[在此处键入]

ICS
CCS

团　　体　　标　　准

T/SSSC □□－20□□

污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南

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

（征求意见稿）

20□□-□□-□□发布　　20□□-□□-□□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　术语和定义 2
4　修复原理及工艺流程 2
5　技术要求 3
6　工艺设计 4
7　主要工艺设备和材料 9
8　监测与过程控制 10
9　施工与调试 10
10　运行和维护 11
11　职业健康与劳动安全 13
附录 A（资料性）原位热处理耦合蒸汽注入修复系统监测指标 14
附录 B（资料性）场地典型介质和流体的热性能参数 15

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：上海市环境科学研究院、武汉大学、森特士兴集团股份有限公司、中科鼎实环境工程有限公司。

本文件主要起草人员：杨洁、司马菁珂、毛旭辉、叶渊、尹立普、叶春梅、李彦希、周栋、陈窈君。

污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南

1 范围

本文件提供了污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术及工程的指导和建议，给出了工艺设计、工艺设备和材料、监测与过程控制、施工与调试、运行与维护、工程安全和职业卫生管理等阶段中与需考虑要点有关的信息。

本文件适用于多环芳烃、石油烃、氯代烃等有机污染类，及各类有机复合污染场地修复工程。

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。

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 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准

GB 12801 生产过程安全卫生要求总则

GB/T 12917 油污水分离装置

GB 13271 锅炉大气污染物排放标准

GB 14554 恶臭污染物排放标准

GB/T 14848 地下水质量标准

GB 16297 大气污染物综合排放标准

GB 19517 国家电气设备安全技术规范

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 50028 城镇燃气设计规范

GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范

GB 50087 工业企业噪声控制设计规范

GB 50273 锅炉安装工程施工及验收规范

GB 50275 风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范

GB 50494 城镇燃气技术规范

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 682 建设用地土壤污染风险管控和修复术语

HJ 819　排污单位执行检测指南 总则
HJ 1165　污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附
HJ 1231　土壤环境 词汇

3　术语和定义

HJ1165 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

原位热处理　*in-situ* thermal treatment

通过直接或间接的加热手段向地下输入热能，加热污染包气带或者饱和带，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，并通过气相抽提或多相抽提实现对目标污染物去除的技术，包括燃气热传导加热、电加热传导加热和电阻加热。

3.2

热传导加热　thermal conductive heating

热量通过传导的方式由热源传递到污染区域从而加热土壤和地下水的处理过程，可以通过电能直接加热的方式对加热井进行加热，也可以通过燃气等能源产生的高温热烟气等介质对加热井进行加热。

3.3

电阻加热　electrical resistance heating

将电流通过污染区域，通过电流的热效应加热土壤和地下水的处理过程，也称为电流加热。

3.4

蒸汽注入加热　steam injection heating

通过将高温水蒸汽注入污染区域，通过传热和传质过程加热土壤和地下水的处理过程。

3.5

饱和蒸汽　saturated steam

密闭空间内气、液两相处于动态平衡状态即饱和状态的蒸汽。

3.6

原位热处理耦合蒸汽注入修复技术　*in-situ* thermal treatment coupled with steam injection

联合应用原位热处理和蒸汽注入的修复技术，包括燃气热传导加热耦合蒸汽注入、电热传导加热耦合蒸汽注入和电阻加热耦合蒸汽注入。

4　修复原理及工艺流程

4.1 修复原理

原位热处理耦合蒸汽注入修复技术主要通过原位电阻加热（ERH）或者热传导加热（TCH）等原位加热技术使土壤和地下水的温度提高，同时在空间尺度或者时间尺度耦合蒸汽注入技术，利用注入蒸汽的传热传质作用增强传热，同时利用蒸汽的吹脱和清扫作用强化将污染物通过气相或者液相带至地表，从而提高修复效率。

4.2 工艺流程

4.2.1　原位热处理耦合蒸汽注入技术工艺流程包括资料收集与调研、热处理耦合修复技术可行性评估、热处理耦合修复技术筛选、热处理耦合修复技术修复方案制定、热处理耦合修复技术修复方案实施、热

处理耦合修复技术修复效果评估。

4.2.2　根据场地进行水文地质参数、土壤热物性参数和污染状况建立精细化场地概念模型，根据不同的原位热处理技术特点和适用性选择合适的热处理技术，明确加热温度、蒸汽注入速率、时间/空间耦合等关键技术参数，宜开展小规模中试，验证修复技术的可行性并根据中试结果确定关键修复技术参数。

