^{-4}\text{m/s}$, 计算得 $j = 0.881$, $L = 20.6\text{m}$ 。

4.4.4 美国规范要求颗粒导排层顶部宜铺设反滤材料; 德国规范建议颗粒导排层顶部可不铺设反滤材料, 但要加大颗粒导排层的厚度, 一部分颗粒层在使用过程中充当反滤作用; 结合我国垃圾渗沥液特性 (细颗粒物高) 和渗沥液导排建设实践 (颗粒导排层厚度较发达国家小), 建议颗粒导排层顶部铺设反滤层, 以减缓细颗粒物进入导排层造成的淤堵, 并应进行反滤计算。

4.4.6 土工复合排水网厚度较薄, 长期使用过程中, 在机械、化学、生物作用下, 其导排性能显著降低, 因此采用土工复合排水网排水时, 应进行长期导排性能验算。库区边坡目前常用透水性较差的袋装黏土作为保护层, 导致边坡区域渗沥液导排能力很低, 应避免使用。

4.4.7 渗沥液导排系统使用过程中易发生淤堵, 淤堵易发生于渗流能力较小或渗沥液流量负荷较大的位置, 如导排反滤层及渗沥液导排管位置等。导排管内的淤堵物逐步由软变硬, 若在结块变硬前进行反冲洗, 可较大程度上减缓淤堵的发展。德国和国内导排管反冲洗实践均取得了良好效果。根据经验, 若要反冲洗, 需要在导排管末端设置端头井作为维护通道, 运行过程中宜定期进行冲洗。

4.5 垃圾堆体水位及控制

4.5.3 小口径抽排竖井施工速度快, 降水效率高, 可作为填埋场应急降水措施。国内某填埋场因连降暴雨, 渗沥液水位急剧上升, 堆体滑动开裂, 急需降水; 在堆体边坡打设了 14 口小口径井, 采用压缩空气降水, 单井出水量 $20\text{m}^3/\text{d} \sim 30\text{m}^3/\text{d}$, 日均总出水量 $300\text{m}^3 \sim 400\text{m}^3$, 经过一段时间的降水, 堆体水位显著下

降，滑坡险情排除。小口径抽排竖井直径 130mm，井管井径 110mm，具体做法如图 16 所示。

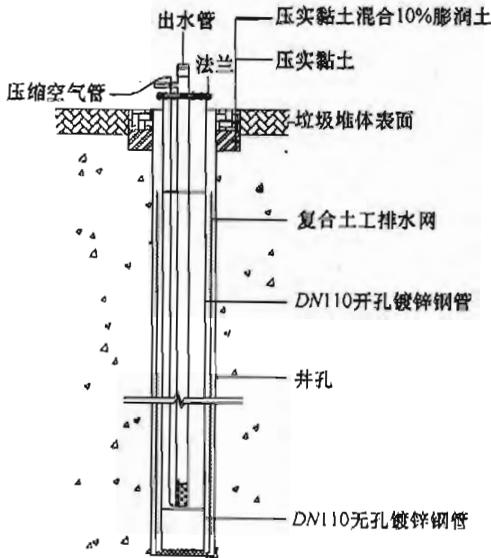


图 16 小口径抽排竖井结构详图

4.5.4 靠近堆体边坡 50m 范围内的渗沥液水位对边坡稳定安全影响大，有效控制该区域内水位，可显著提高堆体边坡稳定安全系数。该区域内加强排水的方法有：加密中间渗沥液导排盲沟和深层抽排竖井等。

4.5.5 抽排竖井内填埋气含量较高，使用电泵可能存在安全隐患；单井渗沥液产量低，电泵易干转损坏；填埋场侧向变形较大，抽排竖井井管易弯曲，电泵难以取出检修、维护，因此，建议采用压缩空气排水。

4.6 填埋气收集及控制措施

4.6.1 填埋气收集量评估是填埋气收集利用工程设计的重要依据。填埋气收集量与填埋场单位时间理论产气量、填埋场施工、运行情

况及渗沥液水位、填埋气收集设施影响范围面积等因素有关。

填埋场建设、运行情况及渗沥液水位对填埋气收集量的影响采用填埋气收集率 η 表征。参考美国环境保护局针对我国垃圾填埋场产气资料，认为无论填埋场设计多么合理和填埋气收集系统覆盖多么完整全面，至少 15% 填埋气无法收集（即填埋气收集率最高取 85%），在此基础上根据填埋场施工、运行与渗沥液水位高度情况做进一步折减。针对各种影响因素说明如下：

①彻底和及时压实、集中倾倒区域和及时覆盖，可减少空气（氧气）和地表水进入垃圾体，加快厌氧降解并产生可利用的填埋气，还可减少不均匀沉降，减少收集管线出现问题的可能性；②填埋厚度较小的填埋场，垃圾趋于好氧分解，甲烷比例下降；③覆盖可使填埋气收集系统更易达到所需的负压状态，扩大填埋气收集范围；④填埋场底部防渗层可减少填埋气从填埋场底部逃逸，并减小场外气体从填埋场底部进入填埋场；⑤因渗沥液水位以下垃圾气体渗透系数很小，填埋气难运移至收集系统。因此，结合我国填埋场现场调研及特点，建议了表 4.6.1 填埋场建设和运行情况的填埋气收集率折减系数。

4.6.2、4.6.3 填埋场渗沥液水位对填埋气收集率影响较大，因此规定高水位填埋场宜进行不同水位降低条件的现场抽气试验，根据现场抽气试验所得的渗沥液水位降幅与填埋气收集量关系，为填埋气收集利用工程设计和渗沥液水位降低措施提供基础，达到提高填埋气收集率的目的。现场抽气试验可按如下要点进行：

- 1) 抽气试验应进行 3 口以上单井试验与多井同步试验。已建竖井区域，宜选取既有竖井进行试验；尚未建设竖井区域，应选择代表性位置进行试验；
- 2) 抽气试验的导气竖井结构形式和施工应符合现行行业标准《生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术规范》CJJ 133 规定。竖井影响范围内垃圾表层应进行覆盖，井头留检测孔，用于检测填埋气成分、温度和压力；

- 3) 抽气试验分为被动（静态）试验和主动（动态）试验；被动试验和主动试验均宜先进行单井试验，后进行多井同步试验，各参数取连续运行三天试验的平均值；
- 4) 被动试验是指在风机不运行（即未抽气条件）情况下的试验，测试无抽气条件下填埋气收集量、井内压力、填埋气成分和温度等，作为主动抽气试验评价的补充；
- 5) 主动试验是指在风机连续运转（即抽气条件）情况下的试验；测试时，竖井周边应设置3口气压监测井，离竖井距离宜取0.5倍、1.0倍、1.5倍井深，且宜呈直线布置；抽气量大小控制依据为在保证风机出口处填埋气中氧浓度低于1%条件下的最大抽气量；主动试验测试抽气条件下填埋气收集量、井内压力、填埋气成分和温度等；
- 6) 导气竖井影响半径宜通过主动抽气试验时气压监测井的气压结果确定；导气竖井与监测井的压力差 ΔP 与两者间距 R 存在以下关系： $\Delta P = a \ln \Delta P + b$ ，式中系数 a 和 b 可采用最小二乘法确定；一般认为导气竖井影响半径处气压力为 -0.25kPa ，利用 $R = \exp [(\Delta P - b) / a]$ 确定导气竖井影响半径；
- 7) 主动试验可获得导气竖井影响半径内垃圾当前填埋气收集量 C ，根据本规范第4.6.1条确定抽气时相应的填埋气收集率 η ，可采用式(4.6.1-1)计算影响半径内垃圾当前单位时间理论产气量 Q （ $\beta=1$ ），结合该填埋场所填埋垃圾的单位重量产气潜力，根据现行行业标准《生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术规范》CJJ 133单位时间理论产气量计算公式确定填埋垃圾产气速率常数；
- 8) 采用抽气试验确定的垃圾产气速率常数，并结合该填埋场所填埋垃圾的单位重量产气潜力，可分别采用现行行业标准《生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程

技术规范》CJJ 133 单位时间理论产气量计算公式和本规范式 (4.6.1-1) 预测未来填埋气产量和收集量, 据此合理制定填埋气收集利用工程分期建设规划。

4.6.4 采用兼有降水和集气功能竖井能有效提高高水位填埋场的填埋气收集率, 其抽排管内径不宜小于 200mm。渗沥液水位较低的填埋场, 井深可尽量取大, 但为防止钻孔破坏场底防渗系统, 井底距场底间距不宜小于 5m。导气竖井间距过小, 会造成导气竖井影响范围重叠而降低效率; 导气竖井间距过大, 难以有效收集导气竖井影响范围外垃圾所产填埋气。编制组研究表明 (图 17) 以气压为 5% 和 10% 抽气压力作为竖井抽气影响范围标准, 影响深度达垃圾堆体底部的竖井影响半径范围分别为 (1.35~1.53) 倍和 (0.76~1.0) 倍井深, 故建议井间距取井深的 (1.5~2.5) 倍。

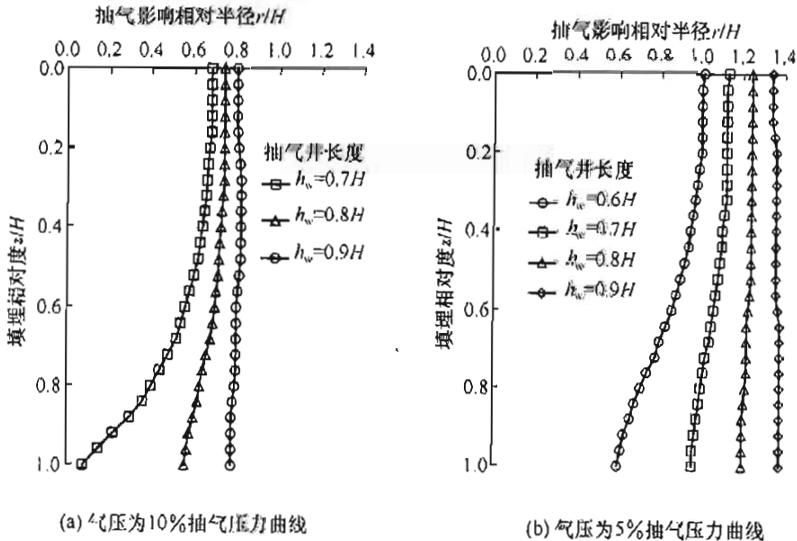


图 17 导气竖井影响半径

H —填埋垃圾厚度; h_w —导气竖井深度; r —导气竖井轴向坐标; z —深度坐标

4.6.5 填埋作业应设立垃圾集中倾倒区域, 减小填埋作业面。对于新填埋垃圾区域, 应及时进行临时覆盖; 对非填埋作业或已达设计标高的区域, 应及时做好中间或封场覆盖。

5 填埋场沉降及容量

5.1 一般规定

5.1.1 填埋垃圾在生化降解和上覆垃圾自重荷载作用下会产生压缩，大量资料表明垃圾堆体沉降量可达初始填埋厚度的30%~50%。而且，填埋场封场后因生化降解作用会产生较大的工后沉降。不均匀沉降可能影响填埋场构筑物服役性能，如渗沥液导排系统发生“倒坡”而影响导排效果，衬垫系统和封场覆盖系统防渗层因张拉而开裂，故作本条规定。

5.1.2 填埋场运行时间一般短则数年，长则几十年，大部分垃圾堆体压缩在填埋场封场前发生，不考虑垃圾堆体压缩将使得填埋场容量和运行年限计算值偏小。

5.1.3 十多米甚至几十米堆高的垃圾堆体荷载可造成地基产生数米的沉降和较大的不均匀沉降。若不进行验算并采取有效措施，底部导排系统或衬垫系统易失效。对于原场底防渗未达防污标准的填埋场进行竖向扩容时，通常需设置中间衬垫系统，若下卧堆体厚度和竖向扩建高度较大，中间衬垫系统沉降可达数米。

5.2 垃圾堆体沉降计算

5.2.2 垃圾堆体沉降计算时上覆垃圾自重应力小于前期固结应力时垃圾主压缩量较小，可忽略不计。钱学德（2001）建议垃圾前期固结应力取48kPa。根据我国填埋场的压实现状及测试结果，本条建议无试验数据时前期固结应力取30kPa。

垃圾主压缩指数可选取新鲜垃圾或填埋垃圾的试验结果，国内外垃圾的室内压缩试验结果总结如图18所示，可见高应力条件（如1000kPa）下垃圾孔隙比趋于稳定值（0.8~1.2）。

