

# 工业固废堆填场地土壤与地下水原位管控 与协同修复标准

Technical code for in-situ management and collaborative  
remediation of soil and groundwater at industrial solid  
waste landfill sites

# 目次

|                     |    |
|---------------------|----|
| 1 总则                | 1  |
| 2 术语                | 2  |
| 3 场地调查和风险评估         | 5  |
| 3.1 一般规定            | 5  |
| 3.2 工业固废场地基本情况调查    | 5  |
| 3.3 工业固废场地勘察        | 6  |
| 3.4 堆体污染情况调查        | 7  |
| 3.5 堆填场周边环境污染调查     | 8  |
| 3.6 报告编制及风险评估       | 10 |
| 4 稳定及控制             | 11 |
| 4.1 一般规定            | 11 |
| 4.2 抗剪强度指标          | 12 |
| 4.3 稳定状况评估          | 13 |
| 4.4 固废堆场稳定控制措施      | 15 |
| 4.5 固废堆场失稳治理措施      | 15 |
| 5 工业固废堆填场地水平覆盖      | 17 |
| 5.1 一般规定            | 17 |
| 5.2 水平覆盖层设计         | 17 |
| 5.3 工程施工及质量控制       | 20 |
| 5.4 效果评估与维护         | 22 |
| 6 工业固废遗留堆填场地垂直阻隔    | 24 |
| 6.1 一般规定            | 24 |
| 6.2 垂直阻隔墙设计         | 24 |
| 6.3 工程施工及质量控制       | 28 |
| 6.4 效果评估与维护         | 32 |
| 7 原位固化/稳定化          | 34 |
| 7.1 一般规定            | 34 |
| 7.2 修复方案设计          | 34 |
| 7.3 修复工程施工          | 38 |
| 7.4 修复效果评估与维护       | 40 |
| 8 污染土壤与地下水修复        | 42 |
| 8.1 一般规定            | 42 |
| 8.2 修复方案和设计         | 43 |
| 8.3 污染修复工程施工        | 44 |
| 8.4 污染修复工程运行监测及效果评估 | 44 |
| 9 填埋场灾害监测及安全预警      | 46 |
| 9.1 一般规定            | 46 |
| 9.2 稳定监测及预警         | 47 |
| 9.3 填埋场污染监测         | 47 |
| 9.4 填埋场安全管理         | 49 |
| 附录 A 堆填场初步调查表       | 50 |

附录 B 堆填场污染问题清单 .....51

附录 C 特征污染物清单 .....53

    附表 C-1 农用地分析检测项目 .....53

    附表 C-2 企业用地特征污染物分类 .....53

    附表 C-3 企业用地分析检测项目 .....54

附录 D 常见工业堆填场地浸出污染物对混合土料回填料渗透系数影响等级表 .....57

附录 E 垂直阻隔墙厚度计算方法 .....58

附录 F 垂直阻隔污染物击穿判别方法 .....59

附录 G 土壤和地下水修复技术适用性分析 .....61

# 1 总则

**1.0.1** 为了防止和减少工业固废堆填场失稳滑坡和污染泄露扩散等危害,规范堆填场地地质勘察与评价,以及堆填场风险管控和治理工程的设计、施工、管理和运行,利用环境岩土手段实现堆填场安全、环保和修复目标,制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用范围包括一般工业固废、工业固废与生活垃圾混填情况。

**1.0.3** 工业固废堆填场地治理时应对堆填场地的场底、库区周边山坡、堆体边坡、封场覆盖系统进行稳定验算,堆填场地运行期间和封场后应对可能出现失稳隐患的边坡进行稳定验算。

**1.0.4** 工业固废堆填场地水平覆盖设计应综合考虑场地污染特征、气候类型、风险管控目标等因素,垂直阻隔工程设计应综合考虑场地勘察与污染状况调查结果、风险管控目标、目标污染物、设计使用年限要求,做到合理选型、优化设计、严格控制施工过程,并做好运营过程中的监测与维护。

**1.0.5** 工业固废堆填场地应根据水、土、气体的不同污染类型选择管控和修复技术。本标准针对工业固废堆填场地水平覆盖和垂直阻隔等原位管控技术,以及固化/氧化稳定化、抽提等修复技术的设计和应用提出要求,修复应达到对应地块土壤及地下水修复目标污染物的修复目标值。

