



中国环境保护产业协会标准

T/CAEPI □□—2018

污染地块阻隔工程技术指南

Technical guidance for contaminated site barrier engineering technology

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2018-□□-□□发布

2018-□□-□□实施

中国环境保护产业协会

发 布

目 录

前 言 i

1 适用范围..... 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 总体要求..... 3

5 污染地块阻隔工程设计 4

6 垂直阻隔工程施工及质量控制 19

7 覆盖阻隔和水平阻隔工程施工及质量控制..... 47

8 阻隔工程验收及维护管理..... 52

前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》，规范污染地块阻隔工程设计、施工和验收，制定本文件。

本文件规定了污染地块阻隔工程设计、施工、验收、评估与维护的技术要求。

本文件为首次发布。

本文件由中国环境保护产业协会组织制订。

本文件起草单位：北京矿冶科技集团有限公司、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、北京市勘察设计院有限公司。

本标准主要起草人：周连碧、魏丽、詹良通、韩华、曹云者、王琼、尚光旭、李育超、张华、吴亮亮、李淑彩、柯瀚、潘倩、陈素云、高文谦、孙伟、李昊、刘力奇、吕正勇、郑中华、郑峰、苗竹、霍成立、孙晓东、朱湖地、李来顺、郭智、贺真、谢云峰、杨宾、谷庆宝、李厚恩。

本文件由中国环境保护产业协会 2018 年□□月□□日批准。

本文件自 2018 年□□月□□日起实施。

本文件由中国环境保护产业协会负责管理和解释。在应用过程中如有需要修改与补充的建议，请将相关资料寄送至中国环境保护产业协会标准管理部门（北京市西城区扣钟北里甲 4 楼，邮编 100037）。

污染地块阻隔工程技术指南

1 适用范围

本文件规定了污染地块阻隔工程设计、施工、验收、评估与维护的技术要求。

本文件适用于污染地块污染物的阻隔工程，包括矿山、工业类污染地块、固体废物填埋地块等针对污染物的阻隔工程。

本文件不适用于农田和放射性污染地块。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 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
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
HJ/T 25.1	场地环境调查技术导则
SL/T 231	聚乙烯（PE）土工膜防渗工程技术规范

《建设工程质量管理条例》（中华人民共和国国务院令第 279 号，中华人民共和国国务院令第 687 号修订）

《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》（国环规环评[2017]4 号）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 阻隔技术（阻隔）barrier technology

通过敷设阻隔层控制土壤中污染物迁移扩散的途径，将污染物与周围环境隔离，从而避免污染物与人体接触和随降水或地下水迁移对人体和周围环境造成危害，降低并消除地块污染物对人体健

康和环境风险的技术。

3.2 垂直阻隔技术 vertical barrier technology

阻隔层采用竖向布置形式，阻断污染物向周边环境迁移扩散的阻隔技术。

3.3 覆盖阻隔技术 cover barrier technology

在污染区域顶部覆盖隔离层，将污染区域四周及顶部与周围隔离的阻隔技术。

3.4 水平阻隔技术 horizontal barrier technology

阻隔层布设于地下采用水平敷设布置形式，阻断污染物向周边环境迁移扩散的阻隔技术。

4 总体要求

4.1 阻隔工程应遵循安全稳定、科学设计、防治污染、保护生态的原则，应根据设计目标确定阻隔工程的安全性、永久性指标。

4.2 阻隔工程设计深度应符合相关规定的要求，设计说明应包括以下内容：

- a) 提供地块现状及未来土地利用规划的基本信息；
- b) 明确设计、施工、监测和维护的一般标准；
- c) 提供足够的细节以确保阻隔措施达到既定的性能标准；
- d) 对阻隔措施的所有组成部分进行详细说明，包括每个部件的设计、施工、运行和维护说明等。

4.3 阻隔系统的类型选取应基于既定的风险管控目标和需要切断的暴露途径，确定选用垂直阻隔系统、水平阻隔系统、地面覆盖系统等。

4.4 阻隔工程施工前应根据设计文件或招标文件编制施工方案和准备施工设备及设施，并根据工程设计图纸、技术文件、设备图纸等组织施工。工程建设单位应专门成立项目管理机构，参与设计会审、设备监制、施工质量检查，组织、参与工程各阶段验收、调试和试运行，建立设备安装及运行档案，工程使用的设备和材料应符合我国现行国家或行业工程施工及验收标准要求。工程施工和设备安装应符合相应的国家或行业规范，施工质量应符合《建设工程质量管理条例》的有关规定。

4.5 阻隔工程实施过程应充分考虑二次污染控制。应充分考虑气态污染物种类及产生量水平，并制

定相应防治措施，废气排放应符合国家标准要求。阻隔工程实施过程中应根据地块产生的渗滤液和地表初期雨水等情况，配置相应的水处理设施，水污染物排放应达到 GB 8978 及相关标准的要求。阻隔工程施工过程产生的残渣、泥浆和回填料应妥善处理；墙体清挖产生的地块废渣，应根据固废类别，按相应标准处理处置。

4.6 阻隔工程验收内容主要包括阻隔工程的实施情况、隔离效果等。还应根据阻隔工程的长期效果，评估后期管理计划合理性及落实情况。后期管理计划落实情况评估包括设备及工程的运行与维护、长期监测、长期存档与报告等制度、定期和不定期的回顾性检查等活动。

4.7 阻隔工程的设计、施工、验收、运行除符合本标准规定外，还应遵守国家现行的有关法律、法规、标准和行业规范的规定，符合有关工程质量、安全、消防等方面的强制性标准规定。

5 污染地块阻隔工程设计

5.1 阻隔技术适用性

5.1.1 阻隔技术类型

污染地块阻隔工程技术类型包括覆盖阻隔技术、垂直阻隔技术、水平阻隔技术等。其中，覆盖阻隔技术包括挥发性有毒有害气体阻隔和堆场（水）污染阻隔覆盖技术两种；垂直阻隔技术包括土-膨润土隔离墙、水泥-膨润土隔离墙、HDPE 土工膜隔离墙、水泥帷幕灌（注）浆墙、高压喷射灌浆墙、水泥搅拌桩墙、渗透反应墙等七种；水平阻隔技术包括混凝土水平阻隔、黏土水平阻隔、柔性水平阻隔技术等三种。

5.1.2 阻隔技术适用性

典型阻隔技术的适用性见表 1。

表 1 污染地块阻隔工程技术适用性

技术类别	技术种类	适用介质类型	适用地块类型	适用目标	技术特征
覆盖阻隔技术	挥发性有毒有害气体阻隔技术	各类岩体、砂卵砾石层、砂土层、碎石土层	挥发性有机物污染地块	污染地块临时性阻隔、应急阻隔	优点：适用于挥发性有机物污染地块。 缺点：不宜用于渗透性差或者地下水水位变动较大的场地。
	堆场（水）污染阻隔覆盖技术	各类岩体、砂卵砾石层、砂土层、碎石土层	垃圾填埋地块、重金属污染地块等	污染地块临时性阻隔、应急阻隔	优点：施工工艺成熟。 缺点：1）长期阻隔效果不能得到保证；2）采用天然黏土覆盖阻隔时造价高。
垂直阻隔技术	土-膨润土隔离墙	各类岩土地层，包括砂卵石层、碎石土层、砂土层、粉土层	垃圾填埋地块、重金属污染地块、有机污染地块等；场地地表坡度小于 1:10	污染地块长期阻隔	优点：防渗性能好，渗透系数可达 10^{-7}cm/s ；软塑性墙体材料与两侧岩土体无缝接触；工程造价低；施工简便，工艺成熟；施工深度可达 30m 以上。 缺点：1）墙体材料软弱，上部承载力小；2）地下水位线以上的墙体可能存在干缩裂缝，应采取防护措施。

技术类别	技术种类	适用介质类型	适用地块类型	适用目标	技术特征
	水泥-膨润土隔离墙	各类岩土地层、包括砂卵石层、碎石土层、砂土层、粉土层	垃圾填埋场、重金属污染地块、有机污染地块等	污染地块长期阻隔	优点：防渗性能好，渗透系数约为 10^{-6}cm/s ，通过回填材料改性，渗透系数可达 10^{-7}cm/s ；墙体材料强度高，压缩性低，可用于斜坡场地。 缺点：受地块限制，一般用于平地。
	HDPE 土工膜隔离墙	在所有地基类型中均可	垃圾填埋场、重金属污染地块、有机污染地块等	污染地块长期阻隔	优点：防渗性能好，无破损 HDPE 土工膜渗透系数可达 10^{-12}cm/s ，适用于各种地层。 缺点：1) HDPE 土工膜底端难以嵌固；2) 防渗效果会受土工膜缺陷影响；2) 地下水水位上升容易造成土工膜气胀，应做好排水排气。
	水泥帷幕灌（注）浆墙	裂隙岩体、透水性较好的砂卵石层、碎石土层等	垃圾填埋场、重金属污染地块、有机污染地块等	污染地块长期阻隔	优点：适用于复杂地层。 缺点：1) 钻孔作业难度大，造价高；2) 防渗效果受地质条件影响很大，应准确查明注浆范围内的地质条件，如断层、破碎带、洞穴等。

技术类别	技术种类	适用介质类型	适用地块类型	适用目标	技术特征
	高压喷射 灌浆墙 (临时)	素填土、粉 土、黏土等地 层	垃圾填埋场 地、重金属污 染地块、非挥 发性有机污染 地块等	污染地块 临时性阻 隔、应急 阻隔	优点：钻探作业难度低、效率高。 缺点：1) 遇到砂层、卵砾石层、含块石人工填海地层、混凝土旧基础、基岩等复杂地层时无法钻进或产生桩位偏移；2) 当钻深较大时，成孔垂直度偏差较大；3) 施工期间孔口处返出大量废浆，废浆中含大量水泥，其外运消纳难度大；4) 长期防渗效果不能得到保证。
	水泥搅拌 桩墙（临 时）	除碎石土地层 之外的各种土 层条件	垃圾填埋场 地、重金属污 染地块、非挥 发性有机污染 地块等	污染地块 临时性阻 隔、应急 阻隔	优点：造价低廉，效率高，适用性强。 缺点：1) 不适合卵砾石层、基岩；2) 钻探深度浅，一般在30m以内；3) 长期防渗效果不能得到保证。

技术类别	技术种类	适用介质类型	适用地块类型	适用目标	技术特征
	渗透反应墙（长期）	各类岩体、砂卵砾石层、砂土层、碎石土层	垃圾填埋场、重金属污染地块、有机污染地块等	污染地块长期阻隔	优点：处理多种污染物（如重金属、有机物等）、扰动小、处理效果好、安装施工方便、性价比相对较高。 缺点：反应墙介质容量有限，应定期更换活性物质，反应介质导致污染物沉淀，使地下水在反应墙及其附近流场发生变化，反应介质堵塞会导致反应墙失效。
水平阻隔技术	混凝土水平阻隔技术	各类岩体、砂卵砾石层、砂土层、碎石土层	重金属污染地块、非挥发性有机污染地块等	污染土壤、废水的临时性阻隔、贮存	优点：工艺成熟、适应性强。 缺点：对有腐蚀性的土壤和废水不适用。
	黏土水平阻隔技术	各类岩体、砂卵砾石层、砂土层、碎石土层	垃圾填埋场、重金属污染地块、非挥发性有机污染地块等	污染地块长期阻隔	优点：对地基基础要求较低，适应性强，适用寿命长。 缺点：对黏土的需求量较大，黏土资源比较缺乏。
	柔性水平阻隔技术	各类岩体、砂卵砾石层、砂土层、碎石土层	垃圾填埋场、重金属污染地块、非挥发性有机污染地块等	污染地块长期阻隔	优点：工艺成熟、适应性强。 缺点：土工合成材料存在老化问题。

5.2 阻隔工程设计流程

污染地块阻隔工程设计主要包括污染地块调查、可行性研究、初步设计和施工图设计等，流程示意如下图。

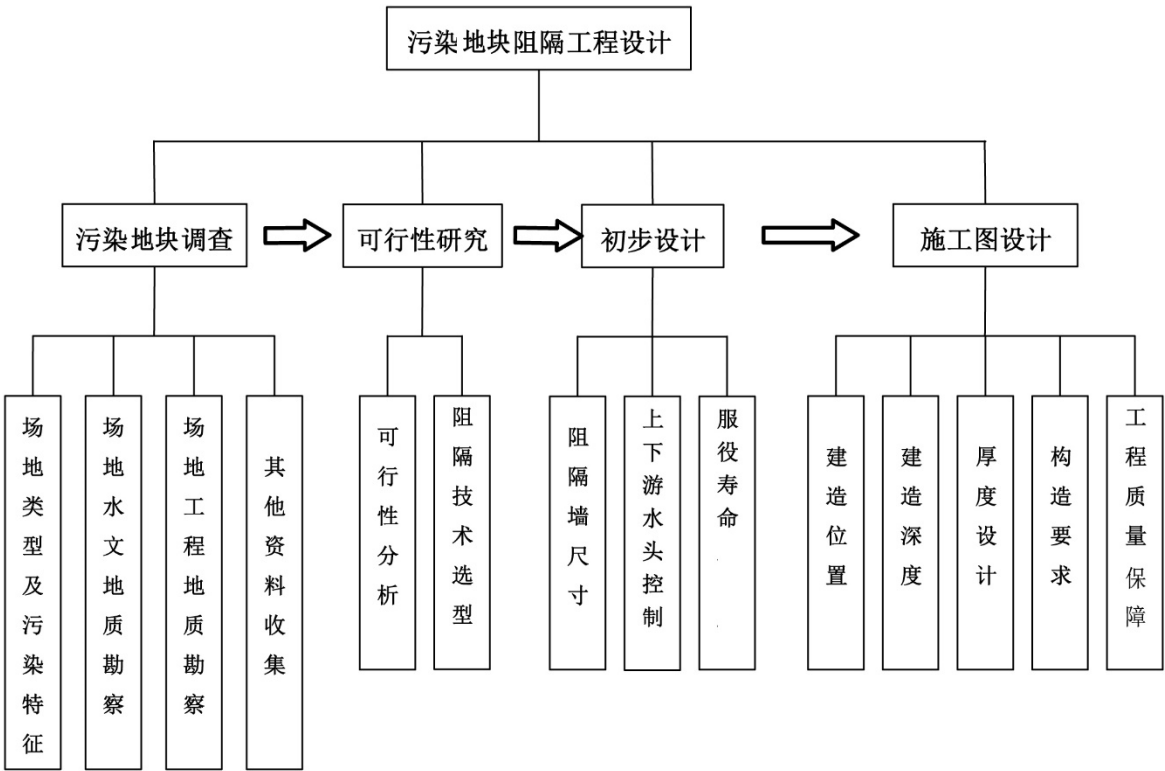


图 1 污染地块阻隔工程设计流程示意图

5.3 污染地块调查

5.3.1 一般要求

污染地块阻隔工程设计施工前应进行详尽的现场勘察，现场勘察的质量和完整程度会极大影响后期污染地块治理效果。污染地块调查参照 HJ 25.1 相关技术要求执行。

5.3.2 地块类型及污染特征

5.3.2.1 地形条件

现场勘察过程中应重点关注的地形条件包括是否存在坡度较大的边坡、地块现有水系格局、

地块与主水系的距离等，地块地形条件的初步信息宜通过地形图等方式获得。

5.3.2.2 植被密度

当地块中植被密度过大时应在工程施工前额外储备用地。

5.3.2.3 地表径流

通过地形图获得地块地表排水模式的初步信息后，应现场考察更详尽的信息，如是否存在侵蚀沟、排水沟中的水头高度和其他异常特征信息。

5.3.2.4 污染特征

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，开展化学相容性试验加以检验，相关化学相容性试验方法有黏度试验、压滤试验、渗透性试验和材料矿物成分检测等。

