

团 体 标 准

T/ACEF ×××—××××

铬污染地块原位还原稳定化修复技术指南

Technical guidelines for the in-situ reduction and stabilization remediation of chromium contaminated sites

(征求意见稿)

××××-×-×发布

××××-×-×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 总体要求 3

5 修复技术可行性评估 4

6 原位还原稳定化修复工程设计与施工 6

7 监测及效果评估 16

附 录 A（资料性）常用药剂反应机理及优缺点 18

附 录 B（资料性）原位注入工艺对比 19

附 录 C（资料性）施工记录表 20

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。

本文件为首次发布。

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。

本文件由北京建工环境修复股份有限公司提出。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件起草单位：北京建工环境修复股份有限公司（污染场地安全修复技术国家工程实验室）、中国环境科学研究院、上海久澄环境工程有限公司、中国科学院过程工程研究所、北京市机械施工集团有限公司、深圳市环境科学研究院、云南省生态环境科学研究院、青岛理工大学。

本文件主要起草人：康绍果、颜湘华、王祺、宋晓威、徐红彬、胡鸿志、林挺、魏中华、熊静、孙英杰、史开宇、王兴润、关亮、谢梦洁、张红玲、邢宁宁、刘海龙、肖恩汪、罗飞、胡柯鑫、和丽萍、龙伟、张大磊、郭丽莉。

铬污染地块原位还原稳定化修复技术指南

1 范围

本文件规定了铬污染地块原位还原稳定化修复技术的总体要求、技术可行性评估、修复设计及施工、监测及效果评估等内容。

本文件适用于铬化工、铬渣堆放场等铬污染地块土壤及地下水的原位还原稳定化修复，不适用于铬渣及含铬渣的渣土混合物修复。

电镀厂、制革厂等其他行业污染地块土壤及地下水中铬原位还原稳定化修复可参照本文件执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注明日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，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）

DL/T 520 水电水利工程高压喷射灌浆技术规范

DL/T 5425 深层搅拌法地基处理技术规范

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

HJ 25.4 建设用地土壤修复技术导则

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则（试行）

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ 164 地下水环境监测技术规范

HJ/T 166 土壤环境监测技术规范

HJ 2050 环境工程设计文件编制指南

地下水环境状况调查评价工作指南（环办土壤函〔2019〕770号）

地下水污染模拟预测评估工作指南（环办土壤函〔2019〕770号）

工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）（环境保护部公告2014年第78号）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

原位修复 in-situ remediation

不移动受污染的土壤或地下水，直接在地块发生污染的位置对其进行原地修复或处理。

3.2

原位还原稳定化 stabilization by in-situ reduction

在原位向土壤或地下水污染区域投加还原剂，使土壤或地下水中的污染物被还原为低毒且更稳定的物质。

3.3

原位搅拌工艺 in-situ soil mixing

利用搅拌机械设备将修复药剂与土壤强制搅拌，使修复药剂与土壤及地下水混合的工艺。

3.4

高压旋喷工艺 high-pressure rotating jet grouting

利用旋喷钻机高速喷射形成的流体切割土体，使修复药剂与土壤及地下水充分混合的工艺。

3.5

直推注入工艺 injection via direct push methods

通过注入设备将修复药剂以一定压力通过输送管道注入预定深度土壤及地下水层中的工艺。

3.6

建井注入工艺 injection via well filters

利用压力泵将修复药剂通过注入井注入到地下孔隙中，使药剂与土壤及地下水混合的工艺。

3.7

延米药剂添加量 dosage per meter

原位注入药剂修复过程中，加药段平均每延米的药剂注入量。

3.8

地块概念模型 conceptual site model

用文字、图、表等方式来综合描述污染源、污染物迁移途径、人体或生态受体接触污染介质的过程和接触方式等。

4 总体要求

4.1 基本原则

4.1.1 科学性原则

基于对污染地块水文地质特征、污染物空间分布特征、施工条件等深入分析，综合考虑经济成本、时间成本及修复目标可达性等约束条件，科学设计修复方案，保证修复效果，争取效益最大化。

4.1.2 安全性原则

充分考虑现场条件、污染物毒理特征、修复药剂及施工机械设备等因素，确保施工过程人员及环境安全，避免修复过程带来二次污染及造成安全事故。

4.1.3 动态调整原则

充分考虑修复区水文地质状况及污染存在的动态变化，在实施过程中根据过程监测数据进行动态调整，不断优化修复方案。

4.2 总体要求

4.2.1 铬污染地块原位还原稳定化修复技术应通过小试和中试确定工艺及施工参数，使处理后的土壤和地下水中铬含量满足修复目标值的要求。

4.2.2 修复药剂和施工工艺的选择应考虑和其他污染物修复技术的协调性。含铬污染地块采用还原稳定化技术修复达标后不应在后续修复中采用氧化修复技术。

4.2.3 原位还原稳定化技术施工过程中大气、水污染物、噪声的排放应符合国家、地方或行业相关标准要求；产生的固体废物应按照其环境管理属性进行管理。

4.2.4 劳动安全和职业卫生应符合国家、地方及行业的规定。

4.3 工作流程与内容

4.3.1 技术可行性评估

根据地块修复目标，基于地块概念模型，进行原位还原稳定化修复技术可行性评估，从技术适宜性、经济成本和时间成本等方面进行评估，技术适宜性方面重点评估修复目标可达性、修复药剂可获取性和施工工法适宜性，判断地块是否适宜采用原位还原稳定化技术进行修复。

4.3.2 修复工程设计及施工

包括工艺流程、修复设计、修复设备、修复工程实施、环境保护和安全要求以及质量控制等。

4.3.3 修复工程监测及评估

修复工程监测及评估包括修复期监测、效果评估监测及后期监测。通过修复期监测，优化工艺参数，调整施工措施，保障修复目标的实现。修复工程经初步判断达到修复目标后，开展修复效果评估监测，评估修复工程实施效果，修复效果评估通过后，按照相关规定开展后期监测。后期监测中重点关注地块六价铬浓度变化趋势，若有“返黄”现象，及时采取措施进行处理。

原位还原稳定化修复技术实施工作流程如图 1 所示。



图1 铬污染地块原位还原稳定化修复技术工作流程

5 修复技术可行性评估

5.1 地块概念模型更新

结合地块水文地质条件、污染物的理化参数、空间分布及其潜在运移途径、风险评估结果等因素，以文字、图、表等方式概化地块地层分布、地下水埋深、流向、描述污染物的空间分布特征、污染物