**1.0.6** 本标准制定的关于工业固废堆填场地勘察、管控与修复技术设计、施工与运行安全监测,除符合本标准规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语

### 2.0.1 一般工业固体废物 non-hazardous industrial solid waste

企业在工业生产过程中产生且不属于危险废物的工业固体废物。

### 2.0.2 一般工业固体废物堆场 non-hazardous industrial solid waste landfill

用于最终处置一般工业固体废物的填埋设施。

### 2.0.3 工业固体废物堆场污染基本情况调查 basic site investigation

采用资料收集、现场踏勘、人员访谈、抽样检测等调查方法获取堆填场基本情况信息，初步确定场地污染物种类，分析污染物可能污染的深度和范围。

### 2.0.4 场地环境勘查 environmental site investigation

采用系统的调查方法，确定场地是否被污染及污染程度和范围的过程。

### 2.0.5 敏感目标 potential sensitive targets

指污染场地周围可能受污染物影响的居民区、学校、医院、饮用水源保护区以及重要公共场所等。

### 2.0.6 环境风险评估 environmental risk assessment

对工业固废堆填场渗沥液渗漏等途径导致的污染土壤及地下水、堆填气扩散导致的污染大气等污染物暴露于人体或环境受体产生潜在不利效应的分析过程。

### 2.0.7 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。

### 2.0.8 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。

### 2.0.9 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。

### 2.0.10 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。

### 2.0.11 水平覆盖 horizontal cover system

设置在工业固废堆填场表面,用于减少雨水的渗透和防止污染气体溢出的多层材料复合结构。

#### **2.0.12 防渗 anti-seepage**

采取措施或使用特定材料,以防止雨水通过覆盖屏障的渗漏。

#### **2.0.13 渗漏量 leakage**

穿过覆盖层、底部衬垫或垂直阻隔等屏障的水分和气体总量。

#### **2.0.14 击穿判别标准 breakthrough criteria**

当目标污染物或指示污染物迁移通过竖向阻隔屏障的浓度达到风险控制值,即判定竖向阻隔屏障被目标污染物或指示污染物击穿。

#### **2.0.15 垂直阻隔技术 vertical barrier technology**

利用单种或复合防渗截污材料作为原材料,采用垂直布置的形式施工建成地下连续墙体结构,用于确保设计使用年限内满足污染场地风险管控目标的工程措施。

#### **2.0.16 垂直阻隔性能 containment performance**

垂直阻隔屏障减缓污染物以对流、水动力弥散方式迁移以及吸附污染物的综合性能,可通过渗透系数、水动力弥散系数、阻滞因子等定量评价。

#### **2.0.17 固化 solidification**

通过加入胶凝性材料等固化药剂,将污染土壤转化成稳定的低渗透性固化体,阻滞或减缓其中污染物迁移释放。

#### **2.0.18 稳定化 stabilization**

通过加入稳定化药剂,使土壤中污染物与其发生化学反应并转化成难以溶解和浸出的状态,提升污染物空间稳定性的过程。

#### **2.0.19 原位固化/稳定化 in-situ solidification/stabilization**

不经挖掘和移动受污染土壤,直接在场地发生污染位置进行固化/稳定化处理的过程。

#### **2.0.20 浸出浓度 leaching concentration**

表征固化/稳定化产物通过理化机理固定和稳定污染物性能的参数,指固化/稳定化产物中的可溶性污染物组分经过浸沥溶解后,浸出液中污染物的浓度。

#### **2.0.21 土壤和地下水协同修复 collaborative restoration**

采用综合治理手段和技术，完成对土体和水体污染的同步去除，实现土壤污染和地下水污染共同治理。

#### **2.0.22 土壤和地下水修复模式 soil and groundwater remediation strategy**

以降低土壤和地下水中污染物浓度或降低污染毒性实现修复目标为目的的对土壤和地下水进行修复的总体思路，包括原位修复、异位原地修复、异地修复、自然修复等。

#### **2.0.23 静态箱 static chamber**

静态箱是一种通过箱内浓度随时间的变化量和箱体体积来计算气体释放通量的土壤气体释放监测装置。

### 3 场地调查和风险评估

#### 3.1 一般规定

**3.1.1** 工业固废堆体场地调查宜分阶段进行，在稳定或污染风险调查前宜先开展基本情况调查，完成堆填场问题清单。

**3.1.2** 当堆体有失稳迹象或监测数据表明有堆体失稳风险时，应开展堆填场勘察工作。

**3.1.3** 工业固废堆场存在堆体失稳风险时，应进行固废场地勘察。存在污染风险时，应补充堆体污染状况调查，必要时需补充堆填场周边环境污染调查。

**3.1.4** 堆体及周边环境污染调查应确定污染物种类和组分，场地污染现状、地下水污染羽的空间分布与扩散趋势，地表水和地下水污染之间的相关性。

**3.1.5** 风险评估报告宜包含对堆填场风险进行的定量评估，风险管控的措施与建议。

#### 3.2 工业固废场地基本情况调查

**3.2.1** 场地基本情况调查应包含基础资料收集，现场踏勘，人员访谈、处理设施调查。

**3.2.2** 应通过档案馆、政府部门、勘察公司、卫星影像等收集场地基本信息、土地利用、场地污染史、水文地质等资料，内容详见附录 A。

**3.2.3** 现场踏勘

**3.2.3.1** 现场踏勘应主要包括以下内容：

- 1 堆填场及周边地形地貌、水文地质等条件；
- 2 土地利用现状和历史；
- 3 可见污染源、疑似污染或污染现象；
- 4 填埋堆体边坡是否存在变形失稳迹象；
- 5 场地周边地表水分布、水井位置；
- 6 高压线、变电站、地下管线等位置；
- 7 环境敏感目标情况。



**3.2.3.2** 应对堆填场地现状和历史的知情人，包括当地政府管理部门相关人员、堆填场工作人员、周边居民进行人员访谈，针对 3.2.2 获得的基础资料进行补充和核对。

**3.2.4** 进行处理设施调查时，应包括下列调查内容：

- 1 防渗系统的防渗层破损渗漏情况；
- 2 地下水导排系统的淤堵、破损情况；
- 3 雨污分流系统的覆盖层破损情况、雨水收集与导排情况；
- 4 渗滤液导排设施淤堵、破损情况；
- 5 填埋气输气管网导排泄漏情况。

**3.2.5** 堆填场问题清单

根据前期基础污染资料分析堆填场污染问题清单，为堆体勘查及土壤、地下水环境调查提供基础资料。详见附录 B。

### **3.3 工业固废场地勘察**

**3.3.1** 勘察范围应包含堆体、堆填场场区内构筑物以及邻近相关地段。

**3.3.2** 堆体及周边工程地质勘察

**3.3.2.1** 工程地质勘察应调查内容参照《岩土工程勘察规范》GB50021-2001 中的第 4.2 节有关规定。

**3.3.2.2** 土体工程性质宜参照现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 有关规定。

**3.3.2.3** 堆体勘探工作应符合以下规定：

- 1 勘探线应垂直堆体走向或平行主滑方向布置勘探孔，勘探孔平面间距宜为 30 m~60 m，勘探线不宜少于 3 条，每条勘探线不宜少于 2 个勘探孔；
- 2 当场地面积较大且地形起伏较缓勘探孔可适当扩大间距，局部地形起伏大可适当加密；
- 3 底部存在人工防渗衬垫时，应保证孔底离衬垫系统不小于 5 m。

**3.3.3** 堆体及周边水文地质勘察

**3.3.3.1** 水文地质勘察应包括下列调查内容：

- 1 地下水的类型和赋存状态；

- 2 地下水补给、排泄条件、地下水流向、水位及其动态变化；
- 3 地表水径流及其和地下水的补排关系；
- 4 透（含）水层与隔水层的埋藏条件及分布，渗透性。

**3.3.3.2** 场地位于岩溶、洼地、以及较大暗河通道等地区，可采用电测剖面或电测深法，参考《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001 第 9 节。

**3.3.3.3** 水文参数测定宜参照《岩土工程勘察规范》GB50021-2001 中的第 7 节有关规定。

**3.3.4** 堆体稳定性调查应符合以下规定：

- 1 通过土工试验或监测确定废渣的力学参数，指标应包括但不限于含水率、容重、颗粒组成、密实程度、酸碱度等；
- 2 对堆填体的位移和水位进行监测，布点应符合本标准 9.2 节；
- 3 查明场地所在区域的地震烈度及地震动参数，评价堆场的地震效应；
- 4 堆体稳定性计算应符合本标准 4.3.1 节。

## **3.4 堆体污染情况调查**

**3.4.1** 采用勘探孔对原位固废进行采样，取样深度间距宜为 2 m~4 m，以分析不同埋深的样品。

**3.4.2** 堆体成分调查应符合以下规定：

1 应开展固体废物全成分分析，酸浸和水浸浸出检测指标包括但不限于镉、汞、砷、铅、铬、六价铬、铜、锌、镍、铊等，以及固体废物对应相关行业特征污染物，特征污染物清单详见附录 C；

2 结合场区堆填资料，对堆体进行固体废物属性鉴别，判别应符合本标准术语规定。

**3.4.3** 堆体渗滤液调查应符合以下规定：

1 宜通过堆体上的勘探孔对渗滤液进行采样，采样方法宜参照《污水监测技术规范》HJ 91.1 第 5-6 节规定执行；

2 检测项目根据一般工业固体废物特性、环境影响评价文件及其批复等相关生态环境管理规定，从《污水综合排放标准》GB 8978 中选取废水污染物项目；

3 分析方法宜参照《污水综合排放标准》GB 8978-1996 第 5 节规定执行。

**3.4.4** 堆体状况调查结果应明确工业固废堆填存量以及堆填体内渗滤液和场内废水现状赋存总量。

**3.4.5** 若堆体产生填埋气，应进行填埋气体成分调查且符合以下规定：

- 1 填埋气成分宜通过勘探孔进行采样测试或采用便携式设备原位检测；
- 2 填埋气成分的采样、分析方法宜按照《环境空气质量手工监测技术规范》HJ/T 194 中的要求执行；
- 3 检测项目宜包括但不限于：甲烷、硫化氢、二氧化硫、三氧化硫、氨、氮氧化物；
- 4 宜分析填埋气产气速率和封场后释放总量。

### 3.5 堆填场周边环境污染调查

**3.5.1** 堆填场周边环境污染调查范围应符合以下规定：

- 1 地下水、地表水调查范围应根据场区水文地质条件等确定，不同的水文地质条件宜按下表确定，必要时范围可适当外延：

表 3.5.1 堆体下游调查范围界限建议值

| 场地地形 | 平原型    |       | 阶地型    |       | 山谷型    |       |
|------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 径流类型 | 强径流型   | 弱径流型  | 强径流型   | 弱径流型  | 强径流型   | 弱径流型  |
| 最大距离 | 2000 m | 150 m | 1500 m | 500 m | 1500 m | 300 m |