5.3.3 地块水文地质勘察

5.3.3.1 地下水与地表水调查内容

在地块中设计建设阻隔工程前应考察地下水系及其与地表水间的相互联系。收集详细的水文信息和地下水系特征，具体包括：

- a) 边界条件：水头分布、进水与排水区域、透水边界的类型与位置等；
- b) 地质特性：地层渗透系数、孔隙比、透光度、地质单元的厚度、位置和范围等；
- c) 水质条件：水质背景值、污染物种类与浓度、污染范围等。

其中，不透水层深度对阻隔工程建设深度影响较大，应特别重视。

5.3.3.2 获取途径

5.3.3.2.1 上述水文地质信息可初步由区域地质报告、地表水与地下水的水量和水质报告、地层水力特性报告等获得，更详细信息的采集应进行现场考察。现场水文数据收集宜通过采集已有水井中的水样进行分析，进行现场钻井、地质取样、抽水试验和水质采样分析等。

5.3.3.2.2 依据上述现场采集数据，可分析得到以下水文地质信息：等水压线和流网、带水位线的

地质剖面、与拟建阻隔工程的化学相容性等。

5.3.3.2.3 现场数据采集应详细深入，尽量弥补信息空白，以防止阻隔工程防污能力不足或因化学相容性差导致提前失效。

5.3.4 地块工程地质勘察

5.3.4.1 工程地质信息

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。

5.3.4.2 获取途径

5.3.4.2.1 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。

5.3.4.2.2 地形图和航拍可以提供部分土质信息，但更详细土质条件如土类、粒径级配、含水率、渗透性、水平和竖向分布、化学特性（如有机质含量等）等应通过现场勘探及室内试验得到。宜采取钻孔、坑探、地球物理勘探和取样试验室分析等方法。

5.3.4.2.3 工程地质勘察过程中有两点应特别关注：第一，地块情况复杂时应结合直接方法和间接方法，才能获得详细准确的地质特征资料；第二，获得的工程地质资料越完整，设计建设的阻隔工程越经济有效。

5.3.4.2.4 基于工程地质勘查结果，应对阻隔工程施工过程及竣工后安全性进行评估，例如竖向阻隔屏障沟槽开挖时的稳定性、周边固废堆体或不稳定地层对阻隔工程稳定性的影响。

5.3.5 其它资料收集

5.3.5.1 地下管线

当水、电、气、通讯等线路及下水道等公共设施横跨地块时，应确定并标出其具体位置，以降低现场勘察和施工过程对各管线的影响。如果阻隔工程的建设位置跨越了公共设施管线，应提前更改管线布置。同时，应注意现场水、电、通讯等设施的可用性。

5.3.5.2 用地红线

地块与建筑红线、主要居民区、交通线路等之间的距离是现场勘察过程中应考虑的重要因素。若地块与既有建筑物相近，应评估阻隔工程施工对既有建筑物稳定性影响的程度，并采取提前设置临时支撑等措施，在住宅附近建设阻隔工程时应额外进行噪音控制及在地块周围设置围栏。上述这些因素均应在地块勘察报告中体现。

5.3.5.3 现场施工条件

5.3.5.3.1 现场勘察过程中应确定地块中可用水源的总量和质量情况。

5.3.5.3.2 偏远地区可能需要配套建造道路桥梁、引水设施及其他公共设施，拥堵地区可能需要配套建造横跨公用设施之上的通道并设立公告牌。这些地区建设阻隔工程时，还应注意施工机械的机动性会受限制。

5.4 可行性研究

5.4.1 一般要求

应根据现场勘察结果进行阻隔工程的可行性和适用性分析，考虑因素主要包括与地块潜在污染物的化学相容性、地块中隔水层特性（如是否存在不透水层、不透水层的位置深度、渗透性、连续性和硬度）及拟建阻隔工程的结构及尺寸、造价、工期等。

5.4.2 垂直阻隔

5.4.2.1 化学相容性分析

污染物与阻隔材料的化学相容性应通过室内试验确定。

5.4.2.2 不透水层特性分析

理想的不透水层应厚度大、渗透性低、无裂隙、硬度较低，以便阻隔屏障嵌入不透水层一定深度。不透水层较薄、连续性差或破碎程度较大时，应配合采取其他污染地块治理措施。

5.4.2.3 阻隔工程技术选型

可行性研究中阻隔工程的建设位置、结构形式等的确定应充分考虑地块的水文地质、工程地质及污染情况，并根据阻隔材料的供应情况、阻隔屏障所需强度和耐久性、工程造价等因素确

定。

5.4.2.4 水力梯度和渗透性

阻隔的水力梯度可由阻隔屏障两侧水头差得到，当阻隔屏障的渗透系数和横截面面积已知时，可根据达西定律得到通过阻隔屏障的流量，见下式：

$$q = kia \quad (1)$$

式中：

q ——体积流量， m^3/s ；

k ——阻隔屏障渗透系数， m/s ；

i ——阻隔的水力梯度，无量纲；

a ——阻隔屏障横截面面积， m^2 。

5.4.2.5 结构选型

5.4.2.5.1 垂直阻隔技术按所用材料不同可分为土-膨润土隔离墙、水泥-膨润土隔离墙、HDPE 土工膜隔离墙、水泥帷幕灌（注）浆墙等。常用垂直阻隔技术的特点见表 1。

5.4.2.5.2 当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。当地基会发生明显侧向变形时，水泥-膨润土隔离墙易开裂，此时宜采用柔性的土-膨润土隔离墙。在特殊地质和环境要求高的地块，如污染地块的边界距居民居住区、人畜供水点、河流、湖泊较近，地下水含盐量高，污染物存在腐蚀性时，宜采用可靠性高、渗透性低的 HDPE 土工膜隔离墙，防止污染物扩散影响周边环境。

5.4.3 覆盖和水平阻隔

覆盖和水平阻隔技术选型宜参考 CJJ 113、GB18598、GB 18599、GB 16889、GB 50869、GB/T 50934 和 GB51220 相关技术规定要求。

5.5 初步设计

5.5.1 一般要求

阻隔工程的设计应对地块条件进行评估，综合考虑众多设计变量，选择最适合的隔离结构形式等。隔离结构形式有垂直阻隔、覆盖和水平阻隔等。

5.5.2 垂直阻隔

5.5.1.2 垂直阻隔尺寸

阻隔屏障厚度设计应考虑防污有效性、水力梯度和施工机械尺寸等因素。垂直阻隔屏障应嵌入渗透系数不大于 10^{-7}cm/s 的隔水层中，嵌入深度不小于 2m。当隔水层埋深过大而采用悬挂式阻隔时，应通过污染物渗流-扩散分析确定阻隔屏障临界嵌入深度，即污染物从阻隔屏障顶部位置竖向运移到达底部所需时间等于污染物水平扩散击穿浅部阻隔屏障时间时所对应的深度。

5.5.2.2 垂直阻隔上下游水头控制

污染地块阻隔工程应控制上下游水头差以减小地下水的渗流量、控制通过阻隔屏障的污染物浓度和量，确保将污染物有效控制在阻隔屏障之内。

5.5.2.3 垂直阻隔服役寿命

5.5.2.3.1 当污染物运移使阻隔屏障外侧达到国家土壤或地下水质量评价标准规定的浓度阈值时，即认为阻隔屏障被污染物击穿。阻隔工程的服役寿命即为污染物运移击穿阻隔屏障所需的时间，应大于地块特征污染物的稳定化时间。

5.5.2.3.2 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。

5.5.2.3.3 初步设计时，可采用屏障外侧污染物浓度达到污染源位置处浓度 10% 作为阻隔屏障的击穿标准，此时阻隔屏障的击穿时间可采用如下公式计算：

$$T = \frac{5.569 \times 10^{-7} \times R_d \times L^2}{k \times H \times D_h^{0.0175} + 80 \times D_h^{0.9895}} \quad (2)$$

式中：

T ——击穿时间，s；

R_d ——阻隔材料的阻滞因子，无量纲；

L ——阻隔厚度，m；

k ——阻隔屏障渗透系数，m/s；

H ——阻隔屏障两侧水头差，m；

D_h ——阻隔材料的扩散系数， m^2/s 。

5.5.3 覆盖和水平阻隔

覆盖和水平阻隔技术的初步设计宜参考 CJJ 113、GB18598、GB 18599、GB 16889、GB 50869、GB/T 50934 和 GB 51220 相关技术规范要求。

5.6 施工图设计

5.6.1 一般规定

阻隔工程的施工图设计，应根据工程目标、遵循合理流程。

5.6.2 垂直阻隔

5.6.2.1 建造位置

建造位置要根据地块污染源位置和水文地质情况等多方论证后确定，必要时结合污染物渗流-扩散分析确定。

5.6.2.2 建造深度

5.6.2.2.1 阻隔工程通常应穿透透水层、风化层、干燥裂隙和其它可能存在渗流的地层，并嵌入隔水层 0.5m~1m。若地块中隔水层的完整度不够，可在阻隔屏障底部一定范围内采用注浆密封等措施降低渗透性。

5.6.2.2.2 若地块中隔水层位置较深，在施工机械操作范围之外，以及地块中污染物主要为溶解度极小且密度小于水的轻质非水相液体（LNAPL）等有机污染物，或者地块中地下水渗流方向指向污染源时，设计宜选用悬挂式阻隔。阻隔屏障底部位置应位于最低季节性水位线以下。

5.6.2.3 厚度设计

垂直阻隔屏障的厚度一般为 0.6m~1.2m，可采用下式计算：

$$L = F_s \times A \times H^B \quad (3)$$

式中：

L ——垂直阻隔屏障的厚度，m；

F_s ——安全系数，无量纲，考虑渗透稳定、机械侵蚀、化学溶蚀、施工因素等，一般取 1.5；

H ——垂直阻隔屏障两侧水头差，m；

A 、 B ——系数，无量纲，与阻滞作用、弥散作用相关，可按图 2 和 3 选取合适的取值。

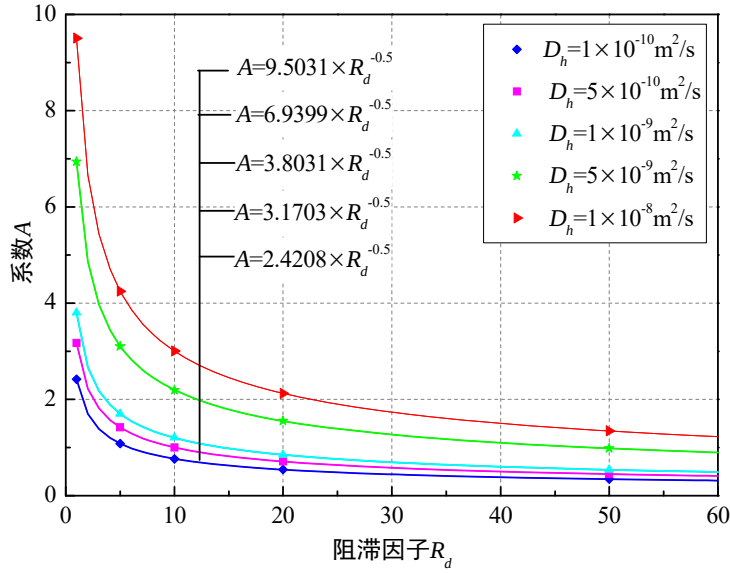


图 2 系数 A 取值

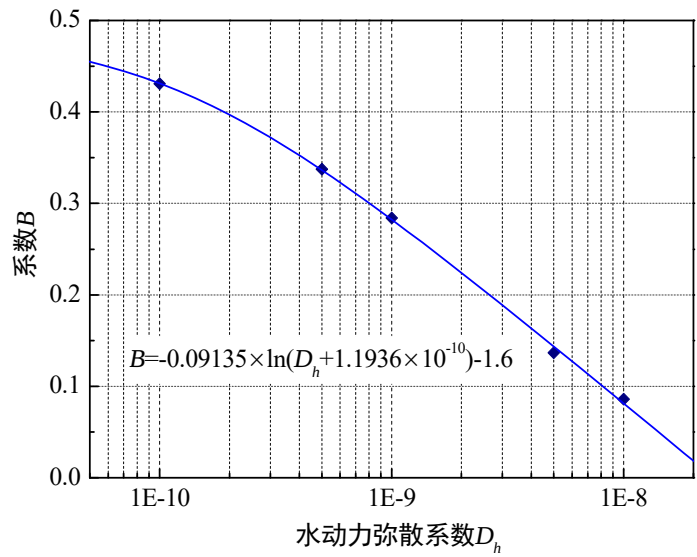


图 3 系数 B 的取值

注：（1）水动力弥散系数 D_h 常用取值范围为 $1 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s} \sim 1 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 。如阻隔屏障两侧水头差较大时取大值，水头差较小时取小值；如无经验数据，应进行试验测定；（2）阻滞因子 R_d ，无

量纲，参考国内外经验数据，重金属污染物宜取 3~40；如无经验数据，应进行试验测试，也可由下式计算：

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d K_p}{n} \quad (4)$$

式中：

n ——阻隔材料孔隙率，无量纲；

K_p ——阻隔材料分配系数， cm^3/g ，有机污染物可取 $0.5 \sim 5 \text{cm}^3/\text{g}$ ；

ρ_d ——阻隔材料干密度 g/cm^3 。

水动力弥散系数 D_h 和阻滞因子 R_d 的取值与阻隔材料类型、污染物种类有关。阻隔厚度设计应根据初步拟定选用的阻隔材料类型，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。

5.6.2.4 构造要求

5.6.2.4.1 垂直阻隔屏障底部应嵌入到隔水层或渗透系数不大于 10^{-7}cm/s 土层中。如实际污染地块底部基岩存在较多的破碎带或者裂隙发育比较完全，则应要对其进行处理。

