



# 污染场地原位直推钻进-喷注一体化装备注射工艺中试探究

葛传芹<sup>1</sup>, 单晖峰<sup>1,✉</sup>, 王杰焱<sup>2</sup>, 朱水清<sup>1</sup>, 张左右<sup>1</sup>

1. 江苏大地益源环境修复有限公司, 南京 210012; 2. 中南大学资源加工与生物工程学院, 长沙 410083

**摘要** 传统的原位修复药剂注入技术在低渗透场地上应用困难, 药剂扩散效果不佳是修复工程普遍面临的挑战, 将水力压裂、气动压裂-雾化喷射与直推钻进融合并实现注射模式切换, 可显著提升原位注射装备针对复杂地层的适用性。采用自主研发的基于双通道钻具的原位直推钻进-喷注一体化装备在高、低渗透性不同的两个场地分别执行了中试, 研究了气动压裂-雾化喷射、水力压裂功能的应用效果、不同渗透性地层条件下的注射影响半径以及适用的注射模式、工艺参数。结果表明, 气动压裂-雾化喷射、水力压裂功能可显著改善在低渗透地层的渗透效果; 高渗透性地层宜采用低压注射模式, 药剂注射压力宜 $\leq 2.0$  MPa, 注射影响半径最大达 3.67 m; 中低渗透性地层采用低压注射+气动压裂-雾化喷射模式, 雾化喷射实施压力宜不小于 0.8 MPa, 注射影响半径最大达 2.36 m; 低渗透性地层采用水力压裂+低压注射模式, 水力压裂工作压力宜在 10~15 MPa, 注射影响半径最大达 4.37 m。本中试为此类注射技术、装备在国内的首演, 为未来原位直推钻进-喷注一体化装备在国内原位修复工程中的应用提供了依据。

**关键词** 原位; 直推钻进; 水力压裂; 气动压裂; 雾化喷射; 影响半径

我国的土壤和地下水环境状况总体不容乐观<sup>[1]</sup>, 随着修复行业发展以及对水土共治的逐渐重视, 修复技术已从早期的以异位修复为主逐渐发展到以原位修复为主<sup>[2-4]</sup>, 其中化学修复和生物修复技术应用最为广泛<sup>[5-13]</sup>。修复药剂能否精准、高效地注入到目标修复区域, 并与污染物充分接触, 是所有原位化学和生物修复技术能否成功应用的关键。常用的修复药剂注入技术主要有: 直推<sup>[14-16]</sup>、注射井<sup>[17-19]</sup>、高压旋喷等<sup>[20-22]</sup>。其中直推注入具有快速、精确、节约资金的优点, 但受钻注深度及岩性限制, 在低渗透性地层中影响半径小(0.6 m)<sup>[20]</sup>, 且不具备倾角注射功能; 注射井施工简单, 操作方便, 但同样不适用于低渗透性地层(黏土层扩散半径 0.5 m<sup>[20]</sup>), 易引起化学或生物堵塞, 建井成本高; 高压旋喷技术适用土层范围广, 修复深度大, 施工效率高, 但存在如下缺点: 1) 注入量和注入速率不能根据地层特性和污染物的分布特征调整, 注射缺乏靶向性; 2) 针对低渗透性地层的药剂传输效果差, 影响半径小(0.9 m)<sup>[20]</sup>; 3) 地面冒浆严重, 造成修复材料浪费、二次污染; 4) 破坏地层承载力; 5) 设备庞大, 笨重, 机动性不高。国内污染场地地形地貌及地层条件复杂, 场地高低渗透性不一, 部分场地(如南方多见的黏土地层)渗透系数偏低, 修复药剂传输扩散困难<sup>[23-24]</sup>, 对上述常规的原位药剂注入技术尤为挑战, 因此, 有必要研发一种机动灵活性高、注射影响半径大、针对高低不同渗透性地层具备不同药剂注入模式的一体化原位注入技术与装备, 其中提高低渗透性地层的药剂注射影响半径是关键。

美国在土壤和地下水修复领域已积累了丰富的原位修复工程经验。直推钻机 Geoprobe 已用于众多场地的土壤和地下水原位修复药剂注入, 但此类场地污染地层介质往往是中、高渗透性的砂质、粉砂等, 对于低渗透性地层, 常采用压裂技术(水力压裂或气动压裂)<sup>[25-26]</sup>来强化原位修复药剂的注入和传输。如美国海军设施工程司令部<sup>[27]</sup>2003 年采用 Ferox<sup>sm</sup> 注射(气动压裂+雾化喷射)技术, 并在钻孔内采用双封隔器强化泥浆态零价铁药剂传输, 对某造船厂卤代烃污染场地进行治理, 注射影响半径可达 15 英尺(4.57 m)。

收稿日期: 2024-05-10 录用日期: 2024-09-13

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFC1807603)

第一作者: 葛传芹(1988—), 女, 硕士, 高级工程师, [gecq@jsddb.com](mailto:gecq@jsddb.com) ✉通信作者: 单晖峰(1973—), 男, 博士, 正高级工程师, [shanhf@jsddb.com](mailto:shanhf@jsddb.com)

LHOTSKY 等<sup>[28]</sup>在一卤代烯烃污染场地修复中试中采用改进了注入系统的 Geoprobe7822DT 钻机，将直推、气动压裂和生物修复材料的水力输送（最大压力 7.5 MPa，最大流量 75 L·min<sup>-1</sup>）相结合，进行铁砂混合物的注射，典型注射影响半径达 2~4 m。国内采用压裂技术增强药剂注射传输的研发近年来才刚刚开始<sup>[29-31]</sup>。张明等<sup>[32]</sup>使用 Geoprobe 钻机将水力压裂（压裂压力 0.4~2.6 MPa）技术用于改善农药污染场地渗透性，提高了气相抽提和原位化学氧化修复效果。沈宗泽等<sup>[33]</sup>将水力压裂与直推注入相结合，开发出连续管式原位注入技术，并将之用于氯苯污染场地原位化学氧化修复，药剂碱活化过硫酸盐溶液的注射影响半径达 2 m。而将水力压裂、气动压裂+雾化喷射与直推技术相融合用于强化修复药剂的原位注射、传输在国内文献中还未见报道。

本研究采用自主研发的，通过双通道钻具将水力压裂（最大压力 30 MPa，最大流量 200 L·min<sup>-1</sup>）、气动压裂+雾化喷射功能与直推技术融合，用于强化修复药剂的原位注射、传输的原位直推钻进-喷注一体化装备（中国发明专利申请号 ZL202210627951.6<sup>[34]</sup>），分别在高、低渗透性不同的 2 个场地开展中试，研究水力压裂、气动压裂+雾化喷射针对不同渗透性地层的药剂注射的强化效果、适用的喷注模式、工艺参数，及可获得的注射影响半径，以期为该装备在国内环境修复领域的工程化应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验场地与原料

