

污染地块阻隔工程技术指南 (征求意见稿)

编制说明

《污染地块阻隔工程技术指南》编制组

2018 年 9 月

目 录

1 任务来源	1
2 标准编制的必要性、编制依据、编制原则	1
2.1 编制的必要性	1
2.2 编制依据	2
2.3 编制原则	4
3 相关标准概况	5
4 主要工作过程	5
5 工程现状调研	6
5.1 气体覆盖阻隔工程案例--某化工厂原场址阻隔	7
5.2 堆场污染阻隔覆盖工程案例-某铅锌冶炼渣地块	9
5.3 垂直阻隔技术	12
5.4 水平阻隔技术--某水源地对重金属污染土壤	27
6 主要技术内容及说明	28
6.1 适用范围	28
6.2 规范性引用文件	28
6.3 术语和定义	29
6.4 总体要求	29
6.5 污染地块阻隔工程设计	29
6.6 污染地块垂直阻隔工程施工及质量控制	30
6.7 覆盖阻隔和水平阻隔工程施工及质量控制	32
6.8 阻隔工程验收及维护管理	32
7 标准实施建议	32

1 任务来源

2016 年 1 月，中国环境保护产业协会组织召开了环境修复行业相关技术和产品标准编制研讨会，会议讨论确定了环境修复领域亟需制定的 7 项技术标准，《污染地块阻隔工程技术指南》（以下简称《指南》）是 7 项技术标准之一。2016 年 5 月，经过专家会评审确定《指南》由北京矿冶科技集团有限公司牵头，北京高能时代环境技术股份有限公司、浙江大学、中国环境科学研究院、北京市勘察设计研究院有限公司协作参编完成该标准。

2 标准编制的必要性、编制依据、编制原则

2.1 编制的必要性

根据中国产业信息网评估结果，我国在 2005~2013 年间对土壤修复领域进行的调查显示全国土壤超标率为 16.1%，工矿废弃地尤其严重，其次是采矿区、污水灌溉区、采油区、固废处理地块等。从区域分布来看，长江三角洲、珠江三角洲、东北老工业基地、西南、中南地区污染情况严重。

全国土壤总的超标率为 16.1%，其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为 11.2%、2.3%、1.5%和 1.1%。污染类型以无机型为主，前三位镉、镍和砷；有机型次之，滴滴涕点位超标率最高；复合型污染比重较小。无机污染物超标点位数占全部超标点位的 82.8%。

根据江苏省（宜兴）环保产业技术研究院及土壤修复战略联盟对公开招投标项目的统计调查，2008-2016 年我国 177 个土壤修复项目中，污染途径阻断技术占比 32%。阻隔技术成为土壤修复应用最广泛的技术之一。

随着新环保法和《土壤污染防治行动计划》的实施，我国污染地块修复市场规模将进一步扩大。阻隔技术作为地块修复常用的技术之一。在重金属、有机物及重金属有机物复合污染土壤均有广泛应用。污染地块阻隔技术针对不同类型地块污染，修复方法多样，工艺多元化，阻隔覆盖修复关键技术参数不统一。近年来地块修复市场逐渐兴起，土壤修复工程技术水平参差不齐，目前国家层面还没有建立完备的污染地块的环境质量技术标准，污染修复治理后也缺乏长期监测和监管。阻隔技术缺乏相应的标准规范，急需制定污染地块阻隔工程技术指南，确保土地污染修复工程质量，便于环境保护管理部门对修复工程进行监督管理。

由此可见，针对污染地块阻隔技术工程实施，提出科学合理的设计要求和规定是十分必

要的。

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国污染防治法》等法律法规，完善污染地块修复标准体系，规范污染地块阻隔工程的规划、设计、施工、验收和运行管理，改善和保护环境，保障人民健康，特制定本指南。阻隔技术指南的制定将全面梳理现有地块修复技术及设计规范，通过调查国内不同污染类型地块修复典型示范工程，针对典型阻隔技术选取代表性修复工艺，合理确定土壤阻隔修复关键技术参数和指标，同时咨询工程设计、施工人员，业内专家对污染地块阻隔工程技术指南的制定进行审核，使指南可靠性高、实用性强。

2.2 编制依据

本指南的编制以国家环境保护现有法律、法规、标准为主要依据，同时参考行业其他相关的技术指南和设计手册，结合国内外有关污染地块治理工程建设运行的文献以及调研取得的国内工程运行情况数据资料，总结编制本指南。

2.2.1 法律法规

- (1) 《中华人民共和国环境保护法》（2014 年 4 月 24 日修订）；
- (2) 《中华人民共和国水污染防治法》（2017 年 6 月 27 日修订，自 2018 年 1 月 1 日起施行）；
- (3) 《中华人民共和国大气污染防治法》（2015 年 8 月 29 日修订）；
- (4) 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（2015 年 4 月 24 日修订）；
- (5) 《中华人民共和国水土保持法》（2011 年 3 月）；
- (6) 《中华人民共和国土地管理法》（2004 年 8 月）；
- (7) 《中华人民共和国环境影响评价法》（2016 年 9 月 1 日）。

2.2.2 政策文件

- (1) 《关于印发近期土壤环境保护和综合治理工作安排的通知》（国办发〔2013〕7 号）；
- (2) 《关于印发土壤污染防治行动计划的通知》（国发〔2016〕31 号）；
- (3) 《关于印发水污染防治行动计划的通知》（国发〔2015〕17 号）；

- (4) 《国家重金属污染综合防治“十二五”规划》（国函〔2011〕13号）；
- (5) 《关于土壤污染防治工作的意见》（环发〔2008〕48号）；
- (6) 《全国土壤污染状况评价技术规定》（环发〔2008〕39号）；
- (7) 《关于印发<建设项目环境保护事中事后监督管理办法（试行）>的通知》（环发〔2015〕163号）；
- (8) 《污染地块土壤环境管理办法（试行）》（环保部令第42号）；
- (9) 《研究部署土壤环境保护和综合治理工作》（国务院第238次常务会议）；
- (10) 《关于加强环境保护重点工作的意见》（国发〔2011〕35号）；
- (11) 《关于加强工业企业关停、搬迁及原址场地再开发利用过程中污染防治工作的通知》（环发〔2014〕66号）；
- (12) 《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》（环保部公告2014年第78号）；
- (13) 《关于印发<土壤环境保护和综合治理方案编制指南>的通知》（环办〔2013〕54号）。

2.2.3 标准规范

GB 175	通用硅酸盐水泥
GB 8978	城镇污水处理厂污染物排放标准
GB 16889	生活垃圾填埋场污染控制标准
GB/T 17642	土工合成材料 非织造布复合土工膜
GB/T 17643	土工合成材料 聚乙烯土工膜
GB 18598	危险废物填埋污染控制标准
GB 18599	一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准
GB/T 50081	普通混凝土力学性能试验方法标准
GB 50202	建筑地基基础工程施工质量验收规范
GB 50203	砌体结构工程施工质量验收规范

GB 50204	混凝土结构工程施工质量验收规范
GB 50205	钢结构工程施工质量验收规范
GB 50231	机械设备安装工程施工及验收通用规范
GB 50236	现场设备、工业管道焊接工程施工规范
GB/T 50290	土工合成材料应用技术规范
GB 50300	建筑工程施工质量验收统一标准
GB 50869	生活垃圾卫生填埋处理技术规范
GB/T 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
HJ/T 25.1	场地环境调查技术导则
CJJ 113	生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范
CJJ 176	生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范
DL/T 5148	水工建筑物水泥灌浆施工技术规范
DL/T 5150	水工混凝土试验规程
SL/T 231	聚乙烯（PE）土工膜防渗工程技术规范

2.3 编制原则

本文件以《中国环境保护产业协会标准管理办法（试行）》为指导，为污染地块阻隔技术工程应用提供技术指导，根据《国家环境保护标准制修订工作管理办法》，突出指南的科学性、完整性、统一性和协调性。

（1）科学性原则。指南是直接为污染地块阻隔工程实施的团体推荐性标准，为确保实施工程达标；通过对国内各地区不同类型污染地块阻隔技术工程技术和经验进行总结与借鉴，筛选出不同地区和不同类型最佳可行的阻隔技术。使指南具有较强的科学性、指导性和可操作性。

（2）完整性原则。污染地块阻隔工程技术指南重点是突出工程设计和工程施工，体现污染控制从设计、建设到验收运行的全过程整体化管理理念。

(3) 统一性原则。污染地块阻隔工程技术指南与已经发布或正在编制污染地块环境保护相关的管理文件、技术政策、排放标准、技术指南和规范等文件保持一致。

(4) 协调性原则。污染地块阻隔工程技术指南与其他同类型环保标准是互相联系、互相衔接和补充的。

3 相关标准概况

国外针对阻隔技术发布标准主要集中在有毒有害气体，矿山污染地块等领域。如针对污染地块阻隔技术发布标准有《Guidelines for Metal Leaching and Acid Rock Drainage at Mine Sites in British Columbia, Ministry of energy and Mines》（加拿大能源矿产部），《Global Acid Rock Drainage Guide》（澳大利亚）。美国环保总局 EPA 发布的针对从建筑物基础进入室内的有毒有害气体阻隔技术指南《OSWER Technical Guidance for Assessing and Mitigating the Vapor Intrusion Pathway from Subsurface Vapor Sources to Indoor Air》。

根据固体废弃物的种类以及环境管理要求，现有阻隔技术标准主要针对卫生填埋场，一般工业固废填埋场，危险废物填埋场，先后出台了《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》GB 50869，《生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范》HJ 564，《危险废物贮存污染控制标准》GB18597，《危险废物填埋污染控制标准》GB 18598，《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》GB18599 等标准规范，上述标准规定了填埋地块的选址、设计、施工、验收和作业管理要求。