5.2.3 填埋场实际沉降-时间对数曲线通常呈现初始平缓、后续

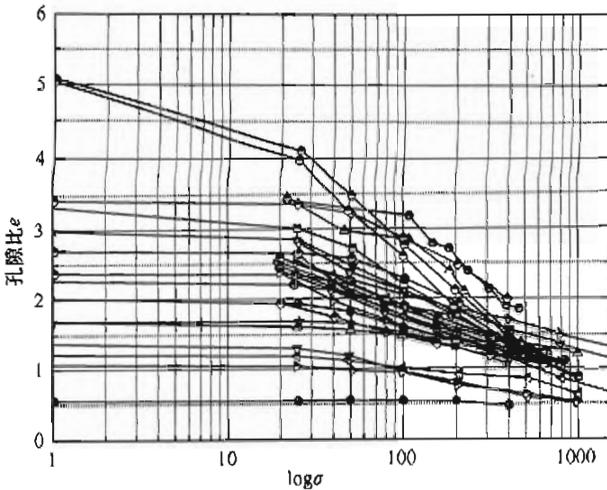


图 18 城市生活垃圾 e - $\log \sigma$ 曲线

较陡的特点。Sowers 次压缩模型易高估初期沉降、低估后期沉降 [图 19 (a)]; 应力-降解压缩模型能较好预测填埋场整个沉降发展历程 [图 19 (b)]。因此, 对后期沉降计算精度要求较高的设施 (如中间渗沥液导排系统与土工膜), 其次压缩沉降验算建议采用应力-降解压缩模型。

式 (5.2.3-2) 中 $\epsilon_{dc}(\sigma_0)$ 和 $\epsilon_{dc}(\sigma_i)$ 分别是 σ_0 和 σ_i 作用下新鲜垃圾和完全降解垃圾压缩应变的差, 如图 20 所示。编制组所开展的室内降解压缩试验表明: 初始孔隙比为 3.93 的垃圾试样, 在 150kPa 压力作用下应力引起的应变为 33.8%, 降解引起的应变为 24%。

垃圾降解压缩速率与材料易降解程度和填埋环境有关, 其取值范围较广。例如, Lu (1981) 和 Sufliote 等 (1993) 建议垃圾降解压缩速率分别为 0.235/年和 0.055/年~0.087/年。编制组对杭州天子岭填埋场表层垃圾进行了取样测试, 测得该填埋场垃圾降解压缩速率为 0.095/年。

修正次压缩指数 $C_a / (1 + e_0)$ 建议取值范围主要基于大量的国内外试验成果 (Sharma 等, 2007)。

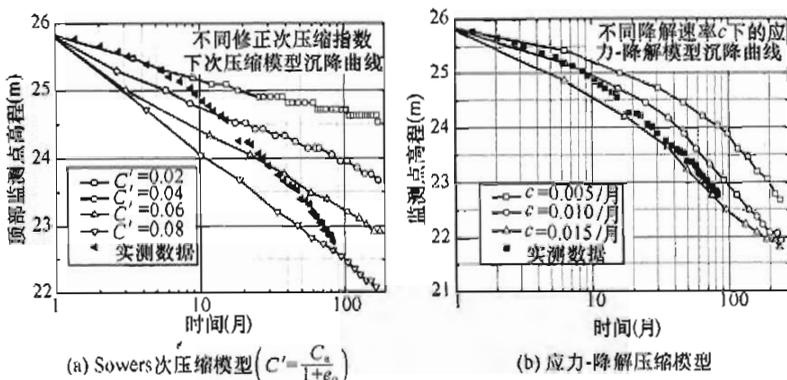


图 19 某填埋场垃圾堆体沉降实测与模型分析结果比较

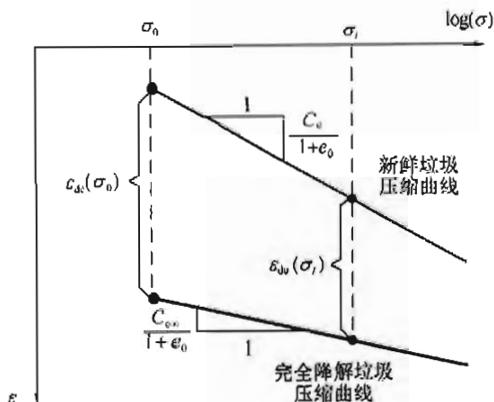


图 20 新鲜垃圾与完全降解垃圾压缩曲线

5.2.4 式 (5.2.1) 是垃圾堆体内任意点在某一时刻其下卧垃圾的总压缩量, 该点沉降应不包括填埋该点时其下卧垃圾的压缩总量 S_1 , 故采用式 (5.2.4) 计算。

5.3 填埋量计算

5.3.1、5.3.2 国内通常采用填埋库容和“单位库容填埋量”的乘积来估算填埋量, 但“单位库容填埋量”取值往往依据经验,

易出现与实际差异较大的情况。本规范计算方法考虑了填埋场运行期间的堆体压缩，经上海老港、苏州七子山、广州新丰、成都和长安等 10 余个填埋场验证，该方法可有效提高填埋场填埋量的计算精度。

填埋场填埋量可按照下列步骤进行分析：

1 将整个填埋场库区按照场底地形和封场形状分为 n 个较规则的区域，计算每个区域的平面面积，某区域 i 堆体的平均设计有效填埋高度 D_i 为该区域的有效库容 V_i 除以该区域的平面面积 A_i ；

2 根据预期的填埋场单位时间垃圾进场量预估填埋速率，并确定各区域垃圾的分层厚度，一般取 2m~5m；填埋速率和分层厚度均不考虑垃圾压缩的影响；

3 如图 21 所示，对任一填埋区域 i ，垃圾体通过逐层添加的方式模拟堆填过程，每堆填一层垃圾，根据本规范沉降分析方法计算其下每一层垃圾的压缩量 S_{ij} 以及压缩后的填埋厚度 H_{ij} —

S_{ij} ，如果 m 层垃圾压缩后的总填埋厚度 $\sum_{j=1}^m (H_{ij} - S_{ij})$ 小于平均

设计有效填埋高度 D_i 时，则该区域继续填埋；当 $\sum_{j=1}^m (H_{ij} - S_{ij})$

与 D_i 的差值接近分层厚度时，最后一层堆填垃圾的初始填埋厚

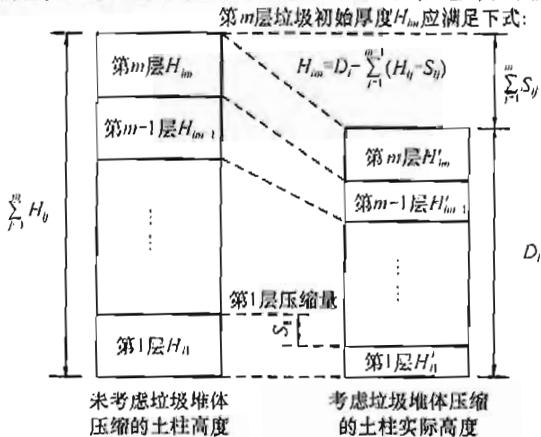


图 21 填埋场某一填埋区域填埋量计算示意图

度则取 D_i 与 $\sum_{j=1}^m (H_{ij} - S_{ij})$ 的差值；

4 该区域的填埋量即为各层垃圾填埋量之和，按式(5.3.1-1)计算填埋量。

5.4 填埋场库区设施不均匀沉降验算

5.4.5 土工膜在不均匀沉降和下卧堆体局部沉陷条件下可能产生过大的拉伸应变，因此本条规定土工膜在上述两种条件下的拉伸应变都应小于其允许应变特征值，以确保填埋场底部防渗系统、中间衬垫系统和封场覆盖系统的有效运行。防渗系统可能由一种以上的土工材料组成，其允许应变特征值应取这些土工材料的允许应变特征值的最小值。HDPE 土工膜的允许应变特征值在 8% 左右，GCL 的允许应变特征值一般为 1%~10%，压实黏土防渗层的允许拉伸应变值一般仅为 0.1%~1.0%，建议通过试验确定。

5.5 填埋场不均匀沉降控制和增容措施

5.5.2~5.5.5 充分压实可降低垃圾初始孔隙比，提高垃圾容重，增加填埋垃圾上覆应力；垃圾容重较小，在水位以下其有效容重仅为 $1\text{kN/m}^3 \sim 4.5\text{kN/m}^3$ ，降低渗沥液水位，可大幅提高垃圾堆体的有效自重应力。渗沥液回灌等措施可加快降解压缩。以上方法在国外已被广泛采用，我国对这方面重视不够。还可采取强夯、堆载预压、深层动力压实与加速固结措施减小沉降，但值得注意的是对于场底有衬垫层的填埋场，应慎用强夯、堆载预压、深层动力压实，防止破坏衬垫层；细化填埋区作业计划及规划，可有效降低堆体不均匀沉降和变形。根据编制组对若干填埋场的专题分析，各增容措施增加填埋量幅度如下：提高填埋作业压实度为 10%~15%；降低渗沥液水位为 2%~5%；加速堆体降解稳定为 2%~5%；合理分区填埋和填埋坡度控制为 1%~3%。

5.5.6 HDPE 柔性材质管材一方面可承受较大的拉伸应变；另一方面也可承受较大的竖向压力，能较好地适应填埋场的不均匀沉降。

6 填埋场稳定

6.1 一般规定

6.1.1 在填埋场施工期间，挖方、填方、垃圾坝和底部衬垫系统等构筑物建设均涉及边坡的稳定性；在填埋场运行期间，随垃圾堆体高度增加，逐步形成永久边坡和临时边坡，其中临时边坡的稳定性常被忽视；填埋场封场后，垃圾堆体边坡高度达到最大，存在较大失稳风险。

国内外垃圾堆体失稳事故调查发现，垃圾堆体一般有以下三种失稳模式（钱学德，2000）：通过垃圾堆体内部的滑动破坏；因下卧地基破坏引起的通过堆体内部与下卧地基的滑动破坏；因土工材料界面强度不足引起的部分或全部沿土工材料界面的滑动破坏。其中，后者破坏后果严重但常被忽视。复合衬垫系统已作为基本防渗系统被现行行业标准《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范》CJJ 113 推荐使用，复合衬垫系统中土工材料界面的抗剪强度特别是残余抗剪强度较低（如其残余摩擦角仅为 $7^{\circ}\sim 18^{\circ}$ ），易导致堆体部分或全部沿土工材料界面失稳。根据 Koerner 和 Soong（2000）以及钱学德和 Koerner（2007，2009）对世界上 15 个填埋场失稳事故的调查，发现 8 个设置复合衬垫系统的填埋场失稳模式均是部分或全部沿土工材料界面的平移破坏，如表 4 所示，造成垃圾与渗沥液大量外泄。我国从 20 世纪 90 年代后期开始陆续建设了含有复合衬垫系统的卫生填埋场，近几年来这批填埋场随着高度逐步增加，也发生了沿土工材料界面的失稳事故，应引起设计者和运行单位的高度重视。

表 4 15 个大型垃圾填埋场失稳模式总结

(Qian and Koerner, 2007; 2009)

| 案例 | 年份 | 地点 | 失稳模式 | 失稳垃圾的体积 (m ³) |
|-----|------|-----|---------|---------------------------|
| U-1 | 1984 | 北美洲 | 单圆弧滑动破坏 | 110000 |
| U-2 | 1989 | 北美洲 | 多圆弧滑动破坏 | 500000 |
| U-3 | 1993 | 欧洲 | 平移破坏 | 470000 |
| U-4 | 1997 | 北美洲 | 平移破坏 | 1100000 |
| U-5 | 1997 | 北美洲 | 单圆弧滑动破坏 | 100000 |
| U-6 | 1998 | 北美洲 | 平移破坏 | 13000 |
| U-7 | 2000 | 亚洲 | 单圆弧滑动破坏 | 16000 |
| L-1 | 1988 | 北美洲 | 平移破坏 | 490000 |
| L-2 | 1994 | 欧洲 | 平移破坏 | 100000 |
| L-3 | 1997 | 北美洲 | 平移破坏 | 300000 |
| L-4 | 1997 | 非洲 | 平移破坏 | 300000 |
| L-5 | 1997 | 南美洲 | 平移破坏 | 1200000 |
| L-6 | 1998 | 非洲 | 平移破坏 | 50000 |
| L-7 | 2000 | 北美洲 | 平移破坏 | 100000 |
| L-8 | 2002 | 欧洲 | 平移破坏 | 200000 |

