

岩土施工技术在污染场地治理中的应用研究

高 骏

(江苏省山水资源开发集团公司, 江苏 南京 210001)

摘要: 本文介绍了采用高压旋喷注浆法和深层搅拌法在南京燕子矶传统老工业集中地区大面积、大深度、重污染场地治理的机理、工艺、施工要点和使用的施工机械、主要参数等。工程实践证明, 采用这2种岩土施工技术治理污染场地, 质量高、效果好、工期短、投资低, 值得推广应用。分析了存在的问题, 提出了进一步研究完善的建议。

关键词: 污染场地修复; 高压旋喷注浆; 深层搅拌法

中图分类号: X53; TU472.3⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)03-0075-05

Study on Application of Geotechnical Construction Technology in Contaminated Site Management/GAO Jun (Jiangsu Landscape Resources Development Group Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210001, China)

Abstract: This paper introduces the mechanism, process, key construction points and construction machinery as well as main parameters in large area, large depth and heavy contaminated site management by high pressure rotary jet grouting and deep mixing methods. The engineering practice proved that these two geotechnical construction technologies have advantages of high quality, good effect, short duration and low investment. The existing problems in the construction were analyzed with suggestions for further study.

Key words: contaminated site remediation; high pressure rotary jet grouting; deep mixing method

污染场地^[1]修复的方法有物理、化学、生物、其他4大类, 化学-氧化原位^[1]修复是化学处理中的一种, 涉及到高昂的经济投入^[2]。传统的方法是通过在污染区设置不同深度的砖井, 然后通过砖井中的泵将化学氧化剂注入土壤中, 使氧化剂与污染物产生氧化反应, 达到使污染物降解或转化为低毒、低迁移性产物的一项土壤原位修复技术。该技术主要用于修复在土壤中污染期长和难生物降解的污染物, 如油类、有机溶剂、多环芳烃、PCP、农药以及非水溶态氯化物(如三氯乙烯、TCE)等污染的土壤。该类修复技术一般由注射井、抽提井和氧化剂等3部分组成。传统的施工方法不能很好地解决溶剂注入污染场地的深度、面积等准确位置, 特别是对深度超3 m大面积的污染场地修复, 修复周期长、投资大, 修复效率低。用岩土施工技术(深层搅拌、高压旋喷)为污染场地化学原位修复服务, 能使化学溶液迅速、准确到达需要修复的位置(深度、广度), 缩短工期, 提高修复效率, 降低修复成本, 成效明显。

1 项目概况

研究项目位于南京市燕子矶地区, 是南京市传

统老工业集中地, 曾经密集分布了66家化工企业, 占地约14 km²。2011年4月, 燕子矶地区大部分小化工企业关停。2013年底, 15家大化工企业全面停产、退城入园。在污染企业搬迁之后, 燕子矶地区被定位为宜居新城, 总规划面积达到13.81 km², 作为居住、商业、公共配套及绿地、道路等用途。

具体研究对象“南京化工厂”(简称小南化)是其中最大的工厂, 占地700亩(0.47 km²), 搬迁前主要生产硝基氯苯系列、苯胺、RT培司、防老剂系列等产品, 是以氯碱为龙头、橡胶助剂和有机中间体三大系列产品为主导的全国大型有机中间体和精细化工生产基地。是《南京市环境保护“十二五”规划》明确要求解决土壤污染问题的场地。整个项目治理投资逾亿元。

1.1 场地地质和污染情况

1.1.1 场地地质

场地内地层类型较复杂, 从上到下依次为: 一层人工填土。二层土体为全新世沉积土层, 具有一定的强度, 局部分布。三层属一般沉积土层, 全场分布。本场地各土层岩性、结构、透水性及理化性质不同。从各个土壤钻孔点看, 局部垂直方向上各土层不连

收稿日期: 2015-09-21; 修回日期: 2016-01-29

作者简介: 高骏, 男, 汉族, 1963年生, 副总经理, 高级工程师, 注册一级建造师, 注册监理工程师, 从事岩土工程、环境工程技术与管理工作, 江苏省南京市中山南路315号瑞华大厦27楼, gaojun63@126.com。