针对污染地块治理的技术标准，我国目前发布的污染地块系列环境保护标准主要有《地块环境调查技术导则》（HJ 25.1），《地块环境监测技术导则》（HJ 25.2），《污染地块土壤修复技术导则》（HJ 25.4），《污染地块风险评估技术导则》等。上述标准主要围绕地块修复前期工作进行，主要涵盖了环境调查，监测，风险评估，修复方案的编制等。

对比国内外已有的污染地块阻隔技术标准发布概况可知，我国目前尚缺乏针对污染地块的阻隔技术标准，特别是指导污染地块阻隔技术的工程设计，施工，验收管理方面，亟需制定相关标准填补空白。

4 主要工作过程

(1) 2016 年 3 月成立编制组，2016 年 5 月 3 日和 7 月 27 日在北京召开了两次工作讨

论会，确定了编制大纲，明确了指南的适用范围。讨论会对阻隔技术类型进行详细划分，按照对应地块类型、技术特征、适用条件等将污染地块阻隔技术划分为覆盖阻隔技术、垂直阻隔技术、水平阻隔技术等三大类。工程勘察设计从前期准备、初步设计、施工图设计等三个不同阶段提出技术要求。工程施工从一般规定、施工材料、施工设备、施工准备、工艺试验、施工作业、施工质量控制、质量检验与验收等方面进行规定。工程评估验收从监理验收、监测评估、后期维护进行说明。

(2) 2016 年 8 月-2017 年 5 月，编制完成开题报告及初稿。

(3) 2017 年 6 月中国环境保护产业协会在北京组织召开了开题论证会。专家组一致同意开题，对初稿也提出了一些完善的建议。

(4) 2017 年 7 月-2018 年 2 月，完成典型工程案例的实地调研，从方案选择、设计、施工运营、监测控制、运行管理、竣工验收全过程提出相关工艺的关键技术参数、实施条件和配套保障等措施，在标准初稿基础上编制完成指南征求意见稿及编制说明。

(5) 2018 年 3 月中国环境保护产业协会在北京组织召开了指南征求意见稿的技术审查会，专家建议名称修改为《污染地块阻隔工程技术指南》与标准内容更为匹配；合理调整完善标准框架结构安排，统一各工艺编制框架并合理确定编制深度；合并覆盖和水平阻隔章节内容；进一步完善标准格式和用语。

(6) 2018 年 4 月至 9 月，编制组按征求意见稿技术审查会上的专家意见对指南及编制说明进行了完善，形成正式的征求意见稿。

5 工程现状调研

我国对阻隔技术的最早应用始于 2007 年，以阻隔填埋方式处置重金属污染土壤；2010 年，某工程采用 HDPE 膜作为主要阻隔材料，阻挡污染物随地下水的水平迁移，将污染物以及污染土壤与外界环境隔绝，杜绝污染扩散，保护周围土壤和地下水。原位土壤阻隔覆盖技术未对污染物进行降解和去除，由于“以风险控制为目标”的修复理念尚未被国内环境管理部门认可，该技术在国内外尚未大规模推广。土壤异位阻隔填埋技术通常与固化/稳定化修复技术联用，在国内发展已比较成熟，已广泛用于重金属污染土壤的处置，相关技术设备已能够完全本土化。该联用技术具有处置速度快、效果好、可操作性强、成本低、对土壤质地限制要求少，可适用不同类型污染土壤的优点。

垂直防渗技术种类很多，有采用灌浆形成的隔水帷幕、或采用防渗连续墙、钢板桩等。灌浆形成隔水帷幕是垂直防渗的重要方式，属于一种化学加固法，化学加固法通常可分为灌浆法、高压喷射注浆法和搅拌法三类。它利用水泥浆液、粘土浆液或其它化学浆液，通过灌注压入、高压喷射或机械搅拌，使浆液和土颗粒胶结起来，以改善土体的物理和力学性能，目前国内该项技术比较成熟一般施工质量好的灌浆帷幕的防渗性能一般在 $1.0 \times 10^{-6} - 10^{-7} \text{cm/s}$ 。柔性垂直防渗系统采用的高密度聚乙烯土工膜，可以深入不透水层 1.5m~2.0m 左右，与传统的刚性垂直防渗技术相比，柔性垂直防渗系统的防渗系数可以达到 $1.0 \times 10^{-12} \text{cm/s}$ ，能较彻底的把污染源与外界隔绝，并且具有结构简单、施工方便的优点。在柔性垂直阻隔技术应用方面，以紫金矿业集团同康沟堆浸场复产改造工程和云南驰宏锌锗集团会泽者海镇大渣堆修复工程作为典型代表，通过构筑柔性防渗墙防止重金属污染扩散，采用高密度聚乙烯膜，在短时间内降低污染土壤的酸性和重金属浓度。

地面阻隔技术主要针对挥发性气体或者矿山酸性水产生。在我国金属矿多为硫化矿，金属矿与硫化物广泛伴生，铁矿、铜矿、铅锌矿等金属矿山生产过程中产生的含硫废石在废石场露天堆存，经过风化淋滤和氧化作用下产生酸性水。含有重金属离子的酸性水废水直接流入自然水系后，会给下游生态环境造成了极大的危害。

依据酸性废水产生的机理，采取利用人工复合隔离材料覆盖排土场，以降低废石与水 and 氧气的接触，从而抑制酸性废水的产生，改善水质，并可以减少毒重金属元素的释出。以德兴铜矿水龙山酸性废石堆场为例，设计人工复合隔离材料厚度为 20-30cm，阻隔层采用高分子材料制成，具有防渗隔绝氧气性能。通过隔离技术的实施，有效的控制水的入渗，从源头上控制了污染的产生。在生态效应上，植物覆盖率达到了 100%，有效的控制了水土流失，恢复局部生态系统；在环境效益上，从源头上削减了 85%的酸性废水和 80%以上的重金属排放量。

5.1 气体覆盖阻隔工程案例--某化工厂原场址阻隔

5.1.1 工程概况

某化工厂历史上是我国重要的化工和农药厂，于 1958 年开始生产氯碱及其衍生产品、农药、聚氯乙烯、聚苯乙烯、环氧系列等有机化工产品以及化工、轻纺、印染等多个类别的助剂，直到 2007 年搬迁，其有机化工产品和农药生产历史达 50 年。在产品的生产过程中，由于产品、原料、辅料等污染物的跑、冒、滴、漏，使土壤已受到严重污染，并进一步污染

地下水。工厂于 2007 年 12 月底实施整厂停产搬迁。随着区域内的工业企业逐步搬迁及城区规划调整，化工厂所在地块功能调整为居住和商业用地。

5.1.2 地质及水文地质条件

场区地面下 20 m 深度范围内地层分布见表 1。

表 1 场区 20 m 深度范围内地层分布情况统计

层号	岩土名称	底板深 (m)	厚度 (m)	岩性特征
1	人工填土	0.4~2.5	0.4~2.5	杂色，稍密，主要由碎砖块、混凝土等建筑垃圾和松软的粘性土组成
2	粉粘土	5.6~6.4	4.0~5.8	灰黄色、褐黄色，含大量铁锰质结核，岩土成分：粉粒 63~69%，粘粒 31~37%
3	粉土	6.4~7.4	4.4~7.2	灰色、灰黄色，稍密、中密，饱和，含云母碎片，局部夹有薄层粉土，颗粒级配一般，岩土成分：粉粒 77%，粘粒 23%
	壤砂	10.5~13.0		
4	砂土	17.9~18.6	5.6~7.4	深灰色、灰黄色，密实，饱和，主要成分为长石、石英颗粒及云母碎片，局部含有胶结状砂结石，颗粒级配良好，粘粒含量低
5	粉粘土	>20	>2.1	深灰色、灰绿色、黄灰色

场区地面下 20 m 深度范围内主要分布 2 层含水层，自上而下依次为潜水含水层和承压水含水层。

潜水含水层：岩性为上更新统粉质粘土、棕黄色亚粘土夹薄层粉土、粉细砂、亚砂土，亚粘土底部为亚砂土及粉砂，逐渐过渡至承压水含水层，两者之间无明显隔水层；潜水水位埋深一般 0.5~2 m，厚 6m 左右，水平方向上水位差异较大。该含水层单井涌水量为 2~5 m³/d，渗透系数小于 1 m/d；矿化度 0.5~1.20g/L。

承压水含水层：由 2 个单层组成。上段顶板埋深 7 m 左右，厚 10 m 左右，岩性为灰黄色亚砂土、粉砂、细砂，与上覆潜水含水层无明显的隔水层。该含水层水位埋深 5~7 m，单井涌水量 200~400 m³/d，渗透系数为 4.2 m/d，平均导水系数 39.5 m²/d，平均储水系数为 1.19×10⁻³；矿化度 0.18~0.40 g/L。下段局部缺失，顶板埋深 30 m 左右，水位埋深 32.8 m，

厚 0~8 m；岩性为灰黄色、灰黑色粉砂、细砂；单井涌水量<50 m³/d。

5.1.3 主要污染物

筛选出 4 种污染物：

- 1) 六六六：检出数 89 个，最高浓度 9690.8 mg/kg；
- 2) 苯：检出数 87 个，最高浓度 1730 mg/kg；
- 3) 氯苯：检出数 86 个，最高浓度 184 mg/kg；
- 4) 二氯丙烷：检出数 42 个，最高浓度 1230 mg/kg。

5.1.4 气体阻隔措施设计

土地再开发后，总建筑面积 50 多万 m²。该工程地下室防水等级为二级，采用了自粘沥青防水卷材作为主要的防水材料，由于该地块土壤污染较为严重，工程依照相关规定必须做气体防渗层。该工程采用了美国捷高公司生产的喷涂型产品和相关配套材料作为气体防渗层和辅助防水层。气体防渗层直接施工于原状土基层上，施工完毕后，在其上浇筑素混凝土垫层。