4.2.3 根据原位热处理耦合修复技术方案实施并通过监测关键技术参数如地层温度、地层压力、水质参数、抽提废水废气浓度等进行全过程监测分析，反馈调节各阶段运行状态，分析评估原位修复效果。若未达到修复目标则继续修复，达到修复目标即停止修复。

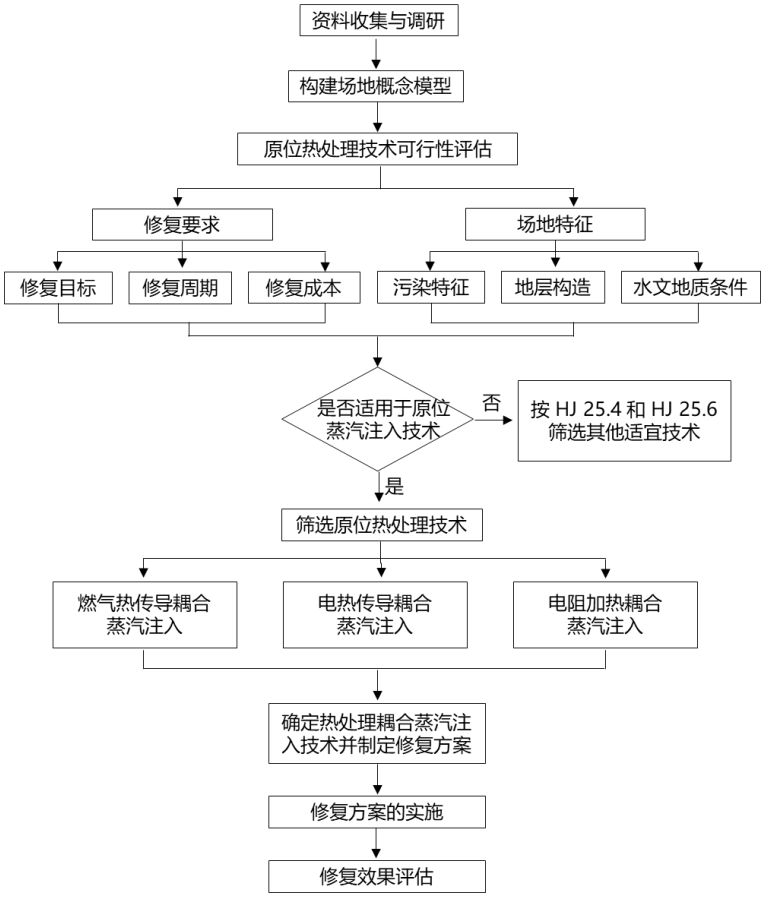


图 1 原位热处理耦合蒸汽注入抽提技术工艺流程

5　技术要求

5.1　一般原则

5.1.1 原位热处理耦合蒸汽注入修复技术的设计与实施宜遵循绿色可持续修复理念，实现污染场地修复的减污降碳协同增效。

5.1.2 修复工程宜因地制宜、科学合理，具备科学性、针对性、可行性和安全性。修复工艺设计宜本着成熟可靠、技术先进、经济适用的原则，并考虑节能、安全、操作简便。

5.1.3 原位热处理耦合蒸汽注入修复技术工艺路线宜根据污染物类型、场地污染特征、修复目标值、水

文地质条件、能源供给条件、场地布置、耦合工艺参数等因素综合论证后确定，以保证热处理耦合蒸汽注入修复达到最优协同效果。

5.1.4 根据土壤修复工程中所产生的废水、废气、固体废物，噪声和扬尘等环境影响，制定相关的收集、处理和处置技术方案，处理处置后达到 GB 8978、GB 16297、GB 14554、GB 12348 等国家、地方和相关行业排放标准要求。

5.1.5 修复工程中污染防治设施建议与主体工程同时设计、同时施工、同时运行。

5.1.6 设备、电气装置的设计、选型和安装符合 GB 3836.1、GB 3836.15、GB 50058 的安全规定要求。

5.2 工程构成

5.2.1 原位热处理耦合蒸汽注入修复工程由原位热处理工程、蒸汽注入工程、辅助工程和配套设施组成。

5.2.2 原位热处理工程构成、辅助工程、配套设施参考 HJ 1165-2021。

5.2.3 蒸汽注入工程由蒸汽发生装置安装、软化水装置安装、注入管道安装和注入井建设组成。

5.3 总图构成

5.3.1 场址选择与总图布置参照 GB 50187 的规定执行。

5.3.2 宜结合原位热处理耦合修复中的原位热处理单元和蒸汽注入单元的工艺特点和地块现状，对办公区、加热耦合修复区、设备控制区、能源供应区、废水废气处理区和危废暂存区等进行分区布置。

