

团 体 标 准

T/GIA XXX—2020

地下水污染管控或修复技术指南
漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）
（征求意见稿）

Technical guidelines for groundwater contamination control or remediation of
funnel and gate permeable reactive barrier

2020-XX-XX 发布

2020-XX-XX 实施

中关村中环地下水污染防控与修复产业联盟 发布

目 录

前 言	1
1 范围	2
2 规范性引用文件	2
3 术语与定义	2
4 总则	3
4.1 基本原则.....	3
4.2 主要任务.....	3
4.3 技术介绍.....	3
4.4 工作流程.....	4
5 场地环境调查	6
5.1 资料收集.....	6
5.2 污染调查.....	6
6 技术可行性评价	6
6.1 技术适宜性.....	6
6.2 技术经济性.....	6
6.3 次生环境风险评估.....	6
7 反应介质筛选	7
7.1 筛选原则.....	7
7.2 反应介质类型.....	7
7.3 反应介质有效性评价.....	8
7.4 反应介质寿命评价.....	9
8 工程设计与施工	10
8.1 工程概况.....	10
8.2 总体要求.....	10
8.3 工程设计.....	10
8.4 经费预算.....	12
8.5 工程施工.....	12
9 工程运行与维护	14
9.1 长期监测.....	14
9.2 运行维护.....	15
9.3 应急预案.....	15
附录 相关 PRB 工程案例	16

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准由中关村中环地下水污染防治与修复产业联盟提出并归口。

本标准负责起草单位：中国环境科学研究院

本标准参加起草单位：中国地质大学（北京），轻工业环境保护研究所，中持水务股份有限公司，南京万德斯环保科技股份有限公司，中铁科学研究院有限公司，北京涞澈科技发展有限公司

本标准起草人员：李瑞，席北斗，冯传平，张耀尹，郝艳，姜玉，陈男，翟天恩，高志永，张丽萍，刘军，戴昕，郭燕，舒中文，魏成武，黄元元，陈方鑫，杜向群，何琦，魏文侠，荣立明

本标准在实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中关村中环地下水污染防治与修复产业联盟标准委员会，以便修订。

联系邮箱：cngpc_org@126.com

地下水污染管控或修复技术指南

漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）

1 范围

本标准规定了漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）技术的工作流程、主要内容、要求、设计施工、运行监测等。主要内容包括污染场地调查、反应介质筛选、工程设计与施工三部分。

本标准适用于拟使用漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）的地下水污染修复工程。

本标准不适用于地下纵向施工深度大（ $>50\text{ m}$ ），地层渗透性强（渗透系数 $K_a \geq 10^{-3}\text{ cm/s}$ ）的污染场地地下水修复。

2 规范性引用文件

本标准的编制主要引用以下文件。凡是不注明日期的引用文件，其有效版本适用于本标准。

HJ/ 25.1 场地环境调查技术导则

HJ/ 25.2 场地环境监测技术导则

HJ/ 25.3 污染场地风险评估技术导则

HJ/ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）

HJ 682 污染场地术语

地下水污染修复（防控）工作指南（试行）

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1 可渗透反应墙 permeable reactive barrier, PRB

在受污染地下水水流方向建造反应墙，在墙体中填充反应介质，通过吸附、沉淀、化学和生物等作用去除地下水中的污染物。

3.2 漏斗门式可渗透反应墙 funnel and gate permeable reactive barrier, FGPRB

在受污染地下水水流方向建造低渗透性隔水墙（漏斗）和具有一定渗透能力的导水门，在导水门中填充反应介质，利用隔水墙控制和引导地下水流通过导水门，经反应介质吸附、沉淀、化学和生物等作用去除地下水中的污染物。

3.3 污染场地 contaminated site

通过调查和风险评估确认污染危害超过人体健康或生态环境可接受风险水平的场地。

3.4 地下水污染羽 groundwater plume

污染物随地下水移动和扩散时所形成的羽状污染区域。

3.5 目标污染物 target contaminant

在地下水环境中，浓度或数量已达到对生态环境和人体健康具有实际或潜在不利影响的，需要进行修复的污染物。

3.6 隔水墙 diaphragm wall

渗透性弱，用于阻隔和引导地下水污染羽流，形状似墙的地下工程结构。

4 总则

4.1 基本原则

4.1.1 针对性原则

漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）工程主要针对污染羽面积较大的地下水污染地块修复，确保发挥最大应用潜力，高质量完成修复目标。

4.1.2 可行性原则

综合考虑地下水污染区域水文地质条件、污染物特征、修复目标、经济成本、环境友好性等，结合室内试验筛选漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）反应介质，评估技术实施可行性，制定工程设计方案。

4.1.3 安全性原则

漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）工程的实施过程中应保证施工安全，避免对施工人员、周边人群健康害以及生态环境产生危害和二次污染。

4.2 主要任务

根据污染地下水所在场地的水文地质条件、污染物种类、污染物特征等的前期调查，确定修复目标，开展适宜性评价及试验，确定漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）反应介质、工程设计与施工等技术要求，制定修复方案，完成工程实施。

4.3 技术介绍

漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）技术是目前地下水污染原位修复技术中应用较为广泛的技术之一，构筑物主体主要由隔水墙、导水门和反应介质三部分组成（图 1，其中反应介质区形状和数量可根据实际场地情况调整）。该技术适用于污染羽面积较大的场地，在原位修复过程中，隔水墙将地下水流汇集流经导水门，从而使污染羽与反应介质充分接触反应，达到去除目标污染物的目的。

