ICS 13.030.01
CCS ZO5

T/SSSC

中 国 土 壤 学 会 团 体 标 准

T/SSSC 005—2024

污染场地原位热处理耦合化学修复技术指南

Technical guideline for *in-situ* thermal treatment coupled with chemical remediation of contaminated sites

2024－07－26 发布　　2024－08－01 实施

中国土壤学会　发布

目　　次

前　　言.....II

1 范围.....1

2 规范性引用文件.....1

3 术语与定义.....2

4 技术路线.....2

5 技术要求.....4

6 工艺设计.....5

7 主要工艺设备与材料.....8

8 施工与调试.....9

9 运行与维护.....10

10 监测与过程控制.....12

11 职业健康与劳动安全.....13

附录 A 原位热处理耦合化学修复设计参数表.....15

附录 B 过硫酸钠注入流量、扩散半径、衰减时间参考表.....16

附录 C 系统监测指标表.....17

前　　言

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

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国土壤学会团体标准工作管理委员会提出并归口。

本文件起草单位：北京建工环境修复股份有限公司、武汉大学、南京大学、生态环境部南京环境科学研究所。

本文件主要起草人：刘鹏、高士祥、钟华、朱长银、万金忠、韦云霄、王镝翔、李昕、解琳、邢轶兰、刘渊文、宋少宇。

污染场地原位热处理耦合化学修复技术指南

1 范围

本文件提供了污染场地原位热处理耦合化学修复技术及工程的指导和建议，给出了工艺设计、工艺设备与材料、监测与过程控制、施工与调试、运行与维护、职业健康与劳动安全等需要考虑的要点内容。

本文件适用于渗透性较好的有机污染场地修复工程。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB3096	声环境质量标准
GB 3836.1	爆炸性环境 第 1 部分：设备通用要求
GB 3836.15	爆炸性环境 第 15 部分：电气装置的设计、选型和安装
GB 8978	污水综合排放标准
GB/T 11651	个体防护装备选用规范
GB/T 14848	地下水质量标准
GB15603	常用化学危险品贮存通则
GB 18218	危险化学品重大危险源辨识
GB/T 20801	压力管道规范 工业管道
GB/T 31962	污水排入城镇下水道水质标准
GB 37822	挥发性有机物无组织排放控制标准
GB/T 38144.1	眼面部防护应急喷淋和洗眼设备
GB/T 45001	职业健康安全管理体系—要求及使用指南
GB 50058	爆炸危险环境电力装置设计规范
GB50187	工业企业总平面设计规范
GB 50727	工业设备及管道防腐蚀工程施工质量验收规范
GB/T 51040	地下水监测工程技术规范
HJ 25.2	建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则
HJ 25.4	建设用地土壤修复技术导则
HJ 25.5	污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则
HJ 25.6	污染地块地下水修复和风险管控技术导则
HJ 1165	污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附
HJ 682	建设用地土壤污染风险管控和修复术语
DZ/T0270	地下水监测井建设规范
GBZ/T 297	职业健康促进技术导则

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

原位热脱附 *in-situ* thermal desorption

向地下输入热能，加热土壤、地下水，改变目标污染物的饱和蒸气压及溶解度，促进污染物挥发或溶解，并通过土壤气相抽提或多相抽提实现对目标污染物去除的处理过程，包括热传导加热、电阻加热及蒸汽强化抽提等。

3.2

化学修复 chemical remediation

利用化学处理技术，通过化学物或制剂与污染物发生氧化、还原、吸附、沉淀、聚合、络合等反应，使污染物从土壤或地下水中分离、降解、转化或稳定成低毒、无毒、无害等形式（形态），或形成沉淀除去。

3.3

化学氧化-还原 chemical oxidation and reduction

根据土壤或地下水中污染物的类型和属性选择适当的氧化或还原剂，将制剂注入到土壤或地下水中，利用氧化或还原剂与污染物之间的氧化-还原反应将污染物转化为无毒无害物质或毒性低、稳定性强、移动性弱的惰性化合物，从而达到对土壤净化的目的。

3.4

原位热处理耦合化学修复 *in-situ* thermal treatment coupled with chemical remediation

通过原位热处理将目标区域升温至目标温度（40~70 ℃），使有机污染物粘度降低、溶解性增强、更易进入液相和气相，实现高效传质，同时通过热场条件激活化学修复药剂反应活性，达到高效降解污染物的目的。通常原位热处理耦合化学修复过程无需进行抽提作业。