5.2 堆场污染阻隔覆盖工程案例-某铅锌冶炼渣地块

5.2.1 工程概况

该渣堆主要由铅锌冶炼废渣、生活垃圾、建筑垃圾堆弃而成，坡面松散程度较高，没有土层，植被恢复极度困难。该项目生态治理最大的难点在于：一是坡面呈现松散体的状况，后期施工稳定性较差；二是成份复杂，严重制约了植物的正常生长，制约生态工程的实施。拟通过削坡整形、整体封场、生态修复、景观再造的总体方案进行原址处置。

5.2.2 渣堆情况

渣堆主要由某冶炼厂建成投产以来火法冶炼产生的水淬渣、窑头渣、生活垃圾、建筑垃圾等堆积而成。经实地测量，并结合历年冶炼厂的生产能力情况，大渣堆平场面积为 9.5 公顷，堆存量近 300 万 m³，折合重量约为 400 万吨。

5.2.3 设计方案

实施大渣堆整体封场生态恢复工程，对渣堆地形地貌进行重塑，按边坡不陡于 1:2 的安

全稳定要求进行局部削坡，局部回填，渣堆削坡整形挖方量和填方量约 30 万方，填方为挖出来的渣料。削坡整形封场后，修建生态袋挡墙砌筑 6000m 和生态边沟 6000m，对堆场地表 110000m² 进行覆土绿化和景观再造，废渣堆产生渗滤液将逐年降低，废渣堆对周边环境的影响得到全面控制，剩余渣堆整体封存。

渣堆削坡整形按边坡不陡于 1:2 的安全稳定要求进行局部削坡，局部回填，考虑松散系数，挖填基本平衡，削坡整形坡比 1:2~1:3。土方平整挖方量约 30 万方，渣堆填方量约 30 万方，填方为挖出来的渣料。根据渣堆现场情况以挖填平衡，边坡稳定为原则进行场地平整。在渣堆北侧设置进口，并通过设一主干道到达 2195.0m 高程的大平台，主干道宽度 6.0m。考虑到现状渣堆南侧边坡先缓后陡，分别于 2145.0m 及 2150.0m 高程设置 20.0m 宽的大平台。渣堆边坡设置维护便道兼做小平台以作后期维护，便道宽度 4.0m。施工采用从渣堆顶部往下削坡挖填的方式施工，并按高程控制点逐层往下放坡施工。

根据堆场施工情况分析，本项目渣场边坡存在的地质灾害隐患主要是前期不规则堆放和再利用后遗留的豁口，不利于后期治理，针对这些灾害隐患，主要采取以下工程治理措施：

（1）边坡清理

为确保后期治理施工安全，需对边坡上的不稳定的废渣进行人工清除，彻底消除坡面安全隐患。根据渣场实际情况控制边坡能力，采用机械和人工的方式对堆渣进行削坡、压坡角等防滑坡措施。

1) 边坡清理

当边坡出现断层或裂隙带时，对滑体上部或中部进行削坡，减少边坡角，从而减少下滑力。

2) 减重压坡角

对边坡出现裂隙时，对滑体上部削坡，使下滑力减小。

（2）修建截排水沟

修建截排水沟，在渣堆坡顶上修建截水沟将坡面上外围的地表水截入水沟内而排离坡面。结合边坡坡向及马道布置修建排水沟，汇流截水沟来水保证雨水及时排出（图 5-2）。截排水沟采用生态边沟施工法进行施工，保证坡顶雨水的及时排出的同时形成绿色生态边沟。

（3）阻隔层设置和景观再造

在削坡整形和辅助工程完成后，对 110000 m²的堆场地表适量使用土壤修复剂固化后进行覆土，覆土厚度 0.5m（天然阻隔层），按照适地适树的原则，考虑乔、灌、草有机结合，选择适应性强、净化能力强的耐重金属树种、喷播植物、栽植树种的在覆土后的地表上进行播种，实施景观生态恢复。

5.2.4 施工工艺

（1）工艺流程

削坡减载→清理坡面→局部坡面修整→坡面加糙处理→铺设锚固土工格栅→植生基材喷射→初期养护→后期养护和维保。

（2）施工技术要求

1）坡面处理

人工清理坡面，确保坡面平整，为铺平双向土工格栅打好基础。施工前坡面的凹凸度平均为±10cm，最大不超过±30cm。

2）铺网、钉网

选用双向土工格栅，网孔 4 厘米×4 厘米；网宽幅宽 4m；铺网时将网片向坡顶延伸不少于 1m，开沟并用桩钉固定后回填或埋入截水沟中。坡顶固定后自上而下铺设。上下及左右采用平行搭接，两片之间搭接宽度不小于 10cm，并用铁丝扎牢，按照平均每 2 平方米固定主锚钉 1 支，平均每平方米次锚钉 1 支的密度固定网片。主锚钉选用 12 号螺纹钢，长度 20-30cm，次锚钉采用 6.5 圆钢，长度 10-20cm。锚钉制作成“7”型，对于回填渣坡选用木桩。木桩长 50-100cm，坡面存在的渗透水点，注意引排。

3）喷播基质和种子

张网锚固工序结束后，按照植生基材喷射施工工艺及技术要点，将制备好的植生基材、植物种子喷到裸露坡面上，设计喷射厚度 12cm，分两次喷射施工的，底层 8-10cm，种子层 2-3cm，总厚度不低于 12cm。施工时须严格核准材料混合比例及用水量。严格按照植生基材配备、种子配比植被植生基材，并充分搅拌均匀。植生基材喷射施工要喷射紧实，保证厚度。

5.2.5 修复效果

修复效果：项目实施后满足修复要求并通过环保局的修复验收，对堆场地表 110000m²

进行覆土绿化和景观再造，废渣堆产生渗滤液将逐年降低，废渣堆对周边环境的影响得到全面控制，剩余渣堆整体封存。保护了周边居民环境安全。

5.3 垂直阻隔技术

5.3.1 土-膨润土隔离墙工程案例—江苏靖江某填埋场

5.3.1.1 工程概况

某城市固废卫生填埋场所位于江苏省靖江市，总占地面积 13.3 万 m^2 ，填埋库区占地面积 10.9 万 m^2 ，库容 158 万 m^3 ，平均填埋规模 500t/d，使用年限 8 年。该场为平原型填埋场，在原地面筑堤，并在围堤内开挖形成库区。场区原地势高约 3.0m，围堤设计标高 7.0m，库底最深处标高-3.0m，围堤内侧最大相对高差 10.0m，围堤内侧坡比 1:3。根据地资料，场区地下水位埋深较浅，为保障库区安全开挖，保护场底水平防渗系统，控制和减少潜在污染，设计院在库区和调节池周边围堤上，设计了塑性混凝土墙垂直防渗系统。

浙江大学（受科技部 863 课题资助）在该填埋场未施工的二期工程地块上设计并建造我国首个土-膨润土隔离墙试验段，总结了土-膨润土隔离墙的施工工艺，形成了现场留样室内测试与现场原位测试相结合的质量检测技术，并构建了墙体含水量、土压力、孔隙水压力等物理量的原位监测系统，揭示了土-膨润土隔离墙渗透和受力特性。

5.3.1.2 地块水文地质条件

该填埋场范围为农田，地形平坦，施工方便，现自然地面黄海高程一般在 2.75-3.35m 之间，地表相对高差为 0.60m，在地貌单元上属于长江三角洲冲（沉）积平原。厚度 35.0m 范围内土层地质年代均为第四纪全新世（Q4）。地块土层主要有表土、粉质粘土夹粉土、淤泥质粉质粘土夹粉土、粉砂夹粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粉砂夹粉土、粉砂和粉质粘土等组成。根据各土层土性特征，自上而下共划分为 8 层：①表土，松散不均，主要以粘性土为主，富含植物根茎，力学性质差；②粉质粘土夹粉土，粉质粘土，软塑~可塑，中等干强度，中等韧性，夹层粉土，湿~很湿，低干强度，低韧性。该层土属中压缩性土，力学性质一般；③淤泥质粉质粘土夹粉土，淤泥质粉质粘土主要呈流塑，中等干强度，中等韧性，夹层粉土低干强度，低韧性。该层土属高压缩性土，力学性质差；④粉砂夹粉质粘土，粉砂处于饱和态，颗粒级配不良，粉质粘土软塑为主，中等干强度，中等韧性。该层属中压缩性土，力学性质一般；⑤淤泥质粉质粘土，呈流塑态，中等干强度，中等韧性，属高压缩性土，力学性质差；⑥粉砂夹粉土，粉砂为饱和态，中密为主，夹层粉土低干强度，低韧性。该层土属中

压缩性土，力学性质一般；⑦粉砂，中密~密实，饱和，级配良好，属中压缩性土，力学性质中等；⑧粉质粘土，软塑~可塑，高干强度，高韧性，属中压缩性土，力学性质一般。

地块内地下水按其埋藏条件划分为孔隙潜水，主要赋存于①~⑦层土中。地下水补给主要为大气降水和地表径流，排泄方式主要为自然蒸发，地下水位呈季节性周期变化。勘测期间稳定水位为自然地面以下 0.60~1.00m（相当于黄海高程 2.06~2.54m）。根据地区经验及从地块采取的 4 组地下水水样和 2 组土样的结果表明：该地块的地下水对混凝土结构具有微腐蚀性，对钢筋混凝土结构中的钢筋均具有弱腐蚀性；土对混凝土结构及钢筋混凝土结构中的钢筋均具有微腐蚀性。