5.6.2.4.2 垂直阻隔屏障浅部的水力梯度变化剧烈、渗流路径短时设计施工中应加强阻隔屏障浅部的防渗性能，还应考虑交通负荷作用、冻融循环、干湿循环等因素影响。

5.6.2 覆盖和水平阻隔

覆盖和水平阻隔技术的施工图设计宜参考 CJJ 113、GB18598、GB 18599、GB 16889、GB 50869、GB/T 50934 和 GB51220 相关技术规定要求。

5.7 工程质量保障设计要求

5.7.1 垂直阻隔工程质量保障设计要求

5.7.1.1 材料质量控制

为保证阻隔工程质量，对膨润土、水、泥浆、回填料等施工用材应符合下列要求：

a) 膨润土：干膨润土质量宜通过检验膨润土泥浆的 pH 值、粘度、滤失量等指标控制。其他参数如细度和纯度也是描述干膨润土性能的重要指标。

b) 水：工程用水应对水质进行检测，水质要求主要包括硬度小于 50ppm、总溶解固形物含量小于 500ppm、有机物含量小于 50ppm、其他污染物含量小于 50ppm、pH 值为 7 左右。

c) 新鲜泥浆：膨润土含量为 4%~8%的新鲜水化膨润土泥浆通常应满足马氏粘度最小为 40s、比重为 10kN/m³ 左右、pH 值为 7~10。膨润土泥浆的 API 滤失量应小于 16mL。

d) 护壁泥浆：护壁泥浆应满足马氏粘度要求，沟槽底部泥浆重度大于回填料密度 2.1kN/m³ 及以上时应及时更换护壁泥浆。

e) 回填料：用于制成回填料的土应进行颗粒级配试验，土中至少含有 20%~60%细粒，且不能有卵石或直径大于 10cm 的黏土块等大颗粒。回填料通常应满足膨润土含量为 4%~10%、含水率为 25%~35%、细粒含量为 20%~60%、坍落度为 100~150mm、重度比槽内泥浆大 2.1kN/m³ 等要求。

5.7.1.2 施工过程中应采取有效的质量保证及控制措施，包括：

a) 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 1.0m，施工过程中应避免浆液顶面发生明显下降（<1m），避免让泥浆静置 24h 及以上。

b) 开挖过程中应检测沟槽宽度和贯通性，开挖完成后应清理沟槽底部沉渣，每隔 3m~8m 检测槽底深度，并在槽底取土样测试其液塑限和颗粒级配，确保沟槽嵌入设计的地层。

c) 阻隔材料回填由下至上连续进行，避免中断而发生沙粒沉积，应防止塌孔，回填作业点与前方的开挖作业点应有足够的距离，回填料坡脚应距离开挖作业点 10m 以上。

d) 当阻隔工程为线形布置时，宜通过控制施工机械操作面的垂直度和水平度来保证阻隔的连续性。当阻隔工程为圆周形布置时，围拢时最初施工段应被重新开挖以保证整体连续性。

e) 设计施工过程中应保证垂直阻隔屏障的垂直度。

5.7.2 覆盖和水平阻隔工程质量保障设计要求

5.7.2.1 材料质量控制应符合下列要求：

a) 土：土的质量可通过检验土 pH 值、含盐量、有机质等指标控制。用于制成覆盖阻隔压实层的土应满足阻隔屏障的渗透性要求。

b) 土工膜：土工膜渗透系数宜不大于 10^{-7}cm/s ，厚度应不小于 1mm。

5.7.2.2 施工质量保障

施工过程中应采取有效的质量保证及控制措施，包括：

a) 采用黏土作为防渗材料时，黏土层在投入使用时应进行平整压实，压实度不得小于 90%，黏土层基础处理平整度应达到每平方米黏土层误差不大于 2cm。

b) 采用土工膜作为防渗材料时，土工膜膜下黏土层基础处理平整度应达到每平方米黏土层误差不大于 2cm。土工膜分段施工时，敷设后应及时完成上层覆盖，裸露在空气中的时间应不大于 30 天。在垂直高差较大的边坡铺设土工膜时，应设置锚固平台，平台高差不宜大于 10m。

c) 封场覆盖系统应进行滑动稳定性分析，防止因不均匀沉降破坏防渗结构。

6 垂直阻隔工程施工及质量控制

6.1 一般规定

垂直阻隔技术包括土-膨润土隔离墙、水泥-膨润土隔离墙、HDPE 土工膜隔离墙、水泥帷幕灌（注）浆墙、高压喷射灌浆墙、水泥搅拌桩墙、渗透反应墙等七种，其应用应符合 GB 175、GB/T 17643、GB/T 50934、CJJ 113、CJJ 176 等相关技术规范要求。

6.2 土-膨润土隔离墙施工及质量控制

6.2.1 施工流程

主要包括施工准备、修筑导墙、泥浆制备、沟槽开挖、泥浆护壁、回填料制备、回填、顶部覆盖和地块清理等过程，具体施工工艺流程如图 4 所示。

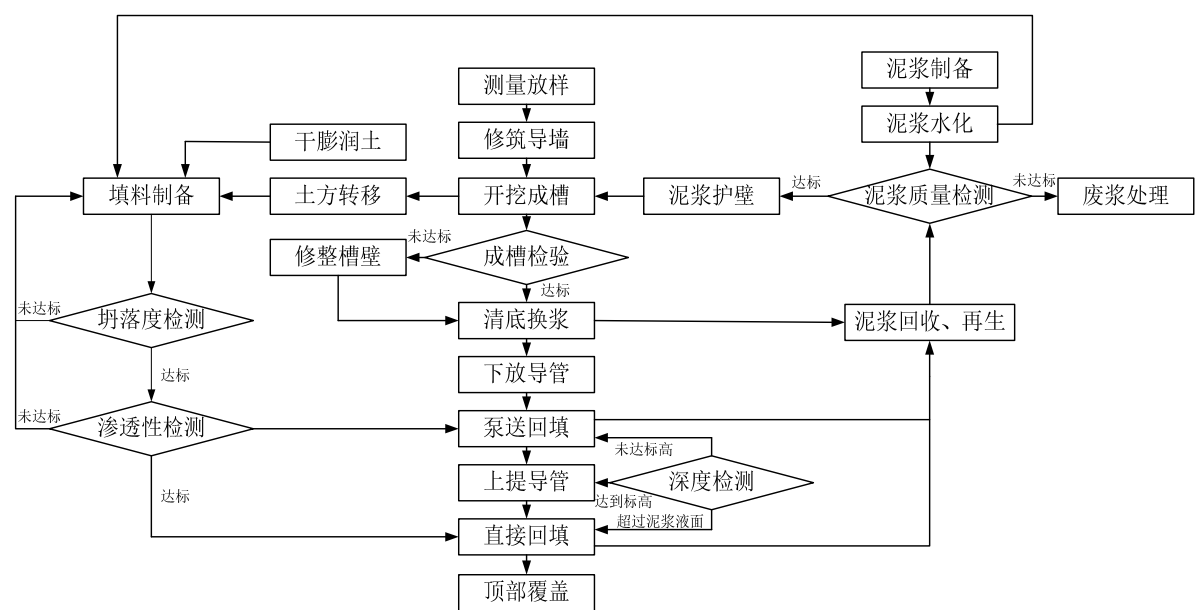


图 4 土-膨润土隔离墙施工工艺流程图

6.2.2 施工准备

6.2.2.1 施工准备阶段主要进行地块平面布局，确定施工机械类型、数量，确定施工材料数量和施工人数等。

6.2.2.2 地块初步平面布置应根据施工组织设计进行，并依据工程建造位置检查平面布置，及时补充遗漏。应根据相关规范、设计图纸、试钻记录、地下勘探报告和公共管线记录等资料确定施工设备和建造材料。此外，应进行现场检验以合理确定施工过程。

6.2.2.3 地块开挖涉及设备主要有液压反铲挖掘机、机械抓斗或液压抓斗等；膨润土泥浆制备设备有搅拌机、泥浆泵、管道、阀门、水化池、除砂器和旋液分离器等；回填料制备设备有机械抓斗、推土机、卡车和水槽等；质量检测设备主要有马氏漏斗粘度计、泥浆比重称和标准筛等。

6.2.3 施工作业与质量控制

6.2.3.1 施工作业流程

①导墙施工→②膨润土泥浆制备→③沟槽开挖→④泥浆护壁→⑤扫孔和清底换浆→⑥回填料制备→⑦回填→⑧顶部覆盖→⑨地块清理。

6.2.3.2 导墙施工

土-膨润土隔离墙施工前可根据地块条件选择是否修筑导墙。导墙施工时，应分段沿轴线设置龙门柱以控制导墙轴线，挖土机开挖沟槽，人工修坡，立导墙模板，模板内放置钢筋网片，对称浇筑，墙体强度达到设计强度 70% 后方可拆模，导墙顶面铺设安全网片，导墙两边设置栏杆和彩条旗以保障施工安全。

6.2.3.3 膨润土泥浆制备及质量控制

6.2.3.3.1 制备膨润土泥浆前应检测膨润土和拌合用水的质量、建造水化池、安装泥浆泵、准备混合区域等。在施工现场应经常检测膨润土的物理化学纯度、pH 值、静切力、细度和滤失量等指标。拌合用水应符合低硬度、近似中性及低含盐量。

6.2.3.3.2 泥浆制备材料采用优质膨润土和水质合格的拌合用水，泥浆制备宜采用快速搅拌方法，快速搅拌之后应静置使膨润土充分水化。小规模工程宜采用批量搅拌法，将定量水和膨润土用高速搅拌机进行搅拌，直至水化完成可以使用，每批次可产出泥浆约 $2\sim 5\text{m}^3$ 。

6.2.3.3.3 泥浆制备工艺流程如图 5 所示。

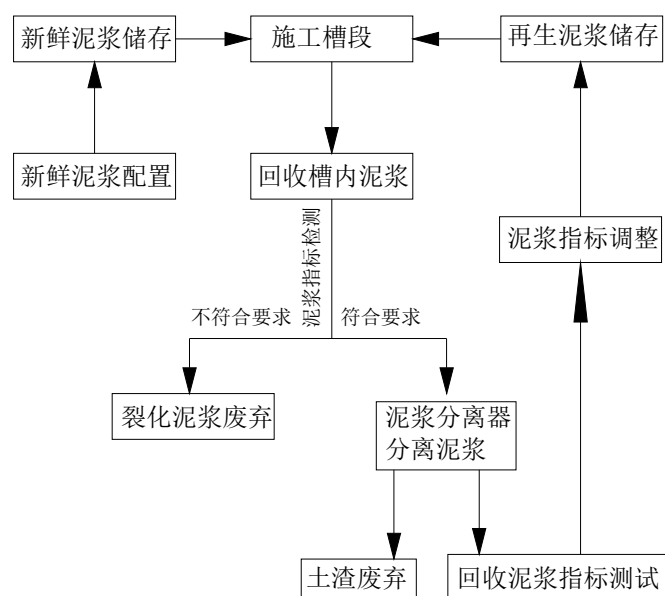


图 5 泥浆制备工艺流程图

6.2.3.3.4 新鲜泥浆的质量控制主要指标包括：比重 1.1~1.3，漏斗粘度 18~25s，含砂率 $\leq 5\%$ ，胶体

率 95%，必要时可添加适量添加剂。各阶段泥浆性能指标应符合表 2 规定。

表 2 制备泥浆的性能指标

泥浆性能	新配制泥浆		循环泥浆		废弃泥浆		检验方法
	粘性土	砂性土	粘性土	砂性土	粘性土	砂性土	
比重（g/cm ³ ）	1.04~1.05	1.06~1.08	<1.10	<1.15	>1.25	>1.35	比重计
粘度（s）	20~24	25~30	<25	<35	>50	>60	漏斗粘度计
含砂率（%）	<3	<4	<4	<7	>8	>11	洗砂瓶
pH 值	8~9	8~9	>8	>8	>14	>14	试纸

6.2.3.4 沟槽开挖

6.2.3.4.1 沟槽开挖宜采用液压抓斗工法，开槽机械通常应配备垂直度仪和自动纠偏装置。

6.2.3.4.2 单元槽段挖掘顺序可根据图 6 所示进行。先挖槽段两端，或挖好第一孔后跳开一段距离挖第二孔使两个单孔之间留下未被挖掘过的土体，使抓斗在挖孔时吃力均衡，保证成槽垂直度。

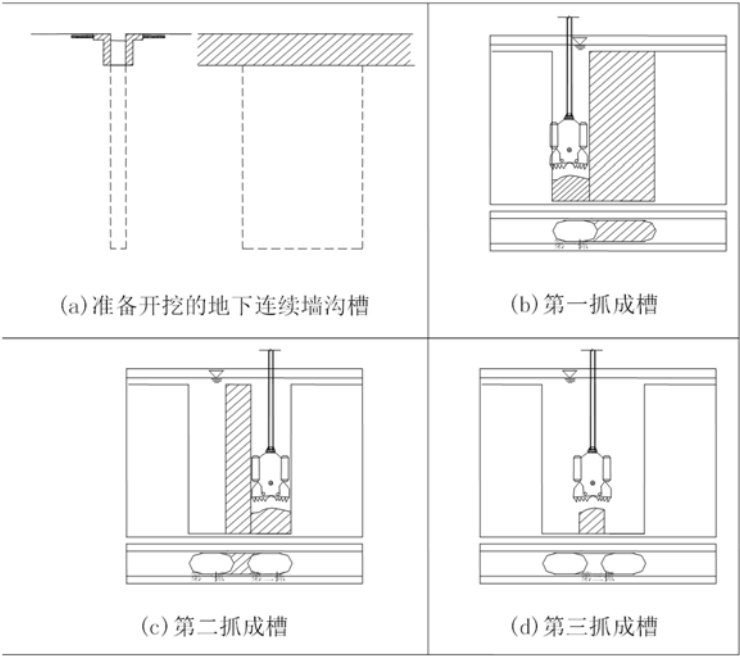


图 6 成槽挖掘顺序示意图

6.2.3.5 泥浆护壁

水化池中泥浆通过泥浆泵送到沟槽中，沟槽中的泥浆液面应保持在地下水水面之上 1.0m 及地表下 0.5m 左右。护壁泥浆应保持一定循环率以保证槽内泥浆的质量。

6.2.3.6 扫孔和清底换浆

扫孔宜采用液压抓斗扫除槽底残余沉渣。扫孔完成后，可采用反循环方式清除槽底沉渣，清底流程如图 7 所示，清底时吸泥管由浅入深吸除槽底部土碴淤泥。槽底沉渣清除完成后开始换浆，应取样检测清底换浆是否合格。

