



地下水污染防治与修复产业联盟团体标准

T/GIA 003—2017

污染地下水原位注入修复 技术指南

Technical Manual for In-situ injection remediation technology for
Contaminated groundwater

（征求意见稿）

2017- ×× - ××发布

2017- ×× - ××实施

地下水污染防治与修复产业联盟

发布

目录

前 言	III
1 适用范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 原位注入修复技术设计总体要求	5
4.1 设计原则	5
4.1.1 科学性原则	5
4.1.2 可行性原则	5
4.1.3 安全性原则	5
4.2 基本流程/技术路线	5
4.3 设计要求	7
4.3.1 场地特征数据收集阶段	7
4.3.2 原位注入可行性评估阶段	7
4.3.3 原位注入实施阶段	7
5 场地特征参数数据收集	7
5.1 地层特征参数	7
5.2 水文特征参数	8
5.3 地下水物理化学性质	8
5.4 污染物特征参数	8
5.4.1 污染源	8
5.4.2 污染物类型及特征	8
5.4.3 污染途径	9
5.4.3 污染状况	9
5.5 生物降解特征参数	9
5.6 场地周围环境敏感区域	9
6 原位修复技术可行性评估	9
6.1 法规要求	9
6.2 修复达标可行性试验	9
6.2.1 数据分析	9
6.2.2 实验室小试	9
6.2.3 现场中试	10
6.2.4 应用案例分析	10
6.3 人体健康及环境风险的可行性	10
6.3.1 人体健康的可行性	10
6.3.2 环境风险的可行性分析	10
6.4 时间可行性	11
6.5 经济可行性	11
7 注入药剂的类型及筛选	11
7.1 原位化学氧化药剂	11
7.2 原位化学还原药剂	11
7.2.1 硫化氢	11
7.2.2 连二亚硫酸钠	12
7.2.3 亚硫酸氢钠	12
7.2.4 多硫化钙	12
7.2.5 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^0$	12
7.2.6 有机质	12
7.3 原位生物修复药剂	13
7.4 注入药剂的筛选	14
8 注入工艺的类型及筛选	16
8.1 原位注入井注入	16

8.2 原位直推式注入	16
8.3 高压旋喷式注入	17
8.4 原位注入工法的筛选	18
9 原位注入修复可行性试验	20
9.1 注入药剂的实验室试验	20
9.1.1 实验参数	20
9.1.2 实验研究反应药剂参数	20
9.1.3 实验研究注入参数	20
9.1.4 实验设计	20
9.2 注入药剂的现场实验	20
9.3 污染物分解效果评价	21
9.4 反应药剂的剂量计算	22
10 原位注入系统设计	22
10.1 原位注入井系统设计	22
10.1.1 系统组成	22
10.1.2 技术应用基础和前期准备	22
10.1.3 关键技术参数	23
10.1.4 注入井设计	24
10.1.5 基础工程	25
10.2 原位直推式注入系统设计	27
10.2.1 系统组成	27
10.2.3 技术应用基础和前期准备	28
10.2.4 关键技术参数	28
10.2.5 设备选型	29
10.3 高压旋喷式注入	30
10.3.1 系统组成	30
10.3.2 高压旋喷工艺参数	33
10.3.3 高压旋喷原位注入系统常见的问题及解决办法	35
11 原位修复系统的现场安装调试运行及维护	35
11.1 电气系统工程技术要求	35
11.2 设备调试	35
11.2.1 设备调试的目的	35
11.2.2 设备调试	35
11.3 系统运行	36
11.4 系统运行操作、维护及监测	36
11.4.1 供电系统	37
11.4.2 设备的维修保养	37
12 系统运行效果监测及评估	37
12.1 系统运行期间的修复效果评价	37
12.2 系统停止运行	38
12.3 整体修复效果评估	38
13 建设规模与投资估算标准（德瑞森科）	38
附录 A 典型案例	40
附录 A.1 典型案例一（宝航）	40
附录 A.2. 某铬渣堆场污染地下水原位注入修复项目	57
附录 B 参考文献	59

前 言

为贯彻实施《中华人民共和国环境保护法》，防治土壤与地下水污染，改善环境质量，保障人体健康，规范原位注入修复的系统设计、实施与效果评估工作，制定本标准。

本指南规定了实施污染地下水原位注入修复的工作程序、主要内容、要求、注意事项等，主要包括场地特征数据收集阶段、原地注入可行性评估阶段和原地注入实施阶段三部分。

本指南由永清环保股份有限公司组织制订。

本指南主要起草单位：永清环保股份有限公司、轻工业环境保护研究所、中国地质科学院水文地质环境地质研究所、北京高能时代环境技术股份有限公司、北京德瑞科森环保科技有限公司、宝航环境修复有限公司

本指南环境保护部 201×年×月××日批准。

本指南自 201×年×月××日起实施。

本指南由环境保护部解释。

污染地下水原位注入修复技术指南

1 适用范围

本指南规定了污染地下水原位注入修复的基本要求、程序、内容和技术要求。

本指南适用于污染地下水进行原位注入修复注入介质与工法的选择、可行性评估、注入系统设计、安装调试、运行维护、效果监测与评估等。

2 规范性引用文件

本指南内容引用了以下文件中的条款。凡是不注明日期的引用文件，其有效版本适用于本指南。

GB 3838-2002 地表水环境质量标准

GB15618-1995 土壤环境质量标准

GB 8978-2002 污水综合排放标准

GB/T 50123-1999 土工试验方法标准

HJ 682—2014 污染场地术语

HJ/T 166-2004 土壤环境监测技术规范

HJ 25.1—2014 场地环境调查技术导则

HJ 25.2—2014 场地环境监测技术导则

HJ 25.3—2014 污染场地风险评估技术导则

HJ/T 164-2004 地下水环境监测技术规范

HJ 610-2016 环境影响评价导则-地下水环境

B50021 岩土工程勘察规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本指南。

3.1

地下水 groundwater

以各种形式埋藏在地壳空隙中的水，含包气带和饱和带中的水。

3.2

污染地下水 contaminated groundwater

任何水质超过《地下水水质标准（DZ/T 0290-2015）》的地下水。

3.3

关注污染物 contaminant of concern

根据场地污染特征和场地利益相关方意见，确定需要进行调查和风险评估的污染物。

3.4

目标污染物 target contaminant

在场地环境中其数量或浓度已达到对生态系统和人体健康具有实际或潜在不利影响的,需要进行修复的关注污染物。

3.5

挥发性有机化合物 volatile organic compounds, VOCs

沸点在 50~260°C之间,在标准温度和压力(20°C和 1 个大气压)下饱和蒸气压超过 133.32Pa 的有机化合物。

3.6

半挥发性有机化合物 semi-volatile organic compounds, SVOCs

沸点在 260~400°C之间,在标准温度和压力(20°C和 1 个大气压)下饱和蒸气压超过 $1.33 \times 10^{-6} \sim 133.32 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 的有机化合物。

3.7

非水相液体 non-aqueous phase liquid, NAPL

不能与水互相混溶的液态物质,通常是几种不同化学物质(溶剂)的混合物,又称非水溶相液体。

3.8

高密度非水相液体 dense non-aqueous phase liquid, DNAPL

比重大于 1.0 的非水相液体,如三氯乙烯(TCE)、三氯乙烷(TCA)、四氯乙烯(PCE)等。

3.9

低密度非水相液体 light non-aqueous phase liquid, LNAPL

比重小于 1.0 的非水相液体,如汽油、柴油等烃类油品物质。

3.10

地层结构 stratigraphic structure

岩层或土层的成因、形成的年代、名称、岩性、颜色、主要矿物成分、结构和构造、地层的厚度及其变化、沉积顺序等。

3.11

水文地质条件 hydrogeological condition

地下水埋藏、分布、补给、径流和排泄条件,水质和水量及其地质条件等的总称。

3.12

地下水埋深 buried depth of ground table

从地表到地下水潜水面或承压水面的垂直深度

3.13

地下水污染羽 groundwater plume

污染随地下水移动从污染源向周边移动和扩散时所形成的污染区域。

3.14

水力梯度 hydraulic gradient

延渗透途径水头损失与相应渗透途径长度的比值。

3.15

渗透系数 permeability coefficient

饱和土壤中，在单位水压梯度下，水分通过垂直于水流方向的单位截面的速度。

3.16

潜水层 unconfined aquifer layer; phreatic stratum

地表以下第一个稳定水层，有自由水面，以上没有连续的隔水层，不承压或仅局部承压。

3.17

含水层 aquifer

能够透过并给出相当数量水的岩层。

3.18

隔水层 impermeable bed, aquifuge

透水而不饱水的岩层。

3.19

非饱和带 unsaturated zone

又称包气带 (vadose zone; aeration zone)，是指地表面与地下水面之间与大气相通的，含有气体的地带。

3.20

饱水带 saturated zone

地下水面以下，土层或岩层的空隙全部被水充满的地带。

3.21

潜水 phreatic zone

地表以下第一个稳定隔水层以上具有自由水面的地下水。

3.22

承压水 confined water; artesian water

充满于上下两个隔水层之间的地下水，其承受压力大于大气压力。

3.23

场地特征参数 site-specific parameter

能代表或近似反映场地现实环境条件，用来描述场地土壤、水文地质、气象等特征的参数。

3.24

原位修复 in-situ remediation

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

3.25

修复可行性研究 feasibility study for remediation

从技术、条件、成本效益等方面对可供选择的修复技术进行评估和论证，提出技术可行、经济可行的修复方案。

3.26

修复系统运行与维护 operation and maintenance of remediation system

对长期运行的修复系统进行定期的监控、检查、保养和维护，以确保修复工程的稳定与运行效果。

3.27

原位注入修复 in-situ injection remediation

在不移动修复目标情况下，借用一定的设备将空气、化学药剂、生物菌种等物质注入到地下水或土壤中，降低污染物质的迁移性，使污染物毒性降低或变成无毒性。

3.28

化学氧化 chemical oxidation

利用氧化剂本身氧化能力或所产生的自由基的氧化能力氧化土壤或地下水中的污染物，使得污染物转变为无害的或毒性更小的物质，从而达到修复的目的。

3.29

化学还原 chemical reduction

利用还原剂本身氧化能力或所产生的自由基的还原能力氧化土壤或地下水中的污染物，使得污染物转变为无害的或毒性更小的物质，从而达到修复的目的。

3.30

原位注入井注入 in situ injection

原位注入井注入是通过固定井向目标地下水污染区域注入药剂,使得药剂在地下扩散并与地下水中污染物接触,通过氧化、还原或生物作用,使地下水中的污染物转化为无毒或对周边环境或人体毒性较小的物质。

3.31

直推式注入 in situ direct push injection

原位直推式注入是指将药剂以一定压力通过注射管道注入污染土壤中。

3.32

高压旋喷注入 high pressure jet grouting

以高压旋转的喷嘴将需要注入土壤中的物质喷入土层与土体混合,形成连续搭接的修复区域。

3.33

影响半径 radius of influence

指注入药剂向周边扩散后在平面上投影的半径。影响半径的大小与含水层的透水性、抽水延续时间、水位降深等因素有关。

4 原位注入修复技术设计总体要求

4.1 设计原则

4.1.1 科学性原则

采用科学的方法,综合考虑污染地下水所在场地的水文地质特性、修复目标、注入药剂、注入方法、修复时间、处理效果、修复成本和修复工程的环境影响等因素,进行技术可行性评估,制定修复方案。

4.1.2 可行性原则

制定的污染地下水原位注入修复方案要合理可行,要在前期工作的基础上,针对污染地下水中污染物的性质、污染程度、范围以及对人体健康和生态环境造成的危害,评估原位注入修复技术的可行性。若评估结果为可行,合理选择注入药剂、注入方法,进行系统设计,因地制宜制定修复方案,使修复目标可达,修复工程切实可行。

4.1.3 安全性原则

制定污染地下水原位注入修复方案要确保污染地下水修复工程实施安全,防止对施工人员、周边人群健康以及生态环境产生危害和二次污染。

4.2 基本流程/技术路线

污染地下水原位注入修复的工作流程如图 1 所示。

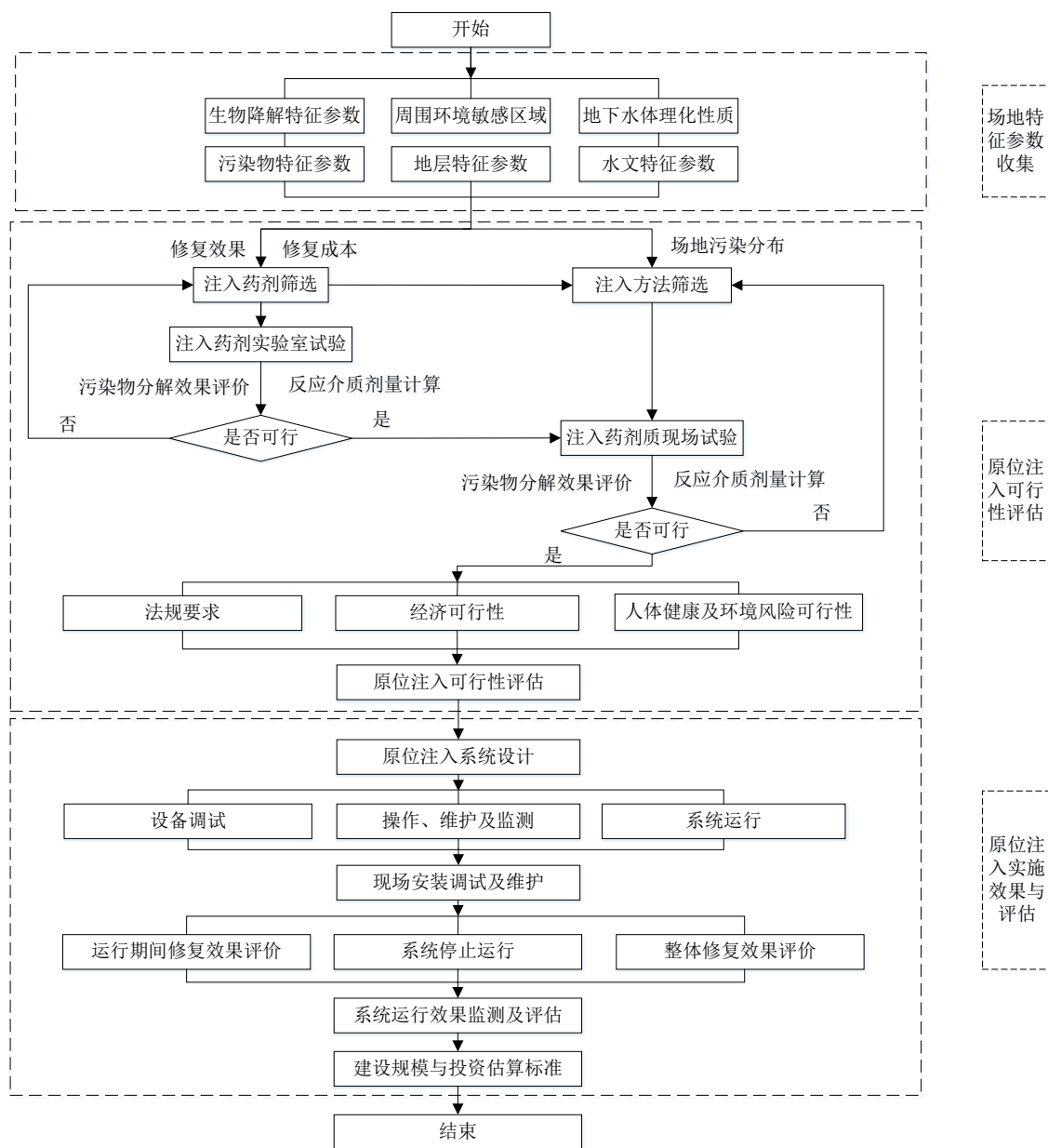


图 1 污染地下水原位注入修复工作流程

4.3 设计要求

4.3.1 场地特征数据收集阶段

场地特征数据收集的工作内容需要调查：

- a) 水文地质特征参数；
- b) 地下水理化性质；
- c) 污染物特征参数；
- d) 所在场地生物降解特征参数；
- e) 明确场地周围环境敏感区域。

调查方式包括收集资料、现场踏勘、人员访谈、水文地质勘探与分析、初步采样监测等。

若通过资料收集、现场踏勘和人员访谈无法确定整个场地范围内的特征数据，需进行必要的水文地质勘探与分析。水文地质勘探与分析包括制定勘探计划、实施现场勘探、正确记录钻孔信息、采集地下水水样、生物培养、实验室分析测试、数据分析、水文地质勘探资料整理等步骤，明确场地内水文地质特征参数、地下水性质、污染物特征。

4.3.2 原位注入可行性评估阶段

原位注入可行性评估包括法规要求符合性评估、经济可行性评估、人体健康及环境风险评估以及修复达标可行性实验。其中修复达标可行性实验包括实验室试验与现场试验。

- a) **实验室试验：**根据前期场地调查收集的场地特征、污染物情况、水文地质状况，结合修复效果和修复成本筛选注入药剂、开展实验室试验，分析污染物分解效果评估、计算反应介质剂量，若分析结果证明药剂可行，进行下一步现场试验；若分析结果不可行，重新筛选药剂；
- b) **场地试验：**根据药剂特性、场地条件、水文地质状况以及污染分布情况，筛选注入方法。开展现场试验，分析污染物分解效果评估、计算反应介质剂量。若分析结果可行，进行下一步可行性评估；若分析结果不可行，重新筛选注入方法。

4.3.3 原位注入实施阶段

4.3.3.1 原位注入系统设计

根据修复目标可行性评估阶段确定的注入方法，地下水理化性质、污染物特征以及地层结构特点，进行注入工艺设计/选择、确定监测井布置、计算注入流量/压力，计算影响圈半径、现场监测系统设计等原位系统设计。

4.3.3.2 现场安装调试及维护

根据设计结果完成设备调试、系统运行、操作维护及监测。

4.3.3.3 系统运行效果监测及评估

对运行期间修复效果进行评估，在系统停止运行一段时间后，进行整个修复效果评估。

4.3.3.4 建设规模与投资估算

根据建设规模与场地污染范围、目标含水层深度、特征污染物等，进行投资估算。

5 场地特征参数数据收集

5.1 地层特征参数

- a) 地形地貌。包括整体地貌（平原、丘陵或山区）、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、有机炭含量等信息。对于基岩地层，要包括岩石年代、类别（砂岩、泥岩、灰岩、岩浆岩、变质岩，等）、厚度以及所有岩石的矿物组

成等。

除上述主要参数外，还可根据场地底层情况收集下列相关参数：

- a) 地质构造。包括所处的构造带、褶皱、节理、断层的发育情况（正断层还是逆断层）等。
- b) 岩层胶结程度、产状及结构和节理等。

5.2 水文特征参数

- 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（弱透水层）的岩性、厚度、渗透性等；
- d) 地下水流向，流速等。

除上述主要参数外，还可根据场地底层情况收集下列相关参数：

- a) 地下水补给、径排、排泄条件；
- b) 年降雨量、降水入渗系数，地下水年开采量，开采层位等。

5.3 地下水物理化学性质

- a) 水温；
- b) 地下水水位（分丰水期与枯水期）；
- c) 地下水天然化学特征：pH、Eh， K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 等。

5.4 污染物特征参数

5.4.1 污染源

5.4.1.1 生活垃圾、废水

- a) 生活垃圾：包括总体方量、有机物含量、含水量、气味、主要污染物等。
- b) 生活废水：包括SS（悬浮物）、BOD（生化需氧量）、N（主要为 NH_4-N ）、P含量、细菌含量等。

5.4.1.2 工业三废：

包括废气、废渣、废水。每类污染物的参数包括其物质组成、排放量、排放规律，储存场所等。

5.4.1.3 农业污染源：

包括农药、化肥，以及地膜等设施农业废弃物。

5.4.1.4 采矿污染源：

包括尾矿淋滤、矿石加工厂的污水、矿坑排水等。

5.4.2 污染物类型及特征

5.4.2.1 污染物类型，

主要分为化学污染物、生物污染物和放射性污染物三大类，其中，化学污染物又可分为有机污染物和无机污染物。

5.4.2.2 污染物特征

包括物理及化学特性，物理特性包括污染物的颜色、气味、密度、熔点、沸点、蒸气压及密度、溶解性等；化学特征主要指污染物的反应性。

5.4.3 污染途径

5.4.3.1 入渗型

有毒或有害物质从地表渗入含水层，必要时需要了解入渗的水量、连续性，面积、速率等信息。

5.4.3.2 越流型

主要特点为污染物通过隔水层天窗、封隔不良的井等从一个含水层进入另一个含水层。需要了解越流发生的位置，必要时需要了解越流量、水位差等信息。

5.4.3.3 径流型

主要特点为已经进入含水层的污染物通过径流形式污染下游地下水，需要了解上游污染羽的范围、深度，向下游补给的速率、断面、水力坡度等。

5.4.3 污染状况

- a) 污染羽范围；
- b) 主要污染物浓度范围；
- c) 污染物迁移转化能力。

5.5 生物降解特征参数

BOD、COD、TOC，溶解氧、硝酸盐、锰氧化物、铁氧化物、硫酸盐、二氧化碳、甲烷等。

5.6 场地周围环境敏感区域

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的分布及特征。

6 原位修复技术可行性评估

6.1 法规要求

修复技术的使用过程应符合国家现有的法律法规以及地方和行业的相关政策、标准要求。

- a) 现场施工和运营应整的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的许可，并按照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。