注：U 表示无衬垫的工程。

L 表示含土工膜或复合衬垫系统 (GM/GCL/CCL) 的工程。

6.1.2 垃圾堆体边坡工程安全等级是设计、施工中根据不同的场地条件及工程特点加以区别对待的重要标准，从高到低分三级，一级最高，三级最低。填埋场位于城市周边，是城市功能的重要组成部分，其失稳造成的危害较大；且从垃圾堆体边坡工程事故原因分析看，高度较大填埋场发生失稳事故的概率较高，造成的损失较大，因此本条主要以垃圾堆体边坡高度作为安全等级的划分标准。在规范编制过程中，对国内省会城市现有大型填埋场形式和设计高度进行了总结，平原形填埋场垃圾堆体高度在 45m~80m 之间，山谷形填埋场在 60m~130m 之间。因此将边

坡高度 $\geq 60\text{m}$ 的垃圾堆体边坡工程划入一级。

以下对安全等级应提高一级的情况进行说明：填埋场下游有重要城镇、企业或交通干线时，失稳会造成人民生命财产的大量损失，灾害严重；修建在软弱地基上的填埋场，沿软弱地基失稳的概率较高，且失稳往往造成场底衬垫系统破坏，或当填埋场修建在现有填埋场及污泥坑等特殊土之上时，其失稳概率也将增加；山谷形填埋场底部库区顺坡向边坡坡度大于 10° 时，易发生部分或者全部沿底部土工材料界面的失稳，该失稳模式将造成大量垃圾堆体和渗沥液的外泄。

6.1.3 三种运用条件主要按可能出现的频度高低划分。一种运用条件往往包含多种工况，但由于垃圾堆体边坡工程的复杂性，条文中难以将不同运用条件下的所有工况全部列出，条文中指明的仅是部分典型的工况，而非所有工况。

1 正常运用条件

在划分正常运用条件时，考虑垃圾堆体边坡工程的特点，明确了正常运用条件包括填埋场填埋过程以及封场后。编制组“渗沥液水位对填埋场稳定影响”专题研究结果发现：由于我国垃圾含水率高、垃圾渗透系数随填埋深度降低及导排层易淤堵等原因，现有填埋场的垃圾堆体主水位和滞水位随堆体边坡高度增加而增加，有些埋深在垃圾堆体表面以下 $4\text{m}\sim 10\text{m}$ 。对于这些现有填埋场，上述逐步壅高的渗沥液水位应属于正常运用条件。

2 非常运用条件 I

根据钱学德和 Koerner (2007, 2009) 的 15 个填埋场事故原因调查，有 10 个垃圾堆体边坡失稳与渗沥液水位相关。在我国南方，在正常运用条件下渗沥液水位经常处于较高水平，一旦发生强降雨和其他原因易引起渗沥液水位显著上升，但该工况持续时间较短，发生频度较低，故将此工况划为非常运用条件 I。

3 非常运用条件 II

非常运用条件 II 主要根据现行行业标准《碾压式土石坝设计规范》SL 274 和《水利水电工程边坡设计规范》SL 386 的规定，

确定正常运用条件遭遇地震作为非常运用条件Ⅱ，与非常运用条件Ⅰ相区别。

6.2 垃圾抗剪强度指标

6.2.1 在工程实践中，垃圾抗剪强度指标的确定方法很多，主要有现场试验（现场直剪试验、SPT、CPT 等现场试验方法均可建立与垃圾抗剪强度指标的相关关系）、室内直剪试验、室内三轴试验、工程类比或反演分析等。一般来说，现场试验方法取得的垃圾抗剪强度指标较为可靠，但是有的现场试验（如现场直剪试验）费用高、周期长、难度较大；室内试验相对简单易行，费用较低，室内试验应选取有代表性的垃圾试样。

垃圾强度与龄期及破坏应变标准有关，如图 22 所示。由图 22 可知，随填埋龄期增加，垃圾内摩擦角增大，黏聚力降低；随破坏应变取值增加，垃圾内摩擦角和黏聚力均增加。鉴于垃圾强度的复杂性，及新建填埋场与一般岩土工程勘察工程不同，无法从现场取得垃圾试样进行试验，因此条文要求一级垃圾堆体边坡同时采用工程类比和反演分析进行综合分析，确定垃圾抗剪强度指标。对于二级和三级垃圾堆体边坡，也可采用工程类比方法

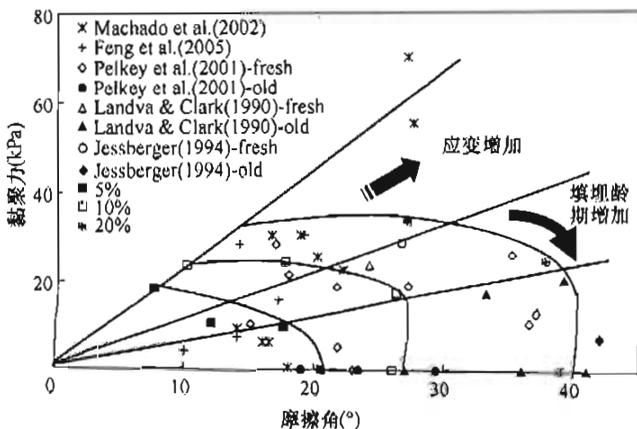


图 22 垃圾抗剪强度参数

确定抗剪强度指标。Kavazanjian 等 (1995) 推荐美国垃圾抗剪强度参数按下列原则取值: 在深度 3m 以内, 黏聚力 $c' = 24\text{kPa}$, 内摩擦角 $\phi' = 0^\circ$; 在深度 3m 以下, 黏聚力 $c' = 0\text{kPa}$, 内摩擦角 $\phi' = 33^\circ$; Dixon 和 Jones (2005) 推荐英国垃圾抗剪强度参数取值为: 黏聚力 $c' = 5\text{kPa}$, 内摩擦角 $\phi' = 25^\circ$; 编制组对垃圾抗剪强度进行了大量研究, 总结了垃圾抗剪强度指标参考值, 如表 5 所示 (10% 应变), 供设计人员参考使用, 其中: ① 无经验时取表中的低值; ② 当加筋含量较多时, 内摩擦角取低值, 黏聚力取高值; ③ 当土粒含量较多时, 内摩擦角取高值, 黏聚力取低值; ④ 浅层垃圾抗剪强度参数与压实程度有关, 压实程度不良时取小值, 压实程度良好时取大值。

表 5 垃圾抗剪强度指标参考值

| 垃圾类型 | 内摩擦角 ϕ' ($^\circ$) | 黏聚力 c' (kPa) |
|-----------------|---------------------------|----------------|
| 浅层垃圾 (埋深小于 10m) | 12~25 | 15~30 |
| 深层垃圾 (埋深大于 10m) | 25~33 | 0~10 |

6.2.3 垃圾表现出应变硬化的特征, 在利用莫尔库伦理论确定强度参数时应选择合适的应变作为破坏标准。根据浙江大学的研究成果, 采用 10% 应变作为破坏标准得到的强度参数, 可满足边坡变形及稳定控制的双要求, 在苏州七子山填埋场及深圳下坪填埋场工程的稳定分析中得到了验证, 因此推荐垃圾破坏标准的应变建议为 10%。

6.3 土工材料界面强度指标

6.3.1 与填埋垃圾相比, 土工材料界面抗剪强度较低, 是垃圾堆体稳定的薄弱环节。根据美国规范、欧洲规范以及现有研究成果, 确定土工材料界面抗剪强度指标的方法主要有两种, 对于正应力较大的土工材料界面, 为获得残余强度, 应采用具有剪切位移达到 100mm 的大尺寸界面直剪仪; 对于正应力较小的封场覆盖系统可采用斜坡试验。土工合成材料因生产厂家、生产工艺、

种类及在现场应用条件不同,其强度指标差距较大,因此条文要求一级、二级垃圾堆体边坡采用试验方法确定土工材料界面抗剪强度指标,三级垃圾堆体边坡可采用工程类比确定抗剪强度指标。表6列出了土工材料界面参数的取值范围,供设计人员参考采用,其中:①无经验时取表中的低值;②封场覆盖系统,摩擦角宜取高值;③当GCL水化时,土工膜/GCL界面摩擦角和黏聚力均应取低值。如果土工材料种类和材质已经确定,还可参考Koerner和Narejo(2005)的总结成果,如表7所示。该表是统计和分析了3260个各种土工材料界面直剪试验数据。

表6 各种典型土工材料界面的抗剪强度指标取值范围

| 界面类型 | 峰值强度指标 | | 残余强度指标 | |
|------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | 有效摩擦角 ϕ'_p (°) | 有效黏聚力 c'_p (kPa) | 有效摩擦角 ϕ'_r (°) | 有效黏聚力 c'_r (kPa) |
| 光滑土工膜/土工织物 | 9~11 | 0 | 7~8 | 0 |
| 粗糙土工膜/土工织物 | 20~30 | 0~5 | 12~15 | 0~2 |
| 光滑土工膜/黏土 | 9~12 | 2 | 7~9 | 1 |
| 粗糙土工膜/黏土 | 22~32 | 0~20 | 12~18 | 0~10 |
| 光滑土工膜/GCL | 9~10 | 0 | 8~9 | 0 |
| 粗糙土工膜/GCL | 22~32 | 0~5 | 9~16 | 0 |
| 土工织物/土工网 | 12~27 | 0 | 10~14 | 0 |
| 土工织物/土工织物 | 15~20 | 0~2 | 9~12 | 0~1 |

表7 土工材料界面剪切强度汇总表 (Koerner and Narejo, 2005)

| 界面材料1 | 界面材料2 | 峰值强度指标 | | | | 残余强度指标 | | | |
|--------|---------|------------------|-----------------|-----|-------|------------------|-----------------|-----|-------|
| | | ϕ'_p (°) | c'_p (kPa) | 试验数 | R^2 | ϕ'_r (°) | c'_r (kPa) | 试验数 | R^2 |
| 光面HDPE | 砂性土 | 21 | 0.0 | 162 | 0.93 | 17 | 0.0 | 128 | 0.92 |
| 光面HDPE | 非饱和黏性土 | 11 | 7.0 | 79 | 0.94 | 11 | 0.0 | 59 | 0.95 |
| 光面HDPE | 无纺针刺土工布 | 11 | 0.0 | 149 | 0.93 | 9 | 0.0 | 82 | 0.96 |

续表 7

| 界面材料 1 | 界面材料 2 | 峰值强度指标 | | | | 残余强度指标 | | | |
|----------|-----------|------------------|-----------------|---------|-------|------------------|-----------------|---------|-------|
| | | ϕ'_p (°) | c'_p (kPa) | 试验 数 | R^2 | ϕ'_r (°) | c'_r (kPa) | 试验 数 | R^2 |
| 光面 HDPE | 土工网 | 11 | 0.0 | 196 | 0.90 | 9 | 0.0 | 118 | 0.93 |
| 光面 HDPE | 土工复合排水网 | 15 | 0.0 | 36 | 0.97 | 12 | 0.0 | 30 | 0.93 |
| 糙面 HDPE | 砂性土 | 34 | 0.0 | 251 | 0.98 | 31 | 0.0 | 239 | 0.96 |
| 糙面 HDPE | 非饱和黏性土 | 19 | 23.0 | 62 | 0.91 | 22 | 0.0 | 35 | 0.93 |
| 糙面 HDPE | 无纺针刺土工布 | 25 | 8.0 | 254 | 0.96 | 17 | 0.0 | 217 | 0.95 |
| 糙面 HDPE | 土工网 | 13 | 0.0 | 31 | 0.99 | 10 | 0.0 | 27 | 0.99 |
| 糙面 HDPE | 土工复合排水网 | 26 | 0.0 | 168 | 0.95 | 15 | 0.0 | 164 | 0.94 |
| 糙面 HDPE | 无纺土工布 GCL | 23 | 8.0 | 180 | 0.95 | 13 | 0.0 | 157 | 0.90 |
| 糙面 HDPE | 编织土工布 GCL | 18 | 11.0 | 196 | 0.96 | 12 | 0.0 | 153 | 0.92 |
| 光面 LLDPE | 砂性土 | 27 | 0.0 | 6 | 1.00 | 24 | 0.0 | 9 | 1.00 |
| 光面 LLDPE | 黏性土 | 11 | 12.4 | 12 | 0.94 | 12 | 3.7 | 9 | 0.93 |
| 光面 LLDPE | 无纺针刺土工布 | 10 | 0.0 | 23 | 0.63 | 9 | 0.0 | 23 | 0.49 |
| 光面 LLDPE | 土工网 | 11 | 0.0 | 9 | 0.99 | 10 | 0.0 | 9 | 1.00 |
| 糙面 LLDPE | 砂性土 | 26 | 7.7 | 12 | 0.95 | 25 | 6.2 | 12 | 0.95 |
| 糙面 LLDPE | 黏性土 | 21 | 6.8 | 12 | 1.00 | 13 | 7.0 | 9 | 0.98 |
| 糙面 LLDPE | 无纺针刺土工布 | 26 | 8.1 | 9 | 1.00 | 17 | 9.5 | 9 | 0.96 |
| 糙面 LLDPE | 土工网 | 15 | 3.6 | 6 | 0.97 | 11 | 0.0 | 6 | 0.98 |
| 光面 PVC | 砂性土 | 26 | 0.4 | 6 | 0.99 | 19 | 0.0 | 6 | 0.99 |
| 光面 PVC | 黏性土 | 22 | 0.9 | 11 | 0.88 | 15 | 0.0 | 9 | 0.95 |
| 光面 PVC | 无纺针刺土工布 | 20 | 0.0 | 89 | 0.91 | 16 | 0.0 | 83 | 0.74 |
| 光面 PVC | 无纺热胶土工布 | 18 | 0.0 | 3 | 1.11 | 12 | 0.1 | 3 | 1.00 |
| 光面 PVC | 编织型土工布 | 17 | 0.0 | 6 | 0.54 | 7 | 0.0 | 6 | 0.93 |
| 光面 PVC | 土工网 | 18 | 0.1 | 3 | 1.00 | 16 | 0.6 | 3 | 1.00 |
| 毛面 PVC | 无纺针刺土工布 | 27 | 0.2 | 26 | 0.95 | 23 | 0.0 | 26 | 0.95 |
| 毛面 PVC | 无纺热胶土工布 | 30 | 0.0 | 8 | 0.97 | 27 | 0.0 | 8 | 0.90 |

