

# 污染场地原位立体修复工艺研究

孔令镨<sup>1,2</sup>, 王瑜<sup>1,2</sup>, 刘宝林<sup>1,2</sup>, 王志乔<sup>1,2</sup>, 冯超<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:**我国土壤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,因原位注入方法无需开挖、扰动小、成本低,已成为场地污染修复的发展热点和方向。目前国内关于药剂喷射注入修复技术方面的研究十分缺乏,无法满足场地污染治理的需求。针对传统修复药剂投放工艺对地面扰动大、钻孔工作量大的问题,在对污染场地典型污染羽和污染物进行归纳分析的基础上,针对不同形态的污染羽设计了垂直井、水平井和多分支井工艺,提出了点-面结合的药剂原位精准喷射注入工艺,通过场地试验研究,初步形成了原位注入立体修复技术方法,以期实现污染地层的精准高效注入和大面积修复,为污染场地高效、精准、环保原位修复奠定基础。

**关键词:**污染场地;原位修复;立体修复;污染羽;多分支水平井

**中图分类号:**P634:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0502-07

## In-situ three-dimensional remediation technology of contaminated sites

KONG Lingrong<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, LIU Baolin<sup>1,2</sup>, WANG Zhiqiao<sup>1,2</sup>, FENG Chao<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:** Soil and groundwater pollution in China has shown a trend of development from point pollution to zonal and planar pollution. Because the in-situ injection method has the features of no need to be excavation, small disturbance and low cost, it has become a development hotspot and direction of site pollution remediation. At present, a lack of research on the remediation technology of chemical injection is made, which can not meet the needs of site pollution control. Aiming at the problems of large ground disturbance and large drilling workload caused by the traditional remediation agent delivery process, an in-situ precise injection process of point-surface combination was proposed through field test research in hope to achieve accurate and efficient injection, large-area remediation of contaminated strata, lay a foundation for efficient, accurate and environment friendly in-situ remediation of contaminated sites.

**Key words:** contaminated sit; in-situ remediation; three-dimensional remediation; pollution plume; multi-lateral horizontal well

## 0 引言

当前,我国场地污染现象突出,已呈现从点状污染向带状和面状污染发展的态势。2014年4月环保部和国土资源部发布了《全国土壤污染状况调查公报》,全国土壤环境状况总体不容乐观,部分地区

土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧,工矿业废弃场地土壤环境问题突出<sup>[1]</sup>。

污染场地修复技术可分为异位修复技术、原位修复技术。其中,异位修复技术以蒸汽浸提、泥浆反应器、土壤堆腐法、焚烧法、预制床法和化学淋洗

收稿日期:2023-05-28; 修回日期:2023-07-21 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.082

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

第一作者:孔令镨,男,汉族,1993年生,博士,地质工程专业,从事环境钻探和污染场地修复研究工作,北京市海淀区学院路29号,lrkong@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:孔令镨,王瑜,刘宝林,等.污染场地原位立体修复工艺研究[J].钻探工程,2023,50(S1):502-508.

KONG Lingrong, WANG Yu, LIU Baolin, et al. In-situ three-dimensional remediation technology of contaminated sites[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):502-508.

法为主<sup>[2-7]</sup>,而原位修复技术包括原位化学氧化技术、可渗透反应格栅修复技术、原位微生物修复技术和监测天然衰减修复技术等。由于不需要开挖和搬运,原位修复技术在修复城市周边的污染场地中具有较大优势<sup>[8-12]</sup>。

在原位修复技术中除可渗透反应格栅修复技术和监测天然衰减修复技术外,其余原位修复技术都需要将功能材料通过原位注入方法注入到地层中。目前常用于污染土壤原位注入修复方法有:(1)建井循环注入,在间隔一定距离上修建注入井和抽出井,通过人为建立地下水局部循环将药剂送入地层中;(2)水力压裂注入,将功能材料以较高的压力注入地层中,通过压力将地层压裂使修复药剂与地层接触,可以形成延伸较粗大的裂缝<sup>[13]</sup>;(3)喷射注入,将功能修复材料从喷嘴中以较高的速度喷出,通过高速切割、搅拌土体,使药剂与土壤充分混合<sup>[14]</sup>。

