

ICS  
CCS

ACEF

中华环保联合会团体标准

T/ACEF×××-××××

# 污染场地原位修复直推钻进-喷/注一体化 装备操作指南

Operations guidelines – application of direct push drilling-jetting-injection integrated equipment in *in situ*  
remediation of contaminated sites

(征求意见稿)

2024-□□-□□发布

2024-□□-□□实施

中华环保联合会 发布

# 目 次

|                  |    |
|------------------|----|
| 前 言 .....        | II |
| 1 范围 .....       | 1  |
| 2 规范性引用文件 .....  | 1  |
| 3 术语和定义 .....    | 1  |
| 4 关键部件技术要求 ..... | 2  |
| 5 工作程序 .....     | 6  |
| 6 适配性测试方法 .....  | 7  |
| 7 喷注实施 .....     | 9  |
| 8 喷注效果监测方法 ..... | 12 |
| 9 二次污染应对措施 ..... | 12 |

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国土壤污染防治法》、《中华人民共和国水污染防治法》、《地下水管理条例》，提高污染场地修复工程质量，保障土壤、地下水环境安全，制定本文件。

本文件为首次发布。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件起草单位：江苏大地益源环境修复有限公司、中国地质大学（北京）、南京贻润环境科技有限公司、中南大学、中山大学、桂润环境科技股份有限公司、中创寰科科技（北京）有限公司。

本文件主要起草人：单晖峰、崔卫华、陈亮、葛传芹、李晓莹、吴克宁、王英滨、李梦珂、朱水清、张左右、杨振峰、王杰焱、胡嘉朋、尹业新、贺治国、晁元卿、汤叶涛、张燕、涂方祥、高原、孙世玉。

# 污染场地原位修复直推钻进-喷/注一体化装备操作指南

## 1 范围

本文件提供了直推钻进-喷/注一体化装备在原位修复、风险管控工程应用中对其功能、技术、材质的指标要求，规定了工况及药剂剂型适配性测试方法、适用场景、工作程序及操作规范。

本文件适用于有色金属采选冶遗留场地，及其他复杂地形地貌的工业污染场地（含退役工业企业场地、在产企业、工业园区）的土壤和地下水原位修复、风险管控工程中直推钻进-喷/注一体化装备的运行与维护。

## 2 规范性引用文件

本文件引用了下列文件或其中的条款。凡是注明日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是未注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

|            |                           |
|------------|---------------------------|
| GB 36600   | 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行） |
| GB/T 14848 | 地下水质量标准                   |
| HJ 610     | 环境影响评价技术导则地下水环境           |
| HJ/T166    | 土壤环境监测技术规范                |
| HJ 494     | 水质 采样技术指导                 |
| HJ 25.1    | 建设用地土壤污染状况调查技术导则          |
| HJ 25.2    | 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则     |

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**钻进-喷/注一体化装备** integrated drilling-jetting-injecting equipment

以现有直推钻机为基础，以倾角注射、气液双通道钻具为核心，整合低压注射及水力压裂/气动压裂/雾化喷射等高阶功能，实现对复杂地貌、复杂地层结构的目标修复区域的靶向修复材料/药剂输入的装备。

### 3.2

**直推** direct push

利用（液压）冲击锤和钻机自身重量通过对土层的挤压将钻具（链接钻杆）顶入/刺入

地下，可用于原位修复药剂注入、传输，和土壤/地下水的调查、取样。

### 3.3

#### 水力压裂 hydraulic fracturing

为改善目标修复区域的渗透性，强化地下水原位修复的进程及效果，在低渗透地层通过水的高压注射形成裂隙的活动。

### 3.4

#### 气动压裂 pneumatic fracturing

为改善目标修复区域的渗透性，强化地下水原位修复的进程及效果，应用高压气体的注入在低渗透地层中打开裂隙的活动。

### 3.5

#### 雾化喷射 atomized spray

为强化注射介质在目标修复区域内的均匀分布、传输，借助空气或氮气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。本文件所述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。