1) 中试 1。中试 1 在代号为 T1 的南方某已停用铁尾矿库尾矿砂堆场上进行，堆场堆积高度约 3 m，堆积斜面倾角约 40°~50°。堆场主要为粗砂、细砂土，场地渗透系数检测结果显示，地下 0~2 m 的渗透系数为 1.55×10<sup>-3</sup>~5.29×10<sup>-2</sup> cm·s<sup>-1</sup>。

实验以原位化学修复常用的稀泥浆（电解锰渣制备）和水溶液（添加亮蓝色素为示踪因子）为注射介质。喷注实验前，分别用工艺水配成 10%（w/w）的电解锰渣稀泥浆液以及 2 g·L<sup>-1</sup> 的亮蓝色素水溶液。

2) 中试 2。中试 2 在代号为 T2 的南方某实验基地进行，水文地质调查显示，地下水水位在 -0.5 m，地层分层岩性及对应渗透系数如表 1 所示。

实验以原位化学氧化（碱活化过硫酸盐技术）及原位生物修复（生物刺激）工程中常用药剂的主要成分氢氧化钠（AR 级）、蛋白胨（AR 级）配制的溶液为注射介质。喷注实验前，分别用工艺水配成 5.5%（w/w）的 NaOH 溶液及 4 g·L<sup>-1</sup> 的蛋白胨溶液，蛋白胨溶液中添加 2.5 kg 亮蓝色素作为示踪剂，以监测注射影响半径。

### 1.2 实验装置

本研究采用自主研发的原位修复直推钻进-喷注一体化装备进行实验。装备由喷注一体化主机、药剂配制及注入模块、柴油发电机组 3 部分组成（图 1）。喷注一体化主机用于野外行走及地下土壤直推钻进，兼具倾角钻进功能，由设备自带动力系统提

表 1 中试 2 实验场地地层岩性及分层渗透系数

Table 1 Stratum lithology and permeability coefficients of site T2

深度区间/m	岩性	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
0~0.5	人工填土	1.52×10 <sup>-4</sup> ~2.68×10 <sup>-2</sup>
0.5~0.8	粉质粘土	≤3.53×10 <sup>-5</sup> *
0.8~6.4	粉砂	2.05×10 <sup>-2</sup> ~3.53×10 <sup>-3</sup>
6.4~9.0	粉砂、粉质粘土复合层	3.53×10 <sup>-5</sup> ~9.88×10 <sup>-3</sup>
9.0~16.0	粉质粘土	≤3.53×10 <sup>-5</sup> *

注：\*渗透系数检测采用 Geoprobe HPT 水力剖面探测系统（南京哈润环境科技有限公司）进行，系统渗透系数检测限为 3.53×10<sup>-5</sup> cm·s<sup>-1</sup>。



图 1 原位直推钻进-喷注一体化装备实验装置

Fig. 1 Experimental configuration of *in situ* direct push drilling-jetting-injection integrated equipment

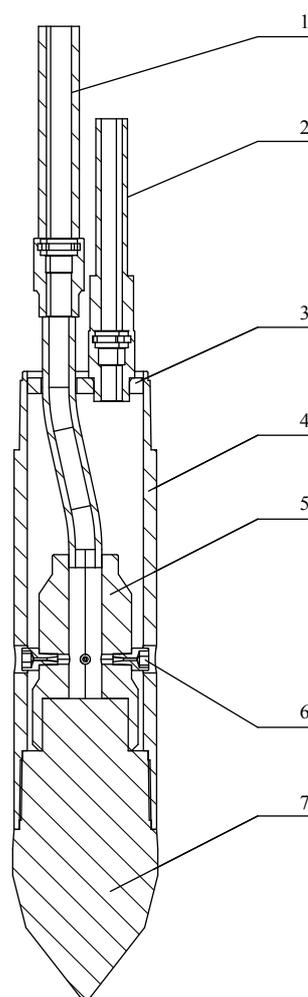
供动力, 主要包含液压行走组件、发动机舱、底盘组件、液压翻转组件、钟摆功能组件、探测组件、双通道钻具等, 其中双通道钻具(见图2)是承载高、低压注射功能的核心部件, 其中水和药剂注射介质共用一个通道, 压缩空气走另一个通道, 注射介质(液体)从喷嘴中心的喷孔喷出, 高压气体从喷嘴的环形空间喷出, 借助气体在同轴或垂直方向的高速射流与注射介质的相对低速液流或液膜的振动、摩擦作用, 使注射介质破碎为极细小液滴, 从而实现雾化喷射, 此雾化喷射技术还包括气流包裹对注射介质射流的集束效应以获得更远的注射影响半径。药剂配制及注入模块同时具备药剂配制、注气、高压注水3项功能, 主要包含清水箱(储存水力压裂用水)、药剂配制罐、高压注水泵、药剂离心泵、注药增压泵、空气压缩机、储气罐等设备以及设备间相互连接的管道、阀门、仪表、电控系统等, 清水箱、药剂配制罐分别设置了液位计以监测液位变化, 注水、注药泵均设置变频器以调节工作压力。柴油发电机组主要为药剂配制及注入模块提供电力。原位修复直推钻进-喷注一体化装备的主要注射参数见表2。

### 1.3 实验方法

实验前, 首先完成一体化设备水、电、钻具连接及药剂注射介质的配制, 以清水为注射介质在地面进行悬空喷射, 确认系统正常工作后操作喷注一体化主机行走至喷注点位, 将双内管钻具直推钻进至设计土层深度, 根据钻进深度所在地层渗透性选用合适的药剂喷注方式(低压注射、低压注射+气动压裂-雾化喷射、水力压裂+低压注射), 控制泵工作压力和流量, 将注射介质通过在同一水平面上间隔 $90^\circ$ 均匀布设的4个喷嘴注射至目标地层。当不同药剂间需切换进行喷注操作时, 使用清水清洗注药通道, 以免注射通道堵塞或交叉污染。

中试1在T1场地尾矿堆场坡面附近进行, 分别以亮蓝色素水溶液、电解锰渣稀泥浆为注射介质, 研究了不同药剂型式(水剂型 vs. 稀泥浆型)、不同注射压力对药剂注射影响半径的影响, 同时考察了气动压裂+雾化喷射对注射效果的影响。每种药剂剂型均在坡面附近选取2个点位进行直推钻进-喷注实验, 利用堆场的坡面观测注射实际影响半径。具体实验方案见表3。钻进及喷注点位如图3所示。

中试2在T2场地2个点位进行直推钻进-喷注实验, 以化学氧化(碱活化过硫酸盐技术)及生物修复(生物刺激)工程中常用药剂的主要成分NaOH和蛋白胨, 分别配制5.5% (w/w) NaOH溶液、 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  蛋白胨注射介质(后者添加亮蓝色素为示踪因子), 研究了其在不同渗透性地层采用不同喷注方式(低压注