当前原位喷射注入修复几乎都采用垂直井的方式。在修复大面积污染场地时,为了覆盖整个场地往往需要布设大量的钻孔,既增加工作量外还会对地面造成较大的扰动。此外,如果污染地层有一定的埋深,每次钻进时都需要钻穿上部覆盖层,不但增加了无效工作量还会导致水层交叉污染。因此,为了实现污染场地的高效、精准、低成本修复,研究能实现点-面结合的高效立体修复工艺是十分必要的。

本文在对污染场地典型污染羽和污染物进行归纳分析的基础上,针对不同形态的污染羽设计了垂直井、水平井和多分支井原位喷射注入修复工艺,并在实际场地进行了多分支水平井的现场验证。本研究能为污染场地的高效、精准、低成本修复提供一种新方法和新思路。

## 1 污染场地典型污染羽和污染物特征分析

污染场地是指对人体健康产生危害或具有潜在风险的空间区域,污染物主要来源于人类生产和生活,如企业生产泄漏、矿山尾库矿堆放下渗、生活垃圾填埋厂渗漏、交通运输排放等。这些进入土壤和地下水中的污染物通过对流扩散、机械弥散和分子扩散等作用最终在土体中呈点状、带状或面状分布,被污染的土壤及地下水被统称为污染羽。场地修复的目标是通过化学、物理和生物修复等手段,使污染羽中有毒有害物质发生还原、氧化、转移、吸附、转化、降解反应和固化等作用,从而使其失去活性达到

修复土壤和地下水的目的。

### 1.1 污染场地类型及污染羽特征

根据2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,抽样调查场地土壤污染物超标情况如图1所示,从图中可以看出与工矿业相关用地点位超标最严重<sup>[1]</sup>。此外,污染场地具有污染物浓度高、迁移深、空间扩散大的特点,对人民生活影响最大,是急需进行修复的污染类型。

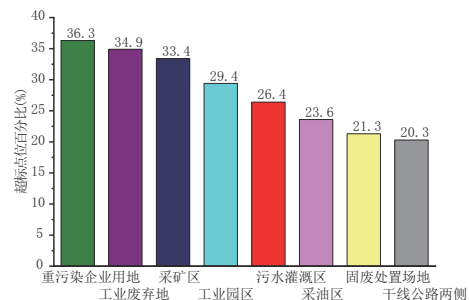


图1 典型场地及其周边土壤超标点位污染状况<sup>[1]</sup>

污染羽的空间形态决定了喷射注入修复井布置和注入参数的选取,因此研究污染羽的空间分布对修复方案设计具有重要的意义。污染羽的空间形态不但受污染源头的影 响,还与污染物迁移特性、场地土壤性质、地下水流场、当地气候条件和场地边界等因素相关。每一个场地的污染羽空间形态不同,但是存在一些共同的特征,可以根据这些共同特征对其进行归纳分类。本文根据空间形态与连通性,可将污染羽分为点状污染羽、带状污染羽和面状污染羽,如图2所示。其中,点状污染羽也被称为透镜体,是存在于未被污染土体中的多个孤立的污染体,在平面上投影为点状。带状污染羽为长宽比较大的带状分布,形成的主要原因有污染源呈带状分布(公路两侧)和污染物在地下水渗流的作用下呈带状迁移,后者常见于裂缝性地层。面状污染羽的长宽比相当,在平面上呈面状分布,空间上呈立体状分布。

