

# 污染场地原位喷射注入工艺与修复机制研究

冯超<sup>1,2</sup>, 王瑜<sup>1,2</sup>, 刘宝林<sup>1,2</sup>, 王志乔<sup>1,2</sup>, 孔令镛<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**我国地下水污染已呈现从点状污染向带状和面状污染发展的态势,传统修复材料投放工艺粗糙、在含水介质中难扩散,且地下水存在分层、赋存状态多变,注入参数控制难度大,易导致各层水交叉污染等问题。针对这些问题,本文提出了集垂直/导向钻进、旋转喷射注入、微压压裂扩散、扩张封隔等一体的原位喷射注入工艺,研制了配套钻进—注入一体化钻具,总结了喷射注入过程中修复材料的运移和修复机制,为污染场地原位修复系统的设计奠定基础,为绿色精准修复提供参考。

**关键词:**污染场地;原位修复;喷射注入;修复机制;运移机理

**中图分类号:**P634;X53 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0509-05

## Research on in-situ injection technology and remediation mechanisms for contaminated sites

FENG Chao<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, LIU Baolin<sup>1,2</sup>, WANG Zhiqiao<sup>1,2</sup>, KONG Lingrong<sup>1,2</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory on Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Groundwater contamination in China has developed from point-like to band-like and surface-like contamination. Traditional remediation materials are roughly placed, difficult to diffuse in the water-bearing media, and there are problems such as stratification of groundwater, variable storage states, difficulty in controlling injection parameters, and easy cross-contamination of various layers of water. To address these problems, this paper proposes an in-situ injection process that integrates vertical/guided drilling, rotary injection, micro-pressure fracture diffusion and expansion seal, develops an integrated drilling-injection tool, summarises the transport of remediation materials and remediation mechanisms during injection, lays the foundation for the design of in-situ remediation systems for contaminated sites, and provides a reference for green and precise remediation.

**Key words:** contaminated site; in-situ technology; injection; remediation mechanisms; movement mechanisms

## 0 引言

污染场地指蕴含有毒、有害物质的区域,该区域的地下水、土壤、地表水和空气都被称为有毒、有害物质的载体。目前,地下水作为我国水资源的

重要组成部分,污染已十分严重<sup>[1]</sup>。特别是近几年工业化的快速发展,不仅加重了水资源短缺的问题,而且给人居环境、区域生态环境构成了严重威胁与挑战<sup>[2-3]</sup>。土壤作为一种重要的环境介质,产生

收稿日期:2023-05-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.083

基金项目:国家重点研发计划课题“多分支水平井导向钻进与精准注入机具研制”(编号:2018YFC1802404);高精尖学科建设“城市地质环境与工程”

第一作者:冯超,男,汉族,1995年生,在读博士,地质工程专业,从事污染场地修复技术和地质钻探研究工作,北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)国土资源部深部钻探技术重点实验室207室,3002210018@email.cugb.edu.cn。

通信作者:王瑜,男,汉族,1979年生,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,从事钻探技术与装备研究工作,北京市海淀区学院路29号, wangyu203@Cugb.Edu.cn。

引用格式:冯超,王瑜,刘宝林,等.污染场地原位喷射注入工艺与修复机制研究[J].钻探工程,2023,50(S1):509-513.

FENG Chao, WANG Yu, LIU Baolin, et al. Research on in-situ injection technology and remediation mechanisms for contaminated sites[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):509-513.

了越来越多的污染物<sup>[4]</sup>,据调查,我国土壤受到石油烃、农药、多环芳烃(PAHs)、重金属、工业三废等有毒、有害物质污染面积较大<sup>[5]</sup>。因此,对污染场地展开相关研究日益迫切。

从污染源、污染特征、保护目标和受体、修复模式以及涉及的管理部门等方面,我国土壤污染可分为4大主要类型:农田耕地土壤污染、企业生产场地土壤污染、矿山开采土壤污染和石油开采土壤污染。其中,企业生产场地多分布于城市周边,严重威胁城市居民身体健康,急需进行修复治理。与其他土壤污染类型相比,企业生产场地污染具有污染物浓度高、种类复杂、迁移深、空间扩散大的特点,传统的原位修复手段,如可渗透反应格栅修复、原位电动修复、建井循环修复、压裂注入修复等,已不能满足高效、精准修复的要求<sup>[6]</sup>。开发高效、精准的污染场地修复技术是关系人民生活福祉的急迫需求。