的迁移过程、迁移途径、污染介质与受体的相对位置关系、受体的关键暴露途径以及未来建筑物结构特征等，并贯穿污染地块修复整个过程，动态调整及不断完善。

参考 HJ 25.4 及《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南（试行）》构建污染概念模型，必要时开展补充调查。

5.2 修复药剂筛选及投加量确定

5.2.1 药剂分类

Cr(VI)还原稳定化药剂一般包括铁系药剂（零价铁、硫酸亚铁、氯化亚铁等）、硫系药剂（多硫化钙、硫化钠、二亚硫酸钠、硫代硫酸钠、焦亚硫酸钠等）、有机和微生物药剂、复配药剂等几类。药剂作用机理及优缺点见可参考附录 A（表 6）。

5.2.2 药剂筛选

药剂筛选应综合考虑地块特征、修复效果、经济性、实施时间和环境安全等多方面因素，通过小试和中试等筛选确定最优药剂。

5.2.3 药剂投加量确定

药剂投加量计算流程：①根据药剂与 Cr(VI)的化学反应方程核算药剂消耗量；②以理论计算结果为依据，设计不同药剂投加量开展小试或中试试验，确定修复达标时药剂投加量。由于原位还原稳定化技术施工时存在药剂扩散不均匀、污染物分布空间分布差异大与以及非污染物消耗药剂等影响，通常实施时药剂投加量宜大于小试或中试确定的投加量。

5.3 修复技术施工工艺试验

5.3.1 工艺种类

铬污染地块原位还原稳定化修复技术施工工艺通常可分为原位搅拌、高压旋喷、直推注入和建井注入，各工艺对比详见附录 B。

5.3.2 工艺筛选

工艺筛选应综合考虑场地情况，结合修复目标、工期要求、现场条件、周边环境因素和预算等因素，确定适宜修复施工工艺。

5.3.3 工艺试验

5.3.3.1 试验区域的选择应符合以下规定：

（1）试验区域应选择在水文地质条件、污染分布、施工条件等具有代表性的区域，区域大小应满足试验要求，宜大于 100 m²；

（2）水文地质条件复杂、待修复区域面积大及污染程度差异大时，可选取多个区域有针对性地开展试验。

5.3.3.2 原位搅拌工艺试验应包括（但不限于）以下内容：

（1）搅拌注入点平面布置参数试验：孔距、排距、搅拌半径；

(2) 搅拌工艺试验：搅拌桩机转速、下钻速率、提升速度、防斜、控斜、纠斜、桩位偏差及桩间搭接等；

(3) 注药工艺试验：注药压力、提钻速率、注药速率、单位注药量等；

(4) 设备调试与适配：钻探、搅拌、注药、检验及计量等设备。

5.3.3.3 高压旋喷工艺试验应包括（但不限于）以下内容：

(1) 旋喷注入点平面布置参数试验：孔距、排距、影响半径（旋喷+扩散）；

(2) 钻探工艺试验：钻进、取芯、防斜、控斜、纠斜、桩位偏差及桩间搭接等；

(3) 注药工艺试验：喷射压力、下钻速率、提钻速率、旋转速度、药剂流量、单位注药量等；

(4) 设备调试与适配：钻探、旋喷、注药、检验及计量等设备。

5.3.3.4 直推注入工艺试验应包括（但不限于）以下内容：

(1) 注入点平面布置参数试验：孔距、排距、影响半径；

(2) 钻探工艺试验：钻进、防斜、控斜、纠斜、桩位偏差及桩间搭接等；

(3) 注药工艺试验：注入压力、提钻速率、药剂流量、单位注药量等；

(4) 设备调试与适配：钻探、注药、检验及计量等设备。

5.3.3.5 建井注入工艺试验应包括（但不限于）以下内容：

(1) 注入井平面布置参数试验：排距、井间距、影响半径；

(2) 建井工艺试验：钻进、建井、洗井等；

(3) 注药工艺试验：注入压力、注入时间、药剂流量、单位注药量等；

(4) 设备调试与适配：建井、注药、检验及计量等设备。

6 原位还原稳定化修复工程设计与施工

6.1 一般规定

6.1.1 原位还原稳定化设计工作应满足 HJ 2050 的要求。

6.1.2 施工前应编制施工组织设计或专项施工方案并通过审批，做好安全、技术与质量交底工作，施工人员应持证上岗。

6.1.3 施工记录应有专人负责，施工记录格式参见附录 C1 和附录 C2。

6.1.4 应根据药剂影响半径开展点位平面布置，药剂影响半径应完全覆盖整个污染区域，不留死角。

6.1.5 计算药剂用量时，按一个分区为整体计算药剂用量，折合至每一影响半径所对应圆柱体单位延米所需要药剂用量；

6.1.6 溶配药宜满足以下要求：

6.1.6.1 溶配药系统推荐采用自动化、一体化、可移动系统，具备以下基本功能：

- (1) 可准确进行固体及液体药剂计量；
- (2) 固-固、固-液及液-液药剂的高效混合；
- (3) 与搅拌设备匹配的流速及压力控制；
- (4) 与药剂性质匹配，满足耐腐蚀性、密闭性、通畅性要求。