6.2 修复达标可行性试验

对于原位注入修复技术（如原位氧化、原位还原、生物修复等）来说，仅根据场地特征的各类调查数据，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，其修复效果是否能够达标需进行合理深入的可行性实验评估，该过程主要包括实验室小试和实际场地中试两个主要方面。

6.2.1 数据分析

根据场地地层特征参数、水文特征参数以及地下水物理化学性质等资料，分析修复技术的适用性。

6.2.2 实验室小试

可以采用实验室小试进行地下水修复技术可行性评估。实验室小试应要采集实际场地的污染地层中的土壤及地下水样品地下水进行试验。通过在小试条件下模拟实际地下水环境，对修复技术所需达到的

目标效果进行考察，初步判断技术的可行性。需考察的关键问题如下：

- 确定是否已获得足够的土壤及地下水样品以进行所需的测试，包括质控和空白对照所需的所有样品；
- 对一个或多个物理或化学过程进行单独考察以评估该技术的基本可行性；
- 确定各级污染物的去除时间；
- 评价修复技术对目标污染物的降解效果；
- 评估非水相流体（移动相、残留相）对修复效果的影响；
- 评价 pH、氧化还原电位、阴离子浓度等因素对金属离子（如砷、铅和铬等）和修复药剂的迁移率、扩散性及整个体系反应活性的影响；
- 评估反应过程中潜在挥发性物质的生成，包括的 CO₂ 等气体；
- 评价修复过程对地下水环境中生化过程的影响；
- 识别在污染物降解过程中可能产生的有害或存在风险的中间体；
- 对各物料进行化学计量分析，使修复技术在试规模的可发挥最佳性能；
- 取部分水样和土样提前进行实验室小规模地放大实验，例如模拟三维环境常用的手段，即一维的柱实验和二维的沙箱实验

6.2.3 现场中试

在小试达到预定效果后，应对修复技术在特定场地的适用性开展现场中试。对地下水的各项理化参数进行测试分析，优化修复技术实施的工艺参数，指导修复技术的选择及中试现场实验的准备工作。

在中试试验应根据实际情况，充分考虑场地中不同区域的地下水环境状况，获得修复工程设计所需要的参数。验证试验修复技术的实际效果的同时，应考虑工程管理和二次污染防范等。当中试实验结果发现场地对该项修复技术存在一些特殊或不利的影响因素时，则需对原位修复技术进行重新设计和优化。中试实验需考虑的具体技术如下：

- 选取最能代表实际污染地块特点的区域开展；
- 确保现场的基础设施、废物管理系统可保证操作的不间断进行；
- 确定技术评估绩效标准及评估短期达标的修复标准。

6.2.4 应用案例分析

也可以通过分析相同或类似污染地下水修复技术的应用案例分析，进行修复技术可行性评估。案例分析应充分考虑到不同场地之间地下水环境的差异性。

6.3 人体健康及环境风险的可行性

地下水原位注入修复过程中不可避免地会使用具有氧化性、还原性或刺激性的化学药剂，虽然其本身毒性较低，但与高活性、易燃的物质易发生剧烈的反应，且在分解过程中会释放出氢气、氧气等易燃易爆气体，对人体和环境可造成不同程度的潜在危害。

6.3.1 人体健康的可行性

修复技术实施过程中的工程施工、药剂使用、污染物的扩散等都会危害人体的健康。应充分评估在技术实施过程中对人体健康可能产生的危害，并制定相应的保护措施和应急预案。当对人体健康的危害超过可接受范围时，应重新选择可行的修复技术。

6.3.2 环境风险的可行性分析

分析技术应用过程中可能产生的环境风险和危害，制定详细可行的防护措施和应急预案。施工期间对环境的主要影响因素包括药剂堆放、施工扬尘、施工噪声、固体废物、污废水等。

6.3.2.1 药剂堆放

现场按药品的存放要求存放药品。不同类型的药品应分开存放。药品应由专人管护，制定详细可行的药品领用制度，防治遗失。并针对药品存放可能存在的危害，制定详细的防护措施和应急预案。

6.3.2.2 扬尘

分析技术应用过程中可能的扬尘产生节点，制定相应的防护措施和应急措施，粉尘的排放需满足当地的环保要求。

6.3.2.3 噪声

修复过程中应满足施工区周边环境敏感点的噪声要求，

6.3.2.4 固体废物

施工单位应在施工期间加强现场环境管理，对产生的固体废弃物按规定进行分类收集、存放、处理。

6.2.3.5 污水及废水

工程实施期间的废水应按相应的要求和标准处理后，排放到规定地点。

6.2.3.6 其他环境风险

分析工程实施中可能存在的其它环境风险。

6.4 时间可行性

根据地下水的特征条件和现场试验结果，从工程实施的调查、设计、建设、运行、维护、系统关闭等不同阶段分析，为达到工程目标所需的时间，合理安排各工程实施阶段的时间计划，并针对可能出现的突发状况制定详细的应急预案。

6.5 经济可行性

从工程实施的调查、设计、建设、运行、维护、系统关闭等不同阶段分析各阶段所需的经济费用，合理安排费用支出，并针对可能出现的突发状况安排合理的预算费用。

7 注入药剂的类型及筛选

7.1 原位化学氧化药剂

原位化学氧化技术主要是通过添加氧化剂的方式把污染物氧化为低毒、易生物降解的物质或者直接把污染物降解。化学氧化技术利用氧化药剂较高的氧化电势，将污染物降解为小分子，反应完全生成无害的二氧化碳、水和其他盐离子等，彻底去除污染物。

常用于修复的化学氧化注入药剂包括过硫酸盐、高锰酸盐、臭氧、过氧化物和芬顿（Fenton）试剂等。注入药剂的详细信息如表 1 所示：

7.2 原位化学还原药剂

通过向地下水污染区域注入还原剂，通过化学还原作用，使地下水中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质。常见的注入还原药剂包括硫化氢、连二亚硫酸钠、亚硫酸氢钠、硫酸亚铁、多硫化钙、二价铁、零价铁、有机质等。化学还原可以处理重金属类(如六价铬)和氯代有机物等。其中：

7.2.1 硫化氢

硫化氢是一种二元弱酸。在 20℃时 1 体积水能溶解 2.6 体积的硫化氢，生成的水溶液称为氢硫酸，氢硫酸比硫化氢气体具有更强的还原性，易被空气氧化而析出硫，使溶液变混浊。在酸性溶液中，硫化氢能使 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ， Mn(VII) 、 Mn(IV) 还原为 Mn(II) ， Cr(VI) 还原为 Cr(III) ， HNO_3 还原为 NO_2 ，而它本身通常被氧化为单质硫。

表 1 化学氧化药剂详细信息介绍[2]

氧化剂	相对氧化强度	氧化能力 (mV) ^[1]	状态
芬顿试剂	非常强	2.800	液体
臭氧/过氧化物		2.800	气体
过硫酸盐		2.700 (活性的) ^[2]	固体/溶液
臭氧		2.600	气体
过硫酸盐		2.010(非活性的) ^[2]	固体/溶液
过氧化物		1.800	液体
高锰酸盐		1.700	固体/溶液
非挥发性过氧化物	弱	-	固体

7.2.2 连二亚硫酸钠

连二亚硫酸钠，也称为保险粉，是一种白色砂状结晶或淡黄色粉末化学用品，熔点 300℃（分解），引燃温度 250℃，不溶于乙醇，溶于氢氧化钠溶液，其水溶液性质不稳定，有极强的还原性，属于强还原剂。暴露于空气中易吸收氧气而氧化，同时也易吸收潮气发热而变质，并能夺取空气中的氧结块并发出刺激性酸味（SO₂）。

7.2.3 亚硫酸氢钠

亚硫酸氢钠水解产生亚硫酸根和亚硫酸氢根离子，还原性极强，可以还原大多数高价金属。例如，将铜离子为亚铜离子（亚硫酸根可以和亚铜离子生成配合物而稳定），将 Cr(VI)还原为 Cr(III)。

7.2.4 多硫化钙

多硫化钙，无固定分子式，常用化学表达式 CaS_x。属于还原性硫化物，具有良好的水溶性和较强的还原性，可以还原大多数高价态金属，并形成稳定的金属硫化物。目前国内外主要用于 Cr(VI)污染场地修复药剂。

7.2.5 Fe²⁺/Fe⁰

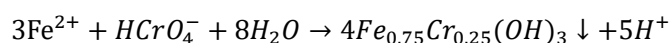
Fe²⁺为还原性金属阳离子，常用于 Cr(VI)污染场地修复。Fe²⁺被氧化成 Fe³⁺，在碱性条件下生产絮状 Fe(OH)₃沉淀，促进金属沉淀物的絮凝沉淀。Fe⁰具有更强的还原性，可以还原金属活性顺序表中排在其后的金属离子，并且可以与氯代有机物发生还原脱氯作用。Fe⁰为单质金属铁，不溶于水，原位注入常采用纳米铁浆液。纳米零价铁由于比表面积增大，还原性随之增强，并且能够随地下水迁移一定距离，常用于原位修复 Cr(VI)、氯代有机溶剂污染含水层。

7.2.6 有机质

有机物中起还原性作用的主要为还原性官能团，如炭炭双键。有机质相对于无机还原剂反应速率较慢，但具有长期的修复效果。向地下环境中注入有机物，可以有效促进微生物的生长，强化微生物对污染物的降解。常用于 Cr(VI)、氯代有机溶剂污染场地的修复。

化学还原反应机理如下：

a) Fe(II)还原 Cr(VI)反应



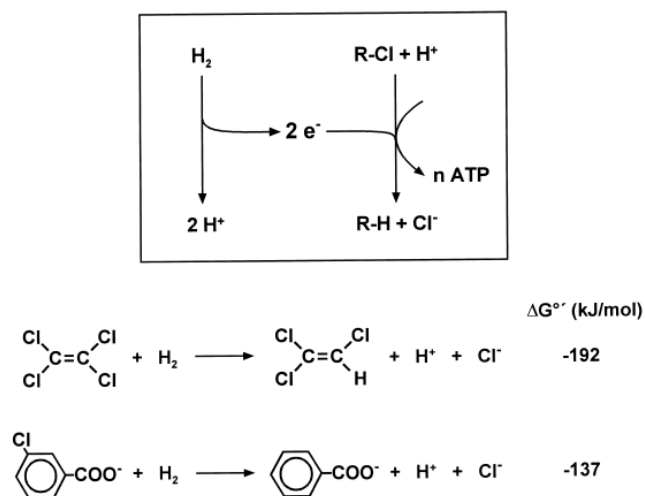


表 2 化学氧化药剂特征[2]

氧化物质	氧化势（地面水平）	适用于	不适用于	氧化物在土壤中的稳定性
Fenton 试剂 ^[1]	2.800	（氯）乙烯、（氯）乙烷、BTEX（苯系物）、轻馏分矿物油与 PAH（多环芳烃）、自由氰化物、酚类、邻苯二甲酸盐（或酯）、MTBE（甲基叔丁基醚）	重馏分矿物油、高级烷醇、重馏分 PAH（多环芳烃）、PCB（多氯联苯）、络合氰化物	经常少于 1 天
臭氧/过氧化物	2.800	（氯）乙烯、（氯）烷醇、BTEX（苯系物）、轻馏分 PAH（多环芳烃）、自由氰化物、酚类、邻苯二甲酸盐（或酯）、MTBE（甲基叔丁基醚）	重馏分 PAH（多环芳烃） ^[5] 、PCB（多氯联苯） ^[5] 、络合氰化物	1-2 天
过硫酸盐	2.600（活性）	（氯）乙烯、（氯）烷醇、BTEX（苯系物）、轻馏分 PAH（多环芳烃）、酚类、邻苯二甲酸盐（或酯）、MTBE（甲基叔丁基醚）	重馏分 PAH（多环芳烃）、PCB（多氯联苯）	几个周至几个月
臭氧	2.600	（氯）乙烯、矿物油 ^[6] 、BTEX（苯系物）、轻馏分 PAH（多环芳烃）、自由氰化物、酚类、邻苯二甲酸盐（或酯）、MTBE（甲基叔丁基醚）	（氯）烷醇、重馏分 PAH（多环芳烃）、PCB（多氯联苯）、络合氰化物	1-2 天
高锰酸盐	1.700	（氯）乙烯、BTEX（苯系物） ^[8] 、酚类	苯、（氯）烷醇、矿物油、PAH（多环芳烃）、PCB（多氯联苯）、氰化物	几周

7.3 原位生物修复药剂

原位生物修复按其作用机理可分为好氧生物修复 (Aerobic biological remediation), 厌氧氧化生物修复 (Anaerobic oxidation biological remediation)、厌氧还原生物修复 (Anaerobic reduction biological remediation) 和共生代谢生物修复 (Symbiotic metabolic biological remediation)。

好氧生物修复是在有氧的条件下,通过微生物代谢活动氧化污染物质,最终形成二氧化碳和水;厌氧氧化生物修复是在无氧的条件下,微生物依靠其他电子受体如硝酸盐或硫酸盐,发生直接微生物代谢氧化过程降解污染物质;厌氧还原生物修复是指微生物在无氧且存在具有生物可利用性有机碳的条件下,促进已被氧化的污染物如氯化溶剂通过发酵反应发生生物还原的过程;共生代谢生物修复是微生物在代谢过程中产生的酶被用来转换其他化合物,且该化合物并不参与微生物正常代谢的过程,这个方法可能对一些低浓度的污染物去除更有效果。

按上述生物修复技术的原理及适用标污染物,其中共生代谢生物修复技术的注入药剂应根据特征污染物及其所对应的微生物菌群,选用特定的底物包括好氧条件下使用的甲醇、丙烷和丙烯等和厌氧条件下使用的葡萄糖、醋酸和乳酸盐等。

表 3 原位生物修复药剂介绍

修复技术	适用污染物	注入药剂	副产物
好氧生物修复	非卤化有机物如 BTEX, 柴油和喷气燃料泄漏场地, 其他溶剂如丙酮、非卤化 SVOCs, PAH, 杀虫剂, 除草剂等	氧气或化学氧化剂如钙和镁的过氧化物, 过氧化氢和臭氧	水和二氧化碳等
厌氧氧化生物修复	石油类污染、BTEX、苯酚、甲酚、苯甲酚、氯乙烯类等	硝酸盐、硫酸盐、三价铁离子盐类	亚硝酸盐、一氧化氮、一氧化二氮、氮气、硫化氢等
厌氧还原生物修复	高氯化污染物如四氯乙烯 PCE、三氯乙烯 TCE、三氯乙烷、四氯化碳等和重金属六价铬等	水溶性底物如甲醇和乙醇、缓释底物如植物油、固态底物如壳多糖	酸度

7.4 注入药剂的筛选

根据上述各个原位注入修复技术注入药剂的分类及其适用污染物情况,并结合考虑注入药剂使用效果与场地特征参数之间的联系,修复前应根据以下点对注入药剂进行筛选和分析,确定最优注入药剂:

- 场地特征: 如地下水埋深、含水层厚度、土质情况、渗透系数、地下水流速等;
- 目标污染物: 种类、含量及修复过程可能产生的副产物等;
- 修复效果: 目标污染物的治理目标、施工工期及施工难易度等;
- 修复成本: 在确保按时保质完成施工的条件下, 选用成本低的注入药剂;

具体筛选原则如下:

- 达到修复目标的能力: 对具有场地特征的污染药剂的技术有效性, 即在合理使用时都应该可以实现修复目标, 使污染降到可以接受的水平。主要考察的指标包括技术成熟度、适合的目标污染物和土壤类型、技术应用性及技术优缺点等;
- 经济性: 在达到目标值的同时, 需充分考虑其经济性, 主要包括各项成本的初步分析。如果有不止一种技术可选择, 那么不同技术施工和实施的资金费用将作为决定修复选择的主要考虑因素。
- 实施时间: 考虑到所采用技术实施需要的时间, 在其他条件相同情况下, 如果有不止一种技术可选择, 那么不同技术施工和实施的时间用将作为决定修复选择的主要考虑因素。
- 环境、安全及健康因素: 对环境的潜在风险、二次污染的危险程度、对场地内 人员和周边人群健康的影响等。

具体筛选评价指标如下所示:

表 4 原位注入药剂筛选评价指标

评价标准	划分等级	时间经济	技术参数				技术适用性		环境影响和社会认可	
		实施时间	药剂使用成熟度	管理控制难度	技术风险	修复区域干扰	土壤适用程度 / 湿度适用程度 / 温度适用程度	污染物参数	社会认可度	二次污染
9	优	年	成熟	易	低	小	效果好	非常适合	支持	无
7	良	0-0.5	较成熟	较易	较低	较小	影响较小	适合	多数认可	较小
5	中	0.5-1	一般	一般	中等	一般	影响较大	不推荐	基本认可	一般
3	差	1-1.5	较不成熟	较难	较高	较大	基本不合适	不适合	少数认可	较大
1	劣	1.5-2	不成熟	难	高	大	不合适	无效	不认可	大

8 注入工艺的类型及筛选

8.1 原位注入井注入

原位注入井注入通过固定井向目标地下水污染区域注入药剂，使药剂在地下扩散并与地下水中污染物接触，通过氧化、还原或生物作用，使地下水中的污染物转化为无毒或对周边环境或人体毒性较小的物质。

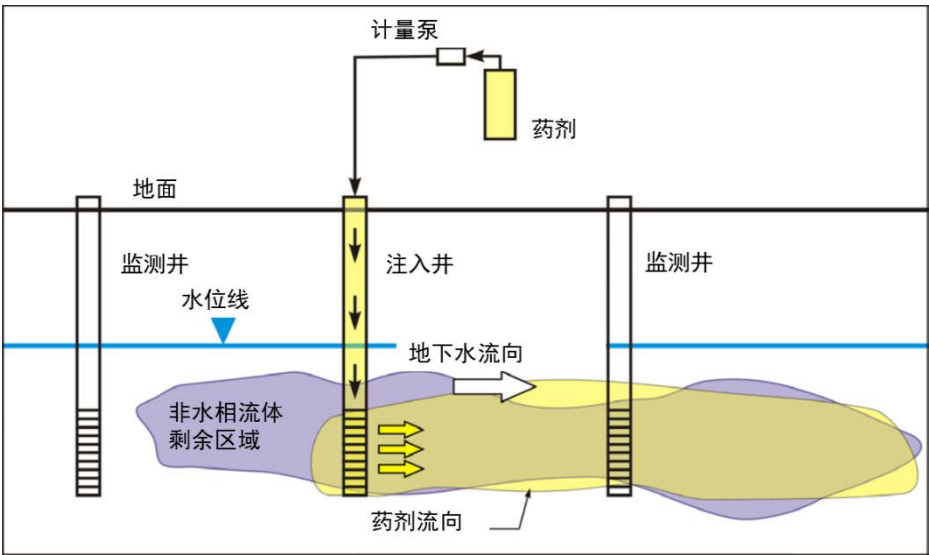


图 2 原位注入井注入示意图

注入介质注入后通常以自由渗透扩散的方式进行横向和纵向迁移。将注入井法与抽水井或循环井联用，可实现原位注入技术在中等渗透性土壤中的应用。采用抽水泵抽取下游方向的地下水，加速地下水流动，可增大药剂的扩散速率。抽水井同时可作为监测井，通过监测水中的污染物浓度和药剂浓度，对扩散效果进行分析。

该方法适合场地中需要设置多处注入点，或者每个注入点需要注入大量的药剂的情况。该工艺对注入深度没有限制。因此，若其它注入工艺无法达到某一特定深度，可采用本工艺以获得注入效果。此外，若现场存在建筑物或者其它基础设施，该工艺可采用水平井/斜井来促进氧化剂的分布，从而达到竖直井或者直推式注入达不到的效果。

该技术设备简单，使用灵活，通过调节注入压力达到不同的影响半径，可在单井反复多次注入用剂，保证修复效果。该方法的一个显著缺点是无法较便利的优化注入点。例如：若需要更紧密的注入点布置或者需要注入新的目标区域，若重新再在场地地上重新设置注入井，则需要花费额外的费用。此外，注入井工艺需要大量的辅助设施，因此费用较高，工艺相对复杂。

注入井法适用于除臭氧以外的所有固态或液态药剂。使用该注入方式时，需通过完整的场地数据模拟出准确的污染分布。但由于该法具备详细的设计参数和精准的监测数据，得到了越来越广泛的应用。

8.2 原位直推式注入

原位直推式注入是指将药剂以一定压力通过直推式钻机的钻杆注入污染土壤中。原位直推式注射法的示意图见图 3。注入管道随注入机械下钻过程进入污染土壤，在其长度方向上根据土壤污染深度分层设置注入介质扩散孔。注入药剂在注射泵的压力作用下经扩散孔进入每层污染土壤，在水平方向形成稀薄的药剂层，在进行纵向渗透扩散迁移，互相交汇，进而覆盖整个污染区域。

原位直推式注入法与原位注入井法相比，在注入点的选择上具有更高的灵活性。在实际实施中，原位直推式注入法的注入点可以根据现场条件及反应状况进行调整。同时，该工艺可以将药剂注入指定污染深度区间，从而能更有针对性的注入，优化修复效果。若现场不宜留下永久的井口，或者需要降低资金成本，该工艺也是优先可以选择的工艺。若现场只需要在较浅层进行药剂注入，该工艺的成本相对是

