

ICS 13.020.40
CCS Z05

T/SSSC

中 国 土 壤 学 会 团 体 标 准

T/SSSC 0 —2026

化工场地复合污染绿色修复管控技术规 程 立体阻隔

Technical Code of Practice for Green Remediation and Management of
Combined Contamination at Chemical Sites—Three-dimensional Barrier

（征求意见稿）

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

中 国 土 壤 学 会 发 布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 总体原则	3
5 工作程序	4
6 技术适用性评价	7
7 立体阻隔系统设计.....	8
8 材料选择与性能要求.....	12
9 工程施工	14
10 长期监测	17
附录 A （规范性） 材料性能测试方法.....	20
附录 B （资料性） 施工记录表格.....	21

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国土壤学会提出并归口。

本文件起草单位：江苏省生态环境技术研究院有限公司、东南大学、上海大学。

本文件主要起草人：曲常胜、夏威夷、王超、丁亮、杜延军、杨洁、朱清禾、周俊、马迅、张泽民、朱迟、刘昆、郑今今。

化工场地复合污染绿色修复管控技术规程

立体阻隔

1 范围

本文件确立了化工场地复合污染立体阻隔的工作程序，以及立体阻隔技术的术语和定义、总体原则、设计、材料、施工、监测等技术要求。

本文件适用于化工场地复合污染（包括有机物、重金属等）的风险管控与绿色修复工程，其他类似污染场地可参照执行。

本文件不适用于放射性污染、致病性生物污染或农田污染场地。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 14848 地下水质量标准

GB 17639 土工合成材料 长丝纺粘针刺非织造土工布

GB 17643 土工合成材料 聚乙烯土工膜

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB 50934 石油化工工程防渗技术规范

GB 51220 生活垃圾卫生填埋场封场技术规范

CJJ 113 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范

HG 20715 工业污染场地竖向阻隔技术规范

HG 20717 污染场地岩土工程勘察标准

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

T/SSSC 0 化工场地复合污染绿色修复管控技术规程 水力循环强化生化修复

T/SSSC 0 化工场地复合污染绿色管控修复技术规程 增溶/曝气强化多相抽提

3 术语和定义

下列术语与定义适用于本文件。

3.1

化工场地 chemical plant site

从事农药、染料、医药中间体等化学品生产、贮存、利用、处置活动的用地。

3.2

复合污染 co-contamination

场地中同时存在多种污染物（如有机物、重金属）的污染状态。

3.3

绿色修复管控 green remediation and control

在保障污染治理效果的前提下，以低碳、低耗、低扰动、低二次污染为核心，通过全流程优化管控措施，最小化修复工程自身的环境与资源代价，实现安全治理与生态友好协同的场地修复管控模式。

3.4

立体阻隔技术 three-dimensional barrier technology

通过水平覆盖和竖向阻隔协同作用，阻断土壤-地下水中污染物迁移扩散途径的风险管控技术。

3.5

水平覆盖系统 horizontal cover system

在污染区域顶部敷设的防渗阻隔层，包括防渗层、排水层、保护层等组成部分。

3.6

竖向阻隔系统 vertical barrier system

在污染区域周边设置的垂直防渗屏障，包括土-膨润土墙、水泥搅拌墙、HDPE 膜墙等类型。

3.7

设计使用年限 design service life

设计规定的立体阻隔系统不需进行大修即可满足风险管控目标的年限。

3.8

长期监测 long-term monitoring

立体阻隔系统使用阶段对地下水质量、系统性能等开展的持续监测活动。

4 总体原则

4.1 技术联合兼容原则

化工场地复合污染修复管控过程中，应坚持各类修复与管控技术协同适配、兼容联用，根据化工场地多组分、多层级污染特征，合理组合物化修复、生物修复、风险管控等技术，避免工艺冲突与功能重叠，在保证修复管控安全与效果的前提下，提升治理效率、降低工程能耗与二次环境影响，实现多技术耦合的绿色协同修复与管控。

4.2 全生命周期原则

化工场地复合污染修复管控工程应覆盖场地调查、方案设计、施工实施、运维管控、验收及后期监测全生命周期，开展连续数据监测、动态研判与综合效果评估，统筹治理成效、资源消耗、碳排放、生态影响及长期稳定性，实现效果可控、绿色效益最大化。

4.3 全空间管控原则

立体阻隔系统需覆盖“污染核心区+潜在迁移区”，竖向阻隔需穿透污染层并嵌入隔水层，水平覆盖阻隔需超出污染边界设置缓冲带，两者通过协同搭接形成封闭管控体系，避免“阻隔盲区”。

4.4 协同适配原则

水平覆盖阻隔与竖向阻隔的材料性能、结构形式需匹配，优先选用绿色修复材料，确保搭接节点抗渗性能不低于系统主体性能，避免因材料收缩率差异、结构不协调导致渗漏。

4.5 风险导向原则

根据场地污染风险等级（高/中/低）确定阻隔方案：高风险区（如临近饮用水源地、高浓度污染区）需强化搭接节点防护（如双重焊接、多道密封），一般风险区可采用常规搭接设计。