6.1.6.2 溶配药系统还应满足环保、安全相关的国家和行业标准。

6.2 原位搅拌还原稳定化

6.2.1 工艺流程

典型原位搅拌工艺流程如图 2 所示，包括地块平整、分区及测量放线、围堰设置、设备组装及调试、溶配药及药剂输送、搅拌及加药、表面固化处理等施工工序。

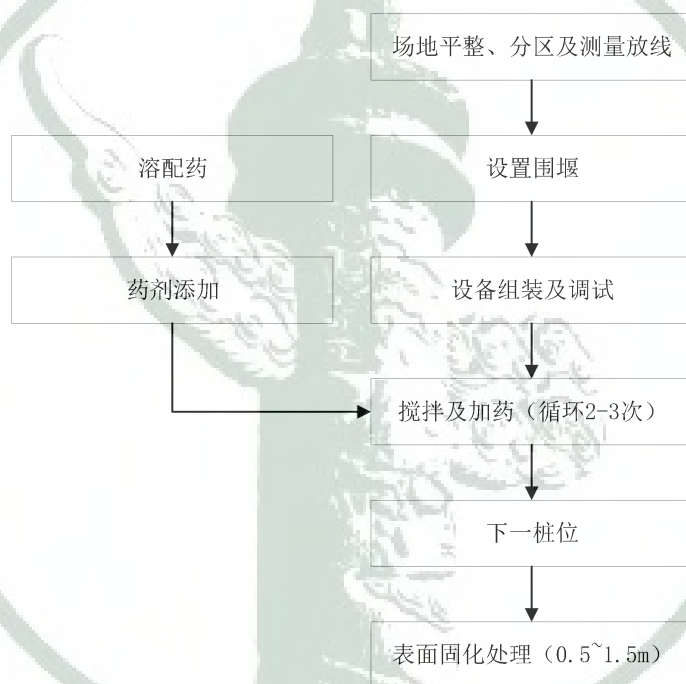


图 2 原位搅拌工艺流程

6.2.2 工艺设计要点

6.2.2.1 应根据设备成桩直径进行点位平面布置，且桩与桩之间宜搭接 10%~15%，确保污染范围搅拌充分，不留死角；

6.2.2.2 自地表开始连续搅拌，通常底部搅拌深度宜超过污染深度 0.3~0.5 m；

6.2.2.3 计算药剂用量时，被搅拌土体的体积可按搅拌桩单桩圆形截面积与深度的乘积计算；

6.2.2.4 添加溶液态、悬浮态、浆状药剂时，药剂配制浓度应根据搅拌速度、药剂流量及设计药剂投加比确定；粉末药剂通过控制药剂添加速度及桩机搅拌速度控制药剂投加比；

6.2.2.5 溶配药系统应配置计量装置及流量调节装置，计量精度及流量调节精度满足项目要求。

6.2.3 主要设备

6.2.3.1 常用的搅拌桩机包括单轴、双轴及三轴搅拌桩机，成桩直径一般包括 450 mm、550 mm、650 mm、850 mm 以及 1000 mm；

6.2.3.2 搅拌桩机应与地质条件、周边环境条件、成桩深度、桩径要求等相匹配；

6.2.3.3 桩架性能参数应与成桩深度和提升力相匹配，钻杆及搅拌叶片应满足药土充分混合的要求；

6.2.3.4 应具有主机调平控制装置、桩架立柱垂直度调整装置，桩架立柱下部搅拌轴应有定位导向装置，搅拌深度超过 20 m 时，应在搅拌轴中部位置的立柱导向架上安装移动式定位导向装置；

6.2.3.5 主卷扬机应具有无级调速功能，采用电动驱动时，应有电动机工作电流显示装置；采用液压驱动时，应有油压显示装置，或具有钢丝绳的工作拉力显示装置。

6.2.4 实施要点

6.2.4.1 为确保药剂均匀添加，搅拌桩垂直度应满足设计要求，桩机安装时起吊设备应保持平稳和导向架垂直；桩机就位时桩位对中误差不大于 20 mm，立柱导向架垂直度偏差不应大于 1/250。

6.2.4.2 药剂应按设计进行配制，并采用流量计进行计量，使用易沉淀药剂时整个搅拌注药过程溶配药装置应持续搅拌，药剂输送流速应满足在输送管道不沉淀的要求。

6.2.4.3 桩机搅拌速度及提升速度应与工艺试验确定参数保持一致，并保持匀速钻进及提升。提升时不应使孔内产生负压，对周边土体造成过大的扰动，搅拌次数和搅拌时间应保证药剂与污染土壤能够均匀混合。

6.2.4.4 施工完成后，应对药剂输送管道及钻头进行清洗，避免药剂对管道和钻头的腐蚀。

6.2.4.5 宜根据设计要求确定是否需要进行表面硬化，表面硬化宜采用水泥、膨润土或其混合物，并不得影响修复效果。

6.3 高压旋喷还原稳定化

6.3.1 工艺流程

典型高压旋喷工艺流程如图 3 所示，包括地块平整、分区及测量放线、围堰设置、设备组装及调试、溶配药及药剂输送、钻孔、试喷以及旋喷等施工工序。

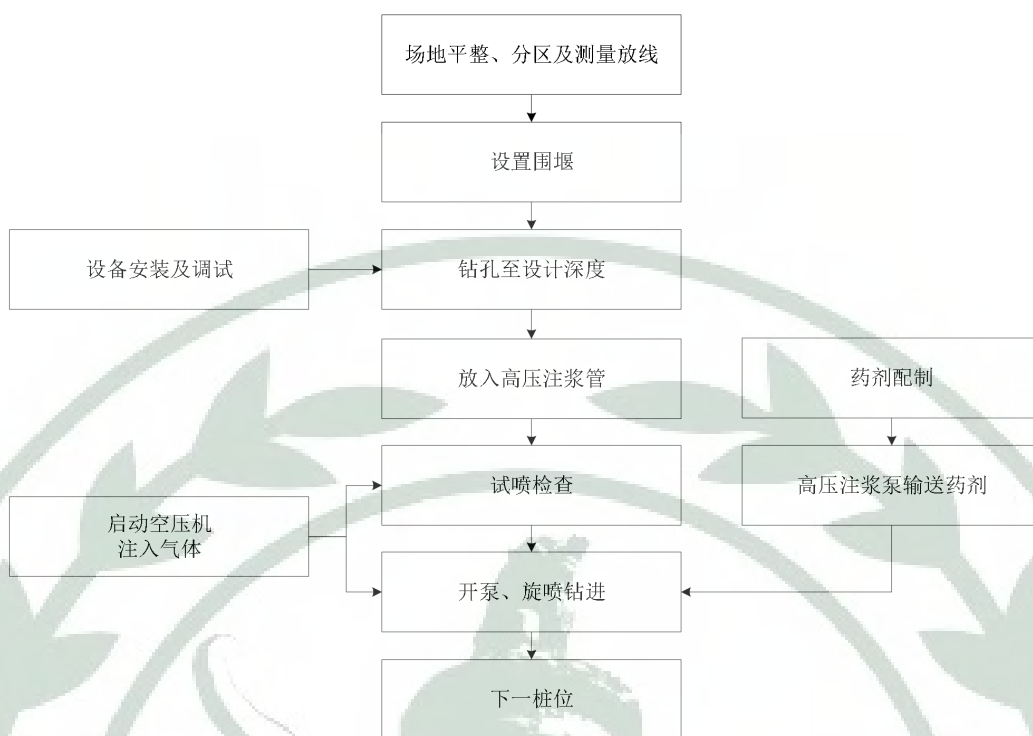


图3 高压旋喷工艺流程（二重管法）

6.3.2 工艺设计要点

6.3.2.1 药剂影响半径等于旋喷桩机成桩半径加药剂扩散距离，影响半径可通过示踪实验法、现场注浆观察法以及经验法确定，推荐采用示踪实验法确定；一般以注入点位为中心向四周采集土壤及地下水样品测定示踪剂或药剂浓度，示踪剂或药剂浓度达到注入点附近浓度的50%以上位置距注入点距离为有效影响半径。