比较低的，所以在现场可以设置很多注入点。

该方法不适用于地下岩石较多或管路较复杂的区域。药剂注入完成后，需拔出注入管道，形成的注入孔用混凝土或膨润土填充，以免引起药剂回流富集而影响修复效果。

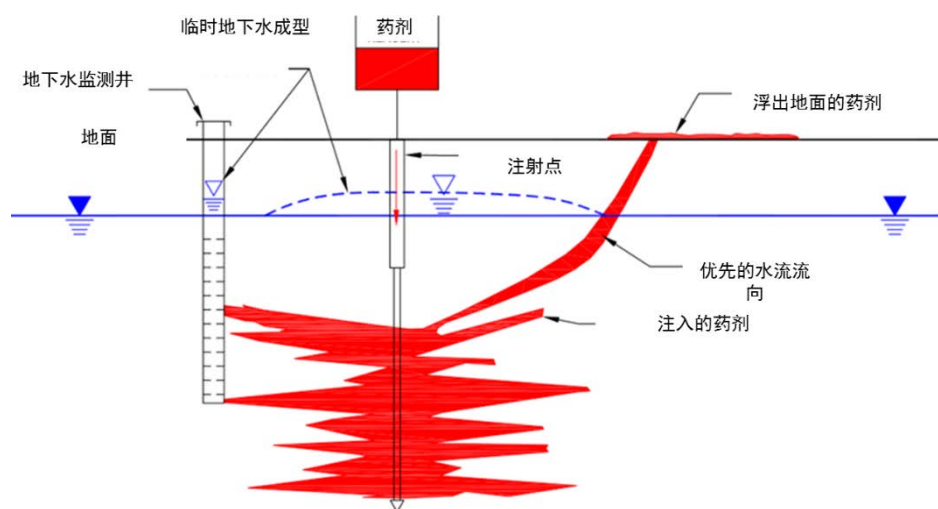


图 3 原位直推式注入示意图

8.3 高压旋喷式注入

高压旋喷注入法是在高压旋喷桩的基础上发展起来的一种药剂投加方法。高压旋喷注射法是利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻进土层的预定位置后，用高压设备使药剂浆液或水（空气）成为 20~40MPa 的高压射流从喷嘴中喷射出来，冲切、扰动、破坏土体；同时钻杆以一定速度逐渐提升，将药剂浆液与土粒强制搅拌混合，同时由于注射压力高，药剂溶液进一步在含水层中扩散，其扩散半径较大。

高压旋喷注射法可提高药剂与弱透水性粘性土壤的混合程度，相对其它药剂投加方法更适合粘性土壤的原位氧化修复。作用机理主要包括：

- 高压喷射流切割破坏土体作用。喷射流动压以脉冲形式冲击破坏土体，使土体出现空穴，土体裂隙扩张；
- 混合搅拌作用，钻杆在旋转提升过程中，在射流后部形成空隙，在喷射压力下，迫使土粒向着与喷嘴移动方向相反的方向（即阻力小的方向）移动，与浆液搅拌混合；
- 充填、渗透作用，高压药剂浆液迅速充填冲开的沟槽和土粒的空隙并加强渗透作用。

根据喷射方法的不同，高压旋喷注射法可分为单管法、二重管法和三重管法。单管法仅注射药剂，影响半径较小（一般为 0.3-0.8m）。二重管法在注射药剂的同时注射高压空气，可冲击破坏土体，加速药剂的扩散并加大药剂的作用范围，最大作用半径可达 0.8-1.0m。采用三重管法可使药剂的影响半径达到最大。三重旋喷管插入直径为 150-219mm 的钻孔，分别喷射注入药剂、水和空气。水以 20MPa 的压力喷射，空气以 0.7MPa 的压力喷射，高压水流和气流同轴喷射冲切土体，形成较大的空隙。低压喷射药剂，填充生成的空隙，填充半径可达 2.0m。

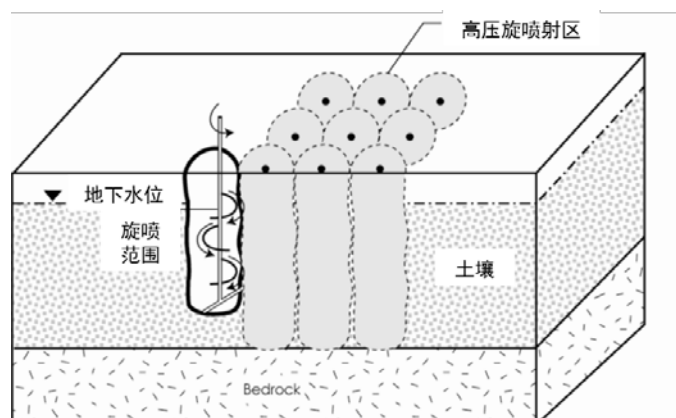


图 4 高压旋喷注射概念模型

高压旋喷系统的优势：

- 高压旋喷原位注入系统的适用范围非常广：粉质粘土、粉土、砂土、砂卵石层均可；且适用于饱和土壤/地下水和非饱和层；
- 可根据每层土壤的污染程度控制药剂投加参数，按深度延米精确控制注药量；
- 对地表无扰动，修复后对地基承载力影响很小；
- 注射压力高，扩散半径大，且在粉质粘土、粉土、砂土等地层中钻进和注药可同时进行，工程经济性好；
- 修复深度大，可对 20m 深以上的污染土壤进行原位修复。

8.4 原位注入工法的筛选

污染地下水原位注入技术的成功应用需要依靠目标污染物与注入药剂的充分接触。尽管注入工艺有直推式注射法、注入井法和高压旋喷注射法是比较典型的原位注入工艺，在修复工程实践中表现出了良好的效果。这三种工艺主要有以下特点：

- 能适应不同目标污染区域的现场条件；
- 比较容易找到有经验的工程实施承包方；
- 基础设施费用较低；
- 便于和其它强化技术联用（如地下水循环、裂变等）。

实际工程实施中，根据不同场地条件、污染物分布以及注入药剂特性等特点，一般选取一种技术或两种技术的组合，并辅以药剂投加点的布设技术，达到修复整个污染场地的目的。

原位注入工艺的选择与污染场地的土壤渗透性、特征水平、污染深度、药剂性质、修复费用等相关。原位注入工法筛选的流程见图 5。由于污染场地各不相同，因此采用原位注入技术进行修复时，需要综合考虑污染状况、水文地质条件、药剂特征等，选取最佳的原位注入工法。

表 5 原位注入工法介绍及优缺点

序号	注入工艺类型	优点	缺点	适用性
1	注入井注入	● 可允许药剂重复注射 ● 每个注入点注入药剂剂量可以很大	● 注入点无法根据后期施工状况调整优化 ● 需要大量辅助设施，费用较高	● 可适用于深度>30m 的场地 ● 适用于工期较长的场地
2	直推式注入	● 注入点及注入深度可以在施工中有针对的调整优化 ● 浅层修复该工艺成本较低	● 每个注入点药剂使用量不能过大，影响半径小	● 适用于需多处注射点的场地 ● 不适用于场地中有基岩、碎石等
3	高压旋喷式注入	● 可应用于渗透性非常差的粘性土壤 ● 药剂影响半径大	● 对土层扰动性较大 ● 裂变效果难以预测及控制 ● 成本较高 ● 安全隐患	● 适用于渗透性非常差的粘性土壤

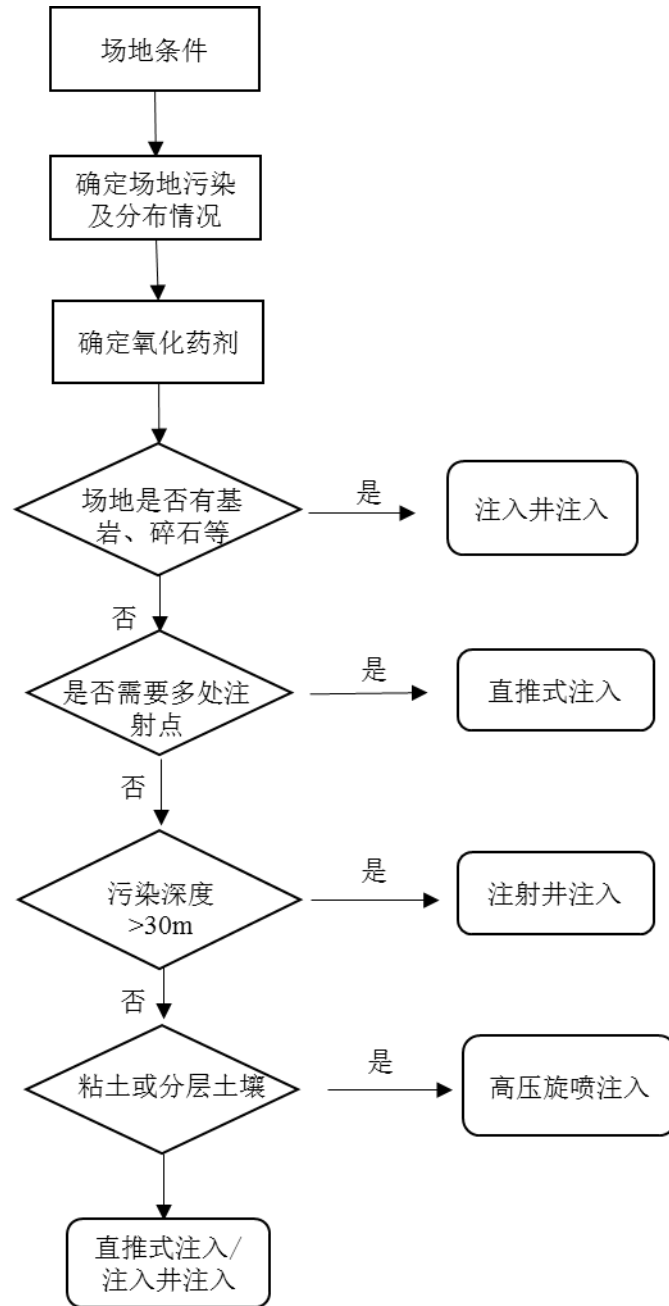


图 5 原位注入工法筛选流程

9 原位注入修复可行性试验

9.1 注入药剂的实验室试验

9.1.1 实验参数

原位注入现场中试和施工开展之前，需要实验室研究原位注入药剂的反应机理、反应效能，初步确定反应技术参数。影响注入药剂的主要因素包括注入环境的 pH、辅助药剂（催化剂、活化剂、钝化剂等）的种类和注入药剂添加剂量以及注入药剂的注入方式。实验室实验需控制以上某一变量进行研究，最终进行参数优化。

9.1.2 实验研究反应药剂参数

根据原位注入药剂对污染物的处理效果，据此确定修复药剂的选择、药剂添加量、反应时间等技术参数。

以目标污染场地地下水和含水层药剂中污染物浓度为背景反应体系，向体系中添加不同浓度，不同种类的药剂，进行正交试验，分析污染物浓度、药剂浓度随时间变化规律。根据实验结果，初步筛选合适的药剂种类、药剂添加量及反应时间。

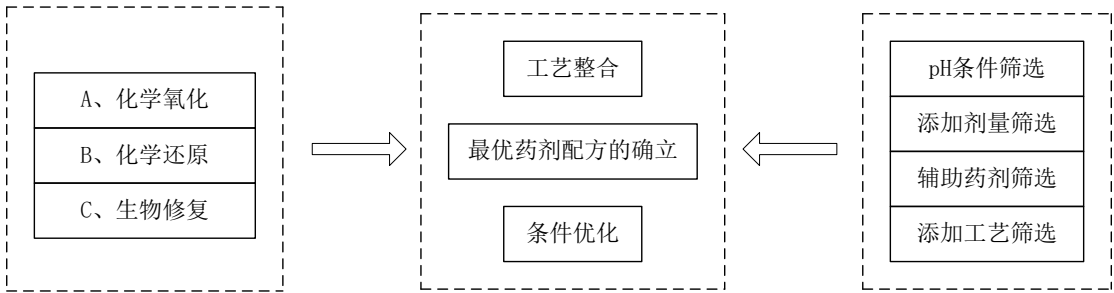
9.1.3 实验研究注入参数

确定药剂在含水层药剂中的扩散特性，初步确定注入压力、注入方式及注入影响半径。

根据场地水文地质条件，实验室建立场地模型，并在模型中建设注入井、监测井等结构。采用不同压力注入反应药剂，通过监测井检测药剂在含水层药剂中的分布情况。以此确定不同注入压力下影响半径与注入压力关系，确定注入参数。

9.1.4 实验设计

小试试验总体设计如下图所示，小试内容主要包括对注入药剂效果的筛选，注入条件的选择以及最终的注入工艺整合和注入药剂复配。



9.2 注入药剂的现场实验

经实验室实验分析，可以初步得到原位注入药剂参数及注入参数。但实验室结果无法准确反映场地实际情况，在技术实施之前，仍需现场中试，确定工艺实施参数。

- 现场实验需要在现场选择具备代表性地块，现场实验地块面积选择 100m²至 500m²为宜。
- 若场地水文地质条件较为复杂，则需要根据不同区域水文地质条件，选择典型地块进行现场实验。根据实验室结果计算的药剂种类、药剂浓度，以及注入压力和影响半径关系进行注入中试设计，验证实验室小试结果，并对技术参数进行合理优化。依据和现场中试试验确定的注入点位置和数量。
- 注入药剂现场实验通过已确定的原位注入方式实施，将注入药剂注入到地下，通过注入设备促

使注入药剂在地下水中扩散，扩散开的注入药剂与地下水中的污染物接触，使污染物毒性降低或变成无毒性的，从而达到降解的目的

- 根据场地特性、水文地质情况并结合实验室实验，设置一定数量的注入点、监测井和抽出井，整个现场实验区域设置一个集中控制系统，通过中控设备控制抽提、注入速度，掌握场地的修复状况，控制注入药剂的注入量；并通过抽出井和注入井人工控制地下水流向，促进注入药剂在地下水中的迁移，在现场实验实施中，抽出系统和注入系统两者配合使用，保障现场实验顺利推进。
- 在注入药剂的现场实验过程中定期通过监测井采集水样进行分析检测，定期采集土壤样品分析检测，以便及时掌握修复效果及调整修复工艺。
- 通过注入药剂的现场实验筛选环境友好型高效修复生物菌剂，并根据场地实际应用情况，提出注入药剂的最佳施用方法，优化注入工艺参数；形成污染场地地下水注入体系，对注入工艺路线设计、注入成本、注入效率和注入时效性等进行可行性分析。

注入药剂的现场实验工艺设计如下图所示：

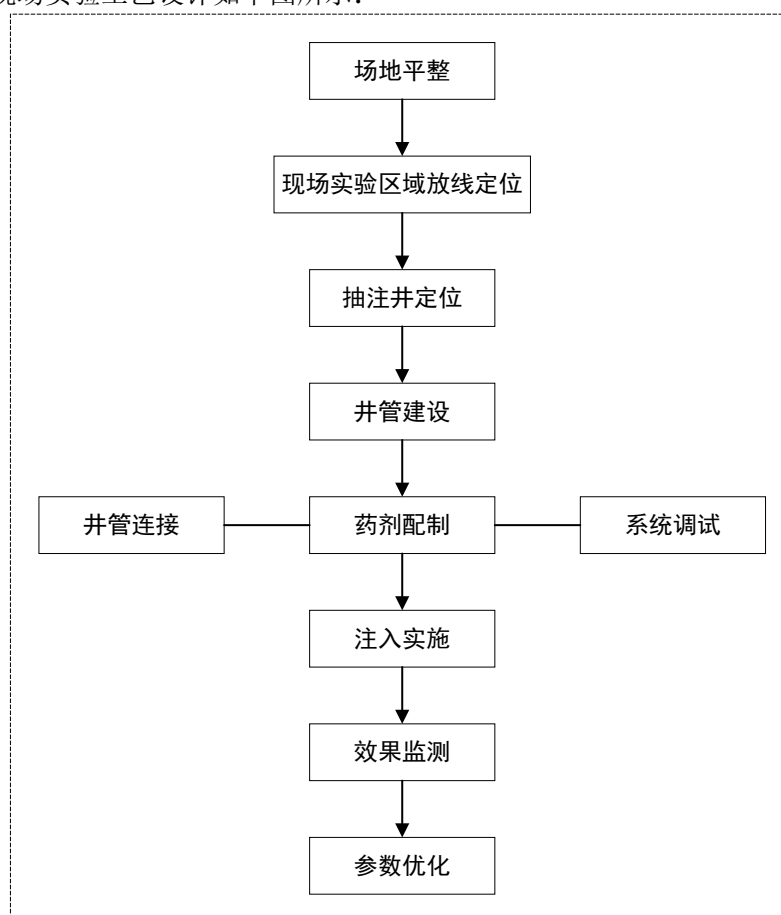


图 6 注入药剂的现场实验工艺

9.3 污染物分解效果评价

场地中污染物的去除效果可以由污染物浓度随时间衰减进行评价，根据小试、中试结果分析浓度变化与初始浓度、反应时间的关系。污染物的分解效果可以用反应动力学中反应物衰减系数反映。常用一级反应和二级反应动力学进行评价，计算方法如下：

a) 一级反应动力学评价

一级反应动力学，是指其反应方程中参与反应或与反应有关的物质的条件（浓度）的指数和为 1 的方程。其方程类型多样，常涉及领域有物质半衰期，化学反应物生成等。

一种化学物质衰减反应的速度与该物质的浓度的一次方成正比的反应过程。如化学物 C 变成产物 P 的反应速率仅仅与化学物 C 的浓度成比例关系。任何时间 t 中化学物的浓度用一级反应速率公式表达如

下:

$$\frac{d[C]}{dt} = -K[C]$$

式中: $d[C]$ —时间 dt 时的浓度, mg/L 或 mg/kg ;

T —反应时间, $d, h, \dots$;

K —一级动力学反应速率常数;

$[C]$ —化学物起始浓度。

一级动力学反应的数学模型有很多应用,例如:放射性衰减、鱼体污染物的排除、污水中的 BOD 衰减情况等。

b) 二级反应动力学评价

二级反应是指反应速度与两个反应物浓度的乘积成正比,也就是与反应物浓度的二次方成正比的化学反应。

二级反应的反应速度方程式为:

$$\frac{dx}{dt} = k(a-x)(b-x)$$

式中: a, b —反应物开始时的浓度,

x —生成物的浓度。

二级反应的半衰期为 $\frac{1}{(k \cdot a)}$ (只适用于只有一种反应物的二级反应;两种反应物的二级反应的半衰期公式比较复杂,除包含速率常数 k 外,还与反应物起始浓度有关),即开始时反应物浓度愈大,则完成浓度减半所需的时间愈短。二级反应最为常见,如乙烯、丙烯、异丁烯的二聚反应,乙酸乙酯的水解,甲醛的热分解等,都是二级反应。

9.4 反应药剂的剂量计算

根据选择药剂与污染物的化学反应方程式进行物料平衡,核算去除污染物消耗药剂剂量;并根据地下水水化学性质及含水层药剂特性,核算修复药剂的额外损耗。

反应药剂消耗剂量,也可以根据小试、中试结果,得出药剂消耗的反应动力学方程,通过数学方法计算反应药剂消耗量。

本指南核算的反应药剂消耗量为理论计算值,最终结果需要在理论计算基础上添加修正系数,考虑反应药剂的额外损失。

10 原位注入系统设计

10.1 原位注入井系统设计

10.1.1 系统组成

原位注入井系统由药剂制备/储存系统、药剂注入井、药剂注入系统、监测系统等组成。其中,药剂注入系统包括药剂储存罐、药剂注入泵、药剂混合设备、药剂流量计、压力表等组成。

在注入井的周边及污染区的外围还应设计监测井,对污染区的污染物及药剂的分布和运移进行修复过程中及修复后的效果监测。另外,可以通过设置抽水井或其他辅助工程,促进地下水循环以增强混合,有助于快速处理污染范围较大的区域。

10.1.2 技术应用基础和前期准备

原位注入井注入的应用需充分了解原位氧化还原反应和传质过程。该技术立足于前期场地调查阶段确定的土壤结构分布,并且需要通过实验室研究确定药剂处理效果和投加量,以及进行中试试验进一步确定和优化设计参数,确定注入点的水平和垂向有效影响半径、污染去除率、可能的反应产物等。还可以通过建立场地概念模型、反应传质模型等方式指导系统设计和运行。

进行原位注入井注入修复系统设计时,需重点考虑注入点布置的间距和深度、药剂注入量、监测井

布设的间距和深度等。还要注意工人的培训、化学药剂的安全操作以及修复产生废物的管理。

10.1.3 关键技术参数

10.1.3.1 药剂的类型及投加量

原位注入井注入工艺不适用于如臭氧（O₃）等气体或非稳态药剂，根据原位注入井适用的药剂，以及场地中地下水中污染物的类型及分布，需对药剂的进行筛选。确定药剂后，针对性的对污染地下水进行小试、中试实验，并综合考虑场地建设条件、工期和经济等因素，确定最终使用的药剂类型。注入药剂的筛选见第 7 章。

药剂的用量由污染物药剂消耗量、土壤药剂消耗量、场地水文地质条件等因素决定，注入药剂的投加量计算见第 9 章 9.4 节。

10.1.3.2 投加点布设

一般而言，药剂可通过足够多的注入井形成水平或垂直方向上的重叠区域，使整个修复区域的氧化剂能与污染物很好的接触（如图 7）。同时，土壤特性数据的不确定性也会频繁的导致阶段性方法的不同，所以对土壤污染修复的方案设计要具有灵活性。

药剂在地下系统中传输的影响半径决定了注入井的间距和分布情况。在进行注入井井间距设计时可首先根据经验数据给出初始值，然后通过场地数值模拟以及中试实验等获得最终的注入间距，初始注入间距可设定为影响半径的 2 倍左右。