3.5

冷点温度 Cold spot temperature

加热区的边界、加热井几何中心点等不利位置的平均温度。

4 技术路线

4.1 一般原则

4.1.1 原位热处理耦合化学修复技术路线如图 1，包括场地概念模型建立、技术工艺设计、修复系统建设、运行与维护、采样检测和效果评估。。

4.2 场地概念模型建立

4.2.1 调查场地的基本信息、污染特征、水文地质、地球化学参数等。

4.2.2　针对性开展污染区的地质勘察，刻画详细的地质和水文地质条件。根据场地的水文地质参数、土壤热物性参数和污染特征建立精细化场地概念模型。

4.3　技术工艺设计

4.3.1　根据场地概念模型的分析、实验室小试和中试，收集设计参数，明确加热方式、目标温度、耦合化学修复模式。

4.3.2　细化井群布设，明确满足修复要求的加热、溶配药注入等设备规格，完善保温阻隔等辅助设施设计，绘制施工图纸，制定修复技术实施方案。

4.4　修复系统建设

4.4.1　开展加热系统、化学注入系统、监测系统和辅助设施的建设，安装所需修复设备，准备修复材料。

4.4.2　系统建设完成后，开展设备调试和校验工作，使设备工作性能满足修复设计要求。

4.5　运行与维护

4.5.1　开展场地降水，使监测井中水位低于污染区最深深度，以降低加热阶段能耗。

4.5.2　加热目标区域土壤及地下水，达到目标温度（40~70℃）后降低加热功率进行保温。

4.5.3　通过化学抽注井将氧化/还原药剂注入污染区，并通过抽注循环辅助药剂扩散和热能传导，提升药剂和温度分布的均匀性。

4.5.4　各运行过程应满足节点控制要求，定期开展设备检查工作并及时进行维护。

4.6　修复效果评估

4.6.1　在完成化学注入、药剂反应完全后，暂停保温和注入作业，并开展采样检测，若污染物浓度低于修复目标值，进入效果评估阶段。若地下水中污染物出现反弹现象，开展化学药剂注入作业，直至达到修复目标，通过效果评估。

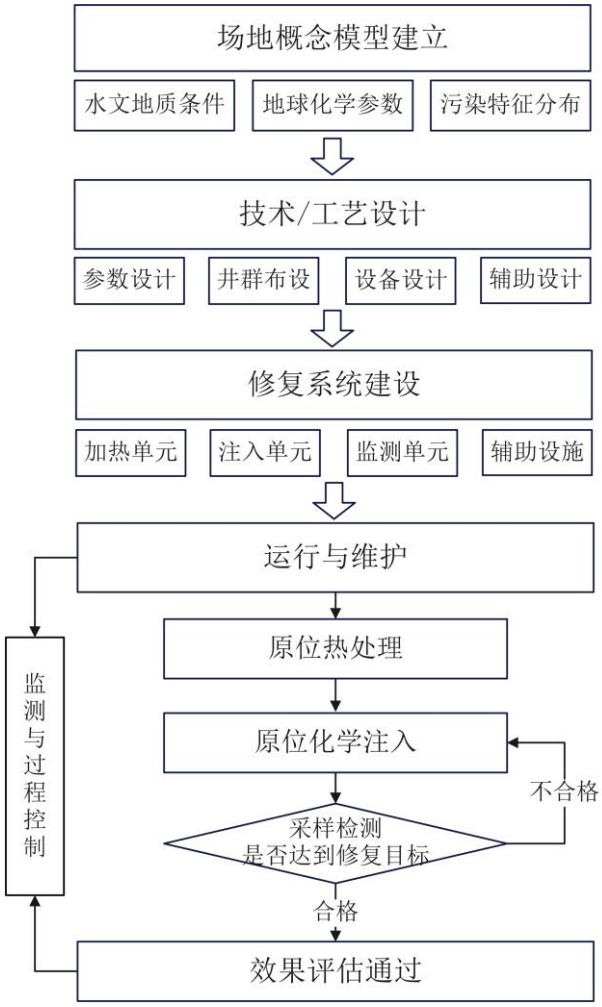


图 1 原位热处理耦合化学修复技术路线图

5 技术要求

5.1 一般原则

5.1.1 原位热处理耦合化学修复宜遵循因地制宜的原则。技术工艺路线根据污染物类型、场地污染特征、修复目标值、地层岩性、水文地质条件、能源供给条件、场地布置、耦合参数范围等因素综合论证后确定，以保证热处理耦合化学修复达到最优协同效果。原位热处理耦合化学修复技术适用的地块条件宜符合表 1 的规定。

表 1. 原位热处理耦合化学修复技术适用的场地条件

地块条件	适用范围
地层渗透系数	＞10^{-7}cm/s
污染区域	包气带、饱和带
污染物	多环芳烃、卤代烃、石油烃、苯系物等
污染程度	可处理苯系物、卤代烃、多环芳烃浓度超《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》GB36600 中第一类用地筛选值 50 倍以上、石油烃超 5 倍以上的污染场地

5.1.2 原位热处理耦合化学修复后的土壤和地下水目标污染物浓度需达到修复目标值的要求。

5.1.3 原位热处理耦合化学修复宜遵循节能降耗、绿色可持续修复理念，评估修复的环境经济效益和碳排放，判断原位热处理耦合化学修复技术的适用性，避免能源和资源的浪费。

5.1.4 对原位热处理耦合化学修复工程施工和运行过程中所产生的废气、废水、固体废物及其他污染物进行治理，并达到 GB 8978、GB/T 31962、GB 37822 等国家、地方和相关行业排放标准要求。