6 工艺设计

6.1 一般原则

6.1.1 原位热处理耦合蒸汽注入修复工程针对污染土壤和地下水进行治理，总体设计满足 HJ 25.4、HJ 25.5、HJ 25.6 的要求。

6.1.2 宜根据场地污染特征、地层构造、水文地质条件、修复目标、修复深度、修复面积、修复周期、周边环境敏感点、能源供给条件等，结合调研和中试结果，确定原位热脱附耦合系统的设计方案。

6.1.3 工艺设计方案主要包括井群布设，工艺参数设计、系统监测方案等。

6.1.4 原位热处理耦合蒸汽注入技术的耦合模式主要包括：燃气热传导加热耦合蒸汽注入、电热传导加热耦合蒸汽注入和电阻加热耦合蒸汽注入。

6.1.5 原位热处理耦合蒸汽注入技术的加热模式宜根据场地特征确定、可采用热传导加热或者电阻加热与蒸汽注入技术在时间尺度或者空间尺度联用。

6.2 设计资料收集

6.2.1 原位热处理耦合蒸汽注入修复技术工艺设计前，宜根据场地调查收集相关基础设计资料，主要包括污染特征、水文地质条件、地下水质参数、土壤热物性参数、修复目标等相关信息和资料。

6.2.2 污染特征、水文地质条件通过在污染修复范围内开展高精度场地调查获取，调查密度宜不小于 10m×10m 网格布点。

6.2.3 原位热处理耦合蒸汽注入修复技术的可持续性评估，宜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，估算评估工艺运行能耗和药剂需求量绿色可持续性并进行设计优化。

6.3 工艺参数设计

6.3.1 场地加热所需热量计算

6.3.1.1 场地加热所需热量可参考公式 (1) 计算：

$$E_T = [(m_w \times c_w + m_s \times c_s) \times (T_2 - T_1) + m_w \times k \times l_w] \times \eta \quad (1)$$

