

# 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)

编制说明

《铬污染地块原位还原稳定化修复技术指南》编制组

2022年11月



# 目 录

<b>1 背景</b> .....	<b>1</b>
1.1 任务来源.....	1
1.2 工作分工及过程.....	1
<b>2 指南编制的必要性分析</b> .....	<b>2</b>
<b>3 国内外相关标准概况</b> .....	<b>3</b>
3.1 国外相关标准情况.....	3
3.2 国内相关标准情况.....	3
<b>4 主要技术内容及说明</b> .....	<b>5</b>
4.1 适用范围.....	5
4.2 术语和定义.....	6
4.3 基本原则.....	6
4.4 总体要求.....	7
4.5 工作流程与内容.....	7
4.6 修复技术可行性评估.....	8
4.7 原位还原稳定化修复工程设计与施工.....	16
4.8 监测及效果评估.....	27
<b>5 重大意见分歧的处理经过和依据</b> .....	<b>31</b>
<b>6 参考文献</b> .....	<b>31</b>

## 1 背景

### 1.1 任务来源

本文件任务来源于国家重点研发计划“制革类、铬化工类和电镀类地块污染土壤风险管控与修复技术（项目编号：2018YFC1802200）”项目。

### 1.2 工作分工及过程

#### 1.2.1 工作分工

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。具体工作分工如表1所示。

表1 草案分工

编制内容	负责单位
前言	北京建工修复+青岛理工
范围	北京建工修复+青岛理工
规范性引用文件	北京建工修复+青岛理工
术语和定义	北京建工修复+青岛理工
总体要求	北京建工修复+云南生态环境研究院
修复技术可行性评估	中国环科院+中科院过程所+北京建工修复
原位还原稳定化修复工程设计与施工	上海久澄环境+北京机施公司+北京建工修复+中科院过程所
监测及效果评估	深圳市环科院+中国环科院+中科院过程所
附录	北京建工修复+中科院过程所+上海久澄环境

#### 1.2.2 工作过程

本文件编制主要工作包括：文献和相关资料调研、参编单位成果收集汇总、文稿编制、专题讨论交流等。

（1）2022年2月，北京建工环境修复股份有限公司启动编制《铬污染地块原位还原稳定化修复技术指南》，组成编制组，确定由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、青岛理工大学共八家单位参与编制，北京建工修复作为牵头单位。

确定了编制组后北京建工修复编制了标准立项申请书，并通过中华环保联合会立项初审。

（2）2022年3月，调研国内外铬污染地块修复治理相关标准规范发布现状及修复技术应用状况。

基于调研结果，提炼铬污染地块修复治理及管理需求，确定指南编制方向，整理形成指南大纲和编制组各单位分工。

组内召开第一次标准编制交底会，明确各家单位分工、编制要求及时间节点要求。

（3）2022年4月，整理标准编制单位铬污染修复治理相关成果，及国内其他铬污染地块资料，

选择其中典型地块赴现场实地调研考察。

同时，基于文献和相关资料调研、项目实地考察成果，分别在实验室和典型污染地块探索标准化小试和中试方法，形成标准化流程，整理完成药剂和技术工艺核心参数，完善实施细节。

(4) 2022年6月，基于前期调研、踏勘获取的资料和数据，编制完成标准草案和编制说明初稿。

组织编组成员内部讨论，形成修订草案和编制说明。

(5) 2022年7月，中华环保联合会组织本文件立项评审会，专家组一致同意本文件立项。

(6) 2022年8-10月，根据立项评审意见，完善指南内容和编制说明，形成评审稿。

(7) 2022年11月，中华环保联合会组织本文件技术审查会，专家组一致同意本文件通过技术审查。

## 2 指南编制的必要性分析

### 2.1.1 贯彻铬污染地块管理政策法规的要求

党中央、国务院高度重视土壤污染防治工作，2016年发布了《土壤污染防治行动计划》，为我国土壤污染防治工作确定了目标，指明了方向。其中多次提到铬污染地块管理要求，包括铬化工、制革以及电镀等地块污染预防、调查评估以及修复治理等方面的内容。

生态环境部发布的《工矿用地土壤环境管理办法（试行）》（生态环境部令第3号）也明确将铬化工、制革、电镀等企业作为土壤污染重点监管单位，《污染地块土壤环境管理办法》（环境保护部令第42号）将铬化工、制革以及电镀等地块定义为疑似污染地块，《土壤污染防治法》对土壤污染重点监管单位生产期间监测及污染预防、停产后建构筑物拆除、原址地块调查评估、修复治理或风险管控提出了明确要求。

综上所述，开展铬污染地块修复治理是贯彻污染地块相关政策法规的要求，编制铬污染地块原位还原稳定化修复技术指南有利于推进铬污染地块的修复治理，更好地贯彻污染地块相关政策及法规。

### 2.1.2 铬污染地块修复治理的现实需求

全国铬渣堆场和铬盐厂关停后的铬污染地块共计60多块，此外，还有数百块制革和电镀涉铬地块。目前仅有少数几块规模较小的地块开展了治理，绝大部分地块没有开展相关的工程治理工作。

目前现行的铬污染修复技术规范有《铬渣污染治理环境保护技术规范》（HJ/T 301-2007）、《铬渣干法解毒处理处置工程技术规范》（HJ 2017-2012）、《铬渣处理处置规范》（GB/T 31852-2015）及《铬污染土壤异位修复技术指南》（T/CAEPI 37-2021）。其中，前三个规范主要适用于铬渣的解毒、综合利用和最终处置，不涉及铬污染土壤的修复治理。《铬污染土壤异位修复指南》规定了铬污染土壤异位修复的总体要求、异位修复技术要求、二次污染控制及土壤修复效果评估等内容。

随着“退二进三”、“退城进园”等政策的实施及环保要求趋严，大量铬化工、制革及电镀厂等关停，遗留下大量的含铬污染地块。调查评估结果表明，由于六价铬的迁移性极强，在进入土壤后随水扩散范围极广，铬污染地块尤其是铬化工类污染地块具有污染范围广、深度深等特点，大部分地块污染深度超过10 m。异位修复存在安全风险大、现场空间有限等问题，致使异位修复技术不具备可实施性。

因此，针对铬污染地块，原位修复是一种适宜的修复模式。现阶段国内缺乏行之有效的铬污染地块原位修复技术规范指导技术选择及实施。拟编制的《铬污染地块原位还原稳定化修复技术指南》将基于铬污染地块特点，明确原位还原稳定化技术适用范围及实施要求，聚焦于不同场景下技术的

选择、药剂的选择与用量、施工工法选择与要求，以及监测评估要求等关键点，为铬污染地块原位修复提供技术指导并规范原位修复实施过程。

### 3 国内外相关标准概况

#### 3.1 国外相关标准情况

国外发达国家在铬污染地块修复方面已开展了多年的研究和实践。针对铬污染土壤的修复制定了较为完善的技术指南。1980年，美国国会通过了《环境应对、赔偿和责任综合法案》（CERCLA），该法案批准设立污染地块管理与修复基金，即超级基金，为土壤污染修复提供了法律和财政支持。

针对铬污染土壤开发了系列原位修复技术，并应用于实际修复工程中，如2001年修复案例：《In situ chemical reduction Morses Pond Culvert, Wellesley, Massachusetts》。针对铬污染土壤的原位修复，美国环保局整理出台了相应的技术指南：

##### （1）铬污染土壤和地下水的原位处理-技术资源指南（美国环保局）

In Situ Treatment of Soil and Groundwater Contaminated with Chromium. Technical Resource Guide (U.S. Environmental Protection Agency)

该指南汇集了有关地下水和土壤中铬原位处理和控制在方法，包括地球化学固定、渗透反应墙和反应带、增强萃取、电动力学、可在渗透反应墙和反应区使用的生物修复、自然衰减和植物修复等方法。详细讨论了包括技术介绍、性能、优缺点、成本和应用案例等，使监管机构、科学家和工程师能够评估各种处理技术或这些技术组合的潜在用途，以有效地修复受铬污染的地块。

##### （2）原位化学还原技术（联邦修复技术圆桌会议）

In Situ Chemical Reduction (Federal Remediation Technologies Roundtable)

原位化学还原技术指通过铁基、硫基等材料对高氧化状态的重金属等污染物进行原地非生物转化。该文本介绍了几种已经建立并得到广泛应用的化学还原技术，包括原位化学还原和原位生物修复的联合修复技术、原位生物地球化学转化技术、原位还原处理技术等，对技术应用中土壤混合的机械设计、成本和实际应用相关因素等信息进行了介绍。

##### （3）金属污染土壤原位处理的最新进展（美国环保局）

Recent Developments for In Situ Treatment of Metal Contaminated Soils (U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office)

美国环保局固废办与应急技术创新办总结了关于受金属污染土壤的四种原位处理技术，包括电动修复、植物修复、土壤淋洗和固化/稳定化技术，以协助修复技术的选择。该报告讨论了目前正在使用或开发的不同技术，统计供应商并总结性能数据，讨论了在前期筛选潜在修复措施时应该考虑的技术属性。

#### 3.2 国内相关标准情况

近年来，国内相继出台了关于重金属铬污染处置的技术规范，主要有《铬污染土壤异位修复技术指南》（T/CAEPI 37-2021）、《铬渣污染治理环境保护技术规范》（HJ/T 301-2007）、《铬渣干法解毒处理处置工程技术规范》（HJ 2017-2012）、《铬渣处理处置规范》（GB/T 31852-2015）、《水泥中水溶性铬(VI)的限量及测定方法》（GB 31893-2015）等标准规范。这些标准对铬渣的治理技术和治理后的处置去向进行了明确的规定。但目前仍缺少对于铬污染地块原位修复的相关标准，

亟需制定针对铬污染地块原位修复技术指南。

### 3.2.1 《铬渣污染治理环境保护技术规范》（HJ/T 301-2007）

该标准主要包括铬渣解毒、铬渣综合利用、解毒后铬渣的最终处置。

铬渣的解毒包括干法解毒和湿法解毒。干法解毒要求了解毒温度、停留时间、水淬冷要求、大气污染控制限值等。湿法解毒要求了pH值应小于5、解毒废水应尽量返回工艺流程、解毒场所粉尘浓度等。

铬渣的综合利用包括用作路基材料和混凝土骨料、用于生产水泥、制砖及砌块、烧结炼铁。铬渣经过解毒、固化等预处理后，满足相关的标准后才能用作路基材料、混凝土骨料、制砖及砌块，制砖及砌块产品还需要满足相关标准要求。烧结炼铁技术和《铬渣处理处置规范》（GB/T 31852-2015）中生产铬铁合金类似。

