

垂直阻隔组合工艺在污染场地修复工程中的研究与应用

杜善磊

上海安居房地产开发有限责任公司，上海

收稿日期：2022年2月26日；录用日期：2022年3月18日；发布日期：2022年3月25日

摘要

垂直阻隔是土壤及地下水修复工程中常用的一种技术，可通过对污染区域的垂直封堵形成止水帷幕，切断垂直暴露途径，阻止污染羽的迁移，但是单一的垂直阻隔技术往往阻隔效果较差。本文以某修复项目为例，采用“三轴搅拌桩 + 高压旋喷桩”的垂直阻隔组合技术，实现了对污染地块的有效阻隔，为后续场地修复奠定了基础，有效阻止了二次污染的产生。

关键词

垂直阻隔，修复工程，三轴搅拌桩，高压旋喷桩

Research and Application of Vertical Barrier Combined Technology in Polluted Site Remediation Project

Shanlei Du

Shanghai Anju Real Estate Development Co., Ltd., Shanghai

Received: Feb. 26th, 2022; accepted: Mar. 18th, 2022; published: Mar. 25th, 2022

Abstract

Vertical barrier is a technology commonly used in soil and groundwater remediation projects. It can form a water-stopping curtain by vertically blocking the polluted area, cut off the vertical exposure path, and prevent the migration of pollution plumes. However, a single vertical barrier technology often has better barrier effect. In this paper, taking a restoration project as an example,

the vertical barrier combination technology of “three-axis stirring pile + high-pressure rotary jetting pile” is used to achieve an effective barrier to the polluted land, laying a foundation for the subsequent site restoration and effectively preventing secondary pollution.

Keywords

Vertical Barrier, Remediation Project, Triaxial Mixing Pile, High Pressure Jet Pile

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着石油、化工、制药等大量企业的易址搬迁及异地重建，原工业遗址中的土壤吸附积累了或多或少的重金属及有机污染物，污染了土壤和地下水环境，因此土壤及地下水污染修复工程刻不容缓。在土壤及地下水修复技术中，阻隔技术是一种常用的辅助技术，可以切断暴露路径，限制污染羽迁移。

阻隔技术是指通过铺设阻隔层阻断土壤介质中污染物迁移扩散的途径，使污染介质与周围环境隔离，避免污染物与人体接触和随降水或地下水迁移进而对人体和周围环境造成危害的技术[1]。阻隔技术主要包括水平阻隔和垂直阻隔两大类，垂直阻隔可分成取代法、挖掘法、注射法等基本类型。三种类型的适用范围及特点见表1。

Table 1. Characteristics of different types of vertical barrier systems

表 1. 不同类型垂直阻隔系统的特点

类型	特征	适用性	常见技术
取代法	采用钢板桩法的地方需要结构上或机械上的支持；酸性土壤一般对苯和甲苯等污染物具有抗性	适用于大多数土壤类型，但大石头、岩石或大量废弃物存在或许会影响施工	钢板桩、振动波墙
挖掘法	应用较为广泛；对于阻隔系统的损坏以及拐角处需要进行修补	大多数土壤及岩石类型	喷射灌浆、泥浆沟渠、混凝土横隔墙
注射法	喷射范围广，浆液损耗较大	粒状土壤或破碎的岩石	水泥或化学灌浆、喷射灌浆、喷射混合

垂直阻隔技术是为了防止污染物及其渗滤液的水平迁移或污染源外部地表水、地下水的渗入，沿污染源周边人工构筑的地面以下并垂直于地面的垂直阻隔系统[2]。根据场地水文地质条件和污染物的分布特征，阻隔墙的垂直形状可以延伸到地表或嵌入到低渗透性岩层[3]。按照阻隔墙底部是否穿过隔水层，垂直阻隔墙可以建设成悬挂型和嵌入型[4]。

在实际施工过程中，单一的垂直阻隔技术往往很难实现密闭，导致阻隔区污染物向周边扩散，造成污染物的泄漏，既达不到施工目标及要求，又严重影响土壤及地下水环境。本文结合实际工程案例，探究了垂直阻隔组合技术在污染场地修复中的应用，以期同类工程实施提供借鉴意义。