4.6 长效稳定原则

系统设计需考虑场地长期使用需求（服役年限不低于 30 年），施工需严控质量，长期监测需覆盖关键节点，确保阻隔效果持续稳定。

5 工作程序

结合化工场地复合污染特征与立体阻隔技术特点，工作程序分为 6 个核心阶段，各阶段层层衔接、协同推进，确保技术应用的科学性与有效性。

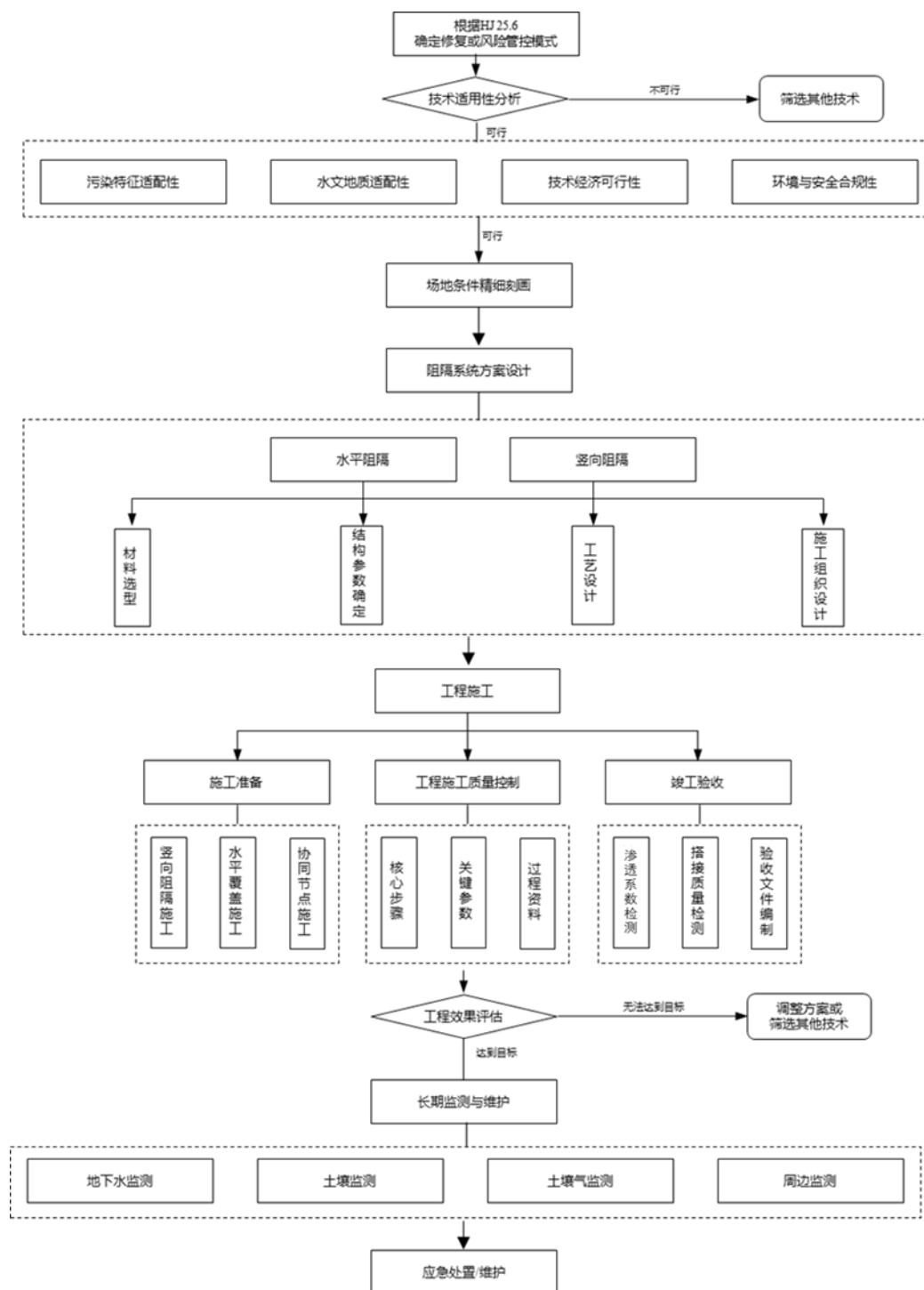


图 1 工作程序

5.1 场地调查与风险评估

开展针对性场地调查，重点检测土壤与地下水中有有机物（苯系物、卤代烃等）、重金属（铅、镉、镍等）的浓度分布，明确污染水平范围、垂直深度及核心污染区位置；勘察地下水水文地质条件，包括水位、水力坡度、隔水层埋深与渗透性，分析污染物多途径迁移规律。依据 HJ 25.3 相关要求完成风险