- 2 表层、深层土壤污染调查范围宜分别参考地表水、地下水调查范围确定；
- 3 大气污染调查范围为堆体外常年或夏季主导风向的下风向且距堆体边界 50 m~100 m 处以及堆填场场界 500 m 范围内环境敏感区域。

**3.5.2** 当地表水监测数据不符合《地表水环境质量标准》GB 3838 IV类指标或堆体外地域下游地表水受到渗沥液泄漏污染的时候，应进行地表水环境调查，且符合以下规定：

**3.5.2.1** 在湖、河、鱼塘、常年有水的水坑等区域进行采样；

**3.5.2.2** 地表水检测指标应符合以下规定：

- 1 检测指标由堆填废物的特性提出，必须具有代表性且能表征固体废物特性；
- 2 常规测定项目应包括：浑浊度、pH、溶解性总固体、氯化物、硝酸盐（以 N 计）、亚硝酸盐（以 N 计），以及铬、铁、锰、铜、铅等；
- 3 分析方法按《地表水环境质量标准》GB 3838-2002 第 7 节执行；

4 水质分析按《地表水环境质量标准》GB 3838-2002 第 5 节的有关规定，分析堆填场对地表水水质的影响。

**3.5.3** 当地下水环境监测记录不符合《地下水质量标准》GB/T 14848 IV类指标、发生渗沥液渗漏或渗滤液收集与导排系统失效时，应进行地下水污染状况调查，且符合以下规定：

- 1 根据已有监测井以及前期地质勘探孔进行地下水采样；
- 2 检测指标可参照本标准 3.5.2 节确定的地表水检测指标；
- 3 分析方法按《地下水质量标准》GB/T 14848 附录 B 执行；

4 水质分析应按《地下水质量标准》GB/T 14848-2017 第 6 节，分析堆填场对场地地下水水质的影响。

**3.5.4** 当需要进行地表水污染调查时，应进行表层土壤污染状况调查。当需要进行地下水污染调查时，应进行深层土壤污染状况调查，满足如下规定：

**3.5.4.1** 表层土壤采样按《污染场地土壤和地下水调查与风险评价规范》DD2014-06 第 7.2.3.1 节的规定执行；

**3.5.4.2** 深层土壤根据前期地质勘探孔进行采样，采样按《污染场地土壤和地下水调查与风险评价规范》DD2014-06 第 7.2.3.2 节的规定执行；

**3.5.4.3** 检测指标应符合以下规定：

- 1 表层土壤必测指标包括但不限于理化性质 pH、有机质、阳离子交换量；无机污染物砷、镉、铬、铜、铅、汞、镍、锌、钒、锰；有机物污染物多环芳烃；
- 2 深层土壤必测指标包括但不限于理化性质 pH、有机碳；无机污染物砷、镉、铬、铜、铅、汞、镍、锌、钒、锰等；有机物污染物多环芳烃；
- 3 若堆填场规划为农用地，检测指标应补充附表 C-1 中的特征污染物；
- 4 若堆填场规划为建设用地，检测指标应根据附表 C-2 污染物分类补充附表 C-3 中的特征污染物。

**3.5.4.4** 应根据现行国家标准《土壤环境质量-建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》GB 36600-2018 第 5 节、《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准（试行）》GB 15618-2018 第 4-5 节及地方土壤环境质量标准，分析堆填场对场地土壤环境质量的影响。

**3.5.5** 当大气监测数据不符合《大气污染物综合排放标准》GB 16297 或周边居民区有臭气的时候，应进行大气环境调查，且符合以下规定：

- 1 采样点布设、采样及检测方法按《大气污染物综合排放标准》GB 16297 的规定执行；
- 2 无组织气体排放的检测因子应基于堆填废物的生化特性提出；
- 3 大气环境质量分析应根据《环境空气质量标准》GB 3095- 2012 第 4 节、《恶臭污染物排放标准》GB 14554-93 第 4 节等有关规定。

## **3.6 报告编制及风险评估**

**3.6.1** 工业固废堆填场地调查报告应根据调查目的包含基本情况、水文地质条件、堆体稳定性、堆体污染情况、周边环境调查及污染风险评估等部分或全部工作内容。

**3.6.2** 污染风险评估内容应包括但不限于以下部分：

- 1 渗滤液污染土壤、地下水的风险以及对区域地下水污染的风险；
- 2 污染土壤在溶滤作用下，地下水被污染的风险；
- 3 堆填气体扩散污染大气的风险；
- 4 污染物对人体的健康风险。

**3.6.3** 调查报告结论应明确工业固废堆场内堆体成分、组分含量、渗滤液积存量、场区及周边水土污染情况、周边居民和环境风险等，为后期管控和治理方案制定提供依据和指导。

## 4 稳定及控制

### 4.1 一般规定

4.1.1 工业固废堆场的等级应根据设计使用期的全库容和坝高按表 4.1.1 确定。

表 4.1.1 工业固废堆场等级

| 安全等级 | 全库容 $V$ ( $\times 10^4 \text{m}^3$ ) | 最终堆积坝高 $H$ (m)    |
|------|--------------------------------------|-------------------|
| 一    | $V \geq 10000$                       | $H \geq 100$      |
| 二    | $100 \leq V < 10000$                 | $30 \leq H < 100$ |
| 三    | $V < 100$                            | $H < 30$          |

注：1 全库容系指校核洪水位以下容积。

2 最终堆积坝高自初期坝轴线处坝底标高起算。

3 按库容与坝高指标分属不同等级时，以高的等级为准。

4 具有下列情况之一者，可按本表确定的等级提高 1 等：当堆场失事时，将使下游的重要城镇、工矿企业或铁路干线遭受严重灾害者；下游有重点保护历史文物、古迹且不易拆迁者；当工程地质和水文地质条件特别复杂，经地基处理后尚认为不够彻底者（洪水标准不予提高）。

#### 4.1.2 稳定分析工况

工业固废堆体边坡稳定验算应根据其工作状况、作用力出现的概率和持续时间的长短分为下列三种运用条件：

1 正常运用条件为堆填场地投入运行期间或封场后，经常发生或长时间持续且堆场渗沥液液位处于正常水位；

2 非常运用条件 I 为遭遇强降雨等引起渗沥液液位短时显著上升；

3 非常运用条件 II 为正常运用条件下遭遇地震。

#### 4.1.3 边坡稳定性评价标准

1 除校核工况外，边坡稳定性状态分为稳定、欠稳定和不稳定三种状态，可根据边坡稳定性系数按表 4.1.3-1 确定。

表 4.1.3-1 边坡稳定性状态划分

| 边坡稳定性系数 $F_s$ | $F_s < 1.00$ | $1.00 \leq F_s < F_{st}$ | $F_s \geq F_{st}$ |
|---------------|--------------|--------------------------|-------------------|
| 边坡稳定性状态       | 不稳定          | 欠稳定                      | 稳定                |

2 边坡稳定安全系数  $F_{st}$  应按表 4.1.3-2 确定，当边坡稳定性系数小于边坡稳

定安全系数时应对边坡进行处理。

表 4.1.3-2 堆填场地堆体边坡的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 除工业固废堆体边坡外的其它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 等相关规范的规定；