5.3.1.3 设计方案与施工情况

设计了两段尺寸（长×宽×深）分别为 15m×0.6m×10m 和 10m×0.6m×6m 的土-膨润土防污隔离墙试验段，墙体材料配比为 5%进口天然钠基膨润土，95%现场感开挖的浅层粉土，含水量 51%；沟槽开挖时的护壁泥浆的膨润掺量为 5%；埋设传感器和测斜管进行应力和变形的监测，并对防污屏障的防渗性能进行了第三方检测。

泥浆制备：（1）制备新鲜泥浆时需控制配合比，满足膨润土:水=1:19；主要控制指标：粘度(32~50s)、密度($1.1\pm0.05\text{g/cm}^3$)；使用前在泥浆池中静置 24h，使膨润土充分水化。

土-膨润土制备：采用混凝土搅拌设备，将现场土、膨润土干粉、膨润土泥浆按计算的配比进行搅拌，控制指标：坍落度 100~150mm。

浇筑导墙：单侧截面呈倒“L”形，顶部长度 50cm，深度 80cm；内置钢筋笼，两侧导墙间隔 70cm（防渗墙宽度 60cm），导墙浇筑完成后需等至初凝以后方可开槽。

沟槽开挖：采用 600mm 宽抓斗，单爪宽度 2.8m；成槽时先间隔成孔，再连起来；采用泥浆护壁，开槽时抓斗尽量减少泥浆损失；同时不断补充新的泥浆，保持液面高于地下水 0.5m 以上。

浇筑土-膨润土：填料坍落度试验，满足 100~150mm；采用导管浇筑土-膨润土，泥浆被置换出槽；浇筑至与导墙顶面齐平。

该工程完工后，进行了 8 个点的墙体材料原位渗透系数检测，检测结果 8 个点全部渗透系数小于 $1\times10^{-7}\text{cm/s}$ ，满足防污隔离墙渗透系数要求。



图 1 液压抓斗机械开槽



图 2 土-膨润土地面搅拌

5.3.2 膨润土隔离墙工程案例--英国某原堆煤场地块

5.3.2.1 工程概况

英国某原堆煤场地块，地块尺寸 50m×100m。该地块硫酸盐、氧化物、硫、多环芳烃、硫化物和砷浓度超过英国标准。该工程对龄期长达 10 年的试样进行了渗透系数和抗剪强度等工程特性测试。

5.3.2.2 地块类型

表面 3m 废氧化物、煤渣、碳黑和污垢石灰，下卧 Lower Lias 黏土，地下水位在地表下 1.5m 左右。

5.3.2.3 阻隔工程

水泥-膨润土隔离墙 120m 长，5m 深，0.6m 厚，墙体材料为 3.4%膨润土、2.5%水泥、10.1%矿渣及水，留样的 90 天龄期渗透系数小于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，10 年龄期现场取样的渗透系数为 $2.4 \times 10^{-9} \text{cm/s} \sim 5.6 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。



浅部开挖取样

现场留样

图 3 膨润土隔离墙体施工

5.3.4 高压旋喷阻隔墙工程案例--北京市某非正规垃圾填埋场异位治理

5.3.4.1 工程概况

某非正规垃圾填埋场所在区域位于永定河冲洪积扇中下部，填埋场周边第一层地下水赋存层位为中、细砂层，地下水类型为潜水。填埋区垃圾土与第一层含水层赋存层位直接接触，渗滤液与第一层地下水（潜水）具有密切的水力联系，存在垃圾渗滤液污染周边地下水的风险。因此，需对该垃圾填埋场采用开挖筛分治理方案，治理范围为“生活垃圾土填埋区（A区）”、“混合垃圾土填埋区（B区）”和“混合垃圾土浸泡区（C区）”，治理面积为 90815m²，治理体量为 577795m³。

根据勘察报告，垃圾土填埋区渗滤液、地表坑塘积水和地下水之间均存在水力联系，当该垃圾填埋场实施开挖筛分治理时，在垃圾填埋土清挖的过程中，需采取地下水控制措施，切断垃圾渗滤液与地下水的水力联系。因此，在垃圾填埋场的治理中采用隔水帷幕止水措施。

5.3.4.2 地块地质条件

地块地层分布条件与垃圾土填埋区周边地层分布条件

地块地层分布条件见表 2；垃圾土填埋区（A 区、B 区和 C 区）周边地层分布条件见表 3。

表 2 地块地层分布条件

成因年代	土层编号	地 层 描 述		
		岩性	颜色	断面状态及分布
人工堆积层	①	生活垃圾土	杂 ~ 灰黑色	湿 ~ 饱和, 有刺激性气味, 含有物以塑料、草木、织物等为主, 含少量砖瓦、灰土; 勘探孔揭露该层厚度在 1.20 ~ 5.00m 之间。
	① ₁	混合垃圾土	杂 ~ 灰黑色	湿 ~ 饱和, 主要含有物为砖瓦、灰土、塑料、草木、织物等; 勘探孔揭露该层厚度在 0.50 ~ 11.30m 之间。
	① ₂	建筑渣土	杂色	湿 ~ 饱和, 以砖块、碎石、灰土为主; 勘探孔揭露该层厚度在 0.60 ~ 9.80m 之间。
	① ₃	粉土填土	黄褐色	湿, 含砖渣、灰渣; 勘探孔揭露该层厚度在 0.50 ~ 7.30m 之间。
	① ₄	黏性土填土	黄褐色	湿, 含砖渣、灰渣; 勘探孔揭露该层厚度在 0.30 ~ 7.50m 之间。
	① ₅	砂土填土	褐黄 ~ 灰色	中密, 湿 ~ 饱和, 含砖渣、灰渣; 勘探孔揭露该层厚度在 0.50 ~ 2.50m 之间。
	① ₆	碎石土填土	杂色	稍湿 ~ 湿, $D_{大}=10\text{cm}$, $D_{一般}=6\sim 8\text{cm}$; 勘探孔揭露该层厚度在 0.50 ~ 2.00m 之间。
第四纪沉积层	②	粉土	褐黄色	中密, 湿, 含云母、氧化铁。
	② ₁	粉质黏土	褐黄 (暗) 色	中密, 湿, 含氧化铁。
	③	中、细砂	褐黄 ~ 灰黑色	中密, 湿 ~ 饱和, 含云母、有机质。
	③ ₁	粉质黏土	褐黄 ~ 灰色	中密, 湿, 含云母、氧化铁、有机质。
	③ ₂	粉土	褐黄 ~ 黄灰色	中密, 稍湿 ~ 湿, 含云母、氧化铁、有机质。
	③ ₃	黏土	褐黄色	中密, 湿, 含氧化铁。
	④	粉质黏土	褐黄 ~ 灰色	中密, 湿, 含云母、氧化铁、有机质。
	④ ₁	粉土	褐黄 ~ 灰色	中密, 湿, 含云母、氧化铁、有机质。
	④ ₂	黏土	褐黄色	中密, 湿, 含氧化铁。
	⑤	中、细砂	褐黄色	密实, 饱和, 含云母、氧化铁。
	⑤ ₁	卵石	杂色	密实, 饱和, $D_{长}=6\text{cm}$, $D_{大}=5\text{cm}$, $D_{一般}=2\sim 4\text{cm}$, 含中砂 30%, 亚圆形, 级配较好。
	⑤ ₂	粉质黏土	褐黄色	中密, 湿, 含云母、粗颗粒。

表 3 垃圾土填埋区周边地层分布条件

成因年代	地层	地层描述	
		岩性	分布条件
人工堆积层	第 1 大层	以填土为主	包括建筑渣土① ₂ 层、粉土填土① ₃ 层及黏性土填土① ₄ 层；该大层在垃圾土填埋区周边普遍分布，厚度为 0.60 ~ 4.50m。
第四纪沉积层	第 2 大层	以黏性土、粉土为主	包括粉土②层、粉质黏土② ₁ 层；该大层层顶标高为 21.05 ~ 25.82m，累计厚度在 0.50 ~ 3.00m 之间。
	第 3 大层	以砂土、粉质黏土、粉土、黏土为主	包括中、细砂③层、粉质黏土③ ₁ 层、粉土③ ₂ 层和黏土③ ₃ 层；该大层层顶标高 20.99 ~ 24.32m，累计厚度在 11.10 ~ 18.00m 之间。
	第 4 大层	以粉质黏土、粉土、黏土为主	包括粉质黏土④层、粉土④ ₁ 层和黏土④ ₂ 层；该大层起伏变化较大，层顶标高 3.69 ~ 11.52m，勘探孔揭露该大层累计厚度在 2.60 ~ 9.00m 之间，局部厚度大于 10.00m。
	第 5 大层	以砂土为主	包括中、细砂⑤层、卵石⑤ ₁ 层、粉质黏土⑤ ₂ 层；该大层层顶标高为-1.81 ~ 5.21m，勘查勘探孔未揭穿该层。

5.3.4.3 地下水分布条件

垃圾土填埋区周边地面下 40.00m 深度范围内主要分布二层地下水，地下水类型自上而下依次为潜水和承压水，各层地下水分布条件如下：

(1) 第 1 层地下水

第 1 层地下水主要赋存于埋深 14.00~23.00m（标高 3.69~11.52m）以内的中、细砂③层中，地下水类型为潜水。勘查期间该层地下水静止水位埋深为 5.53~7.81m，静止水位标高为 18.83~19.64m。该层地下水近 3 年最高地下水位标高为 22.00m。

(2) 第 2 层地下水

第 2 层地下水主要赋存于埋深 21.00~28.50m（标高-1.81~5.21m）以下的中、细砂⑤层和卵石⑤₁层中，地下水类型为承压水。勘查期间该层地下水静止水位埋深为 7.40~9.80m，静止水位标高 16.91~18.56m。