评估，划分高、中、低污染风险区，明确风险管控目标，为后续技术选型与设计提供基础数据。

5.2 技术适用性预评估

结合场地污染特征、水文地质条件及风险等级，初步判断立体阻隔技术的适配性。重点分析水平-竖向阻隔协同管控的可行性，排查潜在技术瓶颈，如高盐环境下材料稳定性、复杂地层竖向阻隔施工难度等，形成预评估报告，确定是否采用立体阻隔技术或需补充其他修复技术协同。

5.3 方案设计

基于调查评估结果，开展立体阻隔系统协同设计，明确水平覆盖与竖向阻隔的结构形式、材料选型、关键参数（如缓冲带宽度、阻隔深度、搭接方式）；同步完成施工组织设计、质量控制方案及应急修复预案；组织专家评审方案的技术可行性、经济合理性及环保安全性，修改完善后形成最终设计文件。

5.4 工程施工

按照“先竖向、后水平，同步搭接”的施工顺序，严格执行设计要求。施工前完成技术交底与试验段施工，确定关键施工参数；施工过程中强化搭接节点、材料铺设等关键环节的质量管控，做好施工记录（详见附录 B）；同步落实环保与安全措施，避免施工引发二次污染或安全事故。

5.5 竣工验收

施工完成后，开展现场检测与验收。主控项目包括阻隔系统渗透系数（不大于设计值）、无渗漏、节点密封性等；一般项目涵盖表面平整度、材料铺设质量、植被覆盖率等。结合施工记录、检测报告形成验收文件，验收合格后方可进入运行阶段。

5.6 长期监测与维护

启动长期监测计划，持续跟踪系统性能与污染管控效果；定期评估阻隔系统完整性，针对监测发现的渗漏、材料老化等问题，及时启动应急修复或维护措施；每 3 年开展一次系统效果全面评估，根据评估结果优化监测方案或更新维护策略，确保系统长期稳定运行。

6 技术适用性评价

技术适用性评价旨在判断立体阻隔技术是否适配具体化工场地污染管控需求，为技术选型与方案优化提供依据，评估过程遵循“风险导向、因地制宜、科学量化”原则。

6.1 评估对象与核心目标

评估对象为化工场地复合污染风险管控场景下的立体阻隔技术应用可行性。核心目标是明确该技术能否有效阻断污染物迁移路径、满足风险管控要求，同时兼顾技术先进性、经济合理性与环境友好性。