2 当工业固废堆体边坡等级为一级且符合表 4.1.1 注 4 中提级条件时，其稳定安全系数应适当提高。

**4.1.1** 工业固废堆积坝的稳定分析，应分析评价现状坝体的稳定性，并应预测达到总坝高时的稳定性。

**4.1.2** 堆填场地的场底、库区周边山坡、工业固废堆体边坡、封场覆盖系统的地震液化判别和评价应符合《构筑物抗震设计规范》（GB 50191）的相关规定。

## 4.2 抗剪强度指标

**4.2.1** 工业固废堆体的抗剪强度指标应根据工况和堆填物质力学特性确定，并应符合下列规定：

1 安全等级为一、二级的堆填场地工业固废抗剪强度指标，宜采用现场试验、室内三轴试验、室内直剪试验等试验方法确定，试验方法应根据工程要求、填料的性质和施工质量等确定，试验条件应尽可能符合实际状况；

2 无试验条件时，安全等级为三级的堆填场地工业固废抗剪强度指标可采用工程类比、反演分析等方法确定；

3 工业固废抗剪强度试验时，试验所施加的应力范围应根据堆填边坡的实际受力水平确定，试样宜采用现场钻孔取样或人工配制，试样尺寸应根据填料颗粒级配确定。

**4.2.2** 工业固废堆积坝的抗剪强度试验方法的选择应符合下列规定：

- 1 根据堆体边坡内的含水状态选择天然或饱和状态的抗剪强度试验方法；
- 2 计算整体稳定、局部稳定和抗滑稳定性时，对渗透性较好的填料宜选择有

效应力强度指标，选择慢剪、三轴固结排水剪、三轴固结不排水剪等试验方法；对渗透性较差的填料宜选择总应力强度指标，选择固结快剪、三轴固结不排水剪或十字板剪切试验。

**4.2.3** 土工材料界面的抗剪强度指标确定方法应符合下列规定：

1 土工材料界面的抗剪强度指标应包括峰值抗剪强度指标和残余抗剪强度指标。库区基底坡度小于  $10^\circ$  区域可采用峰值抗剪强度指标，库区基底坡度大于  $10^\circ$  区域宜采用残余抗剪强度指标。

2 安全等级为一级的堆填场地土工材料界面抗剪强度指标宜采用大尺寸界面直剪试验方法确定。

3 大尺寸界面直剪试样应采用在堆填场地工程中实际使用的土工材料，试样平面尺寸不宜小于  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ ，试验所施加的应力范围应根据土工材料界面的实际受力水平确定。

4 安全等级为二级或三级的堆填场地土工材料界面抗剪强度指标可按工程类比法确定，或参考《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》（CJJ 176）中的相关规定。

## **4.3 稳定状况评估**

### **4.3.1 堆体边坡稳定性分析**

1 堆体稳定性分析之前，应根据岩土工程地质条件、施工条件、填料性质等对堆体边坡的可能破坏方式及相应破坏方向、破坏范围、影响范围等作出判断；

2 工业固废填埋场设计时，应根据填埋物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；

3 宜采用摩根斯坦-普赖斯法验算，抗滑稳定最小安全系数应符合本标准第 4.1.3 条的规定；

4 设计时可用拟合法确定工业固废堆体堆填过程中的渗沥液警戒液位，其所对应的抗滑稳定最小安全系数应按表 4.1.3-2 中非正常运用条件 I 的规定确定。

### **4.3.2 初期坝和堆积坝稳定性分析**

1 对于浆砌石坝、混凝土坝等形式的初期坝，应按《混凝土重力坝设计规范》SL 319 的规定，进行坝坡稳定性验算。



2 对于碾压式土石坝形式的初期坝,应按《碾压土石坝设计规范》SL 274 的规定,进行坝坡稳定性验算。

3 对于堆积坝,应按《尾矿堆积坝岩土工程技术规范》(GB/T 50547)的相关规定进行坝坡稳定性验算。

4 任意高度堆积坝的浸润线最小埋深应符合《尾矿设施设计规范》(GB 50863)的相关规定。

#### 4.3.3 覆盖层稳定性分析

1 填埋场覆盖层边坡应满足稳定性要求,稳定验算可采用无限边坡稳定分析法,根据当地降雨情况验算无渗透水流或完全饱和有渗流时的抗滑稳定性,且覆盖层稳定性安全系数不宜小于 1.25。

2 对于无渗透水流的无限土坡,安全系数应按式(4.3.3-1)计算:

$$F_s = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} + \frac{c}{\gamma_m z \cos \beta \sin \beta} \quad (4.3.3-1)$$

式中:  $F_s$ ——安全系数(无量纲);

$\varphi$ ——内部或界面摩擦角( $^{\circ}$ );

$c$ ——黏聚力(kPa);

$\beta$ ——土坡倾角( $^{\circ}$ );

$\gamma_m$ ——临界潜在滑动面以上材料的总重度( $\text{kN/m}^3$ );

$z$ ——滑动面的深度(m)。

3 对于有饱和渗透水流的无限土坡,安全系数应按式(4.3.3-2)计算:

$$F_s = \left( \frac{\gamma_m(z-h) + \gamma_b h}{\gamma_m(z-h) + \gamma_{sat} h} \right) \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} + \frac{c / \cos \beta \sin \beta}{\gamma_m(z-h) + \gamma_{sat} h} \quad (4.3.3-2)$$

式中:  $F_s$ ——安全系数(无量纲);

$\varphi$ ——内部或界面摩擦角( $^{\circ}$ );

$c$ ——黏聚力(kPa);

$\beta$ ——土坡倾角( $^{\circ}$ );

$\gamma_m$ ——材料的干重度( $\text{kN/m}^3$ );

$\gamma_b$ ——材料的有效重度( $\text{kN/m}^3$ );

$\gamma_{sat}$ ——材料的饱和重度( $\text{kN/m}^3$ );

$z$ ——滑动面的深度（m）；

$h$ ——水位到滑动面的深度（m）。

## 4.4 固废堆场稳定控制措施

**4.4.1** 各稳定性状态边坡的风险控制，应符合下列规定：

1 稳定边坡：采取日常养护管理措施，进行日常巡检，采取目测、影像记录的手段进行持续关注；若稳定边坡出现失稳迹象，则应及时记录和汇报，并重新评估失稳风险。

2 欠稳定边坡：加强养护管理，制定专项监测方案，进行日常巡检，应进行设计校核并组织专家进行现场查勘；建立预警方案，并制定应急处置措施。

3 不稳定边坡：组织专家进行实地查勘，启动应急预案，进行应急抢险，安排专项治理；对边坡失稳影响区域内人员和设备进行撤离疏散。

**4.4.2** 工业固废堆场堆积坝坝坡坡比应按坝高、堆积坝材料和抗震设防烈度因素，根据坝体稳定性计算确定。

**4.4.3** 填埋场地基存在软弱地基和岩溶等不良地质条件时，应进行地基处理。

**4.4.4** 当沿土工材料界面滑移的工业固废堆体边坡稳定验算不满足要求时，应优化基底形状、堆体体型及衬垫系统材料和结构。

**4.4.5** 堆填场地运行期间及封场后，应对堆填场地工业固废堆体、挡墙及库区周边山坡的稳定安全进行监测，当监测结果大于警戒值时，应采取工程措施。

**4.4.6** 当堆体主水位的计算结果可能超过警戒水位时，应设置长期水位控制措施，包括导排盲沟、抽排竖井、水平井等，视情况采用坡顶减载与坡脚反压。

## 4.5 固废堆场失稳治理措施

**4.5.1** 边坡失稳治理应考虑灾害类型成因、失稳形态、工程地质和水文地质条件、滑坡稳定性、工程重要性、坡上建（构）筑物和施工影响等因素，分析事故的有利和不利因素、发展趋势及危害性，并采取适当的工程措施进行综合治理。

**4.5.2** 既有边坡加固方法可分为削方减载法、堆载反压法、锚固加固法、抗滑桩加固法、加大截面加固法、注浆加固法和截排水法等，也可采用当地成熟、可靠、有效的其他加固法。

**4.5.3** 根据边坡的破坏模式、原因、施工安全及可行性以及现场条件等，边坡工程的加固可以使用一种或多种加固方法组合。当采用组合加固法时，应使组合支护结构受力、变形相协调。

**4.5.4** 固废堆场失稳治理施工尚应符合《建筑边坡工程鉴定与加固技术规范》（GB 50843）和《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330）的有关规定。

## 5 工业固废堆填场地水平覆盖

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 工业固废堆填场地水平覆盖设计应综合考虑场地勘察结果、气候类型、风险管控目标、设计使用年限要求，兼顾施工条件。