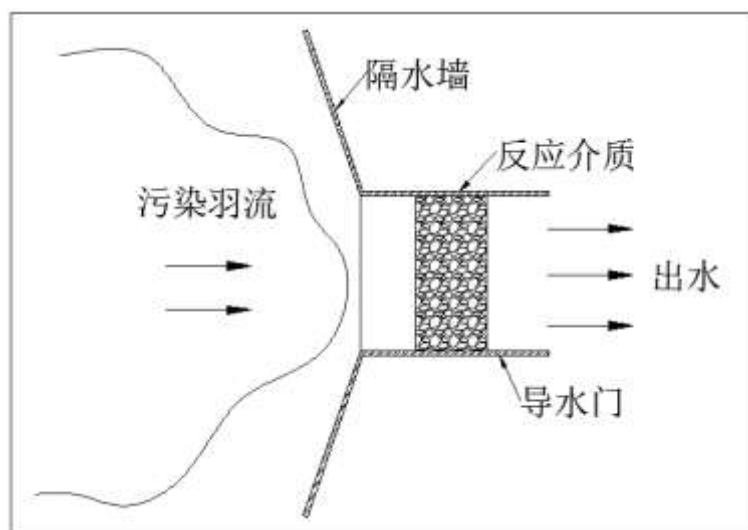


图 1 漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）

4.4 工作流程

漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）技术应用工程的一般工作流程为：前期准备，技术适用性初步评价，（室内）介质筛选、处理可行性评价，现场工程参数与施工工艺优化，工程设计，工程施工建设，工程效果评估，长期运行、维护与监测、关闭，详见图 2。

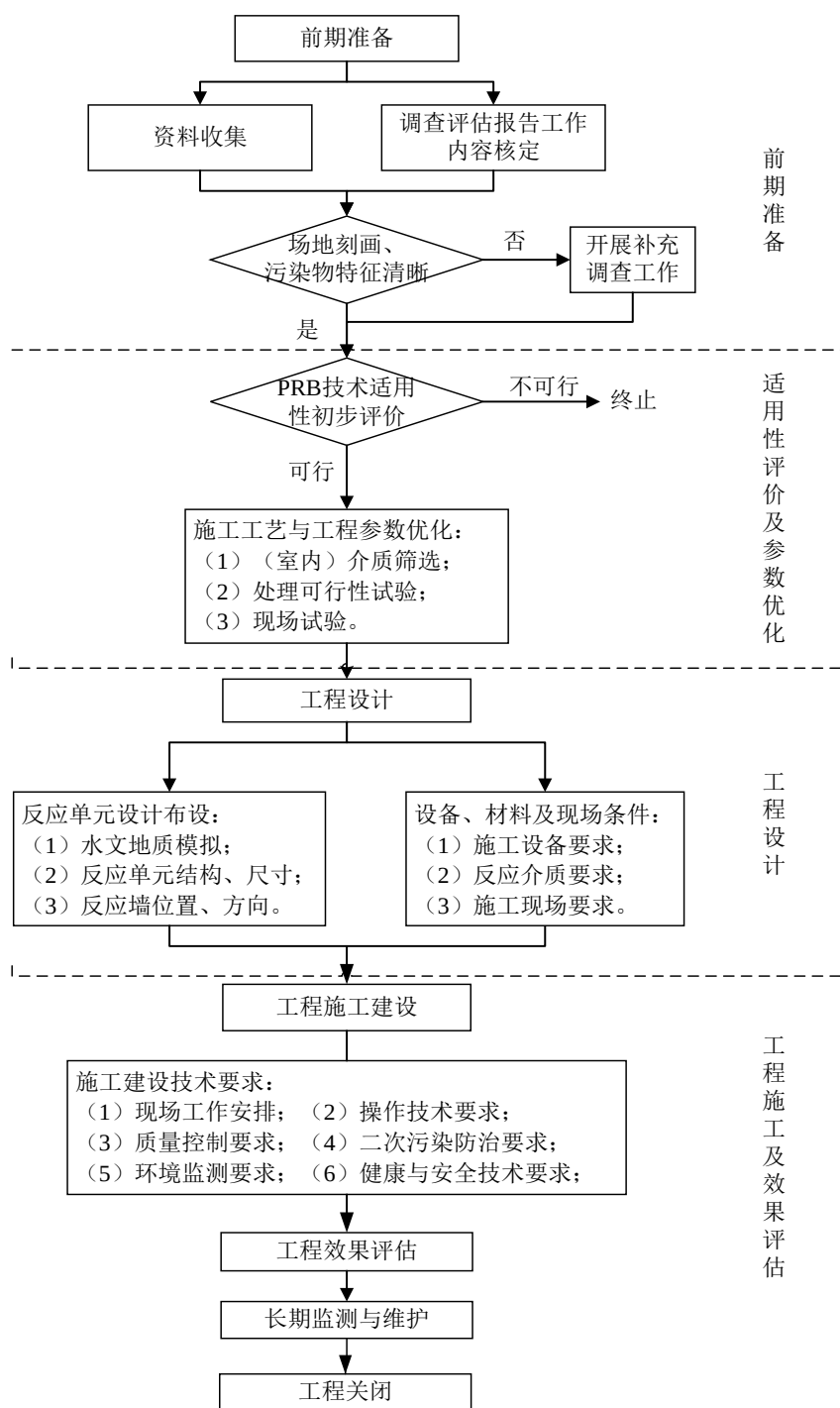


图 2 漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）工程工作流程

5 场地环境调查

5.1 资料收集

根据 HJ 25.1 对污染地下水所在场地进行环境调查,以资料收集、现场踏勘、人员访谈为主,资料收集主要包括场地利用变迁资料、场地环境资料、场地相关记录、有关政府文件以及场地所在区域的自然和社会信息。其中,场地所在区域的自然信息包括地形地貌、地下水分布、水文地质条件、气象资料等。