1-液体连接管; 2-气体连接管; 3-法兰盘; 4-短接管; 5-喷嘴座; 6-喷嘴; 7-钻头

图2 双内管钻具

Fig. 2 Double-channel drilling tool

表2 原位修复直推钻进-喷注一体化设备主要注射参数表

Table 2 Main injection parameters of *in situ* direct push drilling-jetting-injection integrated equipment

主要注射项目	数值
高压注水泵最大注射压力/MPa	30
高压注水泵最大流量/( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )	200
注药增压泵最大注射压力/MPa	5
注药增压泵最大流量/( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )	100
空压机最高排气压力/MPa	0.8
空压机最大排气量/( $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ )	2.3

表 3 中试 1 实验方案  
Table 3 Experimental plan of pilot study 1

编号	点位	坡角/°	注射介质	注射深度/m	注射压力/MPa	气动压裂+雾化喷射开启* (Y/N)
T1- <sub>1</sub>	#1	45	2.5 g·L <sup>-1</sup> 亮蓝色素水溶液	2	0.5	N
					1.0	N
					1.0	Y
T1- <sub>2</sub>	#2	49	2.5 g·L <sup>-1</sup> 亮蓝色素水溶液	2	0.5	N
					0.75	N
					1.0	N
T1- <sub>3</sub>	#3	50	10% (w/w) 电解锰渣稀泥浆	2	1.0~1.2	N
					1.0	N
					1.0	Y
T1- <sub>4</sub>	#4	40	10% (w/w) 电解锰渣稀泥浆	2	0.5	N
					0.75	N
					1.0	N
					4.0	N
					4.0	Y

注：\*气动压裂+雾化喷射功能开启时，压缩空气输出压力为0.8 MPa。

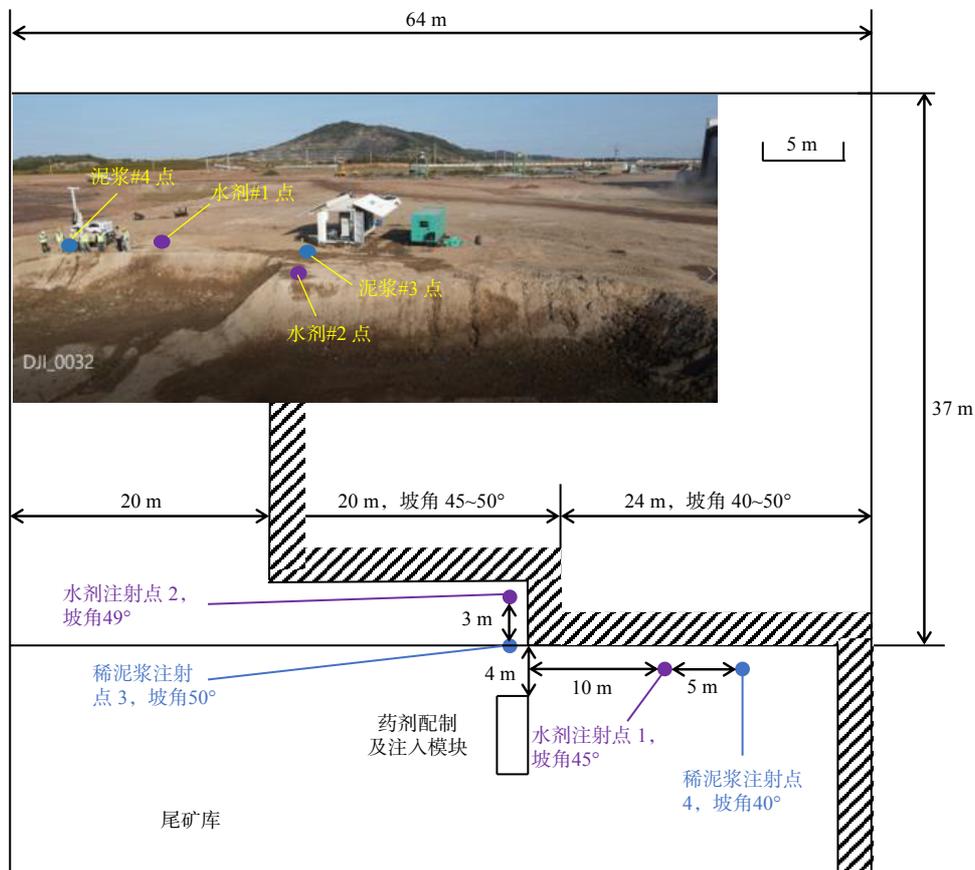


图 3 中试 1 喷注点位平面布置图

Fig. 3 Layout plan of injection points at pilot study 1

射、水力压裂+低压注射、低压注射+气动压裂-雾化喷射)对药剂注射影响半径的影响。实验具体实验方案见表 4。

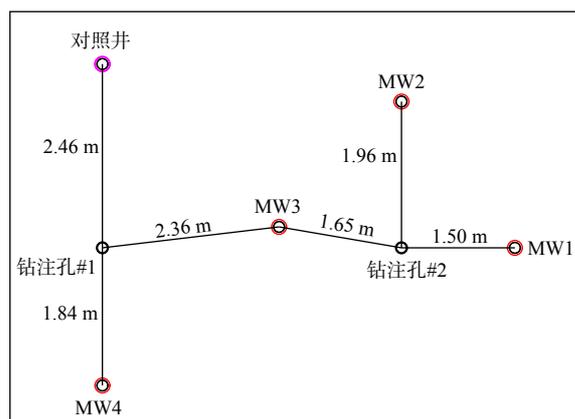
表 4 中试 2 实验方案  
Table 4 Experimental plan of pilot study 2

编号	注射点位	注射介质	注射深度/m	土壤质地	水力压裂压力/ 药剂注射压力/ 气动压裂+雾化喷射		
					MPa	MPa	开启 (Y/N)
T2- <sub>1</sub>	#1	5.5% (w/w) NaOH溶液	4.5	粉砂	10~15	1	N
T2- <sub>2</sub>	#1	5.5% (w/w) NaOH溶液	8	粉砂、粉质粘土复合层	—	1	N
					—	1	Y
					—	1	N
T2- <sub>3</sub>	#2	4 g·L <sup>-1</sup> 蛋白胨+亮蓝色素溶液	8	粉砂、粉质粘土复合层	—	2	N
					10~15	2	N
T2- <sub>4</sub>	#2	4 g·L <sup>-1</sup> 蛋白胨+亮蓝色素溶液	12.5	粉质粘土	10~15	—	N
					—	2	N