6.3.2.2 药剂影响半径还应考虑药剂有效反应时间，应确保距离钻孔最远处药剂有足够的反应时间。

6.3.2.3 旋喷钻孔布点推荐采用正三角形法（如图4所示），其相邻注入点的影响半径之间有10%~15%左右的搭接，以保证药剂覆盖土壤和地下水污染所有范围。

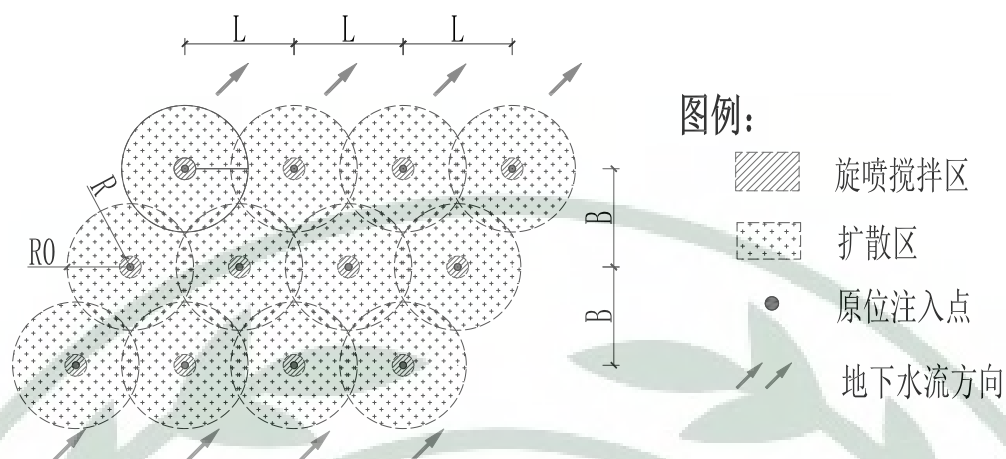


图4 高压旋喷布孔方式示意图 (L-孔距, B-排距)

6.3.2.4 高压旋喷注入布孔参数计算式如下所示:

$$L = 1.73R_0 \quad (1)$$

$$B = 1.50R_0 + B_1 \quad (2)$$

$$v = KI \quad (3)$$

$$B_1 = vt \quad (4)$$

式中:

L——孔距, 垂直地下水流向, m;

B——排距, 地下水流向, m;

R0——影响半径, m;

K——含水层渗透系数, m/d;

I——地下水水力梯度;

v——地下水流速, m/d;

t——药剂在地下水中的反应时间, d;

B1——药剂在地下水中的流动距离, m。

为方便施工, 计算后排距及孔距数值宜修正为 0.5 m 的倍数。

6.3.2.5 最大注药量计算由地层移动孔隙率决定, 移动孔隙率计算如下所示:

$$V_{inj} = \pi R_0^2 h \theta_m \times 1000 \quad (5)$$

$$\alpha = (\theta_m / \theta_1) \times 100\% \quad (6)$$

式中:

V_{inj} ——最大注药量, L/m;

R_0 ——影响半径，m；

h ——单孔延米注药段，取 $h=1$ m；

θ_1 ——总孔隙率，%；

θ_m ——移动孔隙率，由于地下水流动而获得的激活孔隙体积，%；

α ——可注性，移动孔隙率占总孔隙率的比例，%。

实际注药量与地层结构、药剂性质、药剂浓度、注入压力、旋喷速率等均有关系，宜由工艺试验确定。

当最终配制药剂体系达到最大溶解度，并以最大单孔注药量进行一次性注入仍无法满足目标修复层位药剂投加比要求时，可采用间歇式多次注入直至满足目标修复层药剂投加比要求。

6.3.2.6 自地表往下至少 0.5 m 方可喷浆，喷浆段纵向上应超出污染段 0.3~0.5 m；

6.3.3 主要设备

6.3.3.1 旋喷设备包括引孔钻机和旋喷桩机，引孔钻机可采用回转钻进、冲击钻进、射水钻进等类型钻机，地层允许时可采用钻进旋喷一体机，应确保旋喷钻头不被破坏及堵塞。

6.3.3.2 高压喷嘴应采用耐磨材料制造，其出口直径应与设计压力和流量相适应。喷嘴结构尺寸和加工精度应能满足高速射流的要求。

6.3.3.3 应在各类泵或输送管路上安装压力表，使用压力宜为压力表最大量程的 1/3~1/4。

6.3.3.4 注药泵性能应与药剂性质相匹配，具备防腐及耐磨性能，压力和流量应满足设计要求，额定压力不应小于设计压力的 1.2 倍。

6.3.3.5 空气压缩机的流量和额定压力不应小于工艺试验测定值，供气管路上宜设置气体流量测试仪表。

6.3.3.6 旋喷桩机旋转、提升单元的性能应满足设计要求，宜采用高台架的无极调速型桩机，宜采用圆形钻杆。

6.3.3.7 桩架性能参数应与成桩深度和提升力相匹配。

6.3.4 实施要点

6.3.4.1 为保证确保药剂均匀添加至地下，引孔钻机、旋喷桩机垂直度应满足设计要求，引孔钻机、桩基安装时起吊设备应保持平稳和导向架垂直；桩机就位时桩位对中误差不大于 20 mm，立柱导向架垂直度偏差不应大于 1/200。