2. 工程概况

2.1. 工程简介

某煤气厂旧址，原有工业企业在生产过程中以及废弃后对土壤或地下水造成一定程度的污染，根据前期调查结果显示，该场地内土壤和地下水均受到污染，土壤及地下水中均存在石油烃超标的情况。根据方案比选以及专家意见，该污染场地采用“垂直阻隔 + 原地异位修复”组合技术。

2.2. 工程地质

项目场地所在区域为长江三角洲前沿冲积平原，区域内地势平坦，地貌类型属滨海平原地貌。如图 1 所示，本项目场地内自上而下的地层构成大致为：

- 1) 人工填土层：以杂填土为主，局部表层为水泥地坪，上部由碎石、砖块等建筑垃圾组成，下部以粉性土为主，含植物根茎、贝壳等。
- 2) 粘质粉土(江滩土)：属近代江河漫滩沉积土层，含云母、有机质、腐植质、贝壳、朽木等，上部夹较多淤泥质粉质粘土，局部区域含有抛石，土质不均匀。
- 3) 淤泥质粘土：呈灰色，含云母、有机质、贝壳碎屑，夹少量薄层粉砂，土质均匀。

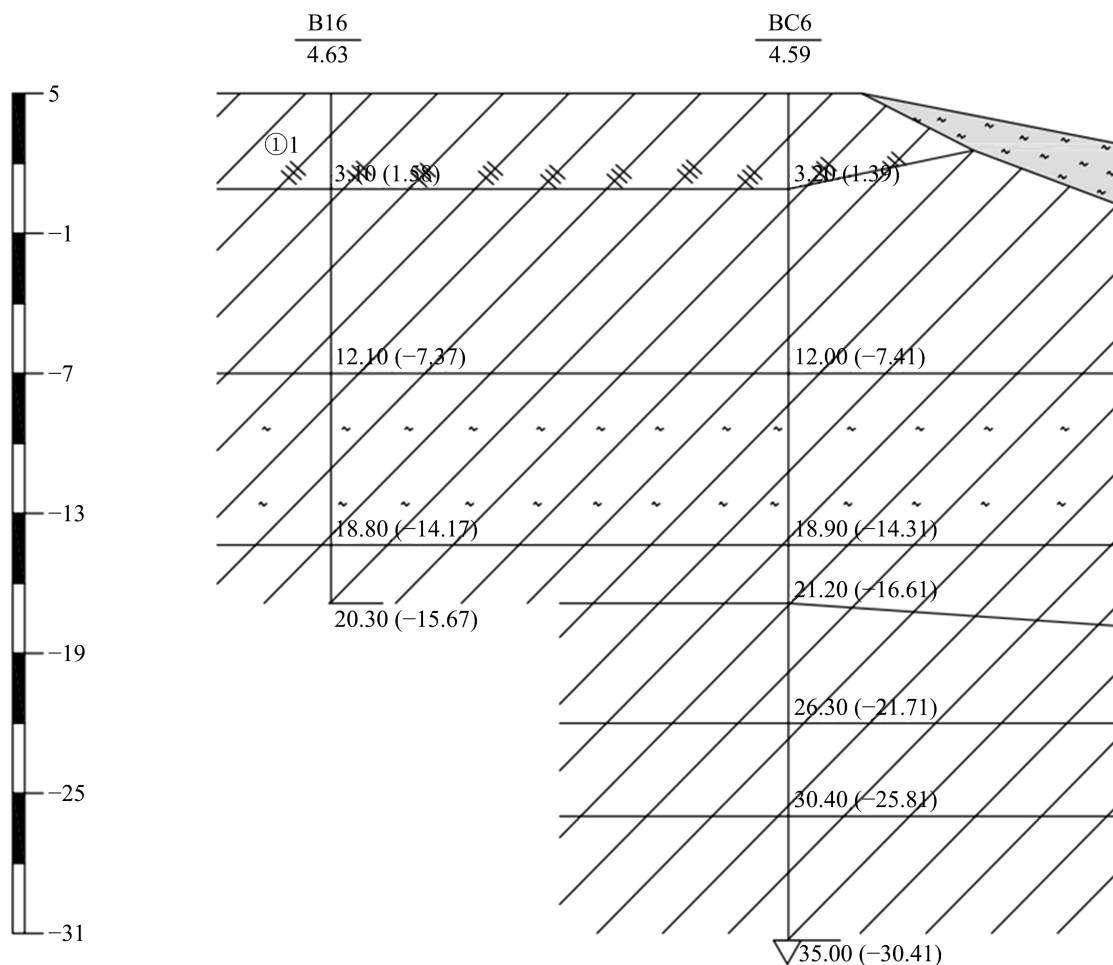


Figure 1. Engineering geological profile
图 1. 工程地质剖面图

3. 垂直阻隔组合工艺

根据工程地质勘探报告，施工范围内工程地质较为复杂，结合施工方案及专家意见，为保证地块边界达到垂直阻隔的效果及要求，本项目垂直阻隔方法采用挖掘法结合注浆法，具体工艺为“三轴搅拌桩 + 高压旋喷桩”组合工艺。