#### 1.4 影响半径监测方法

中试 1 中喷注实验在尾矿堆场边坡进行, 通过现场用卷尺测量药剂渗透点与钻注点之间的水平距离, 计算确定喷注实际影响半径。中试 2 中, 通过建设地下水监测井丛, 并在喷注实验后对地下水监测井丛中的药剂特征指标及示踪剂进行采样监测来确定实际喷注影响半径。

1) 监测井建设。中试 2 中, 在场地已有地下水监测井(对照井)周边设置 2 个钻注孔点#1、#2, 并在其周围设置 4 组地下水监测井丛 MW1~4。单组井丛开孔口径 270 mm, 每组井丛内置 3 根 Ø63 mm PVC 井管, 各井管开筛位置分别为 3~6.5 m (浅层)、7~11.5 m (中层)、12~16 m (深层), 各开筛管底部留有 400 mm 沉淀段, 开筛管外均包覆一层 200 目不锈钢筛网。新建监测井丛距离相邻钻注孔 1.50~2.36 m, 喷注点位布置见图 4。



(a) 喷注点位平面布置示意图



(b) 中试 2 实验现场喷注点位

图 4 中试 2 喷注点位布置

Fig. 4 Layout plan of injection points at pilot study 2

2) 特征指标及示踪实验方法。中试 2 采用 5.5% (w/w) 的 NaOH 溶液及 4 g·L<sup>-1</sup> 蛋白胨溶液 2 种药剂进行实验。当以 5.5% (w/w) NaOH 溶液为注射介质时, 采用酸度计 (HQ40d, 美国 HATCH) 对地下水监测井中的 pH 值进行监测。实验前对场地的 pH 背景值进行检测, 当检测到实验后 pH 值显著增加, 即可认定该点在药剂注射影响半径之内。当以 4 g·L<sup>-1</sup> 蛋白胨溶液+亮蓝色素为注射介质时, 由于亮蓝色素在紫外吸

收波长 630 nm 处有典型吸收峰，因此采用紫外可见分光光度计（UV752，青岛聚创环保集团有限公司）对实验前后地下水样紫外吸光度值进行检测，当检测到实验后紫外吸光度值显著增加时，即可认定该点在药剂注射影响半径之内。地下水采样采用蠕动泵（WT600L，保定融柏恒流泵制造有限公司）进行，采样深度对应实验注射深度，实验前取样检测 1 次，喷注实验开始后每隔 10~20 min 监测 1 次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 影响半径分析

1) 高渗透性地层注射影响半径分析。中试 1 在铁尾矿砂堆场上进行，地层以砂质为主，渗透性相对较高（ $1.55 \times 10^{-3} \sim 5.29 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ），对 2 种药剂剂型（水剂、稀泥浆）4 次原位钻进-喷注实验的注射影响半径进行分析。由于喷注实验在尾矿库堆场坡面附近实施，实验中可在坡面不同位置实地观测到多个药剂渗透点，渗透点出现时间和相应喷注参数见表 5。基于喷注点与渗透点间实测距离，各实验喷注及渗透点位三维实际分布如图 5 所示。

根据图 5，对实验中各渗透点位垂向深度上的注射影响半径（喷注点位与渗透点位的水平距离）进行计算，结果如表 5 所示。由表可知，在低注射压力（0.5~0.75 MPa）下，亮蓝色素水剂的注射影响半径（2.9 m）显著大于 10%（w/w）电解锰渣稀泥浆的注射影响半径（平均 1.32 m），而当注射压力提升至 1.0 MPa 时，亮蓝色素水剂 2 个喷注点位的注射影响半径范围为 1.71~2.98 m，平均注射影响半径为 2.20 m；而 10%（w/w）电解锰渣稀泥浆 2 个喷注点位的注射影响半径范围为 2.03~3.67 m，平均注射影响

表 5 中试 1 注射结果

Table 5 Injection results of pilot study 1

编号	点位	坡角/ $^{\circ}$	注射介质	注射深度/ m	注射压力/ MPa	注射时间*/ min	注射流率/ ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	扩散情况	渗透点垂直 深度/m	注射影响半径 (计算值)/m
T1- <sub>1</sub>	#1	45	2.5 g·L <sup>-1</sup> 亮蓝色素水溶液	2	0.5	11	4.36	渗透点1出现	1.13	2.90
					1.0	40	5.64	渗透点2出现	1.13	2.98
					1.0	48	6.65	渗透点3出现	0.35	1.76
					1.0	60	6.76	渗透点4出现	0.21	1.69
T1- <sub>2</sub>	#2	49	2.5 g·L <sup>-1</sup> 亮蓝色素水溶液	2	0.5	50	5.76	—	—	—
					0.75	90	7.20	—	—	—
					1.0	100	9.62	渗透点1出现	0.53	1.71
					1.0	110	11.20	渗透点2出现	0.68	2.87
T1- <sub>3</sub>	#3	50	10%（w）电解锰渣稀泥浆	2	0.5	70	4.21	渗透点1出现	0.23	1.45
					0.5	78	6.20	渗透点2出现	0.08	1.19
					0.75	86	8.64	渗透点3出现	0.23	2.01
					1.0→1.2	96	17.20	渗透点4出现	0.31	2.29
					1.0	99	15.50	渗透点5出现	0.77	2.48
					0.5	53	3.63	—	—	—
T1- <sub>4</sub>	#4	40	10%（w）电解锰渣稀泥浆	2	0.75	62	7.42	渗透点1出现	0.39	1.54
					0.75	92	7.65	—	—	—
					1.0	103	8.28	渗透点2出现	0.71	2.03
					1.0	111	7.52	渗透点3出现	2.57	3.67
					1.0	141	7.75	—	—	—
					4.0	144	17.24	渗透点4出现	2.25	3.44