6.3.4.2 药剂应按设计进行配制及采用流量计进行计量，使用易沉淀药剂时整个旋喷注药过程溶配药装置应持续搅拌，药剂输送流速应满足在输送管道不沉淀的要求。

6.3.4.3 在钻机就位和钻孔过程中，要随时注意校核钻杆的垂直度，发现倾斜及时纠正，以确保钻孔倾斜度在设计允许范围内；钻速要打慢档，并采用导正装置防止孔斜。

6.3.4.4 旋喷正式开始前，应进行地面系统检查及地面试喷，确保机械及管路运行正常，确定无误后方可进入下一步工序。

6.3.4.5 检查重点如表 1~表 3 所示：

表 1 供气系统检查重点

检查内容	要求
空压机	运行正常，润滑油符合要求，各种仪表正常，气压与气量满足要求。
风管、高喷杆	无破损，连接可靠，接头无漏气现象。

表 2 供药系统检查重点

检查内容	要求
溶配药单元	容积应足够，溶配药速度满足要求。
贮药单元	满足贮药、供药要求，药剂不发生沉淀及反应。
高压注药泵	无故障；流量、压力满足要求；配备备用件、易损件充足。
输药管	畅通、无破损、管径合适，连续可靠。
计量仪器	压力表、流量计等测试仪器齐备、完好。

表 3 旋喷系统检查重点

检查内容	要求
旋喷桩机	电动机转向正确；提升、制动系统正常；各种液压管路、接头无漏油现象。旋转有力、转向灵活。液压泵振动小、噪音小。
喷管	杆/管不得弯曲；药剂、气管路畅通，密封装置完好；管与管可靠连接，止退无误。
喷头风嘴、喷嘴	药剂、气管路在喷头无窜通现象；风嘴、药剂嘴光洁度高，药剂喷嘴出口直径与设计压力和流量值相适应。

- 6.3.4.6 下入或拆卸喷射管时，应采取措施防止喷嘴堵塞，宜先将喷头下至设计深度，全孔自下而上连续旋喷，旋喷完成宜进行封孔。
- 6.3.4.7 应按工艺试验确定的参数进行施工，并观察返浆及串浆情况，根据现场情况对施工参数进行调整，并如实记录实际施工参数。
- 6.3.4.8 施工完成后，应对药剂输送管道及钻头进行清洗，避免药剂对管道和钻头的腐蚀及堵塞管路。

6.4 直推注入还原稳定化

6.4.1 工艺流程

典型直推注入工艺流程如图 5 所示，包括地块平整压实及测量放线、点位定位、设备组装及调试、直推钻进、溶配药及药剂输送、药剂注入、钻杆回拔、封孔等施工工序。

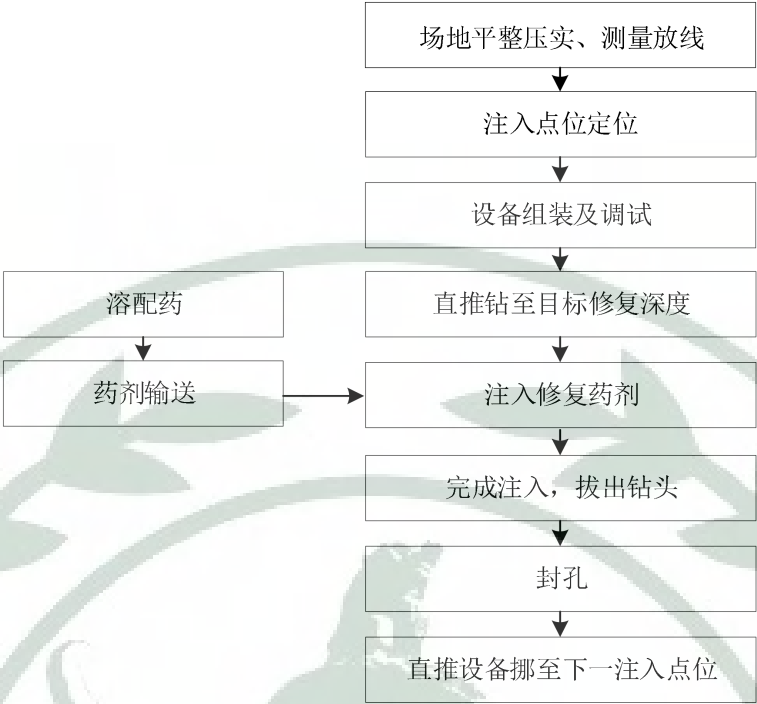


图 5 直推注入工艺流程

6.4.2 工艺设计要点

- 6.4.2.1 影响半径、最大注药量以及注药点布设可参考高压旋喷注入部分确定。
- 6.4.2.2 直推注入在目标修复层注药过程中钻杆的提升速度根据目标修复层厚度、单孔注入药剂量以及药剂输送系统的单位流量确定。
- 6.4.2.3 直推注入应钻进至修复设计深度后，再启动药剂供应系统开始注入。一般采取自下往上间歇注入或连续注入的方式，注入钻杆直径宜为 250~500 mm，间歇注入纵向注入间隔宜为 0.3~0.5 m。注入深度宜在最小污染深度和最大污染深度位置上下各延长 0.3~0.5 m。

6.4.3 主要设备

直推注入设备采用具有直推注入功能的直推式注入钻机或溶配药、钻进以及注药一体的专用设备，满足以下要求：

- (a) 直推注入设备钻进能力需满足地块污染深度要求；
- (b) 直推注入设备给进力、起拔力等能达到地块地层钻探的最小要求。

6.4.4 实施要点

- 6.4.4.1 考虑修复药剂重力下渗、污染物随药剂注入施工向下迁移扩散等因素，在最小污染深度和最大污染深度位置上下各延长 0.3~0.5 m 进行药剂注入。
- 6.4.4.2 现场实施开始前，应对直推系统、注药系统、溶配药系统进行调试和适配，包括但不限于直推系统的稳定性、注药系统的密闭性、溶配药系统计量精准性。
- 6.4.4.3 每个注入点位药剂注入完成后及时进行封孔作业，避免相邻点位注入施工时形成优先通道，使药剂无法达到有效扩散。