5.3.4.4 渗滤液分布条件

勘查过程中于生活垃圾土填埋区（A 区）和混合垃圾土填埋区（B 区）部分勘探孔中揭露渗滤液，渗滤液水位埋深在 4.00~7.00m 之间，水位标高在 19.32~22.62m 之间，渗滤液水头高度在 1.00~10.50m 之间。

填埋区垃圾土与场区第一层地下水的赋存层位—中、细砂③层直接接触，渗滤液与周

边第 1 层地下水（潜水）具有密切的水力联系。见图 4。

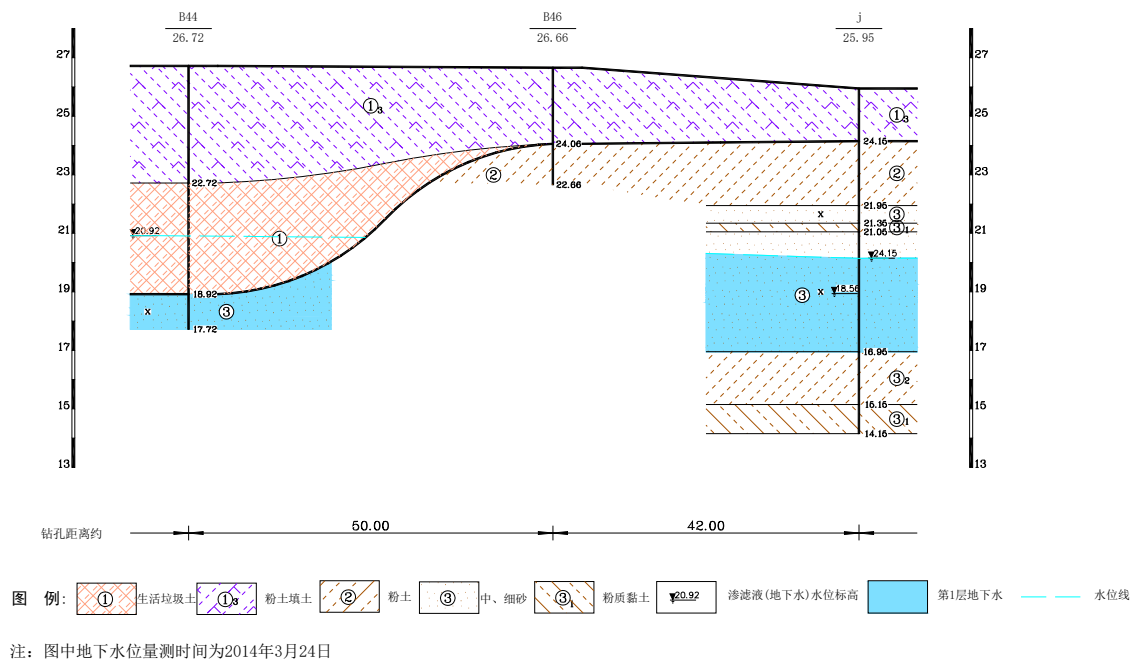


图 4 生活垃圾土填埋区填埋土与周边土层接触关系示意图

5.3.4.5 设计方案

根据垃圾土填埋区及其周边的地层分布特征，考虑到帷幕施工深度、工艺成熟度、处理效果等因素，结合既有的工程经验，本工程隔水帷幕拟采用高压旋喷桩方案。根据该垃圾填埋场的环境污染风险和其所处的地下水分布条件，从防止治理过程中渗滤液污染扩散，保护地下水环境角度出发，采取双排高压旋喷桩方案。

隔水帷幕的桩顶设计标高为 22.00m，桩顶标高至地面标高部分为空孔部分（不旋喷浆液），空孔深度为 4.40m 左右。按帷幕深度不同，设置 2 个区段。I-I区段，桩长 15.50m，桩径 800mm，桩间咬合 250mm，双排桩间咬合 250mm；II-II区段，桩长 18.00m，桩径 800mm，桩间咬合 350mm，双排桩间咬合 250mm；桩身进入填埋土之下的相对隔水层的粉质黏土、粉土、黏土为主的第 4 大层中，且不小于 1.50m。

高压旋喷桩设计参数及工程量统计表见表 4。

表 4 高压旋喷桩设计参数及工程量统计表

隔水帷幕 桩区段	设计 桩长 (m)	桩径 (mm)	桩间咬 合 (mm)	桩排 数	帷幕中 心线长 度 (m)	桩数 (根)	空孔工 程量 (m)	桩体工 程量 (m)
I-I区段	15.50	Φ800	250	2 排	951	3460	15224	53630
II-II区段	18.00	Φ800	350	2 排	304	1351	5944.40	24318
合计					1255	4811	21168.40	77948

5.3.4.6 高压旋喷桩施工说明

(1) 隔水帷幕桩施工前, 应进行成桩试验, 确定高压旋喷桩的施工工艺中各项技术参数, 包括浆液配比、旋喷参数、钻进和提升速度等, 保证成桩直径不小于设计桩径。

(2) 隔水帷幕桩施工时, 桩顶设计标高为 22.00m, 桩顶标高至地面标高部分为空孔部分(不旋喷浆液)。

(3) 隔水帷幕成桩范围内, 针对局部存在垃圾填埋土的区域, 可在施工前采取清理垃圾土换填处理措施。换填时, 开挖边坡放坡比率可按 1: 1.50 考虑, 换填区域的底部宽度按 5.00m 考虑, 则换填总体量约为 12537m³。

(4) 在混合垃圾土浸泡区 (C 区) 积水坑东北侧, 隔水帷幕桩需穿过现状积水坑。施工前, 应先进行回填处理, 再进行帷幕桩的施工。

(5) 垃圾填埋土清挖过程中要做好坡面保护, 避免出现坡面的局部滑移。

(6) 垃圾填埋土清挖施工中, 当清挖至标高 22.00m 时, 若隔水帷幕位于清挖范围内, 应水平清挖至隔水帷幕区域后, 才能进行下一步的清挖工作; 施工过程中, 应注意做好隔水帷幕的成品保护工作, 避免破坏桩体。

(7) 垃圾填埋土清挖过程中, 要做好坑内排水工作。

5.3.5 水泥土搅拌桩墙工程案例--江苏省泰州市生活垃圾卫生填埋场的

5.3.5.1 工程概况

泰州市生活垃圾卫生填埋场位于罡阳镇罡门东大河东侧, 三面环水, 最大填埋高度 22m, 垃圾日处理规模 600t。库区第一阶段库容 43 万 m³, 总造价 4020 万元。为了防止将来垃圾填埋场库区出现污水渗漏, 采取垂直防渗墙进行防渗处理。

5.3.5.2 地层分布条件

泰州市生活垃圾卫生填埋场所处地区的浅层土层地质条件如表 5 所示。

表 5 泰州市生活垃圾卫生填埋地块质条件

地层序号	土的名称	平均厚度/m	饱和度 Sr/%	孔隙比 e	含水量 w/%	干密度 pd/(g•cm ⁻³)	水平渗透系数 k _h /(10 ⁻⁷ cm•s ⁻¹)	垂直渗透系数 k _v /(10 ⁻⁷ cm•s ⁻¹)	工程地质评价
①	素填土	2.17	/	/	/	/	/	/	差
④-1	淤泥质粉质粘	0.60	52.5	1.103	37.9	1.30	/	/	低强度、高压缩性, 差

	土								
④-2	粉质粘土	2.03	85.5	0.831	31.6	1.43	38.9	29.4	中偏高压缩性, 较差
⑤-1	粉质粘土	1.38	90.3	0.725	27.2	1.55	22.3	23.7	中等压缩性, 中等
⑤-2	粉质粘土	0.90	97.0	0.744	26.5	1.57	65.3	82.1	中等压缩性, 中等

5.3.5.3 设计方案

一期工程防渗墙总体工作量约为 6000m², 库区防渗墙长度为 762.4m, 调节池防渗墙长度 275.1m, 墙厚 200mm。采取深层搅拌水泥土防渗墙进行防渗处理。由于①~⑤-2 层土的渗透系数较大, 为了防止填埋体的渗滤液透过土工膜渗入周围土体, 进而污染周围地下水, 故设计桩底进入⑤-1 层下 0.3~0.5m, 墙底标高在填埋场底层以下。

水泥土搅拌桩成墙移机示意图如图 5 所示, 第一次成墙先施工 I 桩, 随后移机施工 II 桩, 它们之间相互切割, 这样连续向前移动施工, 最后形成一道防渗墙, 其中 I 位置分别是移机前第一次成墙的三个桩的桩位, II 位置分别是移机后第二次成墙的三个桩的桩位。

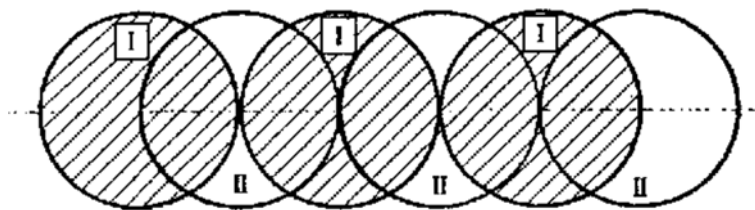


图 5 三钻头水泥土搅拌桩成墙移机示意图

5.3.5.4 施工质量控制与效果

(1) 施工技术要求

1) 桩机有深度计可以精确测量桩深, 有调平装置, 确保墙体竖直; 比重计保证浆液水灰比符合要求; 定期检查搅拌头直径确保墙体宽度, 桩机的主要技术参数如表 6 所示。

表 6 桩机的主要参数

桩径 mm	搅拌头 个	最大桩 深 m	桩轴间距 cm	单元成墙长 度 mm	主机功率 kW	注浆流量 L·min ⁻¹	注浆压 力 MPa
300	3	18	200	1332	90	3×50	1.2