铬渣的最终处置包括进入生活垃圾填埋场和进入第Ⅱ类一般工业固体废物填埋场两种填埋处置方式。铬渣必须首先进行解毒，解毒达到相应填埋标准后才可以进行填埋处置。

### 3.2.2 《铬渣干法解毒处理处置工程技术规范》（HJ 2017-2012）

本文件规定了铬渣干法解毒处理处置工程的总体要求、工艺设计、检测与过程控制、辅助工程、劳动安全与职业卫生、施工与环境保护验收、工程运行管理等技术要求。

（1）回转窑解毒铬渣粒度应控制在10 mm以下。立窑解毒铬渣、燃料煤及其他原料混合粉磨后粒度应控制在0.08 mm筛余≤10%。

（2）回转窑内高温区的料温应高于850℃，铬渣在回转窑内的停留时间宜控制在30-40 min。

（3）立窑内高温区的料温应高于1200℃，出窑料温宜控制在500℃，铬渣在立窑内的停留时间应大于30 min。

### 3.2.3 《铬渣处理处置规范》（GB/T 31852-2015）

本文件规定的铬渣处理处置技术方法包括无钙铬渣生产含铬合金、回转窑干法解毒、增压隔氧高温还原解毒法三种。三种技术均属于高温还原技术，具体技术原理如下：

（1）无钙铬渣生产含铬合金技术是将无钙铬渣、还原剂（焦炭、兰炭或煤）、助熔剂（硅石、石灰或萤石）等在电炉中进行高温冶炼。高温下碳被渣中氧化物部分氧化为一氧化碳，碳和一氧化碳将渣中的六价铬还原成三价铬，进而将渣中三氧化二铬、三氧化二铁还原成单质铬、铁。铬、铁相互熔融形成金属熔液。

（2）回转窑干法解毒技术是铬渣与煤炭按照一定比例混合煅烧，碳生成一氧化碳，高温下碳和一氧化碳与六价铬发生氧化还原反应，生成亚稳定状态的三价铬，经含有还原剂的水溶液水淬急冷，转变为稳定的三氧化二铬。

（3）增压隔氧高温还原解毒技术将铬渣与煤混合细磨后挤压成坯块，进入辊道窑进行高温煅烧，碳在高温缺氧条件下生成的一氧化碳与坯块中的六价铬发生氧化还原反应，将六价铬还原成亚稳定状态的三价铬，经含有还原剂的水溶液水淬急冷，转变为稳定的三氧化二铬。

### 3.2.4 《水泥中水溶性铬(VI)的限量及测定方法》（GB 31893-2015）

为有效监管利用铬渣、铬污染土壤生产的水泥产品使用过程中产生不良影响，该标准规定了水泥中水溶性六价铬的限值及相关检测方法。

标准要求，水泥中水溶性铬(VI)含量不大于10.00 mg/kg。

### 3.2.5 《铬盐污染场地处理方法》（HG/T 5541-2019）

该标准包括污染场地土壤性质分析、污染场地分布确定、污染场地土壤修复处理方法及环境保护要求，适用于铬盐污染场地建设用地土壤的化学处理方法。

污染场地的修复处理方法包括化学淋洗修复法和稳定修复法。化学淋洗法适用于土壤黏粒及粉粒占比低于25%的铬盐污染场地，处理后的污染场地中的六价铬应不高于GB 36600中规定的风险筛选值。若高于风险筛选值低于风险管制值，应对其进行风险评估。

稳定化修复法一般适用于铬盐污染场地（含矿山开采尾矿）的土壤修复。处理后的污染场地中的铬浸出毒性检测指标应符合GB 5085.3中的要求。处理后的污染场地中的六价铬应不高于GB 36600中规定的风险筛选值。

### 3.2.6 《铬污染土壤异位修复技术指南》（T/CAEPI 37—2021）

该标准规定了铬污染土壤异位修复的总体要求、异位修复技术要求、二次污染控制及土壤修复效果评估等内容，适用于铬盐厂、铬渣堆放场等的铬污染土壤异位修复。

标准梳理了铬污染土壤异位修复的常用技术，通过调查不同异位修复技术的典型示范工程，分析不同技术的适用条件、工艺流程、工艺设计要点、主要设备及修复过程的大气、废水、粉尘的二次污染控制。标准介绍了四种异位修复技术，包括高温还原稳定化、球磨酸溶湿法还原稳定化、筛分堆置养护湿法还原稳定化和土壤淋洗技术。高温还原稳定化适用于不同污染程度和各种土质的铬污染土壤。球磨酸溶湿法还原稳定化适用于六价铬浸出量占六价铬总量小于等于60%的污染土壤，这类土壤六价铬通过液相的方式难以释放，须采取球磨等强化手段。筛分堆置养护湿法还原稳定化适用于六价铬浸出量占六价铬总量大于60%的污染土壤，这类土壤中六价铬水溶态较多，可以直接将土壤和药剂混合，然后进行堆置养护还原。土壤淋洗适用于六价铬含量不大于500 mg/kg且粒径>2 mm的石砾含量超过5%的砾石土。六价铬易吸附在粉粘粒中，对于六价铬含量较低且土壤粒径较大的石砾可采用淋洗的方式治理。

### 3.2.7 《污染地下水原位注入修复技术指南》（T/GIA 002-2019）

该标准适用于污染地下水原位注入修复工程实施，主要包括场地特征数据收集阶段、原位注入可行性评估阶段和原位注入实施阶段三大部分。

污染地下水原位注入修复工作主要包括：通过污染场地调查获取场地特征参数，开展合规性、可行性评价，通过实验室试验及现场试验评估确定药剂种类、注入方法、注入浓度和体积、注入点位布设方式等工艺参数，评估修复效果，修复时间和修复成本，在有必要的情况下对选定的工艺条件进行模拟优化，开展注入系统设计；根据设定工艺方法和实施条件，建设所需基础工程，开展修复工作，监测修复数据，评估修复效果并根据需要对工艺进行改进和优化，在达到既定修复目标的前提下，停止修复工作，进行工程验收；验收后进行污染场地的持续监测，确保修复效果长期有效。

标准介绍了常用的地下水修复原位注入药剂，包括化学氧化、化学还原、生物修复药剂和吸附性药剂，提出药剂适用的筛选原则；介绍了常用的注入工艺，包括注入井注入、直推式注入和高压旋喷式注入，并比较了各注入工法的优缺点和适用性。标准在原位注入筛选评价、现场试验、系统设计、现场运行维护和监测评估提出了一系列指导性措施。

## 4 主要技术内容及说明

### 4.1 适用范围

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、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。

编制组内研究及文献调研结果表明，针对铬渣及含铬渣污染土壤，更适合采用异位修复进行治疗，原位修复更适宜处理受铬污染土壤，故本文件明确使用范围不包括铬渣及含铬渣污染土壤。电镀厂污染因子除重金属铬外还可能包括铜、锌、铅等其他重金属。制革厂使用工法种类繁多，产生的污染物不仅有铬，还包括一些有机污染物。已完成和在修复的电镀厂和制革厂案例中，铬污染的深度和程度一般弱于铬化工厂。因此，电镀厂和制革厂中铬污染可参考本文件进行修复。

若所修复的地块涉及铬且计划采用原位修复，可参考本文件内容进行修复。

## 4.2 术语和定义

本文件侧重在铬污染地块原位还原稳定化修复技术。因此，标准对原位还原稳定化技术、四种原位注入工艺、四种原位注入工艺中核心参数的延米药剂添加量、作为施工工艺设计重要参考的地块概念模型进行了定义。

本文件所给定义与现行的污染地块标准中类似定义相一致。

## 4.3 基本原则

根据《国家环境保护标准制修订工作管理办法》，编制本文件，为铬污染地块原位修复工程提供技术指导。本文件编制主要基于安全性原则、科学性原则和动态调整原则，其中安全性原则是首要原则，是制定标准指南的基础；科学性原则是指南的核心准则，各种技术细节均需遵循科学性原则；动态调整原则是考虑到目前污染地块的修复均为以月甚至以年为计的中期或长期工程，地块污染情况可能随时间推移发生变化，因此在修复方案设计、执行和效果评估过程中均需遵循地块情况的动态变化原则。

### (1) 科学性原则

铬污染原位还原稳定化修复技术应用的前提是对地块情况的充分了解，而对地块信息的了解首先是通过地块污染调查报告和风险评估报告，因此需要首先对这两份报告及附件进行深入研究。决定一个地块使用何种修复技术的核心要素是地块水文地质情况、污染分布特征、现场施工条件、修复目标、成本和工期等因素。若上述要素不齐全，则需进行一定的补充调查，了解核心要素情况。

决定一个地块使用何种修复技术的核心要素除了前期对现场资料的收集和分析，还需通过一定的试验验证该技术针对现场情况的适用性。通常这种试验至少进行两轮，一轮是在实验室进行的小试试验，确定目标可达性和部分技术参数；另一轮是在现场进行中试，一方面验证并调整小试确定的技术参数，另一方面了解技术在现场的可执行性。经过两轮试验，可基本保证技术在现场可用，但后期施工时仍需监测地块情况动态调整修复方案，以最终达到修复目标。

铬化工和铬渣堆放地块的污染物种类相对单一，主要为六价铬，但电镀厂和制革类地块的污染物种类较复杂，除六价铬外还可能存在有机污染物。针对六价铬和其他污染物的修复方法可能存在机理上或实施上的矛盾，因此需根据地块特点制定对应的修复方案。

### (2) 安全性原则

任何指南的制定均需符合国家现行法律法规、地方政策和标准的要求。

(a) 现场施工和运营应征得相关责任人和管理者的许可；

(b) 危险品的购买和存放应取得相关许可，并按标准进行存放和使用；

- (c) 废弃物的收集和排放应符合相应的法规要求；
- (d) 相关技术的使用应征得知识产权所有人的许可；
- (e) 设计施工运行人员或单位应符合相应的资质要求。

任何指南的制定均需充分考虑人员和环境安全，同时因为本文件属于环境保护领域，修复过程中不可避免地会使用具有还原性或刺激性的化学药剂。这类药剂本身具有较大的危害性，且在反应过程中可能释放出有毒气体，对人体和环境具有不同程度的潜在危害。因此，需评估人体健康及环境风险，并制定相应的保护措施和应急预案。

### (3) 动态调整原则

六价铬具有高迁移能力，因此从地块调查到修复技术实施阶段，六价铬污染情况可能已发生一定变化。因此需定期监测污染情况，及时反馈污染变化情况，动态调整修复方案，以保证最终能够达到修复目标。

## 4.4 总体要求

(1) 对于铬原位修复技术来说，仅根据地块特征的各类数据，很难对污染地块进行全面彻底的修复治理。设计和实施特定的原位修复技术，其修复效果是否达标需进行合理深入的可行性实验评估，主要包括小试和中试。修复工艺参数还应结合铬污染土壤修复的目标值确定，宜通过小试或中试对具体工艺参数进行优化调整。污染土壤修复目标值、污染边界、深度和土方量应根据地块污染调查报告和风险评估报告确定。