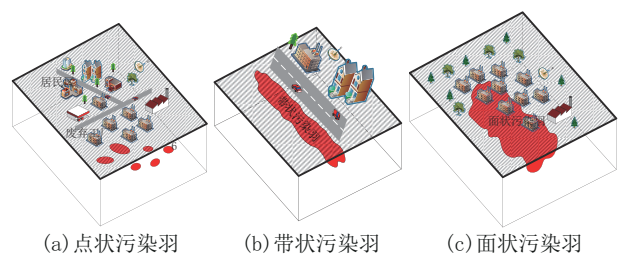


图2 典型污染羽示意

## 1.2 污染场地典型污染物及修复药剂

梁竞等<sup>[15]</sup>对我国2005~2019年期间547个污染场地的污染物种类进行了统计,结果如图3所示。从图中可以看出我国场地污染物种类繁多,根据占比可分为三个层次。其中,重金属污染物为占比最大的一类污染物,多环芳烃、无机物、苯系物、TPH为第二类常见污染物,有机污染物、VOCS、SVOCS杀虫剂、卤代烃为出现频率较低的污染物。

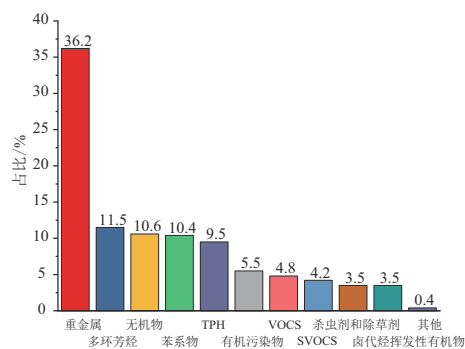


图3 我国污染场地修复项目污染物出现频次统计<sup>[15]</sup>

根据生态环境部对土壤中污染物的分类依据<sup>[16]</sup>,本文对污染场地中常见的污染物进行如图4所示的分类。其中,由于场地污染中重金属污染物特别突出,因此将重金属污染物单独列出为一类污染物。重金属污染物是指密度 $>5\text{ g/cm}^3$ 且能通过富集危害人体健康的重金属及其化合物,常见的有镉、汞、砷、铅、铬、铜、锌、镍等,主要来自冶炼厂、矿山、化工厂等工业废水渗入和汽车废气沉降<sup>[17]</sup>。有机污染物主要是指存在于土壤和地下水中的天然有机物质和其他可降解的人工合成有机物质,农药是最常见的有机污染物<sup>[18]</sup>。目前,农药种类繁多,主要分为有机氯和有机磷两大类,如:DDT、六六六、狄氏剂属于有机氯类,马拉硫磷、对硫磷、敌敌畏属于有机磷类<sup>[19]</sup>。除农药外,有机污染物还来源于石油、化工、制药、油漆、染料等行业排出的废弃物中包含的石油、多环芳烃、多氯联苯、酚等。无机污染物是指主要来自工业废水和固体废物中的各种有害盐类、酸、碱物质,其中硫酸盐氯化物、硝酸盐和可溶性碳酸盐等是常见的无机污染物。

污染场地原位注入修复是采用高压泵及流体输送系统,将修复药剂从喷嘴中高速喷射到污染地层中。因此药剂的特性会对注入参数选取和注入效果有影响。本文统计了污染场地常见污染物的特性及

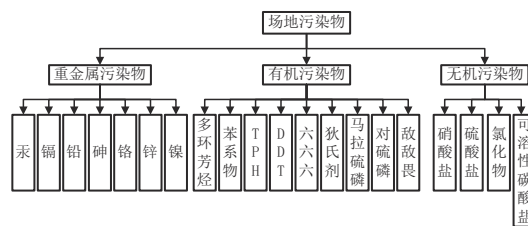


图4 场地污染中常见污染物分类

修复药剂,如表1所示。从表中可以看出除液态活性炭和碳源外,其余修复药剂都具有较强的氧化性或还原性。强氧化性药剂主要有:芬顿试剂、高锰酸钾、过硫酸钠和过氧化氢等;强还原性药剂主要有:硫代硫酸钠、亚铁化合物、零价铁、多硫化钙和糖蜜等。其中,液态活性炭和零价铁为含固体颗粒的药剂,其余药剂为溶液。液态活性炭主要成分包括纳米硅藻土、纳米二氧化钛、纳米电气石粉、负离子粉等纳米材料,常被用来吸附各种污染物。碳源在原位生物修复技术中为微生物提供其生长和繁殖所必须的碳元素,常见的碳源有糖浆和乳化植物油等。