喷射注入技术的出现在一定程度上提高了污染场地修复的效率。喷射注入技术是将修复药剂以较高的速度喷射到地层中,具有切割和重构土体的作用,同时使修复药剂与污染物充分混合达到修复地层的目的<sup>[7-9]</sup>。特别是在修复弱渗透性地层(如粘土、粉粘土、淤泥质土)污染场地时<sup>[10]</sup>,喷射注入技术是其他原位修复技术难以替代的<sup>[11]</sup>。目前,欧美等发达国家喷射注入修复技术发展水平较高,主要体现在注入精度高和药剂扩散距离大等方面,如美国超级基金支持的Phoenix Goodyear Airport North项目中采用4孔喷射的方法在地下水中最大扩散距离达6 m。国内喷射修复技术正处于起步阶段,在喷射注入技术方面研究尚不成熟,尚未形成适合我国的原位喷射注入修复的技术体系,主要体现在:(1)修复工艺不完善,竖直井在修复大面积污染场地时存在效率低、对地面扰动大等问题;(2)修复药剂注入机理不明确,为达到修复指标往往需要向地层中注入过多的修复药剂,容易造成二次污染;(3)缺乏配套机具,当前缺乏与污染场地原位喷射注入相配套的钻具,存在封隔效果差、钻进效率低、修复方式单一等问题<sup>[12]</sup>。因此,系统开展喷射注入机理研究、完善喷射注入工艺和研制配套机具对实现污染场地高效、精准修复具有重大的现实意义。本文主要对被有毒、有害物质污染的地下水 and 土壤组成的空间区域进行修复工艺研究。

## 1 污染场地原位喷射注入关键技术

针对直推式注入、改进的斜井、高压旋转喷射技术、水平介质反应井和水平定向钻孔原位修复技术存在的问题<sup>[13-14]</sup>,原位修复技术的关键技术至少包括:

(1)修复井型设计<sup>[15]</sup>。修复井井型分为垂直修复技术和水平修复技术。与垂直修复技术相比,水平修复技术与污染场地的接触面积更大,可修复土工结构下部污染区域。但水平修复井修复浅层和点状污染羽时,因需要较大的施工距离,施工时间会相对增加。总之,水平修复技术和垂直修复技术适用于不同污染羽,水平井适用较深和带状/面状污染,垂直井适用于较浅层和点状污染。

(2)修复药剂投加技术<sup>[16]</sup>。斜井、水平介质反应井和水平定向钻孔技术均为被动修复技术,采用筛管或反应介质进行污染地下水的修复,但这种被动修复不适合低渗透地层的修复施工。直推式注入静压注入属主动修复,但与污染物混合效果差。高压旋转喷射技术通过高压将修复药剂喷射进入地层,极大地提高了修复药剂与污染物的混合效果,是一种很有前景的修复药剂投加技术。

(3)钻杆与井壁封隔技术。直推式注入静压注入,压力过大会导致地层破裂;高压旋转喷射技术因注入压力过大,会产生返浆,造成上覆地层二次污染,甚至造成工作人员暴露在污染环境中。此外,斜井、水平介质反应井和水平定向钻孔技术采用封隔器可维持筛管两端地层的稳定性,提高施工效率。因此,钻杆与井壁之间的封隔是原位修复技术的关键技术之一。

因此,提出了一种集垂直/导向钻进、旋转喷射注入、扩张封隔等为一体的多分支水平井原位修复工艺,并研发了配套的钻进和注入机具装备。该工艺较好地解决了精准定位、修复范围、混合效果、二次污染等协调难题,导向钻进可在较软地层和地面建筑下方地层中有效实现轨迹和位置的准确控制,有效保证注入修复精度;高压旋转喷射技术可获得较大的修复半径和混合搅拌效果;利用修复液压力实现地层有效封隔,防止不同地层交叉污染。此外,该工艺既可施工竖井修复点状、浅层污染羽,又可施工水平井修复带状/面状、深层污染羽。

## 2 原位喷射注入工艺

原位修复水平钻进-喷射技术是需要先钻进一个主孔,根据需要修复的场地情况可设置多个分支井,钻进过程如图1所示。井底钻具组合为: $\text{\O}165\text{ mm}$ 双刀刃钻头+ $\text{\O}150\text{ mm}$ 双管导向节+ $\text{\O}92\text{ mm}$ 封隔器+ $\text{\O}114.3\text{ mm}$ 喷射节+ $\text{\O}92\text{ mm}$ 封隔器+ $\text{\O}114.3\text{ mm}$ 外钻杆+ $\text{\O}83\text{ mm}$ 内钻杆。在钻进时,由喷射-导向一体化钻机的外钻杆动力头和内钻杆动力头通过内外钻杆给井底钻具提供扭矩和压力,然后井底钻具给钻头提供动力,使钻头切割土体,从而达到钻进的目的<sup>[17]</sup>。