## 4 关键部件技术要求

### 4.1 喷/注一体化装备整体构成

原位修复直推钻进-喷/注一体化装备由喷/注一体化主机、药剂配制及注入系统总成、外置供电设备三部分组成。

### 4.2 装备关键部件设计

#### 4.2.1 喷/注一体化主机

喷/注一体化主机由设备自带动力系统提供动力，设备运行功率在 30 kw ~ 74 kw 之间，主要包括液压行走组件、发动机舱、底盘组件、操作台、后托架、翻转、钟摆功能组件、探测组件。其中探测组件包括高频液压冲击锤、螺旋钻、卷扬桅杆、机头摆动缸。

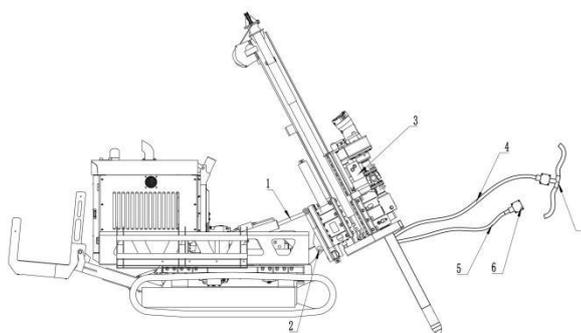
喷/注一体化钻机的各项推荐参数见表 1，主机示意图见图 1。

表 1 喷/注一体化钻机的设备参数

| 参数名称 | 设备参数            |
|------|-----------------|
| 推进力  | 80 kN ~ 83 kN   |
| 提升力  | 150 kN ~ 277 kN |

表 1 喷/注一体化钻机的设备参数（续）

| 参数名称      | 设备参数                 |
|-----------|----------------------|
| 额定功率      | 74 kW                |
| 机头俯仰角度    | -6° ~ +68°           |
| 机头钟摆角度    | ±7.5°                |
| 螺旋动力头工作扭矩 | 5500 N·M ~ 8000 N·M  |
| 螺旋动力头工作转速 | 80 r/min ~ 120 r/min |
| 冲击频率      | 1050 bpm ~ 2050 bpm  |
| 卷扬提升力     | 0.3 t ~ 0.8 t        |
| 后部挂板承载力   | 100 kg ~ 800 kg      |



标引序号说明：  
 1-液压缸 5-气管  
 2-铰点 6-单向阀  
 3-动力头 7-三通接头  
 4-液管  
 注：件6单向阀连接缓冲罐，件7三通接头一端连接水泵，一端连接注射泵。

图 1 主机示意图

#### 4.2.2 液压翻转机构

液压翻转机构包括连接组件、固定座、连接销轴和液压油缸，机头部通过连接组件和液压油缸连接在一起。车架上焊有固定板与固定座，固定板上配有圆孔，用销钉穿过缸筒和固定板的圆孔进行固定。另一端，用销钉穿过缸杆端头的孔与连接组件上端固定。连接组件下端焊有固定板，销钉穿过固定板与底座上的孔形成铰点，通过油缸的伸缩，连接组件可实现绕交点翻转运动。

#### 4.2.3 双内管钻具

钻具是承载中高渗透地层低压注射、低渗透地层水力压裂/高压喷射功能的核心部件。双内管钻具指水和药剂注射介质共用一个通道，压缩空气走另一个通道的双内（软）管设计。

##### 1) 钻具设计参数

为满足多种地形地貌、地层结构特征及钻注负载特性的要求，本文件推荐钻具设计参数要达到表 2 中的数值要求。

表 2 钻具推荐设计参数

| 项目         | 参数                       | 数值                    |
|------------|--------------------------|-----------------------|
| 水/药剂介质共用通道 | 最大输出压力 (MPa)             | ≥20 (水) / ≥3.5 (药剂)   |
|            | 最大流量 (L/min)             | ≥100                  |
| 压缩空气通道     | 最大压力 (MPa)               | 0.7 ~ 1.0             |
|            | 流量 (m <sup>3</sup> /min) | 2 ~ 3                 |
| 喷嘴         | 喷嘴数量 (个)                 | 4/6/8                 |
|            | 喷嘴孔径 (mm)                | 2<br>(设计射流速度 130 m/s) |
| 钻杆         | 外径 (mm)                  | 建议≤110                |