5.2 污染调查

参照 HJ 25.1 和 HJ 25.2,根据资料收集情况判断污染物可能的分布、制定现场采样方案、布设采样点、现场采样与检测,调查目标场地污染类型、理化性质、浓度、分布范围,为漏斗门式可渗透反应墙(FGPRB)筛选反应介质、确定主体尺寸提供依据。

6 技术可行性评价

6.1 技术适宜性

根据场地水文地质条件、污染物性质与分布特征、污染修复目标等,通过室内可行性评价及理论分析预判漏斗门式可渗透反应墙(FGPRB)技术的适宜性。

6.2 技术经济性

与其它地下水污染修复技术(如原位注入修复技术、原位生物处理技术、电力修复技术等)比较建设运行维护成本,确定经济、高效、安全的技术路线。

6.3 次生环境风险评估

风险评估主要涉及的内容有危害识别、暴露评估、毒性评估和风险表征等,参照 HJ 25.3 执行。评价工程施工运行对周边环境和人体健康可能产生的影响,并提出相应解决措施和应急预案。若工程的次生环境风险超出可接受范围,则考虑调整技术参数或更换其它修复技术。

7 反应介质筛选

7.1 筛选原则

7.1.1 反应兼容性和效果

考察反应介质对不同地下水污染物的去除效果，包括单位体积（或质量）反应介质去除目标污染物的能力、所需水力停留时间等。优先选择兼容性强、效果好的反应介质。

7.1.2 反应介质的稳定性和持久性

考察反应介质在地下水环境中理化性质的稳定性，如机械强度、溶解性、使用寿命等。优先使用理化性质稳定、修复效果持久的反应介质。

7.1.3 水力特性

考察反应介质在地下水环境中的渗透性，渗透性好的反应介质不易堵塞。通常，漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）反应介质的渗透系数（ K_p ）约为含水层介质渗透系数（ K_a ）的 10 倍。

7.1.4 经济成本

在达到污染修复目标的前提条件下，估算反应介质的制作采购成本、更换周期与成本，优选效果好、成本低、寿命长的介质。

7.1.5 环境友好

评估反应介质在运行过程中对环境及人体健康的风险，避免二次污染。

反应介质筛选评价指标参见表 1。

表 1 反应介质筛选评价指标

划分等级	适宜性			经济性	次生环境风险
	污染物去除效率	渗透性（ K_p ）	使用寿命（年）	建设及运行维护成本（元/吨）	二次污染
优	>90%	>10 K_a	>15	<1000	无
良	75%~90%	2 K_a ~10 K_a	10~15	1000~1500	较小
中	60%~75%	K_a ~2 K_a	5~10	1500~2000	一般
差	<60%	< K_a	<5	>2000	大

注：建设及运行成本包括漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）工程建设成本：土方建设费、填料购置费、设备购置费、安装费等；运行成本：人员工资及附加费、管理费、水电费、折旧费等。

7.2 反应介质类型

7.2.1 化学类反应介质

利用氧化还原反应转变污染物的价态或降解污染物，降低或消除污染物的环境毒性。

7.2.2 物理化学类反应介质

通过物理吸附、化学吸附、离子交换等，将污染物固定在反应介质的表面或孔隙中。

7.2.3 生物类反应介质

通过投加功能微生物材料或刺激土著微生物，利用生物反应去除污染物。

7.2.4 复合型反应介质

利用物理化学、化学和生物类修复介质的不同组合，去除污染物。

常见反应介质参见表 2，表中未涉及的反应介质类型需根据其他资料、室内试验等进行进一步验证反应机理及目标污染物。

表 2 PRB 常见反应介质

反应介质类型	常见反应介质	适用污染物
化学类反应介质	零价铁（ZVI）	重金属（Cr、Cd、Cu、As、Pb 等）、NO ₃ ⁻ 、NH ₄ ⁺ 、SO ₄ ²⁻ 、DDT 等
	纳米零价铁	氯代烃、苯等
	连二亚硫酸钠	重金属（Ni、Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、As、Cr、Hg 等）
物理化学类反应介质	活性炭	重金属（Cd、Cu、Zn 等）、DDT、BTEX、苯酚等
	沸石	重金属（Cr、Cd、Cu、As、Pb、Ni、Zn 等）、NH ₄ ⁺ 、石油烃等
生物类反应介质	秸秆、稻壳、木屑等	NO ₃ ⁻ 、BTEX、氯代烃、有机氯农药等
	过氧化钙、氧化镁等（释氧化合物，ORC）	NH ₄ ⁺ 、MTBE 等

7.3 反应介质有效性评价

7.3.1 批试验

在室内开展短期小规模反应介质有效性验证批次试验，在与实际场地地下水温度、pH、目标污染物浓度等相近的条件下，分别采用模拟地下水和实际地下水，验证污染物的去除效果及反应中间产物，确定污染物去除机理和反应介质投加量。注意设置平行对照试验。