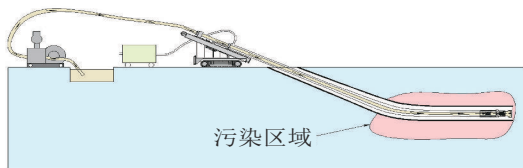


图1 钻进状态

在钻进过程中,井底钻具中的喷射节和封隔器也处于不工作状态,注药系统处于准备状态即不往内外钻杆环空注入修复药剂但处于运转状态混合药剂。在钻进水平井时,钻机桅杆调整到预定的入土角,然后沿着设计的轨迹进行钻进,由喷射-导向一体化钻机的外钻杆动力头和内钻杆动力头通过内外钻杆给井底钻具提供扭矩和压力。在进行入土直线段和水平段钻进时,内外钻杆同时转动,此时不造斜;当外钻杆固定到某一位置时,外钻杆不转,内钻杆转动,外钻杆随着内钻杆的钻进滑动,此时为增斜段,钻井的斜率会越来越大。在钻进时泥浆泵通过高压胶管和内钻杆水龙头连接,将泥浆池中泥浆以压力为 $1\sim 2\text{ MPa}$ 、流量为 $50\sim 150\text{ L/min}$ 压入内钻杆,然后通过从内钻杆中心孔直达井底,清洗钻头,从而使钻头正常钻进。此时,主孔与分支孔可视场地情况在钻到预定位置之后,回拖进行喷射。

如图2所示为水平回拖修复状态,该状态亦可分为高速射流切割状态和低压注入状态。当井底钻具钻到待修复地层之后,整个钻机停止工作,此时内钻杆中心孔通入高压、高速水,当高压水到达井底钻具喷射节时,由于压力较大使喷射节堵阀堵塞下部流道,只能使水从喷嘴喷出来切割土体,使土体破坏。之后停止通高速、高压流体,在内外管环空中通修复药剂,修复药剂进入井底钻具,使上下端封隔器

打开,同时从喷嘴喷出修复污染场地。使用水平井回拖修复时,应先对分支井眼进行回拖修复,依次往井眼方向回拖,主井眼不进行修复作业,这样亦能保证污染场地的修复。

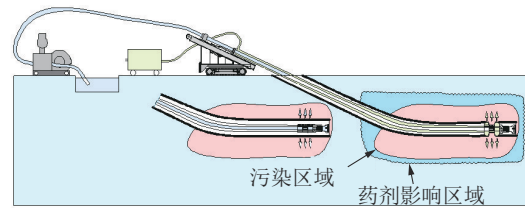


图2 回拖喷射状态

当水平钻进到预定位置即喷射节已经到达待修复区域,即可开始喷射修复的工作,水平回拖喷射修复的工艺与垂直喷射状态相同,且由于注入短节长度为 $1.2\text{ m}$ ,喷射高压水和修复药剂 $5\text{ min}$ 左右,向上提钻杆 $1.2\text{ m}$ ,每提钻杆 $1.2\text{ m}$ ,就形成直径为 $6\sim 8\text{ m}$ 的圆柱形修复体,整个多分支水平井就形成了厚度 $6\sim 8\text{ m}$ 的面状修复区域。如果需要对该井进行监测,应在钻进时采用水平定向钻轨迹,将钻头钻出地表回拖检测管,回拖到待修复区域,再开始进行喷射修复工作。图3为喷射过程高速射流切割-低压注入原理图。

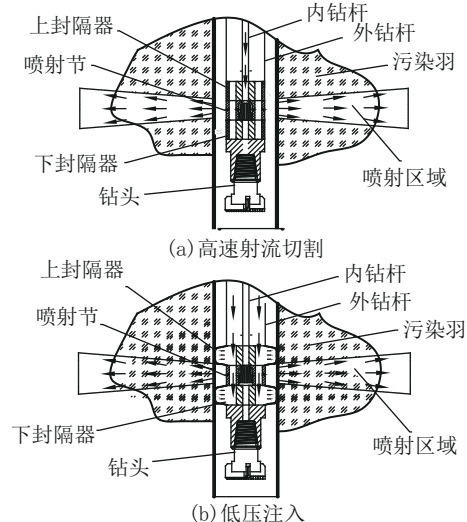


图3 高速射流切割-低压注入原理

图3(a)为高速射流切割原理,图中来自内钻杆中心孔的高速、高压流体通过上封隔器中心孔到达喷射节,由于注入压力、流速较大推动喷射节堵阀向下运动从而使流体进入到喷射腔最终从喷嘴喷出切