续表 7

| 界面材料 1 | 界面材料 2 | 峰值强度指标 | | | | 残余强度指标 | | | |
|---------|----------|------------------|-----------------|---------|-------|------------------|-----------------|---------|-------|
| | | ϕ'_p (°) | c'_p (kPa) | 试验 数 | R^2 | ϕ'_r (°) | c'_r (kPa) | 试验 数 | R^2 |
| 毛面 PVC | 编织型土工布 | 15 | 0.0 | 6 | 0.78 | 10 | 0.0 | 6 | 0.76 |
| 毛面 PVC | 土工网 | 25 | 0.0 | 11 | 1.00 | 19 | 0.0 | 11 | 0.99 |
| 毛面 PVC | 土工复合排水网 | 27 | 1.1 | 5 | 1.00 | 22 | 5.7 | 6 | 1.00 |
| 加筋型 GCL | GCL 内部强度 | 16 | 38.0 | 406 | 0.85 | 6 | 12.0 | 182 | 0.91 |
| 土工网 | 无纺针刺土工布 | 23 | 0.0 | 52 | 0.97 | 16 | 0.0 | 32 | 0.97 |
| 砂性土 | 无纺针刺土工布 | 33 | 0.0 | 290 | 0.97 | 33 | 0.0 | 117 | 0.96 |
| 砂性土 | 无纺热胶土工布 | 28 | 0.0 | 6 | 0.99 | 16 | 0.0 | 6 | 0.91 |
| 砂性土 | 编织型土工布 | 32 | 0.0 | 81 | 0.99 | 29 | 0.0 | 28 | 0.98 |
| 砂性土 | 土工复合排水网 | 27 | 14.0 | 14 | 0.86 | 21 | 8.0 | 10 | 0.92 |
| 黏性土 | 无纺针刺土工布 | 30 | 5.0 | 79 | 0.96 | 21 | 0.0 | 28 | 0.79 |
| 黏性土 | 无纺热胶土工布 | 29 | 0.9 | 15 | 0.71 | 10 | 0.0 | 15 | 0.83 |
| 黏性土 | 编织型土工布 | 29 | 0.0 | 34 | 0.94 | 19 | 0.0 | 16 | 0.86 |

6.3.3 土工材料界面的抗剪强度一般具有应变软化特征，因此根据现场剪切位移可能发生的大小，分别规定了峰值抗剪强度指标及残余抗剪强度指标，可参照表 7 取值。

6.3.4 复合衬垫系统一般包含多个土工材料界面，每个土工材料界面均具有不同的峰值抗剪强度指标及残余抗剪强度指标，选择峰值抗剪强度指标还是残余抗剪强度指标将显著影响填埋场沿土工材料界面的稳定计算结果。Filz 等（2001）和林伟岸（2009）通过数值分析研究填埋场库底和边坡上土工材料界面随填埋高度不断增加而发生应变软化的可能性，分析结果表明即使在填埋高度不大的情况下，位于库区边坡（坡度大于 10° ）上的土工材料界面应力易越过峰值强度，处于大变形或残余强度的状态，而库底近水平段（坡度小于 10° ）土工材料界面大部分还未超过峰值强度。因此，在应用极限平衡理论进行填埋场稳定分析

时，可以假定库底土工材料界面处于峰值强度状态而边坡上土工材料界面处于大变形或残余强度的状态来选择界面强度参数。另外，因为垃圾体在自重作用下的沉降可达初始填埋高度的30%~50%，在堆体如此大的沉降作用下，易引起封场覆盖系统中土工材料的相对位移，从而降低界面上的剪切强度，因此封场覆盖系统中的土工材料界面均宜采用残余强度指标值。

当利用残余强度来进行填埋场稳定分析时，通常容易犯的错误把所有界面中具有最低残余强度的界面作为复合衬垫系统的最危险界面（Gilbert, 2001）。由于一个界面残余强度只有在达到了峰值强度之后才能够发生，所以具有最低峰值强度的界面才是多层复合衬垫系统的最危险界面。以糙面土工膜/加筋GCL/土工复合排水网组成的复合衬垫系统为例，说明如何确定复合衬垫系统残余抗剪强度的选取。对以上三个界面分别进行直剪试验，其结果如图23所示，GCL内部的残余强度是该复合衬垫系统中最小的残余强度，而GCL/土工复合排水网界面的峰值强度是该复合衬垫系统中的最小峰值强度，较小于GCL内部的峰值强度。该复合衬垫系统的最危险界面是GCL与土工复合排水网之间的界面，应取该界面的残余强度作为该复合衬垫

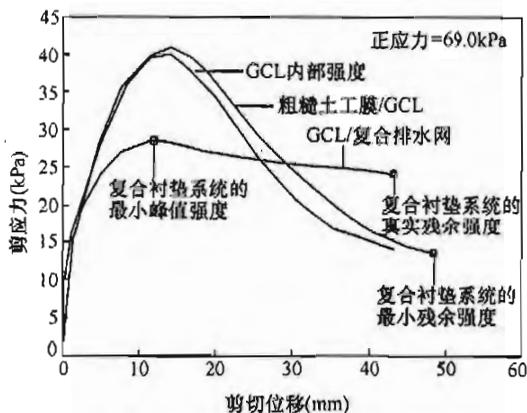


图23 复合衬垫系统各界面应力-位移曲线

系统的残余强度，而不是取 GCL 内部的残余强度。可见，要确定复合衬垫系统的残余强度，应进行不同应力状态下所有界面的直剪试验，再根据得到的应力应变曲线确定峰值强度最低的界面，即是该系统的最危险界面，然后，取该界面的残余强度来进行填埋场稳定计算。

6.4 填埋场边坡稳定验算

6.4.1 本条为强制性条文，是关于稳定验算和警戒水位确定的规定。垃圾堆体失稳滑坡不仅造成严重的地表环境污染，处理难度大、费用高，而且影响填埋场正常消纳垃圾的功能，易造成城市中垃圾没有出路而引发严重的社会危机，因此要求所有等级的垃圾堆体必须进行边坡稳定验算，以下对各条说明如下：

1 考虑到填埋是一个长期的过程，应取每填高 20m 的各填埋阶段进行验算；

2 垃圾堆体最常见的三种失稳模式详见本规范第 6.1.1 条的条文说明，该三种模式均可能产生失稳，因此要求都要验算；

3 摩根斯坦-普赖斯法可计算沿垃圾内部的圆弧形滑动或非圆弧形滑动以及部分或全部沿土工材料界面的折线滑动，因此规定采用该方法进行验算；

4 编制组根据大量工程事故分析及“渗沥液水位对填埋场稳定影响”专题研究，垃圾堆体主水位上升将显著降低填埋场稳定性。某填埋场稳定性分析模型如图 24 所示，其中 h 表示垃圾堆体主水位与垃圾坝顶面的高差， H 表示垃圾堆体边坡最高处与垃圾坝顶面的高差， h/H 表示主水位的相对位置。 H 为 60m，是一级垃圾堆体边坡，垃圾强度参数按照表 6 选取，黏聚力为 5kPa，内摩擦角为 28° ，边坡坡度为 1:3.5。垃圾堆体主水位上升对填埋场稳定安全系数的影响如图 25 所示。可见，随主水位的升高，稳定安全系数降低显著，并在达到 0.6 时，其安全系数降低到非正常条件 I 对应的稳定安全系数 1.3，此时即为警戒水位。值得注意的是，根据“渗沥液水位对填埋场稳定影响”专题

研究的结果，对于不同的垃圾强度、边坡高度及边坡坡度，计算获得的警戒水位并不相同。因此，以第 6.1.4 条规定的非正常条件 I 对应的稳定安全系数为标准可确定各填埋阶段的警戒水位，要求设计时必须给出各填埋阶段的警戒水位，并作为填埋场运行时垃圾堆体主水位监测稳定安全的预警值。

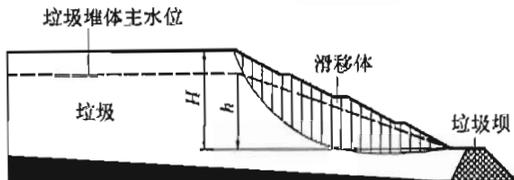


图 24 垃圾堆体主水位的分析模型图

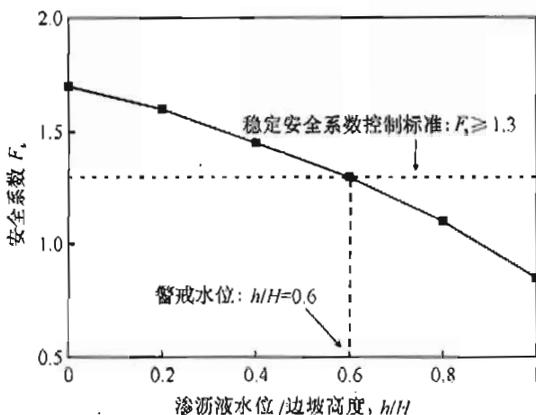


图 25 垃圾堆体主水位上升对
填埋场安全系数的影响

6.4.2 垃圾坝根据坝体用材不同，常见有土石坝、浆砌石坝及混凝土坝三种坝型，其稳定分析应分别采用现行行业标准《碾压式土石坝设计规范》SL 274、《砌石坝设计规范》SL 25 或《碾压混凝土坝设计规范》SL 314 等规范的稳定计算方法。垃圾坝体承担的荷载与水利水电工程坝体只承担水压力不同，还需承担垃圾的侧向土压力。另外由于垃圾坝上游面常铺设防渗层，以

致垃圾坝中浸润线的形状与水利工程中土石坝不同。因此，本条除了规定垃圾坝稳定的计算方法，还规定了水压力和土压力取值应根据填埋场的实际运行情况和可能出现的最不利情况确定。

封场覆盖系统可采用 Koerner 等（1988，1990）提出的双楔体法，并应考虑水头对稳定的影响。

6.4.3 垃圾堆体滞水位的形成详见本规范第 4.1.1 条的条文说明，特别是采用黏土作为中间覆盖层的填埋场极易形成滞水位，如苏州七子山、深圳下坪、成都长安、上海老港等填埋场均存在滞水位。近年来由滞水位引起的浅层局部失稳事故时有发生，因此要求进行滞水位引起的局部稳定性验算，其稳定验算模型可参考图 26。