2) 搅拌头有“裹土”现象时, 换用宽距翼片搅拌头并结合高转速施工, 从而使墙体搅拌均匀, 无水泥“结核”。

3) 水灰比可根据土层性质、土的孔隙率、含水量以及室内试验等来确定, 然后再根据现场施工情况修正, 本工程根据实际需要取水灰比为 1.0-2.0。

4) 严格按照轴线位置、设计深度、桩径、搭接长度及垂直度要求进行施工, 要求误差小于 $\pm 10\text{cm}$, 桩径偏差不大于 4%, 孔位偏差小于 5cm, 垂直度偏差小于 0.5%。

(2) 质量控制

1) 分别以每个单元和一定工作量为单位来计量和控制水泥掺入总量, 确保水泥掺入量。

2) 浆液到出浆口后, 持续喷浆 30s, 浆液完全达到桩端后, 方可提升搅拌, 同时桩顶停浆面在设计标高 0.5m 以上。以保证墙顶质量, 施工质量技术指标如表 7 所示。

表 7 施工质量技术标准

质量技术指标		施工参数及指标	
提升速度/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	(0.6-1.0)	固化剂	32.5 普硅水泥
渗透系数/ $\times 10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}$	1-3	水泥掺入比/水灰比	$\geq 13\%/1.0-2.0$
允许渗透比降	<100	搅拌次数/次	4
墙厚/mm	≥ 200	搅拌时间/min	≥ 3

3) 要经常检查下沉、提升速度和注浆量等指标, 并做好原始记录。施工中如遇到坚硬的石头等障碍物无法下沉时, 应立即停止施工, 然后进行空钻探明障碍物的范围, 并采用开挖或改变轴线绕过障碍物等措施排除障碍。

4) 接头处理: 停浆时应及时记录停浆深度和桩位, 如果在 24h 内恢复输浆, 再次喷浆时应将桩机搅拌下沉到浆面以下 0.5m; 如果超过 24h, 由于上根桩的水泥浆已经硬凝, 无法保证桩的搭接, 则应等水泥土墙具有一定强度后, 先在接头处用工程钻机钻孔, 然后再灌注 1: 4 的水泥砂浆来补强连接处理。

(3) 效果检验

桩的检测常用的方法有开挖检测和钻孔取芯室内试验。

1) 现场开挖观测检测法是在防渗墙两侧同时开挖, 使防渗墙暴露出一定的深度, 通过观察来检测墙体完整性, 它主要包括墙体连续性、完整性, 墙体的厚度、垂直度、墙体的外观、接缝等是否达到设计要求等。该工程现场开挖观测结果表明: 桩体的观感较好, 成桩密实, 桩体轮廓明显, 桩与桩搭接在一条线上, 相互咬合好, 墙体完整, 轮廓清晰, 墙面光滑, 整体形成一条壁状连续的防渗墙。

2) 钻芯取样法是在桩体的不同深度, 每隔加一 50m 钻孔取长柱状芯样, 然后制成一定形状的试样进行室内试验来测桩体静渗透系数等。取芯试验结果表明: 深度 0.00-0.50m 为混合土; 深度 0.50-4.50m 为水泥土, 灰黑色、硬塑、搅拌均匀, 有少量的结块; 深度 4.50-

12.50m 为粉质粘土，青灰色、可塑。桩体总体质量评价好。

室内渗透试验结果表明：渗透系数的变化范围为 $1.3 \times 10^{-7} \sim 6.3 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，取样深度与相应渗透系数试验结果如表 8 所示，满足了设计要求，达到较好的防渗效果，表中 S_{1-2} 、 S_{2-2} 、 S_{3-2} 分别表示填埋场南边从东到西的第一、二、三个试验桩； W_{1-2} 、 W_{2-2} 分别表示填埋场西边从北到南的第一、二个试验桩； E_{1-2} 、 ES_{1-2} ：分别表示填埋场东边和东南边的试验桩。

表 8 水泥土搅拌桩室内试验渗透系数

试样编号	S_{1-2}	S_{2-2}	S_{3-2}	W_{1-2}	W_{2-2}	E_{1-2}	ES_{1-2}
取样深度/m	1.5-1.7	2.5-4.0	4.0-4.2	2.5-2.7	2.0-2.2	3.0-3.2	2.5-2.7
渗透系数/ $10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	6.3	5.8	1.3	4.9	5.3	4.9	5.5

5.3.6 水泥--化学复合灌浆墙工程案例--山东省威海市艾山垃圾填埋场

5.3.6.1 工程概况

山东省威海市艾山垃圾填埋场位于威海市以西 17km 处。面积 32.4 万 m^2 。防渗工程的施工包括混凝土截污坝、防渗墙、帷幕和固结灌浆等分项工程，如图 6 所示。截污坝帷幕灌浆沿截水板、截渗墙及其两岸山肩的帷幕延伸轴线布设。帷幕轴线总长 430m，设计防渗帷幕渗透系数 K 小于 $5.52 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。

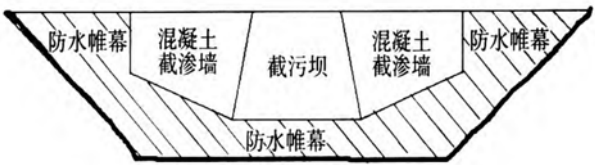


图 6 截污坝防渗帷幕示意图

5.3.6.2 地层分布条件

坝区出露地层为第四系残坡积物、坡洪积物和早元古界荆山群岩石，岩性主要为黑云母片岩、片麻岩和混合岩等。黑云母片岩和片麻岩风化程度高，裂隙发育，透水性强。在上部风化层黑云母片岩中，有溶蚀现象，岩石强度低，岩层厚度较大(约 30 m)，以下层位岩石较完整，裂隙不发育。局部岩石异常破碎，岩石渗透性强。底部为片麻状细粒二长花岗岩，透水性极弱，渗透系数 K 小于 $5.52 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。

5.3.6.3 灌浆方案设计

工程前期进行了典型区域的普通水泥灌浆现场试验，试验压水检测结果表明，由于该地质条件的防渗工程标准要求高，单纯采用普通水泥灌浆不能满足设计要求。结合工程特点和施工环境等因素，设计决定改用湿磨细水泥—化学复合灌浆技术。在使用水泥—化学复合灌

浆时，一方面通过使用颗粒细度很小的湿磨细水泥灌浆材料来充填较大的岩石裂隙，以达到封闭化学灌浆处理区域的目的，为后续化学灌浆提供较好的工程地质施工条件，同时也可以起到有效减少化学灌浆材料的消耗量等作用；另一方面，化学灌浆作为水泥灌浆的补充，能进一步填充岩土中宽度在 0.1 mm 以下的极微细裂隙，使灌浆施工处理地层的防渗系数最终达到工程设计标准。

工程原设计帷幕灌浆方案为：截污坝坝基采用双排普通水泥灌浆，排距 1.0 m，孔距 1.5 m；坝肩和山肩采用单排水泥灌浆，孔距 1.5 m。帷幕灌浆起始高程为 42m，帷幕深入微风化花岗岩层 2.5 m。后根据帷幕设计标准和场区地质情况，现场帷幕灌浆试验分两组进行，分别为：1) 按原设计仅进行双排普通水泥灌浆；2) 采用双排湿磨水泥灌浆中间加单排酸性水玻璃化学复合灌浆。其中，湿磨细水泥灌浆孔距 1.5 m，排距取孔距的 0.7 倍（即约 1 m）；化学灌浆孔距分别试验 3.0 m、1.5 m、0.75 m。

现场灌浆试验结果表明，采用双排水泥灌浆后，在强、中风化地层，帷幕渗透系数 K 仅达到 1×10^{-6} cm/s，不能满足设计要求；在弱风化岩层，帷幕渗透系数 K 部分达到 5.52×10^{-7} cm / s，也不能全部达到设计标准；在微风化花岗岩层，帷幕渗透系数 K 小于 5.52×10^{-7} cm / s。而进行化学复合灌浆以后，所有地层的灌浆帷幕渗透系数 K 均小于 5.52×10^{-7} cm / s，完全达到设计标准。根据现场灌浆试验，帷幕灌浆施工方案变更为：全部采用双排湿磨水泥灌浆加单排化学复合灌浆，共 3 排，排距 0.5 m，水泥灌浆孔距 1.5 m，化学灌浆孔距为 0.75 m。湿磨细水泥化学复合灌浆孔位布置如图 7 所示。

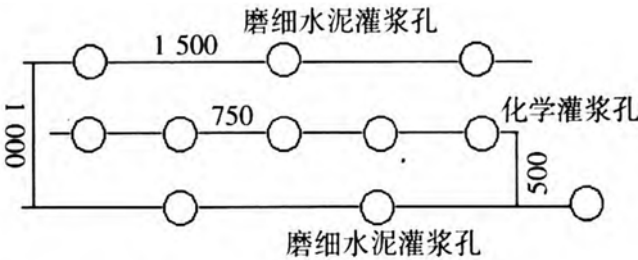


图 7 磨细水泥—化学复合灌浆孔位示意图

5.3.6.4 灌浆材料

(1) 湿磨细水泥灌浆材料

湿磨细水泥灌浆材料采用 42.5 普通硅酸盐水泥经超细水泥湿磨机研磨后制成，要求磨细后水泥颗粒细度最大粒径 D_{max} 小于 40 μ m，颗粒平均粒径 D_{50} 小于 10 μ m。湿磨细水泥材料的配制，是将普通水泥浆经高速搅拌机搅拌制得的 W: C=0.6: 1(质量比)水泥浆，再经