续,二层粉质粘土和二层粉砂夹粉土在局部区域有缺失。详见表1。

表1 场地土层划分

序号	土层名称	厚度/m	土层岩性	土层情况
1	杂(素)填土层	0.5~3.6	杂填土、素填土、房渣土	人工填土,夹杂较多的碎石、砼、砖块等建筑垃圾
2	粉质粘土层(含粉土)	0.8~3.6	粉质粘土,含粉土	微透水层,含水量高,局部缺失
3	粉砂夹粉土层	0.7~4.5	粉砂夹粉土(含砂土、细沙、流沙)	透水性能较好,含水量高,全场分布
4	粉质粘土(含粉土,不饱)层	0.5~9.0	粉质粘土(含粉土,不饱)	弱透水层,含水量低,不饱

1.1.2 污染概况

《小南化地污染场地修复区域概况》载明:该场地一共设置160多个土壤采样点,共采集了2000多个土壤样品。检出率最高的有机污染物为氯苯,并且检出含量也较高,达到4870 mg/kg,1,2-二氯苯最高检出含量达到1310 mg/kg,苯的最高含量达到149.44 mg/kg。

1.2 污染场地修复目标^[3]

- (1) 地块内土壤颜色正常、无刺激性异味;
- (2) 污染土壤清理和修复执行表2中的场地土壤污染物目标值。

表2 场地土壤中关注污染物修复目标值

深度/m	污染物种类	目标值/(mg·kg ⁻¹)
0~ -5	苯	3.89
	氯苯	129
	4-氯甲苯	1.84
	1,3-二氯苯	19
	1,4-二氯苯	38
	1,2-二氯苯	309
	苯并(b)&(K)荧蒽	16
	苯并(a)芘	1.64
	二苯并(a,h)蒽	1.64
	1,3-二硝基苯	11
	2,6-二硝基甲苯	14
	2,4-二硝基甲苯	9.8
	苯胺	68
	邻(对)硝基氯化苯	19
	-5以深	邻(对)硝基氯化苯

1.3 修复区块、范围

本项目土壤修复区为(参见图1):N3-2-①,修复深度为0~12 m;M2,修复深度为3~4 m;M4,修复深度为1~2 m。合计修复土方49644 m³。修复对象的地下水修复范围为地下水IV-5-①区

域;深度预计为3~6 m,共计14160.2 m²。

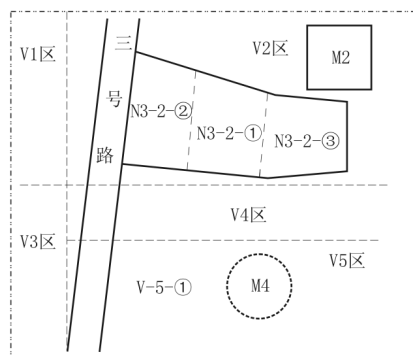


图1 土壤修复区平面示意图

2 修复技术方案

2.1 选择修复技术和工艺方法的指导思想

依据修复目标、修复效果和工期、成本投入等要素,按照“环境友好”要求,针对各个污染地块的特点,以修复效果和效率为判定标准,采用单项技术、复数技术组合以及主体技术和辅助技术结合的修复方案。

2.2 主体修复技术的选用

能否使化学药剂和土壤中的污染物进行充分的拌合中和,是该项目能否成功的关键。岩土施工技术中能达到此目的的技术较多。根据本项目的特点、修复技术的指导思想及本公司的经验,主要选择高压旋喷注浆技术和深层搅拌施工技术。在实际施工中根据不同地质情况、施工阶段具体选用。

2.2.1 高压旋喷注浆技术

把高压旋喷注浆技术用于土壤修复,就是利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻至土层的预定位置后,以高压设备使化学药剂成为20 MPa左右的高压流从喷嘴中喷射出来,冲击破坏土体。当能量大、速度快和呈脉动状的喷射流的动压超过土体结构强度时,土粒便从土体剥落下来。土粒在喷射流的冲击力、离心力和重力等作用下,与浆液搅拌混合,并起化学反应,从而达到清除或减少污染物的目的。