6.5 建井注入还原稳定化

6.5.1 工艺流程

典型建井注入工艺流程如图 6 所示，包括地块平整，测量放线、钻机就位、下钻至目标深度、注入井建设、洗井、设备调试、注入药剂等施工工序。

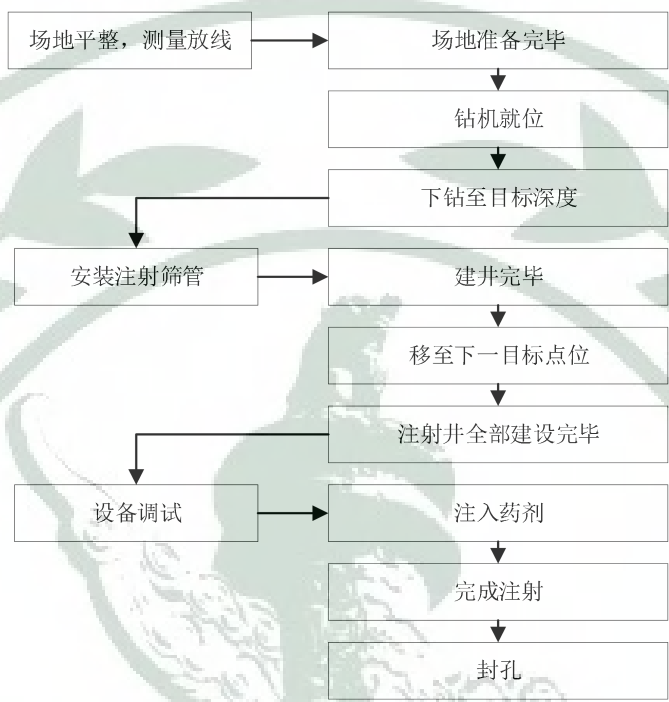


图 6 建井注入工艺流程

6.5.2 工艺设计要点

- 6.5.2.1 影响半径、最大注药量以及注药井布设可参考高压旋喷注入部分确定。
- 6.5.2.2 注入井筛管设置深度建议在最小污染深度和最大污染深度位置上下各延长 0.3~0.5 m；
- 6.5.2.3 宜采用聚氯乙烯材质作为注入井管材，石英砂宜填充至筛管以上至少 0.5 m，并选用优质止水材料填充至地表，宜采用水泥密封固井。
- 6.5.2.4 注入井筛管直径宜为 100~150 mm，为了便于药剂的注入，注入井地上部分井管宜预留至少 250 mm 井管。
- 6.5.2.5 注入井建设完毕应及时洗井，去除污染物或钻井产生的岩层破坏以及来自天然岩层的细小颗粒。

6.5.3 主要设备

6.5.3.1 建井系统

- (1) 常用的建井设备主要包括 SH-30 钻机、螺旋钻机、旋转钻机等。成孔直径有 108 mm、127 mm、146 mm、190 mm、220 mm、270 mm 和 350 mm 等。
- (2) 具体的建井设备选型需与地块条件、地质与水文地质条件、影响半径、污染深度等要求相匹

配。

6.5.3.2 注药系统

主要包括注入泵、注入管路和注入井点。

(1) 由于该工艺适用于无压以及低压注入的条件，故注入泵一般采用隔膜泵或离心泵。

(2) 根据需要可设置一个或多个，一个注入泵可以通过管道连接多个注入井点，每个注入井点分别配备流量计和压力表，用于流量和药剂输送压力的计量。

6.5.4 实施要点

6.5.4.1 注入井建设和清洗的具体操作流程应按照 HJ 164 和 HJ 25.2 执行。

6.5.4.2 正式启动注药系统前，应对药剂管路输送系统密闭性进行检查，避免漏气、漏液等导致注入压力及有效影响半径等达不到设计要求。

6.6 施工过程质量控制

6.6.1 施工单位在开工前应建立质量保证体系，包括组建质量控制机构、配备质量管理人员和仪器设备，并制定质量控制相关制度等。

6.6.2 修复药剂规格型号、有效组分含量、杂质及污染组分含量应满足设计要求，并有相应的质量证明文件，进场时按批次进行质检。

6.6.3 药剂存放环境及时间应满足药剂技术规格书及相关标准规范要求；修复药剂当天配制、当天使用，完成当天注药任务后，应用清水清洗整个溶配药及注药系统。

6.6.4 施工机械设备及溶配药系统中的计量装置应由有资质的生产厂家生产并附相应质量证明文件，应符合地块施工条件及工艺设计要求，并定期维护检查，保持良好工况；溶配药系统计量及输送计量精度应满足设计要求，药剂计量误差一般应小于 1%。

6.6.5 搅拌桩机搅拌叶片直径应每个搅拌分区检查一次，偏差应控制在 3%以内；搅拌桩机回转速度、提升速度、旋喷桩机旋喷速度及提升速度偏差应控制在 5%以内。

6.6.6 施工记录应及时、准确、完整、清晰，禁止对施工记录进行涂改。

6.6.7 原位注药质量检验标准应符合表 4 规定：

表 4 原位注药质量检验标准

序号	检查项目	允许偏差或允许值				检查数量	检查方法
		原位搅拌	高压旋喷	直推注入	建井注入		
1	注药段标高	+30~50 mm	+30~50 mm	+30~50 mm	+30~50 mm	每孔	测钻杆长度及检查筛孔位置
2	孔位偏差	≤20 mm	≤20 mm	≤20 mm	≤20 mm	每孔	钢尺量或复测中心坐标计算
3	钻孔/桩位垂直度	≤1/250	≤1/200	≤1/100	≤1/100	每孔	经纬仪测量
4	药剂浓度	设计要求	设计要求	设计要求	设计要求	每班组	药剂进场台账、溶配药记录查看及计算

序号	检查项目	允许偏差或允许值				检查数量	检查方法
		原位搅拌	高压旋喷	直推注入	建井注入		
5	注药量	设计要求	设计要求	设计要求	设计要求	每孔	施工记录查看及计算
6	流量及压力	设计要求	设计要求	设计要求	设计要求	每孔	施工记录查看及计算
7	下钻、提钻速度	设计要求	设计要求	设计要求	/	每孔	施工记录查看及计算
8	旋转速度	/	设计要求	/	/	每孔	施工记录查看及计算
9	药土混合均匀度	设计要求	设计要求	设计要求	设计要求	每个分区	取样检测药剂特征指标

6.7 环境保护及安全要求

6.7.1 施工单位在开工前应建立环境保护及安全管理保证体系，包括组建专门环境保护及安全管理机构、配备专职人员和仪器设备，并制定相关管理制度等。

6.7.2 施工前编制二次污染防治专项方案，经环境监理审批后按方案组织实施。

6.7.3 施工前做好班组三级安全教育，严格执行国家及行业相关安全生产法律、法规及安全操作规程。

6.7.4 原位搅拌、高压旋喷施工过程应做好围堰管理及维护；直推注入、建井注入应对施工过程中的返浆进行有效收集与妥善处理；修复施工过程产生的泥浆不应扩散至修复分区范围以外。