## 2 立体修复方案设计

为实现大面积污染场地高效、精准、环保修复,针对前面介绍的三类典型污染羽设计了不同的修复方案。对于点状污染羽设计了竖直井钻进+提升喷射注入修复工艺,带状污染羽设计了水平井钻进+回拖喷射修复工艺,对于面状污染羽设计了单层和多层多分支水平井修复工艺。在实际修复中可根据场地污染羽实际分布情况灵活选择多种修复工艺,做到点一面结合,实现高效立体修复。修复时需要用到的主要机具如表2所示。

### 2.1 竖直喷射注入修复工艺

针对空间分布较为分散的点状污染羽,在现有修复工艺的基础上改进了钻进工艺,优化了注入工艺,形成了双动力头双管钻进+封隔喷射的竖直井喷射注入工艺。竖直井喷射注入主要分为竖直井钻进和提升喷射两个过程,在预定位置钻进到设计深度后提升钻具到需修复位置后向钻具中注入修复药剂进行喷射修复。

#### 2.1.1 竖直喷射注入修复流

竖直井钻进时通过钻进-喷射一体化钻机钻进到预定深度,将喷射钻具送入到预定位置。在钻进时泥浆泵通过高压胶管和钻机水龙头连接,将泥浆

表1 污染场地常见污染物及修复药剂

污染物名称	药剂名称	特征描述	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	氧化/还原性
六价铬	硫代硫酸钠	白色晶体粉末,易溶于水,不溶于醇	1667	强还原性
	亚铁化合物	易溶于水、甘油不溶于醇	1898	强还原性
	零价铁	固体颗粒不溶于水	7800	强还原性
	多硫化钙	粉末状固体,溶于水,微溶于醇	1280	强还原性
	糖蜜	胶体状	1030	还原性
三价砷	芬顿试剂	液体药剂	—	强氧化性
	高锰酸钾	紫红色晶体,易溶于水,不溶于醇	2700	强氧化性
苯系物	过硫酸钠	白色晶状粉末,能溶于水	1100	强氧化性
	过氧化氢	溶于水、醇、乙醚,不溶于苯、石油醚	1710	强氧化性
	硫酸盐	粉末状电解质,易溶于水	2000~4000	强氧化性
	液态活性炭	含固体颗粒溶液	—	无
卤代烃	过硫酸钠	白色晶状粉末,能溶于水	1100	强氧化性
	高锰酸钾	紫红色晶体,易溶于水,不溶于醇	2700	强氧化性
	过氧化氢	溶于水、醇、乙醚,不溶于苯、石油醚	1463	强氧化性
	臭氧	常温常压为气态,极易溶于水	2.14	强氧化性
	零价铁	固体颗粒不溶于水	7800	强还原性
	碳源	粘稠状有机物	450~650	无
	液态活性炭	含固体颗粒溶液	450~650	无
多环芳烃	过硫酸钠	白色晶状粉末,能溶于水	1100	强氧化性
石油烃	高锰酸钾	紫红色晶体,易溶于水,不溶于醇	2700	强氧化性
	芬顿试剂	液体药剂	—	强氧化性
	液态活性炭	含固体颗粒溶液	450~650	无
氨氮、硝酸根类	零价铁	固体颗粒不溶于水	7800	强还原性
	碳源	粘稠状有机物	450~650	无

表2 场地修复主要机具

序号	名称	数量	功能
1	钻机	1台	为钻进与喷射提供动力
2	泥浆泵	1台	钻进时泵水润滑钻头
3	钻杆	若干米	提供钻进扭矩和注药通道
4	注入节	1套	向地层中喷射注入药剂
5	导向系统	1套	水平钻进时进行变向和定位
6	注药装置	1套	向钻杆中泵入高压药剂
7	封隔器	2套	用于封隔钻杆与孔壁环空