注：\*注射时间为从药剂注射开始后累计的时间值。

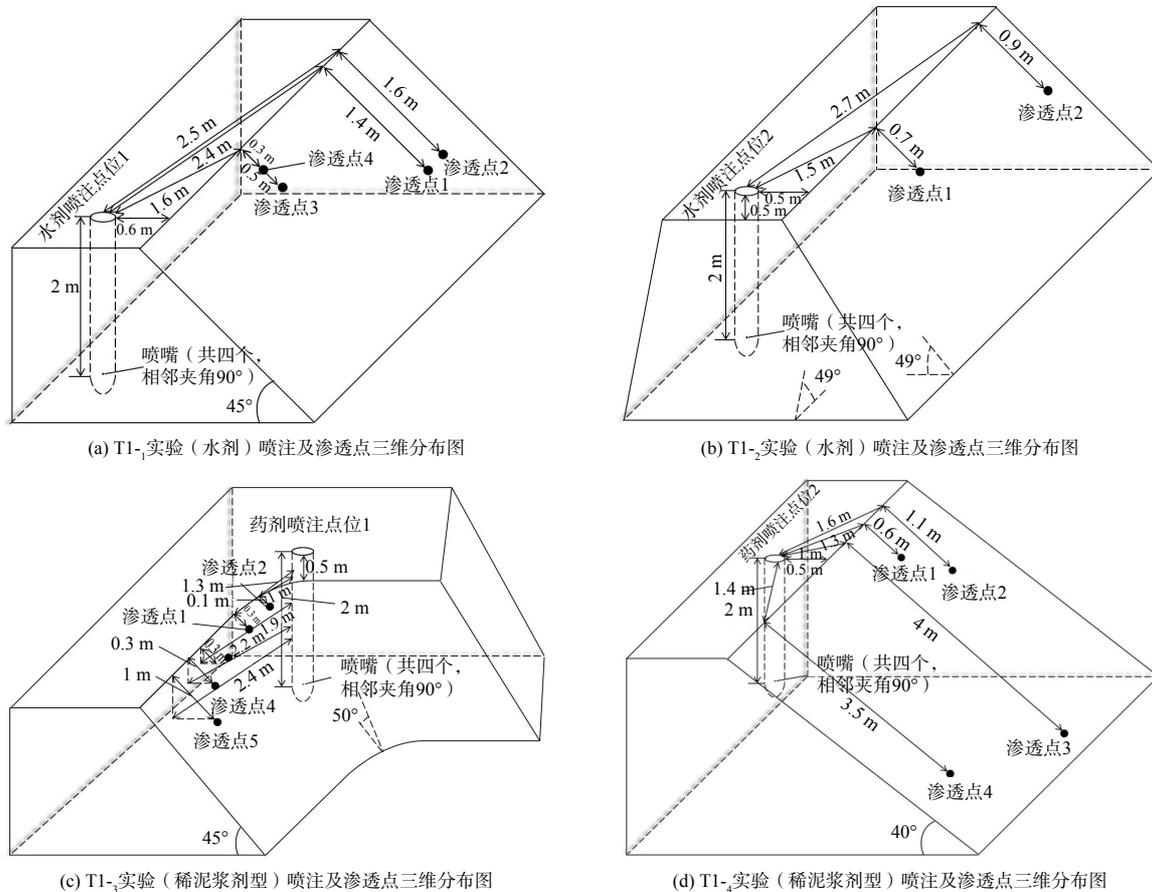


图 5 中试 1 各实验注射及渗透点位三维分布图

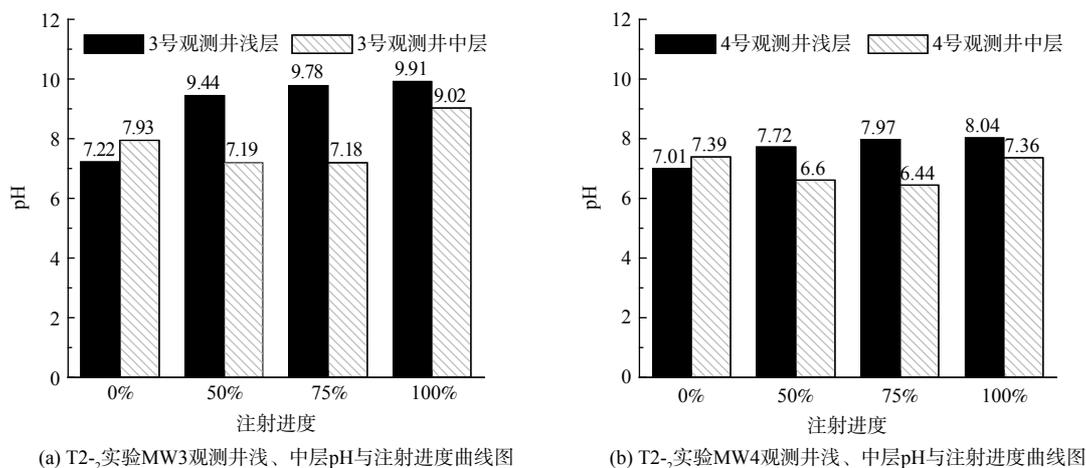
Fig. 5 Three-dimensional distribution maps of injection and penetration points in pilot study 1

半径为 2.62 m，两种剂型在平均注射影响半径上并无显著差异。在较低注射压力下，修复介质的迁移传输主要受到材料自身因素影响，浆液中包含固体颗粒，其在地下环境受团聚效应、重力沉降以及多孔介质的筛滤作用，导致其传质阻力比水剂更大，传输距离受限；而当注射压力提高到一定程度，地层随之产生裂隙，渗透性显著改善，修复介质的迁移传输的作用范围得以扩大<sup>[2]</sup>，不同剂型间的理化性质差异对传输效果的影响则随之弱化。

值得注意的是，各实验介质的喷注深度均为地面下 2 m，但喷注渗透点却在地面下 0.21~2.57 m 的较大垂直深度范围内出现。这可能是由于尾矿堆场的垂向渗透系数的非均质性（浅层较疏松，下层较紧密），使得喷注时介质优先向阻力较小的通道/方向扩散。

2) 中低渗透性地层注射影响半径分析。中试 2 在地下水埋深较浅、渗透系数较低的实验场地开展，对 2 种典型修复药剂组分 5.5% (w/w) NaOH 溶液、4 g·L<sup>-1</sup> 蛋白胨+亮蓝色素溶液钻进-喷注实验的注射影响半径进行分析。

当在#1 喷注点位以 5.5% (w/w) NaOH 溶液为注射介质时，在 T2<sub>1</sub> 4.5 m 喷注深度实验中，检测到注射完成后地下水监测井从 MW3 的浅层井（4.5 m）pH 由喷注前 7.22 升高至喷注后 12.83，但监测井 MW4 浅层 pH 未见明显抬升。而在同一喷注点位 8.0 m 注射深度的 T2<sub>2</sub> 实验（图 6）中，发现随 NaOH 溶液喷注量增加，MW3、MW4 地下水观测井浅层 pH 值逐渐上升，且 MW3 井 pH 值上升速率显著高于 MW4 井，而观测井中层 pH 在注射过程中并未有显著变化，只在全部注射完成后出现 MW3 井 pH 值显著提升，而 MW4 井中层仍变化不明显。两组实验表明，喷注过程中，注射介质在 MW3 监测井方向上快速扩散，注射影响半径在此方向上达到 2.36 m，而在 MW4 监测井方向注射介质扩散较慢，这一方面可能是由于注射时 MW3 井正对着钻具的一个喷嘴从而易接收到影响，而 MW4 井与喷嘴之间存在一定夹角。另一方

图 6 T<sub>2</sub> 实验地下水观测井浅、中层 pH 与喷注进度变化曲线图Fig. 6 pH variation versus injection progress in shallow and middle layers of groundwater monitoring well of T<sub>2</sub>