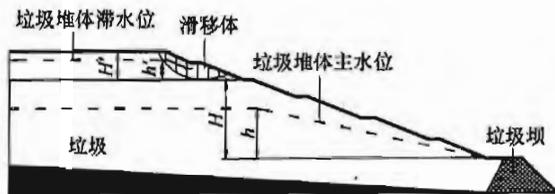


图 26 垃圾堆体主水位与滞水位并存的分析模型图

6.4.4 我国一部分填埋场在库区直接填埋污泥，形成了污泥库，严重影响填埋场边坡稳定及后续填埋作业。因污泥的抗剪强度极低，约为 $0.5\text{kPa} \sim 4\text{kPa}$ ，渗透系数分布范围为 $(10^{-7} \sim 10^{-9})\text{cm/s}$ ，固结系数在 $10^{-5}\text{cm}^2/\text{s}$ 量级。在污泥库上填埋垃圾时，污泥如不经处理而直接在上方填埋，易导致垃圾堆体沿污泥库失稳或污泥产生管涌，将引发严重的污染事故。污泥可采用原位固化或软基加固等工程措施进行处理，提高其抗剪强度及减少其压缩性。采用软基加固措施时，应充分考虑其固结系数较小的特点。

6.5 填埋场稳定控制措施

6.5.2 本条规定了垃圾堆体最大边坡坡度，根据工程经验垃圾

堆体坡度小于 1:3 较为稳定。但在一些特殊情况下,如渗沥液水位很高或下卧软弱地基时,坡度小于 1:3 边坡仍可能存在失稳风险,此时应根据实际情况进行稳定验算,稳定性不足时可设置中间平台减少边坡整体坡度提高边坡整体稳定性。

6.5.3 本条是关于避免沿土工材料界面滑移稳定控制措施的规定。自填埋场开始采用复合衬垫系统以来,沿土工材料界面的失稳事故较多,产生失稳的原因主要是对土工材料界面强度特性以及对易产生沿土工材料界面失稳的位置了解不足。根据工程经验和沿土工材料界面稳定的研究结果,提出了三条措施,各条规定说明如下:①优化基底形状是指根据填埋场场地情况对库底边坡削坡降低坡度,减少滑动力,或延长库区水平段长度,增加其抗滑力,根据林伟岸(2009)的研究结果,以上优化是提高沿土工材料界面稳定最有效的措施;②堆体体型优化是指根据实际情况在不影响库容的前提下,增加库区底部上方的垃圾填埋量,适当减少库区边坡上垃圾的填埋量;③当库区边坡坡度大于 10° 时(大于光滑土工膜/土工织物界面摩擦角),易导致垃圾堆体失稳,建议采用双糙面土工膜提高界面抗剪强度;而在库区底部,因其坡度较缓(约 2%的排水坡度),常使用光滑土工膜,易导致该处产生如图 27 所示的部分沿土工材料界面的失稳事故,故也建议采用双糙面土工膜;土工复合膨润土垫的水化作用易导致土工膜/土工复合膨润土垫界面的峰值剪切强度特别是残余剪切强度显著降低(Chen Yunmin, 2010),施工过程中应采用及时覆盖土工膜等措施减少土工复合膨润土垫的水化和采用加筋土工复合

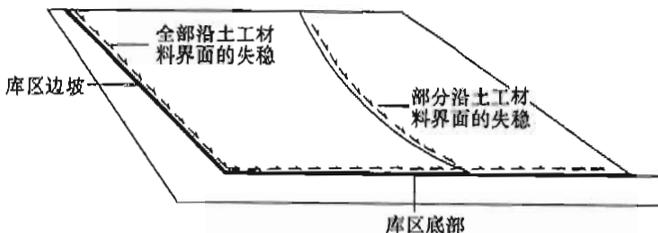


图 27 沿土工材料界面的失稳模式

膨润土垫。总之，填埋场设计应以稳定验算为基础。

6.5.5 本条为强制性条文，是关于填埋场运行后垃圾堆体主水位控制的规定。基于填埋场已有的失稳教训和理论分析成果，控制好填埋场渗沥液水位能有效防止填埋场的失稳事故。一旦垃圾堆体主水位超过警戒水位，垃圾堆体失稳概率显著增大，因此规定各填埋阶段的垃圾堆体主水位必须进行监测，并控制在警戒水位之下，警戒水位具体确定方法可参照本规范第 6.4.1 条的条文说明。

6.5.6 当水位接近或超过警戒水位时，应进行应急抢险，建议采用小口径抽排竖井快速迫降渗沥液水位，参考本规范第 4.5.3 条的条文说明。

7 填埋场治理及扩建

7.1 一般规定

7.1.1 我国早期建设的填埋场大多为简易填埋场。根据现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 的规定，目前有大量简易填埋场未能达标，应根据实际情况进行治理。

7.1.2 在经济发达、人口密集的城市，新建填埋场选址困难，在老填埋场址进行水平向、竖向或两者兼有的扩建，是缓解城市垃圾处置问题最有效方式之一。

7.1.3 竖向扩建工程及治理工程的部分或全部对象为尚未稳定的垃圾堆体，压缩性大，还产生渗沥液及填埋气，对竖向扩建工程及治理工程建设影响较大，应进行岩土工程勘察。

7.2 填埋场治理及扩建岩土工程勘察

7.2.11 由于堆体中常含有建筑垃圾、铺设进场道路所用碎石土及其他坚硬填埋物，钻探宜采用带有合金钻头岩芯管或大直径旋挖钻。另外，根据以往勘探经验，静力触探易遇到坚硬障碍物，成功概率比较低，设备易损坏。结合钻孔实施重型动力触探成功率较高，触探结果可为垃圾土分层、软弱夹层鉴别等提供依据。

7.3 扩建垃圾堆体的基层处理

7.3.2 对于未建设水平防渗系统的现有填埋场，竖向扩建工程通常要在新老堆体之间设置中间衬垫系统。扩建堆体产生的荷载将导致现有垃圾堆体产生显著的不均匀沉降，不仅改变中间衬垫系统中导排层坡度，还会造成防渗材料拉伸破坏。根据堆体沉降验算结果构建合适的基层面地形是解决上述问题最有效的方法之一。例如，对于山谷形填埋场，现有垃圾堆体沉降后往往形成中

间深、四周浅的“小盆地”形状，可相应地将扩建工程的基层面设计成“穹窿”状，该“穹窿”状基层面有利于解决导排层倒坡、防渗层被拉坏等问题。

7.3.3 现有垃圾堆体中的竖向刚性设施和中间衬垫系统竖向间距过小时，可破坏衬垫系统防渗层，竖向刚性设施（如竖井）顶部与中间衬垫系统应留有一定缓冲距离，一般 3m 以上。

7.3.4 如图 28 所示，污泥的压缩性高，压缩系数 a_{1-2} 高达 8MPa^{-1} ，存在污泥库的填埋区域会使填埋场产生较大的不均匀沉降，故作本条规定。

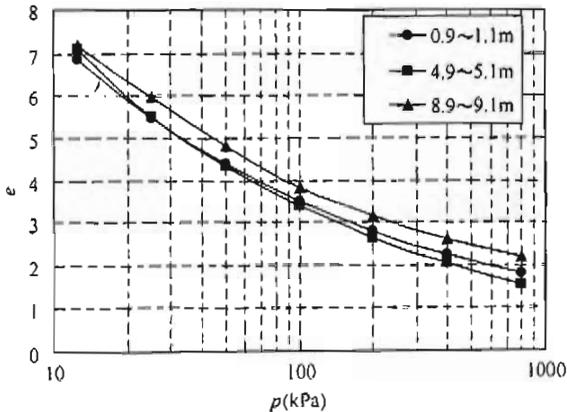


图 28 成都长安污泥库不同深度污泥的 $e-\log p$ 曲线

7.3.5 填埋气收集导排设施能有效避免气压蓄积顶托防渗层甚至爆炸的现象。

7.4 中间衬垫系统

7.4.2 防渗层下设置压实土缓冲层能增加中间衬垫系统的刚度，有利于抵抗下卧堆体不均匀沉降对防渗层的影响。加筋层能有效降低中间衬垫系统防渗层的挠曲变形和应变，其层数可根据本规范附录 B 计算确定。

7.4.5 与封顶覆盖系统的防渗层相比，中间衬垫系统防渗层所

承受的上覆应力更大，下卧堆体局部沉陷更易引起中间衬垫系统防渗材料被拉裂，因而宜设置双向土工格栅加筋层抵抗下卧堆体局部沉陷。无试验数据时，土工格栅的允许应变特征值可取 7%。

7.4.6 中间衬垫系统锚固沟设计一般应满足： $T_{req} < T < T_{allow}$ ，即锚固沟所能提供的锚固力 T 大于中间衬垫系统实际承受的拉力 T_{req} ，但小于中间衬垫系统的允许拉力 T_{allow} 。如果中间衬垫系统承受的拉力过大，则应允许土工膜在被撕裂前从锚固沟拔出。位于基层坡度或堆体厚度变化较大处及中间衬垫系统与天然边坡交界处的中间衬垫系统（图 29）一般承受很大的拉力，此时锚固端宜距离交界处一定距离，同时宜选用柔性锚固方式。

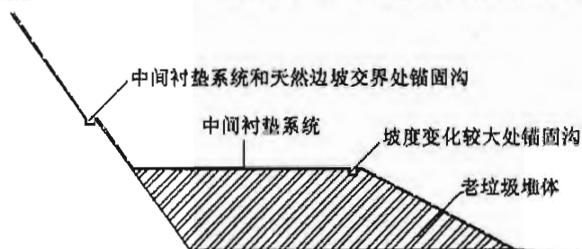


图 29 需设置柔性锚固沟的位置

7.5 填埋场治理及污染控制措施

7.5.1 我国早期建设的一些填埋场由于技术、经济等因素，没有达到现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 的污染控制和安全稳定标准。编制组调查了全国 20 多个填埋场，发现现有填埋场存在以下主要问题，以下对相应的解决措施说明如下：

1 垃圾堆体渗沥液水位普遍偏高，垃圾堆体稳定安全隐患严重。对于渗沥液水位高于警戒水位的填埋场，应在现有垃圾堆体上采取有效导排措施降低渗沥液水位，一方面提高垃圾堆体的稳定性，另一方面有利于增加垃圾导气性能、提高填埋气收

集率。

2 渗沥液渗漏对周边地下环境造成极大威胁。可采用垂直防渗帷幕对现有填埋场进行围封，其防污效果应达到与现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 规定的水平防渗系统同等效果。

3 填埋气收集及资源化利用水平低，常发生火灾、爆炸等事故。应根据现场条件建设有效的填埋气导排和收集系统。

4 缺乏有效的封场覆盖系统和地表水导排系统，造成渗沥液产量高、臭气大，影响周边居民等。应采用有效的雨污分流措施。

7.5.4、7.5.5 毛细阻滞型覆盖层与现行行业标准《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17 中的标准结构相比，可采用当地土体，具有取材方便、耐久性好、工程造价较低、施工难度小等优点，且不存在沿土工合成材料防渗层（土工膜、GCL 等）失稳。毛细阻滞型覆盖层在美国、德国等国家广泛应用于干旱半干旱地区，具有良好的防渗效果，如表 8 所示。

毛细阻滞型覆盖层防渗基于水分存储与释放原理，即降雨时通过覆盖层土体存储入渗水分，不降雨时通过植被蒸腾作用与地表水分蒸发作用释放存储水分。细粒土层与粗粒土层之间存在毛细阻滞作用：粗粒土层非饱和渗透系数随含水率降低而衰减的速率较细粒土层快，因此当含水率较小时粗粒土层渗透性显著小于细粒土，从而产生毛细阻滞效应，阻滞水分进入粗粒土层，并显著增加细粒土层存水能力。

毛细阻滞型覆盖层土层厚度应根据当地降水特点、极端气象条件（如暴雨等）来综合确定。美国 EPA 建议细粒土层厚度为 45cm~150cm，粗粒土层厚为 15cm~30cm。根据浙江大学的研究成果，结合我国干旱半干旱地区的气象特点，本条文建议细粒土层厚度介于 50cm~150cm，粗粒土层厚度应介于 20cm~30cm。工程应用时应保证粗粒土层粒径明显大于细粒土层。覆盖层结构中细粒土层具有一定闭气效果，粗粒土层还同时兼作排

气层。

植被层提供植被生长场所，并保护覆盖层不受风蚀、雨蚀与动物生活的影响。植被层材料宜采用当地适宜植物生长的土壤，土层厚度应根据植被类型、当地降水特点综合确定，但不得小于15cm。植被宜选用蒸腾能力强的植物，如草皮、灌木等，植被根系宜深入细粒土层内。