修复目标值需根据土壤修复后的去向用途并依据相关标准规范和前期相关报告确定。

铬原位修复技术处理后的土壤和地下水中目标污染物含量需满足修复目标值的要求。

(2) 地块内除六价铬以外如有其他污染物，六价铬污染修复技术的选择应考虑和其他污染物修复技术相协调。

(3) 铬原位修复技术的适宜性需评估人体健康及环境风险，并制定相应的保护措施和应急预案。修复过程中不可避免地会使用具有还原性或刺激性地化学药剂，虽然其本身毒性较低，但在反应过程中可能释放出有毒气体，对人体和环境存在不同程度的潜在危害。

## 4.5 工作流程与内容

初步确定采用原位还原稳定化技术后，进一步收集地块信息，精准判断原位还原稳定化技术的适用性，并设计修复方案。

具体流程为：

(1) 技术可行性评估。原位还原稳定化技术的原理是在原位将还原药剂转入目标位置的土壤中，并与土壤均匀混合，因此原位还原稳定化技术的两大核心是修复药剂和修复工法。技术可行性评估是基于地块概念模型，选择并验证修复药剂和修复工法的可行性；

(2) 修复工程设计及施工。通过可行性评估确定修复药剂和工法后，即可进入修复方案设计和施工阶段；

(3) 修复工程监测及评估。对修复工程的监测与评估贯穿整个修复过程。首先在可行性评估和方案设计阶段均需对地块情况进行监测，动态调整修复方案。在施工期、运行期和效果评估阶段仍需进行地块情况监测，严控修复过程，保证达到修复目标。在效果评估后也需要进行一定时间的情况监测，保证修复后地块可维持长期安全，无污染“反弹”问题。

## 4.6 修复技术可行性评估

### 4.6.1 地块概念模型更新

主要参考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）》构建并更新污染概念模型，必要时开展补充调查。

地块环境调查和风险评估阶段构建的地块概念模型，应在风险管控或修复的全过程中，根据资料收集、背景信息分析以及工程运行监测等获取的数据进行动态更新。地块概念模型更新包括污染源、污染物迁移途径、敏感受体特征等相关信息，涉及水文地质特征、污染源特征、污染物分布、敏感受体特征等的分析与刻画。

(1) 水文地质特征刻画所需的水文特征参数主要包括以下几方面：

(a) 包气带岩性、结构、厚度、分布及渗透性等；

(b) 含水层岩性、分布、结构、厚度、埋藏条件、渗透性、富水程度等；

(c) 隔水层岩性、厚度、渗透性等；

(d) 地下水流向、流速等；

(e) 地下水物理化学性质包括水温、地下水水位、地下水天然特征（pH、Eh和常见离子浓度等）。

除上述主要参数外，还可根据现场地层情况收集地下水补给、径排、排泄条件、年降雨量、降水入渗系数地下水年开采量，开采层位等。

地质参数特征参数包括以下几方面：

(a) 地形地貌。包括整体地貌、地面坡度、平整度等；

(b) 地层岩性。对于松散岩层，要包括岩层粒度、分选、有机碳含量等信息。对于基岩地层要包括岩石年代、类别、厚度以及所有岩石的矿物组成等；

除上述主要参数外，还可根据现场地层情况收集地质构造、岩层胶结程度、产状及结构和节理等。

(2) 污染源特征刻画应明确污染源类型，地面、地下装置/设施渗（泄）漏情况，污染源释放特征，以及特征污染物的水溶性、迁移性等。

(3) 污染物分布特征可通过前期资料收集、人员访谈、现场踏勘、污染地块调查等数据进行刻画。具体包括：(a) 污染物类型、性质、污染程度及范围；(b) 污染物分布随时间、空间的变化特征。

(4) 敏感受体识别可通过前期资料收集、人员访谈、现场踏勘、污染地块调查等获得，结合调查阶段健康风险评估结果，对污染源周边受到潜在影响的水体和居民区等进行分析确认。具体包括敏感人群、地表水、周边水源地、周边浅层地下水等敏感区域。

### 4.6.2 修复药剂筛选及投加量确定

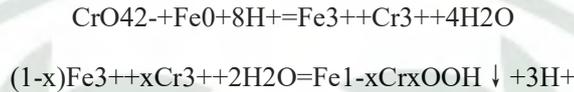
Cr(VI)原位还原稳定化技术的核心主要在两方面：(1) 修复药剂；(2) 施工工艺。本小节将主要论述修复药剂选择和评估依据，4.7小节将主要论述施工工艺选择、施工要点和评估依据。

#### 4.6.2.1 药剂分类

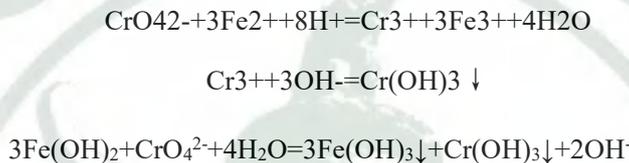
### (1) 铁系药剂

铁系药剂主要包括零价铁（纳米零价铁、普通零价铁、改性零价铁）、亚铁盐（硫酸亚铁、氯化亚铁）和铁硫系材料等。铁系药剂与Cr(VI)的反应机理主要是还原、沉淀、吸附和絮凝等作用。

零价铁可将Cr(VI)还原，形成的Cr(III)离子通过水解作用，以氢氧化物的形态结合在高价态铁离子表面，形成稳定的共沉淀。最终反应产物为Fe(III)和Cr(III)，分别以Cr(OH)<sub>3</sub>或Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeOOH、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，以及Fe(III)-Cr(III)的氢氧化物形式存在。零价铁在使用过程中具有长期还原效果，且不会增加土壤中硫酸根离子浓度，因此主要应用于土壤地下水修复可渗透反应墙（PRB）技术，适合长期修复低浓度铬污染。但零价铁颗粒不稳定且成本较高，考虑其易氧化团聚的同时需结合经济情况。反应机理如下：



亚铁可迅速将Cr(VI)还原为低毒性的Cr(III)，而Cr(III)易形成Cr(OH)<sub>3</sub>沉淀或Fe<sub>x</sub>Cr<sub>1-x</sub>(OH)<sub>3</sub>沉淀，反应机理如下：



以硫酸亚铁为代表的亚铁盐价格低廉，修复效果显著，是修复铬污染土壤常用的药剂之一。适用于修复浓度较高的铬污染地块，酸性条件下更有利于Fe(II)还原Cr(VI)。若修复低浓度铬污染地块，可适量降低投加比例。硫酸亚铁在应用过程中面临的主要问题是：含硫酸盐的还原材料使用会对后续土壤开发利用产生不利影响，过量硫酸根会严重腐蚀建筑根基，导致钙矾石的生成而造成体积膨胀等负面效应。添加硫酸亚铁修复后的土壤中铬的稳定性较差，还原后的Cr(III)不能以稳定不溶的形态存在，在使用时需考虑修复后土壤中Cr(T)浸出量是否超标。当土壤中含有较多锰氧化物时，会加速Fe<sub>x</sub>Cr<sub>1-x</sub>(OH)<sub>3</sub>溶解和Cr(VI)的生成，对于该类土壤不适合采用还原试剂进行还原稳定化修复。

铁硫系材料通常包括天然硫铁矿、黄铁矿以及合成的Fe-S材料。其作用机制需结合反应过程中产生的含硫化合物中间体而定。目前铁硫系材料在使用过程中均存在一定局限性。铬污染土壤大多呈碱性，而天然硫铁矿在中性及碱性条件下溶解度较低，难以发挥还原作用修复铬污染土壤。合成铁硫系材料尚未解决产业化和规模化应用问题。因此铁硫系材料直接应用到修复工程案例中较少。

### (2) 硫系药剂

硫元素在不同氧化条件下可呈现不同氧化状态，可分为低价硫系材料（硫化钠、多硫化钙（CPS））、中低价硫系材料（二亚硫酸钠、硫代硫酸钠、焦亚硫酸钠、亚硫酸氢钠）等。通常情况下，低价硫系材料效果优于中低价硫系材料。

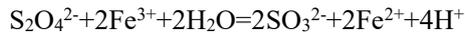
低价硫系材料中硫化钠属危险化学品，使用受到一定限制。以CPS为例，其与Cr(VI)反应生成Cr(OH)<sub>3</sub>和单质硫沉淀，可使土壤长时间范围内处于还原状态，比普通硫化物的还原更为持久。反应机理如下：



CPS广泛应用于处理各种铬污染介质，尤其在处理铬污染地下水和土壤方面非常有效。适用于修复浓度较高的铬污染地块，中性和碱性且有氧的条件下更有利于还原Cr(VI)。但在应用过程中CPS具有强碱性，导致土壤环境pH升高，在使用过程中建议配合酸性物质组分一起使用来维持土壤pH环境。在还原条件下，硫单质在微生物作用下会产生硫化氢气体，具有潜在的健康安全问题。因此在大量使用CPS时，需采取严格的防范措施，降低对工作人员及周围居民造成的影响。

中低价硫系材料以二亚硫酸钠为例，二亚硫酸钠可通过两方面来实现对Cr(VI)的还原作用：①

二亚硫酸钠可将环境中Fe(III)还原为Fe(II)，Fe(II)用于Cr(VI)的还原；②二亚硫酸钠的分解产物如SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>和S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>等，可将Cr(VI)还原为Cr(III)。反应机理如下：



中低价硫系材料对不同类型土壤均具有很好的修复效果，并且具有较好的长期稳定性，其还原效果低于CPS。在施工过程中应注意Na<sup>+</sup>的使用，若使用不当易造成土壤板结，影响土壤质地。

### (3) 生物药剂

生物药剂主要包含有机碳源药剂和微生物菌剂。

以糖蜜、腐殖酸为代表的有机碳源药剂含有丰富的还原性物质，其作用是保证反应体系的长效机制，可为微生物的生长提供碳源和微量元素。微生物在呼吸过程中利用缓释碳源作为电子供体，氧气作为电子受体，逐渐降低土壤中氧气含量，从而使氧化还原电位逐渐降低，促进Cr(VI)的还原转化。在低浓度铬污染土壤中可以单独使用，强化微生物对铬的解毒作用。在高浓度铬污染土壤中，将其与其它还原性材料混合使用，利用化学还原剂降低铬污染浓度的同时强化微生物系统修复。

微生物菌剂被认为是一种环境友好的Cr(VI)修复材料。好氧微生物主要通过细胞还原物质或还原酶对铬酸盐进行还原；厌氧微生物利用铬酸盐作为末端电子受体或利用氢化酶、还原细胞色素C将胞质间的铬酸盐还原；真核细胞主要通过还原性有机生物分子的化学转化、生物吸附、生物积累等实现Cr(VI)的还原或吸附。由于微生物在扩大生产工艺中容易失活，应用过程中面临各种环境考验，修复后产物稳定性较差，目前微生物菌剂直接应用于实际修复工程案例较少。