5.1.5 设备、电气装置的设计、选型和安装应符合 GB 3836.1、GB 3836.15、GB 50058、GB/T 38144.1 的安全规定要求。

5.2 工程构成

5.2.1 原位热处理耦合化学修复系统由原位热处理工程、化学修复工程、辅助工程和配套设施组成。

5.2.2 原位热处理工程、辅助工程、配套设施参考 HJ 1165。

5.2.3 化学修复工程包括：化学药剂溶解配制单元、化学抽注单元、地下水监测井。

5.2.4 化学药剂存储相关要求应参照 GB15603 执行。

5.3 总图布置

5.3.1 场址选择与总图布置应参照 GB 50187 的规定执行。

5.3.2 注入宜结合耦合修复技术工艺特点和地块现状，对办公区、地面设备区、耦合修复区、能源供应区、药剂存储区等进行分区布置。

5.3.3 消防应急、二次污染防治、急救、警示等布置参考 HJ 1165。

6 工艺设计

6.1 一般原则

6.1.1 开展场地地质和水文地质调查，获取相关参数，必要时开展小试中试，满足后续设计需求。

6.1.2 原位热处理耦合化学修复工程针对污染土壤和地下水进行治理，总体设计应满足 HJ 25.4、HJ 25.5、HJ 25.6 的规定。

6.1.3 地下构筑物排查、加热形式可参考 HJ 1165 执行。

6.1.4 工艺设计方案主要包括加热单元、化学抽注单元、监测单元等设计。其中加热与监测单元设计可参考 HJ 1165 执行。化学抽注单元设计包括注入井的布设、药剂选择、注入量和注入压力流量设计、药剂浓度设计、溶配药单元布设等。

6.1.5 宜开展原位热处理耦合化学修复中试试验（不少于 100 m^2），确定加热、化学注入、监测井布设方案及耦合运行工艺参数等。

6.2 设计资料收集

6.2.1 原位热处理耦合化学修复技术工艺设计应收集污染特征、水文地质条件、地下水质参数、土壤热物性参数、耦合特性参数、修复目标等相关信息和资料，需要收集的设计资料参见附录 A。

6.2.2 污染特征、水文地质条件应通过在污染修复范围内开展高精度场地调查获取，调查布点网格应不大于 10 m*10 m。

6.2.3 针对原位热处理耦合化学修复技术的可持续性评估，应在设计阶段收集统计原材料用量、设备生产耗材、建设施工量，评估工艺运行绿色可持续性并进行设计优化。

6.3 工艺参数设计

6.3.1 应根据地块污染特征、修复时间和修复成本要求，确定原位热处理耦合化学修复工程的加热模式和参数，具体包括：加热方式，加热目标温度，以及升温、控温、注入、降温等不同工艺阶段的温度控制等。

6.3.2 原位热处理耦合化学修复模式需要根据场地污染类型判断，针对需要先还原脱卤再氧化修复的卤代烃类污染场地，推荐采用原位热处理耦合化学还原-氧化修复技术，其他有机类如多环芳烃、石油烃等污染场地宜采用原位热处理耦合化学氧化修复技术。

6.3.3 耦合修复监测系统应满足对温度、地下水常规水质、药剂浓度的监测。监测系统平面布置根据加热系统和化学注入系统位置确定。

6.4 井群布设

6.4.1 耦合修复工程加热单元排布根据修复周期、污染特征和土质性质确定，化学注入井排布根据地下水流场、目标温度和土壤性质确定，可采用正三角形或正六边形排布，遵循等间距布置原则，满足加热、化学药剂在污染区域水平方向上的全覆盖和均匀分布。

6.4.2 加热井和化学注入井应交叉布置，注入井宜布置在加热井形成的几何中心冷点位置，并与加热井距离不小于 1 m，以避免药剂暴沸喷射。

6.4.3 化学注入井排布间距应小于 2 倍影响半径（ROI），使注入井形成的几何中心处的药剂浓度满足反应需求。

6.4.4 加热井布设

6.4.4.1 根据污染深度设计加热方式，污染深度小于 3 m 的区域推荐采用水平加热井，污染深度大于 3 m 的区域推荐采用垂直加热井，布设要求参考 HJ 1165。

6.4.4.2 垂直加热井建议采取正三角形或正六边形布置，间距建议为 2~4 m，具体的井间距需根据地块实际进行调整。加热井的最大深度以污染最深的介质深度为准，建议最深深度向下延伸 1~3 m。水平加热井可采取井管平行方式布设、间距建议为 2~6 m。对于燃气加热方式，点火端交错布置。

6.4.5 化学注入井布设

6.4.5.1 化学注入井的影响半径（ROI）受地层岩性、地下水流动、热化学动力学综合影响。氧化药剂过硫酸钠注入流量、扩散半径、衰减时间可参考附录 B。

6.4.5.2 化学注入井的布设宜在平面上完全覆盖目标修复区块，并宜适度扩展，以确保达到地下流场水力循环效果；垂直深度宜超过修复区底部 0.5 m，并避免穿透至下部非修复区的含水层。若修复区深度超过 4 m 或包含多个含水层，则注入井应分层建井、开筛，分层设井要求应满足 DZ/T0270 执行。

6.4.6 监测井布设

6.4.6.1 地下温度监测点宜布置在加热区冷点位置，并避开药剂注入井的影响。垂向上监测点的设置间隔应保证每个点位上有不少于 3 个检测点，且温度监测井至少应高于修复区顶部 1 m、深至修复区底部 1 m，数量应能满足修复地块下土层性质和类型的要求。

6.4.6.2 地下水监测点应设置于化学注入井几何中心、调查阶段发现的污染相对严重区域以及修复区上下游，每 100 m^2 应设置不少于 3 口压力监测井，距加热井、注入井间距应大于 1 m。垂直方向上，应深至修复区底部，并避免穿透至下部非修复区的含水层，分层设井要求应满足 DZ/T 0270 执行。