表 8 干旱半干旱地区毛细阻滞型覆盖层应用情况

| 地 区 | 年降雨量 | 覆盖层结构层厚度 | | | 年渗漏量 占总降雨 量比例 |
|-----------------|------|----------|-----------|---------|---------------------|
| | | 植被层 | 细粒土层 | 粗粒土层 | |
| Altamont CA | 358 | — | 0.6m 粉土 | — | 0.4% |
| Apple Valley CA | 119 | — | 1.1m 细砂 | — | 0% |
| Boardman OR | 225 | — | 1.8m 粉土 | — | 0% |
| | | — | 1.15m 粉土 | — | 0% |
| Polson | 380 | 0.15m | 0.5m 粉土 | 0.6m 粉砂 | 0% |
| Helena | 289 | 0.15m | 1.2m 粉质砂土 | 0.3m 碎石 | 0% |
| Monticello | 385 | 0.20m | 0.6m 粉质黏土 | 0.3m 碎石 | 0% |
| Frankfurt A. M. | 650 | — | 0.6m 粉土 | 0.2m 砂土 | 0% |
| Texas | 311 | — | 2.0m 粉质黏土 | 0.2m 碎石 | 0% |
| New Mexico | 226 | 0.20m | 1.0m 砂土 | — | 0% |

8 压实黏土防渗层及垂直防渗帷幕

8.1 一般规定

8.1.1 根据编制组对我国现有四种典型衬垫系统被污染物击穿时间研究发现，衬垫系统中的压实黏土具有非常重要的防污作用，当渗透系数大于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 时，防污效果显著降低。

8.1.2 垂直防渗帷幕可用来控制渗沥液污染地下环境。对于地下水位很高的填埋场，垂直防渗帷幕也可用于防止场外地下水进入填埋场库区。

8.2 压实黏土防渗层的土料选择

8.2.1 压实黏土防渗层需满足渗透系数小于 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的要求，可初步通过下列特征来鉴别黏土料场的土料能否达到低渗透性，以下对各条要求说明如下：

1 细粒土含量过低，低渗透性很难达到要求；

2 砾石含量不宜过高，砾石会影响细粒土的压实，过高会导致砾石之间孔隙难以被黏土填满，形成连续通道，造成渗透系数急剧增大；

3 一般来说，塑性指数小于 15 的土料，其黏粒含量较低，通常不易压实到 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的渗透系数；当土料的塑性指数大于 30~40 时，干燥时会形成硬块，潮湿时又易形成黏团，造成现场施工困难，还具有潜在的高收缩性、高膨胀性及较差的体积稳定性。因此，土料的塑性指数宜在 15 到 30 之间。

8.2.2 试坑或钻孔的位置应均匀分布于同一网格图上。地质图上应标明地质成因、试验结果、土的分类以及每一主要土层的描述。为保障土料充分及质量稳定，应尽可能选择厚度大于 1.5 m 的黏土料场。

8.3 压实黏土的含水率及干密度控制

8.3.1~8.3.4 在进行压实黏土防渗层施工时，最重要的就是对土进行含水率和干密度的合理控制。因此，设计合格的压实黏土防渗层关键是建立所选土料的干密度、含水率和饱和水力渗透系数的关系。确定上述关系主要采用击实试验和渗透试验。其中击实试验采用修正普氏击实试验、标准普氏击实试验和折减普氏击实试验三种击实试验，标准普氏击实试验即为现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的轻型击实试验，折减普氏击实试验与轻型击实试验基本相同，不同在于以每层 15 击代替了每层 25 击，修正普氏击实试验采用与标准普氏击实试验同样的击实筒，不同在于锤重为 4.5kg，落距为 45.7cm，层数为 5 层，以上三种试验的技术指标比较如表 9 所示。采用修正普氏击实试验、标准普氏击实试验和折减普氏击实试验三条击实曲线顶点连接而成的曲线就是最佳击实峰值曲线。

表 9 三种击实试验的比较

| 试验类型 | 锤重 (kg) | 落高 (cm) | 击实分层数 | 每层锤击数 |
|--------|---------|---------|-------|-------|
| 修正普氏试验 | 4.5 | 45.7 | 5 | 25 |
| 标准普氏试验 | 2.5 | 30.5 | 3 | 25 |
| 折减普氏试验 | 2.5 | 30.5 | 3 | 15 |

通过 40 多年大量试验研究发现，击实曲线上由偏干到偏湿得到的压实黏土，其水力渗透系数可相差几个数量级。因此，压实含水率对水力渗透系数具有很大的影响。为了确保压实黏土防渗层具有很低的渗透系数，现有国外施工技术规范要求含水率必须落在一个指定范围内（通常为湿于最优含水率的 0%~4%），压实黏土的干容重应大于或等于击实试验求出的最大干密度的某一百分数，称为压实度（图 30）。若采用以标准普氏击实试验求得的最大干密度，压实黏土应至少达到 95% 的压实度；若采用以修正普氏击实试验求得的最大干密度，压实黏土则应至少达到

90%的压实度。而现有很多试验数据都证明该压实度的规定会导致工程压实的数据点处于最佳击实峰值曲线以下的干燥区而造成渗透系数不满足要求，但目前该标准仍被广泛使用。因此，为了避免这种情况，应保障压实后的含水率和干密度始终位于最佳击实峰值曲线之上。

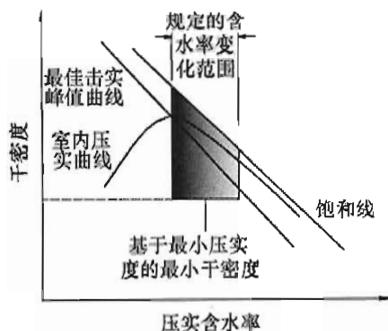


图 30 常规压实度和最优含水率的质量控制示意图 (Benson 等, 1999)

采用位于最优含水率湿边（即大于最优含水率）的击实试样做渗透试验，确定其饱和渗透系数，根据渗透试验结果重绘正文图 8.3.2 中的含水率-干密度试验点，用不同符号代表不同饱和渗透系数的击实试验点，空心符号表示饱和渗透系数大于 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的试样，实心符号表示饱和渗透系数小于等于 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 的试样，如正文图 8.3.3 所示，所绘的阴影区域应包括所有达到或超过设计标准 ($k \leq 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$) 的试验点。

黏土防渗层除了要达到规定的低饱和渗透系数外，还应确保压实后黏土具有足够的抗剪强度。为了增加单位土地面积填埋量，节约土地，大部分现代卫生填埋场的高度都相当高，普遍超过 60m。有许多大型填埋场的破坏由黏土防渗层或压实黏土防渗层/土工膜界面的抗剪强度不足引起。高于最优含水率的黏土其抗剪强度较低，但这一点往往还没有引起人们的足够关注。为了保证压实后的黏土防渗层具有足够的抗剪强度，在确定了满足规

定的饱和和渗透系数的区域后，还需再确定所选土料的抗剪强度满足堆体稳定要求。

无限制抗压强度选取 150kPa 为控制值，该强度可满足在短时间内一次性堆填 20m~30m 垃圾的要求。对于填埋高度较高的填埋场，应采取分区分期填埋的作业步骤，保证压实黏土防渗层有足够的时间消散孔压和增加强度，避免在同一填埋区域因加载速度过快和一次性堆填过高造成压实黏土防渗层破坏。

8.3.5 当土料的干密度和含水率不能满足本规范 8.3.4 条的规定时，可通过添加膨润土等添加剂达到要求。

8.4 压实黏土防渗层的施工质量控制

8.4.2 碾压试验的目的是检验拟采取的施工方法和标准，确定压实方法和碾压参数，保证压实黏土防渗层达到设计要求。以下对施工中几个重要参数说明如下：

- 1) 含水率。在施工现场，要使符合第 8.3.3 条规定范围内的含水率与压实功能配合好是十分困难的（钱学德，1999）：①含水率较高时，产生的湿软土块在一般的压实能量下易被重塑成没有大孔隙的土体，但应注意不能影响施工；②含水率较低时，需超重碾压机才能压碎土块，消除土块之间的大孔隙。
- 2) 压实功能是控制黏土防渗层质量的另一个重要因素。压实功能增加，干密度增加，渗透性减小。压实功能是通过碾压机重量、碾压遍数、速度及松土厚度实现的。Benson (1999) 推荐碾压机重量为 19t，并认为 32t 的超重型碾压机并未有更突出的优势。松土厚度应根据填土层压实完成后达到 150mm 进行控制，一般为 200mm~300mm。碾压机在一定的面积上应碾压足够的遍数才能保证达到所需的干密度，最小的碾压遍数不是固定的，但一般认为（USEPA，1991）应至少碾压 5~10 遍，才能施加足够的压实能量并保证施工质量。

以上参数均需通过碾压试验进行最终的确定。

8.5 垂直防渗帷幕及选型

8.5.1 HDPE 土工膜-膨润土复合墙是在土-膨润土槽中插入 HDPE 膜, 并通过特殊的接缝及嵌固工艺形成的复合墙。各种类型垂直防渗帷幕特点及比较见表 10。

表 10 不同类型垂直防渗帷幕特点

| 类 型 | 特 点 |
|-----------------|---|
| 水泥-膨润土墙 | 强度高, 压缩性低, 可用于斜坡场地, 渗透性低, 约为 10^{-6} cm/s |
| 土-膨润土墙 | 与水泥-膨润土垂直帷幕相比, 渗透性更低, 通常为 10^{-7} cm/s, 有时可低至 5.0×10^{-9} cm/s |
| 土-水泥-膨润土墙 | 强度与水泥-膨润土相当, 渗透性与土-膨润土相当 |
| 塑性混凝土墙 | 比水泥-膨润土刚度大、强度高, 渗透系数一般不大于 1×10^{-6} cm/s, 适合作为深垂直帷幕 |
| HDPE 土工膜-膨润土复合墙 | 防渗性和耐久性较高, 渗透性低, 可达 10^{-8} cm/s |
| 注浆帷幕 | 可密封孔洞或不透水层裂隙 |

8.5.2 垂直防渗帷幕较适合于隔水层埋深较浅的场地, 帷幕插入隔水层, 形成封闭的防渗系统。在垂直防渗帷幕设计前, 应对场地隔水层条件进行勘察, 埋深浅、厚度大、连续性好、透水性差、不存在裂隙等优势流通道的土层是比较理想的隔水层, 另外隔水层岩体不宜太硬, 以便帷幕嵌入。垂直防渗帷幕材料应具有抗渗沥液侵蚀性能和耐久性, 欧美发达国家规定在帷幕材料选择时应针对渗沥液水质开展化学相容性试验加以检验。

8.5.3 水泥-膨润土墙和塑性混凝土墙的强度较高, 水泥-膨润土墙的抗压强度可达 $140\text{kPa} \sim 350\text{kPa}$, 因此当帷幕顶部需承受上覆荷载时, 宜采用水泥-膨润土墙或塑性混凝土墙。然而, 当地基发生明显侧向变形时, 水泥-膨润土墙和塑性混凝土墙易开

裂，此时宜采用柔性的土-膨润土墙。在特殊地质和环境要求高的场地，如填埋场库区和污水处理厂的边界距居民居住区、人畜供水点、河流、湖泊较近，填埋场下存在浅埋高渗透性岩土层等情况时，采用具有较可靠低渗透性的 HDPE 土工膜-膨润土复合墙，有利于防止填埋场污染物扩散影响周边地下环境。

8.6 垂直防渗帷幕插入深度及厚度

8.6.1 专题研究分析表明，防渗帷幕渗透系数为 1×10^{-7} cm/s，且底端密封到不透水层或渗透系数不大于 1×10^{-7} cm/s 土层中时，可在土体中形成近似一维水平向渗流和扩散。根据半无限空间一维对流-弥散解析解 (Ogata, 1961)，垂直防渗帷幕厚度设计可简化为公式 (8.6.2)，该简化公式的适用条件：①帷幕渗透系数为 1×10^{-7} cm/s，底端密封到不透水层或渗透系数不大于 1×10^{-7} cm/s 土层中；②帷幕击穿标准为下游边界污染物浓度达到上游边界的 10%；③防渗帷幕的服役时间（即填埋场治理后运行时间与垃圾稳定化所需时间之和）按 50 年考虑。如填埋场所要求的服役时间短于 50 年，帷幕厚度可适当折减。当帷幕渗透系数大于 1×10^{-7} cm/s 时，可采用等效性分析确定帷幕厚度。