## 2) 钻具材质要求

钻具中喷嘴材质：316 不锈钢或相当性能的材料。要求具有良好的耐腐蚀、耐磨、耐压性能。

钻具中承压管路的材质：含 Ni ≥ 8% 的奥氏体不锈钢或相当性能的材料，要求具有良好的耐高温和机械加工性能，且具有较强的耐大气腐蚀性能。

钻具中不锈钢和合金钢的焊材要求：宜使用酸性 A302 焊条或不低于该材质的异种钢焊材，避免异种钢材料熔接后产生的晶间腐蚀。

### 4.2.4 气、液软管

高压水/药剂注射管路内衬管材宜具有较好的耐磨性、冲击强度、高韧性、自润滑性、不粘性和化学稳定性，长期工作耐温宜不小于 80 °C，宜采用 UPE（超高分子聚乙烯）或以上材质。

压缩空气软管宜采用丁腈合成橡胶及相当材质。

### 4.2.5 回拔器

回拔器由上、下回拔组件和液压油缸组成，并配合上、下卡瓦使用。

上卡瓦的作用是抱紧钻杆，通过液压油缸的伸缩来将钻杆从地下带出，从而实现回拔；下卡瓦的作用是上卡瓦松开钻杆时，夹持住钻杆，为了使回拔出地面的钻杆不再落入井内，起到的是防坠作用，回拔器示意图见图 2。

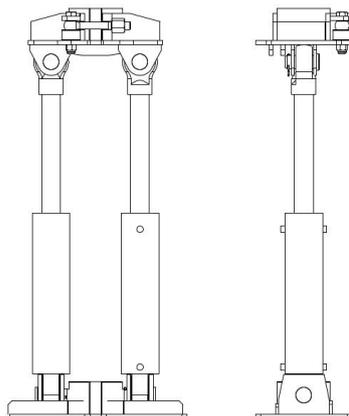


图 2 回拔器示意图

#### 4.2.6 倾角注射辅助器

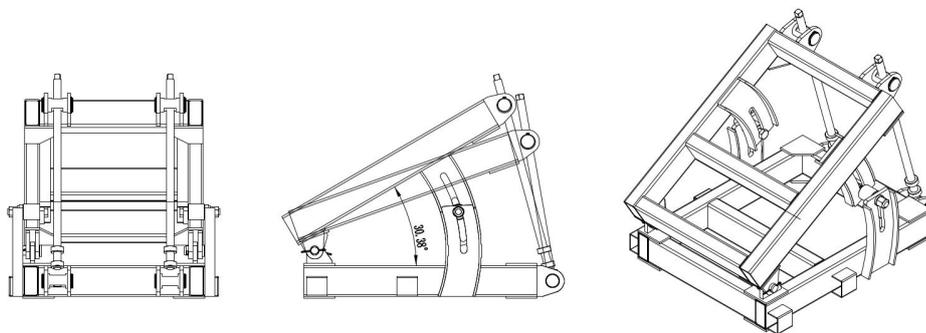


图 3 倾角注射辅助器示意图

倾角注射辅助器由上架、下架组件和连接丝杆等组成。上架组件可以调节规定范围内的任意角度，用于辅助注射，起到支撑作用；下架组件依附于地面，起到倾角注射的基本支撑作用，倾角注射辅助器示意图见图 3。

#### 4.2.7 药剂配制及注入系统总成

药剂配制及注入系统总成包括清水箱、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、仪表和电控系统，宜整体组装于一个撬块或集装箱内，方便运输。