面，地层在水平方向的各向异性同样可能导致影响半径在各方向上的差异。

当在#2 喷注点位以  $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  蛋白胨+亮蓝色素溶液为注射介质时，观察到 T<sub>2</sub><sub>3</sub> 8m 深度注射及 T<sub>2</sub><sub>4</sub> 12.5 m 深度注射实验（图 7）前亮蓝色素紫外吸光度值基底值近乎为 0，而实验后 MW1~MW3 监测井丛的 4.5、8、12.5 m 深度水样中均检测到明显的亮蓝色素吸光度值，表明蛋白胨溶液在#2 点位中、深层是均匀扩散的，3 个方向的影响半径均超过 1.5 m，距 MW2 观测井距离最远，为 1.96 m。注射过程中除 4 个观测井丛外，T<sub>2</sub><sub>3</sub> 实验时对照观测井（距离#2 点位 4.67 m 处）观测到出现监测井涌水，T<sub>2</sub><sub>4</sub> 实验时 MW4 观测井丛（距#2 点位 4.37 m 处）的 8 m、12.5 m 井检测到亮蓝色素吸光度值分别为 0.184、0.121，进一步说明喷注设备在#2 点位中、深层的注射在各方向上的注射和介质扩散较为均匀，最大注射影响半径达 4.37 m。

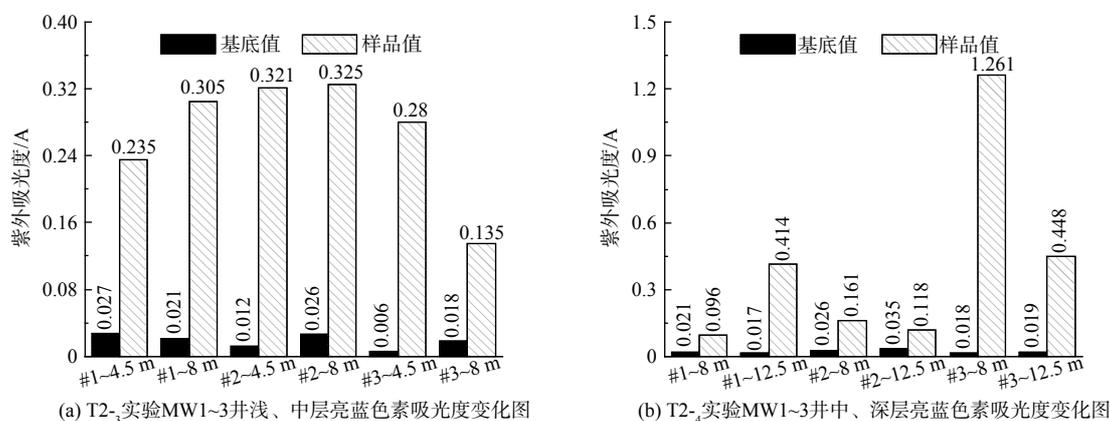


图 7 蛋白胨+亮蓝色素溶液喷注实验前后紫外吸光度变化图

Fig. 7 UV absorbance variation before and after injection of peptone and bright blue pigment solution

## 2.2 不同地层条件注射工艺分析

1) 高渗透性地层注射工艺分析。根据表 6，对于中试 1 以砂质为主渗透性相对较高的尾矿堆场地层，在 0.5~1.0 MPa 的注射压力下，介质可实现正常喷注，平均注射流率在  $4.36 \sim 15.50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，但在注射压力 1 MPa 及以上条件下增开空气压缩机，开启注射介质雾化喷射功能，可观察到实验地面及部分坡面出现裂隙，原先出现的渗透点位从渗流变为涌流，由此表明实验喷注一体化设备的雾化喷射功能实际呈现了气动压裂效果，可瞬时打开地层裂隙，显著提升药剂的传输效果。但此功能在高渗透性地层浅层喷注时需谨慎使用，避免形成地面冒液或冒浆。

2) 中低渗透性地层注射工艺分析。对于中试 2 以粘土为主的中低渗透性地层，由表 7，当注射介质为

表 6 中试 1 气动压裂+雾化喷射功能开启的注射结果

Table 6 Injection results of pneumatic fracturing+atomization at pilot study 1

编号	点位	坡角/ $^{\circ}$	注射介质	注射深度/m	注射压力/MPa	注射流率/ ( $L \cdot min^{-1}$ )	气动压裂+ 雾化喷射开启 (Y/N)	扩散情况
T1- <sub>1</sub>	#1	45	2.5 g·L <sup>-1</sup> 亮蓝色素水溶液	2	1	6.93	Y	地面及坡面出现裂隙
T1- <sub>2</sub>	#2	49	2.5 g·L <sup>-1</sup> 亮蓝色素水溶液	2	1	11.20	Y	地面出现裂隙
T1- <sub>3</sub>	#3	50	10% (w) 电解锰渣稀泥浆	2	1	15.5	Y	地面出现裂隙
T1- <sub>4</sub>	#4	40	10% (w) 电解锰渣稀泥浆	2	4	17.24	Y	地面出现裂隙

表 7 中试 2 注射结果

Table 7 Injection results of pilot study 2

编号	注射 点位	注射介质	注射 深度/ m	水力压裂 压力/MPa	水力压裂 时长/s	药剂注射 压力/MPa	注射时 长/min	气动压裂+ 雾化喷射 开启(Y/N)	气动压裂+ 雾化喷射 时长/s	现象
T2- <sub>1</sub>	#1	5.5% (w/w) NaOH溶液	4.5	10~15	90	—	—	N	—	MW3观测井涌水
				—	—	1	68	N	—	MW3观测井pH逐渐升高
T2- <sub>2</sub>	#1	5.5% (w/w) NaOH溶液	8	—	—	1	10	N	—	药剂配制罐内液位无变化
				—	—	1	—	Y	10	药剂配制罐内液位开始下降
				—	—	1	172	—	—	注射速率随注射压力增大而增大 (图8), MW3、4观测井pH随注 射进度逐渐升高(图6)
T2- <sub>3</sub>	#2	4 g·L <sup>-1</sup> 蛋白胨+ 亮蓝色素溶液	8	—	—	1	16	N	—	药剂配制罐内液位无变化
				—	—	2	10	N	—	药剂配制罐内液位无变化
				10~15	30	—	—	N	—	药剂配制罐内液位开始下降
T2- <sub>4</sub>	#2	4 g·L <sup>-1</sup> 蛋白胨+ 亮蓝色素溶液	12.5	—	—	2	62	N	—	平均注射流率21.2~23.1 L·min <sup>-1</sup>
				10~15	—	—	—	—	—	水力压裂因管道损坏未成功开启
				—	—	2	65	N	—	药剂配制罐内液位下降, 平均注射 流率16.6 L·min <sup>-1</sup>