7.3.2 柱试验

设计柱试验模拟地下水一维连续流动状态，验证污染物去除效果及反应中间产物，评价反应介质的渗透性、污染物去除能力和使用寿命，确定水力停留时间和反应介质填充参数（粒径、密度、有效孔隙度等）等。

柱试验反应装置一般为有机玻璃柱（对于有机污染物，有机玻璃柱应内衬特氟龙），根据需求设计柱体尺寸及取样孔位置。反应介质填充方式及混合比例等结合批试验结果确定，保证布水均匀。配制已知浓度天然地下水或实际地下水，利用蠕动泵匀速进水，一般采用上流式。试验期间，应记录地下水注入量、流出量、侧部各取样孔及出水口处的污染物浓度、氧化还原电位、pH 等指标。一般每 5~10 PV（PV 为有效孔隙体积数）分析测试一次污染物的浓度，直到污染物的浓度变化基本达到稳定。主要技术参数计算如下：

a) 水力停留时间

根据污染物降解的速率常数计算水力停留时间，如果污染物不止有一种，则停留时间由速率常数最小的污染物确定。

水力停留时间 t_R (h) 计算公式如下：

$$t_R = [2.303 \times \log(\frac{C_s}{C_0})] / k$$

式中

C_0 —污染物的初始浓度, mg/L;

C_s —地下水污染物修复的目标浓度, mg/L;

k —反应速率常数 (t^{-1}), h^{-1} 。

其中, 反应速率常数 k 以反应时间 (t) 的负一次方计。

7.3.3 渗流槽试验

设计渗流槽试验仿真模拟刻画实际场地地层岩性及地下水二维/三维流动状态, 进一步评价反应介质的实际运行效果, 确定工艺的实际施工运行参数。

渗漏槽试验装置一般为有机玻璃槽 (对于有机污染物, 有机玻璃槽应内衬特氟龙), 根据需求设计槽体尺寸及取样孔位置。槽内根据实际场地地层结构布置模拟漏斗门式可渗透反应墙及填充土壤、砾石等, 参考实际场地地下水流动状态布置进水方向及流速等, 试验应分别采用模拟地下水和实际地下水进行。主要技术参数计算如下:

a) 渗透系数 K (m/d)

$$K = \frac{vL}{\Delta H}$$

式中

v —出水口流速, cm/d;

L —可渗透反应墙沿地下水流向长度, cm;

ΔH —可渗透反应墙前后水头差, cm。

其中, ΔH 可通过压力计测定。

7.3.4 现场中试

应基于室内试验的结果, 进行现场中试技术效果的评价。从目标污染物去除效果、二次污染控制效果、污染物处理时间、污染物处理能耗、反应介质长期运行寿命等角度考虑反应介质的有效性。

7.4 反应介质寿命评价

漏斗门式可渗透反应墙 (FGPRB) 在运行过程中可能由于反应介质老化、副产物沉淀累积等, 引起修复效果不佳或反应介质孔隙空间被占据, 渗透性下降等问题。因此, 需对反应介质寿命进行评价, 以便及时补充或更新, 保持稳定良好的修复效果。寿命评价主要包括:

a) 物料平衡: 由化学反应方程式计算达成污染地下水修复目标对应消耗反应介质的量, 初步推断反应介质寿命:

$$t = \frac{A}{r}$$

式中

t —反应介质寿命, 年;

A —反应介质有效组分质量, kg;

r —保持目标去除效率时, 反应介质的平均消耗速率, kg/年。

b) 污染物去除效率: 根据反应介质上下游水质参数, 计算目标污染物去除效率:

$$N = \frac{C_0 - C_e}{M}$$

式中

N —目标污染物去除效率, $\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{kg})$;

C_0 —反应介质上游污染物浓度, mg/L ;

C_e —反应介质下游污染物浓度, mg/L ;

M —反应介质总质量, kg 。

c) 反应介质渗透性: 计算渗透系数(参考 7.3.3 渗透系数 K 计算公式), 判断漏斗门式可渗透反应墙(FGPRB)运行过程中反应介质渗透性变化。

8 工程设计与施工

8.1 工程概况

8.1.1 工程介绍

简单介绍工程基本情况(包括工程名称、建设单位名称等)、主要技术经济指标(包括用地指标、总建筑面积、概算指标、主要工艺技术指标、主要建材耗用量等), 说明工程服务及建设范围。

8.1.2 地下水污染调查评价结果

依据前期污染场地环境调查评价结果, 论述污染地块地质及水文地质特征、污染物种类、污染范围、深度和程度, 污染物量的大小。

8.1.3 确定修复目标

依据地下水的使用功能确定修复后的水质目标。

8.2 总体要求

8.2.1 一般性要求

a) 严格按工程设计图件放线作业, 如遇难以按设计要求施工或现场条件发生重大变化时, 应及时向业主和设计单位汇报, 设计变更决定下达后方可恢复施工;

b) 明确现场施工监理的责任, 遵循施工监理的现场整改决定, 保障工程质量优良;

c) 严格按工程设计有关环境污染防控的具体内容开展工作, 严防工程施工产生二次污染。

8.2.2 技术要求

a) 施工工作开展前应了解或调查作业点的地面、地下构筑物、构件情况, 避免造成一些不必要的损失;

b) 施工使用的主要原材料要现场验收、核对是否满足工程设计提出的要求和参数指标。

8.3 工程设计

8.3.1 地下水流场确定

在污染场地布设监测井，测量地下水水位，模拟地下水水流确定流场，绘制场地地下水流场图。

8.3.2 工程单元设计与布置

8.3.2.1 反应介质

根据污染场地的水文地质条件、污染羽空间分布特征、污染物特性，以及室内批试验、柱试验、渗流槽试验结果，设计漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）反应介质种类、配比、填充方式。

