

深层搅拌技术在有机物污染场地原位 化学氧化修复中的应用

刘志阳, 臧常娟, 郭都, 曾跃春, 黄旋
(江苏大地益源环境修复有限公司, 江苏 南京 210012)

摘要: 原位化学氧化修复可以通过浅层搅拌、建井注射、直推注射、高压旋喷和深层搅拌等方式实现氧化药剂向污染土壤和地下水的投加、混合以及反应。针对有机物污染场地的水文地质、污染分布和修复目标等情况, 采用深层搅拌技术进行原位化学氧化修复的设计和施工, 修复后土壤中各目标污染物检出浓度较场调时的初始浓度均有明显下降且低于修复目标值。工程实践表明, 深层搅拌技术适用于污染较深、污染程度较轻的有机物污染场地的原位化学氧化修复, 具有工艺成熟、混合均匀、占地少、环境影响小、性价比高和修复效果好等优点, 有广阔的应用前景。深层搅拌技术在场地修复领域应用时, 应考虑药剂对设备及其管线的腐蚀, 操作人员的安全防护, 以及修复后场地的承载力等事项。

关键词: 深层搅拌法; 原位化学氧化; 有机物污染场地; 土壤修复; 过硫酸钠

中图分类号: P634; X21 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)03-0139-06

Application of the deep mixing method in in-situ chemical oxidation remediation of organic contaminated site

LIU Zhiyang, ZANG Changjuan, GUO Du, ZENG Yuechun, HUANG Xuan

(Jiangsu DDBS Environment Remediation Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210012, China)

Abstract: In-situ chemical oxidation remediation can realize the dosing, mixing and reaction of chemicals to contaminated soil and groundwater through shallow mixing, injection well technology, direct push injection, high pressure rotary jet grouting and deep mixing. In view of the hydrogeology, pollution distribution and remediation target of the organic contaminated site, the deep mixing method was used to design and implement the in-situ chemical oxidation remediation, and the detected concentration of each target contaminant in the soil after remediation is significantly lower than the initial concentration in the site investigation and lower than the target for remediation. The engineering practice shows that the deep mixing method is applicable to the in-situ chemical oxidation remediation of organic contaminated sites with deep pollution depth and light pollution degree, and has the advantages of mature process, uniform mixing, less land occupation, small environmental impact, high cost performance and good remediation effect, and has broad application prospects. When the deep mixing method is applied in the field of site remediation, the corrosion of chemicals on equipment and pipelines, the safety protection of operators, and the bearing capacity of the site after remediation should be considered.

Key words: deep mixing method; in-situ chemical oxidation; organic contaminated site; soil remediation; sodium persulfate

收稿日期: 2022-08-23; 修回日期: 2022-10-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.03.018

基金项目: 国家重点研发计划项目“钻进-注入-监测耦合的一体化智能装备技术集成”(编号: 2018YFC1802405)

第一作者: 刘志阳, 男, 汉族, 1982年生, 副总经理, 高级工程师, 环境工程专业, 硕士, 研究方向为场地修复, 江苏省南京市软件大道119号丰盛商汇5号楼4楼, liuzy@jsddb.com。

引用格式: 刘志阳, 臧常娟, 郭都, 等. 深层搅拌技术在有机物污染场地原位化学氧化修复中的应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 139-144.

LIU Zhiyang, ZANG Changjuan, GUO Du, et al. Application of the deep mixing method in in-situ chemical oxidation remediation of organic contaminated site[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 139-144.

0 引言

随着我国城镇化进程的快速发展,城镇化空间布局持续优化,“退二进三”和“退城进园”政策的落实,以及《土壤污染防治行动计划》《土壤污染防治法》《土壤环境质量建设用地区域土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)等系列法律法规和标准规范的出台,污染场地修复、管控和安全再利用既有迫切的现实需要^[1-2],也有了充分的法律保障和技术支撑,促进了污染场地的可持续利用。