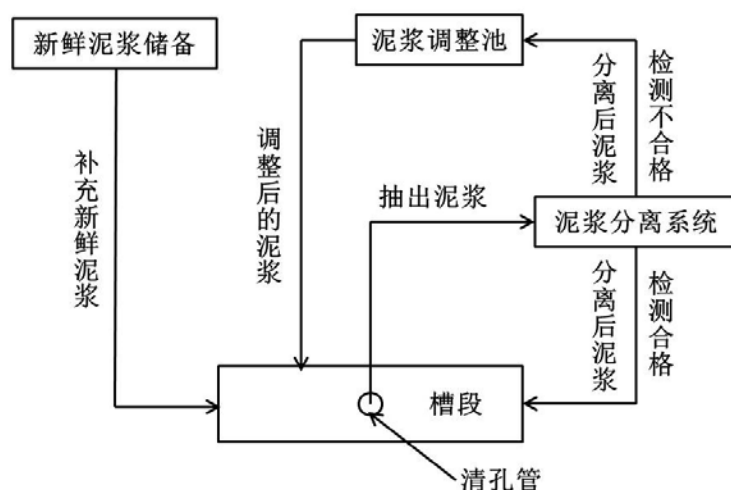


图 7 清底换浆流程

6.2.3.7 回填料制备

土-膨润土回填料制备可直接在空地上用推土机对混合物反复碾压翻铲进行，也可采用搅拌机进行。制备好的回填料应通过细粒含量测试、坍落度测试、湿密度检测以及渗透性测试后才能使用，通常坍落度应满足 100mm~150mm，渗透系数应小于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。

6.2.3.8 回填

6.2.3.8.1 沟槽开挖与回填可在同一槽段的前后位置同时开展，应保证两个作业面之间有足够距

离，防止回填料被重新开挖。

6.2.3.8.2 回填初期宜采用导管法，在沟槽一端将导管深入槽底，让回填料在自重作用下顺着导管往下流，自底部往上逐渐替换槽内泥浆。当导管口的回填料高度超过泥浆液面时，可将后续回填料直接堆填在槽口，让其顺着坡面缓缓往下流动，从而使坡面整体向前推进，不断进行替换回填。

6.2.3.9 顶部覆盖

回填完成后在墙体顶部应设置土工布层和一定厚度碎石覆盖层，以防止顶部回填料干缩开裂。如已经开裂，可将墙体顶部 0.5m~1m 范围内的回填料挖除，重新制备高粘粒回填料填入并压实，并在顶部覆盖地表土或砾石层以防侵蚀。

6.2.3.10 地块清理

土-膨润土隔离墙建造完成后，多余泥浆和回填料应妥善处理，防止产生二次污染，不应直接排入市政管线，也不应成层堆放在地表。膨润土泥浆处理可与粗粒土混合，制成干土块被填埋或在污染区域地表铺成薄层播种植物。

6.2.4 质量检验与验收

6.2.4.1 施工单位在开工前应建立质量保证体系，包括建立质量检查机构，配备质检人员，并制订质量检查制度及实施办法等。

6.2.4.2 施工过程中，质检人员应对沟槽开挖质量、护壁泥浆质量及使用、回填料及施工质量等质量进行检查与控制。

6.2.4.3 检查墙体质量应在成墙一个月后进行，检查内容为墙体的渗透性、均匀性、可能存在的缺陷等，检查可采用钻孔取芯和其它无损检测等方法，检查孔的位置和数量，由业主单位、监理单位会同有关单位研究确定，每个墙段至少取样 2 组。钻孔取芯应考虑墙体厚度选择合适的孔径。无损检测可采用超声波法和弹性波透射层析成像法（简称 CT 法）等方法，但由于物探的局限性，其检测结果只能作为对墙体质量综合评价的依据之一。

6.2.4.4 土-膨润土隔离墙的墙体渗透性指标，应进行现场注水试验和钻孔取芯进行室内渗透性试验，并综合判断墙体防渗性能。钻孔取芯进行室内测试宜采用柔性壁渗透试验，而不宜采用刚性

壁常水头及变水头渗透试验，以防止侧壁渗流影响试验结果。在钻孔取芯位置，可进行注水试验测定隔离墙的现场渗透系数，检验现场防渗效果。

6.2.4.5 现场试验结束后，应将钻孔用回填料进行回灌封闭。

6.2.4.6 土-膨润土隔离墙工程的验收应包括工序质量验收和单项工程竣工验收。工序质量验收包括成槽验收、清孔验收、膨润土泥浆质量验收，回填料及施工质量验收等。单项工程竣工验收，应准备下列资料：

- a) 设计图纸、说明书、技术要求、变更及补充文件；
- b) 竣工报告、竣工总平面图及剖面图、每个沟槽的竣工资料；
- c) 施工原始记录、质量检查及工序验收资料、各种原材料试验资料、墙体材料及泥浆试验资料、施工期地下水位观测资料、墙体检查孔成果资料、重大质量事故报告；
- d) 有关专题试验研究报告。

6.3 水泥-膨润土隔离墙施工及质量控制

6.3.1 施工流程

6.3.1.1 水泥-膨润土隔离墙的设计施工过程与土-膨润土隔离墙类似，施工过程主要包括施工准备、修筑导墙、沟槽开挖、泥浆护壁、水泥-膨润土回填料制备与回填、地块清理等，具体施工工艺流程如图 8 所示。

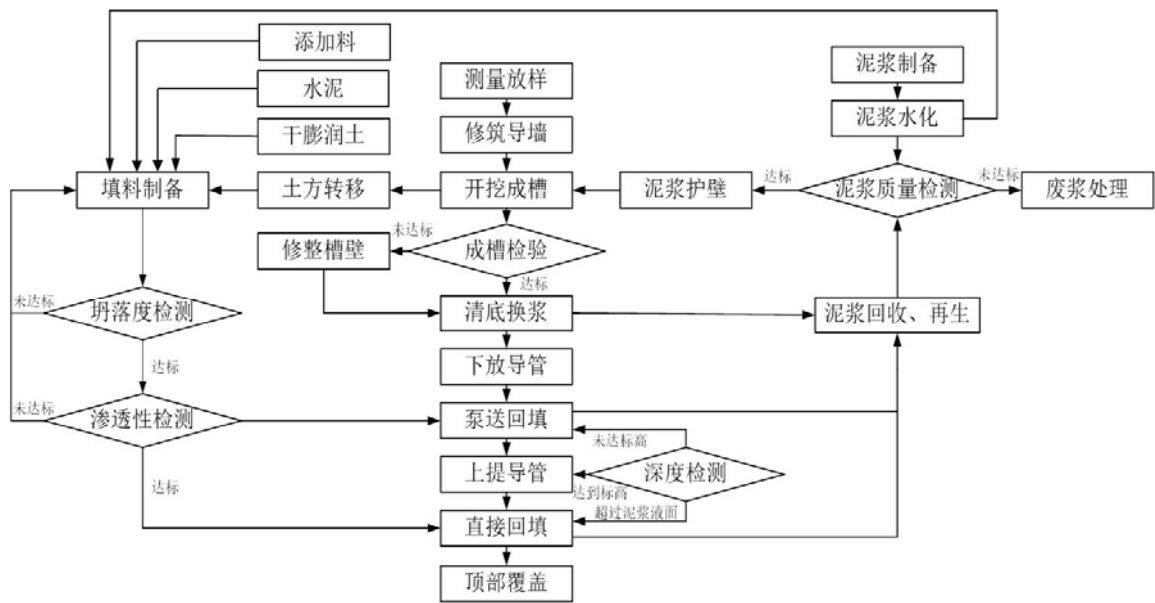


图 8 水泥-膨润土隔离墙施工工艺流程图

6.3.1.2 水泥-膨润土隔离墙设计施工时应充分考虑地块类型、污染特征等因素，选择具有较好化学相容性和抗侵蚀性能的水泥和膨润土品种。

6.3.2 施工准备

宜参照 6.2.2 实施。

6.3.3 施工作业与质量控制

宜参照 6.2.3 实施，将其中土-膨润土回填料相关部分替换为主要由水泥、膨润土和水组成的水泥-膨润土回填料。

6.3.4 质量检验与验收

宜参照 2.4 实施，检查墙体质量时应增加检查墙体强度等相关内容。水泥-膨润土隔离墙的墙体强度性能可钻孔取芯进行室内无侧限抗压强度试验得到，试验参考 GB/T 50081 和 DL/T 5150 进行。

6.4 HDPE 土工膜隔离墙施工及质量控制

6.4.1 施工流程

HDPE 土工膜隔离墙施工主要包括施工准备、修筑导墙、泥浆制备、沟槽开挖、泥浆护壁、HDPE 土工膜垂直安装、底部密封、回填、顶部覆盖和地块清理等过程，具体施工工艺流程如图 9 所示。

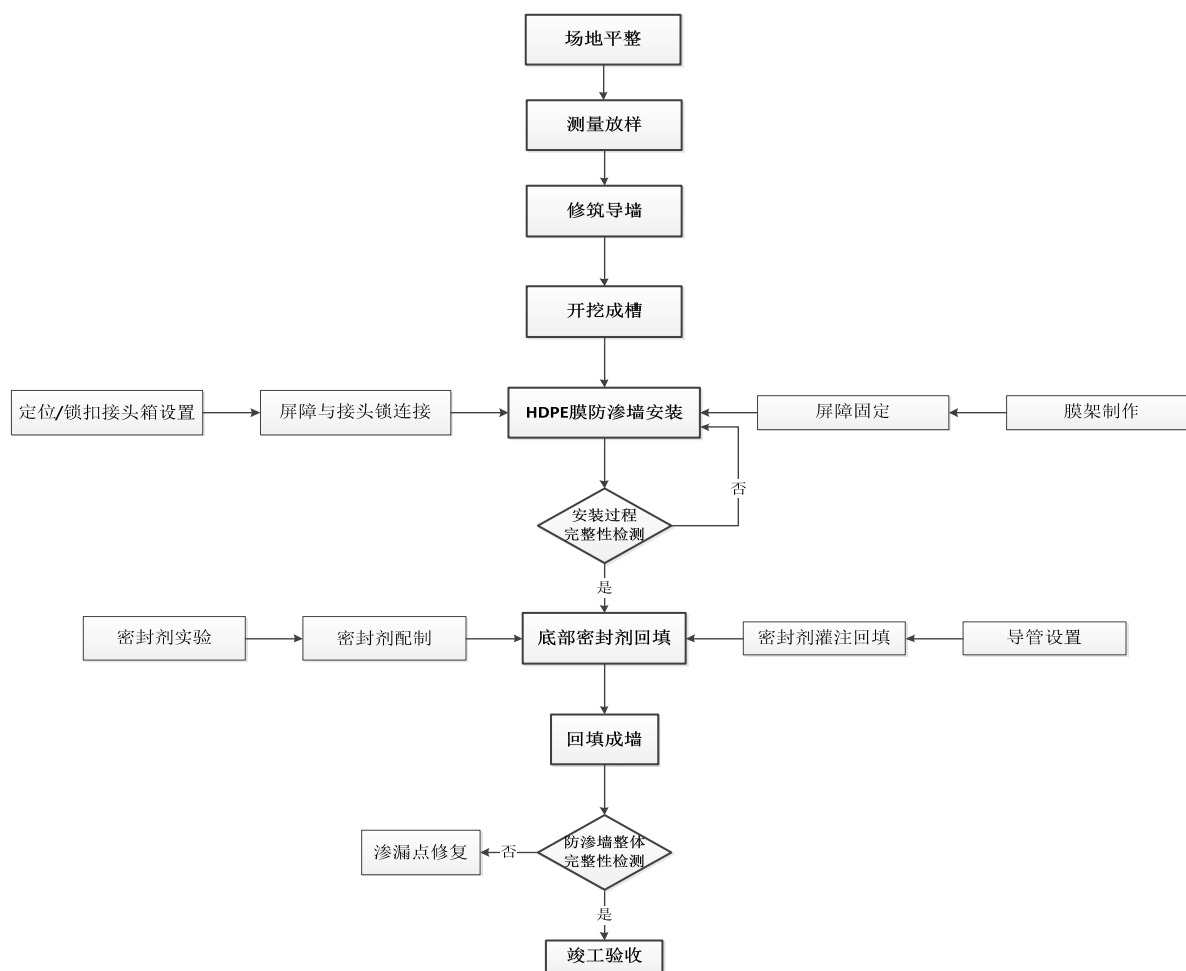


图 9 HDPE 土工膜隔离墙施工工艺流程图

6.4.2 施工准备

施工准备应包括施工用水、用电准备、施工便道、排污系统、泥浆制备场地等准备：

a) 做好现场施工用水和用电准备；

- b) 现场沿防渗墙修筑 6~8m 宽碎石路面或浇筑钢筋混凝土施工便道；
- c) 沿施工道路内侧筑水排污系统。排污沟截面尺寸 200mm×300mm（宽×高），沿线均布集水池，容积为 600mm×600mm×1000mm（长×宽×高），用砖砌，水泥浆粉刷工作面，外围填土并压实；
- d) 根据现场情况布设膜转运场及临时加工场；
- e) 在现场准备泥浆系统：泥浆系统由半埋式泥浆池、泥浆材料仓库、泥浆拌机械、泥浆分离设备、泥浆输送泵及泥浆循环管路组合而成：
 - 1) 浆池：自原地面向下开挖长方形基坑，四周放坡比为 1 : 1，坑底平面采用蛙式打夯机进行夯实后铺筑厚度为 20cm 的素砼底板，自底板向上采用砖砌结构砌筑四周围墙及中间两道隔墙。池内各砖墙表面均采用 C10 砂浆砌筑并抹面，抹面厚度为 1cm。待砖砌结构完成 3~5 天后，分层回填浆池外侧的土方并夯实。
 - 2) 制浆平台：搅拌机底座平台采用土方填筑并夯实后铺筑 20cm 厚素砼地板。搅拌机上面的加料平台采用砖砌支柱，方木和木板组合搭设，顶棚采用石棉瓦、木柱支撑。
 - 3) 泥浆材料库：采用简易板房结构。地面经夯实后铺筑 20cm 厚素砼地面。
 - 4) 管路铺设：由制浆站至施工槽段，铺设 $\Phi 150\text{mm}$ 钢管用于输送泥浆，另按浇筑槽孔的位置铺设可移动的 $\Phi 100\text{mm}$ 管路用于槽段浇筑时回收浆液。管路始端分别安设相应的泥浆泵。
- f) 应在施工现场设置一个能容纳两幅地下墙土方的临时集土坑，用来临时收集成槽作业挖出的湿土，待沥干泥浆后，再进行回填处理。临时集土坑应经过防渗处理。

