

应用于污染场地原位修复的旋喷工艺研究

宋刚练, 牌卫卫, 江建斌, 何健
(上海市地矿建设有限责任公司, 上海 200436)

摘要:从原位修复需求、旋喷技术特点等方面分析高压旋喷注浆技术在污染场地原位修复中的应用前景。根据污染场地原位修复需要, 有针对性地对传统二重管法旋喷工艺参数进行改进设计, 以提高旋喷技术在污染场地原位修复中的适用性, 并开展现场试验研究以验证参数设计合理性, 为后续此类工程推广应用提供技术借鉴。

关键词:污染场地; 原位修复; 旋喷注浆; 二重管法; 旋喷工艺

中图分类号: X53; TU472.3⁺6 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2017)07-0085-05

Research on Rotary Jet Grouting Technology Applied in Situ Remediation of Contaminated Site/SONG Gang-lian, PAI Wei-wei, JIANG Jian-bin, HE Jian (Shanghai Geological Construction Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

Abstract: In this paper, the application prospect of high pressure rotary jet grouting technology in in-situ remediation of contaminated site was analyzed in the remediation demand and jet grouting technical characteristics. According to the requirements of the contaminated site in situ remediation, the improved design have been pertinently made on technological parameters of traditional double-pipe rotary jet grouting to enhance the applicability of high pressure rotary jet grouting in situ remediation of contaminated site. Moreover, field test was carried out to verify the feasibility of parameters design and provide technical references for similar projects in future.

Key words: contaminated site; in situ remediation; rotary jet grouting; double-pipe method; rotary jet grouting process

0 引言

污染场地修复是指利用物理、化学或生物的方法, 转移、吸收、降解和转化场地土壤或地下水中的污染物, 使其浓度降低到可接受的水平, 或将有毒有害污染物转化为无害物质的过程^[1]。按处置场所不同, 场地修复可分为异位修复和原位修复。其中, 原位修复是在污染场地上直接进行处理, 与异位修复比较, 具有施工简单、成本较低、对周边环境扰动小的特点。然而, 原位修复存在治理不彻底或治理过度、污染物解吸反弹、低渗土壤治理效果差、污染扩散及二次污染等问题, 需要结合工期、污染情况、地层特性、地面设施等, 比选最经济实用的修复方法, 并在辅助提高技术上展开更多研究, 使原位修复技术更经济有效^[2]。

高压喷射注浆是将高压水力喷射切割技术和化学注浆技术相结合的一种施工工艺。在修复工程实施上, 可利用高压旋喷设备将药剂注入到深层土壤中, 使其实现药剂与土壤的有效均匀混合, 提升污染物去除效果。基于以上背景, 本研究探索高压旋喷

注浆法在污染场地原位修复施工中的适用性和可行性, 对传统旋喷工艺有针对性地进行改进以保证注入药剂的精准输送和高效混合, 为上海地区污染场地原位修复工程的实施提供技术与经验借鉴, 也为政府管理机构制定相关政策和技术标准提供参考。

1 高压旋喷注浆技术

高压喷射注浆是将高压水力喷射切割技术和化学注浆技术相结合用于地基加固的一种施工工艺^[3]。根据施工过程中喷管旋转与提升的方式不同可实现旋喷、摆喷和定向喷射, 相应地可形成旋喷桩、成片的止水帷幕和挡土墙等地下结构^[4]。

高压喷射注浆于20世纪60年代首创于日本, 具有施工占地少、振动小、噪声较低等优点。70年代初, 我国铁路、煤炭、水电及冶金系统相继引进, 开始研究和应用高压喷射注浆技术, 目前已广泛地应用于建筑的地基加固处理、地铁工程的土层加固或防水、水库大坝坝体坝基防渗加固等工程^[5-7]。

把传统高压旋喷注浆技术用于土壤修复, 就是

收稿日期: 2017-03-20; 修回日期: 2017-06-06

基金项目: 上海市地矿工程勘察院科研项目“高压旋喷工艺在污染场地原位修复施工中的应用研究”(编号: Gky201608)