根据工程地质和周边施工条件情况,本项目利用高压旋喷注浆技术施工区域约3000 m²。自然地坪整平后的绝对标高按±0.00 m计,高压旋喷施工的桩底标高有-8.20, -9.60, -10.50和-12.80 m四种规格。

2.2.1.1 用于本工程的高压旋喷方法

高压旋喷法基本种类有单管法、二重管法、三重管法和多重管法4种。本项目根据实际情况分别使

用“单管法”、“二重管法”及“改进型二重管法”。

“单管法”是利用钻机把安装在注浆管(单管)底部侧面的特殊喷嘴,置入土层预定深度后,用高压泥浆泵等装置,以 20 MPa 左右的压力,把浆液从喷嘴中喷射出去破坏土体,同时,借助注浆管的旋转和提升运动,使浆液与从土体上崩落下来的土和有害物质搅拌混合,修复和减少有害物质。

“二重管法”是使用双通道的二重注浆管。当二重注浆管下到土层的预定深度后,通过在管底部侧面的一个同轴双重喷嘴(如图 2a 所示),同时喷射出高压溶液和空气 2 种介质的喷射流冲击破坏土体。

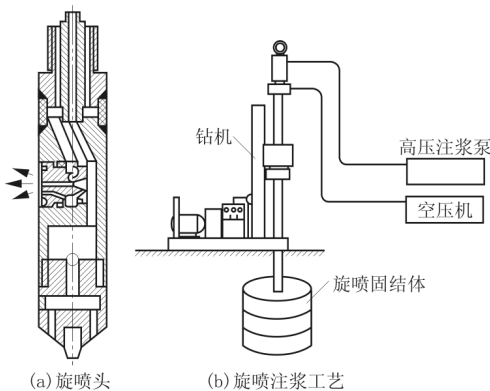


图 2 二重管旋喷注浆示意图

“改进型二重管法”是对上述二重旋喷头进行改进,将原来的浆、气两种介质改为高压清水(用药剂代替清水)和中压化学浆液。在改进后的喷头上设置一个与旋喷管轴线呈 120°的斜喷嘴,在喷头下部设置一个与旋喷管轴线呈 90°的水平喷嘴,如图 3 所示。这两个喷头从不同方向喷射高压化学药剂,更有利于切割、分离土体,以增大化学药剂的喷射距离和药效。在喷头的下端设置 4~6 个 $\varnothing 4 \sim 6$ mm 的浆液喷嘴,使浆液与切割、分离下来的碎土搅拌混合,最大限度地使化学药剂与土体进行充分的化学反应。

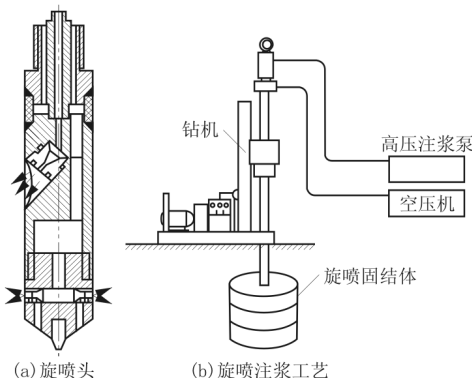


图 3 改进型二重管旋喷注浆示意图

2.2.1.2 主要施工设备

本项目采用 CaSagrandeC8 型钻机、SIRI02SC 型高压喷射注浆机、7T450 型高压注浆泵。

2.2.1.3 高压旋喷现场试验

(1) 确定施工参数:设定试验施工作业范围(5 m × 20 m 左右),通过现场试验获得施工能力、施工速度、注入最佳药剂量、返浆程度、处理成本、施工进度与所需机械数量评估等。确定的施工参数见表 3。

表 3 高压旋喷施工参数

项目	旋喷提升速度/ (cm · min ⁻¹)	浆液流压力/ MPa	浆液流量/ (L · min ⁻¹)
初步设计参数	15	30	150
试验后施工参数	10 ~ 27	45	220 ~ 230