池中的钻井液泵入内钻杆中心孔从钻头流出。与岩石地层中钻进不同,在土层中钻进主要是钻头将破碎的土体向周围地层挤扩从而形成通道。此时,钻井液主要起到润滑钻头减少钻进阻力的作用,并不起携带岩屑的作用。因此,为防止向地层中注入过多流体造成二次污染,应根据实际情况尽量减小泥浆泵的排量。

如图5所示,当钻进到预定位置后,就可开始喷射注入,具体过程为:通过高压胶管将注药泵出水口和外钻杆水龙头连接,通过注药泵将药剂以一定的压力压入内外钻杆之间的环空中,在药剂喷射节上的喷嘴高速喷出,切割搅拌土体,使药剂与土体和地下水中污染物充分混合。在喷射修复剂的同时为了防止返浆污染地面,设置有封隔器来封隔外钻杆与井壁之间间隙。由于设置有封隔器,喷射注入只能采用定喷的方式,当完成一段喷射修复后切断注入井下压力使封隔器收缩再提升钻具到下一段喷射地层位置进行喷射注入。

### 2.1.2 竖直喷射注入修复布井工艺

当污染羽呈点状分布或埋深小于水平轨迹的最小埋深时,需要通过竖直喷射进行修复。如图6所示,竖直井平面上按照“梅花桩”形式布置,间距为喷射直径与渗透长度之和 $\Delta L$ 。在边界上,如果条件允

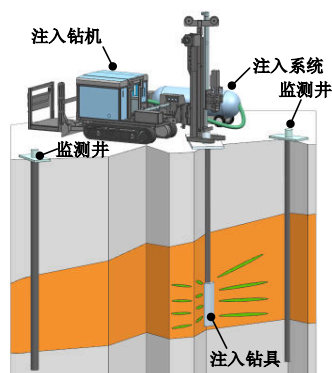


图5 竖直喷射修复示意

许应使修复范围超过场地边界半个井间距的距离。

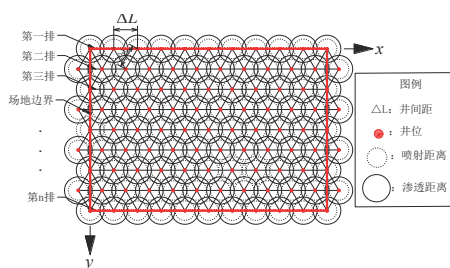


图6 竖井喷射修复布井示意

竖井布井采用平面设计的方法,假设污染场地沿着 $x$ 、 $y$ 方向展开,则沿 $x$ 方向每排井数为:

$$\begin{cases} S_{ks} = \left\lceil \frac{x}{\Delta L} \right\rceil + 1 & \text{奇数排} \\ S_{ks} = \left\lceil \frac{x}{\Delta L} \right\rceil + 2 & \text{偶数排} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_{ks}$ ——某排的井数,个; $x$ ——污染场地 $x$ 方向的长度,m; $\Delta L$ ——井间距,m。

则 $y$ 方向上井排数为:

$$S_{ps} = \left\lceil \frac{y}{\sqrt{3} \cdot \Delta L / 2} \right\rceil + 1 = \left\lceil \frac{2\sqrt{3} \cdot y}{3 \cdot \Delta L} \right\rceil + 1 \quad (2)$$

由以上分析可知,由式(1)、(2)可计算出竖井的每排井个数和排数。

## 2.2 水平喷射修复工艺

水平喷射修复主要包括水平定向钻进和回拖喷射两个步骤,水平定向钻进是通过喷射-导向一体化钻具按设计的轨迹在地层中钻进一定长度的水平井,钻进到预定位置后将钻具逐渐从钻井中回拖至地表,在回拖的过程中分段进行喷射注入。