水动力弥散系数 D_h 和阻滞因子 R_d 的取值与帷幕材料类型、污染物种类有关。防渗帷幕厚度设计，应根据初步拟定选用的帷幕材料类型，参考相关工程的经验数据，选择最危险、污染风险最大、最不利的污染物类型对应的参数和数据。

8.6.2 与水利工程的防渗墙相比，填埋场垂直防渗帷幕不仅需减小地下水渗流量，还应控制通过垂直防渗帷幕扩散的污染物浓度，因此填埋场垂直防渗帷幕标准更高。根据国外工程经验，垂直防渗帷幕用于污染控制时，通常要求渗透系数小于 1×10^{-7} cm/s。当隔水层埋深过大而采用悬挂式帷幕时，应通过污染物渗流-扩散分析确定临界插入深度，垂直防渗帷幕临界插入深度为污染物从帷幕顶部竖向运移到达帷幕底部所需时间等于污染物水平扩散击穿浅部帷幕时间所对应的深度。

9 填埋场岩土工程安全监测

9.1 一般规定

9.1.1 渗沥液水位监测主要是监测渗沥液导排层水头、垃圾堆体主水位以及垃圾堆体滞水位，以上三种水位的存在形式对堆体边坡的稳定性影响互不相同，其影响规律见本规范第 4.1.1 条的条文说明。垃圾堆体主水位是影响垃圾堆体整体稳定的关键因素，故将其设为所有等级垃圾堆体的必测项目；渗沥液导排层水头是监控渗沥液污染地下水环境的重要因素，故一级垃圾堆体边坡设为应测项目；考虑到垃圾堆体滞水位监测较为复杂，均设为宜测项目，可根据情况进行监测。

表面水平位移反映填埋场地表位移状况，深层水平位移监测可以体现堆体沿深度方向上不同点的水平位移状况，可确定堆体沿深度方向最大水平位移值点及其位置；两者结合可掌握填埋场平面和空间的位移及边坡稳定状况，鉴别潜在失稳模式及滑动面位置。鉴于深层水平位移监测的工作量较大，需埋设测斜管，表面水平位移监测相对简便易行，因此，将表面水平位移监测设为一级和二级垃圾堆体边坡的应测项目，深层水平位移可在水位超过警戒水位，填埋场存在滑坡失稳风险时采用。

垃圾堆体沉降监测包括垃圾堆体表面沉降监测、软弱地基沉降监测、中间衬垫系统和竖井等刚性设施沉降监测。垃圾堆体表面沉降既可能是垃圾降解压缩产生，也可能是堆体失稳滑移的征兆。当渗沥液水位超过警戒水位、堆体失稳风险较高时，应进行沉降监测。软弱地基沉降反映填埋场底部地基的变形，可根据监测结果判断软弱地基的固结、强度增长及地基稳定状况，建设于软弱土地基上的一级垃圾堆体边坡填埋规模大，加载速率快，其软弱地基沉降设为宜测项目。中间衬垫系统位于老填埋场上，其沉降较

大，为预测其拉伸破坏，设为一级垃圾堆体边坡的宜测项目。竖井等刚性设施沉降关系到衬垫系统的安全，可根据情况设置。

导排层气压影响封场覆盖系统稳定及防渗层的安全，可根据情况进行监测。

监测项目的监测频次是建议值，监测频次不是一成不变的，应该根据降雨和填埋场的安全稳定状况适当地进行调整。当监测数据达到预警值、变化量较大、变化速率加快或遇到特殊情况，如暴雨、台风等恶劣天气及其他紧急事件，应适当加密观测，必要时跟踪监测；当监测值相对稳定时，可按正常监测频次进行监测。

9.1.3 根据渗沥液水位、表面水平位移速率及沉降速率等测试数据可进行堆体稳定的定性分析，以目测为主的现场踏勘及时直观反映现场状况，可起到补充判断的作用。例如，地表裂纹的发展规律，对于判断地表裂纹是由于失稳还是沉降引起，有着非常重要的作用。另外，深层水平位移为判断堆体沿土工材料界面失稳或是沿堆体内部失稳提供直接的依据。因此，以上监测手段是判断填埋场安全稳定状态的重要依据，可在不同的情况下选用。

9.2 渗沥液水位监测

9.2.1~9.2.3 渗沥液导排层水头监测一般采用孔隙水压力计测试，孔隙水压力计在渗沥液浸泡中的长期耐久性难以保障，水头变化范围大，正常应在 30cm 以下，而一旦导排层发生淤堵易造成水头壅高，可达几十米，导致难以选择合适量程的孔隙水压力计。

编制组通过某填埋场的现场实践，提出了一种新测试方法：即采用剖面沉降仪与水位计联合测定法，其测试原理如下：测量导管在导排层施工完成之后、垃圾填埋之前埋设，在监测点处导管开孔，并采用复合土工排水网包裹，其余段焊接密封。测试时，通过测量导管将剖面沉降仪送入监测点，测试监测点的高程，如图 31 所示，拔出剖面沉降仪后再将水位计送入导管，测出管内水位面的高程，如图 32 所示，将水位面高程与监测点高

程相减即可得到监测点的渗沥液导排层水头，如图 33 所示。导管材质宜选用 PPR 或 HDPE 管，管径宜为 50mm~75mm。

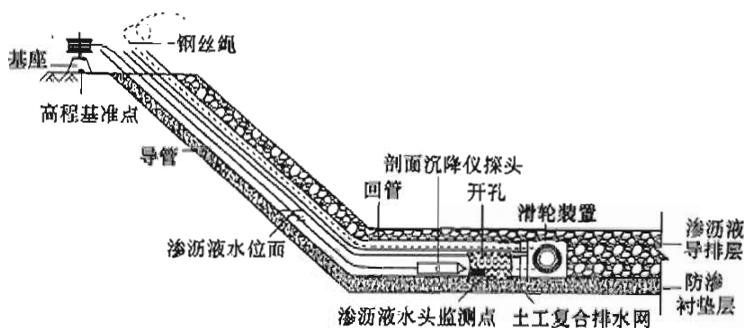


图 31 剖面沉降仪测试示意图

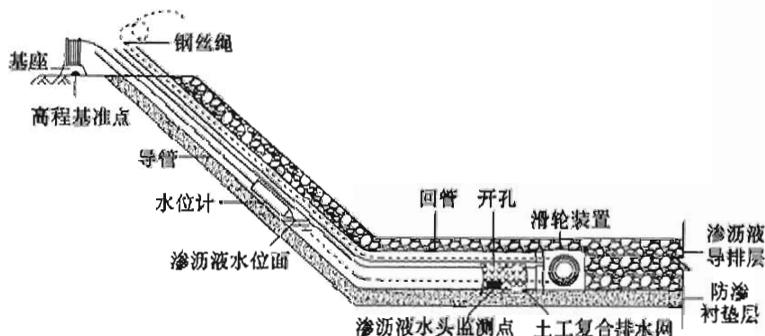


图 32 水位计测试示意图

垃圾堆体内部渗沥液水位分布复杂，存在主水位及多个滞水位，常规的水位管测试无法测试多层水位。浙江大学提出了多重水位管测试渗沥液水位的方法，并在苏州七子山、深圳下坪等填埋场成功应用。多重水位管宜钻孔敷设，钻孔时应记录隔水层的埋深。水位管宜选用 PVC 或 PPR 管，管径宜为 40mm~75mm，管底部开孔段长度宜为 1m~3m，开孔段外包土工织物，并在埋设多重水位管时在隔水层位置加入膨润土进行密封，防止上下渗沥液水位贯通而影响测试结果，如图 34 所示。井筒四周填卵石或粗砂，井口四周用黏土或掺适量膨润土的黏土封闭，管口应盖管帽。

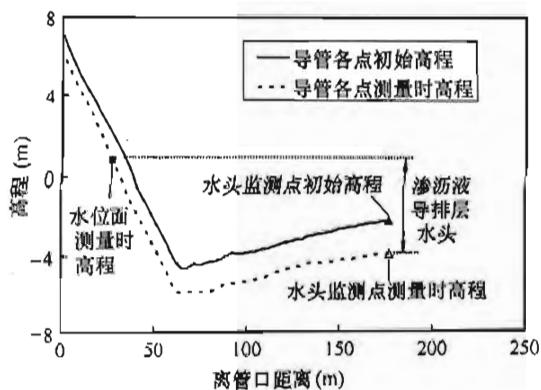


图 33 渗沥液导排层水头计算图

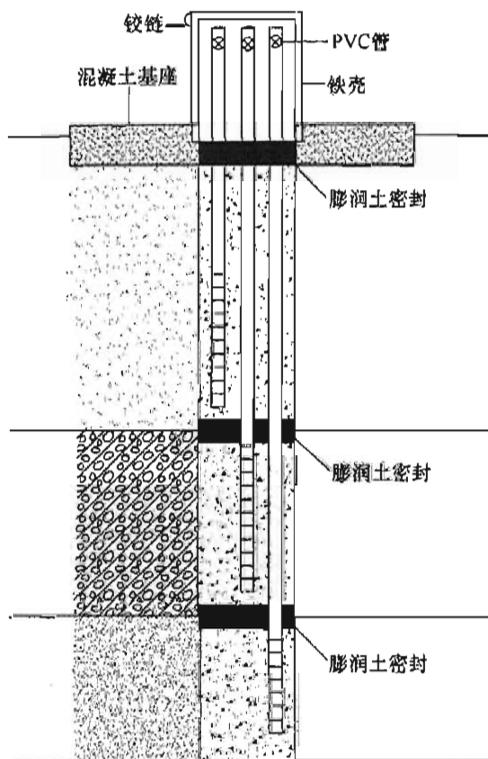


图 34 用于主水位和滞水位监测的多重水位管结构图

9.3 表面水平位移监测

9.3.1 表面水平位移监测方法及监测点可参照现行行业标准《水利水电工程边坡设计规范》SL 386，表面位移工作基点宜布设在边坡附近、边坡变形影响的范围之外，且不受外界干扰、交通方便的部位。监测点布设成网格状可根据测试方法进行优化，比如可按照准直线法或前方交会法的监测要求布设，也可按照边角网法或收敛法布设，还可按照 GPS 法布设。

9.3.3 由于垃圾含塑料、布条等加筋材料，具有应变硬化特性，垃圾堆体失稳前能承受的位移量较一般的土质边坡大。根据浙江大学对某填埋场两次堆体滑移事件前后的水平位移监测及统计分析结果（表 11），当垃圾堆体边坡的位移速率大于 10mm/d 时，堆体处于不稳定的状态，因此提出了垃圾堆体边坡表面水平位移监测的警戒值为连续两天位移超过 10mm/d。

表 11 活跃区监测点位移速率平均值统计结果（mm/d）

| | | | |
|--------|------------|-------------|-------------|
| 2008 年 | 过渡期(3~5 月) | 非稳定期(6~8 月) | 稳定期(9~10 月) |
| | 7.5 | 19.8 | 1.8 |
| 2009 年 | 非稳定期(2 月) | 过渡期(3 月) | 稳定期(4 月) |
| | 10.0 | 4.4 | 2.8 |

9.4 深层水平位移监测

9.4.1、9.4.2 深层水平位移监测建议采用活动式测斜仪。先埋设测斜管，导槽方向应和边坡滑移方向一致；每隔一定的时间将探头放入管内沿导槽滑动，通过量测测斜管斜度变化推算水平位移。监测点沿边坡倾向布置，特别是当出现滑坡征兆时应根据现场踏勘的结果设置在滑坡体位置。

9.5 垃圾堆体沉降监测

9.5.2 垃圾堆体表面沉降既可用水准法测量也可用水位连通管

法测量，标志点可与表面水平位移监测的标志点共用。软弱地基沉降一般通过在渗沥液导排层中埋设沉降管，采用剖面沉降仪进行测量，该方法可测试整个断面的沉降。当剖面沉降仪难以贯通整个断面时，可在远离边界的位置增设沉降板。