### (4) 复配药剂

复配药剂通常是将铁系药剂、硫系药剂、生物药剂结合使用。目前常用的是铁系药剂+硫系药剂、铁系药剂/硫系药剂+生物药剂。相比于单一药剂修复达不到修复要求，复配药剂对不同类型土壤均具有较好的修复效果，往往具有长期修复性能，可降低药剂对土壤pH的影响。

## 4.6.2.2 药剂筛选

原位修复技术在开展施工前，需进行实验室小试和现场中试，考虑注入药剂的使用效果与地块特征间关系并结合实验结果确定最优药剂。

### (1) 实验室小试

实验室小试应针对初步筛选的关键环节和关键参数制定实验方案。以目标污染地块及其地下水污染浓度为反应体系，按照不同的技术或组合试验药剂修复效果。依据试验结果确定修复药剂的种类、添加量、反应时间以及可能产生的二次污染物等技术参数。

### (2) 现场中试

现场中试应结合地块条件、地质与水文地质条件和空间分布特征等，选择具有代表性的单元开展中试。根据中试结果验证实验室小试结果，并对技术参数进行合理优化。根据修复效果、经济性、实施时间、环境安全及健康因素提出最佳方案。

## 4.6.2.3 药剂投加量确定

药剂投加过程中一方面要保证充足的投加量，另一方面要确定药剂加水量，保证注入土壤后能扩散到设定的影响半径、充满大部分土壤孔隙。

### (1) 药剂投加量

反应药剂的投加量计算有两种方式：①根据药剂与污染物的化学反应方程核算药剂消耗量，并

根据地块特征核算额外损耗；②根据小试、中试结果，通过数学方法计算药剂投加量。考虑药剂的额外损失，实际实施时建议使用量略大于小试和中试取得的药剂投加量结果

## (2) 加水量

加水量主要与地块渗透性有关。①对于渗透性强的土壤，为保证药剂注入后能迅速扩散，在保证不返浆的情况下尽量增加加水量；②对于渗透性弱的土壤，由于流动性差且施工过程易返浆，在实施过程中保证加水量能完全溶解药剂且满足施工所需水量即可。

### 4.6.3 修复技术施工工艺试验

编制组系统调研国内铬污染地块水文地质情况，最终获取30个水文地质资料较完整的场地，分布如下图所示。

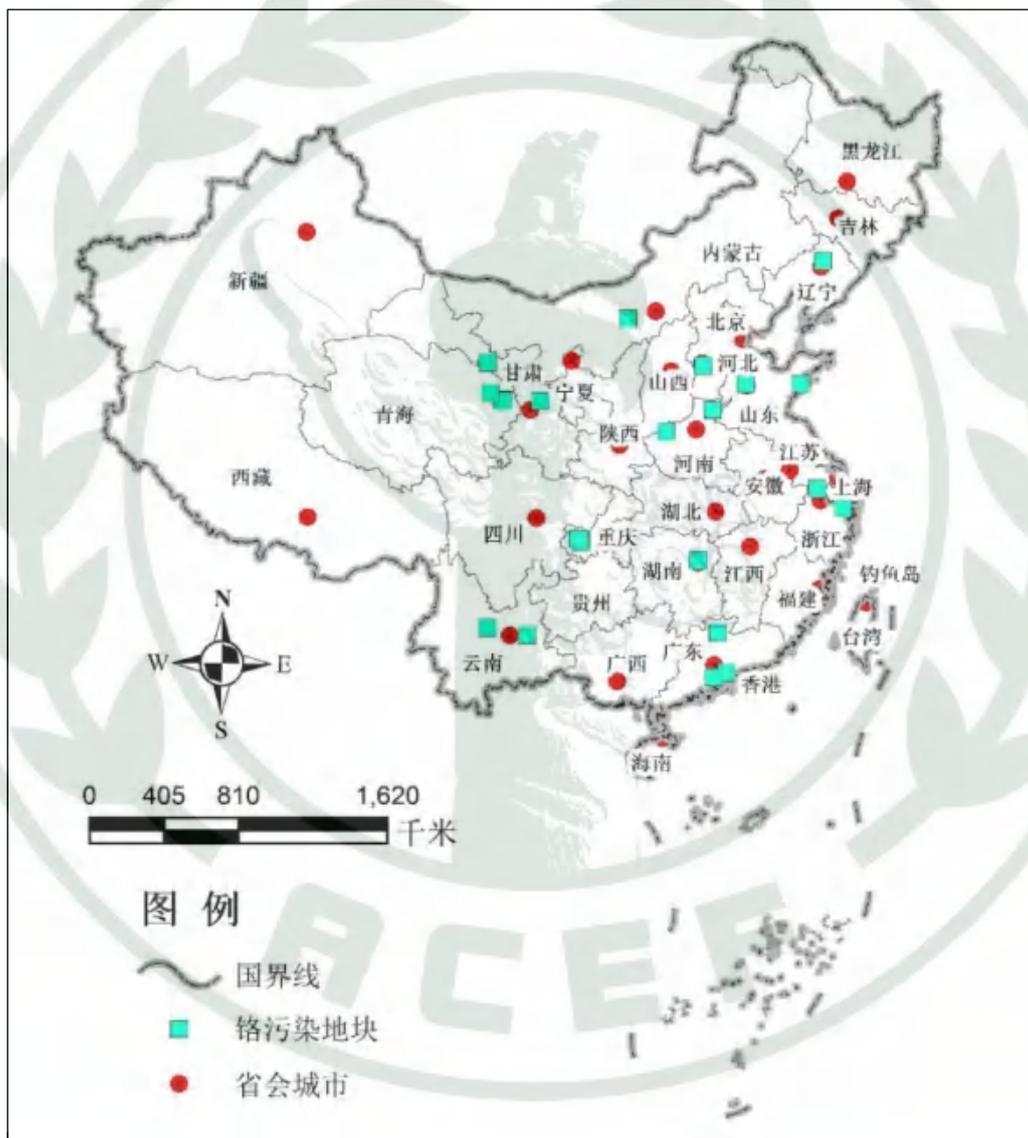


图2 铬污染地块分布图

铬污染地块地块地层分布情况如下表所示：

表2 铬污染地块地层分布情况

序号	所在地	编号	X	Y	地层分布
1	重庆市江北 区	G1	106.576271	29.595857	人工填土、砂质泥岩
2	重庆市九龙 坡区	G2	106.541822	29.497686	杂填土、泥岩、强风化带、中等风化 带、基岩顶面
3	重庆市沙坪 坝区	G3	106.336856	29.720187	素填土、粉质黏土、卵石土、泥岩和 砂岩互层夹少量泥质砂岩和砂质泥岩
4	广东省宝安 区	G4	113.8005556	22.77860556	素填土、淤泥质黏土层、基岩。
5	浙江省南太 湖新区	G5	120.149308	30.915261	杂填土、粉质粘土、淤泥质粉质黏 土、粉土、粉质粘土、粘土、粉质粘 土
6	浙江省奉化 区	G6	121.357151	29.723341	素填土、含黏性土砾砂、强风化粉砂 岩、中等风化粉砂岩
7	浙江省奉化 区	G7	121.356094	29.725875	素填土、含黏性土砾砂、强风化粉砂 岩、中等风化粉砂岩
8	浙江省奉化 区	G8	121.356183	29.725114	素填土、含黏性土砾砂、强风化粉砂 岩、中等风化粉砂岩
9	浙江省奉化 区	G9	121.353457	29.72632	素填土、含黏性土砾砂、强风化粉砂 岩、中等风化粉砂岩
10	云南省牟定 县	G10	101.5333889	25.29761111	砂地坪、素填土、粘土、泥岩夹砂质 泥岩
11	云南省陆良 县	G11	103.6077778	24.99833333	人工回填土（杂填土）、红粘土、白 云岩及假鲕粒灰岩。
12	云南省陆良 县	G12	103.6077778	24.99833333	回填土、粘土、灰岩
13	重庆市沙坪 坝区	G13	106.4628528	29.65741944	人工填土、粉质粘土、砂岩及泥岩
14	重庆市沙坪 坝	G14	106.4661667	29.65589722	人工填土、粉质粘土、砂岩、泥岩
15	广东省江门 市	G15	113.1405556	22.6025	杂填土、粉质黏土、花岗岩
16	广东省韶关 市	G16	113.5810472	24.70437778	人工填土层、粉质黏土、灰岩
17	湖南省岳麓 区	G17	112.9541667	28.26691667	杂填土、粉质粘土、粘质中粗-砾砂、 圆砾、强风化板岩、中风化板岩
18	山东省天桥 区	G18	117.023461	36.711699	杂填土、黏土，粉土、粉质黏土夹粉 土，黏土
19	山东省李沧 区	G19	120.383104	36.217863	填土、淤泥质粉质粘土、粉质粘土
20	河北省栾城 县	G20	114.5329333	37.89455	人工填土层、粉质粘土、砂土、粉质 粘土
21	河南省义马 市	G21	111.8304444	34.74805556	填土层、粉质粘土、粉质粘土、粘土 岩
22	河南省市滑 县	G22	114.7667083	35.61909722	杂填土、粉质黏土、粉土、粉砂
23	甘肃省银东 区	G23	104.1802778	36.56861111	人工杂填土层、砾砂、粉土、砂质泥 岩
24	甘肃省民乐	G24	100.7975	38.43472222	杂填土、粉质粘土、卵石、淤泥质粉

序号	所在地	编号	X	Y	地层分布
	县				质粘土、粉质粘土
25	青海省城东区	G25	101.779353	36.639168	杂填土、粉土、卵石、石英岩
26	青海省城东区	G26	101.897	36.561	层杂填土、饱和粉土、粉质粘土、卵石、泥岩
27	青海省湟中县	G27	101.8543	36.5147	杂填土、耕表土、铬渣土、粉质粘土、粉土、淤泥质粉土、卵石
28	青海省海晏县	G28	101.0375	36.90527778	黄土状土、砾砂、粉质粘土、粉砂及圆砾
29	辽宁省沈北新区	G29	123.509339	42.071525	杂填土、粉质黏土、细砂、中砂、粗砂、砾砂、粉质黏土
30	内蒙古九原区	G30	109.96799	40.602151	填土层（粉土填土、细砂填土、房渣土），粉土、粉质黏土、砂土、圆砾及卵石层，细砂、粗砂、圆砾、卵石，粉质黏土、灰色为主的粉土，粘土

由上表可知，铬污染场地中填土、粉质黏土、砂土、粉土、粘土等土质出现频率较高，故原位注入工艺选择时重点关注对于上述土质类型的适用性。

#### 4.6.3.2 工艺种类

##### (1) 原位搅拌

原位搅拌工艺通过钻杆和钻头或带搅拌头的挖掘机搅拌土壤，同时添加修复药剂，使得药剂与污染土壤充分混匀。该技术可同时实现对污染土壤的搅拌及注药，不受土壤质地影响，切削、搅拌能力强，且土壤与药剂的混合效果好。