割土体,在整个切割过程中,切割使用高速、高压清水作为水射流的流体,不需考虑流体对土层的污染,这时上下端封隔器不工作。图3(b)为低压注入原理,图中来自内外钻杆环空的修复药剂流入封隔器,封隔器受到压力膨胀起到封隔作用,之后修复药剂到达喷射节喷射腔中,从喷嘴喷出,喷出的修复药剂沿着高速切割而成的土体裂缝进行渗透,最终达到

修复污染场地的目的。

### 3 修复药剂运移机制

图4为喷射注入系统原理图,修复药剂注入装置主要由注入系统和注入钻具组成。修复药剂注入过程可分为3个过程:水射流发生系统、修复药剂喷射淹没射流特性和修复药剂土体作用机理。

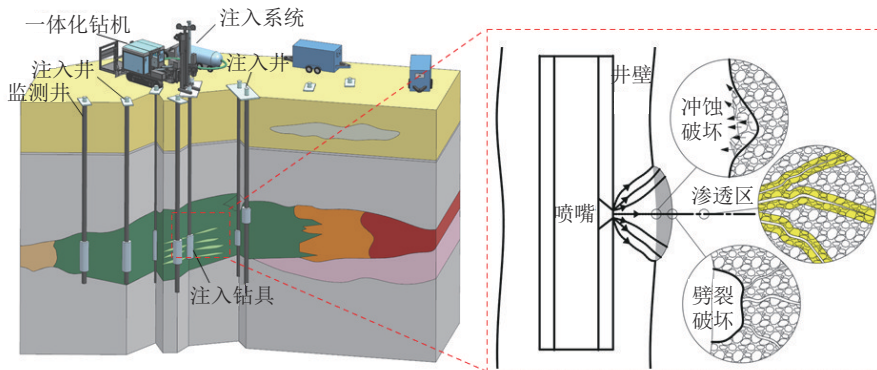


图4 喷射注入系统

水射流系统,液体通过柱塞泵排出到管道中,然后通过喷嘴喷射出来。由于柱塞泵曲柄连杆机构的特殊性,从柱塞泵中排出的液体会产生一定的脉动。这种脉动可以被气囊和其他结构削弱,但它永远不会消失。当柱塞泵产生的脉动流体进入喷嘴

时,不同类型的喷嘴对脉冲射流的反应不同。因此,水射流的输送路径包括柱塞泵、管道和喷嘴3部分,喷嘴模型采用基于流体力学的伯努利方程。建立的柱塞泵和管道的模型分别为:

$$P_1 = \begin{cases} \frac{c}{\eta A_1 r \omega_1 [\sin \theta + (\lambda/2) \sin 2\theta + \sin(\theta + 2\pi/3) + (\lambda/2) \sin 2(\theta + 2\pi/3)]} & \theta \in [0, \frac{\pi}{3}) \\ \frac{c}{\eta A_1 r \omega_1 [\sin \theta + (\lambda/2) \sin 2\theta]} & \theta \in [\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (1)$$

$$Q_1(\theta) = \begin{cases} \eta A_1 r \omega_1 [\sin \theta + (\lambda/2) \sin 2\theta + \sin(\theta + 2\pi/3) + (\lambda/2) \sin 2(\theta + 2\pi/3)] & \theta \in [0, \frac{\pi}{3}) \\ \eta A_1 r \omega_1 [\sin \theta + (\lambda/2) \sin 2\theta] & \theta \in [\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\ln \frac{dQ_1}{dt} + C_n \int Q_1 dt + R_d Q_1 = \Delta P = |P_1 - P_2| \quad (3)$$

修复药剂喷射淹没射流流场特性,速度分布可表示为:

$$u(x, r) = \begin{cases} u_0 & \text{当 } x \leq 6.3d_N \\ u_0 \left( \frac{6.3d_N}{x} \right) \exp \left\{ -\left( \frac{r}{R} \right)^2 \right\} & \text{当 } x > 6.3d_N \end{cases} \quad (4)$$