作者简介: 宋刚练, 男, 汉族, 1981年生, 总经理助理, 矿产普查与勘探专业, 硕士, 从事地基与基础工程、环保建设工程、矿产勘探、岩土工程技术等方面的施工与研究, 上海市宝山区环镇南路522号A座515, songganglian@163.com。

将高压旋喷桩工艺中的泥浆换成原位修复技术中的化学药剂,利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻至土层的预定深度后,通过高压注浆泵使配置好的药剂溶液成为 20~25 MPa 的高压流从喷嘴中喷射出来,冲击破坏土体^[8]。从土体中剥落下来的土粒在高压喷射流的冲击力、离心力和重力等作用下,与浆液充分混合,并起化学反应,从而达到清除或减少污染物的目的。

2 旋喷技术在水位修复中的应用前景分析

随着场地修复行业的发展,原位修复技术由于其具有经济有效、无需建设昂贵的地面环境工程基础设施和远程运输、操作维护较简单、有利于对深层水土污染进行修复的优势,在城市地修复工程中具有一定的应用优势,然而它的推广应用需要因地制宜地选择经济实用的修复方法,同时也需要辅助技术的提高和发展。针对需要注入药剂的原位修复技术,如原位氧化、原位还原、原位固化稳定化及原位淋洗等,药剂注入的效率及注入后药剂与污染土壤的混合程度是影响原位修复工期和效果的重要因素。

目前常用的原位注入方式是注入井注入,通过建设注入井结合相应的注入动力设备进行注入修复,这种注入方式受场地条件影响较大,需对场地地质情况了解透彻;修复范围较大时需投入大量的设备机具,对场地条件要求较高;对于粘性土质,药剂注入后与污染土壤的混合效果一般,效果不好需多次注药,既增加修复成本,又会造成药剂过量,产生二次污染。

相比传统的原位注入方式,旋喷注浆法在水位修复施工中具有以下优点:(1)适用地层较广,旋喷技术从淤泥、淤泥质土、粉质粘土、粘土、沙到砾石类土,均有良好的注入效果;(2)施工简便灵活、设备较轻便、机动性强、施工效率较高,且注入的液体可以准确计量和控制;(3)喷射深度限制小,可多角度注入,且注入深度较深。

目前,国内外关于高压旋喷注浆技术在水位修复中的应用研究较少。唐小龙等^[9]研究表明高压旋喷注浆法对土壤结构扰动剧烈,适用于渗透性非常差的粘性土壤,将高压旋喷注浆法用于原位化学氧化修复技术目前只适应于浅层污染,深层污染土壤的高压旋喷注射方式尚需进一步探讨。

高俊^[8]通过工程实践证明,采用高压旋喷注浆法和深层搅拌法这两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,但在设备耐腐蚀及场地适宜性方面需进一步研究提高。

上海地区由于其地层特性,污染场地的污染物所处地层均为粘性土,土壤的修复主要为粘性土中污染物的清除,相应的原位修复技术主要有固化稳定化、化学氧化、生物强化、化学还原、多相抽提等。旋喷注浆技术由于其工艺特点,适用于固化稳定化、化学氧化和还原等多种原位注入修复技术,在高粘性土污染场地原位修复工程实施上,可利用高压旋喷设备将药剂注入到深层土壤中,实现药剂与污染土壤(尤其是高粘性土壤)的有效均匀混合,提升污染物去除效果。此外,通过对旋喷注浆作用半径的现场测试,以及药剂用量的定量控制,可有效地进行工期和成本的测算,避免药剂的浪费和二次污染。

3 污染场地原位修复旋喷工艺设计

3.1 工艺流程

污染场地原位修复旋喷工艺流程如图 1 所示。

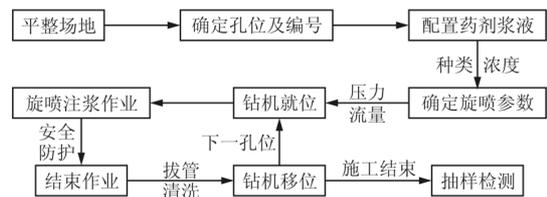


图 1 污染场地原位修复旋喷工艺流程

3.2 传统旋喷工艺参数

3.2.1 高压喷射流性质

高压喷射流是通过高压发生装置产生巨大的能量后,通过一定形状的喷嘴,用一特定的流体运动方式,以很高的流速连续喷射出能量高度集中的液体射流。从流体力学知道,高压水连续射流的速度和功率可按下列公式计算。

$$v_0 = \varphi \sqrt{2gP/\gamma} \quad (1)$$

式中: v_0 ——喷嘴出口流速, m/s; φ ——喷嘴流速系数,圆锥形喷嘴 $\varphi \approx 0.97$; g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; P ——喷嘴入口流速压力, Pa; γ ——水的重度, kN/m^3 。