6.2 评估指标体系

6.2.1 污染特征适配性

污染物类型：适用于有机物与重金属复合污染，若存在高挥发性、强腐蚀性污染物，需核查材料化学相容性是否达标；

污染范围与深度：污染面积 ≤ 10 万 m^2 、污染深度 $\leq 40\text{m}$ 时适配性更佳，超此范围需评估阻隔系统的整体稳定性；

污染浓度：高浓度污染区需确认材料吸附容量与抗污染能力，确保不发生材料劣化。

6.2.2 水文地质适配性

地下水位：水位季节波动幅度 $\leq 3\text{m}$ 时适配性良好，超幅需强化排水设计与节点防护；

地层条件：适用于填土、粉质黏土、粉砂等常规地层，强透水层或岩溶发育区需补充强化阻隔措施；

隔水层条件：存在连续稳定隔水层（厚度 $\geq 1\text{m}$ ）时，竖向阻隔嵌入效果更佳，无明确隔水层需谨慎评估。

6.2.3 技术经济可行性

技术匹配性：水平与竖向阻隔系统的材料性能、结构形式需协同适配，无明显技术冲突；

成本合理性：单位面积治理成本需低于同类污染场地其他管控技术，且系统设计使用年限内无需

重大大修；

施工可行性：场地交通、空间条件能满足竖向阻隔施工设备（如搅拌桩机、开槽机）进场与作业需求。

6.2.4 环境与安全合规性

材料环保性：优先选用可降解、资源化材料，有害物质含量符合 GB 15618 要求；

二次污染防控：施工过程无大量扬尘、废水排放，材料无二次释放风险；

安全稳定性：系统能承受后期场地堆载、振动等影响，无结构失稳风险。

6.3 评估流程与结论

6.3.1 评估流程

收集场地调查、风险评估及相关标准资料→建立评估指标体系并量化评分→综合分析技术适配性→形成评估报告。

6.3.2 评估结论

适配：各项评估指标均达标，可直接采用立体阻隔技术，按风险等级优化设计方案；

条件适配：部分指标（如地下水位波动、高浓度污染）不满足，需补充专项技术措施（如强化排水、选用改性材料）后应用；

不适配：核心指标（如无隔水层、污染物强腐蚀性且无适配材料）不达标，建议更换其他风险管控技术。

7 立体阻隔系统设计

7.1 一般规定

立体阻隔系统设计应遵循以下一般规定要求：

a) 设计前需完成场地调查与风险评估，明确污染边界（水平范围、垂直深度）、地下水水文地质

条件（水位、水力坡度、隔水层埋深）、污染物迁移特性，作为系统布局与搭接设计依据。

b) 设计应综合考虑场地勘察结果、风险管控目标、目标污染物特性及设计使用年限（一般不低于30年）。水平覆盖系统与竖向阻隔系统应协同设计，形成封闭屏障。

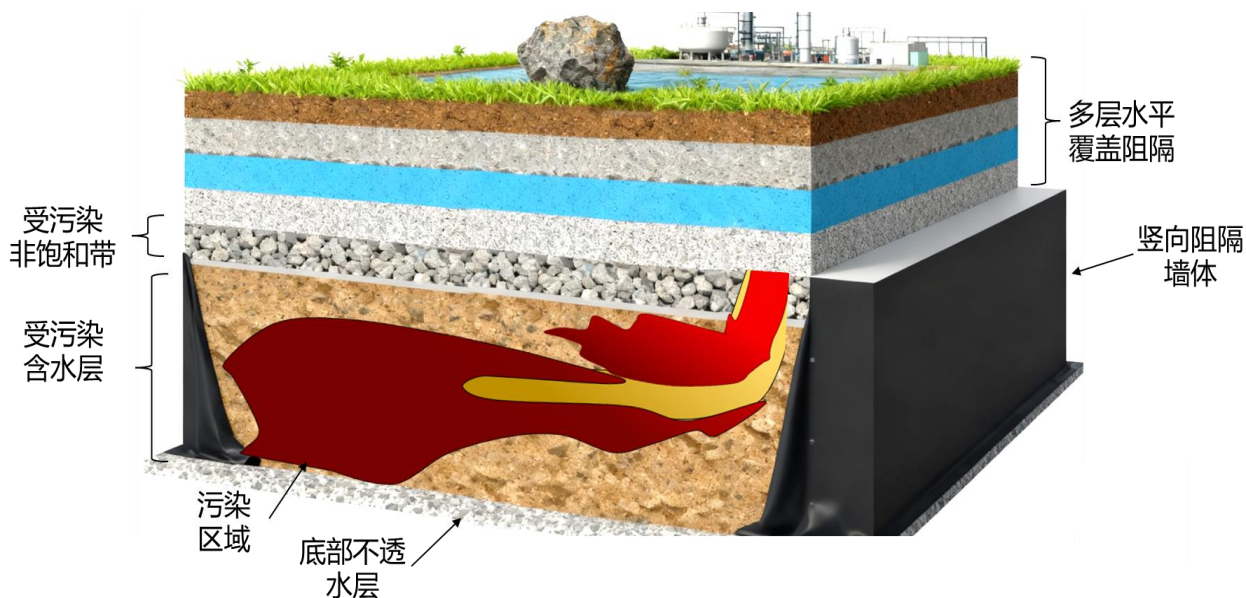


图 2 立体阻隔概念示意图

7.2 总体布局

7.2.1 平面布置

水平覆盖系统应覆盖整个污染区域及周边缓冲带（缓冲带宽度 $\geq 5\text{m}$ ），边缘与竖向阻隔系统无缝衔接；竖向阻隔系统宜采用闭合布置，沿污染区域边界或污染物迁移路径设置，形成封闭或半封闭帷幕，高地下水水力坡度区域需加密布置。

7.2.2 深度要求

竖向阻隔深度需穿透污染层，嵌入下方隔水层 $\geq 1\text{m}$ ，特殊情况不小于 1.5m ，具体通过稳定性计算确定；水平覆盖系统厚度宜为 $0.8\sim 1.2\text{m}$ ，竖向阻隔墙厚度宜为 $0.6\sim 1.0\text{m}$ ，具体根据污染物迁移模型计算确定。

7.2.3 地表处理

水平覆盖系统地表需设置排水坡度（2‰~5‰），避免积水渗入阻隔层；临近敏感目标区域，水平覆盖阻隔需延伸至敏感目标防护距离外，强化搭接节点防护。

7.3 水平覆盖系统设计

7.3.1 结构组成

系统自下而上包括排气层、防渗阻气层、排水层、覆盖支持土层、营养植被层。防渗阻气层渗透系数不大于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，可采用 HDPE 膜、钠基膨润土防水毯等材料。

7.3.2 结构形式选择

- a) 一般污染区：采用“土工膜+砂垫层”单层防渗结构；
- b) 复合污染区：采用“土工膜+膨润土垫+吸附层”复合结构（吸附层选用生物炭或改性膨润土）；
- c) 高挥发性有机污染区：在复合结构基础上增设“气体收集层”，控制污染物大气挥发。