6.4.6.3 地下温度、地下水监测点的安装位置及设置数量由监控目的、地块特征确定。

6.4.7 原位热处理耦合化学修复技术典型井平面布设如图 2 所示。

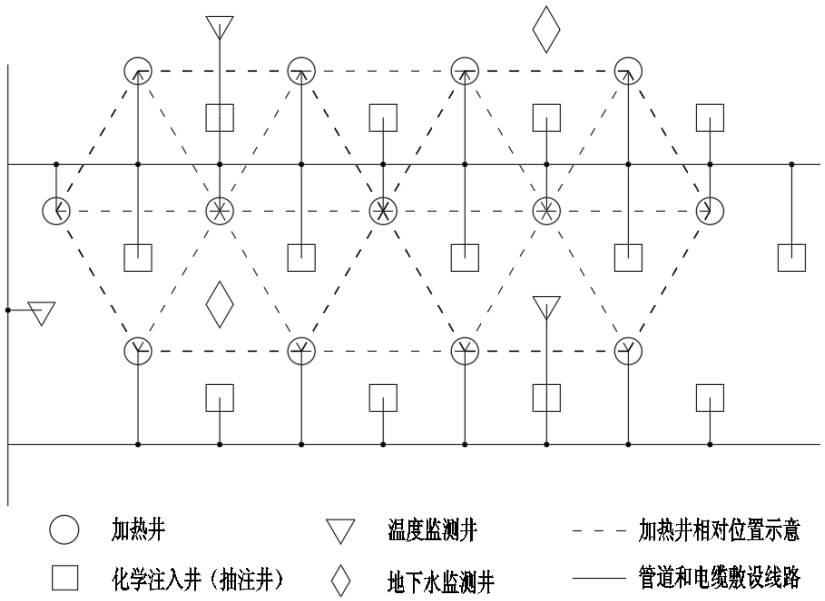


图 2 典型原位热处理耦合化学修复井平面布置示意图

6.4.8　原位加热模式设计

6.4.8.1　原位热处理耦合化学修复工程加热模式的选取同时受地块水文地质条件、能源匹配条件等因素的影响；加热模式推荐使用热传导方式，根据现场能源供应条件可选择燃气或电加热设备。

6.4.9　地下加热单元设计

6.4.9.1　地下加热单元的构造、建井及安装可参照 HJ 1165 中的相关规定执行。

6.4.9.2　加热井规格、建井深度根据安装方法、地块污染特征确定。

6.4.9.3　加热单元在小于 3 m 的浅层污染区域使用时，水平加热井倾斜段与地平面成 45°，与水平段井管采用 135°弯接。污染深度大于 3 m 的深层污染区采用垂直加热井。

6.4.10　药剂注入模式设计

6.4.10.1　应根据地质及水文地质条件、修复时间、修复成本和注入药剂的理化性质等条件，选择适合的药剂注入方式，一般药剂注入方式包括：原位井注入、高压旋喷和水力压裂注入等。耦合修复条件下，药剂受热停留时间缩短，应采用少量多次药剂注入的原则，考虑场内机械移动受加热井布置影响，耦合修复推荐使用原位井注入方式。

6.4.10.2　对于渗透性良好的区域可采用一般注入井注入，渗透条件中等的区域可采用抽注循环井增强药剂扩散。

6.4.10.3　药剂注入的主要工艺参数包括药剂浓度、注入压力、注入流量、注入时间、注入频率等。注入压力为药剂扩散的主要驱动力，可调节注入流量和注入时间控制药剂扩散半径。最适药剂浓度可通过小试、中试确定。注入频率可根据药剂停留时间、污染物增溶周期、地下水位确定。

6.4.10.4　耦合修复药剂注入宜在土壤温度 40~70℃间进行，温度高于 80℃时药剂剧烈反应快速消耗，并可能爆沸引起井喷发。

6.4.10.5　药剂注入应与修复进程的动态监测相结合，实时动态调整。

6.4.11　化学注入单元设计

6.4.11.1　化学注入单元包括化学注入井、管路、注浆泵、溶配药设备和仪器仪表等。

6.4.11.2　化学注入井由井头、井管、滤网和填充滤料层构成，结构示意图如图 3 所示。井管可外包尼龙滤网，再填充滤料。应根据污染深度设置井管筛孔的位置，确保筛管段完全覆盖纵向污染范围并有所扩展；污染地层厚度较大的区域应分层设置注入筛管，每层厚