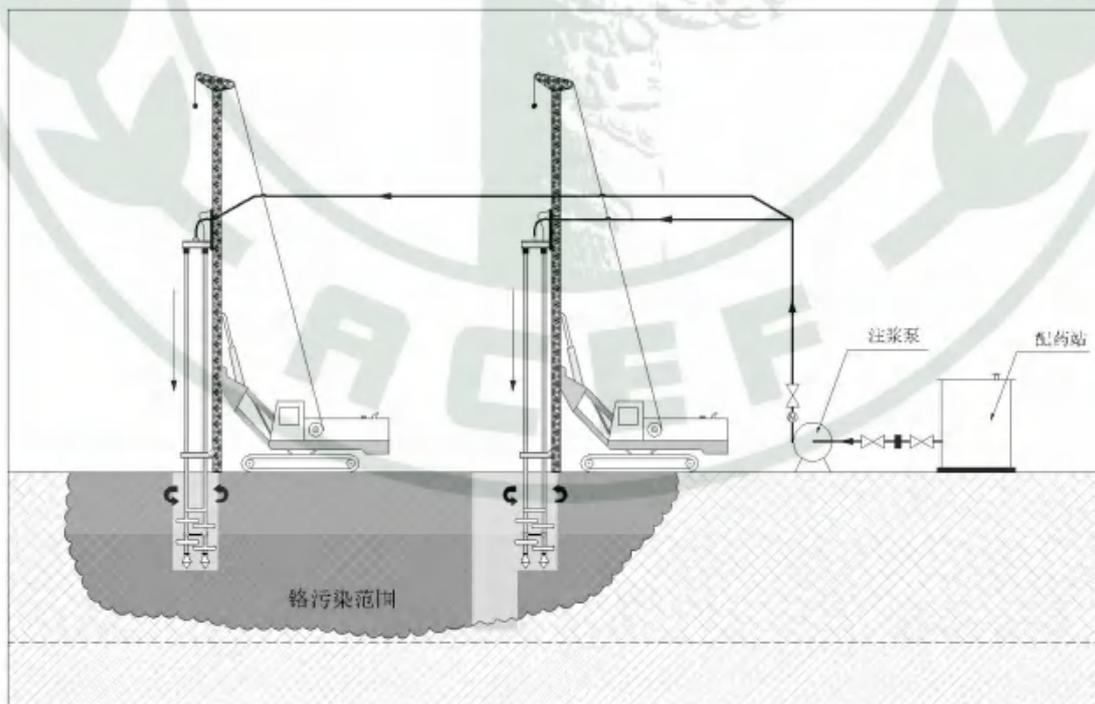


图3 原位搅拌示意图

## (2) 高压旋喷

高压旋喷工艺主要是将带有特殊喷嘴的注浆管，通过钻孔进入土层的预定深度，然后从喷嘴喷出配制好的药剂，带喷嘴的注浆管在喷射的同时向上提升，高压流体对土体进行切割搅拌，使修复药剂与污染土壤充分混合，对铬进行还原及稳定化，消除健康风险。注入完成后，药剂溶液进一步在含水层中迁移、扩散，其最终的药剂扩散半径与土壤渗透性密切相关。

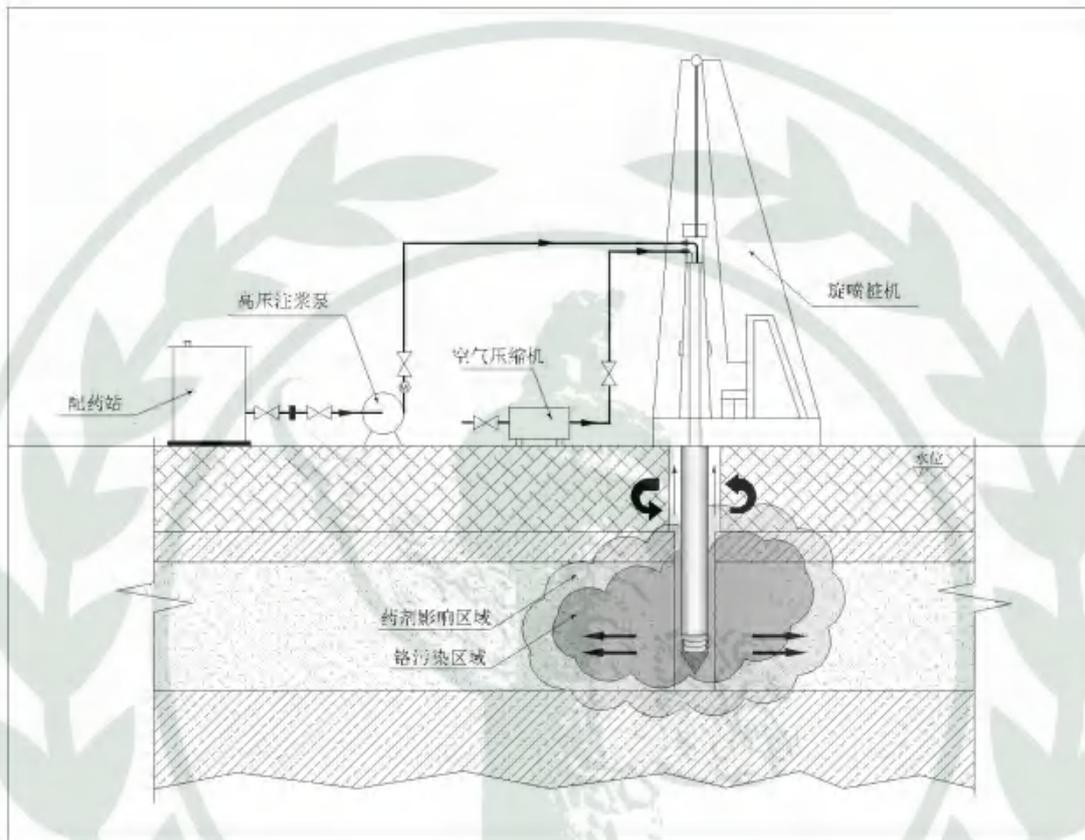


图4 高压旋喷示意图

## (3) 直推注入

直推注入工艺指首先将顶端带注入孔的注入杆直接推进至指定深度，然后将修复药剂通过注浆泵灌注到注浆管中，通过钻头四周的孔洞注入地下。

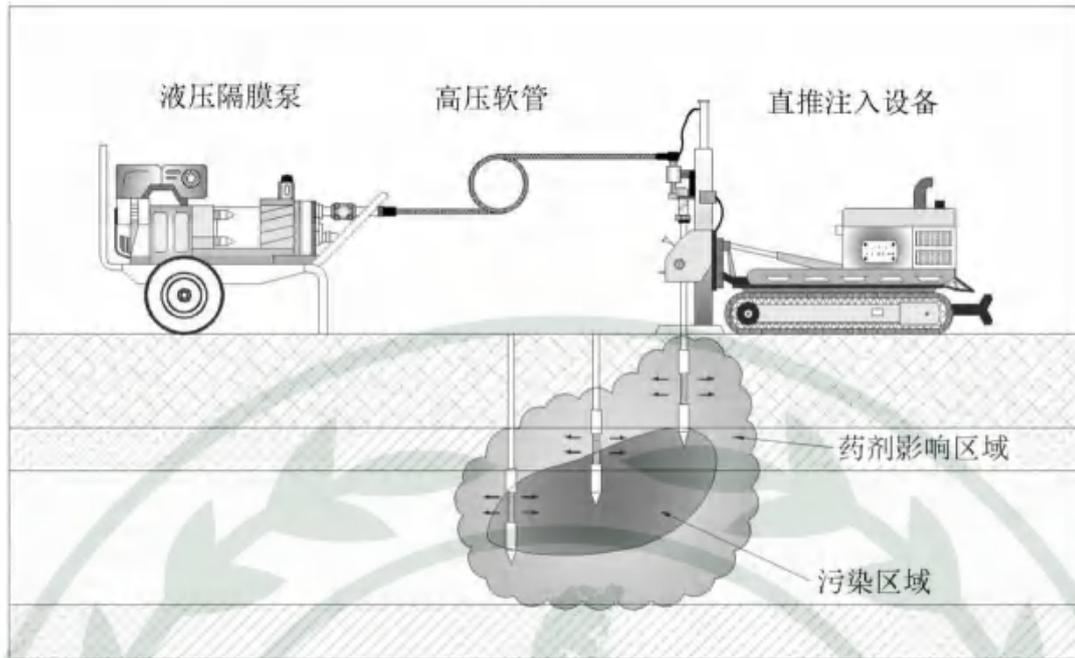


图5 直推注入示意图

#### (4) 建井注入

建井注入工艺首先在污染区域范围内建立注入井，修复药剂在常压或有压下通过注入井添加至地下，在横向和纵向的扩散作用下逐渐覆盖整个污染区域，与污染物接触反应后达到修复效果。建井注入工艺点位固定，药剂通常以自由扩散的方式进行横向以及纵向迁移。采用注入井与抽提井联用的方法，可以增加修复药剂在低渗透地区的迁移距离，以此达到更好的修复效果。

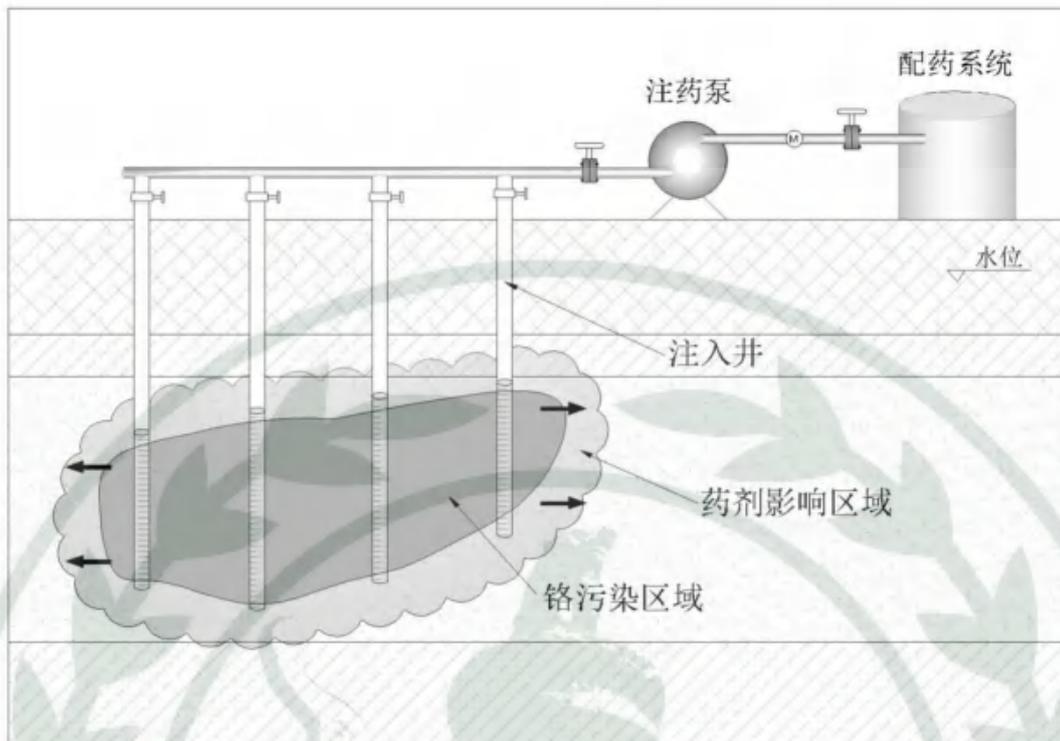


图6 建井注入示意图

#### 4.6.3.3 工艺试验

不同地块水文地质条件、污染物浓度、分布及修复目标存在较大的差异，通常原位还原稳定修复技术可行性评估阶段应开展现场工艺试验，以确定注药参数、施工工艺参数、平面参数等关键技术工艺及施工参数。