3.1. 三轴搅拌桩

三轴搅拌桩施工采用 $\phi 650\text{SMW}$ 工法[5]，选用 ZKD 型多轴钻孔机，主要包括导沟开挖、桩机定位、搅拌施工、泥浆制作等工艺流程，垂直施工范围为： $+5.0\sim-11.0\text{ m}$ ，基坑加固后，三轴搅拌桩加固体 28 天龄期的无侧限抗压强度达到 1.0 Mpa 以上。

该工法要求连续施工，为清除妨碍成桩施工的杂填土和安置导向型钢架，须用挖机开挖出沟槽，在沟槽两侧打入槽钢作为固定支点，再放置 H 型钢。将三轴搅拌桩头中心位置在定位 H 型钢表面划线定位，定位后开动桩机使钻头下沉，同时注入水泥浆，水泥掺入比为 20%，供浆流量为 207 L/min ，泵送压力在 $1.5\sim 2.5\text{ Mpa}$ 之间，到达设计桩底标高后作重复搅拌注浆。为防止搅拌桩向内倾斜而内衬厚度不足，影响结构安全使用，因此建议桩位中心外放 5 cm 。其具体的流程如图 2 所示。

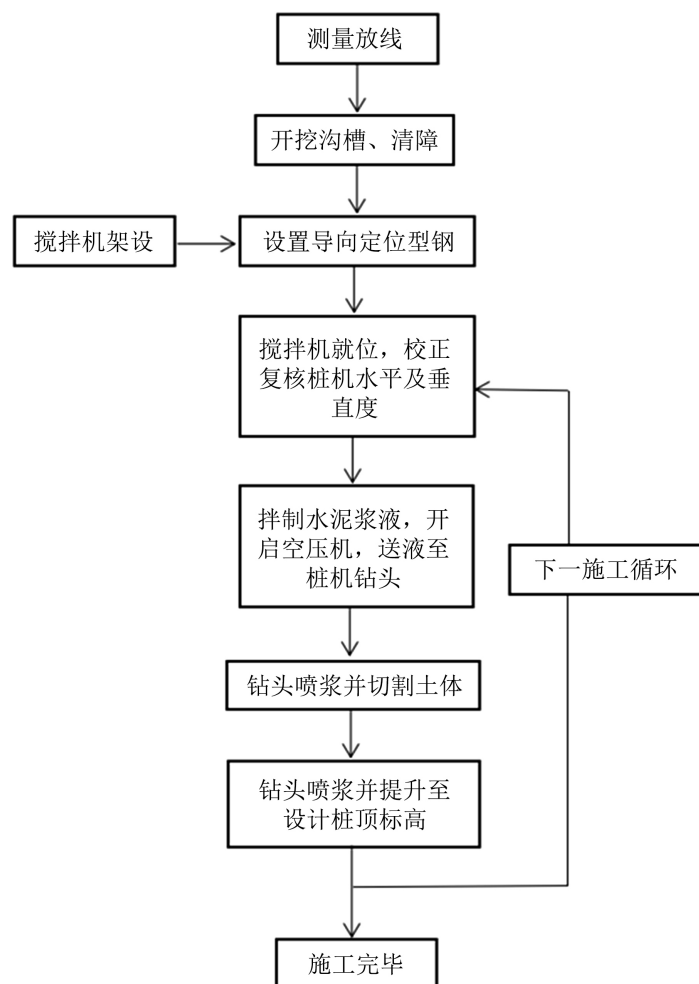


Figure 2. Flow chart of construction process of three-axis mixing pile
图 2. 三轴搅拌桩施工工艺流程图