度不超过 4 m；在纵向上，对于渗透系数相差大于两个数量级的地层，应分别设置不同筛管深度的注入丛井。

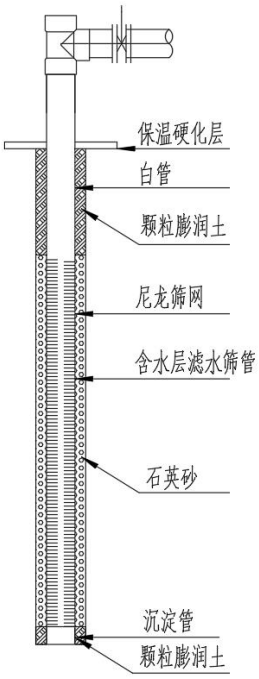


图 3 化学注入井结构示意图

6.4.12　地下水控制

6.4.12.1　对于水力传导系数大于 $1*10^{-5}$ cm/s 的地层推荐使用地下水阻隔措施，参照 HJ 1165 中的相关规定执行。

6.4.12.2　原位热处理耦合化学修复技术可通过控制目标修复区域的含水率，使加热阶段快速升温，为化学注入阶段的热-化学耦合反应创造有利条件。

6.5　地表保温与阻隔

6.5.1　布置要求参考 HJ 1165。表面保温阻隔层从上至下依次为防渗硬化层、保温层，防渗硬化层厚度一般在 5~10cm，保温层厚度宜在 10~20cm。

6.5.2　保温层材料可选择加气保温砖或泡沫混凝土等。

6.6　固体废物与噪声

6.6.1　固体废物处置要求参考 HJ 1165，对药剂包装袋、废弃活性炭等做好收集和登记。

6.6.2　噪声控制要求参考 HJ 1165，设备控制机房内、外的噪声分别符合 GB 3096 的规定。

7　主要工艺设备与材料

7.1　一般原则

7.1.1　主要工艺设备的性能应满足本标准第 6 条的相关要求。

7.1.2　井材、管道、阀门等应满足 GB 50727 的相关防腐要求。

7.1.3　爆炸性气体环境使用的加热设备，使用单位根据危险场所分类正确选择防爆电气设备的防爆型式，应符合 GB 3836.1 及 GB 3836.15 的规定。

7.2 主要工艺设备与材料

7.2.1 工艺设备包括药剂溶配注入模块和加热控制模块。药剂溶配注入模块通过药剂输送管道与化学注入井连接，加热控制模块通过动力、信号缆线与加热井连接。

7.2.2 药剂溶配注入模块可实现药剂的稀释、混匀和精准定量配比、药剂溶液混合注入或单独注入，设备主要构成包括：溶配箱、稀释罐、管路混合器、管道与泵、各仪表管件、传感器、电控单元及无线通讯设备等。

7.2.3 加热控制模块可实现对加热元器件的供电、断电、电压稳定、过流/过载保护、信号采集、温度控制、无线通讯等功能。设备主要构成包括：加热棒、热电偶、测温通讯模块、可编程序控制器（PLC）、人机界面（HMI）、电控柜、数据采集与通讯模块等。

7.2.4 设备和材料主要性能应满足以下要求：

a) 溶配药罐应根据单批注入量要求，确定罐体尺寸及设备套数，以满足修复工程的施工要求。

b) 注药泵的选型应根据其所输送药液的理化性质、注入压力和注入流量来选定，并应满足下列条件：

1）注药泵的工作压力应能满足药剂注入设计影响半径的要求；

2）注药泵应具有良好的耐腐蚀性；

3）所选注药泵应能稳定保持在高效区内运行。

c）流量、压力监测设备需满足量程要求。

d）药剂注入系统管材、管路连接构件、阀门、仪表等宜采用具有良好耐腐蚀性的金属/非金属材料，防腐蚀要求应参照 GB 50727 的规定执行。

7.2.5 还原药剂可选用零价铁或稀释液碱（可降低土壤和地下水氧化还原电位），氧化药剂建议选用过硫酸钠。

8 施工与调试

8.1 施工

8.1.1 施工前确保设备、材料、器件等具备产品合格证书、产品性能检测报告。

8.1.2 施工设计文件、设备材料规格、质量安全相关规范等内容，参照 HJ 1165 中的相关规定。

8.1.3 按技术实施方案、设计图纸有序开展设备安装和场地建设等施工工作。

8.2 调试

8.2.1 工程安装、施工完成后应首先对相关仪器仪表进行校验，后根据工艺流程进行分项调试和整体调试。

8.2.2 分项调试即对各设备单元分别上电测试，使设备工况处于稳定的范围，宜按照以下步骤进行：

a） 所有操作人员就位，佩戴必要的安全防护用品；

b） 检查设备设施的安装和连接情况，确保安装正确；

c） 检查燃料和材料的储备情况；

d） 分别对各系统设备进行上电测试，确保各类仪器、仪表，确保接线正确、量程设置准确，测控性能稳定；

e） 现场各设备仪表与中控系统逐一对点，匹配系统控制要求。

8.2.3 整体调试要求：各项系统运转正常，技术指标达到设计要求。

8.2.4 调试期间应对工程运行进行性能试验，主要包括以下内容：

a） 污染区域加热效果；

b） 药剂溶液配制浓度与频次；

c） 注入系统最大注入速率；

d） 单井最大注入量；

e） 能源和药剂消耗；

f） 运行稳定性。

9 运行与维护

9.1 一般原则

9.1.1 可参照 HJ 1165 中的相关规定执行，分别建立耦合修复加热单元运行台账、化学注入单元运行台账和监测单元数据台账制度。

9.1.2 应向在场施工运维人员培训耦合修复工艺各设备运行逻辑顺序、药剂、土壤和地下水在加热条件下的特性，做好安全技术交底，建立应急处置办法。

9.2 系统启动

9.2.1 原位热处理耦合修复工程运行应在系统通过整体调试、各环节运转正常、技术指标达到设计和合同要求后启动。

9.2.2 原位热处理耦合化学修复系统的启动顺序为监测单元-供能单元-加热单元-注入单元。

9.3 运行管理

9.3.1 耦合修复技术运行管理分为原位加热过程运行管理和原位化学注入过程运行管理，应充分掌握各过程运行要点及控制节点。

9.3.2 原位化学注入过程分为先还原后氧化和直接氧化注入两类，先还原后氧化针对卤代烃等污染场地，直接氧化针对多环芳烃和石油烃等污染场地。

9.3.3 原位化学注入过程运行时保证每口井注入流量、注入时间、注入频率可达到设计要求。着重分析地下水位、EC、pH、ORP、温度、以及药剂浓度变化情况和分布范围，记录饱和井位置。药剂分布薄弱区域加强注入，地下水温度低于目标加热温度时增加能源输入，保持耦合修复反应温度。