水平钻进过程中通过手持式跟踪仪不断跟踪地

下钻头的位置并接收钻井倾角和埋深等信息,如出现偏差需及时调整造斜工具面位置来改变方向。

定向钻进到预定位置后,通过高压胶管将泥浆泵出水口和内钻杆水龙头连接,通过注药泵将药剂以一定的压力压入钻杆中,使药剂只能从中心喷嘴高速喷出。在喷射修复剂的同时,应通过封隔器封闭钻具与井壁之间间隙。当完成当前段喷射修复后关停所有泵并提升钻杆到下一点位进行喷射修复。

## 2.3 多分支水平井修复工艺

多分支水平井已被广泛地用于提高油气采收率,具有泄油面积大和单位技术成本低的优点,能显著提高油井产能和采收率。针对大面积污染区域或者分布比较密集的点状污染羽创新设计了浅层多分支井修复工艺。多分支井是先通过水平定向钻进技术钻进一个主井,根据需要修复的场地情况可设置多个分支井或多层分支井,回拖时通过高压喷射的方法将修复剂注入到需要修复的地层中。根据污染羽的厚度不同,分支井还可分为单层多分支井和多层分支井,多层分支井如图7所示。

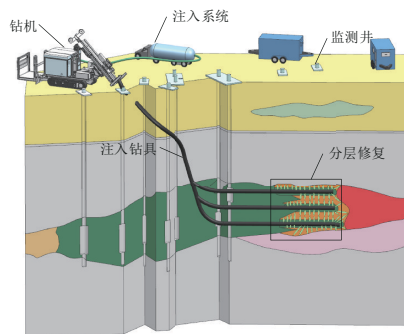


图7 污染场地修复多层分支井示意

单层多分支井水平的空间形态如图8(a)所示,主井水平长度可达100~400 m,深度5~40 m,分支井长度10~50 m,可穿过多个点状污染区域。当需修复地层呈面状且厚度 $>6$  m时,单层水平井已不能完成修复,这时可以考虑布置双层或多层水平井。双层水平的空间形态如图8(b)所示,两层水平井从同一点入土,下层水平井主孔的入土角更大,入土直线段也更长。两层的分支井数量和方位可根据具体污染羽进行灵活调整,使修复效果最佳。以此类推根据场地污染羽分布特性可设计多层分支井,从而实现单个入土点即可完成对多层面状污染羽修复,减少对地面的破坏。

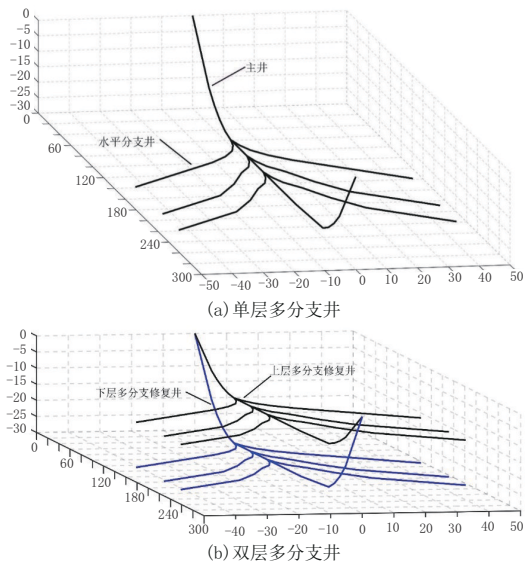


图 8 多分支水平井空间形态

### 3 现场应用试验

#### 3.1 场地地质条件

修复场地位于江苏省南京市,距离长江直线距离 < 200 m (见图 9)。该场地原为南京某化工厂的污水处理车间,至 2010 年退役拆迁服役时间超过 40 年,拟修复后作为商业用地,面积约 10460 m<sup>2</sup>。主要污染物为石油烃、4-氯苯胺,平均污染深度 4 m。2020 年,对该场地内深度 < 4 m 的土体采用水泥窑焚烧工艺进行了异位修复,异位修复后对坑底再次进行场调,发现位于东南角区域还存在面积约 3004.8 m<sup>2</sup> 的污染区,该区域内 4-氯苯胺平均浓度 0.25 mg/L,远高于国标《地下水质量标准,GB 14848》中第 V 类地下水小于 0.005 mg/L 的要求。考虑到后续开发的要求,决定对该区域采用原位化学氧化技术修复。