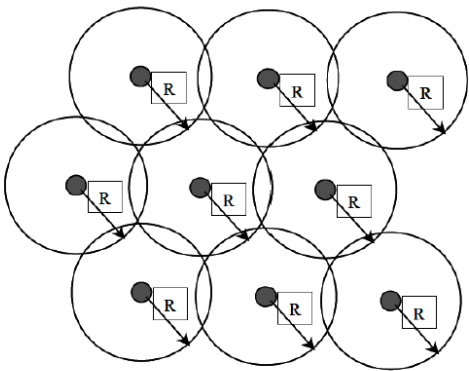


图 7 影响半径示意图

药剂的扩散可能因为它们通过土壤时的消耗而使氧化反应受限。因此，相关反应的有效半径可能在实际上小于其水力半径（ROI）。药剂的反应速率越快其有效的扩散距离越短。此外，土壤的非均质性也会影响其影响半径，如图 8 所示，在渗透性不同的土壤中药剂的影响半径不同。因此在实际的工程中，需要通过中试实验进一步确定场地内药剂注入的影响半径以及注入井间距。

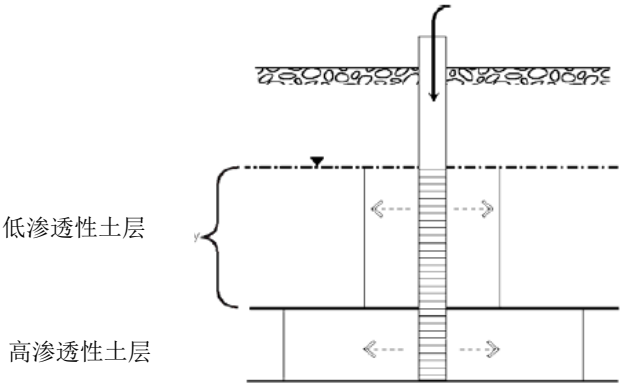


图 8 不同渗透系数药剂影响半径

10.1.3.3 注入流量/压力设计

由于地下情况复杂以及注入过程本身是一个动态的反应过程,仅通过污染场地的水文地质条件来设计注入系统是不准确的,但是前期收集的场地信息能理论上对注入的流量和压力的应用进行计算。

a) 不同土壤类型的注入流量

注入修复系统的实际注入量一定是由场地的具体性质而定,它在场地的纵向和横向两个维度上都有不同的变化。下表是针对场地不同土壤性质的“经验”注入量和相关事项。

b) 垂直注入压力

含水层对溶液的接受力以及溶液的水平迁移显著受到垂直注入压力的影响。最大垂直注入压力可以通过土壤干重密度、湿重密度、渗流层顶板以及含水层顶板距注射点的距离等估算而得:

$$P_{max} = [(\rho_{dry} \times g \times h_{dry} + \rho_{sat} \times g \times h_{sat}) - \rho_{water} \times g \times h_{sat}] \times p_{si}$$

式中: P_{max} —最大垂直注入压力, pa;

ρ_{dry} —含水层土壤干重密度, g/cm³;

ρ_{sat} —为土壤湿重密度, g/cm³;

g —重力加速度, m/s²;

h_{dry} —渗流层顶部到注射点的距离, m;

h_{sat} —含水层顶部到注射点的距离, m;

ρ_{water} —水的密度, g/cm³。

10.1.4 注入井设计

10.1.4.1 注入井结构及质量

注入井主要由封闭段(用于非污染层的封闭)、注药段(用于修复污染目的层,药剂的流入和流出)和沉砂段(用于井底,非目的层、防淤塞)组成。

10.1.4.2 成井管的选择

井管种类:井管包括井壁管、过滤筛管和沉砂管,井壁管安装在场地的非污染层,起隔水护壁的作用(相当于套管);过滤筛管位于土壤或地下水污染层,起滤水挡砂和护壁的双重作用;沉砂管安装在井底部,沉积水中所含泥砂,防治淤塞过滤筛管。非完全井沉砂管应封底,避免翻砂,基岩井(即在基岩层中打出的井)可延长井深,代替沉砂管。

井管材料:井管材料要满足以下要求:不宜由两种材质组成;应顺直无弯曲、残缺、断裂现象;内壁应平整圆滑,接头能弥合,连接后无弯曲。

10.1.4.3 下管方法

井管下管方法主要包括直接提吊法、托盘提吊下管法、浮力塞提吊下管法、二次下管法(分为提吊二次下管法和托盘二次下管法)和综合下管法。其中浮力塞提吊下管法较适宜静水位较高的区域,提吊二次下管法适用于抗压强度较大的金属管,托盘二次下管法适用于非金属管。

10.1.4.4 过滤材料及填砂

在井建设过程中,需要在过滤筛管外围填充砾料,起到过滤控砂防止过滤管孔眼堵塞而影响药剂注射和出水量的作用。

10.1.4.5 止水

为了对目的污染层以外的其它含水层或者非含水层进行封闭和隔离,以防止对目的污染层的干扰和污染,同时防止药剂进入非目的层造成浪费,需要对非目的层进行止水。止水方法可在钻孔及井壁间用膨润土止水和水泥止水。

10.1.4.6 洗井

为了清除井壁泥皮，井内泥沙，疏通目的层，密实填砾，保证注入药剂可以顺利进入目的污染层，实现对土壤或地下水中污染物的治理。

洗井的方法包括抽水洗井、活塞洗井、空压机震荡洗井、液态二氧化碳洗井、盐酸洗井、磷酸盐洗井和综合洗井。

10.1.4.7 抽水实验

通过抽水实验判断井的抽注水效果，反应井的质量，必要时可求出相关水文地质参数。

10.1.5 基础工程

10.1.5.1 仪表及自动控制技术要求

a) 流量计

流量计的技术参数主要为：测量流量（瞬时流量）还是总量（累积流量）；准确度要求；重复性；线性度；流量范围和范围度；压力损失；输出信号特性和流量计的响应时间等。另外，注入药剂的性能对流量计的选型同样有影响。

在安装流量计的管道上需装有控制阀和隔离阀，为避免由于阀门引起一些流速分布扰动和气穴而影响流量计测量，一般控制阀应安装在流量计的下游，隔离阀安装在流量计的上游，上游阀应离流量计足够距离，当流量计运行时，上游阀应全开以避免流速分布畸变等扰动

b) 压力计

1) 仪表类型的选用

- 当压力在 2.6Kpa 时，可采用膜片式压力表、波纹管压力表和波登管压力表。如接近大气压的低压检测时，可用膜片式压力表或波纹管式压力表。
- 若需要进行远距离压力显示时，一般用气动或电动压力变压器，也可用电气压力传感器。
- 根据被测压力的大小确定仪表量程。
- 根据生产允许的最大测量误差，以经济、实惠的原则确定仪表的精度级。一般工业用压力表 1.5 级或 2.5 级已足够。
- 环境条件恶劣，如高温、腐蚀潮湿、振动等，被测介质的性能，如温度的高低、腐蚀性、易结晶、易燃、易爆等等，以此来确定压力表的种类和型号。
- 现场就地指示的压力表一般表面直径为 $\phi 100\text{mm}$ ，在标准较高或照明条件较差的场合用表面直径为 $\phi 200\sim\phi 250\text{mm}$ 的，盘装压力表直径为 $\phi 150\text{mm}$ ，或用矩形压力表。

2) 压力表的安装

- 应选在能正确而及时反映被测压力实际数值的地方。例如，设置在被测介质流动平稳的部位，不应太靠近有局部阻力或其他受干扰的地方。取压管内端面与设备连接处的内壁应保持平齐，不应有凸出物或毛刺，以免影响流体的平稳流动。
- 取压口到压力表之间应装有切断阀，以备检修压力表时使用。切断
- 阀应装设在靠近取压口的地方。需要进行现场校验或经常冲洗导压的地方，切断阀可改用二通阀。
- 在安装压力计时，取压口到压力表之间应装有切断阀，以备检修压力表时使用。切断阀应装设在靠近取压口的地方。需要进行现场校验或经常冲洗导压的地方，切断阀可改用二通阀。

c) 在线监测系统

考虑到施工过程的连续性，根据现场施工区域布置情况，可在施工现场修复区域集成建立实时在线监测系统和监控系统，在线监测系统可实现对厂区无组织排放大气的实时在线监测，监测指标为温度、湿度、风速、风向及相关目标污染物；在线监控系统可实时观测现场的修复实施过程。工作人员可以根据实时监测和监控系统数据，指导现场修复工作，对施工作业进行相应调整，对现场环保措施进行相应整改。

d) 快速检测设备

现场应具有可以检测相关关注污染物的快速检测设备，以快速掌握场地情况。

10.1.5.2 给排水系统工程技术要求

原位注入井系统可能涉及到的给水排水系统包括注浆泵、抽水机的安装、注水管或抽水机的安装、相关附属设备和材料的安装、生活区用水安装和给水排水系统的检验与调试。

a) 泵的安装

- 安装前应核对基础定位尺寸及标高，其允许偏差应符合规范要求。
- 泵的型号应与设计相符，动力机械与泵的功率应匹配；产品合格证、产品说明书及随机配件应齐全。
- 泵在安装前应对其外表及组装件进行一次外观质量检查；如发现有质量问题，不得安装。
- 安装后，泵体的底座应水平，且与基座接触严密，定位基准线应符合设计要求，设备的平面位置及允许偏差应符合相关规范的规定。
- 泵的管口与管道连接应严密，无渗漏水现象。
- 电机的绝缘电阻应符合相关规范的规定。
- 所有泵类设备，在泵进出口未与管道连接前，泵进出口均应用钢板封堵。

b) 泵的试运转

- 启动前必须确认叶轮的旋转方向；
- 合闸后，不能立即启动，应通过控制系统对各种泵类进行自检，如发现有故障出现，应检查并排除故障，然后方可点动，若电机不转，应迅速果断地拉闸，应检查并排除故障，以免损坏电机；
- 水泵或注浆泵启动后，应注意观察电机及电源线路电压表和电流表，若有异常现象，应立即停机查明原因，排除障碍后方能重新合闸启动；
- 几台水泵由同一台变压器供电时，不能同时启动，应由大到小逐台启动，停止时，应由小到大逐台停止；
- 运行中泵体的电流不得超过铭牌上的额定电流，三相电流不平衡度，空载时不超过 10%，额定负载时不超过 5%；
- 运行中电源电压与额定电压的偏差不得超过 $\pm 5\%$ ，三相电压不平衡度不超过 1.5%。

c) 管道安装

- 对管子进行检查与准备，确认管及管件不得有妨碍使用的缺陷
- 管材必须符合设计标准及规范的要求，且应有合格证和出厂检验报告。
- 管道安装要严格按照设计方案进行。

d) 附属设备及材料安装

- 阀门、管件等在安装前均应进行检查，并清除管内、管口杂物。
- 阀门安装前，应作耐压强度试验。试验应以每批（同牌号，同规格、同型号）数量中抽查 10%，且不少于一个，如有漏、裂不合格的应再抽查 20%、仍有不合格的则须逐个试验。对于安装在主管上起切断作用的闭路阀门，应逐个作强度和严密性试验。强度和严密性试验压力应为阀门出厂规定的压力，同时应有试验记录备查。
- 阀门安装位置、方向应符合设计要求，阀门、管件的连接应牢固、紧密，不得有渗漏现象。安装后，阀门与管道中心线应垂直，操作机构灵活、准确；有传动装置的阀门，指示机构指示的位置应正确，传动可靠，无卡涩现象。
- 阀门安装应保证型号、规格符合设计要求，表面洁净，朝向正确，启闭灵活。
- 安装的阀门在工程最终验收前不得有漏水痕迹。

e) 检验与调试

给排水系统调试包括单体设备的测试和各系统的调试两部分，在施工组织方案内应提供调试方案，在调试过程中应按批准的调试方案和计划进行，并在监理工程师的监督下完成。

安装完毕，应根据相关规定进行调试及试运转前的检查及试运转，并做出记录；试运转应符合下列规定：

- 电机转动方向正确。
- 泵体运转无卡阻现象和异常声响

- 泵体带负荷连续运转不应少于 2h。
- 附属系统的运转应正常；管道连接应牢固无渗漏。
- 各密封部位无渗漏水现象。
- 电机电流不超过额定值。
- 安全保护和电控装置及各部分仪表均应灵敏、正确、可靠
- 仪表的灵敏度和阀类启闭的灵活性。
- 抽注水流量满足设计要求。

10.2 原位直推式注入系统设计

10.2.1 系统组成

原位直推式注入系统由药剂制备/储存系统、直推式注入系统、监测系统等组成。直推式注入系统包括直推式注入设备、药剂注入泵、药剂搅拌设备、流量计、压力表等。

原位直推式注入设备依靠推进器将药剂注入目标区域。目前应用较多的推进器由三个主要部分构成：探测组建、液压系统和电气系统。其中，用于药剂注入的部分为液压系统。可通过液压系统将配置好的一定浓度的药剂直接注入的修复目的层，使其完成对土壤或地下水中污染物的修复。

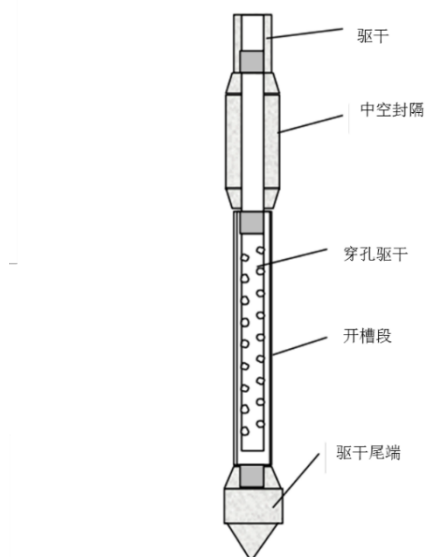


图 9 原位直推式注入设备注入端构成

直推式注入点通常由一系列长度在 0.9~1.5 m 的中空钢管组成，钢管尾端配有开槽段。药剂通过钢管段注入至指定深度。开槽段通常 0.3~0.9m 长，但是在特定求下也可以加长。每个钢管通过法兰管链接。从而便于连接组装及拆卸。这些钢管采用静态水利压力或者冲击锤产生的动态压力又或是这两者的组合推进至地下水中。

大型项目中直推注入系统中，修复药剂可以通过多台直推设备分流并以相同的压力注入地下。每一条注药线至少要有 1 个压力表和 1 个流量计，施工单位尤其要关注反向压力、流量及每条管线的药剂用量。压力表和流量计材料要与试剂兼容。泵、压力计和流量计在注射点位的相对位置见图 10。根据场地规模和污染特征，在地下水污染羽下游合理布置监测井。

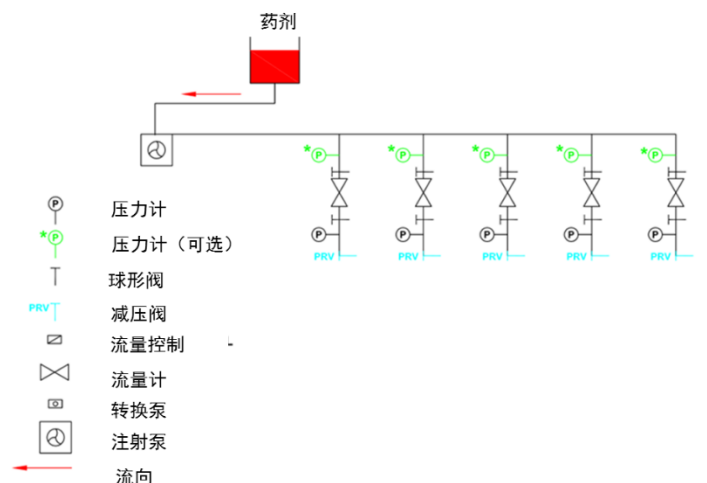


图 10 直推式注入监测系统基本配置

10.2.3 技术应用基础和前期准备

与原位注入井注入技术类似，在设计运用原位直推式注入技术前要充分考虑场地的条件和污染程度，如土壤结构分布、目标区域土壤粒径和渗透性、污染物特性和分布、药剂的反应机理和传质过程，并通过抽水试验、实验室小试和现场中试进一步确定和优化初步设计参数，明确注入点的有效影响半径、预估去除率和反应副产物等，确保实施过程前有据可循。

10.2.4 关键技术参数

10.2.4.1 投加点布设

药剂在地下系统中传输的影响半径决定了注入孔的间距和分布情况。在直推式注入点位的设计时可根据经验数据给出初始值，然后通过场地数值模拟及现场中试获得最终的注入间距，初始注入间距可设定为影响半径的 1.5~2 倍左右。

与原位注入井相比，由于直推式注入每个点位的药剂适用量及浓度不宜过大，因此直推式注入方法的影响半径通常比原位注入井的小。一般情况下直推式注入设备的影响半径为 1.5~3 m。

在实际的工程中，需要通过现场中试进一步确定场地内药剂注入的影响半径以及注入点位间距。由于直推式注入技术具有灵活性高、效率高等特点，因此可以根据每个点位的不同情况，在现场调整注入点位以保证修复效果。

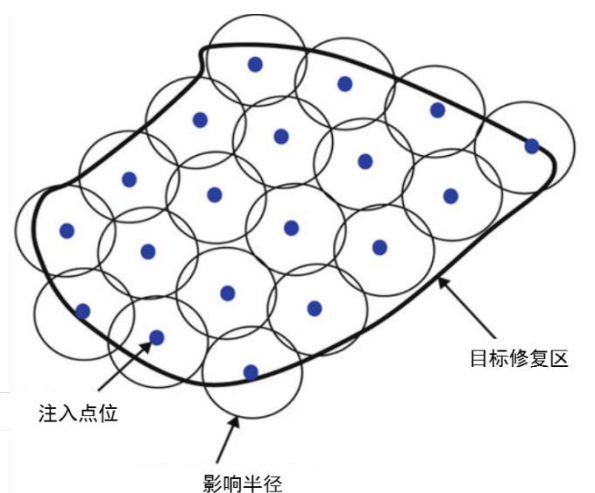


图 11 原位直推式注入影响半径示意图

10.2.4.2 注入方式及深度

一般原位直推式注入有两种方式，可以有表层到深层或由深层到表层连续注入，搭配注入设备及压力启动式注入探头分层注入。注入间距深度通常在 0.3m 至 1.5m 之间。当一次注射完成后，探头可能会被向上拔出 0.3~1m 并开始下一次注射。该程序不断被重复直至所有注射完成。

直推式注入深度需根据场地实际污染深度确定，注入探头一般推进与污染区域同样深度或者比污染深度稍微更深入一点。对于大多数场地，直推式注入最多可以推进至 30m 左右的深度。然而，最大长度可能由于坚硬的基岩、水泥土或者碎石的存在而减小。

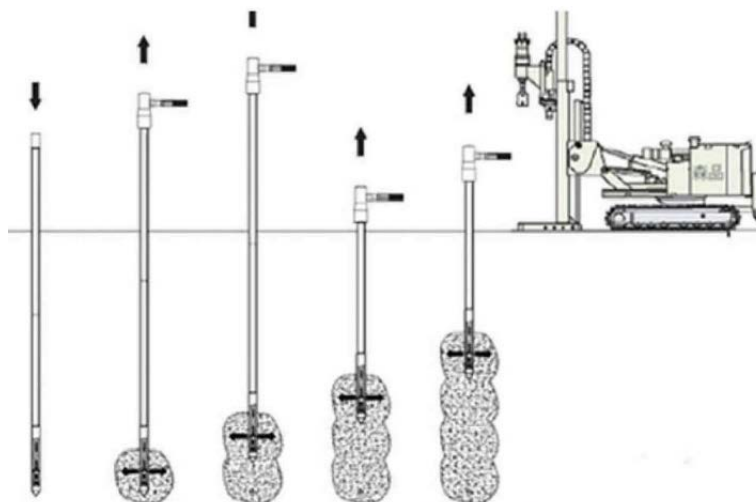


图 12 直推式注入设备注入方式示意图

10.2.4.3 注入次序

原位直推式注入的注入次序取决于场地修复目标值，但是通常从污染物的下梯度向上梯度方向进行。这样的注射方式使得污染物在向外扩散迁移时仍处于药剂作用范围内，既保证了污染区域的有效修复，又阻止了污染区域进一步扩大^[3]。如果需要一次注射多个点位，那么多次的注入最好不要注射至相邻的点位，以避免彼此污染，从而限制了每一个点位的影响半径。

10.2.4.4 注入流量/压力设计

适当增加药剂溶液的注射压力或注射速率可以再地下发生破裂反应，形成药剂扩散的快速通道，增强药剂的作用范围。但注入压力过高则会造成冒浆或形成过大的裂隙，导致药剂向非目标区域扩散。

以目标层为粘土层为例，为了使药剂能进入目标区域，同时避免粘土层结构被破坏，可使用 $3 \text{ kg/cm}^2 \sim 7 \text{ kg/cm}^2$ 较低的初始压力。

10.2.5 设备选型

目前，已有成熟的药剂原位注入设备应用与工程实施中。直推式注入设备通常配有履带，可以远程操控进行移动，可以再多个预设注入点位之间进行移动，设备在快速钻进的同时，可以实现精准的深度定位。实际工程中，可以根据地形条件、工期要求、注入要求等不同条件进行设备选型。表 7 列举了在工程应用中较多的设备参数，可供参考。

原位直推式注入设备的参数主要包括重量、地面压力、地面速度和尺寸参数、发动机参数和液压系统参数，其中，设备的转运高度、转运宽度、转运长度、向下力、液压系统压力（最大）、液压系统流速、左前侧或后侧的辅助液压接头流速（最大）和右前侧辅助液压接头流速（最大）为设备选型时需要考虑的主要参数，可根据注入孔布设情况进行设备的选型。