高压水喷射流的流量计算公式为:

$$Q = \mu_0 F_0 v_0 \quad (2)$$

式中: Q ——流量, m^3/s ; μ_0 ——流量系数,圆锥形喷

嘴 $\mu_0 \approx 0.95$; F_0 ——喷射出口面积, m^2 。

3.2.2 旋喷注浆量

旋喷注浆量的计算主要有2种方法,即体积法和喷量法,取其中大者作为设计喷射流量。

(1) 体积法

$$Q = (\pi/4) D_e^2 K h \alpha (1 + \beta) \quad (3)$$

式中: Q ——旋喷注浆量, m^3 ; D_e ——旋喷体直径, m ; K ——填充率,取 $0.75 \sim 0.9$; h ——旋喷长度, m ; α ——折减系数,取 $0.6 \sim 1.0$; β ——损失系数,取 $0.1 \sim 0.2$ 。

(2) 喷量法

以单位时间喷射的浆量及喷射持续时间计算注浆量,计算公式如下:

$$Q = (H/v) q (1 + \beta) \quad (4)$$

式中: Q ——注浆量, m^3 ; H ——喷射长度, m ; v ——提升速度, m/min ; q ——单位时间喷浆量, m^3/min ,它与喷射压力和喷嘴直径有关; β ——损失系数,通常取 $0.1 \sim 0.2$ 。

3.2.3 旋喷半径

传统旋喷工艺主要用于成桩,成桩半径是衡量工艺效果的标准之一,旋喷半径估计的准确与否,不仅关系到工程的经济效益,还可能影响工程的成败。影响成桩半径的工艺参数主要有注浆压力、提升速度、旋转速度和喷嘴直径^[10]。

(1) 在相同的提升速度下,注浆压力越高,旋喷体直径越大,二者在喷射压力达到一定程度后,近似成比例关系。常用的注浆压力为 $20 \sim 25 \text{ MPa}$ 。

(2) 在相同的注浆压力下,提升速度越小,旋喷体直径越大,但提升速度减小的幅度与直径增大的增量并不成比例,提升速度减小到一定程度后,旋喷体直径增大效果不明显,而提升速度过快,则成型不佳。常用提升速度为 $10 \sim 25 \text{ cm}/\text{min}$ 。

(3) 在相同的提升速度和注浆压力下,采用不同的旋转速度对旋喷体直径影响不大,但旋转速度过小,会造成旋喷体成型不佳,旋转速度过大,则造成旋喷体直径减小。常用旋转速度为 $10 \sim 20 \text{ r}/\text{min}$ 。

3.3 污染场地原位修复旋喷工艺参数设计

传统旋喷工艺的主要作用是防参与加固,所用注浆材料主要为水泥,干粉投加量约为 25% ,水灰比为 $0.8 \sim 1.5$ (常用 1.0)。根据前面所述,在旋喷注浆方法中,二重管法更适用于污染场地原位修复

工程施工,传统旋喷工艺二重管法所采用的工艺参数一般为:注浆压力 $20 \sim 40 \text{ MPa}$ (常用 25 MPa),流量 $80 \sim 120 \text{ L}/\text{min}$,喷嘴孔径 $2 \sim 3 \text{ mm}$,喷嘴个数 $1 \sim 2$ 个 (常用 2 个),提升速度 $10 \sim 25 \text{ cm}/\text{min}$ (常用 $15 \text{ cm}/\text{min}$),旋转速度 $10 \sim 20 \text{ r}/\text{min}$ (常用 $10 \text{ r}/\text{min}$)。