药剂箱应设有药剂搅拌装置，药剂箱及搅拌装置材质应具备较好的耐酸碱性能。

高压注水泵、注药增压泵宜选用柱塞泵，额定压力宜分别不小于 20 MPa、3.5 MPa，泵头应采用 304 不锈钢及相当材质，宜采用变频控制。

空气压缩机宜采用螺杆式，工作压力宜不小于 0.7 MPa。

药剂配制及注入系统总成中，除去辅助注射的喷/注一体化主机外，其余设备部件宜采用单独的外置供电设备提供电力。

### 4.3 装备技术要求

装备技术相关要求见表 3

表 3 装备技术要求参数的建议取值

| 装备技术     | 技术要求                      |
|----------|---------------------------|
| 越野行走     | 可在平地 and 坡度小于 15°的缓坡上运行正常 |
| 钻角调节     | 注射倾角可调范围偏离垂直方向不高于 30°     |
| 影响半径     | 最大值≥ 1.5 m                |
| 喷/注压力    | 最高喷/注压力≥20 MPa            |
| 钻进、喷/注深度 | 最深喷/注深度≥15 m              |
| 喷/注流量    | 最高流量≥100 L/min            |

## 5 工作程序

钻进喷/注一体化设备原位修复的工作程序主要包括场地调研、装备进场调试、适配性验证/中试、喷注效果监测和规模实施。

施工前，对目标注射修复场地进行全面调研，根据 HJ 25.1、GB 36600 和 HJ 610、GB/T 14848 对土壤及地下水污染状况进行调查和风险评估，掌握修复场地污染空间分布情况、水文地质、工程地质等条件，选取对应的修复药剂，设计合适的修复方案，确定所需装备的关键技术参数；然后进行装备进场调试、适配性测试。若适配性测试成功则进行喷注实施阶段；若适配性测试不成功宜尝试其他原位药剂传输工艺，如原位土壤搅拌等。

施工过程中实时监测修正注入深度、剂量、影响半径等关键参数，对喷注效果进行监测，确保工程规模实施达到要求；若不满足喷注效果要求，则应对喷注方案和/或钻进注入机具进行优化调整后再试。若喷注效果满足工程要求，则喷注施工结束。喷/注一体化设备工作程序如图 4 所示。