过由水泥湿磨机磨细制得，制浆工艺为：配料→高速搅拌机制浆→水泥湿磨机磨细→低速搅拌机配浆和储浆。图 8 所示为湿磨细水泥制备及灌浆工艺流程图。

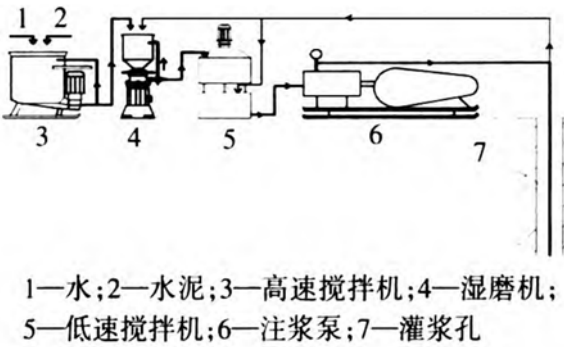


图 8 磨细水泥制备及灌浆工艺流程图

(2) 酸性水玻璃化学灌浆材料

针对威海垃圾填埋场的地质条件和垃圾渗滤液的化学侵蚀性，通过大量室内材料试验，最终选取 HS 酸性水玻璃作为该 T 程的主要化学灌浆材料。在制备 HS 水玻璃的过程中，关键是精细控制浆液的 pH 值始终保持在在一个较小的范围内，这样所制备的化学浆液性能具备足够的稳定性，可以在未加入胶凝剂之前存放较长时间也不会胶凝，同时能充分满足施工中大量制备化学灌浆材料的需要。

HS 酸性水玻璃浆液的胶凝时间可通过改变胶凝剂的用量进行调节。该浆液起始黏度一般为小于 3mPa.s，黏度仅在接近胶凝时间时才会显著增加，这使其具有良好的可灌性。浆液凝胶体渗透系数 $K=1\times10^{-8}\sim1\times10^{-7}\text{cm/s}$ ，不同配合比固砂体 7 d 抗压强度为 0.5~2.0 MPa。该材料具有无毒、可灌性好、防渗性能强、经济优势明显等特点。经过一系列浆液性能改性试验，提高了凝胶体的抗渗性能和抗压性能，同时改善了脱水收缩性以及抗垃圾渗滤液侵蚀性，使浆液性能易控制，并能够在工程现场进行大规模生产，满足工程中化学灌浆的要求。

5.3.6.5 湿磨细水泥化学复合灌浆工艺

(1) 湿磨细水泥灌浆

湿磨细水泥灌浆采用小孔径 $\Phi 75\text{ mm}$ 钻孔，自上而下分段阻塞，方式为孔内循环法。各序孔灌浆前洗孔、简易压水试验和灌浆结束标准均根据 DL/T 5148—2012《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》要求进行。结合湿磨细水泥灌浆 T 程经验，湿磨细水泥灌浆时浆液变换仅采用 3: 1、1: 1、0.6: 1 等 3 个水灰比级，减少了灌浆浆液比级，大幅提高了灌浆效率。设计开灌灌浆压力为 0.4 MPa，过程中最大灌浆压力为 1MPa。

(2) 化学灌浆

HS 酸性水玻璃化学灌浆采用纯压式、单液法，自上而下分段灌浆。在灌浆前进行压水试验，灌浆压力第 1 段为 0.25 MPa，最大不超过 1 MPa。

结束标准：在设计压力下，当基本不吸浆(吸浆量 $<0.03 \text{ Lu}$)或达到胶凝时间时结束。对大漏量孔段采用定量间歇灌浆，直至达到结束标准。

5.3.6.6 灌浆施工

截污坝坝基帷幕灌浆沿整个截水板布设，每 1 个坝段设为 1 个施工单元。坝肩混凝土防渗墙基础部位混凝土浇筑成长 8~15 m、宽 3 m 的阶梯形施工平台供帷幕灌浆使用，每 1 个平台为 1 个施工单元，共 32 个灌浆单元。帷幕灌浆工程总计完成钻孔 1368 个，总进尺为 37207.06 m，其中湿磨细水泥灌浆总进尺为 14267.63 m，累计注入水泥 942.18 t，平均单耗约 66.04 kg/m ；HS 酸性水玻璃化学灌浆的总进尺为 16119.30 m，累计注入 HS 水玻璃灌浆材料 646.39 m^3 ，平均单耗约 40.1 L/m 。湿磨细水泥与酸性水玻璃化学复合灌浆结束后，经常规压水检查，所有地层的渗透系数 K 完全达到设计标准(小于 $5.52 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$)。

5.3.7 可渗透反应墙工程案例--河南某六价铬污染地块和美国堪萨斯某四氯化碳污染地块

5.3.7.1 河南某六价铬污染地块可渗透性反应墙

在河南某六价铬污染地块的地下水含水层中，成功实施了一座尺度为长 15m、厚 2.8m、深 12m 的渗透反应墙。采用质量比为 3:1:4 的铸铁、活性炭、砂混合材料作为反应材料，采用钢板桩支护、大深度开挖、干法连续回填、同步安装监测井等施工技术完成了工程建设。



图 9 渗透反应墙钢板支护



图 10 渗透反应墙建成后效果

5.3.7.2 美国堪萨斯某四氯化碳污染地下水治理工程

地块地下水中四氯化碳的浓度最高达 2700ppb,污染羽的长度大约 760m。地块地层复杂,是砂、砂砾、粘土、淤泥的混合物。通过地勘确定了两个主要的饱和砂土单元,称为上、下饱和砂土单元。上饱和砂土单元厚约 0.9-1.2 m,下饱和砂土单元的厚度在 0-4 米。

修复目标: 地下水中四氯化碳的浓度<5ppb, 氯仿的浓度<100ppb,氯代甲烷的浓度<20ppb, 亚甲基氯化物的浓度<5ppb。

实施过程: 将 21818kgEHC 注射到地下,形成了 1 个长 83m、5m 宽、3m 厚的可渗透反应墙。

结果: 安装 16 个月后, 污染羽中污染物的浓度降低达到最高值 99%, 2 年后, 污染物的浓度降低稳定在 95%-98%。

成本: 渗透反应墙的材料成本约 10 万美元, 注射成本约 395 美元/平方米。

寿命: 渗透反应墙的寿命约为 8 年。

5.4 水平阻隔技术--某水源地对重金属污染土壤

(1) 工程背景: 某水源地对重金属污染土壤进行综合治理, 以异位土壤阻隔填埋方法治理土壤中重金属污染, 该区域原为企业用地后变更为水源地, 由于该工期较短为 5 个月, 修复标准严格, 清挖参照《展览会用地土壤环境质量标准》A 级标准, 阻隔填埋标准参照《地表水环境质量标准》IV 类水体标准值, 为此对高风险污染土壤经清挖处置后, 采取土壤阻隔填埋技术。

(2) 工程规模: 17 万 m³ 污染土壤。

(3) 主要污染物及污染程度: Cr (铬)、Pb (铅)、Cd (镉)、As (砷)、Cu (铜)、Zn (锌)、Hg (汞)、Ni (镍)。Cr 最高污染浓度 28500mg/kg; Pb 最高污染浓度 7514mg/kg; Cd 最高污染浓度 0.97mg/kg; AS 最高污染浓度 30.41mg/kg; Cu 最高污染浓度 3560 mg/kg; Zn 最高污染浓度 3926mg/kg; Hg 最高污染浓度 6.05mg/kg; Ni 最高污染浓度 106mg/kg。

(4) 土壤理化特性: 该项目污染土壤主要为粉粘和粘土, 渗透系数较低, 达到 10⁻⁷~10⁻⁸cm/s。

(5) 技术选择: 综合以上污染物特性、污染物浓度、土壤特征、以及项目开发建设需求, 最终选定技术成熟、成本较低、运行管理简单的污染土壤阻隔填埋技术。

(6) 工艺流程和关键设备：

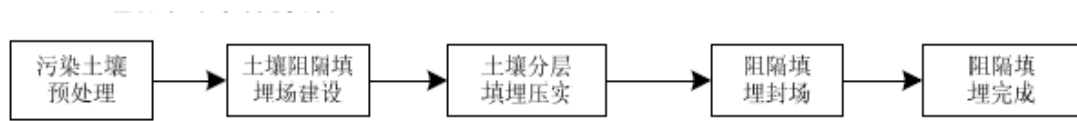


图 11 工艺流程图

具体为：1) 污染土壤清挖预处理包括土壤破碎筛分、固化稳定化；2) 土壤阻隔填埋场建设；3) 土壤分层填埋压实；4) 土壤填埋完毕封场。关键设备：本处置过程用到的关键处置设备为土壤改良机、土壤压实机、挖掘机等。

(7) 主要工艺及设备参数：

考虑到本项目重金属污染较为严重，采取固化/稳定化处置后，再进入填埋场阻隔填埋。污染土壤固化稳定化采用土壤改良机，该设备由进料设备、加药设备和搅拌出料设备构成，履带移动式，可方便到达任何修复现场，最大处理能力 50~80 立方米/小时。填埋场阻隔防渗主要选用 1.5mm HDPE 膜和 600g/m² 土工布，采用热熔挤压式手持焊接机、温控自行式热合机、土工布缝纫机等设备进行焊接。

(8) 成本分析：该项目包含建设施工投资、设备投资、运行管理费用等的处理成本约 500 元/m³。

(9) 修复效果：项目实施后满足修复要求并通过环保局的修复验收，保护了水源地水质安全。

6 主要技术内容及说明

6.1 适用范围

本指南适用于矿山、工业类污染地块、固废填埋地块。使用对象包括需从事污染地块阻隔工程实施技术人员、从事污染地块监督管理的行政主管部门工作人员、第三方监理以及其他相关人员等。