9.3.4 原位热处理耦合化学修复技术运行过程和控制节点如图 4 所示。

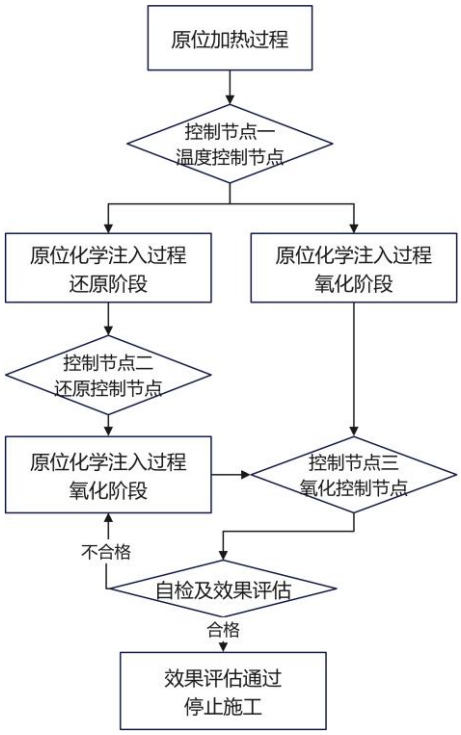


图 4 原位热处理耦合化学修复技术运行过程和控制节点

9.3.5 控制节点一：原位加热过程运行时，分析土壤升温和温度分布情况。达到目标加热温度的区域降低或停止能源输入，保持土壤温度。主体加热区域冷点温度和加热边缘冷点温度均达到 40℃~70℃，此时达到温度控制节点，可保持地下温度进入耦合还原阶段。

9.3.6 控制节点二：原位化学注入的还原阶段运行时，地下水 Eh 明显下降，通过补充药剂维持还原状态，保持 ORP<-150 mV 直至被还原污染物彻底反应，还原目标污染物浓度在连续监测下不发生反弹后停止还原剂注入，利用土壤缓冲能力自然恢复氧化还原电位和 pH，直至接近注入还原剂前的状态。当 pH 值、ORP 恢复至接近还原前数值，被还原污染物和还原产物浓度趋于稳定时，耦合还原阶段结束，可进入耦合氧化阶段。

9.3.7 控制节点三：原位化学注入的氧化阶段运行时，根据工艺设计方案间歇性注入氧化剂，应定期采集土壤和地下水样品，测试地下水氧化药剂浓度，应保持地下水样品中氧化剂浓度在注入浓度的 20%以上，分析氧化药剂扩散情况和地下水氧化还原环境变化情况，需分析土壤和地下水污染物浓度变化情况以及氧化产物毒性。

9.3.8 控制节点四：当氧化药剂扩散和注入量达到设计要求，地下水 ORP>200 mV、EC>50 mS/cm、且土壤和地下水污染物浓度持续降低并低于修复目标值时，达到修复完成控制节点，可暂停保温和氧化剂注入，开展自检和效果评估采样工作。

9.3.9 整个系统设专人管理和运行，对管理和运行人员进行定期培训，确保管理和运行人员熟练掌握正常运行的操作和应急情况的处理措施。

9.3.10 运行操作人员上岗前进行专业培训和运行记录培训。

9.4 维护

9.4.1 制定修复工程设备的定期维护计划。

9.4.2 维护人员宜根据技术要求与规范对工程设备开展定期检查、维护和更换必要的部件和材料。重点维护对象包括加热设备元器件、监测设备、注入设备及管道等。

9.4.3 维护人员宜做好相关维护保养记录。

9.5 修复效果评估

9.5.1 耦合修复工程自检和效果评估应按照 HJ 25.5 等修复相关规范进行。宜在修复薄弱区域、初始浓度高的区域和修复区周边土壤增设采样点，于修复区域上下游增设地下水采样点。

9.5.2 根据运行过程控制节点及定期检测结果分析，若判断修复达到目标值，可开展修复效果评估。

9.5.3 若自检和效果评估阶段发现土壤和地下水污染物浓度反弹，可返回原位化学注入过程，在保持目标温度条件下继续开展化学修复，直至修复效果评估通过。

9.6 系统停止和拆除

9.6.1 运行和维护人员可根据监测数据、运行记录和污染物变化情况，判断加热系统、化学注入系统和监测系统的停止时间。

9.6.2 系统停机顺序：加热系统保温—化学注入系统暂停—自检和效果评估通过—加热系统停机—化学注入系统停机—监测系统停机。

9.6.3 系统停机后进行设备和地表敷设的拆除，拆除顺序为功能系统与药剂溶配注入系统—地面管线—硬化地面及保温层—加热井、注入井。根据效果评估建议，可保留监测系统，持续获取温度、地下水水质等信息，最终关机拆除。