**5.1.2** 堆填场覆盖层应满足：减少雨水渗入工业固废堆体产生有害渗滤液；减少工业固废填埋气中的有害气体及臭气排放至空气；对于会氧化产酸的工业固废，减少空气中的氧气入侵至固废堆体。

**5.1.3** 封场覆盖系统施工过程中及竣工后应进行质量检测，服役期间应定期检测堆填场产生的渗滤液和填埋气，检验阻隔效果。

**5.1.4** 堆填场水平覆盖层封场完成时宜对覆盖系统进行生态复绿。

### 5.2 水平覆盖层设计

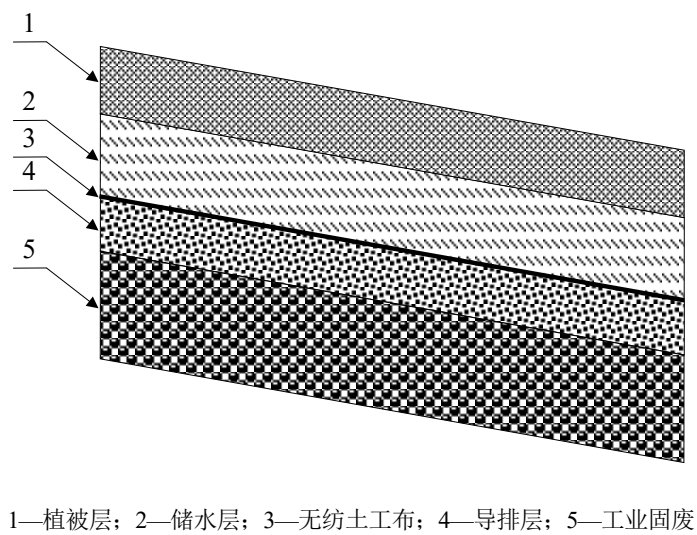
**5.2.1** 用于封场的覆盖层底部雨水渗漏量应根据工业固废堆填场地所在气候区干湿指数按表 5.2.1 控制，覆盖层表面的污染气体排放限值应符合现行国家标准《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》GB 18599 中的有关规定，酸性场地的全年氧气入侵量应不超过 50 g/m<sup>2</sup>。

表 5.2.1 土质覆盖系统的渗漏量控制要求

| 年最大渗漏量 (mm/yr)       |                      |
|----------------------|----------------------|
| 气候干湿指数 $P/PET < 0.5$ | 气候干湿指数 $P/PET > 0.5$ |
| 10                   | 30                   |

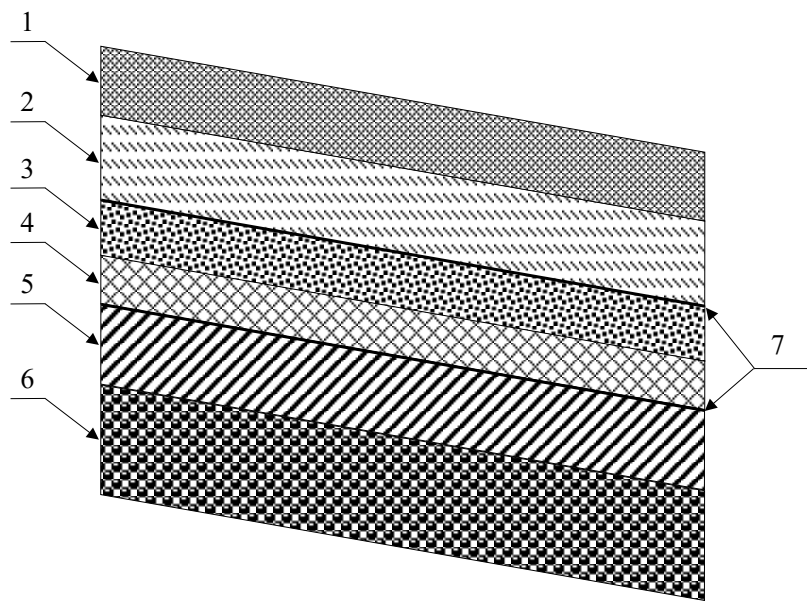
**5.2.2** 封场覆盖系统的结构型式应符合《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》GB 18599 中的有关规定。对于工业固废堆填场地，水平覆盖层结构选型应考虑堆填场地所在气候区和场地类型，宜选用如图 5.2.2-1 所示的腾发式复合覆盖结构或如图 5.2.2-2 所示的增强型腾发式覆盖结构。覆盖结构类型适用性判别应符合下列规定：

- 1 对于非湿润气候区的堆填场，仅考虑防渗要求不考虑闭气要求时，宜选用腾发式复合覆盖结构；
- 2 对于湿润气候区的堆填场地以及非湿润气候区需要同时考虑防渗和闭气要求的堆填场地，应选用增强型腾发式覆盖结构。



1—植被层；2—储水层；3—无纺土工布；4—导排层；5—工业固废

图 5.2.2-1 腾发式复合覆盖层结构



1—植被层；2—储水层；3—导排层；4—防渗层；5—排气层或隔盐层；6—工业固废；7—无纺土工布

图 5.2.2 -2 增强型腾发式覆盖层结构

**5.2.3** 腾发式复合覆盖层结构由植被层、储水层及导排层组成，如图 5.2.2-1 所示，应符合以下规定：

1 植被层土质适合植被生长，厚度不应小于 15 cm，对于封场后需要复垦的覆土应满足《土地复垦质量控制标准》TD/T 1036 等相关要求。

2 储水层采用储水性能良好的粉土、粉质黏土、细砂或再生细粒料等，压实度不低于 85%，厚度为 40~150 cm，可按照规范《生活垃圾卫生填埋处理岩土工程技术标准》CJJ 176 进行设计。

3 导排层应采用导水性能良好的粗砂、碎石或再生粗骨料等，渗透系数不小于 0.1 cm/s，厚度宜为 20~30 cm。

**5.2.4** 增强型腾发式复合覆盖层结构由植被层、储水层与导排层构成的毛细阻滞层、防渗层及排气层或隔盐层组成，如图 5.2.2-2 所示，并符合以下规定：

1 植被层土质适合植被生长，厚度应不小于 15 cm，对于封场后需要复垦的覆土应满足《土地复垦质量控制标准》TD/T 1036 等相关要求。

2 储水层采用储水性能良好的粉土、粉质黏土或再生细粒料等，压实度不低于 85%，厚度不小于 40 cm。

3 导排层采用导水性能良好的粗砂、碎石或再生粗骨料等，厚度为 10~30 cm；

4 防渗层采用渗透系数较低的压实黏土、细颗粒固废、再生细粒料、或合成材料（如，土-膨润土混合料或土-改性膨润土混合料等），厚度不小于 40 cm。

5 排气层或隔盐层应根据工业固废堆填场地调查情况确定是否需要设置，若需要宜采用粗砂、碎石或再生粗骨料等，厚度宜为 20~30 cm。

**5.2.5** 防渗层的材料和厚度选择除了满足 5.2.4 条第 4 款规定外，还应综合考虑经济性、施工便宜性、场地勘察与污染状况调查结果、风险等级和渗透系数等，并符合以下规定：

1 根据场地气候、区域水文条件及场地 pH 值和盐含量，防渗层材料应满足抗干湿、抗冻融和耐酸碱盐等性能。

2 防渗层采用压实黏土或土-膨润土混合料等细颗粒材料，饱和渗透系数宜不大于  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，当饱和渗透系数大于  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$  时应对其阻隔效果根据 5.2.1 的要求进行验算判定。