6.7.5 建设注入井过程中产生的污染土壤、地下水及泥浆等应妥善处理，防止造成二次污染。

6.7.6 高压旋喷、直推注入及建井注入应按照污染区域外侧向中心、下游至上游、轻污染区域向重污染区域的顺序进行注药，避免污染由重度区域迁移至轻度区域及未污染区域。

7 监测及效果评估

7.1 一般规定

7.1.1 在原位搅拌、高压旋喷、直推注入和建井注入施工结束后、运行期间、运行停止后，均应对土壤和地下水修复效果进行监测，便于判断修复是否有效、土壤和地下水的目标污染物是否达到修复目标。

7.1.2 经修复监测土壤和地下水的目标污染物达到修复目标后，依据 HJ 25.6 初步判断地下水中目标污染物浓度稳定达标且地下水流场达到稳定状态时，方可进入效果评估阶段。

7.1.3 经效果评估土壤中目标污染物浓度达到修复目标，但未达到 GB 36600 或地方相关标准中第一类用地筛选值的，应开展后期环境管理。

7.1.4 修复效果监测和效果评估阶段土壤和地下水的采样节点、布点数量、采样频次、评估方法等按 HJ 25.5 和 HJ 25.6 执行。

7.1.5 土壤和地下水的监测指标应根据修复方案确定，至少包括目标污染物、二次污染物、环境表征指标等，具体可参照表 5 执行。

表 5 修复效果监测和效果评估阶段土壤和地下水监测指标

药剂	目标污染物	二次污染物	环境表征指标
铁系药剂	土壤：六价铬总量，可根据地块地下水功能区划检测浸出浓度。 地下水：六价铬。	Fe ²⁺ 、Fe ³⁺ 、Fe、SO ₄ ²⁻ 以及其它药剂可能带入指标	土壤：pH值、锰含量 地下水：pH值、浊度、电导率、溶解氧、氧化还原电位等。
硫系药剂		SO ₄ ²⁻ 、硫化物	
有机和微生物药剂		根据药剂的成分，确定监测指标	
复配药剂			

7.1.6 土壤和地下水样品分析及质量控制与质量保证技术要求按照 HJ/T 166、HJ 164 有关要求执行。

7.2 修复过程监测

7.2.1 在修复施工前，应对修复区域及周边进行土壤和地下水采样监测，确定目标污染物、环境表征指标、二次污染物的初始浓度水平。

7.2.2 原位搅拌、高压旋喷、直推注入和建井注入施工结束后、运行期间、运行停止后均需对修复区及地下水流向的下游区域进行土壤和地下水样品采集和检测。

7.2.3 通过分析土壤和地下水中修复药剂、目标污染物、二次污染物、环境表征指标的浓度变化，确定药剂是否达到修复目标层、是否扩散覆盖修复范围、目标污染物是否达到修复目标、修复过程是否造成二次污染等内容。

7.2.4 原位注入系统运行期间，应密切关注注入点及周边区域药剂冒浆情况，现场快速判断药剂是否达到目标区域。

7.2.5 定期对修复区域内监测井中地下水进行持续采样和检测，确定各指标的变化趋势。尤其关注地下水中修复药剂、目标污染物及二次污染物的浓度变化情况，通过分析药剂和目标污染物的释放、迁移及反应过程，确定药剂的注入效果和覆盖范围。

7.3 效果评估监测

效果评估应考虑添加药剂对目标污染物的影响，土壤除检测六价铬总量外，可根据地块地下水功能区划检测总铬和六价铬的浸出浓度。

7.4 后期监测

7.4.1 一般通过地下水监测井进行周期性采样和监测。地下水监测井设置在原位修复区内部以及外部地下水上、下游。可利用原位修复区内符合采样条件的地下水监测井进行周期性采样和监测。

7.4.2 长期监测指标包括目标污染物和二次污染物。原则上，长期监测 1~2 年开展 1 次。根据结果可适当增加或减少监测频次、指标和监测时长。

7.5 应急处置

7.5.1 若监测结果表明目标污染物和二次污染物浓度持续升高的，应进行原因分析并采取有效的整改措施；

7.5.2 整改措施包括补充注药、采取物理阻隔、水力控制等措施降低污染物浓度及控制污染扩散。

附录 A
(资料性)
常用药剂反应机理及优缺点

药剂类别	药剂示例	反应机理	优点	缺点
铁系药剂	零价铁	$\text{CrO}_4^{2-} + \text{Fe}^0 + 8\text{H}^+ = \text{Fe}^{3+} + \text{Cr}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O}$ $(1-x)\text{Fe}^{3+} + x\text{Cr}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_{1-x}\text{Cr}_x\text{OOH} \downarrow + 3\text{H}^+$	具有长期修复效果	易氧化易团聚，成本高。
	硫酸亚铁/氯化亚铁	$\text{CrO}_4^{2-} + 3\text{Fe}^{2+} + 8\text{H}^+ = \text{Cr}^{3+} + 3\text{Fe}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O}$ $\text{Cr}^{3+} + 3\text{OH}^- = \text{Cr}(\text{OH})_3 \downarrow$ $3\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{CrO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O} = 3\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + \text{Cr}(\text{OH})_3 \downarrow + 2\text{OH}^-$	适用范围广，价格低廉	土壤酸化，会促进重金属溶出，与稳定化目标矛盾；增加环境含盐量，引起土壤盐化，土壤增容比大；不合适含有较多锰氧化物地块。
硫系药剂	硫化钠/多硫化钙	$2\text{CrO}_4^{2-} + 3\text{CaS}_5 + 10\text{H}^+ = 2\text{Cr}(\text{OH})_3 \downarrow + 15\text{S} \downarrow + 3\text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	修复效果好	修复后导致土壤pH升高，产生H ₂ S气体，对施工现场人员危害大，引入的硫化物水生态毒性大，引起土壤盐碱化。
	二亚硫酸钠/硫代硫酸钠/焦亚硫酸钠/亚硫酸氢钠	$\text{S}_2\text{O}_4^{2-} + 2\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{SO}_3^{2-} + 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{H}^+$ $6\text{H}^+ + 2\text{HCrO}_4^- + 4\text{HSO}_3^- = 2\text{Cr}^{3+} + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{S}_2\text{O}_6^{2-} + 6\text{H}_2\text{O}$	修复效果好，吸附后具有较好的稳定性	修复后导致土壤pH升高，增加土壤含盐量，引起土壤盐碱化，成本高。
有机和微生物药剂	糖蜜/腐殖酸	微生物利用碳源为电子供体，氧气为电子受体，通过降低氧气含量使氧化还原电位降低，促进Cr(VI)还原	环境友好，具有长期修复效果	还原效率低，修复时间长，缺乏工程应用案例。
	微生物菌剂	微生物将还原物质或电子受体进行转化、吸附、积累实现Cr(VI)的还原或吸附	环境友好，具有长期修复效果	修复效果受环境影响大，修复时间长，成本高，缺乏工程应用案例。
复配药剂	铁硫复配药剂/铁系缓释碳源复配药剂/硫系缓释碳源复配药剂	通过氧化、还原、沉淀、吸附、络合或生物作用等，使得Cr(VI)转化为无害或者毒性更小的物质。	修复效果好，具有长期修复效果，药剂相互作用减弱了对土壤环境的影响。	工艺较复杂