(2) 确定技术参数:药剂配置设备能力要求,注入可能药剂浓度,(沙土中的)影响范围,药剂浓度和药剂量与修复效果的关系。

①取药剂扩散直径 1800 mm。旋喷桩钻孔中到中距离为 1500 mm,呈梅花形布点。

②由药剂配剂站按照设计要求配制药剂溶液,药液配制量以保证施工正常进行为宜。试验施工药剂:处理深度每米 35% 双氧水 42 L,加 280 L 的水稀释;硫酸亚铁 1.36 kg、柠檬酸 1.03 kg、柠檬酸钠 2.88 kg 加 50 L 水,一起混合然后两液混合成单一溶液供给系统大致 200 L/m,如表 4 所示。

2.2.1.4 高压旋喷注化学浆液修复污染土壤关键工序质量控制

(1) 控制桩位。根据设计的施工图测量放出的施工轴线,允许偏差为 15 mm;钻机就位时,主钻杆中心轴线对准孔位允许偏差 ≥ 50 mm。

表 4 配制药剂溶液参数

溶液名称	初步设计参数	试验后技术参数
双氧水	35% 双氧水 42 L + 280 L 水稀释	35% 双氧水 42 L + 220 L 水稀释
其他溶液	硫酸亚铁 1.36 kg、柠檬酸 1.03 kg、柠檬酸钠 2.88 kg 加 50 L 水	硫酸亚铁 1.36 kg、柠檬酸 1.03 kg、柠檬酸钠 2.88 kg 加 30 L 水
两液混合供给	溶液供给系统大致 200 L/m	溶液供给系统大致 300 L/m

(2) 控制孔深。钻孔终孔时测量钻杆钻具长度,允许偏差 ≥ 10 mm;喷射管下至设计开喷深度允许偏差 ≥ 10 cm。

(3) 控制压力和流量。施工用高压浆压力偏差 $\geq \pm 1$ MPa;流量偏差 $\geq \pm 1$ L/min;施工用压缩气压

力偏差 $\geq \pm 0.1$ MPa, 流量偏差 $\geq \pm 1$ L/min。

(4) 控制提升时间节点。高压喷射注浆开喷后, 待化学浆液返出孔口后, 开始提升。喷射过程中出现压力突降或骤增, 必须查明原因, 及时处理。喷射过程中孔内漏浆, 应停止提升。

(5) 控制旋喷速度。允许偏差不超过施工技术参数 ± 1 r/min。

(6) 回填土壤。终喷提出喷射管后, 应及时向孔内充填无污染的土壤, 直到密实。

2.2.2 深层搅拌施工修复污染土壤技术^[5]

采用深层搅拌法, 在需要进行土壤修复的原位搅拌注入混合化学药剂, 通过氧化反应原位氧化分解有机污染物, 从而达到土壤修复目的。根据土壤采样点的土壤样品报告, 本项目采用深层搅拌施工区域约 4000 m²。自然地坪整平后的绝对标高按 ± 0.000 m 计, 深层搅拌施工的桩底标高有 -7.400、-9.800 和 -12.000 m 三种规格。

2.2.2.1 主要施工设备

本次施工采用先进的改良型双向搅拌机械和常规单向搅拌机械。改良型双向搅拌机械: 动力系统带动分别安装在内、外嵌套同心钻杆上的两组搅拌叶片同时正、反向旋转搅拌, 可以同时独立地注入两

种不同浆液, 具有搅拌均匀性良好, 可以避免大量化学浆液上冒, 施工效率高优势。在高浓度土壤污染区块, 高浓度地下水污染区块使用双向搅拌机械。

常规单向搅拌机械: 属于通机机械, 技术成熟, 施工成本低, 适合大规模施工。在低—中度浓度的土壤污染区块, 地下水污染区块使用常规单向搅拌机械。

2.2.2.2 深层搅拌现场试验, 确定主要参数

(1) 确定施工参数: 设定试验施工作业范围(4 m \times 30 m 左右) 施工能力, 通过试验获取施工速度、注入药剂量、表面处理效果、处理成本、施工进度与所需机械数量评估等。试验确定的施工参数和工艺见表 5。