**5.2.6** 压实黏土、细颗粒固废或再生细粒料等作为防渗层时，应符合下列规定：

- 1 防渗层压实度不小于 93%；
- 2 粒径小于 0.075 mm 的土颗粒干重应大于土粒总干重的 30%；
- 3 粒径大于 5 mm 的土粒干重不宜超过土粒总干重的 20%。

**5.2.7** 土-膨润土混合料作为防渗层时，应符合下列规定：

- 1 土-膨润土混合料由土、膨润土（或改性膨润土）和水混合而成，水宜为淡水，宜选用自来水，压实度不小于 93%；
- 2 土应优先选用场地清洁土料，宜选用粉砂、矿渣、粉土或筛分过的可回收固废；
- 3 膨润土宜选用天然钠基膨润土或钠化钙基膨润土，粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量不大于总质量的 5%，含水量不大于 10%。

**5.2.8** 生态复绿所需的植物类型应根据当地气候、植被分布、植物特性等自然条件及经济状况确定，应满足下列条件：

- 1 应选择当地抗逆性强、适应堆填场环境条件、生长稳定的植物。
- 2 植物应能在旱涝条件下生存，能够在很少或没有维护的情况下存活并发挥作用。
- 3 植物类型应具有足够的多样性，以抵御各种气候条件下的水蚀和风蚀。
- 4 植物类型不会诱发穴居野生动物采食。
- 5 覆盖层边坡宜选用护坡、防冲刷能力强的浅根植物。

## **5.3 工程施工及质量控制**

**5.3.1** 植被土层应分层压实，应满足下列条件：

- 1 绿化土层土壤的有机质含量、水分、通气性、pH 值等应符合所选植物种植的土壤要求，重点绿化区可人工配制土壤。

2 绿化土层土壤密实度、粒径、杂物含量等参数宜符合现行行业标准《绿化种植土壤》CJ/T 340 的有关规定。

3 坡度大于 1:3 的边坡宜采取表面固土措施。

**5.3.2** 储水土层应分层压实，压实度应大于 85%，储水层与导排层交界面处宜使用低压推土机铺设土壤。

**5.3.3** 导排层应根据工程实际需要和现场条件选择，并符合以下规定：

1 碎石等颗粒材料应耐酸性气体腐蚀，碳酸钙含量应不大于 15%；

2 碎石层应有大于 2%的坡度，上部宜铺设不小于 200 g/m<sup>2</sup> 无纺土工布。

**5.3.4** 防渗层填筑施工前应开展碾压试验，确定达到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、速度及铺土厚度等，特别是不同土层交界面处的压实需谨慎处理。

**5.3.5** 低渗透性防渗层采用压实黏土或细颗粒固废时，宜先在堆填场当地查勘满足本标准第 5.2.6 条的土料场，拟采用的黏土或细颗粒固废料场中宜每 100 m<sup>3</sup> 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、界限含水率及渗透系数试验，试验方法应符合《土工试验方法标准》GB/T 50123 的规定。

**5.3.6** 压实黏土或细颗粒固废防渗层施工和质量控制应符合下列要求：

1 对于天然含水率超过设计的压实含水率时，需要晾晒处理，降低其天然含水率至设计压实含水率；

2 每层松土铺设厚度不大于 30 cm，压实后的填土层厚度不应超过 15 cm；

3 在后续层施工前，应将前一压实层表面拉毛，并适当洒水，拉毛深度宜为 2.5 cm，可计入下一层松土厚度；

4 各层应每 500 m<sup>2</sup> 取 3 个点进行压实度检测，每 1000 m<sup>2</sup> 取 1 个点进行饱和渗透系数检测，并应满足本标准 5.2.5 条的规定。



**5.3.7** 土-膨润土混合料作为防渗层施工和质量控制应符合下列要求：

1 土-膨润土混合料施工前应进行合成材料的配合比试验，满足渗透系数、化学相容性及现场施工和易性要求。

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。

3 各层应每 500 m<sup>2</sup> 取 3 个点进行压实度检测，每 1000 m<sup>2</sup> 取 1 个点进行饱和渗透系数检测，并应满足本标准 5.2.5 条的规定。

4 土-膨润土防渗层施工完成后，宜在现场钻孔取芯进行室内渗透系数测试。

## **5.4 效果评估与维护**

**5.4.1** 工业固废堆填场地水平覆盖层施工完成投入运营后，需要对工程效果进行评估，主要包括施工质量以及覆盖层阻隔性能评估，并形成效果评估报告，评估现场工作完成后应立即对工作点采取复原和保护措施。

**5.4.2** 施工质量评估应在施工单位自行核查评定合格的基础上进行，包括工程全流程资料、土体压实度、覆盖层厚度、覆盖材料均匀性，应符合下列规定：

1 全流程资料完整，施工过程中的质检项目及指标记录满足设计和质量控制要求；

2 土体压实度、覆盖层厚度、覆盖材料均匀性等抽检点位宜随机分布，检测结果应不低于设计要求。

**5.4.3** 覆盖层阻隔性能评估可在水平覆盖层完成施工后一年内完成，主要为工程性能抽检，包括饱和渗透系数、导气系数，应符合下列规定：

1 饱和渗透系数通过现场钻孔取样进行室内测试并满足设计值要求，耐酸碱盐的土-改性膨润土混合料应满足相应的酸碱盐溶液下的控制指标。

2 导气系数通过现场钻孔取样进行室内测试并满足设计值要求。

**5.4.4** 工业固废堆填场封场后宜对覆盖系统进行长期现场监测，主要包括渗漏量监测、气体排放量或氧气入侵监测等，应符合下列规定：

1 监测点位的平面布置应采用分区布点法，宜根据现场和勘察结果布置。

- 2 根据具体监测项目明确监测方法及监测频次，可按表 5.4.4 执行。
- 3 当监测到的项目指标出现异常时，应及时向运营单位发出警报并提高监测频率，及时采取应对措施。

**表 5.4.4 覆盖系统现场监测方法及监测频次**

| 序号 | 现场监测项目 | 监测方法           | 监测频次   |
|----|--------|----------------|--------|
| 1  | 渗漏量    | 按本规范 9.3.1 节执行 | 每年 1 次 |
| 2  | 气体排放通量 | 按本规范 9.3.5 节执行 | 每年 1 次 |
| 3  | 氧气入侵量  | 按本规范 9.3.5 节执行 | 每年 1 次 |

**5.4.5** 工业固废堆填场地封场覆盖系统完成后，应进行维护，并符合下列规定：

- 1 宜至少每五年评估一次覆盖系统的性能，进行一次全面的维护；
- 2 开展必要的例行检查作为覆盖系统长期维护计划的一部分，宜不少于每半年一次，包括植被生长情况、覆盖层表面侵蚀和完整性、地表沉降、排水及排气结构检查、现场监测系统检查、基础设施检查等，形成相应的记录文件、存档；
- 3 对出现问题的地方应及时采取措施，必要时核实覆盖层的阻隔性能。