附 录 B
(资料性)
原位注入工艺对比

序号	施工方法	适用范围	优点	缺点	主要设备
1	原位搅拌	适用于污染较重，自地表连续污染的区域，地层为填土、粘性土、粉土以及砂性土等，地层异质性明显，地下无建构筑物，地表开阔，污染深度小于25m的铬污染地块的修复。	设备成熟、适用范围广，混合效果好。	成本较高，搅拌后地表形成泥浆池，泥浆外溢造成潜在二次污染风险；对地层扰动大，影响后期使用；不能实现特定深度修复；存在污染扩散稀释的可能。	溶配药系统及单轴、双轴及三轴搅拌桩机、长螺旋钻机或挖机驱动的专门搅拌头。
2	高压旋喷	适用于不同污染程度，地层为填土、粘性土、粉土以及砂性土等，地层均质性相对较好，地下无密集建构筑物，地表开阔，污染深度小于40m的铬污染地块的修复。	设备成熟、适用范围广，成本较低，可实现特定深度修复。	高压操作，安全隐患较大，返浆及串浆存在二次污染风险。	溶配药系统及单重管、双重管及三重管桩机。
3	直推注入	适用于不同污染程度的，地层为渗透性相对较好的粉土、砂土等，地层均质性相对较好，施工空间狭小，污染深度小于40m的铬污染地块的修复。	设备较为灵活、对狭小空间及地表存在建构筑物区域均有较强适应性，成本较低，地层扰动小，可实现特定深度修复。	设备较昂贵，仅适合渗透性较高地层，优先通道影响修复效果。	溶配药系统及具有直推式注入功能的钻机或溶配药、钻进以及注药一体的专门设备。
4	建井注入	适用于不同污染程度的，渗透性较好的粉土、砂土等地层，地层均质性相对较好，以及地形起伏较大、作业空间有限、地下建构筑物复杂，周边敏感目标较多的，需要二次及以上多次注入，污染深度小于50 m（分段注入）的铬污染地块的修复。	可实现固定位置多次注药，对地下及地表环境复杂地块适应性较强，地层扰动小，可实现特定深度修复。	前期建设周期较长、费用较高；井位置固定，不便调整，优先通道影响修复效果。	溶配药系统及常规建井钻机如30钻、螺旋钻、旋转钻等，以及离心泵、隔膜泵等注药泵。

附 录 C
(资料性)
施工记录表

附录C1 溶配药施工记录表

溶配药施工记录表

工程名称：
配药班组：

☐ 白班/☐ 夜班

序号	配制日期	搅拌时间		药剂用量						加水量 L	药剂浓度%或 g/L	配药体积L	备注
		开始	结束	药剂1:		药剂2:		药剂X:					
				数量	单位	数量	单位	数量	单位				
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													

记录员：

班长：

专业技术负责人：

专业监理工程师：

附录C2原位搅拌施工记录表

原位搅拌施工记录表

工程名称：

施工班组：

钻机型号：

钻机编号：

分区编号：

☐ 白班/☐ 夜班

序号	施工日期	孔位编号	地面高程	设计深度	实际深度	钻进搅拌喷药			提升搅拌喷药			泵压力 MPa	药剂参数				备注
						时间	深度	下沉速度	时间	深度	提升速度		流量	药剂浓度	总用量	延米用量	
			m	m	m	(min)	(m)	(m/min)	(min)	(m)	(m/min)		L/min	%或g/L	m³或kg	m³/m或kg/m	
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
11																	
12																	
13																	
14																	
15																	
16																	

记录员：

班长：

专业技术负责人：

专业监理工程师：

高压旋喷施工记录表

工程名称： □ 白班/□ 夜班

施工班组： 钻机型号： 钻机编号： 分区编号：

序号	施工日期	孔位编号	地面高程 m	设计深度 m	时间 时：分			深度（m）			喷射参数								药剂参数			返浆、串浆情况	备注
					起始	终止	间隔	起始	终止	旋喷长度	提升速度 cm/min	旋喷速度 r/min	水		气		药剂		药剂浓度 %或g/L	总用量 m³或kg	延米用量 m³/m或kg/m		
													压力 MPa	流量 L/min	压力 MPa	流量 L/min	压力 MPa	流量 L/min					
1																							
2																							
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9																							
10																							
11																							
12																							
13																							
14																							
15																							
16																							

记录员： 班长： 专业技术负责人： 专业监理工程师：

附录C4直推注入施工记录表

直推注入施工记录表

工程名称：

☐ 白班/☐ 夜班

施工班组：

钻机型号：

钻机编号：

序号	施工日期	孔位编号	注入段 m ~ m	提升时间（时·分）		提升速度 cm/min	注药速度 L/min	单孔注药量 m³	延米用量 m³/m或kg/m	返浆、串浆情况	备注
				开始	结束						
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											

记录员：

班长：

专业技术负责人：

专业监理工程师：

建井注入施工记录表

工程名称： ☐ 白班/☐ 夜班

施工班组： 钻机型号： 钻机编号：

序号	施工日期	井编号	开筛位置 m～m	注入段 m～m	注药速度 L/min	注药压力 Mpa	药剂浓度 %或g/L	单孔注药量 m³	延米用量 m³/m或kg/m	返浆、串浆情 况	备注
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											

记录员： 班长： 专业技术负责人： 专业监理工程师：