6.4.3 施工作业与质量控制

6.4.3.1 一般规定

6.4.3.1.1 HDPE 柔性垂直阻隔结构的阻隔能力满足渗透系数 $\leq 1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ；

6.4.3.1.2 HDPE 柔性垂直阻隔结构深入相对不透水层深度 $\geq 1.0\text{m}$ ，且应超过污染物影响深度；

6.4.3.1.3 HDPE 柔性垂直阻隔结构应完整、连续、稳定、可靠。

6.4.3.2 施工材料

应主要包括 HDPE 土工膜、锁扣、防渗密封剂、护壁泥浆等。

6.4.3.3 施工设备

应主要包括液压双轮铣槽机、窄挖斗机、钢绳冲击钻机、打桩机、吊机、长臂挖机、高压喷射注浆机、泥浆机、污泥泵、运输车等。

6.4.3.4 施工作业包括：

a) 导墙修筑

应沿污染地块外围的设计区域开挖导槽，修筑导墙。

b) 垂直开槽

在泥浆护壁作用下，应采用机械方式沿导墙垂直开槽，深度至相对不透水层，同时控制开槽垂直度和槽底沉渣厚度；开槽施工法示意图见图 10。

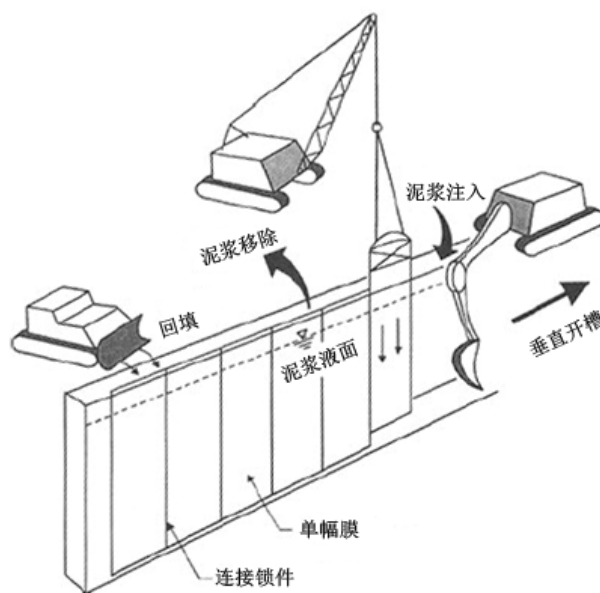


图 10 开槽施工法示意图

c) 垂直铺膜

应利用下膜设备将 HDPE 土工膜垂直铺设到开挖好的槽段，并采取抗浮措施，通过连接锁扣实现不同幅土工膜的互锁连接。

d) 灌浆密封基础固结

应利用注浆管将满足设计要求的密封材料灌注到 HDPE 膜底，使土工膜与底端不透水层固结密封，同时控制注浆深度。

e) 回填成墙

应通过回填砂土或黏土形成完整的垂直阻隔墙。

6.4.3.5 施工质量控制包括：

a) 护壁泥浆所用原料及外加剂应重新检验，严格按照设计标准配置，对泥浆的各项性能指标进行检测。

b) 泥浆的用量以及在槽中的高度应合乎要求，泥浆的输送过程要严格遵守设计规定，对泥浆的回收工艺要做到规范有序。

c) 使用水泥应有贸易证书，并对其品种、标号、出厂日期检查验收，对有潮结的水泥绝对禁止使用。

d) 泥浆在开工前，应做好配合比试验。

e) 工程采用光面 HDPE 土工膜具有光边，在施工时清理方便，避免杂质藏匿于粗糙结构内。

6.4.4 质量检验与验收

应采用电法检测、监测井监测等方法对施工质量进行检验与验收。电法检测时，应在 HDPE 土工膜的两侧布设测量电极和供电电极，采用双电极法对施工过程中 HDPE 土工膜的完整性进行检测。监测井监测时，应在垂直防渗墙的内外两侧布设监测井，通过测量示踪剂或污染物的浓度变化监测防渗墙的阻隔效果。

6.5 水泥帷幕灌（注）浆墙施工及质量控制

6.5.1 施工流程

水泥帷幕灌（注）浆墙施工流程包括定位，钻孔，冲洗孔，压水试验，制浆，下喷射管，提升，封孔。水泥帷幕灌（注）浆墙施工工艺流程见图 11。

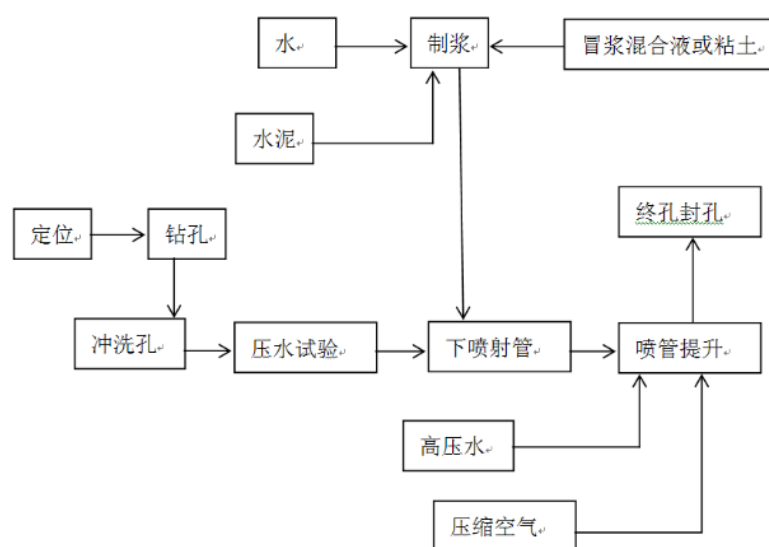


图 11 水泥帷幕灌（注）浆墙施工工艺流程图

6.5.1.1 水泥帷幕灌（注）浆浆液的品种选择应与受注岩层的渗透性相适应，应符合下列规定：

a) 当含水岩层的裂隙小于 0.15mm 时，宜采用磨细水泥、化学浆或先采用水玻璃进行预压处理，采用预处理后注浆应采用化学浆液；

b) 当含水层裂隙大于 0.15mm、水流速度小于 200m/d 时，就采用水泥浆或黏土水泥浆；

c) 当含水层吸水量大于 7L/min·m 时或地下水流速小于 200m/d 时，应采用水泥-水玻璃浆；

d) 当含水层的水流速度大于 200m/d 时，应采用水泥-水玻璃浆；

e) 当遇有溶洞、断层、破碎带和处理突水事故时，宜先注入粉煤灰、尾矿粉、砂子、砾石、锯末等惰性材料，再注水泥-水玻璃浆或水泥浆；

f) 当遇基岩裂隙发育，既有大裂隙又有小裂隙，单纯用悬浊液达不到防渗要求时宜采用复合注浆，先注悬浊液再注化学浆液。

6.5.1.2 水泥帷幕灌（注）浆参数应根据岩层裂隙情况、吸水量、浆液品种通过试验或经验数据确定。

灌（注）浆液有效扩散半径宜按表 3 选用。

表 3 浆液有效扩散半径

裂隙宽度 (mm)	浆液有效扩散半径 (m)
0.3-2	2-4
2-5	4-6
5-10	6-10
>10	10-15

6.5.1.3 灌（注）浆孔的排距应小于或等于注浆孔孔距、应为浆液有效扩散半径的 1.4~1.5 倍左右。岩体注浆孔的布置宜采用“梅花形”或“方格形”，其间距应以有效扩散半径相重叠为原则。

6.5.1.4 灌（注）浆压力宜取 1.6~3.0 倍的静水压力值；岩体加固的注浆终压，浅部应视覆盖层或混凝土止浆的厚度而定，深部宜参考帷幕注浆确定。

6.5.1.5 灌（注）浆注浆量可按式计算

$$Q=A\pi R^2 H \beta n / m \quad (5)$$

式中：

A—浆液损耗量，取 1.2~1.5；

R—浆液有效扩散半径，m；

H—注浆段长，m；

n—岩体或土体孔隙率 1%~5%；

β —浆液充填系数 0.8~0.9；

m—浆液结石率，取 0.5~0.95，水灰比大时取小值，小时取大值。

6.5.2 施工准备

6.5.2.1 施工前应清除或拆迁地块内的地上和地下障碍物，平整地块挖好排浆沟、排水沟设置临时设施。

6.5.2.2 应进行测量放线并设置桩位标志。

6.5.2.3 现场大样应在室内按不同含水量和配合比进行配方试验优选出合理的浆液配方。

6.5.2.4 机具设备应已配齐进场并进行维修安装就位进行试运转，进行现场试桩应已确定成桩施工的各项施工参数和工艺。

6.5.3 工艺试验

6.5.3.1 地质条件复杂区域岩体帷幕灌（注）浆、土体帷幕灌（注）浆应进行现场灌（注）浆试验。

6.5.3.2 试验施工完成后应留有必要的时间进行灌浆效果的测试，并提出专项测试报告；试验完成后，应按照试验的目的和要求对全部试验成果进行分析研究，提出完整的关键试验报告。

6.5.3.3 在施工期或施工初期，宜进行生产性灌浆试验验证灌浆工程施工详图设计和施工组织设计，调试运行钻孔灌浆施工系统，验证合理的机械设备与人员配置。

6.5.4 施工作业与质量控制

6.5.4.1 水泥帷幕灌（注）浆墙施工作业流程：①灌（注）浆孔成孔→②灌（注）浆孔冲洗→③压水试验→④灌（注）浆→⑤封孔→⑥结束。

6.5.4.2 灌（注）浆孔成孔应符合下列要求：

- a) 钻孔应统一编号，并注明施工次序，钻孔开孔位置与设计位置的偏差不大于 10cm。
- b) 应先导孔钻取岩芯检查验证地层。
- c) 直径钻孔、终孔深度应符合设计规定；每段结束后孔内残留岩芯不得超过 20cm。
- d) 帷幕注浆钻孔应保证孔向准确，终孔深度超过 30cm 应测斜，偏斜率应符合设计要求。
- e) 应对开孔位置、冲洗液漏失层位、漏失量、断层、破碎带、洞穴、掉块、涌水、孔偏斜方位和偏值要详细记录。

6.5.4.3 灌（注）浆钻成后应用清水冲洗孔壁，直到清水为止，不返水时，冲洗时间不少于 30min。

6.5.4.4 简易压水试验应符合下列要求：

a) 帷幕注浆钻孔冲洗后, 每次注浆前应进行简易压水试验, 检查套管固结密封程度和止浆塞的止浆效果, 确定浆液的品种和初始浓度。

b) 岩体加固注浆在钻孔裂隙冲洗后, 应进行简易压力试验, 试验孔应均匀布置, 数量不少于总数的 20%。

6.5.4.5 注浆应符合下列要求:

a) 正式注浆前, 应用 1.2~1.5 倍注浆压力对整个注浆管进行耐压试验, 持续时间不少于 15min, 无渗漏为合格。

b) 浆液制备应符合下列规定:

1) 注浆用水泥的品种标号应符合质量标准, 水泥浆的搅拌时间, 使用普通搅拌机时不得少于 5min; 高速搅拌机不少于 30s, 水泥浆自制至用完时间不超过 4h。

2) 制浆用水应符合混凝土用水水质要求, 对化学浆还应符合各种材料的具体要求。

3) 化学浆液的配制应计量准确, 严格按各种浆液配制程序进行。

c) 注浆方式宜按下列原则选择:

1) 基岩裂隙注浆应优先选用分段下行式注浆, 由上向下分段注浆后, 再自下而上复注一次。

2) 当岩层稳定且垂直节理发育或在含水层向又有隔水层时宜于分段上行式。

3) 当地质条件比较复杂且注浆孔深时宜采用混合式。

4) 对于浅孔, 宜全孔一次注浆。

6.5.4.6 达到注浆结束标准后, 双液注浆应按管路占浆量定量压水, 注浆结束时, 应暂时封闭孔口阀, 及时冲洗泵和管路, 适时拨除注浆管, 全孔注浆应用注浆液或水泥砂浆封孔。

6.5.4.7 施工质量控制应符合下列要求:

a) 分段注浆长度、注浆量、注浆压力等施工工艺和施工参数应按场地适应性试验确定。

b) 注浆材料宜采用快凝、早强型止水浆液。

c) 每根桩开钻前应检查钻具方位, 角度偏差应满足设计要求, 并应不大于 1%。

d) 停浆面应控制在丰水期地下水位线顶标高以上 1.0m。

6.5.5 质量检验与验收

6.5.5.1 工程质量检验应符合下列要求：

a) 检查部位应选择有代表性的地段，薄弱部位。取试块的部位宜选在浆液有效扩散半径的中间或沿扩散半径均匀布置。试件尺寸应符合试验规程要求，每组不少于 6 个。

b) 检查数量除开挖法和载荷试验法仅作少量检查外，其余检查方法检查数量应不少于注浆孔总数的 5%，且不少于 3 个。

c) 帷幕注浆质量检查宜采用分析注浆资料，用钻孔进行注水、抽水、压水试验开挖检查井等方法。检查数量不应少于检查孔数量的 4%。黏土-水泥浆质量检查应在注浆结束 30 天后进行。

d) 检查孔应用水泥砂浆或注浆液封堵。

6.5.5.2 工程验收应符合下列要求：

a) 帷幕注浆验收标准为帷幕范围内的渗透系数不大于设计值或压水试验测得的单位吸水量不大于设计要求。帷幕内开挖的工程宜直接采用抽水试验检查帷幕质量，帷幕渗漏水不大于设计要求和漏水带砂现象。

b) 验收资料包括收集的资料、设计资料、试验资料、施工原始记录、各种成果图表和质量检查有关资料。

6.6 高压喷射灌浆墙施工及质量控制

6.6.1 施工流程

6.6.1.1 根据工程需要和地质条件，高压喷射灌浆可采用旋喷、摆喷、定喷三种形式，每种形式可根据动力源分为三管法（施工用高压水、压缩气、高压水泥浆）、双管法（使用高压水泥浆和压缩气）和单管法（只使用高压水泥浆）。

6.6.1.2 根据喷嘴摆动角度可实施各种喷射：单嘴喷头摆 360°为旋喷；小于 360°为弧喷；小于等于 180°为拱喷；小于等于 90°为摆喷；摆角为 0°时为单向定喷。同轴双嘴喷头摆 180°为旋喷；小于 180°为双向拱喷；小于等于 90°为双向摆喷；摆角为 0°时为双向定喷。