表 7 常用直推式注入设备参数范围 [4]

参数项	范围
动力头行程	1067-1372 mm
重量	200-1135 kg
横向运动（一侧到另一侧）	229 mm
向下压力	52KN-80 KN
提升力	62.3-111 KN
液压（最大）	138-152 bar
液压流量（系统）	38 LPM
振动频率	30Hz
扭矩（锤马达）	841 N*m
自转速度（双向）	80-125 转

10.3 高压旋喷式注入

10.3.1 系统组成

10.3.1.1 气动源系统

气动源系统主要包括配电箱 1、电缆 12、空压机 2、空气过滤罐 3 和气管 13；空压机 2 与配电箱 1 通过电缆 12 相连，空气过滤罐 3 与空压机 2 通过气管 13 相连，当启动气动源系统时，空压机一是可以通过气管 13 在药剂配制时向药剂与水的混合溶液曝气，使药剂与水充分混合；二是可以在药剂注入过程中，向钻孔中曝气，使药剂更好的向钻孔周围扩散，增大药剂扩散影响半径。

10.3.1.2 溶配药系统

溶配药系统主要包括药剂存储罐 4、输药管 15、加药泵 5、加水管线 14、混合药剂搅拌罐 6；其主要作用为根据设计的药剂与水混合比例配制药剂，并利用空压机向药剂搅拌罐曝气使药剂与水充分混合。具体过程为首先用加药泵 5 通过输药管 15 将药剂存储罐 4 里的药剂抽至混合药剂搅拌罐 6，然后通过加水管线 14 按设定的比例添加相应量的水至混合药剂搅拌罐 6，然后用空压机通过气管 13 向药剂与水的混合溶液曝气，使药剂与水充分混合，药剂配制完毕。

10.3.1.3 引孔系统

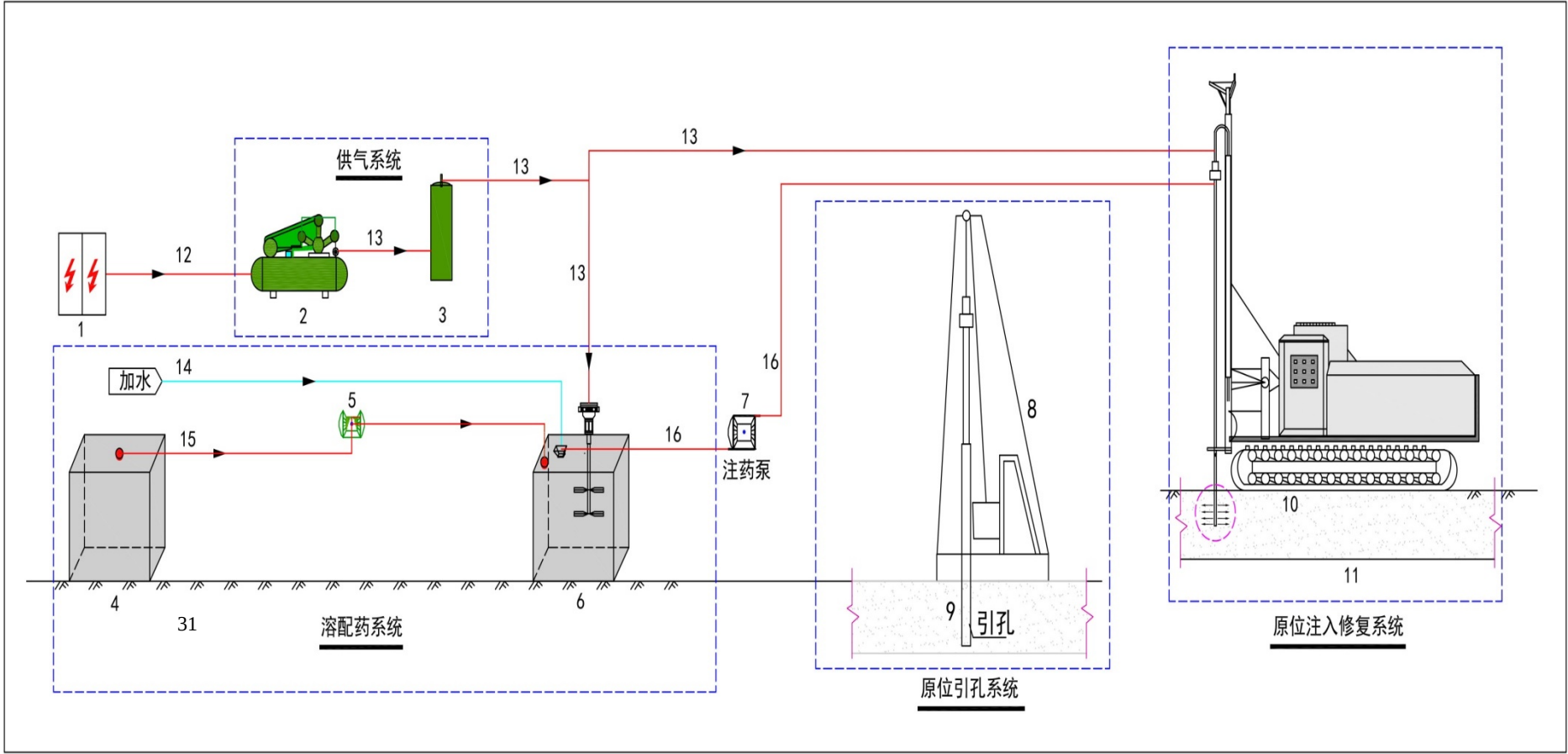
引孔系统主要包括引孔机 8、钻杆 9、PVC 管；高压旋喷钻机本身的钻进能力有限，引孔系统的作用是：若遇到高压旋喷钻机本身较难下钻的地层（如卵石层），利用专业的引孔钻机 8 提前进行引孔，使本系统适用的地层范围更广；在引孔时，若有必要可以在钻孔中下 PVC 管防止塌孔；引孔系统是药剂注入前期准备系统，可以独立成为一个系统。

10.3.1.4 原位注入系统

药剂注入系统包括：高压注药泵 7、原位注入设备（即高压旋喷机）11、混合药剂输药管 16、配有喷嘴的钻杆 10；其作用是将配制好的药剂与水混合物以高压液体方式注入到污染的土壤/地下水，高压液体对土体进行切割搅拌，达到药剂与土壤、地下水的充分混合的目的；具体过程为首先将中空钻杆 10 放至钻孔中预定的位置，然后用高压注药泵 7 通过混合药剂输药管 16 将药剂输送至高压旋喷机 11 的带有喷嘴的中空钻杆 10，高压液体（药剂与水混合物）通过中空钻杆 11 最前端的喷嘴喷出，切削钻孔周边土壤/地下水，使药剂与污染土壤/地下水充分混合，同时高压旋喷机 11 不停的旋转并缓慢向上提升钻杆，直到地面。钻杆缓慢的提升、不停的旋转，能保证高压液体对钻孔周边污染土壤/地下水全方位、无死角的进行修复。

10.3.1.5 高压旋喷现场监测系统

监测系统（未包含在示意图中）主要包括监测井、取样器、监测设备等；其作用是在药剂注入结束后静置一段时间，当药剂与土壤/地下水中污染物充分反应后，通过采集土壤/地下水样品送检，对修复效果进行验证，监测系统也可以独立成一个系统。



注：图 8.8 中 配电箱 1、空压机 2、空气过滤罐 3、D 药剂存储罐 4、加药泵 5、混合药剂搅拌罐 6、高压注浆泵 7、引孔机 8、钻杆 9、配有喷嘴的钻杆 10、原位注入设备 11、电缆 12、气管 13、加水管线 14、输药管 15、混合药剂输药管 16。

10.3.2 高压旋喷工艺参数

10.3.2.1 高压旋喷设备参数

a) 高压旋喷机主要技术参数

常见的高压旋喷机主要技术参数如表 8 所示：

表 8 高压旋喷机主要技术参数 [5]

技术参数名称	技术参数指标	备注
最大钻孔深度（m）	50-60	
钻杆直径（mm）	Φ50、Φ60、Φ73、Φ89、Φ102、Φ114	
旋喷施工方式	单管、双重管、三重管	
钻塔高度（m）	3.5-22	
一次装接杆长度（m）	3、7、12、17、22	根据钻塔高度确定一次装接杆长度
钻孔倾角	左右±10°、前后-10~100°	某些型号高压旋喷机可实现水平钻孔内以高压旋喷的方式注入药剂
动力头转速（r/min）	0-180	
钻杆提升速度（mm/min）	0-450	
整机质量（kg）	980-3500	

b) 高压注浆泵参数

常见的高压注浆泵主要技术参数如表 9 所示：

表 9 高压注浆泵主要技术参数

技术参数名称	技术参数指标	备注
最大注浆压力（MPa）	20-45	
注浆量（L/min）	100-350	
额定功率（kW）	20-100	
整机重量（kg）	1000-3600	

c) 空压机参数

常见的空压机主要技术参数如表 10 所示：

表 10 空压机主要技术参数

技术参数名称	技术参数指标	备注
额定压力（MPa）	0.8-1.0	
额定功率（kW）	1.5-20	
排气量（m³/min）	0.2-2.0	
重量（kg）	100-500	

10.3.3.2 钻孔布设参数

钻孔布设参数主要包括钻孔间距、钻孔深度，钻孔间距的确定与药剂有效扩散半径相关，钻孔深度与污染深度一致。

a) 药剂有效扩散半径

药剂有效扩散半径是修复工程设计的最关键参数之一，设计值过大不能完全覆盖整个修复区域导致出现修复“盲区”，设计值偏小造成返浆严重且工程成本大大增加。

在土壤/地下水修复领域，高压旋喷注入的药剂为液体，其有效扩散半径除了高压液流的瞬时劈裂搅拌外，还有后期的渗透扩散，因此药剂有效扩散半径=搅拌半径+渗透扩散半径，如图 16 所示。

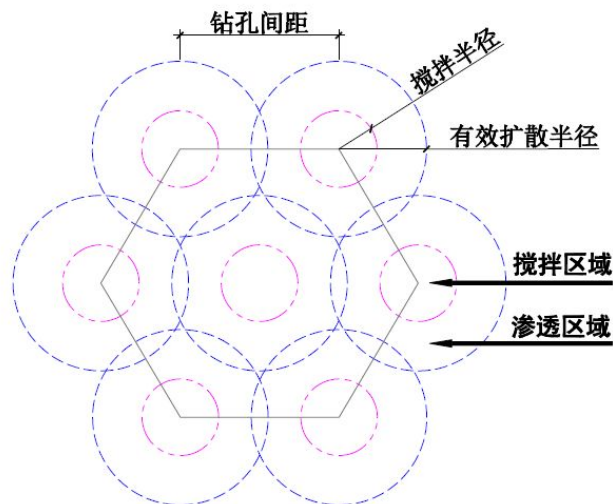


图 16 高压旋喷搅拌+渗透扩散示意图

在实际工程修复过程中，可以根据经验值设计药剂有效扩散半径，但通常还要根据现场中试来进行验证。药剂有效扩散半径主要与注药压力、修复药剂类型、注浆量、地层岩性、密实度、地层饱和度、地下水流速、药剂在地层中有效反应时间有关。药剂有效扩散半径的经验值参见表 8.3，在工程修复过程中根据中试试验对经验值进行调整。

表 11 药剂有效扩散半径参考值 [5]

地层岩性	有效扩散半径 (m)		备注
	饱和带	包气带	
粘性土	0.8	— —	注药压力为 25—30MPa
粉—细砂	2.8	— —	
粗砂—砾石	3.5 以上	0.75	

b) 钻孔深度

钻孔深度根据土壤污染的最大深度来确定。

10.3.3.3 药剂投加参数

在进行原位注入修复时，为了保证污染物质能与药剂充分反应，一是要保证充足的药剂投加量，使药剂能与污染物质充分反应；二是要在注入的药剂中加入一定的水，向污染土壤/地下水中注入药剂与水的混合物，这样才能保证药剂注入到土壤后，能扩散到设定的影响半径、充满大部分土壤孔隙，因此要计算药剂投加量、加水量等参数。

药剂投加量主要与污染物的浓度有关，根据污染物的浓度按相应的理论公式计算出药剂投加量的理论值，然后乘以一个安全系数，保证工程修复效果。通常安全系数越高，工程修复效果越容易保证，安全系数推荐值为 1.5。

加水量参数主要与地层的饱和程度、渗透系数有关：

- 对于渗透系数高的饱和层，由于地下水流动较快，为保证药剂注入后能迅速与周边地下水混合，加水量的设计思路是在保证不返浆的情况下尽量增加加水量；
- 对于渗透系数低的饱和层，由于地下水流动近乎停滞，且容易返浆，加水量的设计思路是尽量减少加水量，保证所加水量能完全溶解药剂且满足高压旋喷所需最低水量即可；
- 对于渗透系数高的非饱和层，地层本身不含水，为了保证药剂充满地层孔隙，加水量的设计思路是在保证不返浆的情况下尽量增加加水量，保证药剂与水混合物充满孔隙；
- 对于渗透系数低的非饱和层，为了保证修复效果，首先要保证足够的加水量以使药剂充满地层孔隙，但同时返浆情况可能严重，可通过减小药剂有效扩散半径设计值或复喷的方式解决此问题。

10.3.3 高压旋喷原位注入系统常见的问题及解决办法

10.3.3.1 返浆现象严重

在高压旋喷原位注入药剂的过程中，经常会出现返浆现象，若返浆情况不严重，可持续注入药剂，若较严重，可通过复喷或等待药剂渗入地层再继续注入药剂的方式解决，减少药剂溢出量。

10.3.3.2 注浆泵设备损坏

采用高压旋喷注入氧化剂或腐蚀性较高的药剂（如过硫酸钠和氢氧化钠混合液）时，高压注浆泵的柱塞、工作腔、高压旋喷机的中空钻杆等多采用碳钢制作而成，与药剂长期接触极易被腐蚀而造成泄露，可用不锈钢对易腐蚀器件进行特制，并在每次注药结束后采用清水进行冲洗，减缓器件的腐蚀。

11 原位修复系统的现场安装调试运行及维护

11.1 电气系统工程技术要求

原位注入修复电气系统工程技术需满足以下标准：

- 1) 供配电系统设计规范（GB50052-95）：用于场地配电系统的设计与安装；
- 2) 通用用电设备配电设计规范（GB50055-93）：用于注浆泵、抽水泵以及各种设备用电的选型规范；
- 3) 爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范（GB50058-92）：用于氧化剂仓库内的电力安装及设计规范；
- 4) 电力装置的继电保护和自动装置的设计规范（GB50062-92）：用于场地内自动化控制系统的设计规范；
- 5) 建筑照明设计标准（GB50034-2004）：用于场地内办公生活区照明设计规范；
- 6) 工业及民用电力装置的接地设计规范（GBJ65-83）：用于场地内电力接地设计规范。

11.2 设备调试

11.2.1 设备调试的目的

原位注入系统设备调试的目的主要有：

- a) 确定供电系统是否满足系统运行的需求；
- b) 对整个系统进行调试，检查设备的运行情况、密封情况，若有问题及时解决，保证整个系统的顺利运行；
- c) 确定合适的注药压力值、确定合适的注药量；
- d) 确定合适的钻杆提升速度、旋转速度等参数。

11.2.2 设备调试

首先将原位注入系统所需的全套设备/辅助设备，按施工场地情况进行合理布置、安装。

然后分别检查供电系统、供气系统、注药系统等各种设备运转是否正常，管路是否畅通或有泄露（进行地面管路试喷），测试压力仪、监控仪器是否齐备、完好，确认无误后方可进入下一步工序。

- 供电系统：检查供电系统是否能满足高压旋喷原位注入系统的用电负荷需求，是否有漏电保护、绝缘等，保证用电安全。
- 供气系统：空压机→气管→中空钻杆→中空钻杆喷嘴。
- 注药系统：溶配药系统→高压注浆泵→压力表→输药管→中空钻杆→中空钻杆喷嘴。

各种设备检查完毕后在地表进行联合试机、试喷检查，以确定各种设备能否正常进行工作。把各种压力和流量调到喷射注药施工的要求进行试喷，了解各种管路是否畅通、密封，喷嘴的加工质量等，在地面调节好喷射效果后方可下入孔内使用。

11.3 系统运行

根据原位注入系统的基本原理和系统组成，在进行污染土壤/地下水修复时具体操作过程如下文所述。

- 首先准备好引孔系统、气动源系统、药剂注入系统、溶配药系统，并将相关联的系统连接起来；
- 若有必要，利用引孔系统首先在地层进行引孔，并下入 PVC 套管防止塌孔；若高压旋喷机可自行下钻，则不需要引孔；
- 利用溶配药系统按设定好的药剂与水配合比配制好药剂，并将药剂注入系统带喷嘴的注浆管放至预定深度；
- 启动气动源系统、药剂注入系统，用高压注药泵将配制好的药剂通过带喷嘴的注浆管注入到污染的土壤/地下水，同时用空压机向高压旋喷钻机提供气压，以增加药剂扩散半径；
- 高压旋喷机同时向上提升钻杆，钻杆提升速度根据每米注药量进行控制，直到到达地面，本次注药过程结束；
- 静置一段时间，待药剂与污染物充分反应后采集土壤/地下水样品验证修复效果，若未达标，重复过程一到五；若达标，本次修复结束。

原位注入系统操作流程如下图 17 所示。

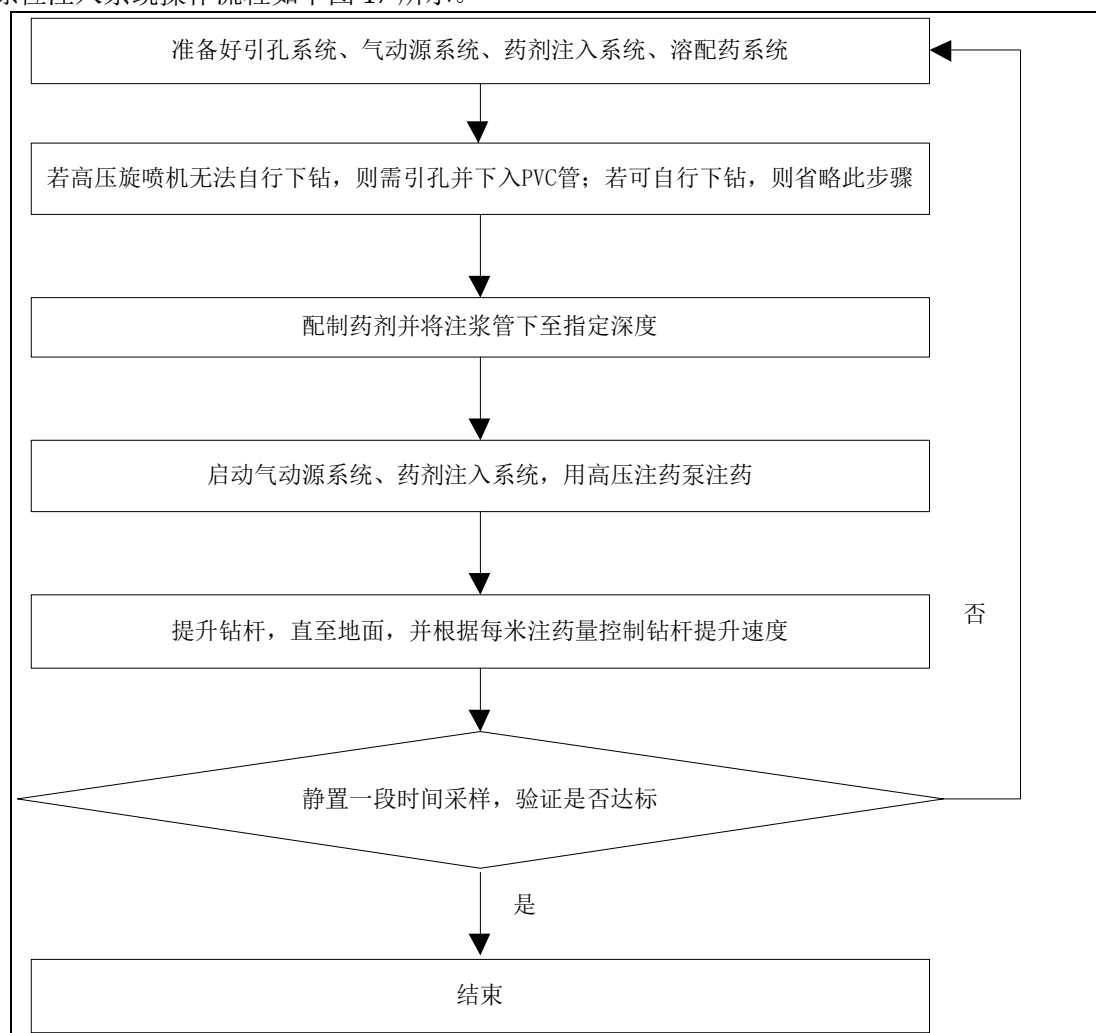


图 17 原位注入系统运行流程

11.4 系统运行操作、维护及监测

原位注入系统的维护及监测是保证设备运行畅通、设备操作人员安全的重要手段，主要包括用电安全、设备的维修保养等。

11.4.1 供电系统

- a) 供电系统的安装必须由持证电工安装、维护,非电工不得私自安装、维修、移动一切电器设备。
- b) 供电系统全部完整无损、动作可靠、绝缘良好,绝对不使用破损电器产品。
- c) 所有配电箱与开关箱均在其箱门出标注其编号、名称、用途和分路情况。
- d) 维修电工应严格按照电器操作规程进行维修、检验,并做好维修记录,按时检测接地电阻及机械设备、线路的绝缘电阻。配电箱、开关箱应上锁,钥匙由专人保管。
- e) 对现场各种用电设备进行定期检查,发现事故隐患必须立即消除,严禁设备带病运行。
- f) 定期组织电工及其他人员进行安全用电教育,加强施工现场人员的安全用电意识。
- g) 雷雨天禁止施工,防止雷击对设备、人员造成损害。