三轴搅拌桩的搭接以及成形搅拌桩的垂直度补正是依靠搅拌桩单孔重复套钻来实现的，已确保搅拌桩的止水帷幕作用。 $\phi 650$ SMW 工法施工按图 3 所示的顺序进行，其中阴影部分为重复套钻，以保证墙体的连续性和接头的施工质量， $\phi 650$ 接头搭接 200。

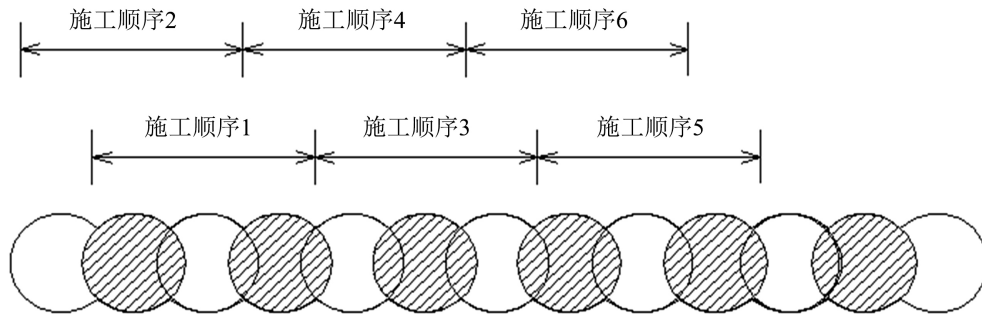


Figure 3. Schematic diagram of three-axis mixing pile drilling and lap joint
图 3. 三轴搅拌桩钻孔搭接示意图

3.2. 高压旋喷桩

由于三轴搅拌桩体型大，在拐角处以及与其他建筑物相连处不方便施工，本方案采用高压旋喷桩工艺作为垂直阻隔止水帷幕的局部加固。高压旋喷桩施工工艺采用二重管法[6]，注浆体直径为 700 mm，桩体搭接 300 mm，采用 42.5 级的普通硅酸盐水泥，水泥掺量 25%，加固范围为：+5.0~-11.0 m，基坑加固后，高压旋喷桩加固体 28 天龄期的无侧限抗压强度达到 1.0 Mpa 以上。其具体流程如图 4 所示。

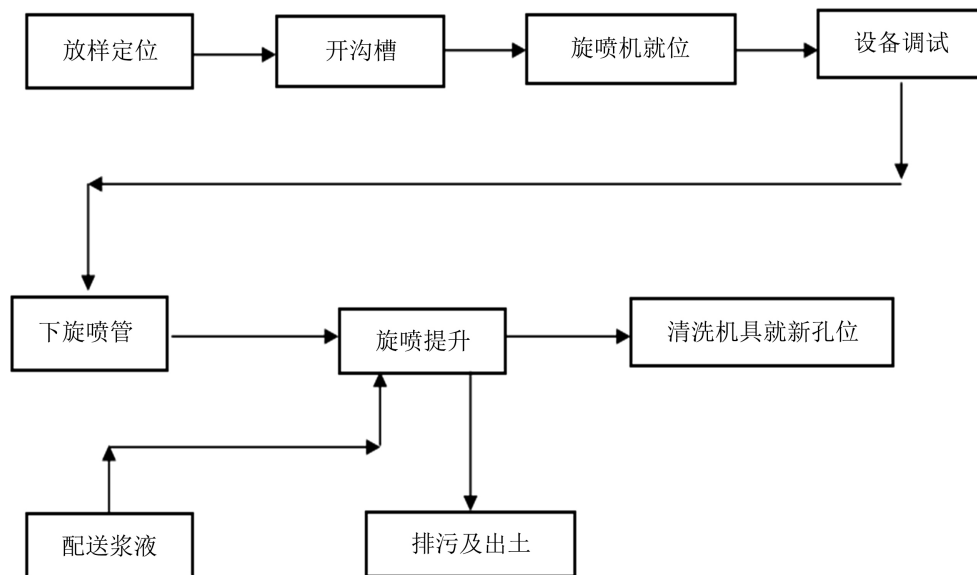


Figure 4. Flow chart of construction process of high-pressure jetting pile
图 4. 高压旋喷桩施工工艺流程图