8.3.2.2 隔水墙

隔水墙应尽可能拦截污染羽，避免污染物从周边外泄。根据场地水文地质条件和造价成本，隔水墙可采用高密度聚乙烯（HDPE）柔性截水帷幕或水泥帷幕灌浆，截水帷幕底部的建设深度应至少位于弱透水层以下 0.20 m，外侧使用粘性土填实。拆模后应立即在隔水墙间假设支撑，支撑的水平间距一般为 1.50 m 左右，上下各一道。支撑可采用方木或角钢代替，当遇到不良地质时，适宜进行土体加固或采用深导墙。

隔水墙的厚度一般为 30~100 cm，两墙的间距和长度应根据前期污染羽调查、刻画、模拟，尽可能地涵盖污染羽流，为保证隔水墙的隔水效果以及受污染水体汇入反应单元内，隔水墙的角度应根据地下水流向进行设计，一般垂直于地下水污染羽的流向进行设置。

根据场地污染状况的调查结果，隔水墙的长度应覆盖污染羽的边界，更要保证污染物处理效率，隔水墙所呈现的角度原则与地下水流向垂直。

8.3.2.3 反应单元（区）

在设计漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）反应单元（区）时，需考虑地下水中污染物的浓度和类型、水流方向、水力传导系数、温度、填充介质的特征以及化学反应过程等因素。

反应单元（区）的体积应满足目标污染物通过反应单元处理后可达到的处理要求，由流量与污染物反应单元（区）内的停留时间决定：

$$V = Q \times T_w \times Z$$

式中

V —反应单元（区）的体积，L；

Q —水体在反应单元内的流量， m^3/d ；

T_w —水体在反应单元（区）内的停留时间，d；

Z —安全系数。

其中， Q 与反应单元内的水力传导系数正相关，可通过仪器测定。 T_w 设计值应充分考虑反应介质的处理能力。

8.3.2.4 系列工程布置及图件绘制

表3 工程单元设计过程需要考虑的因素

设计参数		备注
尺寸	◆ 位置 ◆ 方向 ◆ 渗透反应墙类型和配置 ◆ 长度和深度 ◆ 宽度	应提供渗透反应墙设计的基础，以及设计计算中使用的安全系数的合理性。 渗透反应墙相对于污染物羽流的位置。风险评估应考虑渗透反应墙下游任何污染物的环境归宿。

反应介质（化学成分，颗粒尺寸，表面积规格）	◆ 化学组分 ◆ 表面积 ◆ 颗粒尺寸 ◆ 介质密度 ◆ 渗透系数 ◆ 强度	该介质不应含有可能有害的其他潜在污染物（杂质）。 反应介质的预期使用寿命和更换频率。 供应养分，生物降解的氧化剂或电子供体。
漏斗（漏斗门的设计）	◆ 渗透系数 ◆ 强度	
构建	◆ 构建方法 ◆ 方法描述，性能准则 ◆ CQA ◆ 环境控制 ◆ 废弃物管理 ◆ 控制地表水进入渗透反应墙的措施 ◆ 报告（构建过程的记录）	应考虑在施工期间破坏隔水层的风险（例如，穿透下部隔水层的最小深度） CQA（测试的类型和数量）细节，以确保反应材料满足规格，材料以最佳密度放置，反应单元具有所需的体积； 允许更换反应材料的恢复措施。
运行和维护	如果观察到渗透反应墙的性能下降时，替换或修复反应材料	
监测计划	◆ 监测孔的位置 ◆ 监测孔的构建 ◆ 分析测试 ◆ 取样方法 ◆ 监测频率 ◆ 运行控制水位 ◆ 报告	
渗透反应墙拆除	停止监测的准则	一旦满足修复目标，应该给出渗透反应墙的处理细节

8.4 经费预算

施工经费预算应依据漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）整体施工工程量、施工定额（岩土工程定额）、反应介质材料供应量、地下水水质监测设备购置或租赁、人工成本、运行及监测、维护、验收等分项详细计算编制。

8.5 工程施工

8.5.1 施工方法

根据现场中试确定的开挖、反应介质填充方法描述，明确施工方法及技术要求。

8.5.2 施工组织

8.5.2.1 资质要求

施工单位应具备相应的施工资质，施工人员应具有相应资格。

8.5.2.2 组织结构

按照高起点、高标准；组织精干机构，选配精干人员，配置精干设备；达到进场快，安家快，开工快，形成施工规模快的“两高，三精，四快”原则设置施工组织机构，构建施工组织结构图。

8.5.3 机械设备

设备选型，说明工艺设备功能、技术参数、材质及防腐要求，或提出非标设备工艺方案及工程设备清单。施工设备的选择，主要从以下因素进行考虑：

- a) 设备名称、型号、性能要求、数量；
- b) 施工设备本身对环境影响较小；
- c) 施工过程不会导致污染物扩散；
- d) 设备的选择应满足时间性、经济性要求；
- e) 地面设施。