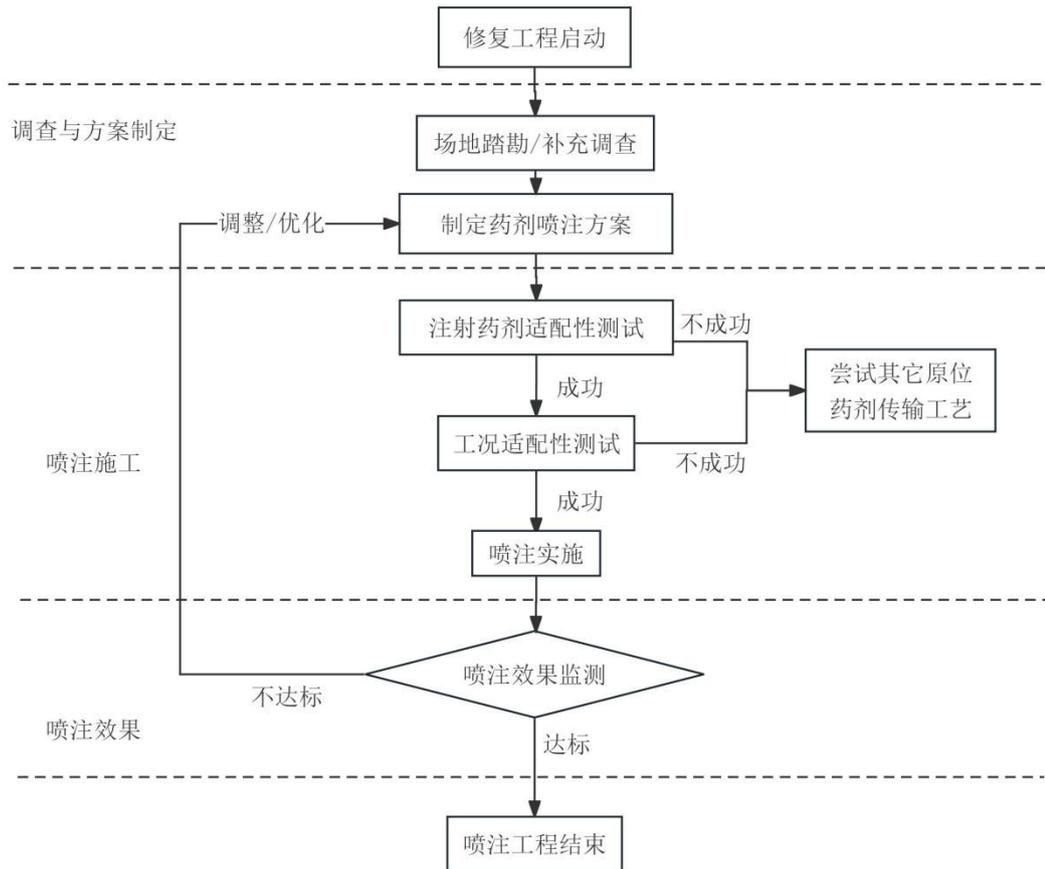


图 4 喷/注一体化设备工作程序

## 6 适配性测试方法

### 6.1 场地调研

场和地调研应符合 HJ 25.1 及 HJ/T166 的规定。

适配性测试前，应根据测试需要对目标注射修复场地进行全面调查，收集试验所需相关资料，主要包括但不限于：

- a) 地块的地形地貌；
- b) 区域气象气候条件：包括气温、降水量等；
- c) 地块地质和水文地质条件：包括地层岩性、结构、厚度、土壤渗透性、地下水水位、流向、流速等；
- d) 地块的污染特征，包括污染物、污染物浓度分布、污染深度、污染范围等；
- e) 周边敏感点及分布情况：包括敏感人群、地表水源地、地下水源地等。

### 6.2 制定药剂喷注方案

本文件所述装备可适用于地面崎岖不平、目标修复区域土层结构复杂、多重污染物复合污染的采选冶聚集区及工业场地的土壤、地下水修复工程。需根据每项修复工程的场地概念模型制定针对性的药剂喷注方案，包括修复药剂的选择、药剂注射介质的配制方法、喷注模式的选择、喷注点位的布设、喷注深度区间、药剂喷注量、多轮次喷注（如需要）的间隔周期等。在工程实践中建议根据现场中试所验证的最优喷注模式及影响半径来优化调整喷注方案。喷注点位的常见布设方式包括覆盖污染源区/重污染点或整个目标修复区域的梅花布点法，以及在污染源区/重污染点的下游、地下水污染羽的中段、下游前端通过原位喷注点形成反应带或渗透反应墙的形式。

本文件所述装备针对一些代表性的较挑战的应用场景的应对功能及解决方案见表 4。

表 4 原位修复直推钻进-喷/注一体化装备适用场景

| 适用场景        | 本装备的适配功能/属性   |
|-------------|---|
| 低渗透污染地层     | 可采用水力压裂/气动压裂/雾化喷射模式，改善地层的低渗透性，以强化药剂传输，提升药剂作用范围和效能。        |
| 中、高渗透地层     | 低压注射模式为主，可辅以气流包裹、雾化功能以强化传输。                               |
| 污染分布非均质、非连续 | 靶向、定位注射属性：在不同的目标深度位置，可实现针对不同地层条件、污染特征优化调整注射方式、注射量，实现精准注入。 |
| 复杂崎岖斜坡地形地貌  | 可在平地 and 坡度小于 20°的缓坡上运行正常。                                |
| 污染物复杂场地     | 装备材料耐腐蚀性优秀，可兼容、胜任各种常见的不同理化性质的修复材料、剂型的注射任务。                |

### 6.3 注射药剂介质剂型适配性测试方法

#### 6.3.1 修复药剂理化性质及注药系统耐受性试验

根据场地污染物特征筛选修复药剂，在目标修复药剂不同工作 pH 范围及修复药剂固液比条件下，以注药系统的喷嘴、注药增压泵泵头及出口管道材质为对象，通过进行静态、动态挂片腐蚀试验检验注药系统对于注射药剂的腐蚀耐受性，无明显腐蚀或平均腐蚀率 $<0.05$  mm/a 的，则可视为注药系统主要材质对修复药剂耐受。

#### 6.3.2 修复材料与一体化装备喷/注兼容性研究

根据修复药剂剂型差异，以药剂自身或以用水配制的不同固液比、不同注射剂型的药剂为注射对象，在地面进行钻头地面悬空喷射试验，药剂的注射剂型包括稀泥浆、悬浊液、乳化液、水溶液，根据药剂能否顺利实现喷射以及喷射半径大小检验修复材料与一体化装备的喷/注兼容性，可在工作压力范围内实现喷射且喷射半径不小于 5 m 的视为兼容。