现场放样并做好明确标志，放样偏差 ≤ 5 cm；成孔时钻机机架垫平，钻具垂直地面，成孔垂直度小于 1/200。旋喷机架就位，喷管处于自然悬吊状态时喷管中心对准孔心，偏差不大于 50 mm；当浆压符合设计要求时方可下管，压力控制在 25~28 Mpa。喷管下至较设计深度多 10 cm，开始拌送水泥浆，然后开

高压气，气压控制在 0.6~0.8 Mpa；孔口冒浆正常后(约 2 min~4 min)，开始旋喷提升，提升速度 \leq 12~18 cm/min，喷注作业时做好已喷邻桩的补浆回灌，保证加固体固结后的桩顶标高。

4. 测试及结论

垂直阻隔系统建成后，为了检验整个系统的稳定性，现场进行了取芯送检，检测桩体的抗压强度和抗折强度；同时，为了检测阻隔系统的密闭性，现场进行了渗透性试验。主要试验如下：

4.1. 垂直阻隔系统强度测试

垂直阻隔系统建成后，三轴搅拌桩和高压旋喷桩加固体 28 天龄期的无侧限抗压强度均须达到 1.0 Mpa 以上，检测点的数量不少于总桩数的 1%，且不少于 5 个点。

根据规范要求，三轴搅拌桩选取代表性的 6 个点位，高压旋喷桩选取代表性的 5 个点位，送至检测单位检测其桩体强度，检测结果如表 2 所示。

Table 2. Characteristic table of detection points of triaxial stirring piles

表 2. 三轴搅拌桩检测点的特性表

点位编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6
3d 抗折强度(Mpa)	5.6	5.9	5.2	5.5	6.1	5.3
28d 抗折强度(Mpa)	7.8	7.3	8.5	8.0	7.5	7.6
3d 抗压强度(Mpa)	29.6	23.7	28.7	29.7	28.9	27.5
28d 抗压强度(Mpa)	50.2	48.8	55.6	50.8	51.4	52.1

注：3d 抗折强度 \geq 3.5 Mpa (标准值)，28d 抗折强度 \geq 6.5 Mpa (标准值)；3d 抗压强度 \geq 17.0 Mpa (标准值)，28d 抗压强度 \geq 42.5 Mpa (标准值)。

如图所示(图 5~8)，三轴搅拌桩的抗压强度与抗折强度和龄期有关，28d 的强度明显高于 3d 的强度，而且取芯检测点的 3d 抗折强度及抗压强度、28d 抗折强度及抗压强度均达到规范要求及施工目标。

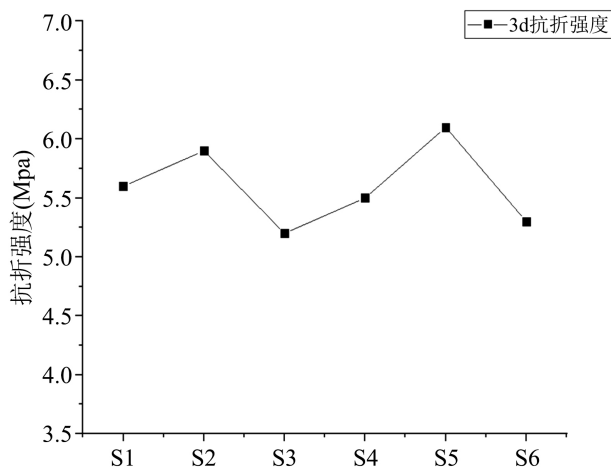


Figure 5. 3d flexural strength of the detection point of the triaxial stirring pile

图 5. 三轴搅拌桩检测点 3d 抗折强度

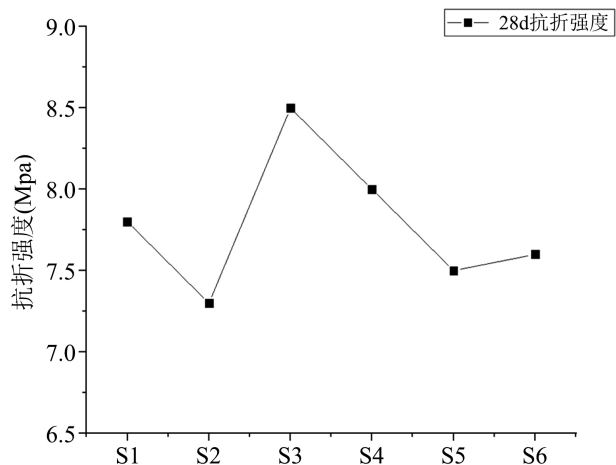


Figure 6. 28d flexural strength of triaxial stirring pile detection point
图 6. 三轴搅拌桩检测点 28d 抗折强度