8.5.4 原材料及供应

- a) 名称、型号、性能要求、数量；
- b) 产品说明书、产品质量证明书、产品质量试验报告、质检部门的检测报告、有效鉴定证书等。

8.5.5 施工顺序与进度安排

- a) 施工工段划分；
- b) 施工顺序；
- c) 编制施工进度计划；
- d) 绘制甘特图。

8.5.6 施工监理

- a) 监理单位资质及监理人员要求；
- b) 现场项目监理组织机构；
- c) 监理方案框架：
 - 工程概况；
 - 监理工作的范围、内容、目标、依据；
 - 监理组织形式、人员配备及进场计划、监理人员岗位职责；
 - 工程质量控制；
 - 工程造价控制；
 - 工程进度控制；
 - 合同与信息的管理；
 - 组织协调；
 - 安全生产管理职责；
 - 监理工作制度和监理工作设施。

8.5.7 环境污染防治

8.5.7.1 环境监测方案

说明环境检测及监测项目、方法及检测频度要求。

8.5.7.2 二次污染防治方案

施工废水、废气、噪声、废渣等排放标准及处理处置方法，提出二次污染防治系统工程量及设备清单。

8.5.8 质量控制

- a) 施工技术规范、质量管理体系、质量控制和检验制度；
- b) 施工质量控制方案
 - 施工前质量管理：质量责任制、图纸会审、材料采购环节质量控制；
 - 施工中质量管理：施工材料及施工技术的管理、施工中的监督和检查管理；
 - 施工后质量管理：质量评定标准和办法，分项、分部工程、单位工程检查验收；

c) 监测质量控制方案

- 外检单位专业资质、设备、技术要求；
- 抽样检测方案。

8.5.9 安全生产

8.5.9.1 施工人员健康安全保护措施

分析工程建设和运行期的劳动安全（人身伤害）隐患、工作场所安全预防措施、作业人员安全预防措施、人员的劳动保护措施等。

8.5.9.2 文明生产措施

文明施工管理制度，文明施工管理体系，文明施工保证措施。

8.5.9.3 健康安全培训

人员安全生产教育和培训计划，事故应急处理预案与措施。

8.5.10 制度控制

协助有关主管部门制定和实施各项规定或制度等利用行政管理手段达到工程高效运行的目的：

- a) 制度控制区划分；
- b) 控制制度制定。

8.5.11 施工工程竣工验收

- a) 验收组织；
- b) 验收内容及方案；
- c) 验收结论。

9 工程运行与维护

9.1 长期监测

9.1.1 主要内容

9.1.1.1 有效性监测

根据《地下水污染修复（防控）工作指南》（试行），严格按照工程设计的监测位置、监测指标、监测因子、监测频率要求开展日常监测，按季度连续采样，采样周期不少于 8 个季度。监测项目包括污染羽流上下游和场地介质中的污染物、反应产物、相关地下水环境表征指标（pH、DO、ORP、NO₃⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻等）、二次污染物的浓度变化，污染物的自然衰减。

9.1.1.2 运行工况监测

对场地污染地下水范围、体积、水位和流场进行监测，评价漏斗门式可渗透反应墙工程运行情况，确保相关运行参数与设计的一致性。

9.1.1.3 趋势监测

分季度采样监测污染物浓度，每季度监测 1 次，一般持续 8 个季度。利用采样数据绘制趋势图结合统计学检验量化修复效果，利用数值模拟预测是否可达到修复目标。

9.1.2 监测方法

参考 HJ 25.1 和 HJ 25.2，结合污染场地水文地质条件和污染特征，确定监测项目，布设地下水监测点位，根据《地下水污染修复（防控）工作指南》（试行）制定监测计划，在监测周期内进行样品采集与分析，结合 GIS 等技术，评估整个

系统的运行效果。

9.1.3 效果评估

对比系统运行前后场地监测数据，定期进行效果评估，判断是否达到修复目标，系统运行是否正常、有效，并识别需要维修或调整的工程单元，以便及时更新反应介质，维护设备等。若修复过程中产生大量气体，则还需对挥发性有机污染物、爆炸下限（LEL）等参数进行连续监控，避免造成二次污染或发生爆炸等危险。依据监测数据和评估结果撰写结果报告，定期上报有关主管部门，征得有关主管部门同意后，定期向社会公布监测结果。

9.2 运行维护

漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）工程运行维护主要内容如下：

a) 根据日常巡查和监测资料，及时对漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）主体构筑物（隔水墙、导水门及反应介质）、监测井、抽水井等工程系统实施维护保养措施；

b) 评价反应介质性能变化和效果，制定反应介质更新方案，根据修复效果变化及时更换或清理反应介质。

9.3 应急预案

制定工程运行异常时紧急处理应急预案，当污染物浓度超过既定的修复目标或者下游监测井的运行控制浓度水平超过相关标准的要求，或者漏斗门式可渗透反应墙（FGPRB）中有明显的沉淀堆积，影响了水力传导性或反应介质的反应性时迅速启动应急预案，及时处理异常。

附录 相关 PRB 工程案例

1 场地环境调查

1.1 案例名称

某非正规垃圾填埋场地下水污染在线监测预警及修复示范工程。

1.2 项目概况

由于历史原因，该地区缺少正规生活垃圾无害化处理设施，生活垃圾主要运往垃圾填埋场、垃圾焚烧厂处理。随着城市发展生活垃圾产量不断增加，该垃圾填埋场作为附近居民生活垃圾的接纳场所，没有防渗、渗滤液处理、填埋气体导排等环保设施，存在地下水环境安全隐患。