2014年《全国土壤污染状况调查公报》^[3]显示全国土壤环境状况总体不容乐观,工矿业废弃地土壤环境问题突出,污染类型以无机型为主,有机型次之,复合型污染比重较小,典型地块及其周边土壤中的主要有机污染物有多环芳烃和石油烃等^[4-5]。污染场地可采用原位或异位的修复模式,由于法规政策的引导和“邻避效应”的影响,原位修复越来越成为修复技术决策的首选^[6]。针对有机物污染场地,可以采用物理修复、化学修复、生物修复及其联合修复的方法^[7-8]。化学氧化具有技术较为成熟、快速、高效等优点。常用的氧化药剂包括过硫酸盐、双氧水、臭氧和高锰酸钾等,过硫酸盐因其氧化电位较高、药剂持续性较长、降解能力强等优势在土壤修复中应用广泛^[9-10]。原位化学氧化修复可以通过原位浅层搅拌、建井注射、直推注射、高压旋喷和深层搅拌等方式实现药剂向污染土壤和地下水的投加、混合以及反应^[11-17],深层搅拌法可以使药剂与土壤和地下水混合均匀、有利于药剂与污染物充分接触,具有修复效率高和效果好等优点^[18-19]。本案例中采用三轴搅拌设备进行深层化学氧化修复,该设备已广泛用于住宅建设、高速公路建设、隧道施工、大江大河防洪工程,具有结构简单、维修、运输方便,工作可靠等特点^[20]。

1 项目概况

项目位于江苏省,占地面积约13500 m²。该地块在20世纪80年代为村办化工厂,拥有十多年的生产历史,于90年代停止生产,规划为商住用房。综合考虑地块污染物种类、污染浓度、污染深度和后期开发建设等因素,拟先采用原位化学氧化搅拌技术处理11~18 m深度范围的污染土壤,然后采用水泥窑协同处置技术处理0~11 m深度范围的污染土壤,通过上述施工顺序可以将修复工程和地下室建

设有机结合,将地下室底板以上的污染土壤直接清挖并进行水泥窑协同处置,避免先开挖再修复造成长时间基坑暴露、安全隐患大的风险。

2 水文地质

本区第四系沉积层厚达140~190 m,结构松散,孔隙发达,按地下水埋藏条件、物理性质以及水力特征分为孔隙地下水和基岩地下水两大类。本场地揭示土层范围内为孔隙地下水,含水层由中晚更新世以来的冲湖积、滨海岸积所形成的灰黄色和灰色粉砂(土)组成。场地土层分布情况见表1。

表1 场地土层分布情况

Table 1 Distribution of soil layers at the site

土 层	压缩性	工程特性	层厚/ m	顶板标高/ m
① ₁ 素(回)填土	不均	较差	1.50~4.00	
① ₂ 淤泥质填土	高	较差	0.90~2.50	
① ₃ 素填土	不均	较差	0.70~3.40	
② ₁ 粘土	中等	良好	0.70~4.40	-2.33~1.35
② ₂ 粉质粘土	中等	中等	4.20~5.70	-3.32~-2.38
③粉质粘土	中等—高	一般	13.00~14.80	-8.74~-7.25
④ ₁ 粉质粘土夹粉砂	中等	中等	3.50~4.60	-22.72~-21.49

潜水主要赋存于①₁素(回)填土、①₂淤泥质填土、①₃素填土层中,该土层以粘性土为主,富水性差,透水性不均,勘察期间,测得其初见水位标高在1.30~1.40 m之间,稳定水位标高在1.40~1.50 m之间。其补给来源为大气降水及地表水入渗,以大气蒸发为主要排泄方式。

第I承压水上段主要赋存于④₁粉质粘土夹粉砂、④₂粉土夹粉砂、④₃粉土、④₄中砂夹粉砂层中,补给来源主要为承压水的越流补给及地下径流补给,其富水性及透水性均较好,该层埋深一般在自然地面24 m以下,其上有较好的隔水层②₁粘土、②₂粉质粘土、③粉质粘土层,具有相对较好的封闭条件。勘察期间测得其稳定水位标高为-1.15~-1.10 m。

3 污染状况

根据场地调查结果,深层搅拌修复区及其上方

区域土壤的污染物主要有氯苯、苯酚、二苯醚和甲基二苯醚,场调点位平面布置见图1,土壤超标点位污染物浓度情况见表2,根据《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ 350—2007)和《浙江省污染场地风险评估技术导则》(DB 33/T 892—2013)等标准,结合场地情况经风险评估确定的土壤修复目标见表3。通过表2和表3的数据对比可知,0~11 m范围内污染物浓度较高、超标倍数大,11~18 m深度范围内存在污染物超标的点位不多,但二苯醚和甲基二苯醚的检出较多,总体污染程度较轻。