6.6.1.3 三重管高压喷射灌浆墙施工工艺流程见图 12。

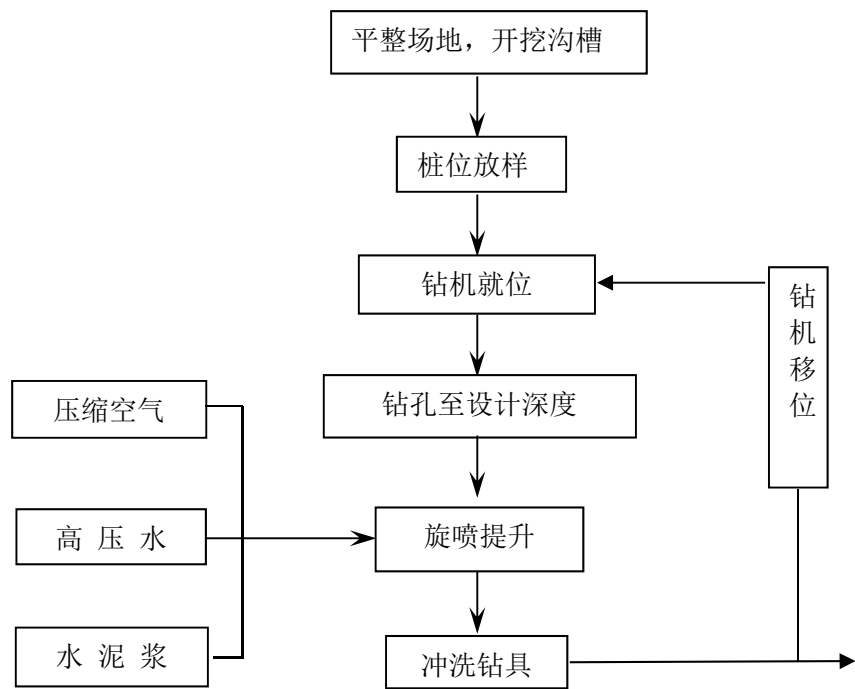


图 12 三重管高压喷射灌浆墙施工流程图

6.6.2 施工准备

6.6.2.1 应清理施工现场的地下、地面障碍物，地块平整度基本要求 $\pm 100\text{mm}$ ，应尽量清除地下障碍物，应依据施工总平面图、设计图纸编制施工方案，确定施工工艺，安排好打桩施工流水。

6.6.2.2 应施做好施工机具准备，主要机具设备包括高压泵钻机、浆液搅拌器等辅助设备。

6.6.2.3 高压喷射浆液宜使用水泥浆，所使用的水泥品种和强度等级，应根据工程需要确定。根据需要，宜在水泥浆液中加入速凝剂、减水剂等外加剂；掺合料与外加剂的种类及掺入量应通过室内试验和现场高喷灌浆试验确定。

6.6.3 施工作业与质量控制

6.6.3.1 工序

高压喷射灌浆墙的一般工序为机具就位、钻孔、下入喷射管、喷射灌浆及提升、冲洗管路、孔口回灌等。当条件具备时，也可以将喷射管在钻孔时一同沉入孔底，而后直接进行喷射灌浆和

提升。多排孔高喷墙宜先施工下游排，再施工上游排，后施工中间排。一般情况下，同一排内的高压喷射灌浆孔宜分两序施工。三重管高压喷射灌浆墙的施工作业示意图见图 13。

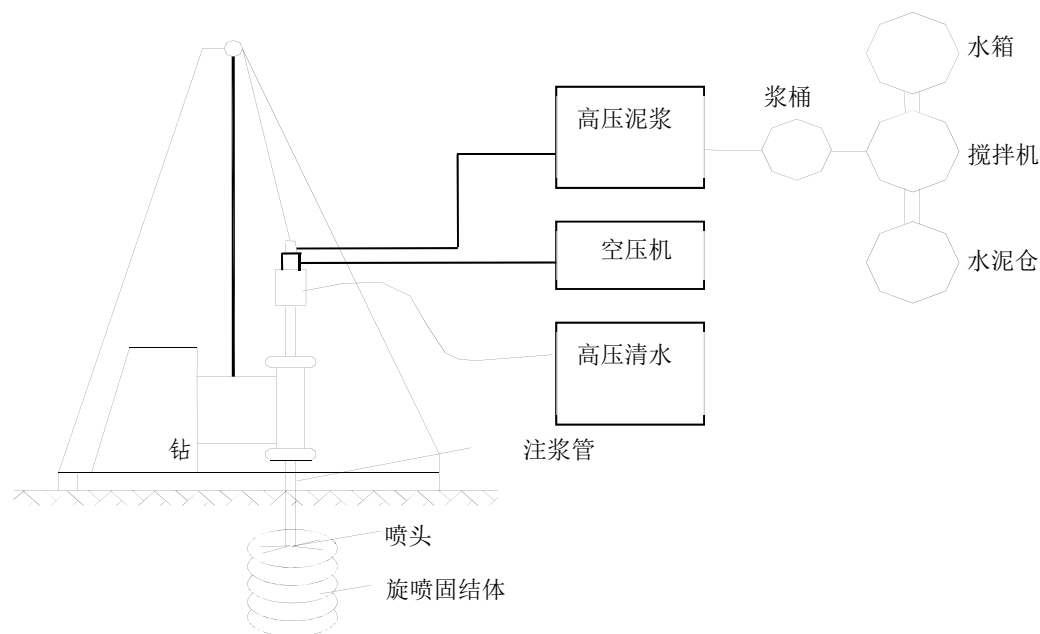


图 13 高压喷射灌浆墙施工作业示意图

6.6.3.2 施工过程：

- a) 先用振动打桩机将带有活动桩靴的套管打入土中然后将套管拔出一段拔出地面高度大于拟旋喷的高度然后拆除上段套管；
- b) 安放钻机和慢速卷扬机用以旋转和提升喷射管；
- c) 将喷射管通过钻机盘插入孔内；
- d) 接通高压管水泥浆管空压管开动高压泵泥浆泵空压机和旋转钻机进行喷射用仪表控制压力流量风量当分别达到预定数值时开始提升；
- e) 继续喷射和提升直至预定的喷射高度为止；
- f) 拔出喷射管和套管；
- g) 当采用三重管法喷射开始时先送高压水再送水泥浆和压缩空气；在一般情况下压缩空气可晚送 30s 在桩底部边旋转边喷射 1min 后再进行边旋转边提升边喷射。

6.6.3.3 高压喷射灌浆墙施工参数宜按照表 4 选择。

表 4 高压喷射灌浆墙常用施工参数表

项目			单管法	双管法	三管法
水	压力（MPa）				35～40
	流量（L/min）				70～80
	喷嘴个数（个）				2
	喷嘴直径（mm）				1.7～1.9
气	压力（MPa）			0.6～0.8	0.6～0.8
	流量（m³/min）			0.8～1.2	0.8～1.2
	气嘴个数（个）			2 或 1	2
	环状间隙（mm）			1.0～1.5	1.0～1.5
浆	流量（L/min）		25～40	25～40	0.2～1.0
	流量（L/min）		70～100	70～100	60～80
	密度（g/m³）		1.4～1.5	1.4～1.5	1.5～1.7
	浆嘴个数（个）		2 或 1	2 或 1	2
	浆嘴直径（mm）		2.0～3.2	2.0～3.2	6～12
	回浆密度（g/m³）		1.3		
提升速度 v ^a （cm/min）	粉土层		10～20		
	砂土层		10～25		
	砾石层		8～15		
	卵（碎石）层		5～10		
旋喷	转速 r/min		（0.8～1.0） v		
摆喷	摆速 b 次/min		（0.8～1.0） v		
	摆角	粉土、砂土	15°-30°		
		砾石、卵（碎）石	30°-90°		
a 对于振孔高喷，提升速度可为表列数据的 2 倍。					
b 单程为一次。					

6.6.3.4 施工质量控制应符合下列要求:

- a) 水泥的品种标号、水泥浆的水灰比和外加剂的品种掺量应符合设计要求;
- b) 高压喷射灌浆墙深度、直径及强度应符合设计要求, 检验方法为钻机取样, 标准贯入平振

荷载试验，开挖检查和检查施工记录；

c) 桩桩中心位移允许偏差 50mm，旋喷管垂直度允许偏差 $1.5H/100\text{mm}$ ，H 为旋喷管长度(mm)。

6.6.4 工程质量检验与验收

6.6.4.1 工程质量检验

6.6.4.1.1 施工过程中应对高喷灌浆材料、浆液和各道工序的质量进行控制和检查，并做记录。

6.6.4.1.2 高压喷射灌浆墙的防渗性能应根据墙体结构形式和深度选用围井、钻孔或其他方法进行检查。

6.6.4.1.3 高压喷射灌浆墙质量检查宜在地层复杂的部位、漏浆严重的部位、可能存在质量缺陷的部位进行。

6.6.4.1.4 围井检查法适用于所有结构形式的高压喷射灌浆墙，并应符合以下要求：

a) 可在井内开挖进行直观检查和取样，并做注水或抽水试验；亦可在围井中心处钻孔，做注水或抽水试验。

b) 每 3~5 个单元工程宜布置一个围井；少于 3 个单元的工程，至少应布置一个围井。

c) 围井各面墙体轴线围成的平面面积，在砂土、粉土层中不宜小于 3m^2 ，砾石、卵（碎）石层中不宜小于 4.5m^2 。

d) 围井边墙与被检查墙体的技术条件应一致；注水水位高于围井顶部时，围井顶部应予以封闭。

6.6.4.1.5 厚度较大的和深度较小的高压喷射灌浆墙可选用钻孔检查法，并应符合以下要求：

a) 每个单元工程可布置 1 个检查孔；

b) 检查孔孔位宜布置在墙体中心线上的相邻两孔高喷凝结体的搭接处，宜自上而下分段钻孔、取芯和进行静水头压水试验。

6.6.4.1.6 围井检查宜在围井的高压喷射灌浆结束 7d 后进行，如需开挖或取样，宜在 14d 后进行；钻孔检查宜在该部位高压喷射灌浆结束 28d 后进行。

6.6.4.1.7 采用围井法进行注水或抽水试验时，渗透系数 K 按附录 B 进行计算；采用钻孔法进行静水头压水试验时，透水率值的计算宜依据 DL/T 5148 的规定进行。

6.6.4.1.8 高压喷射灌浆墙整体效果的检查可在其下游侧布设测压管，观测和对比该测压管与上游水位差。

6.6.4.1.9 高压喷射灌浆墙防渗工程的质量应结合分析施工资料 and 检查测试成果，综合评定。

6.6.4.2 工程验收

6.6.4.2.1 高压喷射灌浆工程应进行单孔质量检验、单元工程质量评定和分部工程（或竣工）验收。

6.6.4.2.1 高压喷射灌浆分部工程的验收应提供的文件和资料：设计说明书、图纸、施工技术要求及设计修改通知、施工原始记录、成果资料、检验测试资料、施工报告或施工技术总结、质量检查记录、单元工程验收资料、重大质量事故报告等。

6.7 水泥搅拌桩墙施工及质量控制

6.7.1 施工流程

6.7.1.1 水泥搅拌桩墙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整体性、水稳性的桩柱体，以达到止水防渗的目的。

6.7.1.2 水泥搅拌桩墙适用于正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、饱和黄土、素填土、粘性土、无流动地下水的饱和松散砂土。

6.7.1.3 目前常用三轴搅拌机进行施工，三轴深搅桩施工工艺流程详见图 14。

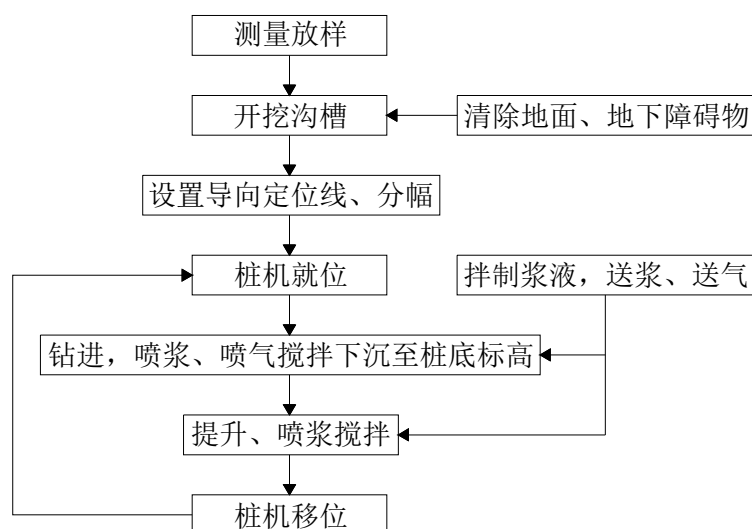


图 14 三轴搅拌桩施工工艺流程图

6.7.2 施工准备

6.7.2.1 施工准备阶段主要进行地块平整、施工测量放样、确定施工机具设备、数量，确定施工材料等。

6.7.2.2 施工场地应平整，低洼时应回填素填土，施工工作面高程应高于设计桩（墙）顶高程 0.3m~0.5m；施工前进行施工测量放样。

6.7.2.3 施工前应做好施工机具准备，并进行机械组装和试运转。机具设备包括：深层搅拌机、起重机、水泥制配系统、导向设备及提升速度量测设备等。应根据工程地质条件与设计参数选用不同形式或功率的水泥搅拌设备，搅拌头翼片的枚数和宽度、翼片与搅拌轴的夹角、搅拌头的回转数、提升速度应相匹配；注浆泵的额定工作压力宜大于 0.5MPa，排浆量应满足施工工艺参数需要，工作流量应可调节。

6.7.2.4 施工使用的固化剂和外掺剂，应通过室内试验确定满足工程设计指标要求的掺入比。水泥宜选用强度等级 32.5 级及以上的普通硅酸盐水泥，水灰比为 0.45~0.55；外掺剂如木质素磺酸钙，三乙醇胺等根据需要掺加，掺入量应通过试验确定。

6.7.3 工艺试验

6.7.3.1 在施工前应根据设计要求选择有代表性的地层进行工艺试验。试验内容应包括：搅拌桩机钻进深度，桩底高程，桩顶高程；水泥浆液水灰比；搅拌桩机转速、下钻和提升速度；注浆泵压力；输浆量及每延米桩体注浆量；冲水或注水下钻，复搅复喷及其部位等。