附录 A 填埋场堆体压缩量 计算过程及参数确定

A.0.1 垃圾的初始容重和比重是沉降计算中的重要参数。国外很多研究者提出了垃圾初始容重取值建议。例如，Sowers (1958) 提出根据压实程度垃圾初始容重可在 $5.7\text{kN/m}^3 \sim 9.4\text{kN/m}^3$ 范围取值；Zekkos (2006) 针对美国垃圾提出，根据压实程度从低到高垃圾初始容重可分别取为 5kN/m^3 、 10kN/m^3 、 15.5kN/m^3 。钱学德 (2001) 建议填埋垃圾容重可取 $7.7\text{kN/m}^3 \sim 13.8\text{kN/m}^3$ 。编制组总结了大量国内工程实测数据，垃圾容重随埋深变化可采用双折线表示。结合我国填埋场压实情况，本条建议了无试验数据时垃圾初始容重的取值方法。新鲜垃圾颗粒比重宜采用现场取样测定，亦可将垃圾各组分颗粒比重按含量加权平均进行估算，表 12 为我国某城市生活垃圾主要组分的颗粒比重。新鲜垃圾颗粒比重一般在 $1.6 \sim 2.4$ 范围内，有机质含量高于 25% 时建议取 $1.6 \sim 2.2$ ；低于 25% 时建议取 $1.8 \sim 2.4$ 。

表 12 我国某城市生活垃圾主要组分颗粒比重

| 组分 | 菜叶 | 肉骨 | 纸类 | 塑料 | 橡胶 | 纤维 | 煤渣 石土 | 玻璃 | 金属 | 陶瓷 | 果核 | 草木 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 颗粒 比重 | 0.9 | 2.0 | 1.2 | 1.4 | 0.9 | 1.2 | 2.4 | 2.5 | 5.0 | 2.3 | 1.0 | 1.1 |

下面通过实例介绍填埋场封场后沉降和容量的计算过程。

某填埋场位于中等湿润气候地区，根据运行单位的压实机械

以及填埋作业规划，确定场地压实程度为中等压实。拟计算：

1 封场覆盖系统上某点封场 2 年后的沉降量，该点封场时的有效填埋高度为 10m，在 5 个月内堆填完成；

2 填埋场某区域的填埋量，该区域平面面积为 $5\text{m} \times 5\text{m}$ ，填埋高度为 10m，填埋速率为 2m/月。

计算时不考虑堆体内部水位的影响，不考虑场底防渗系统、中间覆盖系统、封场覆盖系统以及填埋区域地基的压缩沉降，堆体次压缩沉降采用应力-降解压缩模型进行计算。计算该点封场后沉降时，其沉降量为该点土柱各层垃圾的次压缩量之和；计算该区域的填埋量时，通过逐层添加的方式模拟堆填过程，计算每新填一层垃圾后在堆填时间内各层垃圾的总压缩量，直至达到填埋高度 10m，该区域的填埋量即为各层垃圾填埋量之和。具体计算过程如下：

根据 A.0.1 的要求，中等压实程度下初始容重 γ_0 取为 $8\text{kN}/\text{m}^3$ ，垃圾平均颗粒比重 d_s 取为 1.7。根据规范第 4.2 节的建议，对中等湿润气候地区垃圾初始含水率取 50%。

$$\begin{aligned} \text{垃圾初始孔隙比 } e_0 &= \frac{d_s \gamma_w}{(1 - W_c) \gamma_0} - 1 = \frac{1.7 \times 10}{(1 - 50\%) \times 8} - 1 \\ &= 3.3 \end{aligned}$$

按式 (5.2.2-2)，1000kPa 压力下垃圾孔隙比取 1.0，新鲜垃圾主压缩指数：

$$\begin{aligned} C_c &= \frac{e_0 - e_1}{\log(1000/\sigma_0)} = \frac{3.3 - 1.0}{\log(1000/30)} \\ &= 1.51, \frac{C_c}{1 + e_0} = 0.35 \end{aligned}$$

完全降解垃圾修正主压缩指数 $C_{\infty}/(1+e_0)$ 取 0.15，主压缩指数 C_{∞} 为 0.645。

考虑中等湿润的气候条件，在应力-降解模型中，前期固结应力 σ_0 取 30kPa， σ_0 长期作用下垃圾降解压缩应变与蠕变应变之

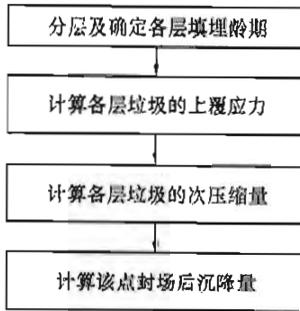


图 35 封场后沉降量计算流程

和 $\epsilon_{dc}(\sigma_0) = 25\%$ ，降解速率 c 取 $0.01/\text{月}$ 。

一、封场后沉降量计算

封场后沉降计算流程见图 35。

① 分层及确定各层填埋龄期

按 $2\text{m}/\text{层}$ 将该点所在土柱均匀分成 5 层，每层 2m ，每层填埋时间为 1 个月，则各层垃圾封场时的平均龄期如表 13 所示。

② 计算各层垃圾的上覆应力

各层垃圾上覆应力按式

(A.0.1-1) 进行计算，如第一层垃圾的上覆应力为：

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sum_{j=1}^5 \gamma_j H_j = 9.65 \times 2 + 9.28 \times 2 + 8.92 \times 2 \\ &\quad + 8.55 \times 2 + 8.18 \times 2 \\ &= 89.17\text{kPa} \end{aligned}$$

其他各层垃圾上覆应力的计算结果如表 13 所示。

③ 计算各层垃圾的次压缩量

按式 (5.2.3-1) 计算各层垃圾封场后 2 年内次压缩量，以第 4、5 层垃圾为例：

第 4 层垃圾，根据其上的覆应力 33.47kPa ，按式 (5.2.3-2) 得 $\epsilon_{dc}(\sigma_i) = 0.24$ ，则 $S_{d4} = 2 \times 0.24 \times (1 - e^{-0.01 \times 25.5}) - 2 \times 0.24 \times (1 - e^{-0.01 \times 1.3}) = 0.101\text{m}$

第 5 层垃圾，根据其上的覆应力 16.37kPa ，按式 (5.2.3-2) 得 $\epsilon_{dc}(\sigma_i) = 0.25$ ，则 $S_{d5} = 2 \times 0.25 \times (1 - e^{-0.01 \times 24.5}) - 2 \times 0.25 \times (1 - e^{-0.01 \times 0.5}) = 0.106\text{m}$

④ 计算该点封场后沉降量

按式 (A.0.2) 累积第 1 层到第 5 层垃圾的次压缩量，得该点封场后 2 年的沉降量为 0.428m 。

表 13 各层垃圾上覆应力、平均龄期及压缩量

| 计算内容 | 层号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 上覆应力(kPa) | | 89.17 | 69.87 | 51.30 | 33.47 |
| 封场时平均龄期(月) | | 4.5 | 3.5 | 2.5 | 1.5 | 0.5 |
| 封场 2 年后平均龄期(月) | | 28.5 | 27.5 | 26.5 | 25.5 | 24.5 |
| 封场 2 年后压缩量(m) | | 0.063 | 0.073 | 0.085 | 0.101 | 0.106 |

二、填埋量计算

取该区域的土柱进行分析，土柱的平面面积为 $5\text{m} \times 5\text{m}$ ，平均高度为 10m 。其填埋量计算流程见图 36。

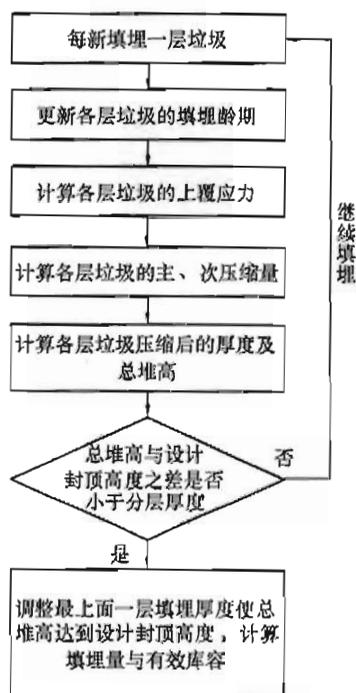


图 36 填埋量计算流程

1 确定分层厚度及填埋作业间隔

根据填埋速率 2m/月，取土柱每层垃圾的初始厚度为 2m，填埋作业间隔为 1 个月，假定填埋作业连续无间断直至封场。

2 计算第 2 层垃圾填埋后各层垃圾的上覆应力

根据填埋场封场后沉降计算过程，第 2 层垃圾填埋前第 1 层垃圾压缩后的厚度应为 1.998m。第 2 层垃圾填埋后，各层垃圾上覆应力计算如下：

第 1 层垃圾：

$$\sigma_1 = \sum_{j=1}^2 \gamma_j H_j = 8.55 \times 1.998 + 8.18 \times 2 = 33.44 \text{ kPa}$$

第 2 层垃圾：

$$\sigma_2 = \sum_{j=2}^2 \gamma_j H_j = 8.18 \times 2 = 16.36 \text{ kPa}$$

3 计算第 2 层垃圾填埋后各层垃圾的压缩量

①各层垃圾主压缩量按式 (5.2.2-1) 计算：

$$\text{第 1 层垃圾: } S_{p1} = H_1 \frac{C_c}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right) = 2 \times 0.35 \times \log \left(\frac{33.44}{30} \right) = 0.033 \text{ m}$$

第 2 层垃圾：上覆应力小于 30kPa，主压缩量为 0

②各层垃圾次压缩量按式 (5.2.3-1) 计算：

$$\text{第 1 层垃圾: } S_{s1} = H_1 \epsilon_{dc}(\sigma_1) (1 - e^{-c\sigma_1}) = 2 \times 0.24 \times (1 - e^{-0.01 \times 1.5}) = 0.007 \text{ m}$$

$$\text{第 2 层垃圾: } S_{s2} = H_2 \epsilon_{dc}(\sigma_2) (1 - e^{-c\sigma_2}) = 2 \times 0.25 \times (1 - e^{-0.01 \times 0.5}) = 0.002 \text{ m}$$

按式 (5.2.1) 计算得：该两层垃圾的总压缩量为 0.042m

4 判别是否继续填埋

考虑压缩后的垃圾堆体厚度为 $\sum_{j=1}^2 (H_{ij} - S_{ij}) = 3.958 \text{ m}$ ，与填埋高度 10m 相差 $10 - 3.958 = 6.042 \text{ m} > 2 \text{ m}$ ，应进行下一层填埋计算。

5 调整最后一层垃圾填埋厚度

其他层计算可按照第 2 层计算过程，封场时各层垃圾沉降计算结果如表 14 所示。土柱各层垃圾厚度 (m) 随填埋过程变化如表 15 所示。当填埋到第 5 层垃圾时堆体厚度为 9.198m, $10\text{m} - 9.198\text{m} = 0.802\text{m} < 2\text{m}$, 这时应调整第 5 层填埋厚度为 2.802m 达到设计封场标高。

表 14 封场时各层垃圾压缩量计算结果

| 层号 | 上覆应力 (kPa) | 主压缩 (m) | 次压缩 (m) | 各层垃圾压缩量 (m) | 压缩后各层垃圾厚度 (m) |
|----|------------|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| 5 | 16.37 | 0.000 | 0.002 | 0.002 | 2.802 |
| 4 | 33.44 | 0.033 | 0.007 | 0.040 | 1.960 |
| 3 | 50.91 | 0.161 | 0.010 | 0.171 | 1.829 |
| 2 | 67.84 | 0.248 | 0.013 | 0.261 | 1.739 |
| 1 | 84.51 | 0.315 | 0.015 | 0.330 | 1.670 |
| | | $\Sigma S_p = 0.757$ | $\Sigma S_s = 0.047$ | $\Sigma S = 0.804$ | $\Sigma H = 10.000$ |

表 15 各层垃圾厚度随填埋过程的变化 (m)

| 层号 \ 时间 | 时间 | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 |
| 5 | | | | | 2.802 |
| 4 | | | | 1.998 | 1.960 |
| 3 | | | 1.998 | 1.960 | 1.829 |
| 2 | | 1.998 | 1.960 | 1.829 | 1.739 |
| 1 | 1.998 | 1.960 | 1.829 | 1.739 | 1.670 |
| 总高度 | 1.998 | 3.958 | 5.787 | 7.526 | 10.000 |

6 计算填埋量及平均单位库容填埋量

填埋量按式 (5.3.1-1) 计算得:

$$W = A_1 \sum_{j=1}^5 \gamma_{0j} H_{ij} = 25 \times 0.8 \times (2 \times 4 + 2.802) = 216.04\text{t}$$

土柱有效库容 $V' = 25 \times 10 = 250\text{m}^3$

按式 (5.3.2) 得平均单位库容填埋量; $Q_w = \frac{W}{V'} = 216.04 / 250 = 0.864\text{t}/\text{m}^3$