7.3.3 搭接衔接要求

水平覆盖阻隔边缘需延伸至竖向阻隔“搭接段”内侧，延伸长度 $\geq 0.5\text{m}$ ；土工膜与竖向阻隔的连接采用“双层焊接”（内层焊接土工膜，外层焊接竖向阻隔墙体），焊接缝需连续无断点。

7.4 竖向阻隔系统设计

7.4.1 类型选择

根据地质条件、污染状况及设计寿命选择适宜类型，具体如下表所示：

类型	渗透系数（cm/s）	适用地质	设计寿命
土-膨润土墙	$\leq 1 \times 10^{-7}$	砂土、粉土	≥ 30 年
水泥-膨润土墙	$\leq 1 \times 10^{-8}$	黏土、碎石	≥ 50 年
HDPE 膜墙	$\leq 1 \times 10^{-12}$	各种地层	≥ 100 年

7.4.2 结构形式选择

可选择的竖向阻隔结构形式包括：

- a) 污染深度 $\leq 5\text{m}$ 、土壤渗透性强：搅拌桩阻隔墙（可掺加生物炭、改性膨润土等吸附材料）；

- b) 污染深度>5m、高风险区：土工膜垂直阻隔墙（配套膨润土垫保护层）；
- c) 地下水丰富、地层复杂：“搅拌桩+土工膜”复合阻隔墙（搅拌桩作支撑，土工膜作防渗层）。

7.4.3 搭接衔接要求

顶部预留“搭接段”（长度 $\geq 0.5\text{m}$ ），表面需平整、无凸起，清理油污与杂物；搭接段与水平覆盖阻隔的连接采用热焊接或专用环保粘接剂，确保衔接紧密。

7.5 协同搭接节点设计

7.5.1 节点结构

采用“防渗+密封+防护”三重设计，主要包含水平覆盖阻隔层、竖向阻隔墙、双层焊接段、膨润土密封层、黏土防护堤、排水盲沟。

7.5.2 关键要求

- a) 间隙控制：节点处水平与竖向阻隔的间隙 $\leq 5\text{mm}$ ，间隙用膨润土腻子或专用密封胶填充；
- b) 抗渗要求：节点渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ ，与系统主体抗渗性能一致；
- c) 力学防护：节点需承受 $\geq 20\text{kPa}$ 附加荷载（如施工机械、后期堆载），避免变形开裂。

7.5.3 场景优化

- a) 高水位场地：节点下方增设排水盲沟，及时排出积水，降低水压；
- b) 冻融地区：选用耐寒型土工膜，节点外侧设保温层，防止冻融循环破坏；
- c) 振动环境（如临近道路）：节点增设土工布缓冲层，减少振动对焊接缝的影响。

7.6 辅助设计

7.6.1 渗漏监测设计

在搭接节点周边 2m 范围内布设渗漏传感器（间距 $\leq 20\text{m}$ ），监测土壤含水率、污染物浓度；节点两侧设监测孔（污染侧与非污染侧各 1 组），定期采集水样分析污染物迁移情况。

7.6.2 应急修复设计

节点外侧预留注浆管（间距 $\leq 50\text{m}$ ），当监测发现渗漏时，注入膨润土浆液或防渗胶，快速封堵渗漏通道。

7.6.3 热点区域强化设计

针对污染热点区域，可增设局部强化阻隔单元，提升阻隔效果。

8 材料选择与性能要求

8.1 选型原则

a) 协同适配：竖向与水平覆盖阻隔材料的化学稳定性、热膨胀系数需匹配，避免搭接节点因材料特性差异开裂；

b) 绿色环保：优先选用可降解、可回收或资源化利用材料，材料中有害物质含量符合 GB 15618 要求；

c) 性能可靠：材料需具备长期耐污染、抗老化能力，满足系统服役年限要求（ ≥ 30 年）；

d) 兼容性要求：所有材料需进行化学兼容性测试，确保与污染物接触时不劣化，测试方法见附录 A。

8.2 防渗材料

8.2.1 HDPE 膜

厚度不小于 1.5mm （高风险区 $\geq 2.0\text{mm}$ ），耐化学腐蚀性符合 GB/T 17643 要求，渗透系数不大于 $1 \times 10^{-12}\text{cm/s}$ ，拉伸强度 $\geq 15\text{MPa}$ ，断裂伸长率 $\geq 500\%$ ，耐环境应力开裂时间 $\geq 1000\text{h}$ ，与水平土工膜焊接兼容性良好。

8.2.2 钠基膨润土防水毯

膨胀指数不小于 24 mL/2g ，耐盐性良好，渗透系数不大于 $1 \times 10^{-9}\text{cm/s}$ ，单位面积质量 $\geq 4000\text{g/m}^2$ 。

8.2.3 混凝土

抗渗等级不低于 P6，强度等级不低于 C25，用于竖向阻隔时需添加防腐剂。

8.3 竖向阻隔材料

8.3.1 搅拌桩材料

水泥选用 PO42.5 及以上等级；掺加吸附材料时，需与水泥相容性良好，桩体 28d 抗压强度 $\geq 1.5\text{MPa}$ ，渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ 。