原位修复工程常见修复药剂剂型中的乳化液、水溶液属于均相介质，相对操作便利。稀泥浆、悬浊液则属于非均相介质，非均相介质静置后固体颗粒将沉淀，为了确保其与喷/注一体化装备兼容，本指南建议药剂粉末的粒径应 $\leq 0.25$  mm，目数以 50 目 ~ 200 目为宜。

配制稀泥浆/悬浊液剂型的注射介质时应保持持续搅拌状态，使其均质、稳定，以利于直推喷/注的顺利完成以及药剂在目标修复区域内的均匀分布和传输。

## 6.4 工况适配性测试方法

### 6.4.1 爬坡试验

根据目标注射场地地形地貌，选择复杂崎岖及不同角度（ $\leq 45^\circ$ ）的斜坡路面操作喷/注一体化主机进行上下坡试验，检验装备野外行走的适应性及最大耐受坡角。

### 6.4.2 喷/注角度试验

利用倾角钻进辅助器固定钻进钻杆，调整钻杆入土角度，进行不同角度下的倾角钻进试验，根据钻杆是否可钻进、钻进深度及钻进后钻杆的回拔难度确定场地最大钻进倾角。

### 6.4.3 喷/注模式试验

以水或其它修复药剂为注射剂，分别在高压注水泵、注药增压泵典型工作压力（ $\geq 20$  MPa、 $\geq 3.5$  MPa）下进行钻头地面悬空喷射试验，观测钻具的各喷嘴的喷射表现、强度是否一致。

分别在高压注水泵、注药增压泵液态注射剂喷射试验基础上，增开空气压缩机，切换至药剂雾化喷射模式，观测雾化条件下喷射半径、强度是否得以增加。

### 6.4.4 喷/注参数实验

分别在垂直和倾角喷/注模式下，在高、低不同渗透性地层，进行不同注射压力、不同喷/注深度、不同注射量、不同喷射速度、不同喷/注模式（雾化/非雾化）的药剂喷/注试验，观察地面修复药剂冒浆情况，通过在线（如采用在线地下水水质监测仪检测地下水 pH）或离线（如采用紫外分光光度计检测荧光示踪剂）方式检测药剂中的指示或特征参数判定实际注入深度、注射影响半径。

## 7 喷注实施

### 7.1 装备进场调试

#### 7.1.1 原位修复直推钻进-喷/注一体化装备进场调试应确定

- a) 施工场地空间及地基承载力满足一体化装备布置；
- b) 现场供水、装备动力供应条件满足装备运行需求。

#### 7.1.2 一体化装备各部分根据施工场地实际合理布置就位后，应进行下列操作

- a) 连接设备间电力管线，完成水、电接入；
- b) 完成钻具与喷/注一体化主机管路连接；
- c) 根据注射需求量进行修复药剂配制；

d) 进行设备单机检查，检查注水、注药、供气系统设备是否正常运转，进行地面管路试喷，检查管路是否畅通、有无泄漏，检查压力、流量、液位等仪表及控制系统能否正常工作；