11.4.2 设备的维修保养

- a) 高压注浆泵封存前或调换工作场地需长时间停泵时,必须用清水彻底冲洗泵头工作腔、截止阀、安全阀及吸液、排出管道内的残余介质,擦干并涂上机油,以免产生干固,锈蚀。
- b) 运转中,柱塞密封若有介质泄漏,说明前端则型密封损坏,必须及时更换。以免引起泄漏及加剧密封损坏。注意压紧螺母不要调的太紧,以免导向密到抱死柱塞,使填料温升过高。
- c) 为了保证 v 型带的传动功率,应定期检查 v 型带的张紧程度。安装时,一组皮带应使用具有同一长度公差 of 的 v 型带,不得将不同长度的 v 带混合使用。
- d) 高压注浆泵运行时一般处于高压状态,需注意安全。必须配备具有相应知识的专人负责泵的操作、维护与保养,否则极易造成危害。
- e) 经常检查上、下阀座密封,如有损坏趋势,应立即更换。否则将进一步引起阀座损坏。
- f) 高压注浆泵的自吸能力欠佳,需将介质池面与泵的吸液端持平或例灌。
- g) 最好按照推荐的牌号,使用符合标准的润滑油,使用不合格的润滑油会降低曲轴的寿命,尤其是过于粘稠且不洁净的润滑油,会对曲轴,轴瓦等零件造成严重的损坏。野外施工时,地盘不得倾斜放置,否则会影响泵的润滑,影响正常使用。
- h) 经常检查安全阀体中膜片与高压通道之间是否通畅,防止堵塞。
- i) 经常检查各处的螺栓,防止松动。
- j) 经常检查输药管、中空钻杆等的密封情况,如出现泄漏或堵塞,必须立即排除。

12 系统运行效果监测及评估

在原位注入系统运行期间、运行停止后,均需对修复效果进行监测和评估,便于判断系统是否有效运行,是否达到修复目标可停止系统运行。

系统运行效果监测及评估主要通过注入井周边及地下水流向的下游区域建设适量地下水监测井,也可充分利用现有监测井/抽出井,进行地下水样品采集和检测。通过分析地下水中修复药剂、污染物、反应产物、相关地下水环境表征指标(如 pH、DO、ORP、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 等)的浓度变化,确定药剂是否到达修复目标层、药剂是否扩散覆盖修复范围、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,进而完成对整个系统运行的效果评估。

12.1 系统运行期间的修复效果评价

在系统运行之前,通过对修复区域及周边监测井中进行采样、检测,确定目标含水层地下水中污染物、相关地下水环境表征指标(如 pH、DO、ORP、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 等)的初始浓度水平。

系统运行期间,通过对流量计和压力计的读数,注入孔及周边区域是否出现药剂冒浆情况进行密切

关注，判断药剂是否达到目标含水层，进而确定修复效果。此外，定期对修复区域内监测井中地下水进行持续采样、检测，确定各指标的浓度变化趋势，尤其关注地下水中修复药剂、污染物及其反应产物的浓度变化，通过分析药剂和污染物的释放、迁移及反应过程，确定药剂的注入效果和覆盖范围。

若修复过程中产生大量气体或场地正在使用，则可能还需对挥发性有机污染物、爆炸下限（LEL）等参数进行监控，避免造成二次污染或发生爆炸等危险。

12.2 系统停止运行

若注入过程中，发生流量计、压力计读数异常，或者注入孔及周边区域出现药剂冒浆情况，立即停止系统运行。调整注入深度、注入流量、注入压力或者更换注入孔位置后，重新启动系统继续运行。

若通过对修复区域及其周边监测井地下水的采样、检测，确定污染物浓度已经达到修复目标值水平，即可以暂时系统运行。若短期内检测发现地下水中污染物浓度出现反弹迹象，需要重新启动系统进行药剂补充注入，直至污染物重新降低至修复目标值以下，短期内基本保持稳定，可停止系统运行。

12.3 整体修复效果评估

通过对修复范围内及周边区域，尤其是下游区域监测井中地下水进行长期采样、检测，判断场地内地下水中污染物是否达到修复目标，评估系统运行的总体修复效果。

判断污染物是否达到修复目标，可采用单因子指数法，即根据评价时段内所有监测井点位中所有污染物类别最高的一项来确定。

$$S_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{C_{s,j}}$$

式中：S_{i,j}——评价污染物 i 在监测井 j 的标准指数；

C_{i,j}——评价污染物 i 在监测井 j 的实测统计代表值，mg/L；

C_{s,j}——评价污染物 i 的修复目标值，mg/L。

污染物的标准指数≤1 时，表示该区域地下水中污染物的浓度已经达到修复要求。污染物的标准指数>1，表明该污染物的清除仍未达到修复要求。污染物的标准指数越小，说明修复效果越好。

通过分析地下水中残留的修复药剂及其与污染物的反应产物的浓度水平，判断修复过程是否对场地内及周边区域的地下水环境造成二次污染。

13 建设规模与投资估算标准（德瑞森科）

该技术的建设规模与场地污染范围、目标含水层深度、特征污染物等场地污染特征密切相关，场地污染特征决定注入系统的选择、修复药剂种类及其用量、修复时间等规模指标。一般来说，该技术的修复速度相对较快，通常需要 3-24 月的时间。修复地下水污染羽流区域通常需要更长的时间。

该技术的投资估算与地下水修复量、特征污染物、渗透系数、药剂注入影响半径、修复目标和建设

规模等因素相关，主要包括注入井和监测井的建造费用、修复药剂费用、样品检测费用、人工费用及其他配套费用（如设备购置或租赁费、设备维修保养费及水电费等），公式如下。

$$W_{\text{总}} = W_{\text{建井}} + W_{\text{药剂}} + W_{\text{检测}} + W_{\text{人工}} + W_{\text{配套}}$$

式中： $W_{\text{总}}$ ——某一场地采用原位注入技术修复的总成本，元；

$W_{\text{建井}}$ ——原位注入修复过程中的监测井、注入井等建井费用，元；

$W_{\text{药剂}}$ ——原位注入修复过程中的药剂费用，元；

$W_{\text{检测}}$ ——原位注入修复过程中的样品检测费用，元；

$W_{\text{人工}}$ ——原位注入修复过程中的人工费用，元；

$W_{\text{配套}}$ ——原位注入修复过程中的其他配套费用，元。

根据美国相关经验，使用原位注入技术修复污染地下水的处理成本约为 100-150 美元/m³。

附录 A 典型案例

（资料性附录）

附录 A.1 典型案例一

1.1 场地概况

该场地位于西北高原，是典型的铬污染场地。占地面积约为 8.3 万 m^2 ，于 1988 年建成，1989 年投入试生产，1999 年破产。从投入生产至破产的 10 年间累计生产红矾钠($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$)约 4000t，生产过程中排放的高浓度六价铬废水、红矾钠生产母液以及简单堆放的 4.8 万 m^3 铬渣严重污染了铬盐厂内外的土壤及地下水。被污染的地下水又以泉群形式转变为地表水后进入河流，汇入当地水库。该水库原为饮用水源地，现为农业用水水源。

该化工厂自关闭以来，遗留的铬渣都已进行了处理，但被六价铬污染的生产构筑物、土壤和地下水一直未进行全面处治，其铬酸酐制造厂房和红矾钠制造厂房、厂区原铬渣堆场等污染源仍然威胁着河流和周边居民的健康，阻碍了当地经济的快速发展。

场地周边为青稞种植地、油菜种植地和牧场（见图 1）。场地附近有乡村公路通达国道 G315 公路，交通比较便利。周边主要以农牧业为主，种植青稞、油菜，总面积 4580.07 平方公里，总人口为 2.44 万人，其中藏、蒙、回、土等少数民族约占一半。



图 1 场地位置示意图

该场地位于祁连山南支脉—达坂山东段南缘，盆地东北部山前冲洪积平原，地势较平坦，地面高程 2935.3~2966.3 m，相对高差约 31m。

场地东南西北四个方向被农田、生活区以及河流所环绕，具体如图 1.2 所示：（1）东侧：草原牧场；（2）南侧：草原牧场，距离场区南侧 700 m 处有一处铬渣堆场；（3）西侧：草原牧场，距离场区西侧 1.3 km 处分布有村庄，西北方向 1 公里处有多个地下水流出的泉眼；（4）北侧：北面约 100 m 有大片的油菜种植地，500 m 左右有一个机井泵房取用地下水。

该场地位于河流源头，沿 315 国道纵贯全境。场地位于祁连山南支脉—达坂山东段南缘，属山前冲洪积平原，周边为放牧的大草原，附近有 3 个小村庄。气候属典型的高原干旱半干旱大陆性气候，具有冬季寒冷、夏季凉爽、干旱多风、昼夜温差大的特点。年平均降水量 277~499mm，最大降水量 512.3mm，平均蒸发量 2364.7mm，年平均气温 0.2~3.4℃，历年极端最高气温 30.5℃，极端最低气温 -32.6℃，主导风向多为西北和东南，平均风速 2.1m/s，最大风速 22.3m/s，全年平均日照时数约为 2580~2750h，标准冻深 1.81m。

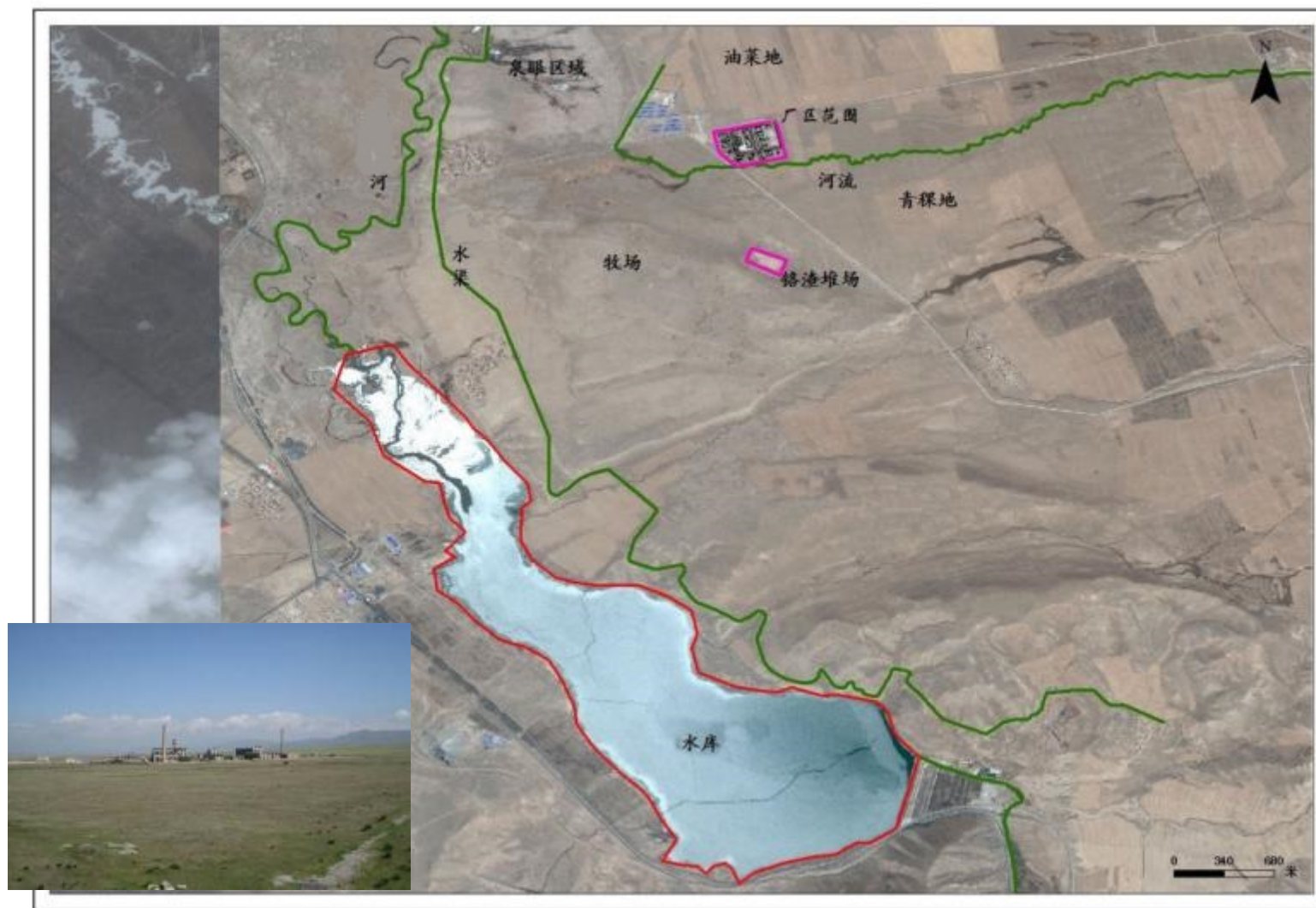


图 2 场地周边环境图

1.2 场地历史情况

1.2.1 场地原始生产工艺

该场地破产多年，所涉及的基本资料多已难于找到，根据现场情况，结合采访咨询信息推断，红矾钠产品采用硫酸法生产，硝酸酐采用硫酸熔融法生产。主要原料铬铁矿来源于祁连山，其他原材料绝大部分来源于该州或该省境内，储量丰富，运输方便。化工厂采用我国铬盐生产的常用方法——纯碱焙烧硫酸法，具体生产工艺流程见图 3。

该工艺的缺点是铬提取率低、产渣量大（每生产 1 t 重铬酸钠产生 1.8 – 3 t 铬渣），造成资源、能源的极大浪费和严重的环境污染；生产过程中还需在焙烧原料中加入石灰石、白云石等炉料填充剂，因此产生的铬渣中含有大量的钙镁化合物而呈碱性，其组成随原料产地和生产配方的不同而有所改变。

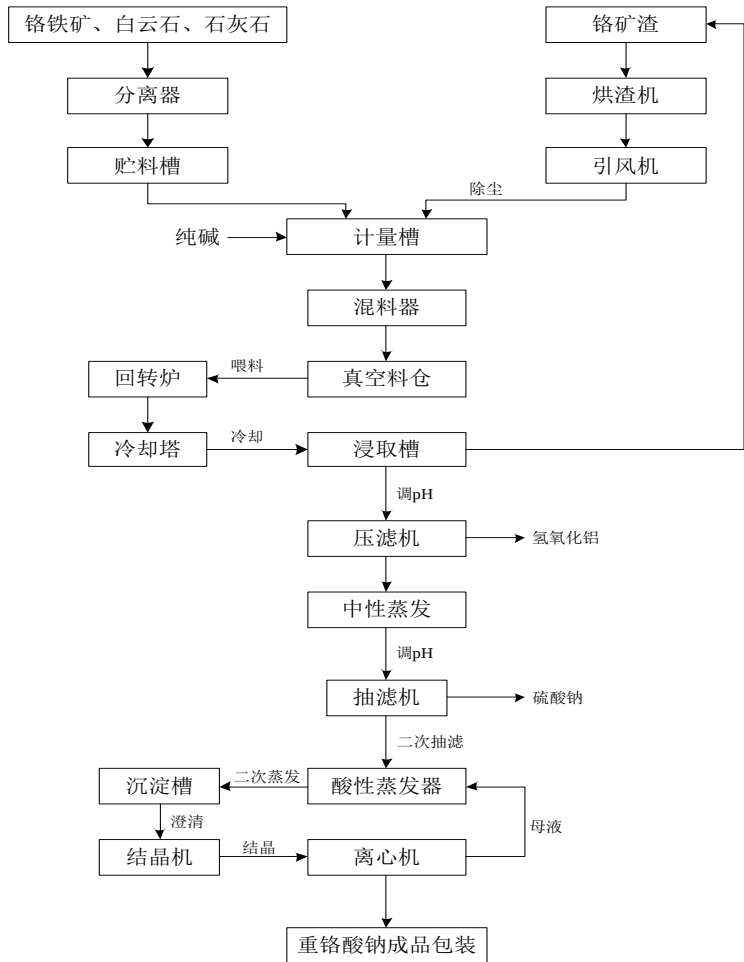


图 3 纯碱焙烧硫酸法生产红矾钠的工艺流程

1.2.2 场地原始生产布局

该场地始建于 1988 年，1989 年投入试生产。设计规模为年产铬酸酐 1,800t，生产红矾钠（重铬酸钠）3,000t，投资 4,723.08 万元。

该化工厂内原生产布局和功能分布如图 1.5 所示，以厂区内的道路为界，整个厂区可以分为三个功能区，厂区右上部分为两条道路所围，包括生产车间、产品库房、原料库房、铬渣堆场等建筑，相当于厂区的生产制造区域；道路南面部分包括锅炉房、水处理车间、循环水冷却车间、机修车间、燃料储备车间等，相当于生产辅助区域；道路西端包括办公楼、医务保健楼等，相当于办公区域。

场地污染集中在铬酐车间、红矾车间、浸出车间、铬渣堆场等区域，该区域土壤均被六价铬污染，呈黄色，如图 4 所示，最大污染深度 21m，最高污染浓度高达 10000mg/kg，高于修复目标 199 倍。



图 4 六价铬污染土壤



图 5 场地原始生产布局示意图

1.3 场地水文地质条件

该场地所处的大地构造部位隶属于祁吕贺山字形构造体系西翼反射弧与前弧衔接处,系由一系列紧密的褶皱、断裂及凹陷盆地所组成,河西构造体系仅于达坂山—团保山北坡表露。本区所处的大地构造部位分析,构造应力场的主压应力应当于东北—南西向,因此,在区内产生了一系列北西—南东向构造群体。

纵观全区构造形迹的展布规律,大致可归纳为两组:一组以西北 20°-60°方向延展,与区域构造线基本吻合;另一组以北东 20°-30°方向延展,与区域构造线斜交。无论是山字型构造体系或河西构造体系,均表现了强烈的“控水”作用,特别在两组断裂的交接复合部位其“控水”作用尤为明显。

1.3.1 地形地貌

勘察场地位于祁连山南支脉—达坂山东段南缘,属山前冲洪积平原,地势较平坦,地面高程 2935.3~2966.3 m,地面高程地东北,相对高差约 31m。

1.3.2 地层岩性

本次勘察揭露地层为第四系松散堆积物,地基土自上而下依次为黄土状土(Q^{4al+pl})、砾砂(Q^{4al+pl})、粉质粘土(Q^{4al+pl})、粉砂(Q^{4al+pl})及圆砾(Q^{4al+pl})、其岩性特征及分布规律分述如下:

①黄土状土(Q^{4al+pl}):浅黄色、灰黑色,松散,稍湿—饱和,土质较均匀,全场地均有分布,厚度不均匀,层厚 0.2m。

②砾砂(Q^{4al+pl}):青灰色,稍密-中密,潮湿-饱和,砂质较纯净,粒径大于 20mm 者含量约占 35%,最大粒径 40mm,主要成分为砂岩、花岗岩及其它暗色变质岩,顶面埋深 0.0-1.5m,揭露厚度 1.5-8.7m (局部未揭穿)。

③圆砾(Q^{4al+pl}):青灰色,稍密-中密,潮湿-饱和,最大粒径 120mm,一般粒径 5-30mm,粒径大于 20mm 者约占 30%,2-20mm 者约占 55%,余为中细砂,砾石磨圆较好,多呈次圆状,分选较好,主要成分为砂岩、花岗岩及其它暗色变质岩,分布在勘察场地的大部分地段,顶面埋深 0.2-5.7m,揭露厚度 2.9-8.6m (未揭穿)。

③—1 粉质粘土(Q^{4al+pl}):灰黄色,软塑,土质较均匀,干强度、韧性高,切面光滑,有光泽反应,以透镜体状分布;该层在 ZK1 附近 50.1m 处分布,厚度 2.1m,为场地区第一层隔水层。

③—2 粉砂(Q^{4al+pl}):浅黄色,稍密-中密,潮湿-饱和,砂质较纯净,颗粒较均一,以透镜体状分布。

该污染场地地形地貌条件简单,相对平坦、开阔,无不良地质现象和液化土层。

1.3.3 水文条件

该场地地处河流源头,西面 2km 处为河流,西南面约 5km 处是水库,厂区南面有条季节性的小溪流,自东向西汇入主河流。

场地区域地下水资源较为丰富,主要为第四系松散岩类孔隙潜水,赋存在第四系松散砂砾层之中。据水文地质普查报告,该地区含水层厚度 60-80 m,地下水单井涌水量 1156.03 m³/d。盆地的东北部是该盆地地下水的补给区,地下水主要由大气降水补给,流向沿东南向西北方向涌流,在距厂区 2 km 处三个泉泄出,部分以地下形式补给河流。

1.4 场地污染概况

自 2008 年开始,该场地共计进行了四次污染调查并进行了风险评估,依据调查和风险评估结果:厂内共有六价铬污染土壤 236800 方;厂内共有原生产车间、原料仓库等受污染的建筑物 8 座,共有六价铬污染建筑垃圾 4 万方。厂外铬渣堆共有污染土壤 252368 方,尚未开展治理工作。场地内及渣场的修复范围三维图见图 6 及图 7。