8.3.2 垂直土工膜

厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ ，拉伸强度 $\geq 15\text{MPa}$ ，耐环境应力开裂时间 $\geq 1000\text{h}$ ，与水平土工膜焊接相容性良好。

8.3.3 膨润土垫（保护层）

钠基膨润土，单位面积质量 $\geq 4000\text{g/m}^2$ ，膨胀指数 $\geq 24\text{mL/2g}$ ，渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-9}\text{cm/s}$ 。

8.4 水平覆盖阻隔材料

8.4.1 水平土工膜

厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ （高风险区 $\geq 2.0\text{mm}$ ），断裂伸长率 $\geq 500\%$ ，耐化学腐蚀性（浸泡 7d 性能衰减率 $\leq 10\%$ ）。

8.4.2 吸附材料

生物炭：比表面积 $\geq 300\text{m}^2/\text{g}$ ，吸附容量 $\geq 50\text{mg/g}$ （重金属）、 $\geq 100\text{mg/g}$ （有机污染物）；改性膨润土：吸附容量 $\geq 60\text{mg/g}$ （重金属），无二次释放风险。

8.4.3 砂垫层

级配良好，粒径 0.5~2.0mm，含泥量 $\leq 3\%$ ，压实系数 ≥ 0.95 。

8.5 排水材料

土工排水网导水率不小于 $0.01\text{m}^2/\text{s}$ ，砂石料含泥量不大于 3%，粒径均匀。

8.6 保护材料

土工布断裂强度不小于 20kN/m ，耐紫外线性能符合 GB/T 17639 要求，单位面积质量 $\geq 200\text{g/m}^2$ ，用于膜体保护。

8.7 搭接节点专用材料

8.7.1 焊接剂/粘接剂

与土工膜同材质热焊接条，或环保型粘接剂，粘接强度 $\geq 0.1\text{MPa}$ ，耐老化年限 ≥ 30 年。

8.7.2 密封材料

膨润土腻子：膨胀倍数 ≥ 20 倍；丁基橡胶密封胶：耐化学腐蚀，低温无脆裂。

8.7.3 防护材料

黏土：压实系数 ≥ 0.95 ；土工布：单位面积质量 $\geq 200\text{g/m}^2$ ，断裂强度 $\geq 15\text{kN/m}$ 。

9 工程施工

9.1 施工准备

9.1.1 技术准备

编制专项施工方案，明确施工顺序、搭接节点工艺、质量控制要点；设计单位向施工单位详细说明技术要点，包括设计图纸、材料规格和施工工艺；进行“搭接节点试验段”施工（长度 $\geq 10\text{m}$ ），确定焊接温度、密封材料用量等关键参数。

9.1.2 现场准备

清除障碍物，平整场地，坡度不大于 5%，压实度不低于 95%；清除地表尖锐杂物（碎石、钢筋头），竖向阻隔周边 1m 范围内铺设 10cm 厚砂垫层，确保水平覆盖阻隔铺设平整。

9.1.3 材料检验

所有进场工程材料进场时须同步提供产品出厂合格证、质量证明书等原厂质量文件，严格执行按批次进场抽检制度；现场逐一核查每批次产品合格证、出厂检测报告、规格型号、外观质量与有效期，对土工膜、膨润土垫等防渗体系关键材料，按规范规定的取样频次、取样点位开展现场抽样送检，重点检测材料拉伸强度、渗透系数、抗撕裂性能等核心指标，全部检验项目合格后方可投入施工使用，完整

留存样品信息、取样影像、检测原始记录及正式检测报告，相关材料检验记录详见附录 B。

9.2 施工顺序

遵循“先竖向、后水平，同步搭接”原则：先完成竖向阻隔施工（预留搭接段）→清理搭接段表面→铺设水平覆盖阻隔层→施工协同搭接节点→验收节点质量。

9.3 竖向阻隔施工

9.3.1 搅拌桩阻隔墙施工

桩位偏差 $\leq 50\text{mm}$ ，垂直度偏差 $\leq 1\%$ ，相邻桩搭接宽度 $\geq 0.3\text{m}$ ；吸附材料与水泥浆混合均匀（搅拌时间 $\geq 3\text{min}$ ），注浆压力控制在 $0.5\sim 1.5\text{MPa}$ ，避免桩体出现空洞。

9.3.2 土工膜垂直阻隔墙施工

沟槽开挖宽度 $\geq 0.8\text{m}$ （预留搭接施工空间），基底压实系数 ≥ 0.95 ；土工膜垂直铺设，避免褶皱，顶部预留搭接段 $\geq 0.5\text{m}$ ，搭接段表面清理干净（无泥土、油污）。