污染场地原位修复旋喷工艺的作用在于实现修复药剂的有效输送,包括两层含义:一是药剂输送到位,可通过调节钻入位置和控制喷射半径来实现;二是药剂与土壤的有效均匀混合,通过高压浆液与压缩空气切割土体实现。在污染场地原位修复工程中,修复药剂的干粉投加量为:氧化剂与还原剂 $1\% \sim 5\%$,固化稳定化剂 $5\% \sim 10\%$ 。采用传统旋喷工艺二重管法来施工,会导致药剂的大大过量,从而带来二次污染,且施工过程大量的返浆会对操作人员及周边施工人员造成一定的危害。此外,修复药剂没有水硬性,过量的注浆浆液会造成施工区域地基土强度大大降低,影响后续施工安排。因此,污染场地原位修复旋喷工艺不能简单地套用传统旋喷工艺参数,需在其基础上进行改进,以达到药剂有效输送和均匀混合的目的。下面主要从注浆流量、旋喷半径及混合效果等方面入手,对注浆压力、提升速度、旋转速度、喷嘴直径等工艺参数进行改进设计。

3.3.1 注浆压力

注浆压力反映着高压浆液对土体的切割力,它不仅与旋喷作用半径相关(正相关),还影响混合效果。为保证效果,应选择较大的注浆压力。此外,注浆压力与注浆流量直接相关,在喷嘴直径不变的情况下,注浆流量随注浆压力的增大而增大,这可能导致药剂的极大浪费。因此,考虑到工效、修复效果及二次污染等方面因素,在设定注浆量的前提下,尽可能选择较大的注浆压力,初步设定 $20 \sim 25 \text{ MPa}$ 。

3.3.2 喷嘴直径

注浆流量主要与注浆压力和喷嘴直径相关,在注浆压力不变的前提下,注浆流量随喷嘴直径增大而增大,旋喷半径也会相应增大。因此在注浆量一定的情况下,应根据注浆压力选择合适的喷嘴直径,初步设定 $2.0 \sim 2.5 \text{ mm}$ 。

3.3.3 提升速度与旋转速度

如前所述,提升速度和旋转速度都对旋喷半径有一定的影响,提升速度越小旋喷半径越大,但减小到一定程度后,半径增大效果不明显;旋转速度对旋

喷半径影响不大,但速度过大会造成半径减小。

提升速度过快或旋转速度过小,会导致高压浆液与土体接触面减小,从而产生切割盲区,对于成桩旋喷工艺来说,会导致旋喷体成型不佳;而对于污染场地原位修复旋喷工艺,则会影响修复效果。基于此,本文定义一个新的参数——螺距,即提升速度与旋转速度之比,单位为 cm/r ,表示旋转一圈提升的距离。传统旋喷工艺的螺距大约为 $1 \text{ cm}/\text{r}$,考虑到从喷嘴出来的喷射水柱有一定厚度,在垂向上浆液基本是连续不间断的。对于修复工程来说,药剂注入土壤后有层间的渗透作用,只要保证药剂与土壤混合均匀,达到去除污染物的效果就可,对于砂性土螺距可适当放大,粘性土螺距适当减小。可通过试验确定最佳螺距,在满足混合效果的前提下,尽量减少浆液用量。初步设定提升速度 $15 \sim 75 \text{ cm}/\text{min}$,旋转速度 $10 \sim 15 \text{ r}/\text{min}$ 。

4 高压旋喷注浆技术的现场试验研究

为验证设计工艺参数的合理性和有效性,本文开展现场试验研究,设计在非污染场地进行模拟试验,得到一组适用于污染场地原位修复的旋喷施工工艺参数,主要包括注浆压力、喷嘴直径、提升速度、旋转速度以及定义的螺距等参数。

4.1 试验设计

由于在非污染场地进行试验,不能直接选用修复药剂进行试验以免带来二次污染,本试验采用水溶性环保染料代替水溶性修复药剂,通过不同工艺参数的组合试验来研究各工艺参数对旋喷半径及混合效果的影响,从而得出最佳的工艺参数组合。本次现场试验共布置 11 个孔位,按平整场地→旋喷孔位放样→地面试喷→开始作业→结束作业→开挖等步骤进行,各点位编号及分布如图 2 所示。