9.6.4 拆除过程及时清理设备、管道与固体废弃物，可再次利用的设备材料清理后备用，固体废弃物按环保要求进行合规处置。

9.7 事故应急处理措施

9.7.1 应预先制定原位热处理耦合化学修复工程事故应急预案，事故处理时应详细记录事故经过及手段措施，对事故原因进行分析，避免同类事故再次发生。

9.7.2 原位热处理耦合化学修复工程事故应急措施内容包括但不限于：事故停机应急处理措施、重要设备/系统故障应急处理措施、注入药剂泄漏/漫灌/井喷应急处理措施、火灾事故应急处理措施、触电事故应急处理措施、误接触药剂应急处理措施、突发停水/停电应急处理措施、人员伤亡应急救援措施、环境污染和破坏应急处理措施等。

10 监测与过程控制

10.1 修复系统监测

10.1.1 在原位热处理耦合化学修复实施过程中，需对运行系统各项指标、土壤和地下水及修复区域环境进行实时和定期监测。监测指标见附表 E。

10.1.2 地下温度、大气无组织排放、周边土壤与地下水采样监测等参照 HJ1165、HJ 164、HJ/T 166 中相关要求执行。

10.1.3 在耦合修复工程实施过程中，应对加热区内及周边、厂区边界开展无组织大气污染排放监测。监测指标包括目标污染物、颗粒物、非甲烷总烃等。监测频次不低于 1 次，施工期大于 1 个月的，监测频次不低于每月 1 次。

10.1.4 根据原位热脱附现场运行状况，可对修复区域及周边的土壤、地下水进行取样监测。采样、制样及送检过程中应采取措施防止污染物在高温作用下逸散，并防止人员烫伤。取样后应对表面的阻隔层进行恢复。监测指标包括目标污染物及可能产生的中间产物。取样检测应参考 HJ 25.2。对修复区域的土壤进行热采样时，宜采用钻孔方式进行，

可根据土层特征和钻探作业条件选择合适的钻探设备。钻探过程宜使用耐高温的钢制套管。取土管应立即置于预先准备好的冰浴槽中急冷降温，再进行取样和分样。

10.1.5　地下水进行热采样时，受热部分采样管应与置于冰浴槽内的不锈钢换热盘管连接，不锈钢换热盘管出口与出水管连接，从出水管出口直接采集水样。不锈钢换热盘管长度以出水温度不超过环境温度为宜。

10.1.6　原位药剂注入过程中应对附录 C 中的化学注入单元指标进行监控，其中配药进水流量、注入总流量、固体药剂添加速率、单井注入时间、单井注入流量为稳定运行时的值，注入井头压力为运行过程最大值。

10.1.7　在原位加热和注入实施期间中，应对作业区内地下水质进行日常监测。可采用水质检测仪对地下水温度、pH 值、电导率（EC）、溶解氧（DO）、氧化还原电位（ORP）、地下水水位进行定期监测，注入运行期间宜增加监测频率，如每日监测 1 次。地下水中目标污染物浓度可定期采集水样送检。

10.1.8　原位注入期间，可对作业区内地下水药剂浓度进行检测，分析药剂扩散范围和停留时间。

10.1.9　注入过程中井内压力>50 kPa 的井需要做标注并单独管理。

10.2　过程控制

10.2.1　原位热处理耦合化学修复技术的过程控制依靠加热单元、化学注入单元对井温度、井头压力、注药流量、运行电流、进气流量等注入参数的实时监测，以及监测单元对土壤温度、地下水水位、地下水水质、药剂浓度、污染物浓度等参数的监测，来开展针对工艺过程的反馈调控。

10.2.2　控制系统可采用中控室集中控制系统或分站就地控制系统，实时传输各单元关键数据参数如温度、流量等，并进行数据处理和调节。

10.2.3　控制系统宜设置安全保护装置，针对加热、化学注入单元均需单独设置急停模式，且在发生突发情况时可关闭。

10.2.4　注入原位热处理耦合化学修复针对工艺节点的过程控制应结合土壤温度、地下水水质参数（pH 值、电导率、溶解氧、氧化还原电位、水位）、污染浓度等进行动态调节。加热单元在保温阶段应根据各层土壤温度调节能源输入。化学注入单元配药进水流量与注入总流量应保持平衡，以维持药剂连续注入。注入井头压力>50kPa 时，宜适当降低注入流量并延长注入时间，可启动邻排注入井进行抽出。

11　职业健康与劳动安全

11.1　职业健康

11.1.1　职业健康管理应符合 GB/T 45001 和 GBZ/T 297 的有关规定，工作场所有害物质浓度应符合 GBZ 2.1 等的规定。

11.1.2　参照 HJ1165 开展与职业健康有关的理论和操作培训，建立健康档案，进行安全技术交底和应急演练。

11.1.3　在可能会引发急性职业损伤的工作场所中应设置警示标识，配备报警装置、急救用品、消防器械等，预留应急撤离通道和必要的泄险区。

11.2　劳动安全

11.2.1　劳动防护装备选用和判废参照 GB/T 11651 的有关规定，化学药剂包装验收、贮存与运输参照 GB 15346 的规定，化学品危险源辨识参照 GB 18218 的有关规定。