e) 各单体设备检查完毕，在地表进行联调试机、试喷。

## 7.2 钻进过程

a) 钻进作业前应检查钻杆螺纹连接处的清洁度，用钢刷和水对钻杆进行清理。检查破碎锤连接部件橡胶 O 型圈的磨损情况，及时更换。

b) 操作钻机前检查机油尺，确保机油充足，此外应同步检查水箱防冻液、液压油液位、燃油液位尺，检查机油滤芯是否漏油。

c) 启动钻机，并对钻机的各项动作进行检查，检查密封部位是否漏油，液压管路是否有破损等情况，检查设备全部的紧急停车按钮是否复位。

d) 检查设备的运行环境，包括地下埋设的管路或电缆的具体位置，检查安全防护用具的完好情况，并对操作工作人员加以确认安全防护用具的佩戴。

e) 将钻机移动到作业场地，对准点位，放下平衡架，观察设备整体的水平情况，使用后托架进行现场找平，开始钻进。

f) 钻头地面试喷射，确保注射钻头的水液通道畅通，喷嘴无堵塞，开启气路，确保气路能正常工作无堵塞。

g) 将钻杆和注射钻头连接，放好橡胶减震帽、敲击帽，移动设备保持钻杆与地面的垂直，开启设备的高频冲击钻进，根据钻进深度，及时加装钻杆，直到喷/注深度。

## 7.3 喷/注过程

根据各钻进深度所处地层及地层渗透性，明确喷/注模式。高渗透性地层（如砾石、粉砂）宜采用低压喷/注；低渗透性地层（如黏土、壤土）宜先水力压裂再进行低压药剂注射。药剂注射阶段可采用压缩空气雾化强化药剂传输效果。

### 7.3.1 中高渗透地层低压喷/注模式

a) 打开药剂注射管路阀门，开启与药剂配制罐相连的药剂离心泵及注药增压泵，调整注射压力和流量，执行地下喷/注操作。药剂注射压力建议 $\leq 2.0$  MPa，以 0.5 MPa ~ 1.0 MPa 为宜，在每一个注射点位的每个深度点位的药剂注入耗时宜小于 60 min。

b) 当需开启雾化强化功能时，打开压缩空气喷射管路阀门，启动空气压缩机，雾化喷射压力宜不小于 0.8 MPa，持续时间宜短于 2 min。

c) 喷/注过程中应关注注射压力、注射流率以及药剂箱液位变化，在喷/注点位附近的地面及观测井处观测药剂喷/注效果，测量注射影响半径，过程监测要求见第 8 章。

### 7.3.2 低渗透地层水力压裂-低压喷/注模式

a) 打开高压水注射管路阀门，调节高压注水泵压力至 10 MPa ~ 20 MPa，高压喷射持续时间宜小于 2 min。

b) 关闭高压注水泵，关闭高压水注射管路阀门，打开药剂注射管路阀门，执行低压喷/注操作。

c) 每次完成稀泥浆介质注射或切换注射药剂时使用清水清洗注药通道，以免注射通道堵塞或交叉污染。

### 7.3.3 中低渗透地层气动压裂模式

对于渗透系数在  $10^{-4}$  cm/s 级别的粉土/黄土，可启动雾化喷射功能，以产生气动压裂效果，雾化实施压力宜在 0.8 MPa ~ 1.0 MPa 之间，持续时间建议短促，以 30 s ~ 60 s 为宜。气动压裂之后恢复至低压注射，观察注射效果是否改善，如注射压力下降、注射速度提升等。

## 7.4 地面冒浆应对措施

修复药剂的原位注射时若形成蜿蜒向上的优势通道则将导致地面冒浆，浅层注射时更易发生。

轻微地面冒浆（零星冒浆点，仅微量注射介质渗出）的情形可接受，可继续执行喷/注施工，但需适度调整注射压力及流速，避免冒浆现象加重。

观测到严重地面冒浆（出现较多冒浆点，甚至裂隙，导致较大量注射介质淌出而非渗出）时需立即停止该点位深度的注射，可尝试向下继续钻进，调整喷/注深度后再尝试，若严重地面冒浆现象持续存在，宜终止此点位的喷/注实施，用膨润土和水回填、封闭此钻孔。从此点位平移一段距离（如 0.5 m ~ 1m）之后重新尝试。

从直推-喷/注装备的改良角度，可尝试改进直推钻具的结构设计用以强化药剂在水平方向上的传输，减少向上延伸的裂隙的形成，缓解或避免地面冒浆。

## 7.5 钻具回拔

地下作业完成后，应将钻杆、注射钻头等从地下井中回拔至地面，可使用钻机液压缸配合回拔帽或单独使用液压回拔器设备进行回拔。当采用液压回拔器进行回拔时，将液压回拔器布置在点位，放置上下卡瓦，通过卡瓦的斜度锥块锁紧钻杆，液压缸通过强推力将钻杆拔出，回拔及拆卸钻杆时应注意卡瓦的锁紧程度，防止钻杆落入井内。