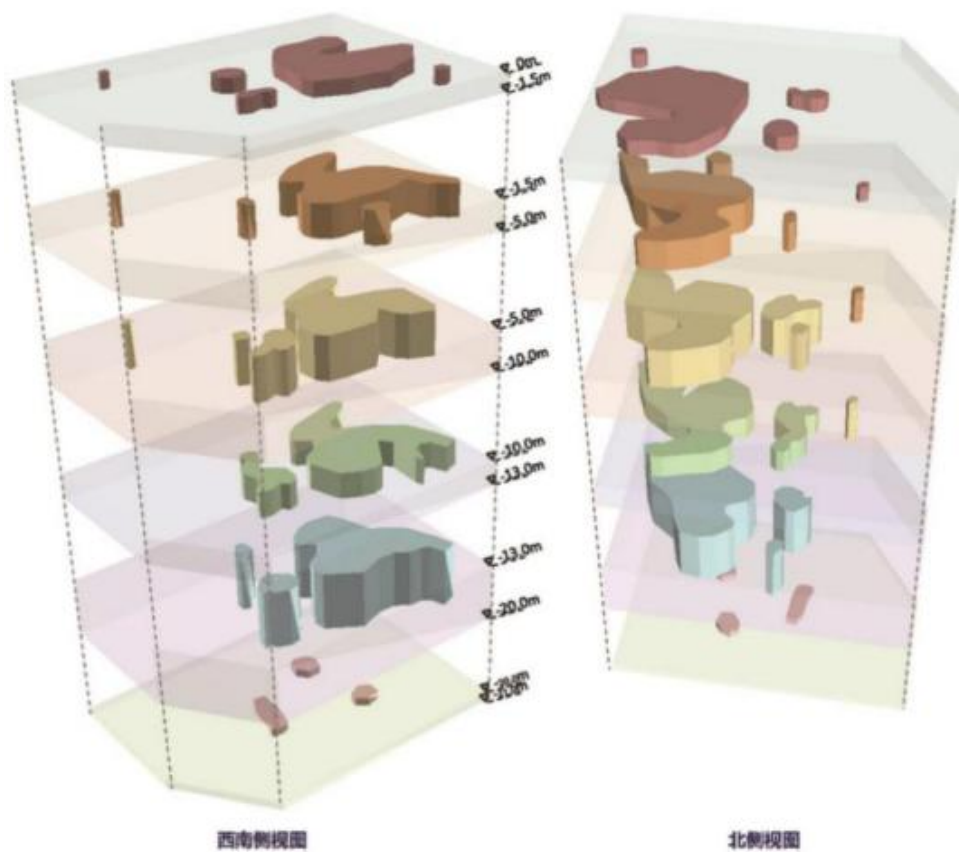


图 6 厂区土壤六价铬污染修复范围三维图

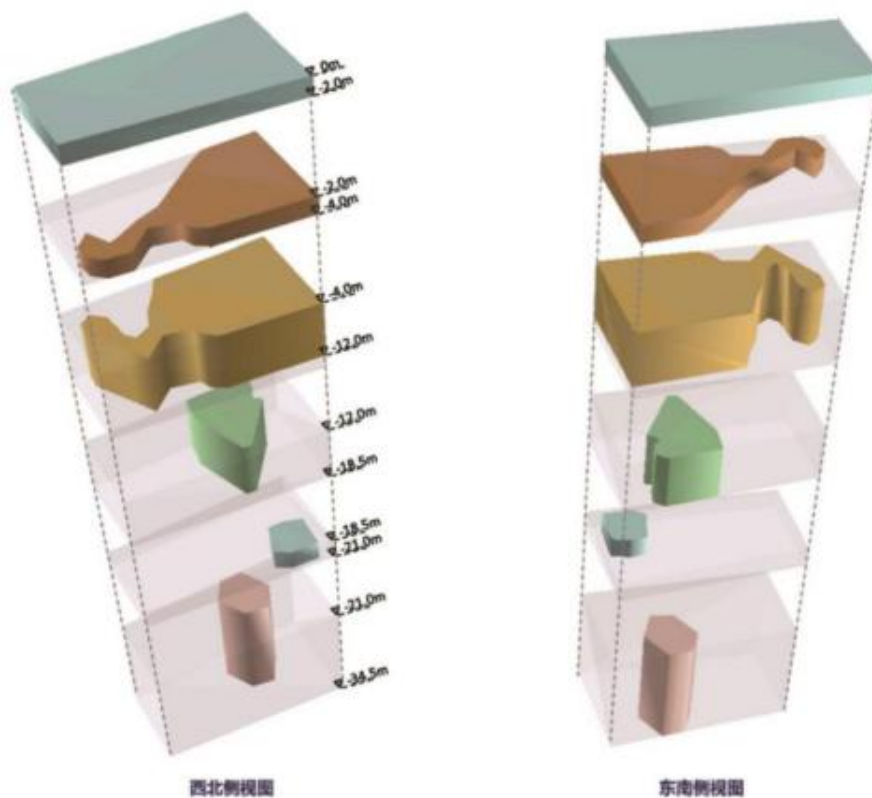


图 7 渣场土壤六价铬污染修复范围三维图

六价铬溶解性较强，易随地下水迁移。依据环境污染和水文地质调查结果，该场地厂区内地下水污

染最严重，且早已迁移至下游地下水和地表水体中。地下水的流向为东南向西北，污染的地下水在场地西北 1km 处经由泉眼出露转变为地表水，然后汇入河流，最终汇入当地水库。

因此该场地厂区下游泉眼、河流和当地水库均有六价铬检出。地下水最高浓度为 1410mg/L，总污染总面积达 355.68 万 m²。2016 年地表水采样结果见表 1，从表中可以看出，厂区下游地表水中六价铬最大检出浓度为 26 mg/L，超标 520 倍（目标值 0.05 mg/L）。

表 1 地表水采样结果

样品编号	采样位置	pH 值	悬浮性总固体	六价铬	铬
单位	/	/	mg/L	mg/L	μg/L
检出限	/	0.01	1	0.01	1
HBQS1	泉眼	8.18	6	26	26700
HLJH1	泉水汇入河流的上游	7.73	5	<0.010	<1.0
HLJH2	泉水汇入河流处	7.69	6	1.32	1370
HLJH3	泉水汇入河流的下游	7.82	5	0.049	53
DDTSK1	河水汇入水库处	6.98	5	0.015	19.6
DDTSK2	水库中间	7.1	7	<0.010	9
DDTSK3	水库下游边界	7.63	6	0.023	27

1.5 场地修复目标值介绍

该场地采用科学合理、技术可行、经济可行、具有针对性与操作性的场地治理（修复）技术来转化、转移或消除场地中的六价铬污染物，使目标场地对暴露人群的健康风险控制可在可接受水平之内，依据风险评估结论，六价铬污染铬渣土修复目标确定为 50 mg/kg。

场地周边主要为农田和工厂，且场地下地下水汇入水库后一部分用作灌溉用水。依据风险计算和评估，确定下游地下水排泄点（泉眼）处六价铬浓度达到地下水 III 类水标准 0.05 mg/L，该标准适用于农业和部分工业用水，适当处理后可作生活饮用。考虑化工厂厂区至排泄点（泉眼）之间的自然衰减作用，厂区内地下水中六价铬修复标准为 0.5 mg/L。

1.6 原位注入修复参数确定

本次原位注入系统应用，先在场内开展多组实验，摸索确定最佳设备和施工参数，为原位注入修复奠定基础。



图 8 污染土壤/地下水原位注入实施照片

根据系统组成及具体操作流程：引孔时有相应的钻孔布设参数；药剂注入时所注药剂要有相应的投加量、加水量等参数；设备运行时也要有相应参数。

1.6.1 主要设备参数

本系统包含了各种设备，如高压旋喷机、高压注浆泵和空压机，每种设备都有相应的参数指标。

（1）高压旋喷设备主要参数

本次铬污染场地原位注入修复技术采用 XPL-50A 型锚固旋喷钻机，采用双重管旋喷方式进行药剂注入。其最大钻孔深度为 50m，钻杆直径Φ为 73mm，钻杆采用 3 米长钻杆，并配备有精确的钻塔垂直度显示装置，钻机对孔、定位准确快捷。

（2）高压注浆泵设备主要参数

本次铬污染场地原位注入修复技术采用 GZB-40C 型高压注浆泵，为高压旋喷钻机配套设备，其额定压力为 40Mpa，药剂注入量可达 110L/min。

在现场时间运行过程中，其压力设置为 30Mpa，钻杆提升速度小于 0.14m/min，药剂注入量约 250L/m。

（3）空压机设备主要参数

本次铬污染场地原位注入修复技术采用 HB537X-8 型艾格赛斯螺杆式空气压缩机，其额定排气压力为 0.8Mpa。

现场运行过程中，其压力设置为 0.6-0.7Mpa。

不同场地污染程度不同、水文地质条件不同，注射设备的实施参数差异较大，以下以青海某场地为例进行介绍。该项目高压旋喷工艺所需主要设备/设施参数如下表 2 和 3 所示。

表 2 高压旋喷工艺所需设备/设施一览表

设备/设施名称	功能或作用	作业能力	数量	单位	备注
高压旋喷钻机	实现药剂的原位注入	144 m/天	2	套	配套高压注浆泵设备、空压机
引孔钻机	注射前引孔	150 m/天	2	台	
药剂仓库	储存 S 药剂	420 m ²	1	座	
药剂站	药剂配置		2	套	配置药剂

表 3 高压旋喷设备主要工艺参数表

序号	项目	参数值	单位
1	药剂溶质浓度	29%溶液	
2	单孔注射量（药剂+清水）	4.5	m3
3	注浆压力	25-30	Mpa
4	注浆流量	50	L/min
5	空气注射压力	0.7	Mpa
6	空气流量	3	m3/min
7	正负零高程	24.034	m
8	钻杆提升速度①	10	cm/min
9	钻杆旋转速度①	8	r/min
10	最大掘进深度	-18	m
11	设计停浆面	-6	m

1.6.2 钻孔布设参数

利用引孔系统引孔时，需要确定钻孔孔间距及引孔深度，其中孔深是由土壤/地下水污染的最大深度确定；孔间距是由药剂注入时药剂扩散影响半径来确定，药剂扩散影响半径是指在进行原位药剂注入时，药剂只能扩散到周边的一定范围，这个范围称为药剂扩散影响半径，在实际运行过程中，要根据现场中试来确定药剂扩散影响半径。

（1）中试试验相关参数

在实际过程中，根据现场中试来确定药剂扩散影响半径或钻孔间距：即通过对不同钻孔间距的钻孔进行高压旋喷原位注入试验，观察返浆情况，当基本无返浆时，就是要确定的最优参数。本次进行了 A、B、C、D 共 4 组试验，每组试验均按“梅花桩”形式布置 3 口注入井，如下图所示：

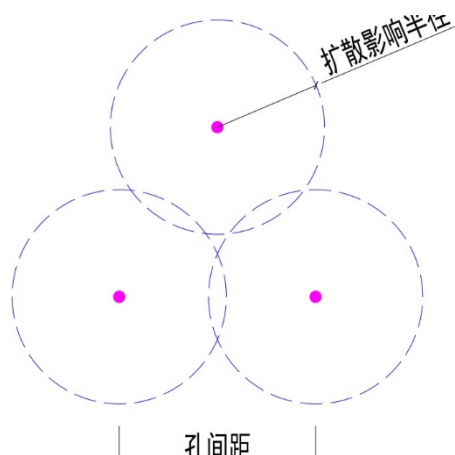


图 9 中试试验点布置图

扩散影响半径及钻孔间距分别为：

- A 组试验（套管护壁引孔；扩散影响半径 1.5m，钻孔间距 2.5m）；
- B 组试验（套管护壁引孔；扩散影响半径 0.9m，钻孔间距 1.6m）；
- C 组试验（套管护壁引孔；扩散影响半径 0.8m，钻孔间距 1.4m）；
- D 组试验（套管护壁引孔；扩散影响半径 0.75m，钻孔间距 1.3m）。

4 组试验其它相关参数相同，见下表 1.4。

表 1.4 中试试验相关参数表

泵压 (Mpa)	气压 (Mpa)	钻孔孔径 (mm)	钻杆提升速度 (cm/min)	每延米注药量 (L/m)
30	0.7	130	10-25	200-300

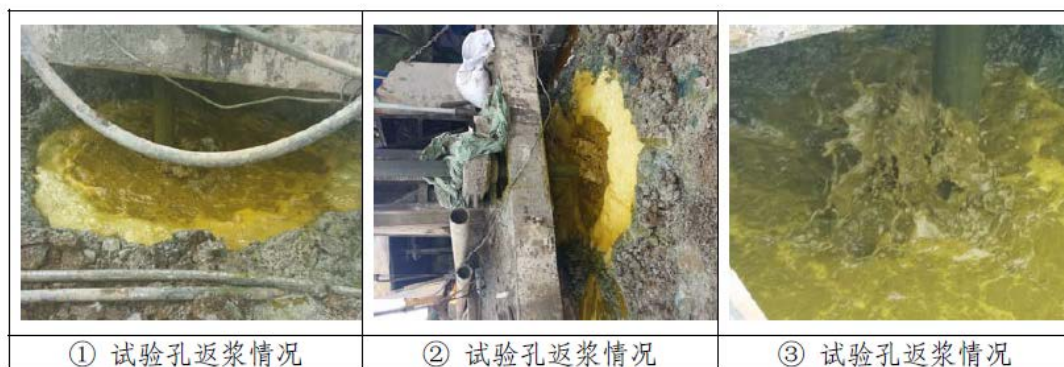
(2) 中试试验返浆情况

A、B、C、D 4 组试验返浆情况如下：



返浆较为严重

图.10 A 组试验返浆情况



① 试验孔返浆情况

② 试验孔返浆情况

③ 试验孔返浆情况

图 11 B 组试验返浆情况

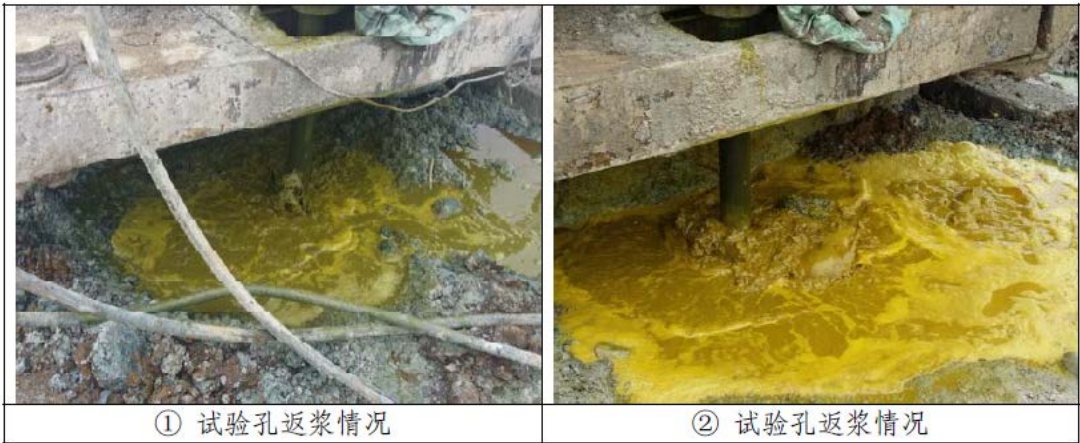


图 12 C 组试验返浆情况



图 13 D 组试验返浆情况

根据上述 4 组试验的返浆情况，D 组试验确定的影响半径和钻孔间距是最优参数，即本次铬污染场地原位注入修复确定的药剂扩散影响半径为 0.75m、钻孔间距为 1.3m。

表 5 原位高压旋喷注射钻孔布设参数表

孔距（m）	扩散半径（m）	布孔密度（个/100m ² ）	钻孔（引孔）总数（个）	旋喷总延米（m）
1.3	0.75	64	128	3072

本次注射修复区域长 20m、宽 10m、厚 17m，面积为 200m²，共设置了 128 个药剂注入孔(如下图所示)。

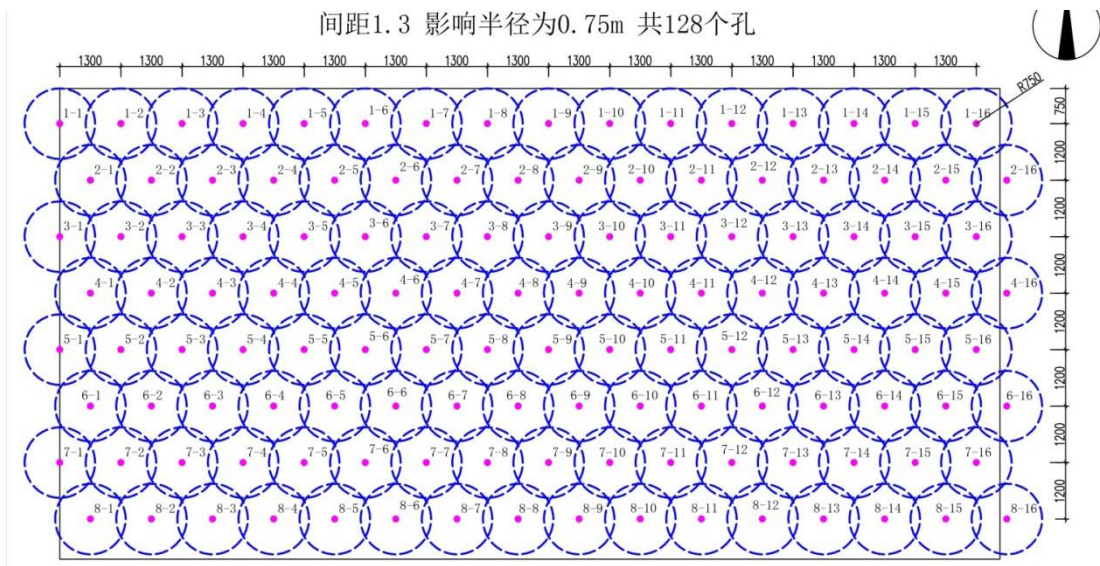


图 14 原位注射布点示意图

1.7 药剂投加参数

在进行原位注入修复时，为了保证污染物质能与药剂充分反应，一是要保证足够药剂投加量，使药剂能与污染物质充分反应；二是要在注入的药剂中加入足够的水，向污染土壤/地下水中注入药剂与水的混合物，这样才能保证药剂注入到非饱和层土壤后，能扩散到设定的影响半径、充满大部分土壤孔隙，因此要计算药剂投加量、加水量等参数。

根据现场中试结果确定的药剂扩散影响半径、土壤/地下水污染深度、土壤/地下水污染物含量等计算每个钻孔的药剂投加量、加水量，计算步骤如下：

本次铬污染场地原位注入修复包括非饱和层（1-18m）污染土壤和饱和层（18-24m）污染土壤及地下水的修复，修复区域长为 20m、宽 10m，总修复面积为 200 m²；采用的修复药剂为 D 药剂溶液(29%)，简称 D 药剂。非饱和层（1-18m）污染土壤和饱和层（18-24m）污染土壤/地下水的污染情况不同，因此药剂投加量、加水量等参数应按非饱和层和饱和层分别计算：

1.7.1 非饱和土壤修复药剂投加量、加水量计算

（1）非饱和层土壤修复药剂投加量计算

首先计算单孔所需的药剂量，计算步骤如下：

一、根据高压旋喷注射影响半径、修复厚度及土壤湿重计算出单孔污染土壤质量；再根据非饱和层土壤中六价铬平均浓度计算出单孔污染土壤中六价铬含量；

二、用 D 药剂消除污染土壤中六价铬的反应基本上就是纯化学反应，反应摩尔比为 3:2，折算为质量比也就是 D 药剂质量：六价铬质量= 5.77 : 1，按此质量比计算出单孔理论所需药剂量为 0.12t；

三、但土壤中其它成份可能也会和 D 药剂产生反应，而且药剂在通过钻孔注入过程时，孔与孔之间会存在重叠区域，故设计药剂的安全系数为 2.35，实际所需纯药剂量约为 0.29t；

四、采购的药剂为 D 药剂含量为 29%的溶液，根据 D 药剂溶液的浓度计算出实际所需 D 药剂质量（29%溶液）为 1.0t；再根据 D 药剂溶液（29%）密度计算出 D 药剂溶液(29%)实际需求体积为 0.80m³；而每桶 D 药剂溶液(29%)的体积为 0.20m³，因此非饱和层土壤修复单孔所需 D 药剂溶液 4 桶，具体计算过程及参数值见表 6。

表 6 非饱和层土壤修复单孔所需 D 药剂投加量估算

参数	数量	单位
影响半径	0.75	m
非饱和层单孔修复面积	1.77	m
非饱和层修复厚度	17.00	m
土壤湿重	1.80	g/cm ³
污染土壤质量	54.05	t
土壤六价铬平均含量	400.00	mg/kg

六价铬质量	0.02	t
D 药剂质量：六价铬	5.77	
理论所需 D 药剂质量	0.12	t
安全系数	2.35	
实际所需 D 药剂质量	0.29	t
实际所需 D 药剂质量（29%溶液）	1.00	t
D 药剂溶液（29%）密度	1.27	kg/L
D 药剂溶液(29%)实际需求体积	0.80	m ³