6.7.3.2 搅拌桩墙应形成轴线长为 3m~5m 墙体。

6.7.3.3 工艺试验完成 7d 后，应进行浅部开挖，观察桩体均匀性，检测桩径、墙厚、桩位偏差及桩（墙）间搭接等是否满足设计要求。

6.7.4 施工作业与质量控制

6.7.4.1 三轴搅拌

三轴深搅桩应采用“一次搅拌下沉、一次提升工艺”，施工作业示意图见图 15。

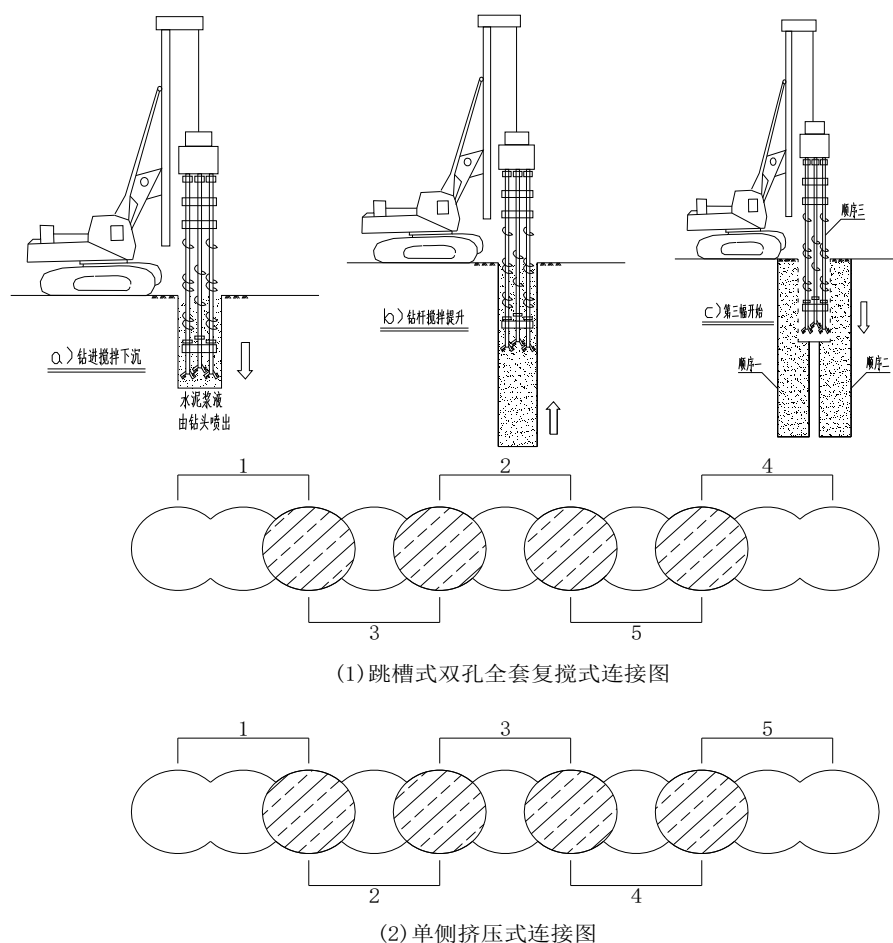


图 15 三轴搅拌桩施工示意图

6.7.4.2 放样、钻机设备就位

进行桩位放样，钻机就位后，应平整，确保施工过程中不发生倾斜、移动。应注意保证机架和钻杆的垂直度，其垂直度偏差不得大于 1.5%。施工中应采用吊锤观测钻杆的两个方向垂直度和用平水尺测量机架的调平情况，如发现偏差过大，及时调整。

6.7.4.3 制备水泥浆

应按设计确定的配合比拌制水泥浆，待压浆前将水泥浆倒入集料斗。

6.7.4.4 预搅下沉

应待搅拌机的冷却水循环正常后，启动搅拌机电机，放松起重机钢丝绳，使搅拌机沿导架搅拌切土下沉，下沉速度可由电机的电流监测表控制（一般为 0.38~0.75m/min），工作电流应不大于 40A。搅拌机下沉时开启注浆泵将水泥浆压入土层中，边喷边旋转。搅拌机预搅下沉时，不宜冲水；当遇到较硬土层下沉太慢时，方可适量冲水，但应考虑冲水成桩对桩身强度的影响。搅拌时不应出现搅拌桩头未到桩顶浆液已拌完的现象。一旦因故停浆，为防止断桩和缺浆，搅拌机应下沉停浆点以下 0.5m，待恢复供浆后再喷浆提升。

6.7.4.5 提升搅拌、重复上、下搅拌

6.7.4.5.1 搅拌机下沉到达设计深度后，开启注浆泵将水泥浆压入土中，边喷边旋转，同时应严格按照设计提升速度提升搅拌机（一般为 0.3~0.5m/min）。成桩要控制搅拌机的提升速度和次数，使连续均匀，以控制注浆量，保证搅拌均匀，同时泵送应连续。

6.7.4.5.2 搅拌机提升至设计深度的顶面标高时，集料斗中的水泥浆应正好排空，为使土和水泥浆搅拌均匀，再次将搅拌机边旋转边沉入土中，至设计深度后再将搅拌机提升出地面完成一根柱状加固体，外形呈现“8”字形。

6.7.4.6 清洗

应向集料斗注入适量热水，开启注浆泵、清洗全部管线中的残存水泥浆，直到基本干净，并将粘附在搅拌头上的杂物清洗干净。

6.7.4.7 移位

重复（1）~（6）步骤，再进行下一根桩的施工。一根接一根搭接，即成壁状加固体，几个壁

状加固体连成一片，即成块状。

6.7.4.8 施工质量控制

6.7.4.8.1 深层搅拌法施工质量控制应以过程控制为主，施工过程中应保证机具平稳，并严格控制垂直度、回转速度、提升速度、水泥浆液浓度、供浆流量等参数，保证掺入比满足设计要求且搅拌均匀。

6.7.4.8.2 水泥质量应符合 GB 175 规定。搅拌水泥浆液所用水应符合混凝土拌和用水要求。选用水泥的强度等级不得低于 32.5 级，并应按批次做质量检测。

6.7.4.8.3 根据土质条件和工程要求选用具有早强、减水作用的外加剂时，外加剂产品应有生产许可证和产品合格证，并应严格按室内试验和现场试验确定的外加剂种类和用量进行控制。

6.7.4.8.4 搅拌设备应由有资质的生产厂家生产，应配备经计量认证的监测计量仪器；搅拌叶片直径每个单元工程应检测一次，偏差应控制在 3% 以内。回转速度、提升速度偏差应控制在 5% 以内。

6.7.4.8.5 单桩施工搅拌桩的垂直偏差不得超过 1%，桩位偏差不得大于 50mm；有搭接要求时垂直度偏差不得超过 0.5%，桩位偏差不得大于 20mm。垂直度及桩位偏差每个机位均应检测。

6.7.4.8.6 成桩直径和桩长应不小于设计值。对于防渗墙施工，在考虑垂直度偏差、桩位偏差达到允许的最大值时，应能保证墙体有效墙厚满足设计要求。

6.7.4.8.7 水泥浆材料配制称量误差应控制在 1% 以内。水泥浆存放时宜控制浆体温度为 5℃~40℃，当气温在 10℃ 以下时浆液存放不应超过 4h，气温在 10℃ 以上时，不应超过 3h。超过存放时间时，应作弃浆处理。

6.7.4.8.8 搅拌机喷浆提升（下沉）速度、回转速度应符合施工工艺要求。施工中应定时检查计算掺入比，发现不满足规定时应及时修正。

6.7.4.8.9 施工过程中应详细记录搅拌钻头每米下沉（提升）时间、注浆与停浆的时间。记录深度误差不得大于 50mm，时间误差不得大于 5s。

6.7.5 工程质量检验与验收

6.7.5.1 工程质量检验

6.7.5.1.1 施工完成后，应对墙体深度、墙体抗压强度、渗透系数、允许比降、墙体有效厚度，以及墙体均匀性、完整性、连续性等指标进行检验。

6.7.5.1.2 对于搅拌桩墙可采用如下方法进行质量检验：

a) 钻孔检查。成墙后沿墙体轴线布设检查钻孔。通过所取芯样对墙体均匀性、完整性、连续性进行评价，利用芯样进行渗透系数、允许比降等室内试验。堤防工程每 300m~500m 抽检一孔，不足 300m 也应布设一孔，坝体防渗墙和挡墙可适当加密；取芯后的钻孔应采取可靠措施封填。

b) 开挖检查。沿墙体轴线布设开挖检查点，每处开挖长度 3m~5m、深 2.5m~4.0m，检查墙体完整性和均匀性、桩体间连接质量和墙体厚度，并取样在室内进行渗透系数、允许比降等试验。堤防工程每 500m 开挖一处，不足 500m 也应布一处。坝体防渗墙可适量布设开挖检查点。

c) 无损检测。必要时可利用无损检测方法对墙体连续性、完整性进行检查。在无损检测中发现异常的部位，应采用钻孔取芯法或开挖进行验证。

d) 原型观测（安全监测）成果分析。必要时，可进行原型观测，利用布设的安全监测设施监测的成果资料，对墙体整体防渗效果及位移变形进行综合分析。

6.7.5.1.3 搅拌桩质量检查项目主要包括渗透系数、桩顶高程、桩径、搭接、桩长，其中渗透系数、桩顶高程、桩径、应满足设计要求；搭接应满足最小有效墙厚要求；桩长要求不小于设计桩长。

6.7.5.2 工程质量验收应具备下列文件和资料：

a) 工程勘察、设计资料；

b) 施工过程记录、质量检查及工序验收资料、各种原材料试验资料、水泥浆试验资料、室内掺入比试验资料、现场试桩资料、原型观测资料、钻孔检查资料、开挖检查资料；

c) 施工大事记、施工质量自检及评定记录、施工质量缺陷记录、缺陷分析及处理结果、质量事故处理报告、竣工报告及竣工图、工程质量检测报告、其他有关资料。

6.8 渗透反应墙施工及质量控制

6.8.1 施工流程

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。施工流程包括土体挖掘和反应材料回填两部分。

6.8.2 施工准备

6.8.2.1 施工准备阶段主要进行地块平整、施工测量放样、确定施工机具设备、数量，确定施工材料的种类和数量等。

6.8.2.2 施工材料主要包括零价铁、双金属和新型的反应介质（如陶瓷状铁泡沫、胶状铁等）。首先应查清研究地区的背景资料，主要包括地下水渗流特征、地下水中有机的组成与浓度、含水层类型、地质结构等，然后选择合适的反应介质。

6.8.3 工艺试验

6.8.3.1 工艺试验，即可处理性试验，确定 PRB 的设计参数。反应介质的初步筛选可以通过批量试验进行，对初步选定的一两种候选介质可采用柱试验进行比较和最终确定。柱试验比批量试验更具有动态场的代表性，而且可以提供更准确的设计信息。可以确定污染物的半衰期和停留时间。建议使用从地块获得的地下水做柱试验，以取得具有代表性的设计数据。

6.8.3.2 试验内容应包括反应墙体深度、宽度、长度，反应材料，反应时间等。

6.8.4 施工作业与质量控制

6.8.4.1 PRB 的施工包括两部分，即土体的挖掘和反应材料的回填（包括漏斗——通道系统中漏斗区材料的回填）。

6.8.4.2 土体的挖掘方法应考虑污染区的地质条件、污染状况、地上和地下建筑、施工过程中废弃物的产生与处置以及对施工人员健康与安全的影响因素等方面。施工方法包括传统施工方法（如反铲挖掘、板桩墙和泥浆墙）和创新方法（如沉箱和喷射）。

6.8.4.3 施工方法的技术可行性和成本在很大程度上取决于需要达到的地下深度，弱透水性岩体的深度是决定在特定地块选择施工方法的主要因素。岩土方面的考虑，如是否存在岩石或高度固结

沉积物，也可能会影响采用技术的可行性。在 PRB 的埋藏深度不深时，宜采用挖掘机施工或者履带式连续挖掘方法，也可采用板桩、地沟箱、螺旋钻孔等挖掘方式。当挖掘深度大于 10 m 时，一般采用泥浆墙法、连续打桩、水力压裂、高压喷射、深土混合等方法实施。

6.8.5 质量检验与验收

PRB 建成后，应对反应墙的性能进行长期监测和运行管理。监测应在 PRB 上下游及 PRB 内布置地下水监测井观测水位深度变化，并周期性地监测相关的水文地质化学参数、流速等。监测井的布置要保证能够捕获污染羽流的运动方向，因此应在浓度较高或接近反应墙的位置集中布置监测井。常用的监测指标有目标污染物、降解中间产物、ORP（氧化还原电位）、pH 值、Eh（氧化还原电势）、BOD₅、COD 等。运行维护相对简单，运行过程中应在长期监测的基础上对反应介质进行定期更换。

7 覆盖阻隔和水平阻隔工程施工及质量控制

7.1 挥发性有毒有害气体阻隔技术

7.1.1 一般规定

7.1.1.1 挥发性有毒有害气体阻隔技术应采用工程措施改变气体的迁移途径，避免地下挥发性气体进入建筑物空间，防止通过呼吸途径危害人体健康。

7.1.1.2 表层覆盖应建设在地表防止污染物挥发进入大气，表层覆盖将导致土壤气体沿着覆盖层底部横向迁移。

7.1.1.3 表层覆盖阻隔技术宜与其它技术配合使用，提高控制效率。

7.1.1.4 表层覆盖阻隔应配套建设气体收集系统。

7.1.1.5 采用的阻隔层应足够厚，且在正常施工事故下依然牢固。

7.1.1.6 应开展全面的质量控制来最大程度地降低阻隔层的损坏。应确保阻隔层的边缘、嵌入位置、结合处的密封性，安装后应测试屏障的完整性和性能。同时，应制定阻隔层失效情况下的应急措施。

7.1.2 基于建筑底板的气体导流措施

7.1.2.1 一般规定

基于建筑底板的气体导流措施主要包括被动式通风、建筑底板（主动）减压、建筑底板加压等。

7.1.2.2 被动式通风

7.1.2.2.1 被动式通风应在建筑底板下设置通风层让土壤气体在自然扩散梯度（由于建筑物下面土壤气体积聚所致）和压力（热气流或风所致）梯度下沿着建筑物轮廓横向移动。

7.1.2.2.2 通风层应是高渗透性的，被动式通风层应具有足够的透气性，能够使土壤气体畅通的横向迁移。

7.1.2.2.3 常用的通风层材料包括砂或砾石（即不会损坏隔膜的无规则材料），有足够气体渗透率的非织造土工织物或土工格栅等；安装时要确保混凝土和细粒土不阻塞薄土工合成材料的孔隙。

7.1.2.2.4 如果地下水位较高或地面排水问题导致水饱和，则通风介质不能正常工作。

7.1.2.2.5 被动式通风应配套分布式气体收集管道系统。多孔收集管道通常设置在通风介质外围或穿过通风介质，用于收集土壤气体并将其输送到建筑外的排放点。在需要的情况下，可额外增加风扇以满足性能目标。

7.1.2.3 建筑底板（主动）减压

7.1.2.3.1 底板（主动）减压系统应从建筑底板下方抽提土壤气体，并在某一高度（高于室外呼吸区且远离窗户和空气供入口）将其排放到大气中。

7.1.2.3.2 现有建筑中，底板（主动）减压系统应在现有建筑底板上切割一个或多个孔，从建筑底板下方开挖一个或多个土孔，并将垂直抽吸管道放置在孔中，然后将管道连接在一起，接到一个风扇上。这些管道将从建筑底板下抽吸土壤气体并将其排放到户外。