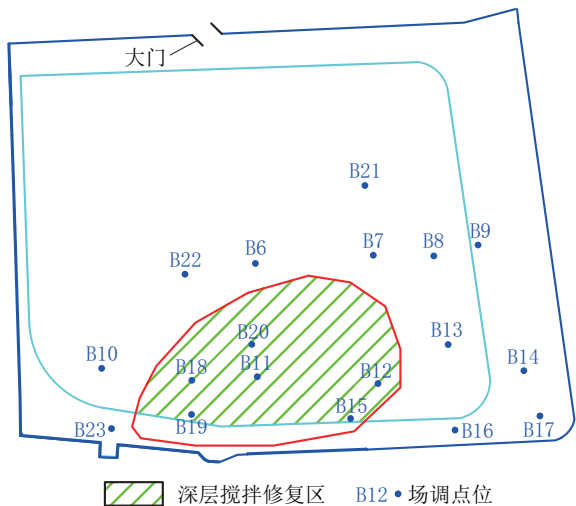


图1 场调点位平面布置

Fig.1 Layout plan of site investigation points

4 方案设计

采用深层搅拌技术对本场地11~18 m深度范围的污染土壤进行化学氧化修复,修复面积约2160 m²。本工艺采用改良型JZL120型三轴搅拌桩机进行搅拌施工,在不开挖情况下,采用“一喷四搅”的原位修复施工方式,将碱活化过硫酸钠溶液直接添加到污染土壤中,使氧化药剂与土壤中的污染物充分接触、反应,以实现修复的目的。

4.1 土壤化学氧化参数

本项目原位化学氧化药剂为碱活化过硫酸钠,实际实施过程中,药剂添加量根据修复对象的污染程度进行动态调整,药剂的添加量为土壤湿重的0.25%~2%。

4.2 搅拌桩搅拌点位布设

搅拌桩搅拌点位采用搭接布置形式,三轴搅拌桩桩径850 mm,自身搭接200 mm,幅间搭接150 mm。

表2 土壤超标点位污染物浓度情况

Table 2 Pollutant concentration at over-standard points in soil

点位	深度/ m	污染物浓度/(mg·kg ⁻¹)			
		氯苯	苯酚	二苯醚	甲基二苯醚
B12	1.5	38.8	124	18000	3100
	4.5	ND	96.4	4	0.9
	6	ND	ND	10.3	1.5
	12	20.6	ND	23.4	9.7
	13.5	6.6	ND	17.2	5.9
	15	ND	ND	40.7	15.6
B15	4.5	93	1100	10000	10000
	6	ND	ND	54.5	17.5
	10.5	10.9	ND	739	116
	12	ND	96.6	ND	ND
	13.5	ND	304	ND	ND
	15	ND	244	44.7	6
B19	18	ND	ND	1.5	ND
	3	ND	ND	6.6	0.9
B20	13.5	ND	314	ND	ND
	3	ND	ND	28.5	1.2
B23	13.5	ND	247	ND	ND

注:“ND”表示未检出,下同

表3 土壤修复目标值

Table 2 Soil remediation targets

地面以下 深度/m	污染物浓度/(mg·kg ⁻¹)			
	氯苯	苯酚	二苯醚	甲基二苯醚
0~11	6.2	474	70	70
11~12	6.3	634	536	536
12~18	9.5	916	811	811

5 工程实施工艺流程

(1)平整场地和测量放样。先清理场地,清除场内垃圾及表土后按设计要求用素填土整平坑洼底至设计标高,根据图纸放样布置桩位,用灰线和标杆标示。

(2)搅拌施工参数确定。根据现场计算、工程经验和试桩情况,确定施工技术参数,指导后续全面铺开原位搅拌修复。

(3)桩机定位。根据测量确定的桩位进行桩机定位,将钻机调平并使钻杆垂直,钻头对准桩位,然后检查喷药口,并清理干净。

(4)预搅下沉。先检查搅拌桩机喷浆是否正常,启动压浆泵待深层搅拌桩机搅拌头喷浆口喷浆后,启动桩机搅拌头正转下沉搅拌(速度 ≤ 2.0 m/min)至桩底标高。

(5)药剂制备。开始预搅拌下沉前,即按照现场试验确定的药剂掺配比制备药剂,药剂根据需要提前配置,设置2个 5 m^3 的配药池进行配药,1用1备,确保可连续注药。