场地处于河流阶地、沙滩和坳沟地带,阶地分布黄土状亚粘土,漫滩坳沟分布粘性土和粉砂,下伏基



图 9 场地位置及周边环境

岩为浦口组沙砾岩。场地地层为未扰动的低渗透粉质粘土和粉质粘土夹砂,垂直渗透系数为  $8 \times 10^{-7} \sim 8.85 \times 10^{-7}$  cm/s,水平渗透系数为  $8.28 \times 10^{-7} \sim 9.31 \times 10^{-7}$  cm/s。污染场地地下水主要为孔隙潜水,由大气降水补给。主要排泄方式为蒸发和向附近河流补给。污染场地内地下水流向为从场地东侧流向场地西侧。由于土壤的渗透性较低,地下水流动对射流喷射修复的影响可以忽略。

#### 3.2 试验过程

由于污染物主要分布在场地的东南角,因此考虑从东北角采用水平多分支井技术进行原位修复,布置了 5 个分支井,可实现单点入土即可完成该区域修复。试验流程如图 10 所示,主要可分为场地平整及设备进场、水平定向钻进和回拖喷射 3 个阶段。

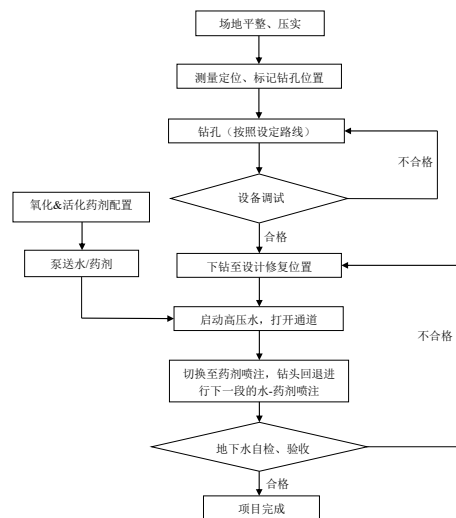


图 10 场地修复试验流程

#### 3.3 试验结果

经导向钻进一回拖喷射注入后对污染羽区域完成了原位化学氧化修复,施工完成后钻井轨迹如图 11 所示。按照前期设计图共钻进 5 个水平井,其中 1 号为直线钻进的主井,长度为 129 m,其余为分支井,参数如表 4 所示。

本次试验通过 5 口水平井对面积为 3004.8 m<sup>2</sup> 的污染场地进行原位修复。若采用直井喷射注浆法,至少应布置 106 口井,是水平井喷射注入的 21 倍。因此,水平井喷射注入法可以大大减少现场的钻井数量,从而减少对地面的扰动。另一方面可以缩短施工时间,降低成本。

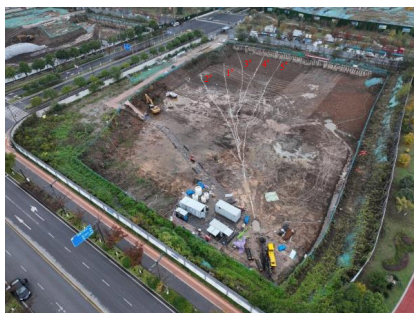


图11 多分支水平井修复现场

表4 多分支水平井修复参数

多分支水平井编号	1号主井	2号	3号	4号	5号
钻进长度/m	129	57	78	78	78
修复段长度/m	75	51	57	60	66
修复段深度/m	4				
总钻进长度/m	420				
总修复段长度/m	309				