表 5 深层搅拌施工参数及工艺

项目	搅拌头转速/ (r \cdot min ⁻¹)	搅拌头提升速 度/(m \cdot min ⁻¹)	喷浆压 力/MPa	深层搅
				拌工艺
初步设计参数	100	0.8	≤ 0.4	两喷六搅
试验后施工参数	60	0.4	≤ 0.4	两喷四搅

(2) 取得技术参数: 通过试验取得药剂配置设备能力、注入药剂浓度和注入量(见表 6), 各种土质的药剂浓度和药剂量与修复效果的关系。试验后按 1 m 间隔取土壤, 送样分析(简易分析和精密分析), 确定各种药剂浓度、药剂量在各种土质的效果。

表 6 药剂配置参数

药剂 剂量	设计药剂配比	设计药剂注入量	施工注入量	
			中—重度污染区块	轻度污染区块
高剂量	190 L 35% 双氧水 + 350 L 水; 12 kg 硫酸亚铁 + 9 kg 柠檬酸 + 120 L 水	双氧水供给系统 45 L/m; 硫酸亚铁供给系统 10 L/m	15% 双氧水, 注入量 80 L/m; 15% 硫酸亚铁等, 注入量 15 L/m	
中剂量	150 L 35% 双氧水 + 450 L 水; 5 kg 硫酸亚铁 + 4 kg 柠檬酸 + 120 L 水	双氧水供给系统 50 L/m; 硫酸亚铁供给系统 10 L/m		10% 双氧水, 注入量 60 L/m; 10% 硫酸亚铁等, 注入量 10 L/m

2.2.2.3 施工质量控制要素

用深层搅拌法对污染场地进行治理, 就是用其无振动、无污染、成本低、工效高等特点来实现工程目的, 但如何在不同地质条件、不同深度把化学药剂与污染土壤充分搅拌和中和, 是本工程的关键, 需对以下过程进行控制。

(1) 控制搅拌深度。为使施工顺利进行, 在放样时要注意区别不同桩深的桩, 区别标定。在开工前和终桩后仔细对照设计图纸, 避免超深施工增加生产成本、欠深施工达不到设计要求。

(2) 控制搅拌桩位置。在桩基施工前, 要严格控制钻头钻进位置和钻杆的垂直度。钻杆中心轴线对准孔位允许偏差 ≥ 50 mm、垂直度容许偏差 $\geq 1.5\%$ 。

(3) 控制搅拌过程中的药剂用量即喷浆量。在施工过程中, 要时刻注意压浆过程中是否有断浆现象; 通过观察钻进电流的变化决定增加喷浆搅拌提升时间。当电流增大时保持正常提升, 当电流减小时适当增加 10 s 停留时间。

(4) 控制搅喷的时间和压力。为保证深层搅拌施工的质量, 第一次提钻喷浆时应在桩底设计标高停留 35 s, 为使在桩顶部位四周污染物得到充分治理, 搅拌需进行“延迟”作业, 停留时间为 30 s。为使污染物得到全面中和, 根据桩长, 施工时间应 $\leq 20 \sim 32$ min, 喷浆压力控制在 0.5 ~ 0.6 MPa。

(5) 在搅拌桩施工过程中采用“叶缘喷浆”的搅拌头。这种搅拌头的喷浆口位于搅拌叶片的最外

缘,当浆液离开叶片向桩体中心环状空间运移时,随着叶片的转动和切削,浆液能较均匀地散布在土体中。长期使用证明,“叶缘喷浆”搅拌头能较好地解决喷浆中的搅拌不均问题^[6]。

2.3 药剂的使用

本项目化学药剂采用芬顿药剂,以 Fe^{2+} 为催化剂,通过过氧化氢发生分解反应生成具有强氧化能力的羟自由基,其与有机污染物发生反应,分解有机物生成无害的水和二氧化碳^[7]。C-芬顿药剂通过各种 pH 值调节控制芬顿反应速度和反应持续性,大幅度提高了氧化反应的效率。