可得射流沿轴线方向的流量为:



$$Q(x) = \begin{cases} \pi u_0 (Sx + \frac{d_N}{2})^2 & \text{当 } x \leq 6.3d_N \\ \pi u_0 (\frac{6.3d_N}{x}) (Sx + \frac{d_N}{2})^2 (1 - e^{-1}) & \text{当 } x > 6.3d_N \end{cases} \quad (5)$$

修复药剂射流经钻具与孔壁间隙之间的自由射流段后将与井壁发生碰撞,从而与土体发生作用。图5所示,药剂射流对土体的作用包括3方面:(1)冲蚀破坏;(2)劈裂破坏;(3)渗透扩散。冲蚀破坏是由于射流较高的速度冲击土体颗粒导致的,这主要发生在井壁较小的范围内,冲蚀后将形成冲蚀空腔。随着喷射距离的加大,射流动压减小静压不断增加,当作用在冲蚀孔壁上的静压力超过土体强度后会产生裂缝。药剂会进一步进入到裂缝中使裂缝扩张,这一过程与劈裂注浆较为相似。在使土体发生结构性破坏的同时,药剂在压差的作用下将会通过土壤的孔隙不断向地层中发生渗透作用。

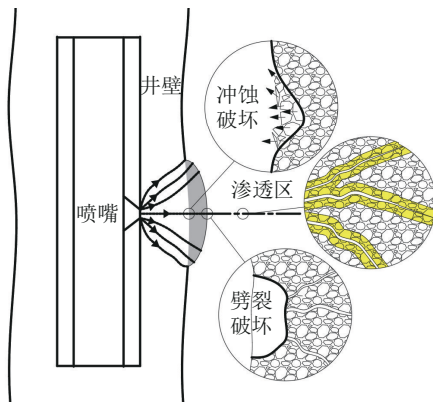


图5 土体冲蚀破坏示意

#### 4 结论

(1)在调研直推式注入、改进的斜井、高压旋转喷射技术、水平介质反应井和水平定向钻孔原位修复技术的基础上,总结了原位修复技术应该包括的关键技术为修复井型设计、修复药剂投加技术、钻杆与井壁封隔技术。

(2)针对当前土壤和地下水中污染物空间分布复杂多变的特点,创新提出了垂直/导向钻进、旋转喷射注入、微压压裂扩散、扩张封隔等一体的多分支井原位注入工艺,可实现大范围污染地层的精准注入修复,有效降低修复成本。

(3)基于研发的注入工艺和机具,综述了地面注

入装备—地下注入机具—污染地层中修复液传输扩散机制,为推动污染场地原位精准注入奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵勇胜. 地下水污染场地风险管理与修复技术筛选[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5):1426-1433.
- [3] 陈梦舫. 我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3):327-335.
- [4] 刘英莉, 李艳, 高红霞, 等. 某污灌区土壤有机污染物成分分析[J]. 环境与职业医学, 2008, 25(2):181-183.
- [5] 贾小飞, 崔颖, 李勇. 我国污染土壤修复研究现状分析[J]. 科技创新与应用, 2016(4):147.
- [6] 陈如海. 污染液在地基土体中迁移及控制研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [7] 白秀佳, 张红玉, 王桂琴, 等. 填埋场陈腐垃圾综合利用研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(12):48-52.
- [8] 武亚军, 韩亚东, 唐欣, 等. 污染土壤高压旋喷修复药剂迁移透明土实验及数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(5):21-28.
- [9] 宋刚练, 牌卫卫, 江建斌, 等. 应用于污染场地原位修复的旋喷工艺研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(7):85-89.
- [10] 韩慧慧. 利用弱凝胶强化修复试剂在低渗透地层中的迁移研究[D]. 长春:吉林大学, 2019.
- [11] 冯超, 王瑜, 王志乔, 等. 地下水原位修复材料钻进注入技术现状调研[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京:地质出版社, 2019.
- [12] 孔令谔. 污染场地原位修复喷射注入机理及关键技术研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2022.
- [13] 李静波. 土壤及地下水原位注入修复技术[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023, 3:96-99.
- [14] 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.
- [15] 黄俊杰. 长平矿皮带运输大巷修复技术研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2014.
- [16] 唐小龙, 吴俊锋, 王文超. 有机污染土壤原位化学氧化药剂投加方式的综述[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8):376-380.
- [17] 冯超. 污染场地双管导向钻进注入修复工艺研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2021.

(编辑 李艺)