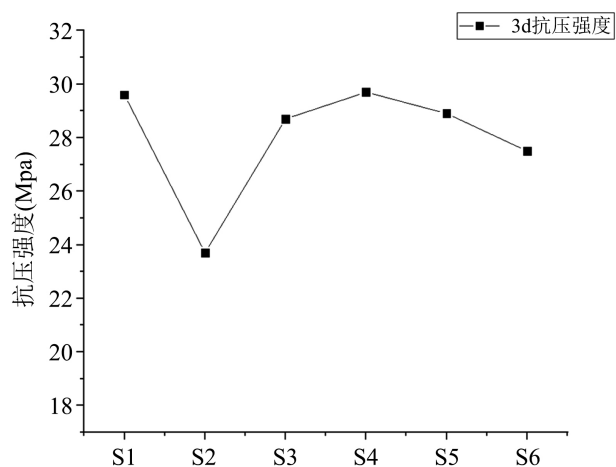


Figure 7. 3d compressive strength of the detection point of the triaxial stirring pile
图 7. 三轴搅拌桩检测点 3d 抗压强度

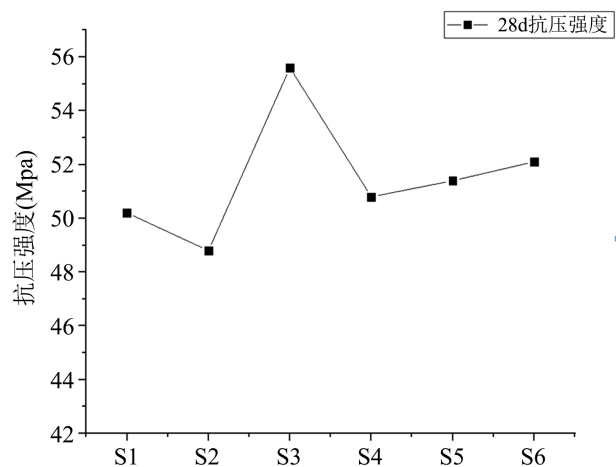


Figure 8. 28d compressive strength of the detection point of the triaxial stirring pile
图 8. 三轴搅拌桩检测点 28d 抗压强度

如图表所示(图 9~12, 表 3), 高压旋喷桩的抗压强度与抗折强度和龄期有关, 28d 的强度明显高于 3d 的强度, 取芯检测点的 3d 抗折强度及抗压强度、28d 抗折强度及抗压强度均达到规范要求及施工目标, 表明整个垂直阻隔系统的强度高, 具有良好的稳定性。

Table 3. Characteristics of high-pressure jetting pile detection points

表 3. 高压旋喷桩检测点的特性表

点位编号	S1	S2	S3	S4	S5
3d 抗折强度(Mpa)	4.4	4.6	4.5	4.6	4.7
28d 抗折强度(Mpa)	7.2	7.4	7.1	7.2	7.0
3d 抗压强度(Mpa)	23.3	24.2	23.8	23.6	24.0
28d 抗压强度(Mpa)	49.5	50.6	49.7	49.7	50.8

注: 3d 抗折强度 ≥ 3.5 Mpa (标准值), 28d 抗折强度 ≥ 6.5 Mpa (标准值); 3d 抗压强度 ≥ 17.0 Mpa (标准值), 28d 抗折强度 ≥ 42.5 Mpa (标准值)。