本指南不适用于农田、放射性污染地块。

6.2 规范性引用文件

本标准引用了国家、地方及行业标准、规程。对污染地块阻隔技术进行分类、描述等内

容均引用国家标准；对物探、静力触探及监测井建设等内容引用相关行业标准。

6.3 术语和定义

本标准定义了阻隔技术、覆盖阻隔技术、垂直阻隔技术、水平隔离技术等 4 个术语。

6.4 总体要求

第 4 章规定了阻隔技术实施的总体要求，对阻隔工程的实施程序、施工工作要求、验收做出了规定。

6.5 污染地块阻隔工程设计

第 5 章规定了阻隔技术的类型以及适用情形。包括典型阻隔技术的适用介质、地块类型、目标和技术特征。并从污染地块调查、初步设计、施工图设计明确了不同阶段不同类型阻隔工程设计要求。

过度密集的植被覆盖会给现场勘察带来阻碍，导致勘察人员难以进入地块，或掩盖重要地表特征如岩石露头和洞穴侵蚀等，还会增加工程施工测量定位难度。因此，当地块中植被密度过大时应在工程施工前额外储备用地。

地块中污染物可能对阻隔材料的物理或化学性质产生影响，如导致土质材料絮凝、降低膨胀性能或产生结构性破坏等，进而降低阻隔工程的防污性能并导致阻隔工程提前失效。因此，阻隔工程实施前应针对地块中的主要污染物，评估阻隔工程的抗侵蚀性和耐久性。

为明确地块中污染羽和污染物迁移情况，需详细描述地下水系特征，为阻隔工程优化设计提供基础信息。此外，评估阻隔工程建设过程中是否要采取降水措施也需要收集详细的水文信息和地下水系特征，并应考虑降水对周边土体和构筑物的影响。

阻隔工程设计施工所需的工程地质信息主要包括地块岩土类型、地层深度、结构断层位置和各地层风化程度等。地块岩土类型和风化带特征通常决定了施工机械类型；结构断层等异常地下条件会影响阻隔工程的连续性，在设计施工前应确定其范围及处理对策。

污染地块治理通常刻不容缓，需要阻隔工程有较短的建设工期，但通常在污染环境建造阻隔工程所需时间远长于无污染地块，这就要求设计时选择适宜阻隔技术类型并在施工中采取有效措施，保证质量的同时缩短工期。

设计施工所需的特定地块数据通常不能简单从公开资料中获得，确定现地块层特征应采

用一些现场勘探技术，包括试钻、坑探、取岩芯、地球物理勘探和试验室分析等。

受水利和土木工程影响，我国大部分已建阻隔工程为塑性混凝土墙和水泥搅拌桩。大量工程实践发现两者渗透性难以达到隔离墙设计要求（渗透系数不大于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ）。欧美发达国家地下污染防治技术发展早于我国三十年以上，其中美国主要采用土-膨润土阻隔，英国和欧洲大陆主要采用水泥-膨润土阻隔。因此，我国污染地块阻隔工程应当充分吸收国外经验，同时关注阻隔新技术（如复合阻隔）的发展。

阻隔屏障厚度、渗透系数和阻滞因子是影响击穿时间的关键内在因素；水动力弥散系数仅在渗透系数较大时才对击穿时间有较大影响；水头差高度对击穿时间影响显著。可通过降低阻隔材料渗透系数、增大阻隔材料阻滞因子、采取渗流调控措施控制水头差等措施提高阻隔工程服役寿命。建成阻隔工程的连续性和垂直度极大影响后期服役性能。设计施工时必须采取措施保证各施工段之间的连接段不成为薄弱点。污染地块阻隔工程的垂直度会影响阻隔连续性，如某一段阻隔屏障垂直而相邻另一段往外倾斜，两段之间会出现漏洞。因此，设计施工过程中需应保证垂直阻隔屏障的垂直度。

现有的阻隔工程设计主要关注阻隔材料的渗透系数及施工完成后阻隔的防渗性。但是，阻隔工程的主要目的是防控污染向外扩散，因此应根据防控时间要求通过污染物扩散分析确定阻隔的结构及相关参数，并结合质量检测和服役期监测评估阻隔工程的质量和效果，总结工程经验和教训，提升我们污染地块阻隔工程设计和施工水平。

6.6 污染地块垂直阻隔工程施工及质量控制

第 6 章规定了 7 种垂直阻隔技术的工程施工和质量控制规定。分别从施工准备、施工作业、工程验收阶段的施工要点和质量控制主要参数。

施工准备阶段明确了准备阶段的主要工作内容，包括施工材料、施工机械设备、施工设施、工程质量检验设备的种类和名称。

施工阶段通过施工工艺流程图将各分项施工内容进行划分说明，并重点对施工参数、工艺试验和材料参数进行了说明。

工程质量检验规定了施工过程中对材料和各道工序的质量进行控制和检查，注重说明从工程实施过程中的监管与检测。工程验收规定了工程整体验收需要的资料、记录和检验方法。

土-膨润土隔离墙的沟槽开挖一般采用液压抓斗工法，开槽机械通常需应配备垂直度仪

和自动纠偏装置以保证随挖随测随纠。为使槽孔垂直，关键是要使抓斗吃土阻力均衡，即抓斗两边斗齿都落在实土中或都落在空洞中。由于地基土中土颗粒进入泥浆并悬浮，槽内泥浆的密度和含砂率会增大，进而影响回填过程的泥浆置换率，因此，护壁泥浆要保持一定循环率以保证槽内泥浆的质量。

水泥-膨润土泥浆是一种能够自行硬化形成强度的泥浆，主要原材料为水泥、膨润土和水。实际工程中，还可根据具体情况掺入一些如粉煤灰、石粉、减水剂等添加料来调整泥浆的工作性能、硬化后固结体的力学性能和渗透特性指标。水泥-膨润土泥浆需在制备后的 2h~3h 内使用，否则将开始凝固，可在制备时添加缓凝剂以延长其凝固时间。膨润土类型、水泥和膨润土配合比和化学相容性等是影响水泥-膨润土隔离墙防污能力的因素。

水泥和膨润土对固结体渗透系数的影响相互依赖，只有在水泥用量达到一定程度后，增加膨润土用量才能有效地降低固结体的渗透性能，因此设计施工时应保证水泥用量，并选择合适水灰比，从而确保水泥-膨润土隔离墙有足够的防渗防污性能。水泥-膨润土隔离墙具有强度大、防渗效果好、施工快捷等特点。与土-膨润土隔离墙相比，水泥-膨润土隔离墙具有较高的抗剪强度，一般可达 140kPa~350kPa。当垂直阻隔屏障顶部需承受上覆荷载时，宜采用水泥-膨润土隔离墙。

HDPE 土工膜隔离墙（永久）施工是以高密度聚乙烯（HDPE）土工膜为主体阻隔材料，采用垂直开槽或震击方式将柔性 HDPE 土工膜垂直插入到相对不透水层，通过连接锁扣与内置止水条实现多幅 HDPE 土工膜的互锁连接，同时利用灌浆密封材料对土工膜底端进行止水固结形成立体式柔性垂直阻隔墙，达到阻隔污染物水平迁移的目的。震击施工法适用于松软地层，深度一般不超过 10m；开槽施工法适用地层较广，深度一般不超过 30m。该技术具有渗透系数低 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 、耐腐蚀性强、化学稳定性和连续性好、适应变形能力强、使用寿命长等优点。

水泥帷幕灌（注）浆墙是用浆液灌入岩体或土层的裂隙、孔隙，形成阻水帷幕墙，以达到止水防渗的目的。水泥帷幕灌（注）浆墙适用于各类岩体、以及基岩之上的覆盖层包括砂卵石层、砂土层、碎石土层的帷幕灌（注）浆施工流程包括定位，钻孔，冲洗孔，压水试验，制浆，下喷射管，提升，封孔。

高压喷射灌浆墙是一种采用高压水或高压浆液形成高速喷射流束，冲击、切割、破碎地层土体，并以水泥基质浆液充填、掺混其中，形成桩柱或板墙状的凝结体，以达到止水防渗

的目的。高压喷射灌浆墙适用于淤泥质土、粉质黏土、粉土、砂土、砾石、卵（碎）石等第四系松散土层。

水泥搅拌桩墙是利用搅拌机械在土体中，边钻进边往土中喷射水泥浆液同时借助于搅拌轴旋转搅拌，使喷入土体中的水泥浆液与土体充分拌合在一起，形成抗压强度比天然土高并具有整体性、水稳性的桩柱体，以达到止水防渗的目的。

渗透反应墙（PRB）一般采用低渗透性材料作为墙体，墙内填充可与污染物发生反应的材料，垂直安装于地下水水流方向。当地下水缓慢通过墙体时，污染物通过与填料发生反应而被固定到反应墙中的填料上，从而达到去除地下水中污染物的目的。该技术可有效地去除多种污染物，包括水中溶解的重金属和放射性物质、有机物、无机阴离子等。

6.7 覆盖阻隔和水平阻隔工程施工及质量控制

第 7 章规定了覆盖阻隔技术和水平阻隔技术从施工准备阶段到工程验收阶段施工要点和质量控制主要参数。

6.8 阻隔工程验收及维护管理

第 8 章规定了阻隔工程验收程序，验收办法和维护管理注意事项，包括监测评估因子与方法，监测周期频率，后期维护时限和内容。

7 标准实施建议

由中国环境保护产业协会组织，编制单位向各相关单位和相关部门开展规范宣传活动，并与中国环境保护产业协会密切配合，做好相关条款的执行与实施的准备；制定保证本标准实施的配套政策文件；组织关于本标准的宣传贯彻培训，以帮助相关单位及技术人员正确理解和应用本标准；可选择某污染地块进行试点阻隔技术示范工作，组织相关技术人员进行实地学习，深化对标准条文的理解。