另外，考虑到工艺试验需要涉及大型设备进出场、临时水电接通等，单独开展工艺试验投入较大，故对于不具备在方案编制或设计阶段开展工艺试验的项目，可在正式施工前由施工单位开展工艺试验，在方案编制及设计阶段，可参考类似条件项目确定相关技术和施工参数。

### 4.7 原位还原稳定化修复工程设计与施工

#### 4.7.1 一般规定

原位还原稳定化的多种修复工艺，其设计主要应满足HJ 2050的要求，并基于此，根据场地实际情况，设计并实施修复工程。本小节对修复工程设计与施工中一些通用内容，如施工记录、注入半径计算、药剂用量计算、溶配药模块要求等通用内容进行规定。

#### 4.7.2 原位搅拌还原稳定化

##### 4.7.2.1 工艺流程

原位搅拌还原稳定化工艺流程如下：

典型原位搅拌工艺流程如下图所示，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。

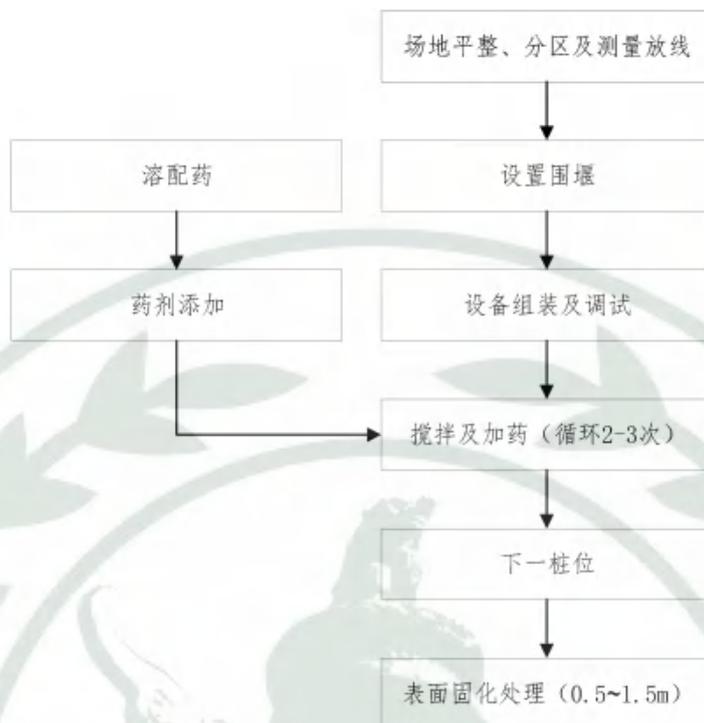


图7 原位搅拌工艺流程

#### 4.7.2.2 工艺设计要点

原位搅拌还原稳定化设计阶段关键确定药剂配制参数、注药参数、平面布置参数以及施工参数等，本部分规定确定上述参数应遵守的原则、方法及要求，具体条文如下：

6.1.3.1 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；

6.1.3.2 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；

6.1.3.3 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；

6.1.3.4 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；

6.1.3.5 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。

#### 4.7.2.3 主要设备

原位搅拌还原稳定化修复技术主要设备包括溶配药系统及搅拌桩机，其中搅拌桩机为该工艺核心设备，主要功能为将药剂与污染土壤和地下水混合均匀。

结合编制单位实施经验和文献调研，提出原位搅拌还原稳定化设备要求，具体条文如下：

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。

#### 4.7.2.4 实施要点

本部分参考DL/T 5425，结合编制单位实施经验编制，具体条文如下：

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。

### 4.7.3 高压旋喷还原稳定化

#### 4.7.3.1 工艺流程

高压旋喷还原稳定化实施流程如下：

典型高压旋喷工艺流程如下图所示，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。

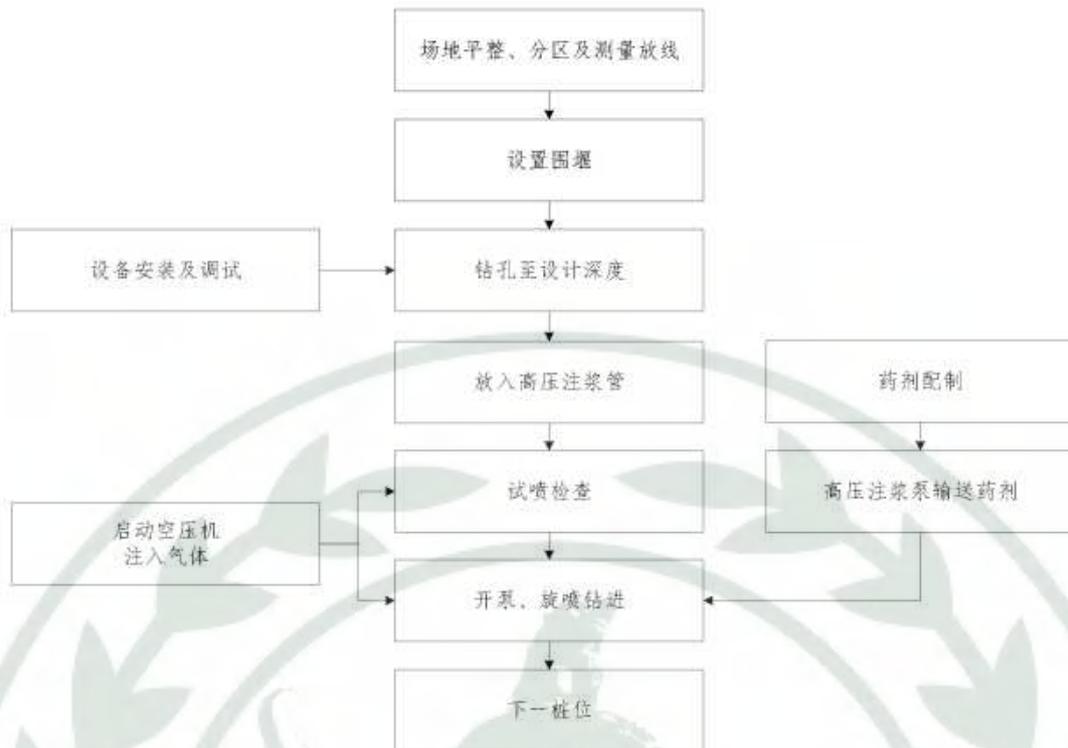


图8 高压旋喷工艺流程

#### 4.7.3.2 工艺设计要点

高压旋喷还原稳定化设计阶段关键确定药剂配制参数、注药参数、平面布置参数以及施工参数等，药剂配制参数参见原位搅拌部分，本部分规定确定高压旋喷平面布置及施工参数应遵守的原则、方法及要求，具体条文如下：

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（如下图所示），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。

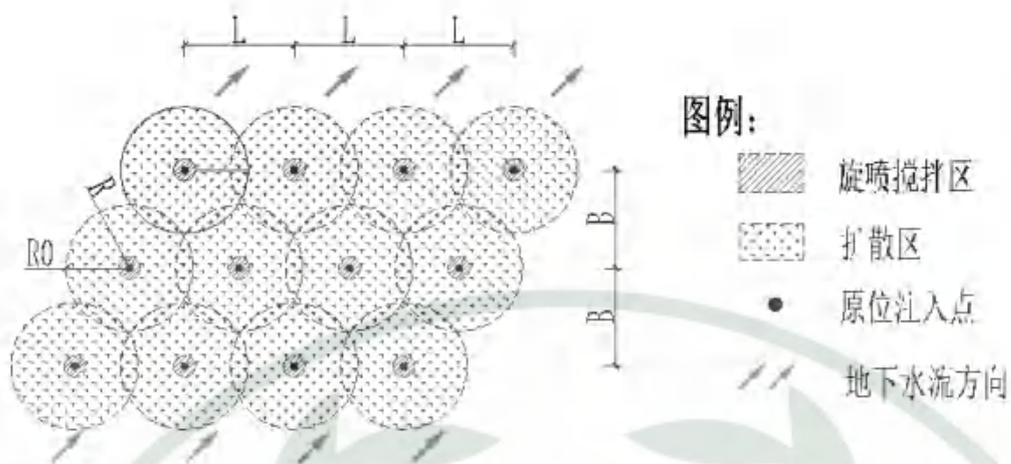


图9 高压旋喷布孔方式示意图 (L-孔距, B-排距)

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<sub>inj</sub>——最大注药量, L/m;

R0——影响半径, m;

h——单孔延米注药段，取h=1 m；

$\theta_1$ ——总孔隙率，%；

$\theta_m$ ——移动孔隙率，由于地下水流动而获得的激活孔隙体积，%；

$\alpha$ ——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；。

#### 4.7.3.3 主要设备

高压旋喷桩机喷浆压力如下表：

表3 高压旋喷桩机常用压力介绍

	项目	单管法	双管法	三管法
水	压力 (MPa)			35~40
	流量 (L/min)			70~80
	喷嘴数量 (个)			2
	喷嘴直径 (mm)			1.7~1.9
气	压力 (MPa)		0.6~0.8	0.6~0.8
	流量 (m <sup>3</sup> /min)		0.8~1.2	0.8~1.2
	气嘴数量 (个)		2或1	2
	环状间隙 (mm)		1.0~1.5	1.0~1.5
药剂	压力 (MPa)	25~40	25~40	0.2~1.0
	流量 (L/min)	70~100	70~100	60~80

对于难钻进的地层会适用液压锤击，需采用其他设备进行引孔后再进行旋喷施工。

本部分明确了高压旋喷桩机及液体注浆泵、空压机等的要求，具体条文如下：

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，地层允许时可以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。

#### 4.7.3.4 实施要点

本部分参考DL/T 5200，结合编制单位实施经验编制，具体条文如下：

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4~表6所示：

检查重点如表4~表6所示：

表4 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5 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6 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。