1.3 水文地质条件

水文地质调查工作在填埋场及周边布设了工程钻孔 20 个，最大深度为 80.00 m，所调查的地层包含第四系全新统、上更新统及部分中更新统地层。本示范工程初步认为可能受垃圾填埋场堆体影响较大的含水层为第 I 含水组上部的潜水含水层及 50.00 m 以浅的第一层（底板埋深约 30.00 m）、第二层（底板埋深约 45.00 m）微承压水含水层。

本项目的重点为 21.00 m 以浅的潜水位，示范区内的潜水含水层主要为黏性含量较高的粉土层，渗透性较差，富水量差，该层中砂土不发育，仅以透镜体或薄层状出现。

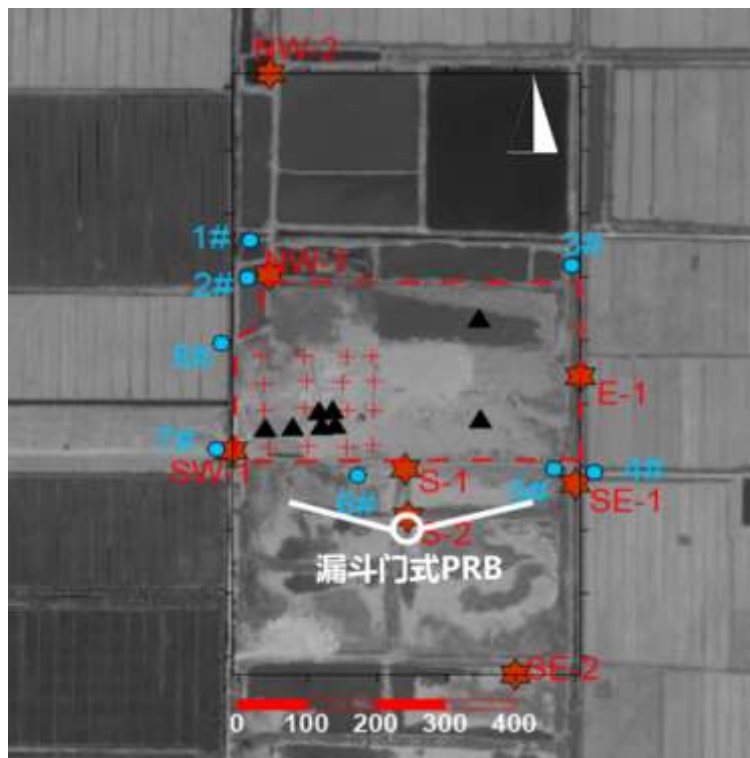
场地区域潜水地下水主要的补给源来自大气降水，主要的排泄形式为蒸发，也会通过越流补给下部含水层。

1.4 污染调查

对地下水调查井进行采样，以详细调查地下水污染，地下水修复工艺整体布设示意如图 3。填埋场周边潜水含水层中（15.00 m 以浅），填埋区域渗滤液氨氮浓度最高为 2358.00 mg/L，并呈向周边扩散趋势且主要向南扩散。填埋场周边地下水中，S-1 点氨氮浓度最高为 9.83 mg/L，是地下水 V 类标准（1.50 mg/L）的 6.6 倍，随着与填埋区域距离增加，氨氮浓度逐渐减小。

填埋场中硝酸盐氮浓度整体不高，平均为 29.00 mg/L，填埋场下游地下水中硝酸盐氮浓度最高为 0.89 mg/L。

该填埋场周边潜水含水层有机物污染主要来自于垃圾填埋区域，与氨氮的迁移趋势类似。填埋场内部 15.00 m 监测井中地下水 TOC 浓度高达 3490.00 mg/L；周边监测井中地下水 TOC 浓度最高为 11.13 mg/L，位于 S-1 号点。



—★—地下水监测井；—▲—场内监测井；—●—土壤采样点；
—+—垃圾填埋区域；—---—填埋场边界

图3 地下水污染修复工艺整体设计图

2 投资费用：

工程建设经费 242.41 万元。

3 工艺流程

本工程针对地下水中氨氮等特征污染物，采用间歇性曝气漏斗门式 PRB 地下水污染原位生物修复工艺，对填埋场南部污染地下水进行治理。其中 PRB 水质净化组件中的反应填料使用负载微生物后的颗粒状赤铁矿-沸石-淀粉混合物，混合填充介质的渗透系数为 $1.87 \times 10^3 \sim 5.52 \times 10^3 \text{ cm/d}$ 。填充之前使用微生物菌液对混合填料进行浸泡挂膜，微生物为稻田土进行淹水培养的铁还原工程菌种。经过 PRB 水质净化组件处理后的地下水，进入监测池，若出水达标则直接排放；如不达标，则回灌至前端地下水监测井循环处理。