NaOH、蛋白胨溶液时, 均发现在较低的注射压力 (1 MPa) 下介质喷注速度缓慢, 提高注射压力至 2 MPa 也无较大改善作用。在此条件下, 对增开气动压裂+雾化喷射功能或水力压裂功能的喷注效果进行研究。

T2-<sub>2</sub> 实验 (图 7) 中, 在 1 MPa 注射压力介质注射速率缓慢条件下, 开启 10 s 雾化喷射, 发现雾化后注射速率随注射压力的提升而提升, 最大注射压力达 3.5 MPa, 注射速率约 9 L·min<sup>-1</sup>, 结合图 6, 可知在完成设计注射介质量的 50% 时, 地下水观测井已检测到 pH 升高, NaOH 溶液在该方向注射影响半径已达 2.36 m。由此表明, 气动压裂+雾化喷射功能有助于改善低渗透地层的渗透性, 强化注射介质在地下传输。

T2-<sub>3</sub> 实验中, 当在 2 MPa 注射压力下介质注射速率仍然缓慢条件下, 开启了 30 s 水力压裂, 水力压裂工作压力控制在 10~15 MPa, 压裂后维持介质注射压力 2 MPa, 发现注射速率提升至 21.2~23.1 L·min<sup>-1</sup>, 高于 T2-<sub>2</sub> 实验雾化喷射后最大工作压力下 (3.5 MPa) 的注射速率 (9 L·min<sup>-1</sup>), 结合图 7, 可知在此条件下, 注射点周边四口地下水监测井方向均检测到紫外吸光度值升高, 最大注射影响半径达 4.37 m。对于低渗透性地层, 该数值相较常规的直推注射技术、注入井注射技术以及高压旋喷技术的注射影响半径 (分别为 0.6、0.5 和 0.9 m) [20] 都显著提升, 同时也高于沈宗泽 [33] 等采用水力压裂进行原位注入修复的注射影响半径 (2 m) 以及 LHOTSKY [28] 等采用直推气动压裂和水力输送 (最大压力 7.5 MPa) 结合技术原位注射的典型注射影响半径 (2~4 m), 由此表明一体化设备水力压裂效果明显。在高压下实施的水力压裂诱导地层产

生新的裂隙，同时使压裂前存在于地层中的细小裂隙扩展，二者连接形成复杂的裂隙网络，可显著提升地层的渗透性和渗流速率，从而强化注射介质在地下的扩散和传输<sup>[35-37]</sup>。

对比气动压裂+雾化喷射功能与水力压裂功能开启下的药剂注射影响半径，可知水力压裂可实现更大的注射影响半径，这可归因于气动压裂的压裂压力较低，产生的裂隙开度较小<sup>[38]</sup>，且裂隙扩展以水平缝为主<sup>[39]</sup>；而水力压裂压力较高，产生的裂隙开度更大，易于形成裂隙网络，在此条件下注射介质的传输阻力更低，因此注射影响半径更大。

### 3 结论

- 1) 原位直推钻进-喷注一体化装备的水力压裂和气动压裂-雾化喷射功能均可改善低渗透地层的渗透性，强化注射介质在地下的传输，且以水力压裂改善性能更为显著。
- 2) 高渗透性地层（渗透系数 $\geq 10^{-3} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ）注射宜采用低压注射模式，药剂注射压力宜 $\leq 2.0 \text{ MPa}$ ；低渗透性地层（渗透系数 $\leq 10^{-5} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ）宜先水力压裂再进行低压注射，水力压裂工作压力宜在  $10\sim 15 \text{ MPa}$ ；中低渗透性地层（渗透系数处于  $10^{-4} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  量级）药剂注射过程可采用气动压裂+雾化喷射功能强化介质传输效果，雾化喷射实施压力宜不小于  $0.8 \text{ MPa}$ 。
- 3) 在本中试条件下，低压注射模式在高渗透性地层的最大影响半径达  $3.67 \text{ m}$ ；中低渗透性地层采用低压注射+气动压裂-雾化喷射模式，最大影响半径达  $2.36 \text{ m}$ ；低渗透性地层采用水力压裂-低压注射模式，最大注射影响半径达  $4.37 \text{ m}$ ，且各向扩散较为均一。

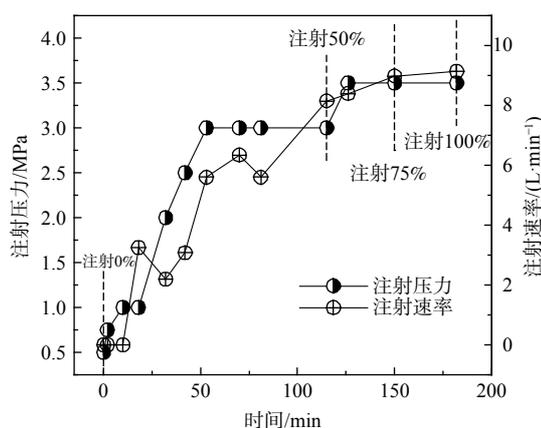


图 8 T<sub>2</sub><sub>2</sub> 实验注射压力及注射速率随时间变化图

Fig. 8 Injection pressure and flowrate versus time of T<sub>2</sub><sub>2</sub>

### 参考文献

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014.
- [2] 张祥, 曹睿. 原位注入修复药剂的迁移传输强化技术研究[J]. 环境科技, 2022, 35(4): 65-70.
- [3] 张娟, 邢轶兰, 李书鹏, 等. 土壤与地下水修复行业 2017 年发展综述[J]. 中国环保产业, 2018, 11: 5-19,24.
- [4] U. S. Environmental Protection Agency. Superfund remedy report, 17th edition[EB/OL]. [2023-01] <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1016JB0.txt>.
- [5] RAYAROTH M P, OH D, LEE C S, et al. *In situ* chemical oxidation of contaminated groundwater using a sulfidized nanoscale zerovalent iron–persulfate system: Insights from a box-type study[J]. *Chemosphere*, 2020, 257: 127117.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 张小翠, 林杰, 赵欢, 等. 原位化学还原技术对有机污染物的降解效果研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 10: 33-36,58.
- [9] ZHANG M, CHEN W X, CHUAN X Y, et al. Remediation of heavily PAHs-contaminated soil with high mineral content from a coking plant using surfactant-enhanced soil washing[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 909: 168499.
- [10] 仝婧婧. 生物刺激对 Cr(VI) 污染土壤修复及微生物群落结构的影响[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- [11] 殷鹏婷, 韩书新, 刁志龙, 等. 生物通风法修复石油烃污染土壤[J]. 化工环保, 2023, 43(6): 805-812.
- [12] 靳广永. 石油烃污染土壤生物修复技术分析[J]. 黑龙江环境通报[J]. 2023, 36(9): 148-150.
- [13] ZENG J, WU R N, PENG T T, et al. Low-temperature thermally enhanced bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soil: Effects on fate, toxicity and bacterial communities[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 335: 122247.
- [14] 冯超, 王瑜, 王志乔, 等. 地下水原位修复药剂钻注入技术现状调研[C]//中国地质学会. 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, 2019: 133-141.
- [15] 张峰. 原位化学还原技术在氯代烃污染场地修复中的应用[J]. 上海化工, 2015, 40(10): 16-18.
- [16] 章生卫, 程小谷, 于李罡, 等. 石油烃污染地下水原位化学氧化修复研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S1): 56-60.
- [17] 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.
- [18] 林威, 牛耕, 付全凯, 等. 使用 ISCO 和 P&T 联用技术修复某有机污染地块[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(S2): 142-149.
- [19] 吴乃瑾, 李培中, 张文, 等. 纳米零价铁对衰减停滞期氯代烃污染地下水的实地修复[J]. 环境工程学报, 2021, 15(12): 3907-3915.
- [20] 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): 48-53,118.
- [21] 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.
- [22] 章长松, 崔航. 高压旋喷注射法在城市石油烃污染场地修复中的实践应用[J]. 上海国土资源, 2023, 44(4): 154-160.
- [23] JANG S B, WONG K T, CHOONG C E, et al. Enhancing *in situ* remediation of clayey soils contaminated with total petroleum hydrocarbons by combining pneumatic fracturing, plasma blasting, and vacuum extraction: A comprehensive field investigation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*,