(6)提升喷药搅拌。到达设计标高后提前喷药,间歇一定时间再提升钻具,在桩端底部搅拌喷药剂30 s,确保底部有足够药剂量;然后边搅拌边喷药边提升(速度 ≤ 2.0 m/min),当搅拌头提升至离设计修复顶标高1 m时,减慢速度进行喷药搅拌,当搅拌头提升至设计修复顶高程时正好用完设计配合比所要求的药剂量。

(7)复搅喷浆提升。第一次提升至设计顶标高后,将搅拌头重新下沉搅拌(速度 ≤ 2.0 m/min)和提升喷浆搅拌(速度 ≤ 2.0 m/min)一次,使注入的药剂充分与土体拌和,保证搅拌的连续性和均匀性。

(8)桩机移位到下一桩位,重复施工步骤(3)~(7)。

6 修复效果

自检采样点位平面布置图见图2,图中S4~S9点位所在区域为深层搅拌化学氧化修复区,该区域的土壤自检结果见表4。修复后各目标污染物的检出浓度较场调时的初始浓度均有明显下降,且实现了修复区域目标污染物浓度均低于修复目标值,可确保用地的人居环境安全。修复后的土壤样品中目标污染物的检出率有所提高,可能因为11~18 m修复区的上部区域污染物浓度较高,搅拌过程上部的污染物存在垂直方向上往下迁移至11~18 m修复区域的可能,另一方面搅拌过程也会促进污染物水平方向的混合或迁移。修复后自检点位S4、S8和S9的土壤样品氯苯未检出,可能是因为氯苯不溶于水,而在场调时上述3个点位区域的土壤样品的氯苯浓度就是未检出或未超标,这说明采用深层搅拌工艺时不溶于水的目标污染物更多的只是在单桩搅拌范围内降解或混合,即深层搅拌的影响范围主要集中在搅拌区域。修复后土壤样品中苯酚的检出率达到了100%,这可能是因为苯酚本身微溶于水,而采用碱活化过硫酸钠作为氧化修复药剂的碱性环境

背景也有利于苯酚通过地下水进行扩散和迁移。

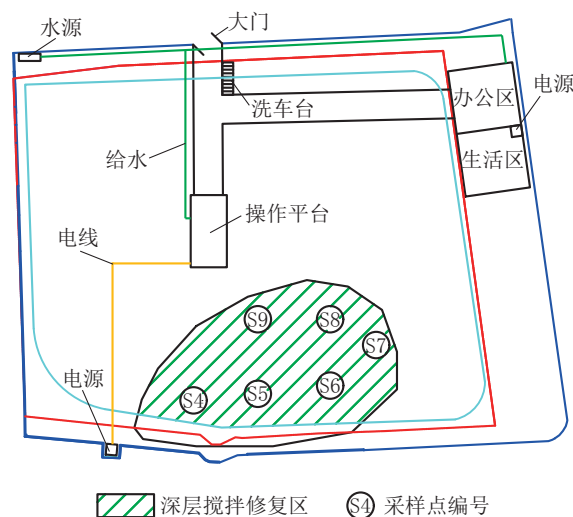


图2 自检采样点位平面布置

Fig.2 Layout plan of self inspection sampling points

7 经济分析

深层搅拌化学氧化修复的机械费约为20元/ m^3 ,根据不同投加比例和药剂市场价格波动因素,化学氧化药剂费约为50~300元/ m^3 ,考虑人工费和管理费等,修复成本可控制在110~450元/ m^3 的区间内,与热脱附修复和水泥窑协同处置相比具有明显的价格优势。

8 结论

(1)深层搅拌技术适用于污染较深、污染程度较轻的有机物污染场地的原位化学氧化修复,具有工艺成熟、混合均匀、占地少、环境影响小、性价比高和修复效果好等优点。

(2)深层搅拌设备来源于传统建筑和市政行业,在使用过程中要考虑化学氧化药剂的腐蚀造成管线、接口和密封处的跑冒滴漏,并及时消除隐患,作业结束后应及时清洗配药系统和输药系统,并定期检修保养,确保设备的正常运行。

(3)深层搅拌施工要加强安全防护,除了常规的劳动保护外,还要考虑化学药剂和场地污染物可能对作业人员造成的危害,工作人员要视工作岗位正确穿戴防护服、防酸碱手套、化学防护眼镜、防护口罩和防毒面具等针对性的劳保用品,另外现场要配备洗眼器、雾炮和气味抑制剂等必要的应急装备和材料。