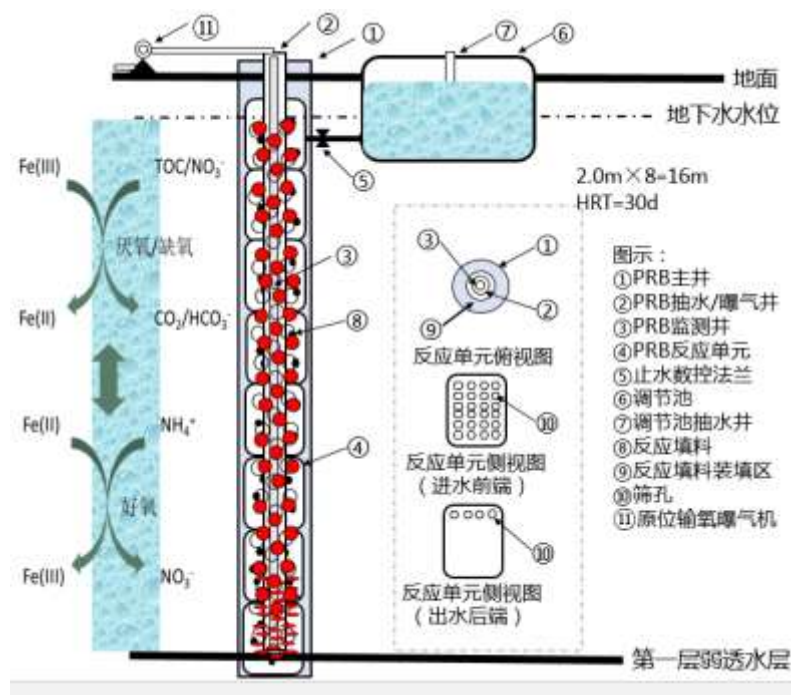


图 4 地下水污染修复工艺流程示意图

4 主要工艺运行及控制参数

4.1 隔水墙截水帷幕

本工程采用的间歇性曝气漏斗门式 PRB 地下水污染原位生物修复工艺中采用帷幕灌浆截水帷幕，其具体规格为 2.00 mm 厚度 HDPE 双毛面土工膜、6.00 mm 厚膨润土，单翼截水帷幕尺寸为 50.00 m×15.50 m。截水帷幕底部插入第一层弱透水层顶板 0.20 m 以上，外侧使用粘性土填实。

4.2 漏斗门式反应单元结构井

本工程中反应单元结构井包括 PRB 主井与输氧曝气井，其中 PRB 主井与输氧曝气井深度均安装与第一层弱透水层内 0.50 m，PRB 主井的设计井径为 2.00 m，设计总长度为 15.50 m。

4.3 生化处理反应单元

本工程中所设计的生化处理反应单元由 15 个小型反应单元组件联结而成，总体设计尺寸为高于 15.00 m，底宽 0.85 m；整体吊装于 PRB 主井与输氧曝气井空间内，各小型反应单元组件为井径 0.85 m 的不锈钢圆柱。有效容积 15.00 m³、上下游水头差 $\Delta h=0.30$ m、垂向流速 $V=1.16$ m/d、水力停留时间 $HRT=12.90$ d，反应填料为赤铁矿-沸石-淀粉-铁还原菌，反应介质渗透系数为 $1.87\sim5.52\times10^3$ cm·d⁻¹，曝气频率为 2 h/d。

4.4 水质水位自动监测调节池

本工程所设计的水质水位监测调节池设置水位水质自动监测装置。水质水位监测调节池建设于地面以下 3.00 m 深处，其总尺寸为 5.00 m×2.00 m×3.00 m。监测池安装有提升泵、流量计（浮球液位计，测量范围为 0~2.50 m）、综合仪表。其中综合仪表为水质分析探头、pH、EC、DO、ORP、T、水位等。地下水经生化处理反应单元后若水质不满足地下水标准，则回灌中前端循环处理；若同时满足地下水、地表水 V 类标准，达到环评的要求后排放至地表水体。

4.5 自动化监测控制系统

本工程设计的水质水位自动化监测系统包括：生化处理反应单元水质自动化监测系统、调节池水质水位自动化监测系统。

生化处理反应单元内的输氧曝气井安装有常规水质分析探头，可在线监测反应单元不同深度的 DO、EC、ORP、T、pH。此外，曝气井内装有样品自动采集装置，在实现多层位样品的自动化采集以及地面保存。

水质水位监测调节池安装有水位自动化监测组件，可实现监测池的水位自动控制，PRB 反应单元前后水头差小于 0.30 m 时，则自行启动监测池内的提升泵抽水回灌至 PRB 上游。

自动化曝气系统能够自动化控制地面的空压机，从而实现生化处理单元内的可控曝气时间、可控曝气流量的自动化过程。

自动化电力供给系统，可实现工艺内的各部分自动化数控系统的电力供应以及保障，当太阳能组合电池板蓄电装置出现故障时，则自动启用燃油发电机，给太阳能组合电池板蓄电装置进行充电；同时可保障紧急条件下，其他外接、应急设备的电力供应。

5 辅助配套设施

间歇性曝气漏斗门式 PRB 地下水污染原位生物修复工艺主要包括各工艺段临时检查井、工艺流程标识牌、设备安装护栏、警示牌等辅助配套设施。

6 第三方监测

经过地下水污染调查，该填埋场地下水污染集中在潜水含水层（15.00 m 以内），该场地地下水埋深较浅（1.50~2.00 m），且场地含水层介质以粉质黏土为主，渗透性较差，渗滤液中有机物和氨氮等特征污染物，在地下介质中绝大部分污染物被含水层介质吸附、截留，有机物浓度相对较低，氨氮是潜水地下水中最典型的特征污染物，因而填埋场下游地下水重污染羽 PRB 处理工程监测指标为氨氮（潜水含水层），第三方监测频率为每月 2 次。