- 2024, 12: 113064.
- [24] CHRISTIANSEN C M, DAMGAARD I, BROHOLM M, et al. Comparison of delivery methods for enhanced *in situ* remediation in clay till[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2010, 30(4): 107-122.
- [25] FENG S J, CHEN H. Enhanced delivery of amendments in contaminated low-permeability soils by hydraulic fracturing[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 622: 129678.
- [26] ZHAO S, ZHANG J, FENG S J. The era of low-permeability sites remediation and corresponding technologies: A review[J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137264.
- [27] Final cost and performance report Ferox<sup>sm</sup> injection technology demonstration[EB/OL]. [2003-7-11]. <https://clu-in.org/download/techfocus/fracturing/Frac-Ferox-C&P.pdf>.
- [28] LHOTSKY O, KUKACKA J, SLUNSKY J, et al. The effects of hydraulic/pneumatic fracturing-enhanced remediation (FRAC-IN) at a site contaminated by chlorinated ethenes: A case study[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 417: 1-10.
- [29] FENG S J, ZHANG X, ZHENG Q T, et al. Modeling the spreading and remediation efficiency of slow-release oxidants in a fractured and contaminated low-permeability stratum[J]. *Chemosphere*, 2023, 337: 139271.
- [30] 余锦涛, 孙天宇, 戴毅. 水力压裂结合化学氧化法修复多环芳烃污染的低渗土壤[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(2): 174-180.
- [31] 郑奇腾, 张旭, 冯世进, 等. 单裂隙低渗透地层原位氧化修复机制与适用性研究[J/OL]. *岩土工程学报*, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20240522.0847.002>.
- [32] 张明, 赵怡阳, 徐辰. 气相抽提与氧化压裂技术结合在有机污染土壤修复工程中的应用[J]. *环境与发展*, 2020, 32(6): 88-90.
- [33] 沈宗泽, 王祺, 阎思诺, 等. 连续管式原位注入化学氧化技术对某有机污染场地地下水的修复效果[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(1): 93-100.
- [34] 单晖峰, 杨登, 张左右, 等. 修复药剂强化原位直推喷注钻具及喷注方法: ZL202210627951.6[P]. 2022-09-30.
- [35] 陈贺, 冯世进, 郑奇腾, 等. 低渗污染场地水力压裂强化修复药剂运输机制[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(4): 937-945.
- [36] 沈曙华, 余锦涛, 孙天宇. 水力压裂增透多环芳烃低渗场原位修复技术研究进展[J]. *上海化工*, 2023, 48(5): 47-51.
- [37] 曾悦. 低渗土壤水力压裂缝网形态及压裂参数[D]. 北京: 中国石油大学, 2023.
- [38] U. S. Environmental Protection Agency. Hydraulic and pneumatic fracturing[EB/OL]. [1998-02]. <https://clu-in.org/download/techfocus/fracturing/hydraulic-and-pneumatic-fracturing.pdf>.
- [39] SCHURING J R, CHAN P C, BOLAND T M. Using pneumatic fracturing for in-situ remediation of contaminated sites[J]. *Remediation Journal*, 1995, 5(2): 77-90.

(责任编辑:陶雪)

## Pilot studies on injection technology of *in situ* direct push drilling-jetting-injection integrated equipment at contaminated sites

GE Chuanqin<sup>1</sup>, SHAN Huifeng<sup>1\*</sup>, WANG Jieyi<sup>2</sup>, ZHU Shuiqing<sup>1</sup>, ZHANG Zuoyou<sup>1</sup>

1. DDBS Environmental Remediation Co., Ltd, Nanjing 210012, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China

\*Corresponding author, E-mail: [shanhf@jsddb.com](mailto:shanhf@jsddb.com)

**Abstract** Application difficulties and poor diffusion effect of reagents is a common challenge faced by traditional *in situ* injection technologies at low permeability sites. Integrating hydraulic fracturing, pneumatic fracturing-atomized jetting and direct push drilling, furthermore realizing switch among various injection modes, may significantly improve the applicability of *in situ* injection equipment to complex formations. Two pilot studies were conducted on sites with high and low permeability, respectively, using a self-developed double-channel based *in situ* direct push drilling-jetting-injection integrated equipment. Effects of hydraulic fracturing, pneumatic fracturing-atomized jetting on low-permeability strata, injection radius of influence (ROI) of the integrated equipment, applicable injection modes and process parameters under various permeability conditions were investigated. Results demonstrated that pneumatic-atomized jetting and hydraulic fracturing could significantly improve the permeability of low-permeability formations. Low-pressure injection mode ( $\leq 2.0$  MPa) was suitable for high-permeability strata; low-pressure injection plus pneumatic fracturing-atomization mode ( $\geq 0.8$  MPa) was suitable for medium to low permeability strata; and hydraulic fracturing (10~15 MPa) followed by low-pressure injection mode was suitable for low permeability strata, with injection ROI up to 3.67, 2.36 and 4.37 m achieved respectively under the above conditions. The pilot studies were the debut of such injection technology and equipment in China, providing the basis for future application of *in situ* direct push drilling-jetting-injection integrated equipment in *in situ* remediation projects in China.

**Keywords** *in situ*; direct push drilling; hydraulic fracturing; pneumatic fracturing; atomized jetting; radius of influence