9.3.3 通用要求

土-膨润土墙采用开槽法，槽壁稳定性偏差不大于 $1/300$ ；HDPE 膜墙垂直度偏差不大于 $1/200$ ，接头采用双焊缝检测。

9.4 水平覆盖系统施工

9.4.1 基层处理

基层处理压实后，确保表面平整、无杂物，压实系数 ≥ 0.95 。

9.4.2 各层铺设

a) 防渗层铺设：HDPE 膜焊接缝强度不低于母材的 80% ，焊接温度 $200\sim 230^{\circ}\text{C}$ ，焊接速度 $0.5\sim 1.0\text{m/min}$ ；膨润土防水毯搭接宽度不小于 300mm ，铺设后及时压实（压实度 $\geq 90\%$ ）。

b) 排水层铺设：厚度均匀，坡度朝向集水井，确保排水顺畅。

c) 吸附层铺设：均匀铺设，厚度偏差 $\leq \pm 5\text{cm}$ ，避免局部堆积或缺。

d) 植被层铺设：按设计厚度摊铺，确保植被覆盖率符合要求。

9.4.3 膜体搭接要求

土工膜从竖向阻隔向场地内侧推进，膜与膜搭接宽度 $\geq 10\text{cm}$ ；膨润土垫覆盖土工膜搭接缝，搭接宽度 $\geq 30\text{cm}$ 。

9.5 协同搭接节点施工

9.5.1 施工流程

a) 预处理：清理竖向阻隔搭接段表面浮浆、杂物，铺设 10cm 厚膨润土垫；

b) 焊接：先焊接内层（水平土工膜与竖向土工膜），再焊接外层（水平土工膜与竖向墙体），焊接缝宽度 $\geq 8\text{cm}$ ；

c) 密封：在双层焊接缝间隙填充膨润土腻子，表面抹平，确保无空隙；

d) 防护：节点外侧铺设土工布（搭接宽度 $\geq 0.5\text{m}$ ），砌筑黏土防护堤（高度 $\geq 0.3\text{m}$ ，压实系数 ≥ 0.95 ）；

e) 临时保护：设置警示标识，避免施工机械碾压节点。

9.5.2 质量控制

焊接质量采用充气检测（压力 0.2~0.3MPa，保压 5min 无下降），检测数量 $\geq$ 焊接缝总数的 10%；密封质量采用注水检测（向节点周边沟槽注水，24h 无渗漏）；黏土防护堤采用环刀法检测压实系数，每 10m 检测 1 点。

9.6 质量控制

实时监测渗透系数，每 100m²检测一点，合格率 100%；焊缝进行气压试验，压力不低于 0.2MPa，保压时间 5min；施工记录表格见附录 B。

9.7 验收标准

主控项目包括阻隔系统渗透系数不大于设计值、无渗漏；一般项目包括表面平整度、植被覆盖率等；验收合格后出具报告。

9.8 施工环保与安全

9.8.1 环保要求

施工作业区域须常态化开展洒水降尘作业，根据现场风力、气温及土方扰动情况合理调整洒水频次，裸露土方、堆土区及临时扰动土体全面铺设防尘网并做好固定压边，防止扬尘扩散；施工产生的生产废水、基坑渗滤液须经多级沉淀池充分沉淀处理，配套设置水质简易监测环节，处理后的废水优先回用于场地洒水降尘，确需外排时必须满足排放标准要求，严禁未经处理直接排放，同步做好防渗隔离措施，阻断废水下渗通道，避免污染物迁移造成地下水与土壤二次污染。

9.8.2 安全要求

严格落实施工现场安全责任制，规范各工序安全作业。高空作业人员须持证上岗，作业前检查安全帽、安全带、安全绳，全程规范佩戴；作业区域搭设脚手架及防护网，划定作业禁区，禁止无关人员进入。工程机械、特种设备操作人员持有效证件上岗，严禁无证顶岗；设备进场完成检修验收，作业按规程操作，禁止超载，每日前后巡检排查故障隐患。现场统一设置安全警示标识与防护围挡，基坑、高空、机械及用电区域增设防护，夜间施工配齐照明及警示灯。落实全员安全技术交底与岗前培训，严防高空坠落、触电、基坑坍塌、机械伤害等风险；规范临时用电，做好线路、配电箱绝缘接地防护，严禁私拉乱接，保障人员、设备与工程安全。。

10 长期监测

10.1 监测要求

10.1.1 监测范围

重点覆盖协同搭接节点、污染核心区、场地周边敏感目标，具体包括：搭接节点周边 2m 范围；竖向阻隔两侧（污染侧与非污染侧）；水平覆盖阻隔上方（控制挥发性污染物）；场地周边饮用水源地、居民区等敏感目标周边。

10.1.2 监测指标

- a) 土壤：主要污染物浓度（如重金属、有机污染物）、含水率；
- b) 地下水：污染物浓度、水位、pH 值，需符合 GB/T 14848 要求；
- c) 阻隔系统：搭接节点完整性、土工膜破损情况、渗透系数；
- d) 环境空气：挥发性有机污染物浓度（高挥发性污染场地）。