7.1.2.3.3 新建建筑中，应在建筑底板下设置渗透性通风层和被动阻隔层提高系统的工作效率，实质上是扩大抽吸的区域并减少抽吸坑的数量。

7.1.2.4 建筑底板加压

建筑底板加压系统与底板（主动）减压系统相似，但风扇用于推动空气进入土壤或建筑底板的通风层，使土壤气体从地下迁移到建筑物的侧面。

7.1.3 低渗透膜结合气体导流措施

7.1.3.1 膜减压

膜减压技术应用隔膜代替建筑底板使土壤减压。不透水膜覆盖地下狭小空间暴露的泥土表面，而减压系统从隔膜下方提取土壤气体，并防止其进入上方的空间。

7.1.3.2 应用条件

当膜直接放置在低渗透性土壤上时，膜下土壤气体管道应采用穿孔进气管或具有多个抽吸点的吸管系统。膜应在基础墙的所有边缘或墙脚及任何穿过膜的管道位置密封，并具有足够的松弛度，以防止膜在压力下撕裂。由于膜很容易被损坏或在边缘失去密封性，应定期检查隔膜，或进行其他性能测试。

7.1.4 建筑增压/暖通空调优化

设计暖通空调时，应进行适当的压力测试和监测，以确保整个建筑内能够维持足够的正压力以抵制气体入侵。

7.2 堆场（水）污染阻隔覆盖技术

7.2.1 施工准备

施工准备阶段主要进行地块平面布置，确定施工机械类型、数量，确定施工材料数量和施工人员人数等。

7.2.2 施工作业

7.2.2.1 施工流程

堆场污染阻隔覆盖技术施工流程见图 16。

7.2.2.2 堆体地表重塑

通过对堆体进行地貌重塑，进行削坡开级，形成台阶、坡面和排水系统，使坡面便于下一步隔离层施工，同时通过地表整形使堆体保持稳定，不产生滑坡现象。堆场覆盖物表面坡度一般不超过 33%。标高每升高 3~5m，应建造一个台阶。台阶应有不小于 1m 的宽度、2~3%的坡度和能经受暴雨冲刷的强度。封场覆盖系统堆体顶面坡度应不小于 5%；当边坡坡度大于 10%时宜采用台阶式收坡，台阶间边坡坡度不宜大于 1:3，台阶宽度不宜小于 2m，高差不宜大于 5m。

7.2.2.3 隔离层敷设

7.2.2.3.1 覆盖系统设计目标包括：物理稳定性满足抑尘和防止水土流失的要求，对风和水造成的堆体侵蚀发挥可靠的屏障作用，防止动植物与废石物料直接接触。化学稳定性应满足控制氧气或水以及其他介质进入堆体的要求，通过减少渗入量控制渗滤液的流出。为防止地块直接暴露和雨水渗入堆体内，封场时表面应覆土二层，第一层为阻隔层，可覆黏土亦可用人工隔离材料，防止雨水渗入固体废物堆体内；第二层为覆盖层，覆天然土壤，以利于植物生长。

7.2.2.3.2 封场时表面可覆天然黏土阻隔层，覆 20~45cm 厚黏土并压实，黏土层压实度不得小于 90%，防止雨水渗入固体废物堆体内；黏土层在投入使用前应进行平整压实。黏土层基础处理平整度应达到每平方米黏土层误差不得大于 2cm。

7.2.2.3.3 人工复合隔离材料包括中和层、水分阻隔层、吸附层和基质层，形成稳定的隔水层，耐酸碱度高、不易分解。采用土工膜作为防渗材料时，土工膜应符合 GB/T 17642、GB/T 17643、SL/T 231、GB 50290 的相关规定。土工膜膜下黏土层基础处理平整度应达到每平方米黏土层误差不得大于 2cm。土工膜分段施工时，铺设后应及时完成上层覆盖，在垂直高差较大的边坡铺设土工膜时应设置锚固平台，平台高差不宜大于 10m。

7.2.2.3.4 种植层宜采用天然土进行覆盖，厚度 15~20cm。

7.2.2.3.5 堆场坡面宜恢复为灌木林地或草地，植物一般以浅根性灌木或草本为主。

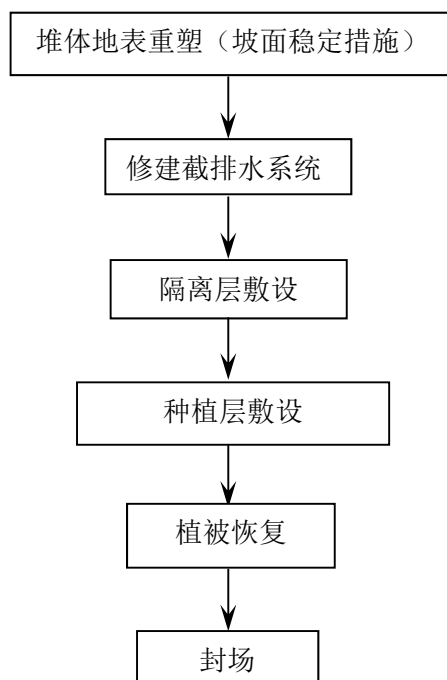


图 16 堆场（水）污染阻隔覆盖施工流程图

7.2.3 质量检验与验收

7.2.3.1 阻隔层铺设的土工膜应焊接牢固，达到规定的强度和防渗漏要求，符合相应的质量验收规范。

7.2.3.2 封场覆盖系统应进行滑动稳定性分析，典型无渗压流和极限覆盖土层饱和情况下的安全系数设计中应采取工程措施，防止因不均匀沉降而造成防渗结构的破坏。

7.3 水平阻隔技术

水平阻隔技术主要有混凝土水平阻隔、黏土水平阻隔、柔性水平阻隔技术等：

a) 混凝土水平阻隔技术是用混凝土作为阻隔层，实现防渗漏的目的，要求采用防渗混凝土进行施工。

b) 黏土水平阻隔技术是用压实黏土作为阻隔层，一般要求压实黏土渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，压实黏土厚度不得小于 2m。

c) 柔性水平阻隔技术是在地块底部或顶部铺设或喷涂具有防渗或防止 VOCs 挥发的土工材

料，从而起到阻止污染物渗漏或 VOCs 挥发的作用。

混凝土水平阻隔的工程施工及质量控制宜参照 GB/T 50934，黏土水平阻隔和柔性水平阻隔工程施工及质量控制宜参照 CJJ 113。

8 阻隔工程验收及维护管理

8.1 监理验收

8.1.1 土建工程验收应按 GB 50300、GB 50202～GB 50205 及相关验收规范执行。

8.1.2 安装工程验收应按 GB 50231、GB 50236 和有关规定执行。

8.1.3 工程竣工环境保护验收应执行《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》和行业环境保护验收规范。

8.1.4 建设单位应结合试运行组织具备相应资质的性能测试机构和监测机构，并提交性能测试报告和工程质量验收报告。

8.2 监测评估

8.2.1 一般规定

8.2.1.1 针对临时性阻隔墙：高压喷射灌浆墙、搅拌桩墙、搅喷桩墙可不考虑长期监测评估。

8.2.1.2 针对永久性阻隔墙：阻隔墙施工完成后应对三个要素进行监测：阻隔墙流出（污染）、阻隔墙的流入（渗滤液）、埋设维护。

8.2.2 监测因子与方法

8.2.2.1 监测因子包括地下水水质、水头、水压测试、物理取样和分析、地表水水质、沉降与土应力监测、测斜仪和阻隔墙的移动等，如发现异常，应确认出现异常的原因，并及时对其进行维护。

8.2.2.2 监测方法见表 5。

表 5 工程阻隔性能监测方法

序号	参数	监测方法	用途	备注
1	潜水面(地下水位)	监测井	产生第 1 含水层或滞水面的水力梯度	监测区域取决于观测间隔
2	地下水水头	振弦, 气动及立管压力计	产生水力梯度和地下水流速	根据渗透系数测算流速; 需要有建立标高监测点的知识
3	地下水中的化学组分浓度	地下水样品的有机和主要无机成分分析	建立背景浓度和浓度梯度及渗漏探测	对于复杂地质环境来说, 得到代表性的背景值较为困难
4	化学组分浓度的地下分布	电子和声学探测	识别工程阻隔的缺口及优先地下水流途径	实际中应用较少
5	化学组分浓度分布范围的初步预测	地球物理调查 (电阻率、电磁及探地雷达)	识别并描述特定污染物在地下水中形成的污染羽	实际中应用较少
6	土壤的体积含水量	时域反射法	直接判断湿润界面, 并通过渗透系数—土壤体积含水量及土壤吸力—土壤体积含水量关系得到非饱和含水层的渗透系数 k 及土壤吸力	提供了一种直接测量水含量的方法, 另外间接测量土壤吸力 (见 7) 建立土壤—水关系曲线也看得到水含量
7	土壤吸力	石膏块、干湿计、张力计及虹吸浓度计	产生虹吸梯度, 推断非饱和和水流下的渗流	不同的测量仪器得到的土壤吸力范围也不同。
8	通过阻隔墙的渗透	测渗计 (暗渠)	得到填充物放置前后阻隔墙底部的渗流速率及覆盖物的渗流速率	测量精度与边界条件有关

序号	参数	监测方法	用途	备注
9	气相组分浓度 计通过覆盖系 统的流速	气相样品分析 可以使用手持 式仪器或通量 箱	判断气体排放物的数量与 质量及空气质量	对于复杂的地理空间模型来 说，需要分析下风向的测量 值，该值可通过示踪试验得 到；通量箱得到的点测量值并 不能捕捉气相组分的散发方 式；结果并不可靠
10	气体收集系统 中的气相组分 浓度	设置在钻孔口 的地下探针	得到气体组成，识别释放 物，建立浓度梯度	可直接评价气体收集系统性 能，间接评价覆盖系统性能
11	主内衬的渗滤 液水头	振弦测压仪及 集水坑中的液 位测量仪（利用 下拉式电阻探 针）	评价渗滤液收集及去除系 统的性能	除集水坑以外的测量数据几 乎没有，尽管内衬的振弦测压 仪在某些案例中效果较好
12	渗滤液收集及 去 除 系 统 LCRS 及渗滤 液 检 测 系 统 LDS 的体积渗 漏	根据系统不同 可选择泵吸量 或流量计	评价 LCRS 及主内衬系统 的有效性	可间接评价覆盖系统、LCRS 有效性、内衬完整性及堵塞情 况
13	LCRS 持续性	抽水试验和染 色试验	识别 LCRS 堵塞情况	实际中应用较少
14	渗滤液组分浓 度	有机和无机渗 滤液样品的化 学分析	识别其成分组成并评价污 染物的质量通量及阻隔墙 系统的分解能力（即渗透	对于渗滤液成分而已该 方法可能产生误导，因为在 内衬系统内渗滤液组分会发

序号	参数	监测方法	用途	备注
			系数)	生化学转化
15	防渗膜连续性	电子渗漏探测 (利用导电防渗膜或在防渗膜下放置栅网)	能判断防渗膜缺陷的位置及频率	通常仅用于工程质量保证CQA中,当土壤或废料覆盖在防渗膜上超过1m,该技术效果较差
16	沉降(表面及深层)	调查标记、沉降岔口及伸缩仪	判断覆盖系统沉降	评价覆盖系统沉降性需要总沉降及不均匀沉降两方面
17	合成阻隔墙成分及土壤温度	热电偶	估计土工合成材料的服务周期,判断热力梯度,进行热力及水分转移分析	从历史上来说,该技术在实际中应用较少。但从最新报道的现场研究发现该测量技术是很重要的
18	垂直阻隔墙连续性	地球物理方法,泥浆墙导水系数、水头及阻隔墙内外组分浓度的现场测量	识别垂直阻隔墙的缺陷	地球物理方法具有极大的应用潜力,但目前实际中应用较少;通过对现场已修复样品的实验,导水系数测量主要用于CQA
19	垂直阻隔墙渗漏检测	安装在垂直渗透墙中部的井、排水层	判断渗漏量并由此评价垂直阻隔墙性能	该技术结果具有争议;实际中应用较少;需要在阻隔墙中设置收集和去除系统;需要对阻隔墙半厚度的完整性进行评价

8.2.3 监测周期与频率

8.2.3.1 应根据修复作业周期和时间、实际操作过程环境影响强度、污染物排放特点、周边敏感受体反应情况及地块特定条件等具体确定监测周期与频率。

8.2.3.2 设计说明中应当说明阻隔措施的运行与维护要求、监测方法和监测频次，以确保达到最佳的阻隔效果。包括：

a) 整个阻隔措施运行期间监测频次的变化；

b) 在监测与维护期间获得的数据或信息的基础上，对监测频次进行评价和必要调整，如遇突发事件（例如洪水和地震）应进行非常规检查以核实系统性能。

8.2.3.3 地下水监测应包括阻隔工程实施后 3 年内至少一个连续水文年的枯、平、丰水期地下水水质动态监测资料。

8.2.4 评估方法

监测结果应与相关标准或预先确定的监测目标进行比对分析，明确达标情况。监测单位应定期向环境管理部门汇报监测结果，报告内容包括：

a) 监测目标；

b) 监测人员与设备；

c) 监测结果（包括日期、时间，以及气候、地面状况等其他观测结果）；

d) 监测结果展示（可通过时间序列图、等值线图等展示）；

e) 结果分析（包括比对评估标准进行核对）；

f) 监测过程中若存在终止监测、变更监测（如变更监测频次）或采取其他行动等情况，应进行文字说明并解释原因。

8.3 维护管理

8.3.1 后期维护时限

后期维护所需的各项条件应在阻隔设计阶段根据地块污染特征、土地利用方向、环境敏感性、阻隔工程渗透特征等来确定。

8.3.2 维护内容

8.3.2.1 土壤阻隔覆盖技术的运行维护主要是定期维护阻隔体的完整性，指标包括：HDPE 膜破损情况、覆盖黏土层是否有大型植物生长、上下游地下水水质情况（监测污染土壤中特征污染因子）等。

8.3.2.2 阻隔系统的监测主要是沿着阻隔区域地下水水流方向设置地下水监测井，监测井分别设置在阻隔区域的上游、下游和阻隔区域内部。通过比较分析流经该阻隔区域内的地下水中目标污染物含量变化，及时了解阻隔区域对周围环境的影响，并适时作出响应，防止二次污染。

8.3.2.3 阻隔工程完成后，根据阻隔对象和阻隔工程情况，应对阻隔工程进行长期维护。

8.3.2.4 长期维护计划的主要内容包括：

- a) 确定阻隔工程特性；
- b) 明确保护措施的效果与规范；
- c) 明确需要采取的维护与监测活动；
- d) 制订应急预案。

8.3.2.5 长期维护措施包括：

- a) 建设保护系统，防止阻隔工程失效；
 - b) 限制土地利用避免对阻隔工程造成破坏。
-