#### 4.7.4 直推注入还原稳定化

#### 4.7.4.1 工艺流程

直推注入还原稳定化实施流程如下：

典型直推注入工艺流程如下图所示，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。

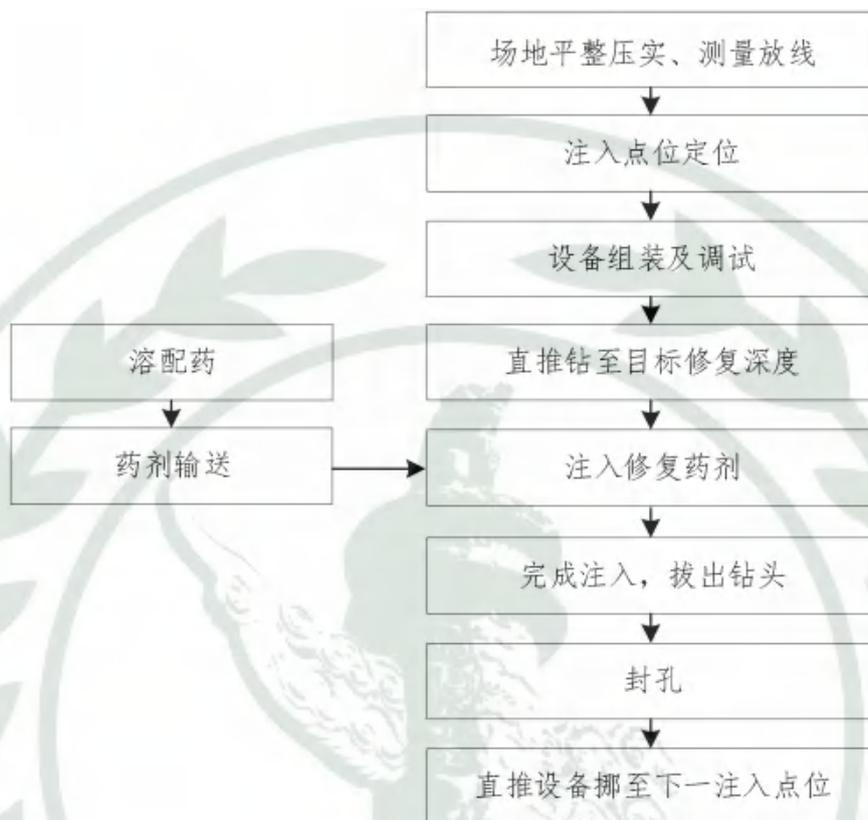


图10 直推注入工艺流程

#### 4.7.4.2 工艺设计要点

直推注入还原稳定化设计阶段关键确定药剂配制参数、注药参数、平面布置参数以及施工参数等。本部分规定确定直推注入施工参数应遵守的原则、方法及要求，具体条文如下：

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。

主要设备

直推注入还原稳定化工艺设备主要包括直推系统、溶配药系统和注药系统。

直推系统是指直推钻进系统，主要参数包括钻进能力、给进力、起拔力等，目前国内外均有专业直推注入钻机或者集成了取样、建井及注入一体化的钻机。国内已研发成功溶配药、药剂输送及药剂注入一体的直推注入设备，有少量应用示范案例。

本部分主要明确直推注入设备的功能要求，具体条文如下：

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。

#### 4.7.4.3 实施要点

本部分参考国内外直推设备使用手册，结合编制单位实施经验编制，具体条文如下：

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。

#### 4.7.5 建井注入还原稳定化

##### 4.7.5.1 工艺流程

建井注入还原稳定化实施流程如下：

典型建井注入工艺流程如下图所示，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。

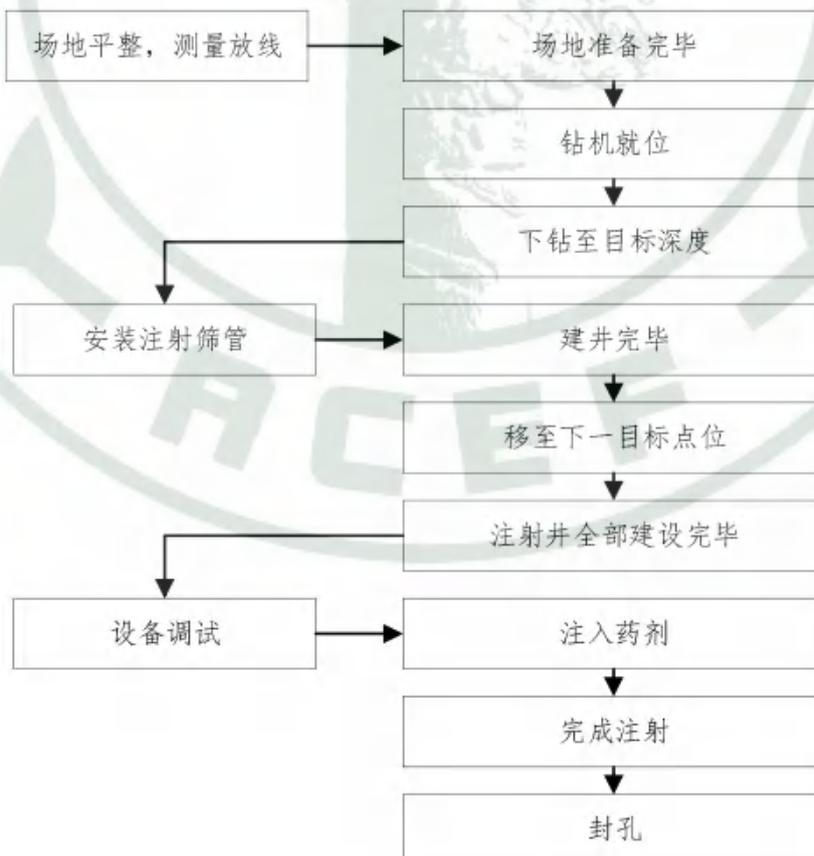


图11 建井注入工艺流程

#### 4.7.5.2 工艺设计要点

建井注入还原稳定化设计阶段关键确定药剂配制参数、注药参数、平面布置参数以及井结构、井材等。本部规定井结构及井材相关要求，具体条文如下：

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。

#### 4.7.5.3 主要设备

建井注入工艺设备主要包括井建设系统、溶配药系统和注药系统。井建设系统主要指建井设备，主要参数包括钻进能力、给进力、起拔力等，条文明确了常用的建井设备和井孔尺寸。针对建井注入采用低压或无压注入模式，条文明确了注药设备的类型及要求。

具体条文如下：

##### 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。

#### 4.7.5.4 实施要点

本部分参考HJ164，结合编制单位实施经验编制，具体条文如下：

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。

#### 4.7.6 施工过程质量控制

从人员配备、质量制度、修复药剂、施工设备、施工方法等方面明确质量控制的要求，并对关键参数设置了质量检验标准，具体条文如下：

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下表规定：

表7 原位注入质量检验标准

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	每组	药剂进场台账、溶配药记录查看及计算
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

#### 4.7.7 环境保护及安全要求

从人员保障、制度保障等对环境保护及安全提出明确要求，并针对各注入工艺特点，对各工艺二次污染控制重点提出要求，具体条文如下：

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。

#### 4.8 监测及效果评估

包括修复过程监测、效果评估监测和后期监测3个部分。

在原位搅拌、高压旋喷、直推注入施工期间及施工结束后、养护期，以及建井注入系统运行期间、运行停止后养护期，均应对土壤和地下水修复效果进行监测，便于判断药剂混合是否均匀、注入是否到位、修复效果是否有效、土壤和地下水目标污染物浓度是否达到修复目标。如存在地下水污染的地块，经修复监测土壤和地下水污染物浓度达到修复目标后，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，方可进入效果评估监测阶段。经效果评估监测，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，应开展后期环境监测。

修复效果监测和效果评估监测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。土壤和地下水的监测指标应按照修复方案确定，至少包括目标污染物、二次污染物、环境表征指标等。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、HJ 493有关要求执行。

另外，六价铬采用还原稳定化技术修复后“返黄”现象一直是业界关注的点，编制组汇总组内研究成果及调研整理其他研究者研究成果，对于“返黄”机理解释汇总如下表：

表8 “返黄”机理研究小结

序号	研究对象	研究结论	“返黄”机理解释
1	CrCl <sub>3</sub> 负载土壤	在曝气、高pH及添加碳酸钙、焦磷酸等情形下均未检测到六价铬。	自然条件下三价铬不容易转变为六价铬。
2	铬渣	在还原铬渣的碱性条件下，铬渣还原处理的典型产物Cr(OH) <sub>3</sub> 可以通过下述三个路径再氧化成Cr(VI)，分别为：(1) 被氧气氧化，(2) 被δ-MnO <sub>2</sub> 氧化，(3) 被Mn(II)催化氧化；其中路径1和路径3中Cr(III)的氧化可以持续不断地进行，而且这两个路径贡献的占比随时间推移不断增加。	铬渣还原三价铬产物在存在锰化合物时，存在转化为六价铬的现象。
3	硫酸亚铁还原后土壤	短期内四价锰、三价锰的添加均会导致硫酸亚铁还原后土壤六价铬浸出浓度升高，二价锰添加会导致硫酸亚铁还原后土壤六价铬浸出浓度降低。pH在4时三价铬被四价锰氧化的程度最高，后续随着pH升高，四价锰对三价铬氧化能力降低。	存在三价锰及四价锰时，会导致硫酸亚铁还原土壤六价铬浸出浓度升高。
4	含铬渣污染土壤（修复后）、铬渣、含铬渣污染土壤、污染土壤	现有方法消解时间较短，六价铬消解不彻底，致使检测值低于实际值，残留部分六价铬随着时间延长而溶出，导致返黄。三种含铬渣污染土壤采用新方法后六价铬检测值明显比现有方法检测值高，单独污染土壤新方法略微升高。	现有测试方法对于六价铬的检测值低于实际值，尤其是对于含铬渣的污染土壤，导致检测达标的污染土壤中残留较高的六价铬，随着时间延长而浸出，导致“返黄”现象出现。
5	添加还原剂修复后污染土壤	现有方法测试时需用碱消解预处理样品，在此过程中，土壤样中的还原组分会被Cr(VI)氧化，导致Cr(VI)的测定值低于其真实值，准确真实测定出修复后土壤的Cr(VI)是“返黄”问题的关键。开发了预氧化除残留还原剂的修复后Cr(VI)污染土壤新方法，将Cr(VI)检测新方法用于测定修复后土壤中Cr(VI)的变化，发现新方法的测定值随堆存时间变化不大，而常规方法随着堆存时间的增加，Cr(VI)测定值逐渐增大，且逐渐接近研究开发新方法。因此，新方法可以准确检测出土壤中的Cr(VI)浓度，准确地诊断铬污染场地的修复效果，从而可以预防土壤“返黄”的发生。	现有测试方法用于添加还原剂的土壤测试时，由于残留还原剂的干扰，检测值低于实际值，导致检测达标的污染土壤中残留较高的六价铬，随着时间延长而浸出，导致“返黄”现象出现。