## 6 工业固废遗留堆填场地垂直阻隔

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 垂直阻隔工程设计应综合考虑场地勘察与污染状况调查成果、目标污染物种类和源强、风险管控目标、设计使用年限要求，做到合理选型、优化设计；

**6.1.2** 垂直阻隔屏障的总体设计内容应包括平面布置、阻隔墙深度、厚度和墙体材料及构造设计。阻隔墙设计需考虑填埋场渗沥液污染地下水与土壤的风险等级，该等级评估可参考《生活垃圾卫生填埋岩土工程技术标准》第 3.0.2 条规定；

**6.1.3** 垂直阻隔结构的施工工艺应考虑场地施工条件，施工过程中应严格控制施工质量；

**6.1.4** 竣工后应对墙体进行防渗性能检测，在服役期间定期检验阻隔效果，并做好运营过程中墙体的监测与维护；

**6.1.5** 对使用时间超过服役期的垂直阻隔墙，需要继续使用时，应对垂直阻隔墙的工程性能及效果进行重新检测和评估，合格后方可继续使用。

### 6.2 垂直阻隔墙设计

#### 6.2.1 垂直阻隔墙的平面布置

**1** 垂直阻隔墙的平面布置，应考虑场地地形、地下水流向与水力梯度、地下污染平面范围、场地红线与已有构筑物、场地地下管线等因素确定；

**2** 垂直阻隔墙的平面布置形式可根据场地的水文地质条件、地下水污染物迁移途径采用闭合式、逆地下水流向非闭合式和顺地下水流向非闭合式，平面布置需能够切断污染物的迁移途径；

**3** 针对山谷型污染场地等地下水埋深落差较大的污染区域，宜进行地下水降水设计，如在垂直阻隔墙上游适当布置降水井，控制阻隔墙建成后上游与下游地下水的水头差。降水井设计可参考《建筑基坑支护技术规程》JCJ 120-2012 第 6.3 条规定，其中单井流量和地下水位降深可参考规程中第 8.3.5-8.3.10 条计算公

式。

### 6.2.2 垂直阻隔墙的深度

垂直阻隔墙的深度设计，宜考虑场地地层结构、地基稳定性、岩土层渗透系数、地下水位、承压含水层水头、污染深度等地质条件，以及场地的污染物性质与污染深度，并符合下列要求：

1 垂直阻隔墙的设计深度宜大于污染深度；

2 垂直阻隔墙宜嵌入连续且完整的隔水层，隔水层厚度不小于 3 m 且渗透系数不大于  $1.0 \times 10^{-6}$  cm/s；隔水层为土层时，嵌入深度应不小于 1 m；隔水层为岩层时，在大多数页岩与灰岩地层中宜嵌入 0.3-0.9 m，对于坚硬岩层，可根据开挖难度和经济性选择嵌入深度；

3 隔水层埋深大或目标污染物主要为低密度非水相液体（LNAPLs）时，可采用悬挂式垂直阻隔墙，深度设计应满足污染物从底部绕流击穿垂直阻隔墙的时间不小于污染物从浅部水平击穿防污垂直阻隔墙的服役寿命设计要求；

4 对于阻隔墙中插入土工膜的情况，当垂直阻隔墙的深度小于等于 20 m 时，土工膜插入深度宜与墙深相同；当垂直阻隔墙深度大于 20 m 时，土工膜插入深度宜取 20 m 或根据施工条件确定。

### 6.2.3 垂直阻隔墙的厚度

垂直阻隔墙的厚度设计，宜考虑场地岩土层分布、渗透系数等地质条件，以及阻隔墙两侧的水头差、污染物扩散、及垂直阻隔墙的墙体材料对污染物的吸附性。

6.2.3.1 垂直阻隔墙的厚度，可按附录 E 中公式（E1-E3）确定；

6.2.3.2 当根据式（E1）计算的厚度小于 0.6 m 时，宜取 0.6 m；

6.2.3.3 当根据式（E1）计算的厚度大于 1.2 m 时，宜取 1.2 m，并采取以下两种措施之一：

1 采用土工膜复合墙，回填墙体材料的渗透系数应不大于  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/s，土

工膜厚度应不小于 2.0 mm;

2 采用工程措施,控制靠近堆填体一侧地下水水位标高应低于远离堆填体一侧地下水水位标高 0.3 m 以上。

6.2.3.4 对设计的垂直阻隔墙厚度,可按附录 F 方法进行污染物击穿判别验算。验算满足击穿判别标准时,阻隔墙厚度可用于施工;验算不满足击穿判别标准时,宜合理增加墙体厚度或采取措施,并重复验算。

#### 6.2.4 垂直阻隔墙体材料及构造设计

工业固体废物堆填场垂直阻隔墙需具备低渗透性(渗透系数宜不大于  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/s)和耐久性,在极端气候或高污染程度等特殊服役条件下还需具备抗腐蚀、抗干湿、抗冻融等性能。垂直阻隔墙可选取土-膨润土墙、水泥-膨润土墙、土工膜复合防渗墙等类型。

##### 6.2.4.1 土-膨润土墙

1 土-膨润土垂直阻隔墙的墙体材料由基土、膨润土和水拌合制成。墙体材料选取及回填料配比、坍落度、密度等特性应符合《生活垃圾卫生填埋岩土工程技术标准》第 6.5.2 条的规定;

2 在化学侵蚀性强的地下水条件(如高盐、强酸、强碱等)中,宜选用化学相容性较好的改性膨润土材料制备回填料;

3 可通过改性剂提升土-膨润土回填料的化学相容性和耐久性。针对膨润土的改性剂可选用亲水、抗盐或耐酸/碱性良好的聚丙烯酸钠、羧甲基纤维素钠、六偏磷酸钠、黄原胶等材料,改性工艺可选用原位聚合或物理拌合等制备方法;

4 土-膨润土回填料配比初步确定后宜进行柔性壁渗透试验,评价墙体材料与地下水的化学相容性:

1) 未受污染土-膨润土在标准养护 28 天龄期时的渗透系数不宜大于  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/s; 污染物作用下在标准养护 28 天龄期时的渗透系数不应大于  $1.0 \times 10^{-6}$  cm/s;

2) 当化学相容性不符合设计要求时,宜调整墙体材料原料、配合比或

添加改性剂。

- 3) 针对污染风险等级高、工程项目重要性高的场地污染物时，宜测定污染物在墙体材料中的扩散系数和阻滞因子；
- 4) 工业固废堆填场地常见浸出污染物对土-膨润土回填料渗透性能的影响见附录 D。

#### 6.2.4.2 水泥-膨润土墙

1 水泥-膨润土墙由水泥和膨润土加水混合形成，硅酸盐水泥、膨润土等墙体材料的选取、材料配比和坍塌度等性能应符合《生活垃圾卫生填埋岩土工程技术标准》第 6.5.3 条中的规定；

2 当垂直阻隔结构顶部需承受上覆荷载时，宜采用水泥-膨润土墙，设计应符合《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》CJJ 176-2012 第 8.5.3 条；

3 可在水泥中加入细炉渣等添加剂降低渗透系数，增加材料的化学相容性和强度，细炉渣的粒径应小于 0.075 mm，水泥与细炉渣材料配比及对应渗透系数可参考《地下水污染阻隔技术指南》T/GIA 006-2021 第 4.3.1 条。