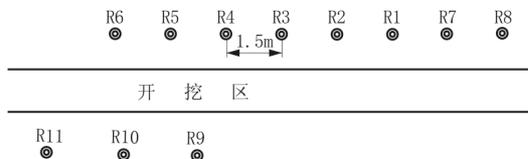


图 2 旋喷工艺现场试验点位布置

4.2 试验结果及分析

本试验于 2016 年 9 月在上海某郊区空地开展,场地地势总体较平坦,场地填土层厚度为 $0.5 \sim 2.7 \text{ m}$,填土层以下依次为粉质粘土、淤泥质粉质粘土、淤泥质粘土等土层。

试验过程中各点位所用旋喷工艺参数如表 1,控制注浆压力 25 MPa ,旋转速度 $15 \text{ r}/\text{min}$ 。试验结束后隔天开挖,先用挖机开槽(深度约 2 m),再人工边修边挖,开挖结束后现场测量旋喷体有效直径和螺距,结果见表 1。

表 1 各点位试验参数及结果统计

编号	喷嘴直径/mm	提升速度/ $(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	有效直径/mm		注浆量/L		
			实测	理论	实测	理论	
R1	2.5	30	800	2.0	2.0	648	582
R2	2.5	45	700	3.0	3.0	390	352
R3	2.5	75	800	4.0	5.0	234	237
R4	2.0	75	700	6.0	5.0	156	167
R5	2.0	45	600	4.0	3.0	273	229
R6	2.0	30	450		2.0	351	342
R7	2.5	60	800	3.0	4.0	312	249
R8	2.0	60	700	3.0	4.0	195	148
R9	2.5	15	1200		1.0	1336	1237
R10	2.5	30	600		2.0	624	552
R11	2.5	45	900	3.8	3.0	360	321

通过对表中数据进行整理分析,并参考传统旋喷施工经验和污染场地修复工程案例,可得到以下结论。

(1) 各组旋喷注浆试验的有效直径基本在 $700 \sim 800 \text{ mm}$,R6 和 R10 直径偏小($400 \sim 600 \text{ mm}$),根据现场开挖情况,初步分析是因为土壤太硬,射流衰减很快;R9 直径偏大(1200 mm),主要原因是提升速率较小($15 \text{ cm}/\text{min}$),注浆量明显大于其他试验组。旋喷体直径随喷嘴直径的增大略有增加,直径与提升速率相关性较小。

(2) 除点位 R6、R9、R10 外,其余试验组旋喷体均有明显分层现象,且测量出的螺距与理论计算得到的螺距数值接近。开挖处地层为粉质粘土分布,根据场地勘察资料,相应的渗透系数 K_v 约为 $2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{s}$,即向下渗透 1 cm 需 46 天时间,按工期 3 个月计算,适用的螺距为 2 cm 及以下。

(3) 根据以往修复工程经验,常用修复药剂投加量一般为土体质量的 $1\% \sim 2\%$,按 800 mm 直径、 3 m 高度旋喷体计算,需用药剂 $24 \sim 48 \text{ kg}$,按配置浓度 10% 考虑,可得出相应的注浆量为 $240 \sim 480 \text{ L}$ 。结合前面关于螺距的选择,在粘性土(如粉质粘土)中开展污染场地原位修复旋喷施工时,建议采用的工艺参数为注浆压力 25 MPa ,喷嘴直径 2.5 mm (单喷),提升速度 $30 \text{ cm}/\text{min}$,旋转速度 $15 \text{ r}/\text{min}$,采用该工艺参数进行施工可初步满足药剂浓度

及用量要求,且能达到较大的旋喷作用范围(直径800 mm)。

5 结论

(1)旋喷注浆技术由于其工艺特点,在上海地区等低渗透性土层中进行原位修复时,可克服传统原位注入技术(如注入井)效率低、效果差等缺点,实现药剂的有效输送和混合。从成本、工效及效果等因素考虑,二重管法更适用于污染场地原位修复工程施工,在施工过程中可通过调整工艺参数,达到减少返浆甚至不返浆的目的。