表4 自检结果

Table 4 Results of self inspection

序号	点位	深度/m	污染物浓度/(mg·kg ⁻¹)			
			氯苯	苯酚	二苯醚	甲基二苯醚
1	S4-13	12.0~12.2	ND	27.9	0.38	ND
2	S4-14	13.8~14.0	ND	28.9	0.40	ND
3	S4-16	15.8~16.0	ND	30.5	1.06	ND
4	S4-17	16.8~17.0	ND	28.3	0.93	ND
5	S4-18	17.8~18.0	ND	27.9	ND	ND
6	S5-12	11.0~11.2	0.15	130	3.3	0.14
7	S5-14	13.8~14.0	0.13	27.8	2.0	ND
8	S5-16	15.8~16.0	ND	31.3	2.0	0.62
9	S5-17	16.8~17.0	ND	29.8	0.54	ND
10	S5-18	17.8~18.0	0.06	32.8	2.7	ND
11	S6-12	11.0~11.2	0.35	60.5	8.5	2.4
12	S6-13	12.8~13.0	0.15	20.6	59.2	25.6
13	S6-15	14.8~15.0	ND	25.8	1.3	ND
14	S6-17	16.8~17.0	ND	27.5	1.8	0.68
15	S6-18	17.8~18.0	ND	36.9	2.0	0.76
16	S7-12	11.0~11.2	4.69	3.2	127	42.5
17	S7-14	13.0~13.2	7.39	3.11	185	79.0
18	S7-15	14.8~15.0	1.58	1.60	75.0	31.8
19	S7-16	15.0~15.2	5.81	2.29	147	64.6
20	S7-17	16.8~17.0	0.79	1.07	31.9	13.8
21	S7-18	17.8~18.0	1.22	1.56	58.8	24.9
22	S8-13	12.0~12.2	ND	25.4	2.2	0.89
23	S8-15	14.8~15.0	ND	37.6	1.0	0.40
24	S8-16	15.8~16.0	ND	32.2	1.9	0.8
25	S8-17	16.0~16.2	ND	26.0	2.1	0.89
26	S8-18	17.8~18.0	ND	2.95	0.98	0.44
27	S9-12	11.0~11.2	ND	8.5	0.50	0.24
28	S9-13	12.8~13.0	ND	1.4	1.4	1.4
29	S9-15	14.0~14.2	ND	15.1	1.9	0.81
30	S9-16	15.0~15.2	ND	0.21	1.5	0.71
31	S9-18	17.8~18.0	ND	0.28	1.1	0.48

(4)深层搅拌修复后短期内会对施工区域的承载力造成一定影响,采取一定加固措施后方可快速开展补充修复或进行后续场地开发。

参考文献(References):

- [1] 滕应,骆永明,沈仁芳,等.场地土壤-地下水污染物多介质界面过程与调控研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(6):1333-1340.

TENG Ying, LUO Yongming, SHEN Renfang, et al. Research progress and perspective of the multi-medium interface process and regulation principle of pollutants in site soil-groundwater [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (6) : 1333-1340.

- [2] 孙平贺.直推钻探技术在污染场地调查中的应用现状研究[J].钻探工程,2021,48(1):95-102.
SUN Pinghe. Study on application status of direct push drilling technology in contaminated site investigation [J]. Drilling Engineering, 2021, 48 (1) : 95-102.
- [3] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. 2014-04-17. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. National general survey on soil contamination [EB/OL]. 2014-04-17. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [4] 葛锋,张转霞,扶恒,等.我国有机污染场地现状分析及展望[J].土壤,2021,53(6):1132-1141.
GE Feng, ZHANG Zhuangxia, FU Heng, et al. Distribution of organic contaminated sites in China: Statu quo and prospect [J]. Soils, 2021, 53 (6) : 1132-1141.
- [5] 于靖靖,梁田,罗会龙,等.近10年来我国污染场地再利用的案例分析与环境管理意义[J].环境科学研究,2022,35(5):1110-1119.
YU Jingjing, LIANG Tian, LUO Huilong, et al. Case analysis and environmental management significance of contaminated site reuse in China from 2011 to 2021 [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35 (5) : 1110-1119.
- [6] 李发生.新形势下我国污染场地修复技术决策和产业发展探析[J].环境保护,2016,44(20):13-15.
LI Fasheng. Analysis on the remediation technology decision and industry development of the contaminated site in China under the new situation [J]. Environmental Protection, 2016, 44 (20) : 13-15.
- [7] 骆永明.污染土壤修复技术研究现状与趋势[J].化学进展,2009,21(2/3):558-565.
LUO Yongming. Current research and development in soil remediation technologies [J]. Progress in Chemistry, 2009, 21 (2/3) : 558-565.
- [8] 骆永明,滕应.中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J].土壤学报,2020,57(5):1137-1142.
LUO Yongming, TENG Ying. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5) : 1137-1142.
- [9] 刘志阳.地下水污染修复技术综述[J].环境与发展,2016,28(2):1-4.
LIU Zhiyang. Review on remediation technology of groundwater