#### 6.2.4.3 土工膜复合防渗墙

1 土工膜复合防渗墙由土工合成材料与常规的泥浆沟垂直阻隔技术建造，使用于特殊地质、环境要求高、一般材料难以满足渗透性或化学相容性的场地；

2 土工膜材料的选取、渗透系数、厚度、表观完整性等特性应符合《土工合成材料聚乙烯土工膜》GB/T 17643 和《工业污染场地竖向阻隔技术规范》HG/T 20715-2020 第 5.3.6 条规定；

3 宜考虑阻隔区域地下水中污染物对土工膜服役寿命的影响；

4 可根据《垃圾填埋场用高密度聚乙烯土工膜》CJ/T 234 对土工膜进行最小密度、拉伸性能、氧化诱导时间等技术指标进行测试评估；

5 可采用水蒸气或目标有机污染物气体扩散试验评价土工膜的渗透系数；

6 土工膜膜片间的搭接宜采用水膨型止水锁扣、灌浆型锁扣及焊接型锁扣

等搭接方式，使用水膨型密封剂或锁扣腔室内的灌浆产生机械密封；

7 施工过程中会对锁扣产生压力，可通过室内或现场试验测试锁扣处的渗流量评估锁扣的强度和抗渗性能，并评估密封材料与地下水的相容性。

## **6.3 工程施工及质量控制**

### **6.3.1 垂直阻隔墙施工方法**

垂直阻隔墙的工程施工可选择沟槽开挖-回填法、深层搅拌法、高压喷射注浆法、渠式切割法等方法。

施工组织设计应符合现行国家标准《建筑施工组织设计规范》GB/T 50502 的相关规定，根据工业污染场地特点，具体应包括：材料配置、人员配置、设备配置、重点施工方法和工艺要求、施工过程质量保障措施、进度安排与保障措施、安全施工保障措施、工程应急预案、环境保护措施等。

#### **6.3.1.1 沟槽开挖-回填法**

1 沟槽开挖-回填法施工可通过挖掘地下土形成沟槽，由灌入的膨润土泥浆维护槽壁稳定，向沟槽中灌注墙体材料并将置换出护壁泥浆从而形成的阻隔墙，可应用于土-膨润土墙、水泥-膨润土墙、塑性混凝土墙等；

2 垂直阻隔墙施工前应进行墙体材料的配合比试验，并应满足渗透系数、化学相容性及施工和易性要求；

3 垂直阻隔墙采用沟槽开挖-回填法施工时，宜根据场地条件修筑导墙。开挖沟槽及导墙建造宜参考《建筑基坑支护技术规范》JGJ 120 中的规定，墙体材料回填施工可参考《生活垃圾卫生填埋岩土工程技术标准》的规定；

4 垂直阻隔墙回填施工完成后，顶部应铺设临时覆盖层防止垂直阻隔墙顶部开裂。墙体材料主沉降完成后，宜移除临时覆盖层，采用墙体材料修补凹陷或沉降槽，并铺设永久覆盖层，覆盖的顶部标高宜与天然地面一致。

### 6.3.1.2 深层搅拌法

深层搅拌法通过螺旋钻和特殊搅拌装置，在钻进的同时注入墙体材料，形成圆柱形的原位土-注入材料混合体，可用于在堤坝及其地基中形成连续阻隔墙，施工工艺可参考《深层搅拌法地基处理技术规范》DL/T 5425 及《工业污染场地竖向阻隔技术规范》HG/T 20715 中的规定。

### 6.3.1.3 高压喷射注浆法

1 高压喷射注浆法通过高压注浆的方式向土层中注入水泥浆液等形成阻隔帷幕，施工工艺宜符合《地基与基础工程施工及验收规范》GBJ 202、《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 和《高压喷射注浆施工技术规范》HG/T 20691 中的规定；

2 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，底部注浆施工宜符合《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》DL/T 5148 中的规定。

### 6.3.1.4 渠式切割法

渠式切割法通过渠式切割机械在土体中切割出渠槽，向渠槽内灌注墙体材料从而形成阻隔墙，适用于建造深度较大的垂直阻隔墙，施工工艺宜符合《渠式切割水泥土连续墙技术规程》JGJ/T 303 中的规定。

### 6.3.1.5 土工膜复合防渗墙

土工膜复合防渗墙，施工工艺包括沟槽开挖、灌注泥浆护壁、土工膜安装、回填墙体材料、土工膜顶部固定、铺设覆盖层等，施工工艺应符合《工业污染场地竖向阻隔技术规范》HG/T 20715 和《生活垃圾卫生填埋岩土工程技术标准》的规定。

## 6.3.2 泥浆沟槽的稳定性

1 沟槽稳定分析时应考虑沟槽旁边地表上覆荷载（包括垃圾堆体、垃圾坝、围堤等荷载）对沟槽稳定性的影响。

2 垂直阻隔墙沟槽开挖应验算开挖至各土层底面、设计深度工况时的沟槽稳定性，沟槽稳定安全系数应不小于 1.1，沟槽稳定安全系数可按公式（6.3.2-1、



6.3.2-2、6.3.2-3) 计算:

$$F_b = \frac{P_s}{P_a + P_w} \quad (6.3.2-1)$$

$$P_s = \frac{1}{2} \gamma_s H_s^2 \quad (6.3.2-2)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \gamma_w H_w^2 \quad (6.3.2-3)$$

式中:  $F_b$ ——沟槽稳定安全系数;

$P_s$ ——沟槽内泥浆施加在沟槽壁的力 (kN/m);

$P_w$ ——周边地基土内的地下水作用在沟槽壁的静水压力 (kN/m);

$P_a$ ——周边地基土及地表荷载作用在沟槽壁的土压力 (kN/m), 宜按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 中挡土墙主动土压力计算方法计算, 地表荷载应包括垃圾堆体、垃圾坝、围堤等荷载;

$\gamma_s$ ——泥浆重度 (kN/m<sup>3</sup>);

$H_s$ ——沟槽泥浆液面至验算深度的距离 (图 6.3.2) (m);

$\gamma_w$ ——地下水的重度 (kN/m<sup>3</sup>);

$H_w$ ——周边地基土中地下水水位面至验算深度的距离 (图 6.3.2) (m)。

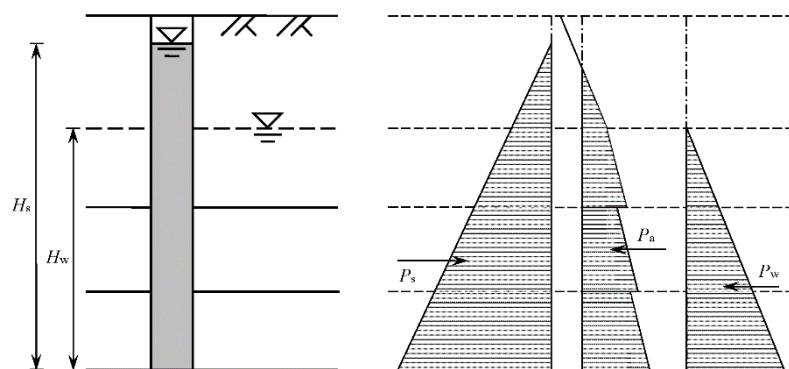


图 6.3.2 垂直阻隔墙沟槽稳定验算示意

3 当沟槽开挖出现侧壁塌时, 槽壁加固措施可选用水泥土搅拌桩 (墙)、高压旋喷桩等。

### 6.3.3 施工质量控制和质量保证

1 施工质量控制应包括施工材料质量控制、施工工序质量控制。各阶段施工

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/386034002121010131>