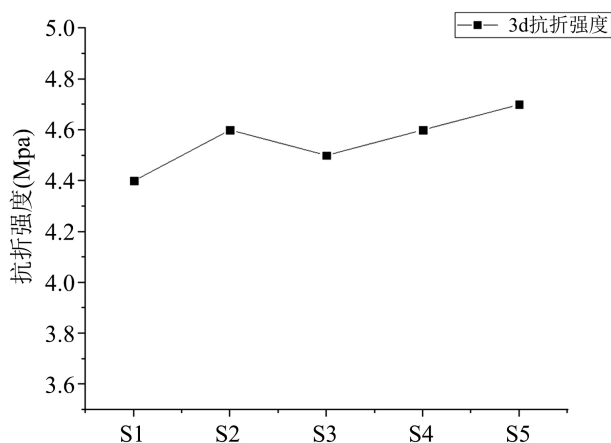


Figure 9. 3d flexural strength of the high-pressure jetting pile detection point

图 9. 高压旋喷桩检测点 3d 抗折强度

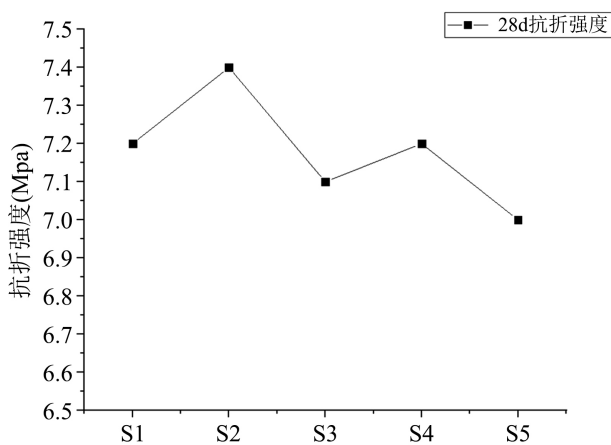


Figure 10. 28d flexural strength of the high-pressure jetting pile detection point

图 10. 高压旋喷桩检测点 28d 抗折强度

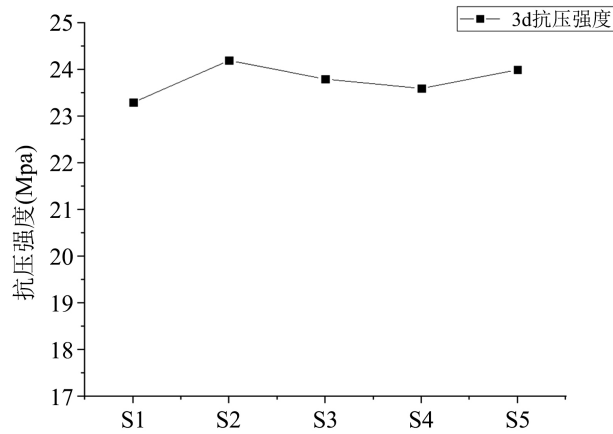


Figure 11. 3d compressive strength of high-pressure jetting pile detection point
图 11. 高压旋喷桩检测点 3d 抗压强度

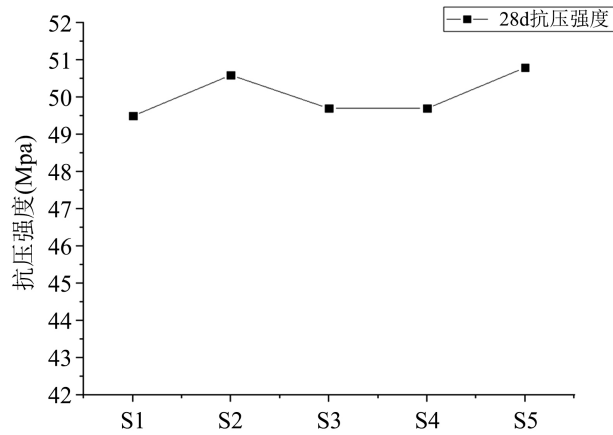


Figure 12. 28d compressive strength of high-pressure jetting pile detection point
图 12. 高压旋喷桩检测点 28d 抗压强度

4.2. 垂直阻隔系统渗透性测试

垂直阻隔系统建成后，在阻隔区内外分别建设 6 口监测井，监测井深度 12 m (超过该场地最大污染深度)，分别取水样送检，检测结果如表 4、表 5 所示：

Table 4. Summary of monitoring well detection data in the vertical barrier area

表 4. 垂直阻隔区域内监测井检测数据汇总

监测井编号	N1	N2	N3	N4	N5	N6
石油烃(mg/L)	2.2	1.7	1.8	1.1	2.8	1.9

注：石油烃修复目标值为 0.6 mg/L。

Table 5. Summary of detection data of monitoring wells outside the vertical barrier area