- [J]. Environmental and Development, 2016, 28(2):1-4.
- [10] 舒心, 胡培良, 马英. 高压旋喷技术在苯污染地下水修复中的应用[J]. 中国环保产业, 2021(7):26-30.
SHU Xin, HU Peiliang, MA Ying. Application of high-pressure jet grouting technology in the remediation of benzene contaminated groundwater[J]. China Environmental Protection Industry, 2021(7):26-30.
- [11] 李乃营, 王瑜, 孔令镭, 等. 地下水循环井修复技术发展现状综述[J]. 钻探工程, 2021, 48(9):119-126.
LI Naiying, WANG Yu, KONG Lingrong, et al. Advances in groundwater circulation well technology[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9):119-126.
- [12] 王青薇, 尹业新, 王水, 等. 中空螺旋半合管直推取样建井工艺在污染场地调查中的应用研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(3):154-159.
WANG Qingwei, YIN Yexin, WANG Shui, et al. Application of direct push sampling and well drilling technology with the hollow auger split-tube in contaminated site investigation[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3):154-159.
- [13] 盛海星, 高成, 吕佩东, 等. ESD-70 型环保取样钻机的研制[J]. 钻探工程, 2021, 48(12):101-106.
SHENG Haixing, GAO Cheng, LÜ Peidong, et al. Development of ESD-70 environmental protection sampling drill[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(12):101-106.
- [14] 牌卫卫, 江建斌, 宋刚练. 深层搅拌技术在污染场地原位修复工程中的应用[J]. 建筑科技, 2019, 3(3):30-33.
PAI Weiwei, JIANG Jianbin, SONG Ganglian. Application of deep SMW technology in polluted site rehabilitation project[J]. Building Technology, 2019, 3(3):30-33.
- [15] 杨乐巍, 张岳, 李书鹏, 等. 原位化学氧化高压注射修复优化设计与应用案例分析[J]. 环境工程, 2019, 37(8):185-189.
YANG Yuewei, ZHANG Yue, LI Shupeng, et al. A case study on design and application of in-situ chemical oxidation high pressure injection remediation[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8):185-189.
- [16] 唐小龙, 吴俊锋, 王文超, 等. 有机污染土壤原位化学氧化药剂投加方式的综述[J]. 化工环保, 2015, 35(4):376-380.
TANG Xiaolong, WU Junfeng, WANG Wenchao, et al. A review of in-situ chemical oxidation injection method for organic contaminated soil[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2015, 35(4):376-380.
- [17] 王锦淮, 祝可成, 殷俊. 岩土施工技术修复有机物污染土壤的中试研究[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(6):77-80.
WANG Jinhui, ZHU Kecheng, YIN Jun. Pilot-scale study on application of geotechnical construction technology in organic contaminated soil[J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(6):77-80.
- [18] 高骏. 岩土施工技术在污染场地治理中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(3):75-79.
GAO Jun. Study on application of geotechnical construction technology in contaminated site management[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(3):75-79.
- [19] 王健华. 土壤及地下水原位注入修复技术的研究[J]. 环境科技, 2022, 35(2):72-78.
WANG Jianhua. A review of in-situ injection technology for soil and groundwater remediation[J]. Environmental Science and Technology, 2022, 35(2):72-78.
- [20] 张红涛. 粗砂砾石地层中高压旋喷桩隔水帷幕施工技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(6):113-117.
ZHANG Hongtao. Construction of the jet grout water cut-off curtain in coarse gravel formation[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6):113-117.

(编辑 荐华)