整个修复区域长 20m、宽 10m、厚 17m，面积为 200m²，共设置了 128 个药剂注入孔(如下图所示)，单孔所需 D 药剂为 0.8 m³。

（2）非饱和层土壤修复加水量计算

非饱和层土壤修复加水量计算以每桶 D 药剂溶液（29%）所需加水量为准，具体据算步骤如下：

一、根据影响半径和非饱和层修复厚度计算单孔修复区域土壤体积，再根据孔隙度（假定为 0.4）计算单孔注射范围内空隙体积为 12.01m³；

二、设定药剂的充满度（设定为 0.35），根据此值计算出单孔修复区域需要注入药剂与水的总量为 4.2m³；

三、单孔修复区域孔隙注入的药剂与水的总量减去药剂量为加水量，加水量为 3.4 m³；

四、加水量除以所需药剂桶数（4）为每桶所需水量为 0.85m³。

具体计算过程及参数值见表 7：

表 7 非饱和层土壤修复单孔所需加水量估算

参数	数量	单位
影响半径	0.75	m
非饱和层单孔修复面积	1.77	m
非饱和层修复厚度	17.00	m
孔隙度	0.4	
单孔注射范围内空隙体积	12.01	m ³
单孔修复区域孔隙注射药剂充满度	0.35	
单孔修复区域孔隙注入的药剂与水的总量	4.2	m ³
单孔修复区域孔隙注入的药剂量	0.8	m ³
单孔修复区域孔隙注入的加水量	3.4	m ³

1.7.2 饱和层土壤及地下水修复药剂计算

（1）饱和层土壤及地下水修复药剂投加量计算

首先计算单孔所需的药剂量，计算步骤和非饱和层相似，如下：

一、根据高压旋喷注射单孔影响半径、修复厚度及土壤孔隙度计算出饱和层水体体积；再根据饱和层地下水六价铬平均浓度计算出单孔地下水中六价铬含量为 1.696Kg；

二、根据 D 药剂质量与六价铬反应的质量比（5.77），计算出单孔理论所需药剂量为 9.78Kg；

三、但地下水是赋存于土壤中的，土壤中六价铬和其它成份也会和 D 药剂产生反应，而且药剂在通过钻孔注入过程时，也会扩散到非污染区，故设计药剂的安全系数为 8，实际所需纯药剂量为 78.27Kg；

四、再根据 D 药剂溶液（29%）密度计算出 D 药剂溶液(29%)实际需求体积为 0.80m³；而每桶 D 药剂溶液(29%)的体积为 0.20m³，因此非饱和层土壤修复单孔所需 D 药剂溶液 4 桶

采购的药剂为 D 药剂含量为 29%的溶液，根据 D 药剂溶液（29%）的含量计算出 D 药剂溶液（29%）质量为 0.27t；再根据 D 药剂溶液（29%）密度计算出 D 药剂溶液(29%)实际需求体积为 0.212m³；每桶

D 药剂溶液(29%)的体积为 0.2m³，因此饱和层土壤及地下水修复单孔所需 D 药剂溶液 1.060 桶，为了方便现场药剂配制，取值为 1.00 桶；具体计算过程及参数值见表 8。

表 8 饱和层土壤及地下水修复单孔所需 D 药剂投加量估算

浅层井六价铬平均浓度	400.000	mg/L
土壤假定孔隙度	0.400	
浅层井修复厚度	6.000	m
影响面积	1.766	m ²
影响半径内体积	10.598	m ³
影响半径范围内孔隙体积	4.239	m ³
饱和层水体体积	4.239	m ³
地下水中六价铬质量	1.696	kg
D 药剂和六价铬的质量反应比	5.770	
D 药剂理论需求量	9.784	kg
D 药剂安全系数（考虑饱和层土壤）	8.000	
纯 D 药剂实际需求质量	78.27	kg
D 药剂溶液（29%）质量	0.270	t
D 药剂溶液（29%）密度	1.273	kg/L
D 药剂溶液(29%)实际需求体积	0.212	m ³
每桶 D 药剂溶液(29%)的体积	0.20	m ³
D 药剂溶液(29%)实际需求体积	1.00	桶

整个修复区域长 20m、宽 10m、厚 6m，面积为 200m²，共设置了 128 个药剂注入孔，单孔所需药剂桶数为 1.00 桶，因此整个饱和层修复区域共需要 D 药剂溶液(29%)128 桶，质量约 32t。

（2） 饱和层土壤及地下水修复加水量计算

饱和层土壤及地下水修复加水量计算以每桶 D 药剂溶液（29%）所需加水量为准，具体据算步骤如下：

- 一、根据影响半径和非饱和层修复厚度计算单孔修复区域土壤体积，再根据孔隙度（假定为 0.4）计算单孔注射范围内空隙体积为 4.24m³；
 - 二、设定孔隙饱和水被药剂与水混合物的替换度（设定为 0.33），根据此值计算出单孔修复区域需要注入药剂与水的总量为 1.4m³；
 - 三、单孔修复区域孔隙注入的药剂与水的总量减去药剂量为加水量，加水量为 1.2 m³；
 - 四、加水量除以所需药剂桶数（1）为每桶所需水量，为 1.2m³。
- 具体计算过程及参数值见表 9。

表 9 饱和层土壤及地下水修复单孔所需加水量估算

参数	数量	单位
影响半径	0.75	m
饱和层单孔修复面积	1.77	m
饱和层修复厚度	6.00	m
孔隙度	0.4	
单孔注射范围内空隙体积	4.24	m ³
单孔修复区域孔隙饱和水替换度	0.33	
单孔修复区域孔隙注入的药剂与水的总量	1.4	m ³

单孔修复区域孔隙注入的药剂量	0.2	m ³
单孔修复区域孔隙注入的加水量	1.2	m ³
单孔修复区域 D 药剂溶液(29%)实际需求桶数	1	桶
每桶 D 药剂溶液（29%）所需水量	1.2	m ³

1.8 原位注入施工

（1）场地平整和压实：正式进场施工前，进行管线调查后，清除施工场地地面以下 1 m 以内的障碍物，不能清除的做好保护措施，然后整平、夯实，以方便后续工程设备的作业和施工；同时合理布置施工机械、输送管路和电力线路位置，确保施工场地的“三通一平”。

（2）设备准备和调试：现场需要的主要设备包括药剂罐、高压注浆泵、空压机、旋喷柱、套管和旋喷头。机械、设备进场后，为保证施工顺利进行，施工前，需对相关设备进行调试。需要调试的主要机械设备有空压机、注浆机、管道和钻杆。根据设计要求，施工时空气压力需达到 0.7 MPa，注浆压力为 28 MPa，管道通路正常，其它连接处无漏气。因此，通过高压注水检查相关参数是否能达到预期设计。空压机和注浆泵主要关注压力；空气管道和注浆管道主要关注连接处是否漏气或漏液；钻杆主要关注喷孔喷液是否正常及连接处是否漏气。



图 15 注浆泵和空压机

（3）钻探点位和测量：根据设计好的注入影响半径，将注入点位的坐标进行现场放点，影响半径为 0.75 米，为保证影响半径之间有重合，要求扩散半径覆盖范围不能出现药剂达不到的“盲区”，钻孔间距设计为 1.3 m。布设的点位用小旗子标记，一点一签，保证钻孔中心移位偏差小于 50 mm。并撒白灰标识，确保机械准确定位。

（4）引孔钻探：首先将 18 米的引孔钻探完成，钻进过程中防治塌孔配合泥浆护壁，成孔后孔壁附着较多泥浆。若泥浆过多导致堵塞土壤中孔隙，不利于药剂扩散，可使用空压机将过多泥浆洗出，但不能清洗过多，导致塌孔。

（5）药剂调配和试喷：配制 S 药剂溶液时，需至少在药剂注入前 30 min~60 min 配制。



图 16 药剂调配和试喷

（6）喷头下放和旋喷：当高压旋喷钻杆钻进至设计深度后，接通注浆泵，然后由下向上一边提升钻杆，一边喷射药剂。喷射时，应先达到预定的喷射压力后再逐渐提升钻杆。一般当喷嘴下沉到设计深度时，在原位置旋转 10 s 左右，待孔口冒浆正常后喷射压力即符合要求。钻杆的旋转和提升应连续进行，不得中断。中间发生故障时，应停止提升和旋喷，以防桩体中断，同时立即检查排除故障，重新开始喷射注浆的孔段与前段搭接不小于 1 m。在旋喷提升过程中，可根据不同的土层，调整旋喷参数。喷

作业系统的各项工艺参数都必须按照预先设定的要求加以控制，并随时做好关于旋喷时间、用浆量，冒浆情况、压力变化等的记录。

(7) 静置反应和封孔：由于化学还原反应速度相对较快，在旋喷药剂的同时也保证了一定的水分进入土壤中，在保证一定持水率的情况下药剂反应可以达到最高效。在保证反应时间在 10 天以后，可以基本保证药剂与污染物进行了充分反应。还原药剂与土壤混合施工完成后，药剂与土壤的化学反应需要一段时间，在此期间内需对土壤中的参数进行监测。

综上所述，通过前期研究和污染场地的修复中试工作，本单位积累了大量关于原位高压旋喷注入修复污染土壤/地下水的宝贵经验，对本次污染土壤/地下水原位注入专业设备的研发具有很大帮助。

1.9 修复后的土壤/地下水六价铬含量与修复目标值对比

本次铬污染土壤、饱和含水层污染地下水的原位高压注入工程共对长 20m、宽 10m、总面积为 200m² 的区域内的非饱和层土壤（1-18m）和饱和层（18-24m）土壤/地下水进行了原位修复。修复的目的是减少或消除土壤/地下水中六价铬，减小六价铬污染风险，具体的修复目标值为：修复区域内的土壤六价铬含量为 50mg/kg，修复区域内地下水六价铬浓度达到 0.5mg/L。

为了检验原位高压注入工程的修复效果，一是将修复后的土壤/地下水六价铬含量与修复目标值进行对比，看其是否满足修复目标；二是将修复后的土壤/地下水六价铬含量与修复前的进行对比，看含量降低的百分率。下面从上述两方面分析原位高压注入工程的修复效果。

在 200 m²修复区域原位高压旋喷药剂注入工作结束后静置 10 天，对修复区域的土壤和地下水修复效果进行采样检测：

一、在修复区域随机确定 4 个钻孔点，钻孔孔深均为 18.0m，每个钻孔采集 10 个土壤样品，采样深度分别为 0.5、1.5、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0、14.0、16.0、18.0m，共采集 40 个土壤样品对不同深度的土壤修复效果进行检验；

二、选择修复区域已经建立的 7 口监测井采集地下水样，7 口监测井分别位于修复区域的上中下游，且包含深井（24.0m）和浅井（21.0m），分别对上中下游浅层及深层地下水的修复效果进行检验；

三、所采集的土壤及地下水样品均送到具有“实验室认可”（CNAS）、“ISO9001 认证”和“计量资质认定证书”（CMA）认证资质的实验室—澳实分析检测（上海）有限公司检测，以保证检测结果准确可靠。土壤及地下水样品检测结果分别如表 10 和表 11 所示。

表 10 地下水检测结果

水样编号	六价铬（mg/L）	目标值（mg/L）
HBX-SSW1	<0.010	0.5
HBX-SQW1	<0.010	
HBX-SSW5	<0.010	
HBX-SQW5	<0.010	
HBX-SSW6	<0.010	
HBX-SQW6	<0.010	
HBX-SCW	<0.010	

表 11 土壤检测结果

土样编号	六价铬（mg/Kg）	目标值（mg/Kg）	土样编号	六价铬（mg/Kg）	目标值（mg/Kg）
HB2XZS1-1-0.5m	16.9	50	HB2XZS3-1-0.5m	0.34	50
HB2XZS1-1-1.5m	0.56		HB2XZS3-1-1.5m	34.2	
HB2XZS1-1-4.0m	0.17		HB2XZS3-1-4.0m	<0.10	
HB2XZS1-1-6.0m	0.58		HB2XZS3-1-6.0m	0.59	
HB2XZS1-1-8.0m	1.05		HB2XZS3-1-8.0m	0.17	
HB2XZS1-1-10.0m	<0.10		HB2XZS3-1-10.0m	0.33	
HB2XZS1-1-12.0m	<0.10		HB2XZS3-1-12.0m	<0.10	

			.0m	
HB2XZS1-1-14.0m	<0.10		HB2XZS3-1-14.0m	<0.10
HB2XZS1-1-16.0m	0.16		HB2XZS3-1-16.0m	0.11
HB2XZS1-1-18.0m	0.32		HB2XZS3-1-18.0m	<0.10
HB2XZS2-1-0.5m	0.54		HB2XZS4-1-0.5m	0.48
HB2XZS2-1-1.5m	29.0		HB2XZS4-1-1.5m	<0.10
HB2XZS2-1-4.0m	18.5		HB2XZS4-1-4.0m	<0.10
HB2XZS2-1-6.0m	0.13		HB2XZS4-1-6.0m	<0.10
HB2XZS2-1-8.0m	0.18		HB2XZS4-1-8.0m	<0.10
HB2XZS2-1-10.0m	<0.10		HB2XZS4-1-10.0m	<0.10
HB2XZS2-1-12.0m	0.32		HB2XZS4-1-12.0m	0.26
HB2XZS2-1-14.0m	0.35		HB2XZS4-1-14.0m	0.18
HB2XZS2-1-16.0m	<0.10		HB2XZS4-1-16.0m	<0.10
HB2XZS2-1-18.0m	0.17		HB2XZS4-1-18.0m	2.54
所有土壤样品六价铬平均值	2.70			

根据地下水检测结果可知：场地上中下游的深层及浅层地下水六价铬含量均低于检出限（0.010 mg/L），远低于厂区内地下水六价铬修复目标值（0.5mg/L），说明场地地下水修复效果很好。

根据土壤检测结果可知：修复区域随机选择的 4 个土壤点所采集的不同深度的 40 个土壤样品所有检测值均低于场地的土壤六价铬修复目标值（50mg/kg），而且只有少数土壤样品检测值超过 1.0 mg/kg，其中最大值为 34.2mg/kg，平均值为 2.70 mg/kg，说明场地土壤修复整体上效果很好。

1.10 修复前后土壤/地下水六价铬含量对比

在场地土壤及地下水修复前共采集了 6 个土壤点的 44 个土壤样品（其中包含 2 个平行样）、7 对地下水水质监测井的 14 个地下水样品，送往具有“实验室认可”（CNAS）、“ISO9001 认证”和“计量资质认定证书”（CMA）认证资质的实验室—澳实分析检测（上海）有限公司进行检测分析。

1.10.1 修复前后土壤六价铬含量对比

修复前后土壤样品均采集于同一土壤修复区域，但分布于同一土壤修复区域的不同位置，且每个土壤点的土壤样品采集数量及采样深度均不同，不能按单个数据一一对比，但可以求平均值（注：求平均值时，小于检出限以 0.0 计算）做整体对比，把握修复区土壤六价铬含量变化的整体规律。

修复前的土壤六价铬含量检测结果见表 12。

表 12 修复前土壤样品六价铬含量检测结果

土样编号	六价铬（mg/kg）	土样编号	六价铬（mg/kg）
HBXS1-1.0m	53.2	HBXS4-3.0m	26.0
HBXS1-3.0m	83.4	HBXS4-6.0m	17.8
HBXS1-6.0m	53.6	HBXS4-7.0m	17.8
HBXS1-9.0m	12.5	HBXS4-9.0m	51.7
HBXS1-12.0m	138	HBXS4-12.0m	252
HBXS1-15.0m	121	HBXS4-15.0m	63.5
HBXS1-19.0m	49.1	HBXS4-19.0m	17.7

HBXS2-1.0m	21.2	HBXS5-1.0m	127
HBXS2-3.0m	4.6	HBXS5-3.0m	209
HBXS2-6.0m	65.3	HBXS5-6.0m	22.7
HBXS2-8.5m	59.1	HBXS5-9.0m	74.2
HBXS2-12.0m	100	HBXS5-12.0m	120
HBXS2-15.0m	113	HBXS5-15.0m	51.6
HBXS2-19.0m	155	HBXS5-19.0m	15.4
HBXS3-1.0m	79.2	HBXS6-1.0m	94.0
HBXS3-3.0m	105	HBXS6-3.0m	54.1
HBXS3-6.0m	202	HBXS6-6.0m	392
HBXS3-8.5m	196	HBXS6-9.0m	107
HBXS3-12.0m	250	HBXS6-12.0m	50.5
HBXS3-15.0m	181	HBXS6-15.0m	154
HBXS3-19.0m	148	HBXS6-16.0m	154
HBXS4-1.0m	20.2	HBXS6-19.0m	140
六价铬含量平均值 (mg/Kg)	100.51		

根据表 5-12 可知修复前的土壤六价铬含量平均值为 100.51mg/Kg；修复后的土壤六价铬含量平均值可从表 5-11 查出，平均值为 2.70 mg/Kg，远远低于修复前的值，六价铬去除率为 97.3%，说明修复效果很好。

1.10.2 修复前后地下水六价铬含量对比

修复后所采集的地下水样品中有 6 个与修复前的采集于相同监测井，可以直接进行对比（见表 1.13）。

表 1.13 修复前后地下水样品六价铬含量对比表

样品编号	六价铬 (mg/L)	
	修复后	修复前
HBX-SSW1	<0.010	0.263
HBX-SQW1	<0.010	54.0
HBX-SSW5	<0.010	0.224
HBX-SQW5	<0.010	15.9
HBX-SSW6	<0.010	0.034
HBX-SQW6	<0.010	2.45
平均值	0.0	12.15

注：求平均值时，小于检出限以 0.0 计算。

根据相同的 6 口监测井的地下水样品检测结果对比：修复前的地下水样品均有检出，且部分超标严重，平均含量为 12.15 mg/L，而修复后的地下水样品六价铬均未检出，说明修复后六价铬含量明显降低。

1.11 原位高压注入工程效果结论

从修复后的土壤/地下水六价铬含量与修复目标值对比、修复前后土壤/地下水六价铬含量对比分析可知：

修复后土壤/地下水六价铬含量远远低于修复目标值；且修复后土壤/地下水六价铬含量远远低于修复前，土壤/地下水六价铬去除率均超过 97%，因此可以得出以下结论：原位高压注入工程适用于该场地土壤/地下水六价铬污染的修复，修复效果非常好。

附录 A.2. 某铬渣堆场污染地下水原位注入修复项目

该项目为某铬渣堆场，场地面积约 2.5 公顷，土壤和浅层地下水均受到六价铬污染，修复目标含水层为第一含水层。

场地地层情况：从上至下依次为杂填土——粉质黏土——粗砂（第一含水层）——粉质黏土——中

粗砂（第二含水层）——黏土。其中，粉质黏土层的水平与垂直渗透系数均为 10^{-6}cm/s - 10^{-7}cm/s 之间，导致第一含水层受六价铬污染不严重，第二含水层未受污染。

含水层特性：第一含水层的地下水流向为东北流向西南，平均水力梯度为 1% 左右，渗透系数为 10^{-3}cm/s ，孔隙率为 0.25-0.50，其稳定水位埋深为 6.0 m 左右，厚度为 0.1-0.6m。

地下水污染情况：地下水 pH 值为中性，溶解氧为 3.26-4.74mg/L，六价铬最大浓度为 16.1mg/L，超标 320 倍，受污染的地下水约 6 万 m^3 。

修复目标值：由于该区域周边的居民饮水来源于市政供水，且周边均已建成居住小区，受污染地下水不会作为饮用水和工业、农业用水水源。因此，六价铬的修复目标值参照《地下水质量标准》（GB 14848-93）中 IV 类水质标准 0.1mg/L。

修复技术与工艺：场地中心区域采取抽出-处理-回灌的修复技术，场地边缘轻度污染区域采取原位注入还原性药剂进行修复，本次使用的修复药剂为一种结合强还原性矿物质、控释的植物性碳源、缓释硫酸盐及其他有效成分的还原型稳定化药剂。

考虑到场地中心区域的土壤已开挖形成基坑，注入作业区域较窄，因此采取 Geoprobe 进行原位直推式注入。基于地下水的流向以及下游方向为人类活动区域，因此在地下水上游（场地北侧）、下游（场地南侧）及人群活动区（场地西侧）分别布设双排药剂注射孔（孔间距为 3.0m，排间距 2.5m），先使用 Geoprobe 钻机以“隔一打一”的点位注射顺序钻孔，然后使用 GP350 液压泵以最大喷射压力 15 MPa 的注射压力，将经 20 转/min 搅拌过修复药剂分三层自下往上注射至目标含水层及其上下地层中。注入过程中若发生反浆情况，及时调整注入深度或更换注入孔位置。注射完毕，使用膨润土对钻孔进行封填，防止药剂串孔反浆。

修复规模和效果：本项目合计钻孔 129 个，注入药剂 55.67 吨。系统运行停止后，对注入区域及周边的 8 口地下水监测井进行地下水采样、检测，所有监测井中地下水样品中六价铬浓度均低于 0.1mg/L，达到修复目标并通过修复验收。

附录 B 参考文献

（资料性附录）

- [1] 环境保护部,《污染场地修复技术目录》(第一批)(公告 2014 年 第 75 号), 2014 年;
- [2] 曾彪, 铁化合物活化过硫酸钠氧化修复多氯联苯污染土壤研究[D]浙江: 浙江大学, 2014; 1-54;
- [3] 有机污染土壤原位化学氧化药剂投加方式的综述, 唐小龙, 吴俊锋, 王文超, 李社锋, 化工环保, 2015 年第 35 卷第 4 期;
- [4] 美国 Geoprobe 官网: <http://geoprobe.com/>;
- [5] 高压旋喷灌浆施工参数,《甘肃水利水电技术》, 2015,51 (11): 80-81。