表 5. 垂直阻隔区域外监测井检测数据汇总

监测井编号	W1	W2	W3	W4	W5	W6
石油烃(mg/L)	0.2	ND	ND	0.2	0.1	ND

注：石油烃修复目标值为 0.6 mg/L，ND 表示未检出。

根据图 13、图 14 所示,垂直阻隔区内存在检测因子(石油烃)超标情况,垂直阻隔区外检测因子不存在超标情况,对比分析表明整个垂直阻隔系统的密闭性好。

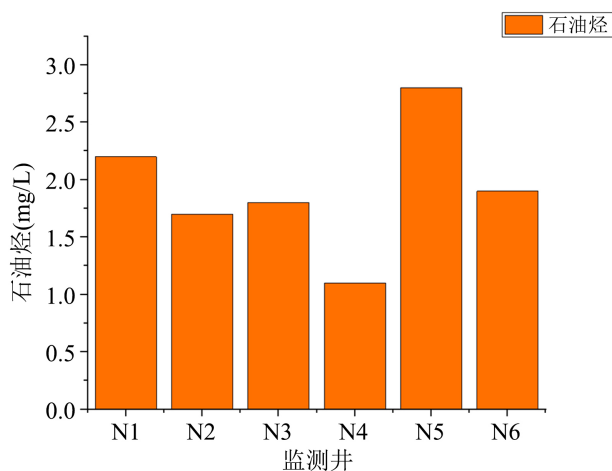


Figure 13. Detection results of monitoring wells in the vertical barrier area

图 13. 垂直阻隔区内监测井检测结果

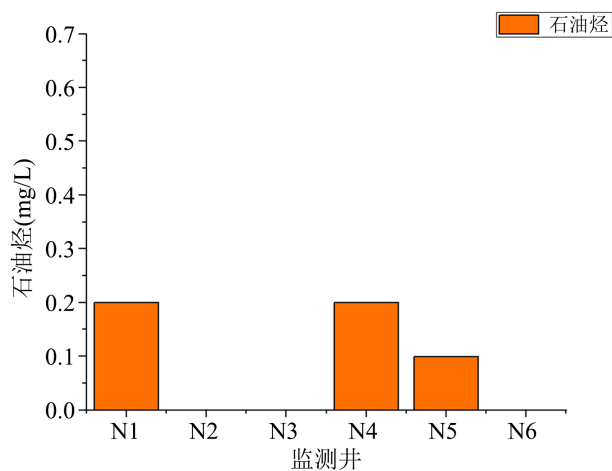


Figure 14. Detection results of monitoring wells outside the vertical barrier area

图 14. 垂直阻隔区外监测井检测结果

5. 结论

垂直阻隔技术在污染场地修复工程中应用广泛,本文结合工程实例,总结了相关应用经验,主要得到以下结论:

- 1) 在工程应用时,垂直阻隔工艺应综合考虑控制目标、工程概况、水文条件等因素,筛选出最适宜的技术工艺;
- 2) 现场取芯检测结果表明整个阻隔系统的强度高、稳定性好,渗透性测试表明该阻隔系统具有良好的密闭性;

“三轴搅拌桩 + 高压旋喷桩”组合工艺在本案例中的应用效果较好,有效阻止了区域内污染物的扩散迁移,为后期的修复施工奠定了基础;同时,该组合工艺对于其他场地修复及水利工程具有良好的借鉴意义。

参考文献

- [1] 陈文浩, 任宇鹏, 张严严, 许国辉, 许兴北. 污染场地围封阻隔技术研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(S2): 114-124.
- [2] 甄胜利, 霍成立, 贺真, 郑中华, 郑峰, 孙晓东, 刘力奇. 垂直阻隔技术的应用与对比研究[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(1): 51-56.
- [3] 吴亮亮, 王琼, 周连碧. 污染场地阻隔技术应用现状概述[C]//2017 中国环境科学学会科学与技术年会. 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集: 第二卷. 厦门: 中国环境科学学会, 2017: 411-415.
- [4] 李韬. 上海地区污染场地垂直隔离屏障设计方法与参数研究[J]. 工程勘察, 2018, 11(10): 5-12.
- [5] 林俊贤. 三轴水泥搅拌桩施工工艺在基坑支护的应用探讨[J]. 福建建材, 2016(4): 45-47.
- [6] 任明武. 谈高压旋喷桩的施工工艺及质量控制[J]. 山西建筑, 2016, 42(9): 71-73.