#### 4 结论

目前国内关于药剂注入修复技术方面研究十分缺乏,无法满足场地污染治理需要。本文针对传统修复药剂投放工艺粗糙、在弱渗透地层中难扩散的问题,提出了点一面结合的药剂原位精准喷射注入工艺,通过现场试验验证了多分支水平修复工艺的可行性,初步形成了原位注入立体修复技术方法,以期实现污染地层的精准高效注入和大规模修复,为污染场地原位修复系统的设计奠定基础。本文得到如下结论:

(1)污染场地的污染羽可分为点状、带状和面状,同一场地可以是单一污染羽或多种污染羽的组合,污染场地以重金属污染和有机污染为主,常见修复药剂多为可溶于水的氧化剂或还原剂。

(2)为实现大面积污染场地高效、精准、环保修复,针对点状污染羽设计了垂直井钻进提升喷射注入的垂直修复工艺,对带状污染羽设计了水平定向钻进回拖喷射注入的水平井喷射注入修复工艺,对于面状污染羽设计了多分支井水平喷射注入修复工艺。在实际修复中可根据场地污染羽实际分布情况灵活选择多种修复工艺,做到点-面结合实现高效立体修复。

(3)通过现场试验验证了多分支水平井能够实现污染场地的高效、精准、环保修复,可减少钻井数

量,降低对地面的扰动。

**致谢:**本研究的现场试验受到2018YFC1802400国家重点研发计划项目组的顾爱良博士、岳昌盛博士、夏春高工、黄璇高工、张左右高工等的支持和协作,作者在此一并表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].环境教育,2014(6):7-10.
- [2] 陈海英.多环芳烃污染土壤的泥浆生物反应器处理技术研究[D].北京:北京师范大学,2010.
- [3] 刘玲.不同腐熟度垃圾堆肥对重金属污染土壤修复机理与效应研究[D].北京:北京林业大学,2018.
- [4] 焦海华,黄占斌,白志辉.石油污染土壤修复技术研究进展[J].农业资源与环境学报,2012,29(2):48-56.
- [5] 吴楠楠,张珂,孙晨曦,等.微生物技术在土壤修复中的应用研究进展[J].湖北农业科学,2020(13):5-9.
- [6] 籍国东,周国辉.异位化学淋洗修复石油类污染土壤[J].北京大学学报:自然科学版,2007,43(6):863-871.
- [7] 李玉双,胡晓钧,孙铁珩,等.污染土壤淋洗修复技术研究进展[J].生态学杂志,2011(3):596-602.
- [8] 于胜南.原位化学氧化技术在石油类污染场地的应用实践[D].天津大学,2018.
- [9] 崔朋,刘骁勇,刘敏,等.原位化学氧化技术在苯酚类污染场地修复中的应用[J].山东化工,2020,49(9):251-253.
- [10] 纪冬丽.电动-渗透性反应格栅联合修复砷污染土壤效能与机理研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
- [11] 刘峻平.渗透反应格栅修复铬污染地下水的研究[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
- [12] 代小丽,王硕,李佳斌,等.石油污染土壤原位生物修复强化技术研究进展[J].环境工程技术学报,2020,10(3):456-466.
- [13] 张久麟.水力压裂法修复TCE污染低渗介质的研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [14] 杨乐巍,张晓斌,李书鹏,等.土壤及地下水原位注入-高压旋喷注射修复技术工程应用案例分析[J].环境工程,2018,36(12):48-53.
- [15] 梁竞,王世杰,张文毓,等.美国污染场地修复技术对我国修复行业发展的启示[J].环境工程,2021,39(6):6.
- [16] 《土壤污染防治行动计划》编写组.土壤污染防治行动计划[M].北京:人民出版社,2016.
- [17] 蒋大猛.川芎GAP基地复合污染土壤中汞的植物修复研究[D].成都:成都理工大学,2010.
- [18] 张丽君.彭州市土壤污染防治技术的研究[J].成都:四川师范大学,2010.
- [19] 李志强.土壤污染及其防治研究[J].能源与节能,2014(10):3.

(编辑 王文)