2.3.1 高压旋喷施工时的药剂使用

(1)采用钻孔直径为 1000 mm 旋喷桩钻机。旋喷角度 360° ,药剂扩散直径取 1800 mm。旋喷桩钻孔中到中距离为 1500 mm,呈梅花形布点。

(2)由药剂配剂站按照设计要求配制药剂溶液,药液配制量以保证施工正常进行为宜。

处理深度每米 35% 双氧水 42 L,加 220 L 的水进行稀释;硫酸亚铁 1.36 kg,柠檬酸 1.03 kg,柠檬酸钠 2.88 kg,加 30 L 水;一起混合然后两液混合成单一溶液供给系统大致 300 L/m。

2.3.2 深层搅拌施工时的药剂使用

(1)轻度污染区块。10% 双氧水:每米注入 60 L(每米按 0.72 m^3 计算);10% 硫酸亚铁等:每米注入 10 L。

(2)中—重度污染区块。15% 双氧水:每米注入 80 L(每米按 0.72 m^3 计算);15% 硫酸亚铁等:每米注入 15 L。

2.4 小结

土壤修复区块施工阶段使用的技术工艺见表 7。

表 7 土壤修复区块施工阶段技术工艺

污染区块	施工阶段	修复方案	施工目的	处理深度/m	厚度/m	采用的主要技术工艺
土壤污染区块	第一	追加调查	污染源确认;详细掌握污染范围和深度	0~3	1~3	挖机采样和 Geoprobe 采样调查分析
		表面清理	清理表面建筑垃圾和表层污染土			土壤分区挖掘和筛分,回填作业
		现场试验	掌握施工参数			深层搅拌,高压旋喷,快速成井,抽水处理筒易挡水墙
	第二	污染源及重污染区块处理	清除污染源及降低重度污染区的污染浓度	5~8 的含水层	平均 3	抽水处理及原位注入清洗;污染源隔断作业
第三	浅层污染处理	清除污染	0~4			挖机搅拌氧化处理
第四	污染土壤地下水处理	达到修复目标	0~12	11		原位注入搅拌化学氧化
	未达标区块补充,达标			1~12		原位搅拌或高压旋喷

3 治理效果

经检测,修复地块一次合格率为 98%,经过局部再治理,竣工验收时污染物全部降低至目标值以下。本项目直接施工费不超过 300 元/ m^3 ,是传统施工方法 800~900 元/ m^3 的 1/3 左右,性价比较高。

4 结语

(1)工程实践证明,岩土施工技术用于污染场地修复是实现工程工期短、投资低、效率高、效果好的措施。目前该技术在国内污染场地修复工程中应用较少,可大力推广。

(2)岩土施工的机械在修复污染土壤过程中与化学药剂接触,这些化学药剂的 pH 值一般都在 2 以下,对机械设备有较大的腐蚀作用;另外,现有设备上的橡胶密封圈、油封等也受到腐蚀。在设备耐腐蚀方面还需要进一步研究提高。

(3)为保证修复质量,本项目施工时为 2 次搅拌(旋喷),其承载力在第一次大面积施工后已经被破坏,给岩土施工机械第二次搅拌(旋喷)施工造成一定困难,需要对机械设备的场地适宜性进行改进,对施工工艺作进一步的修改完善。

参考文献:

- [1] HJ 682—2014, 污染场地术语[S].
- [2] 周启星,宋玉芬,等. 污染土壤修复原理和方法[M]. 北京:科学出版社,2004:688.
- [3] HJ 25.4—2014, 污染场地土壤修复技术导则[S].
- [4] 高谦,罗旭,等. 现代岩土施工技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,2006:122.
- [5] 陈礼仪,胥建华. 岩土工程施工技术[M]. 四川成都:四川大学出版社,2008:137.
- [6] 王凯光. 水泥搅拌桩施工过程中的控制要点[J]. 山西建筑,2008,34(5):248-249.
- [7] 黄健. 负载型铁氧化物光芬顿催化剂在水处理中的应用[D]. 广东广州:中山大学,2010.
- [8] 王贵和,刘宝林,夏柏如. 岩土工程施工废泥浆固化技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(9):10-11,14.