10.2 监测方案

10.2.1 监测点布设

- a) 土壤监测点：在搭接节点周边每 50m 设 1 个，污染核心区每 100m 设 1 个；
- b) 地下水监测孔：竖向阻隔两侧各设 1 组，每组 3 个（不同深度），孔深穿透阻隔层；上下游均需设置监测井；
- c) 渗漏传感器：搭接节点周边间距 $\leq 20\text{m}$ ，埋深与水平覆盖阻隔层平齐；
- d) 环境空气监测点：场地边界及敏感目标上风向、下风向各设 1 个。

10.2.2 监测频率

监测阶段	监测频率
验收后 1 年	每月 1 次（节点渗漏、地下水）；每 3 个月 1 次（土壤、空气）
验收后 1~5 年	每 3 个月 1 次（节点渗漏、地下水）；每 6 个月 1 次（土壤、空气）
验收 5 年后	每 6 个月 1 次（节点渗漏、地下水）；每年 1 次（土壤、空气）
极端天气后	24h 内专项监测（如暴雨、地震后核查节点完整性）

10.3 数据管理与应急响应

监测数据应记录在案，建立监测数据台账，定期分析数据趋势，评估阻隔效果；异常时启动应急响应，如浓度上升超过 30%需排查原因并修复。

当出现以下情况时，启动预警并采取措施：

- a) 节点渗漏传感器监测到含水率突增（ $\geq 20\%$ ）或污染物浓度超背景值 10 倍；

b) 地下水监测孔中污染物浓度超风险管控值；

c) 土壤或空气污染物浓度持续上升。

10.4 效果评估与维护更新

每 3 年开展 1 次立体阻隔系统效果评估，重点验证搭接节点阻隔有效性，采用数据对比、数值模拟结合的方法；每年一次渗透系数测试，每 5 年一次全面评估，包括结构完整性和材料耐久性；定期检查裂缝、植被状况，及时修补和补种，确保系统长期有效性；评估发现节点渗漏或阻隔性能衰减时，及时采用注浆等修复措施。

附录 A

（规范性）

材料性能测试方法

A.1 HDPE 膜耐化学腐蚀测试

按 GB/T 17642 规定，将试样浸泡于污染液（模拟场地污染物）中 30d，测量强度保留率不低于 80%。

A.2 膨润土膨胀指数测试

称取 2g 膨润土置于量筒，加水至 100mL，静置 24h 后读取沉降体积，计算膨胀指数。

A.3 渗透系数测试

采用柔性壁渗透仪，按 ASTM D5084 标准执行，测试条件模拟场地环境。

A.4 其他材料测试

其他材料性能测试按照对应产品标准及相关规范要求执行。

附录 B

(资料性)

施工记录表格

表 B.1 材料进场记录表

材料名称	规格	生产厂家	进场日期	检验结果	备注
HDPE 膜	1.5mm (或 2.0mm)	XX 公司	20XX-XX-XX	合格	/
钠基膨润土毯	5kg/m ² (或 4000g/m ²)	YY 公司	20XX-XX-XX	合格	/
生物炭	比表面积≥300m ² /g	ZZ 公司	20XX-XX-XX	合格	/
水泥	PO42.5	AA 公司	20XX-XX-XX	合格	/
土工布	≥200g/m ²	BB 公司	20XX-XX-XX	合格	/

表 B.2 焊缝检测记录表

焊缝编号	检测方法	压力值	保压时间	结果	检测人员	检测日期
WH-001	气压试验	0.22MPa	5min	合格	XXX	20XX-XX-XX
WH-002	真空试验	-0.08MPa	3min	合格	XXX	20XX-XX-XX
WH-003	气压试验	0.25MPa	5min	合格	YYY	20XX-XX-XX

表 B.3 施工过程记录表

施工日期	施工部位	施工内容	施工参数	质量检查结果	负责人	备注
20XX-XX-XX	竖向阻隔墙	搅拌桩施工	注浆压力 0.8MPa, 桩间距 1.2m	合格	AAA	/
20XX-XX-XX	水平覆盖系统	HDPE 膜铺设	焊接温度 210℃, 搭接宽度 10cm	合格	BBB	/
20XX-XX-XX	协同搭接节点	焊接与密封	焊接缝宽度 8cm, 密封材料填充饱满	合格	CCC	/

表 B.4 监测数据记录表

监测日期	监测点编号	监测指标	监测值	标准值	是否达标	备注
20XX-XX-XX	SJ-001	地下水重金属浓度 (mg/L)	0.05	0.1	是	/
20XX-XX-XX	SJ-002	土壤有机污染物浓度 (mg/kg)	10	50	是	/
20XX-XX-XX	SJ-003	节点渗漏传感器含水率 (%)	15	20	是	/