## 7.6 装备退场

喷/注操作完成且喷注效果经监测评估（具体喷注效果监测方法见 8.1~8.3）达标后，应执行下列退场操作：

a) 将喷/注一体化主机桅杆和钢丝绳归位折叠，关闭发动机。

b) 将药剂箱中剩余修复液排尽，用清水对药剂箱及注药通道、钻杆及钻头（含拆卸后钻孔）进行清洗，待干燥后妥善放置。

c) 各用电设备确认归位及无用电需求后，断开电力管线连接，关闭外置发电设备。

d) 一体化装备整体装车退场。

## 8 喷注效果监测方法

### 8.1 监测井布设

喷注效果监测应符合 HJ 25.2 及 HJ/T166 的规定。

监测井应在钻进喷/注前完成布设，监测井应布设在喷/注点位拟喷射方向上，兼顾目标修复区域的地下水流向。各监测井位之间保持至少 2 m 的距离，保证各监测井位之间不相互影响。

监测井可采用单个地下水监测井或地下水监测井丛形式，在满足监测要求条件下以监测井数量及成本最小化为原则。

监测井的布设可充分利用地块环境调查设置的监测井。

### 8.2 监测指标

喷/注过程中应监测注入孔及周边区域地面修复药剂冒浆情况，通过在线/离线方式监测药剂实际注入深度、影响半径、污染物浓度等参数，同时应对可能产生的二次污染物浓度展开监测。

影响半径可通过检测主要药剂指示或特征指标（pH、药剂某个特征成分如  $\text{Fe}^{2+}$  离子）、示踪剂等进行测定。

### 8.3 监测频次

a) 喷/注前应对修复区域及周边监测井进行采样检测，记录目标含水层地下水中药剂特征指标和目标污染物的初始浓度。

b) 药剂注入深度和影响半径监测应在喷/注开始后，宜在喷/注开始后每隔 10 min ~ 20 min 监测 1 次。

c) 关注污染物及其降解产物的监测方法、方案根据所属修复工程的实施方案执行。药剂喷/注实施前（即本底值）及实施后的变化趋势应科学、规律地持续监测。

d) 二次污染物监测宜在喷/注前后各监测 1 次，后续监测频次为每月 1 次，稳定后为每季度 1 次。

## 9 二次污染应对措施

### 9.1 二次污染风险分析

应用直推钻进-喷/注一体化装备执行原位修复工程，其直推钻进环节并不产生钻屑等固废、危废。在喷/注过程中可能发生的二次污染主要包括严重地面冒浆导致的混含修复材料成分（如强氧化剂等）、土壤/地下水污染物的废水，以及施工过程带来的噪音影响，基本

没有废气、固废产生。

## 9.2 二次污染应对措施

在喷/注过程中，如发生严重地面冒浆，导致非环境友好的修复材料引发的二次污染，可采取以下措施应对：

a) 立即停止喷/注作业：一旦发生严重地面冒浆，应立即停止喷/注作业，以防更多的修复材料涌出，二次污染加重。

b) 清理和回收修复材料：对已经冒出的修复材料进行清理和回收，避免其进一步污染周围环境。同时要确保回收过程的安全，避免对人员和环境造成二次伤害。

c) 评估污染程度：对受影响的区域进行评估，确定污染的程度和范围，以便制定针对性的应对措施。

d) 采取应急措施：根据评估结果，采取必要的应急措施，如使用吸附材料、设置围堰等，以控制污染物的扩散和迁移。

e) 加强监测和报告：对受影响区域进行持续监测，关注污染物的变化情况，并及时报告相关部门，以便采取进一步措施。

### 9.2.1 废水应对措施

a) 废水应现场及时收集，水样采集应符合 HJ 494 的规定。

b) 宜优先考虑通过修复工程现场配备的废水治理系统治理，如无废水治理系统，则应委外处理。

### 9.2.2 噪声应对措施

工程施工期间，直推钻进时的敲击声是主要的噪声源，为间断和阵发性。应严格遵守噪音限制标准，积极采用降噪措施、合理安排控制施工时间，现场施工人员应佩戴降噪耳塞加以防护。