序号	研究对象	研究结论	“返黄”机理解释
6	添加还原剂后污染土壤	当采用还原修复技术对铬污染土壤中的六价铬 (Cr(VI)) 进行还原处理时, 为保障还原效果, 还原剂用量会过量。这些过量的还原剂在修复结束时依然残留在土壤中, 对土壤Cr(VI)的检测结果可能造成不可接受的干扰将检测过程中从土壤中提取的部分或全部Cr(VI)还原, 导致检测结果出现严重负偏差 (低于真实值)。并开发了能消除不同还原剂干扰的六价铬检测新方法。	(1) 土壤Cr(VI)含量检测“返黄”的本质: 土壤中残留还原剂因淋溶以及溶解氧、微生物等的氧化作用在土壤中的含量随时间降低, 对检测的干扰相应降低, 导致土壤Cr(VI)检测结果逐渐上升接近真实值; (2) 少量易溶性Cr(VI)在还原过程中被新生沉淀物 (如: Cr(OH) <sub>3</sub> 、Fe(OH) <sub>3</sub> ) 所包覆, 未能被还原。就如同含Cr(VI)废水处理的污泥中通常含有少量Cr(VI)一样。这部分易溶性Cr(VI)在浸出实验这种相对激烈的振荡条件下可能被再次溶出但没有理论或实验证明这种浸出能力会随时间而显著增强, 导致可观察到的“返黄”现象。(3) 土壤中真实的Cr(VI)含量只会随养护时间的延长而降低或不变, 不可能回升。如果在有残留还原剂的情况下Cr(VI)都能变成Cr(III) (而且是> 1 mg · kg <sup>-1</sup> 级别的), 那么未被污染的土壤中早就有大量原生Cr(VI)了。
7	合成Cr(OH) <sub>3</sub> 及CrOOH在大气环境下在不同pH值及温度下氧化	Cr(OH) <sub>3</sub> 在pH为6.02和8.02时几乎不存在氧化为六价铬情况, 随着pH升高开始存在氧化现象, 最大氧化率约1.4%, 温度在20-80℃均不存在氧化为六价铬现象。CrOOH在6-13.5之间均存在氧化为六价铬的情况, 且氧化率随着pH升高而升高, 最大氧化率达到约11%, 随着温度升高, 氧化率也呈上升趋势。	两种形态三价铬纯物质暴露空气中存在氧化为六价铬的现象, 说明修复后土壤已可能存在三价铬再氧化现象, 尤其是在温度及pH均较高的条件下。然而, 修复后土壤环境与三价铬化合物纯物质存在较大的差异, 修复后土壤在氧化规律是否与纯物质再氧化规律一致仍需进一步研究。

由上表可知, 综合现有研究, 修复后铬污染土壤“返黄”可能机理包括: (1) 还原剂的添加干扰了六价铬的检测, 铬渣中六价铬消解不彻底, 致使现有检测方法测试值低于真实值, 未在检测值中表现的六价铬溶出而导致“返黄”现象出现; (2) 还原生成的三价铬物质在一定条件可能转换为六价铬, 比如强碱和高含锰化合物的环境中, 此中机理仍需进一步研究支持。

综合来看, 机理(1)导致“返黄”现象存在的依据更加充分。本文件编制时, 在适用范围上, 明确指南不适用于含有铬渣的污染土壤的修复治理, 对于含有高浓度锰化合物的场地, 建议地表覆盖、药剂过量系数取大值等措施避免三价铬的再氧化。另外, 增加监测频次, 及时掌握修复区域六价铬情况, 在出现“返黄”倾向时, 通过补充注药、调节pH等方式解决“返黄”问题。

本部分具体条文如下：

### 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，具体可参照下表执行。

表9 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 <sup>2+</sup> 、Fe <sup>3+</sup> 、Fe、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 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 <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、硫化物	
有机和微生物药剂		根据药剂的配方成分，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游、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。

### 5 重大意见分歧的处理经过和依据

无。

### 6 参考文献

Wilkin R. T., Su C., Ford R. G., et al. Chromium-removal processes during groundwater remediation by a zerovalent iron permeable reactive barrier[J]. Environ Sci Technol, 2005, 39(12): 4599-4605.

R. Zhang, N. Zhang, Z. Fang. In situ remediation of hexavalent chromium contaminated soil by CMC-stabilized nanoscale zero-valent iron composited with biochar[J]. Water Sci Technol, 2018, 77 : 1622-1631.

F. Fu, D.D. Dionysiou, H. Liu. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: a review, [J]. J Hazard Mater, 2014, 267 : 194-205.

S. Comba, R. Sethi. Stabilization of highly concentrated suspensions of iron nanoparticles using shear-thinning gels of xanthan gum[J]. Water Res, 2009, 43: 3717-3726.

Gröhlich, M., Langer, M., Mitrakas, A., et al. Effect of Organic Matter on Cr(VI) Removal from Groundwaters by Fe(II) Reductive Precipitation for Groundwater Treatment[J]. Water, 2017, 9 : 389.

A. B. Cundy, L. Hopkinson, R. L. Whitby. Use of iron-based technologies in contaminated land and groundwater remediation: a review[J]. Sci Total Environ, 2008, 400: 42-51.

D. Li, C. Gui, G. Ji, et al. An interpretation to Cr(VI) leaching concentration rebound phenomenon with time in ferrous-reduced Cr(VI) -bearing solid matrices[J]. J Hazard Mater, 2019, 78: 120734.

Buerge I. J., Hug S. J. Kinetics and pH dependence of chromium (VI) reduction by iron (II)[J]. Environ Sci Technol, 1997, 31(5): 1426-1432.

吴见珣, 杨远强, 和丽萍, 等. 六价铬污染场地还原修复及其稳定性研究[J]. 环境科学导刊, 2017, 36(2): 91-96.

T.T. Zhang, Q. Xue, J.S. Li, et al. Effect of ferrous sulfate dosage and soil particle size on leachability and species distribution of chromium in hexavalent chromium - contaminated soil stabilized by ferrous sulfate[J]. Environ Prog Sustain, 2018, 38: 500-507.

N. Papassiopi, F. Pinakidou, M. Katsikini, et al. A XAFS study of plain and composite iron(III) and chromium(III) hydroxides[J]. Chemosphere, 2014,111: 169-176.

C. Pan, H. Liu, J.G. Catalano, et al. Rates of Cr(VI) Generation from  $\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$  solids upon reaction with manganese oxide[J]. Environ Sci Technol, 2017, 51: 12416-12423.

M. Chrysochoou, C.P. Johnston, G. Dahal. A comparative evaluation of hexavalent chromium treatment in contaminated soil by calcium polysulfide and green-tea nanoscale zero-valent iron[J]. J Hazard Mater, 2012, 201-202: 33-42.

黄莹, 徐民民, 李书鹏, 等. 还原稳定化法修复六价铬污染土壤的中试研究[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 951-958.

卢鑫, 罗启仕, 刘馥雯, 等. 硫化物对电镀厂铬污染土壤的稳定化效果及其机理研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2315-2321.

王婉玉, 刘元元, 黄思敏, 等. 利用 CPS 还原稳定化修复 Cr (VI) 污染土壤[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3853-3860.

M. Chrysochoou, C.P. Johnston. Polysulfide speciation and reactivity in chromate-contaminated soil[J]. J Hazard Mater, 2015, 281: 87-94.

C.J. Cheng, T.H. Lin, C.P. Chen, et al. The effectiveness of ferrous iron and sodium dithionite for decreasing resin-extractable Cr(VI) in Cr(VI)-spiked alkaline soils[J]. J Hazard Mater, 2009, 164: 510-516.

李小刚, 曹靖, 李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 64-72.

Tseng J. K., Bielefeldt A. R. Low - temperature chromium (VI) biotransformation in soil with varying electron acceptors[J]. J Environ Qual, 2002, 31(6): 1831-1841.

C.Y. Lai, L. Zhong, Y. Zhang, et al. Bioreduction of Chromate in a Methane-Based Membrane Biofilm Reactor[J]. Environ Sci Technol, 2016, 50: 5832-5839.

M.A. García-Hernández, J.F. Villarreal-Chiu, M.T. Garza-González. Metallophilic fungi research: an alternative for its use in the bioremediation of hexavalent chromium[J]. Int J Environ Sci Te, 2017, 14: 2023-2038.

和利钊, 顾静, 李琼, 等. 复配还原稳定化药剂修复铬污染土壤研究[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(5):5.

刘帅霞, 陈勇, 陈亮. 两段式还原铬渣中 Cr (VI) 的试验研究[J]. 环境工程, 2013, 31: 527-617.

郭丽莉, 许超, 李书鹏, 等. 铬污染土壤的生物化学还原稳定化研究[J]. 环境工程, 2014, (10): 152-156.

李培中, 吕晓健, 王海见, 等. 某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 368-373.

王旌, 罗启仕, 张长波, 等. 铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 4036-4041.

Y. Li, A. B. Cundy, J. Feng, et al. Remediation of hexavalent chromium contamination in chromite ore processing residue by sodium dithionite and sodium phosphate addition and its mechanism[J]. J Environ Manage, 2017, 192: 100-106.

Ludwig R. D., Su C., Lee T. R., et al. In situ chemical reduction of Cr (VI) in groundwater using a combination of ferrous sulfate and sodium dithionite: a field investigation[J]. Environ Sci Technol, 2007, 41(15): 5299-5305.

S.G. Singaraj, B. Mahanty, D. Balachandran, et al. Adsorption and desorption of chromium with humic acid coated iron oxide nanoparticles[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2019, 26 : 30044-30054.

Parlayıcı Ş., Avcı A., Pehlivan E. Fabrication of novel chitosan-humic acid-graphene oxide composite to improve adsorption properties for Cr (VI)[J]. Arab J Geosci, 2019, 12(19): 1-13.

席冬冬, 李晓敏, 熊子璇, 等. 生物炭负载纳米零价铁对污染土壤中铜钴镍铬的协同去除[J]. 环境工程, 2020, 38(6): 58-66.

张峰. 污染场地原位化学药剂注入修复要点分析[J]. 环境保护科学, 2018, 44(2): 123-126.

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[J]. 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, 2019, 9.

郑伟, 梅浩, 陈敬仁. 原位化学氧化技术在地下水修复工程中的应用[J]. 资源节约与环保, 2018, 10: 23-25.

曹俊, 申源源, 张建, 等. 原位修复某大埋深六价铬污染土壤的中试研究[J]. 环境工程, 2019.

李炯, 王瑜, 周琴, 等. 环境取样钻机的关键技术及发展趋势研究[J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2019, 46(9): 81-87.