(2)为提高旋喷注浆技术在污染场地原位修复中的适用性,本文基于传统旋喷工艺,对二重管法旋喷工艺参数进行改进设计,初步设计为:注浆压力20~25 MPa,喷嘴直径2.0~2.5 mm,提升速度30~75 cm/min,旋转速度10~15 r/min。

(3)本研究开展旋喷注浆现场试验,以验证设计工艺参数的合理性和有效性。现场试验表明,旋喷体直径随喷嘴直径增加而略有增大,直径与提升速度相关性较小;旋喷体分层现象明显,实测螺距值与理论计算值接近,结合地层条件及修复案例分析,适用螺距为2 cm左右;建议旋喷工艺参数为注浆压力25 MPa,喷嘴直径2.5 mm(单喷),提升速度30 cm/min,旋转速度15 r/min,采用该参数进行施工可初步满足药剂浓度及用量要求,且能达到较大的旋喷作用范围(800 mm直径)。

(4)由于各场地地层条件不一,使用高压旋喷

注浆工艺进行污染场地原位修复施工时,需在施工前进行现场中试,筛选出适用于该场地地层条件和污染特性的旋喷施工工艺参数,利用该组工艺参数进行施工,能使修复药剂与污染土混合均匀,同时达到旋喷作用半径较大、返浆量较少、注浆量略大于理论计算值的目的,最终施工完成后的场地能保持较好的工程强度。

参考文献:

- [1] 周际海,黄荣霞,樊后保,等.污染土壤修复技术研究进展[J].水土保持研究,2016,23(3):366-372.
- [2] 冯俊生,张俏晨.土壤原位修复技术研究与应用进展[J].生态环境学报,2014,23(11):1861-1867.
- [3] 牛虹.高压旋喷法的施工特性及设备[J].工业建筑,2002,32(10):52-59.
- [4] 余暄平.国内外高压旋喷技术的发展现状与趋势[J].成果应用,2006,(4):185-189.
- [5] 徐平,张敏霞,丁亚红.高压旋喷注浆加固设计及应用[J].山西建筑,2009,35(13):94-95.
- [6] 刘黎,崔晓峰.高压旋喷桩处理技术在软土地基中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2011,(11):131-134.
- [7] 殷湘舰,周意红.双高压旋喷桩在超深地下连续墙接缝止水加固中的运用研究[J].吉林建筑工程学院学报,2014,31(3):35-39.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 韩金田.复合注浆技术在地基加固中的应用研究[D].湖南长沙:中南大学,2007:14-18.

(上接第92页)

内部的滑面滑动,当在降雨等影响下,会进一步加重边坡的失稳。但岩堆坡体破坏面主要集中在表层,发生小范围滑动破坏,坡体深层滑动的可能性较小。

(2)通过对大前石岭隧道进口岩堆稳定性评价表明,该隧道施工过程中,采取一定施工措施条件下(明挖放坡+抗滑桩),无论在正常工况下还是降雨工况下,均能保证岩堆边坡的稳定,证明了施工措施的有效性,也便于同类工程得以借鉴。

参考文献:

- [1] 陈建平.高边坡岩堆地区隧道洞口段围岩稳定性分析[D].四

川成都:西南交通大学,2008.

- [2] 杨慧之,邓清禄,李佰龙.桓仁岩堆特征及稳定性研究[J].低温建筑技术,2016,(5):126-128.
- [3] 文谦.高等级公路岩堆体边坡稳定性分析研究[D].上海:同济大学,2007.
- [4] 李乾坤,石胜伟,韩新强,等.国内地质灾害机理与防治技术研究现状[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(7):52-54.
- [5] 编写组.铁路工程地质手册(修订版)[M].北京:中国铁道出版社,2010.
- [6] TB 10025—2006,铁路路基支挡结构设计规范[S].
- [7] TB 10027—2012,铁路工程不良地质勘察规程[S].
- [8] 宋国龙.露天煤矿边坡稳定性实例分析及优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):30-35.
- [9] 熊斌.基于ANSYS软件的边坡开挖模拟和稳定性评价[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(2):64-68.