11.2.2　严格按照设计施工，避免在地层温度高于 80℃时注入化学药剂，防止爆沸引起井喷发而造成施工风险。

11.2.3　参照 HJ1165 对施工人员开展劳动安全培训和，作业过程中做好安全防护，防止人员烫伤。

11.2.4　化学品的采购、运输、储存和使用按国家、地方和行业相关规定进行，对施工人员开展药剂使用安全教育。

附录 A

（资料性）

表 A 原位热处理耦合化学修复设计参数表

	设计资料	数值/内容	单位
污染特征	污染物类型		/
	污染深度		m
	污染面积		m^2
水文地质条件	土壤质地（地层分布）		/
	地下水流向		/
	地层渗透系数		cm/s
	初见水位		m
	地下水流速		m/d
	土壤密度		kg/m^3
	含水率		%
	孔隙度		-
地下水质参数	地下水温度		℃
	溶解氧		mg/L
	电导率		μS/cm
	pH		-
	氧化还原电位		mV
土壤热物性参数	干土壤比热容		kJ/(kg·℃)
	土壤导热系数		W/ (m·℃)
	土壤热扩散系数		W/ (m·℃)
耦合特性参数	目标耦合温度		℃
	目标 pH		-
	热激活氧化剂半衰期		D
	单井单次注入药剂量		L
修复参数与修复目标	加热与保温时间		d
	药剂注入总质量百分比		%
	土壤污染物修复目标浓度		mg/kg
	地下水污染物修复目标浓度		mg/L、μg/L

附录 B
（资料性）
过硫酸钠注入流量、扩散半径、衰减时间参考表

表B.1 最大注入流量对照表

压力水头 m / 渗透系数 cm/s		3	5	6	7	12
强透水	0.1	4	5	7	8.5	12
中等透水	0.001	1.4	1.7	2.1	2.5	3.6
弱透水	0.0001	0.9	1	1.3	1.6	2.2
微透水	0.00001	0.6	0.8	1.1	1.3	1.8
杂填土	0.0008	1.2	1.4	1.7	2	2.9

*流量Q，m^3/h；注入井管径63 mm，开筛长度以2 m计。单井压力水头=(注药泵水头-沿程压力损失)/注入井个数。

表 B.2 药剂扩散半径对照表

压力水头 m / 渗透系数 cm/s		3	5	6	7	12
强透水	0.1	3.2	4.5	5.7	6.2	9.5
中等透水	0.001	1.1	1.3	1.6	2	2.9
弱透水	0.0001	0.6	0.7	1	1.25	1.75
微透水	0.00001	0.45	0.65	0.85	1	1.4
杂填土	0.0008	0.9	1.1	1.35	1.6	2.3

*药剂扩散半径R，m；土壤温度为50℃，注入时长以20min计。

表 B.3 药剂衰减时间对照表

药剂原浓度 % / 温度 ℃	2%	5%	10%	20%	30%
20	25	25	25	25	25
30	24	25	24	25	25
40	24	23	23	24	24
50	22	22	22	22	22
60	18	18	18	18	18
70	12	12	12	12	12

*衰减时间指扩散半径处过硫酸钠药剂衰减至原浓度20%经历的时间。
时长t，h；药剂浓度以质量百分浓度计。

附录 C
（资料性）
表 C 系统监测指标表

系统模块		监测指标		单位	数值
加热单元	电加热	加热电流		A	
		加热棒功率		W	
		加热棒温度		℃	
		加热用电量		kW.h	
	燃气加热	用气标况流量		NM^3/h	
		用气量		NM^3	
		助燃风机用电量		度	
		加热井出气温度		℃	
		燃烧器出气 CO 含量		%	
		检漏点可燃气体浓度		ppm	
化学注入单元		配药进水流量		m^3/h	
		注入总流量		m^3/h	
		固体药剂添加速率		kg/h	
		单井注入时间		min	
		单井注入量		L	
		单井注入流量		m^3/h	
		单日累积药剂注入量		m^3/d	
		注入井头压力＞50kPa 井编号及井头压力		/kPa	
		循环抽出水量		m^3	
		注入单元耗电量		度	
监测单元	修复区	温度监测井各层点位温度		℃	
		地下水 pH			
		地下水 DO		mg/L	
		地下水 EC		mS/cm	
		地下水 ORP		mV	
		地下水温度		℃	
		地下水井口 PID 值		ppm	
		地下水水位		m	
		地下水过硫酸盐浓度		mg/L	
		地下水硫酸盐浓度		mg/L	
		地电阻监测面电阻率		Ω·m	
		激发极化监测面极化率		mV/V	
		地下水污染物浓度		mg/L	
		土壤监测点污染物浓度		mg/kg	
	修复区周边	上下游地下水水位		m	
		上下游地下水硫酸盐浓度		mg/L	
		上下游地下水污染物浓度		mg/L	
控制单元		加热温度上限		℃	
		总管注入流量下限		m^3/h	
		系统运行总耗电量		度	
		系统故障部位			
环境监测		修复区大气污染物无组织排放			
		修复区大气污染物有组织排放		/	
		修复区噪声		dB（A）	
		固废收集质量	药剂包装袋	t	
			活性炭	t	