式中：

E_T ——场地加热所需总热量，kJ；

m_w ——地下水质量，kg；

c_w ——水比热容，kJ/(kg·℃)；

m_s ——土壤质量，kg；

c_s ——土壤比热容，kJ/(kg·℃)；

T_2 ——场地初始温度，℃；

T_1 ——场地目标温度，℃；

k ——场地内地下水蒸发比例；

l_w ——水汽化潜热，kJ/Kg；

η ——场地加热效率。

6.3.1.2 土壤质量可参考公式 (2) 计算：

$$m_s = V \times \rho_s \times (1 - \varphi) \quad (2)$$

式中：

m_s ——土壤质量，kg；

V ——场地土方量，m^3；

ρ_s ——土壤密度，kg/m^3；

φ ——孔隙度。

6.3.1.3 地下水质量可参考公式 (3) 计算：

$$m_w = V \times \varphi \times \rho_w \times S_w \quad (3)$$

式中：

m_w ——地下水质量，kg；

V ——场地土方量，m^3；

φ ——孔隙率；

ρ_w ——水密度，kg/m^3；

S_w ——液态水占孔隙空间的比例。

6.3.2 热处理单元

6.3.2.1 采用电阻加热时，电流可通过公式 (3) 计算：

$$I = \sqrt[2]{\frac{E_{ERH}}{3.6 \times R \times t_{ERH}}} \quad (3)$$

式中：

I ——电流，A；

E_{ERH} ——需要电阻加热提供的热量，kJ；

R ——电阻率，Ω·m；

t_{ERH} ——电阻加热时间，h。

6.3.2.2 采用电热传导加热时，加热功率可通过公式 (4) 计算：

$$P = \frac{E_{TCH}}{3600 \times t_{TCH}} \tag{4}$$

式中：

P ——加热棒功率，kW；

E_{TCH} ——需要通过电热传导提供的热量，kJ；

t_{TCH} ——电热传导加热时间，h。

6.3.2.3 采用燃气热传导加热时，天然气流量可通过公式 (5) 计算：

$$Q = \frac{E_{GTR}}{q \times t_{GTR}} \tag{5}$$

式中：

Q ——天然气流量，Nm^3/h；

E_{GTR} ——需要燃气热传导加热提供的热量，kJ；

q ——天然气热值，kJ/Nm^3；

t_{GTR} ——燃气热传导加热时间，h。

6.3.4 蒸汽注入单元

6.3.1.1 蒸汽注入所用蒸汽宜选用饱和蒸汽或过热蒸汽，蒸汽温度宜为 120~150 ℃。

6.3.1.2 蒸汽注入压力不宜超过 11 kPa/m（筛网上覆盖层深度）。

6.3.1.3 蒸汽可与空气混合注入，空气比例宜为 10%~20%。

6.3.1.4 蒸汽注入总流量可通过公式 (6) 计算：

$$Q_T = \frac{E_{SEE}}{[(T_s - T_0)c_w + l_w] \times t_{SEE}} \tag{6}$$

式中：

Q_T ——蒸汽注入总流量，kg/h；

E_{SEE} ——需要蒸汽注入单元提供的热量，kJ；

T_0 ——蒸汽用水的初始温度，℃；

T_s ——蒸汽用水的目标温度，℃；

c_w ——水比热容，kJ/(kg·℃)；

l_w ——水汽化潜热，kJ/kg；

t_{SEE} ——蒸汽加热时间，h。

场地中典型介质和流体的热性能参数见附表 B。

6.4 井群布设

6.4.1 宜根据污染特征、地层结构、水文地质条件等确定加热井与抽提井的数量及位置。

6.4.2 热传导加热井间距建议为 2 m～6 m，电阻加热井间距建议为 4 m～6 m，蒸汽注入井间距建议为 6 m～15 m。具体的井间距宜根据实际场地污染特征、地层构造、水文地质条件、导电导热性能、修复效率、修复工期等因素调整。

6.3.3 根据场地污染特征布置加热井，宜采用正六边形或正三角形布局。

6.3.4 加热井和抽提井的数量比例宜根据场地条件确定，在 4:1～1:1 之间。

6.3.5 利用热处理耦合蒸汽注入处理低渗透层和高渗透层交替存在场地，宜在土壤渗透系数低于 10^{-4} cm/s 的地层采用热传导或电阻加热，高于 10^{-4} cm/s 的地层采用蒸汽注入，相关布局示意可参考图 2。

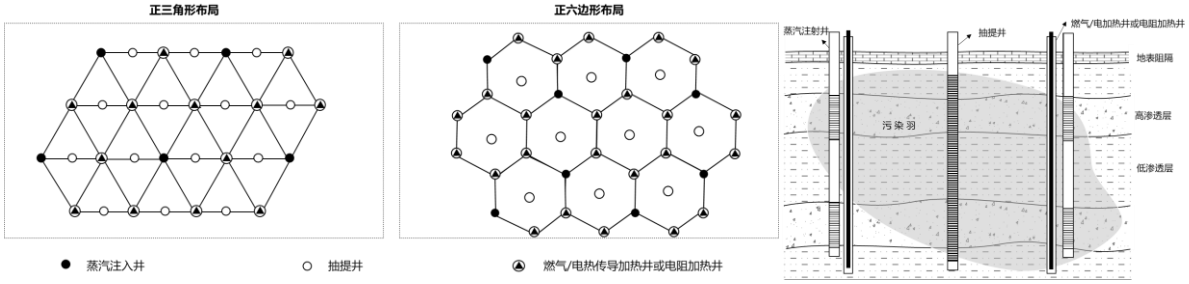


图 2 井群平面布设示例 1

6.3.6 利用热处理耦合蒸汽注入处理地下水流（流速> 10^{-4} m/s）存在场地，可利用蒸汽注入形成“蒸汽屏障”减小地下水渗流对热处理模块的影响，宜在热处理加热井周边布设蒸汽注入井，降低地下水流对热传导加热井或电阻加热井的影响，相关布局示意可参考图 3。

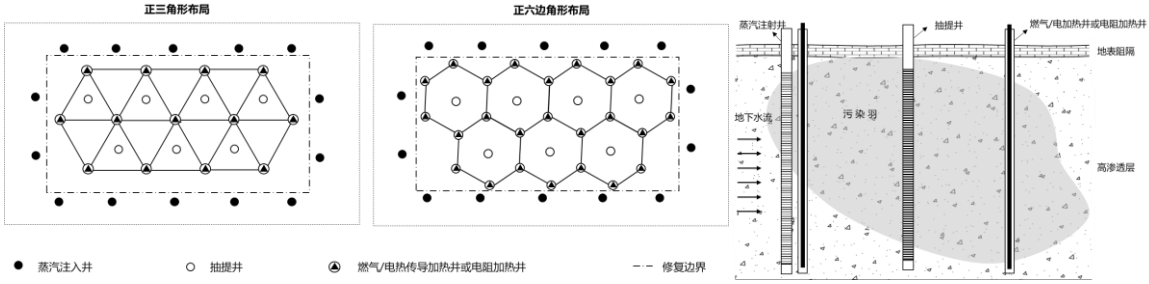


图 3 井群平面布设示例 2

6.3.7 对于适用电阻加热技术，但土壤含水率低于 20% 的场地，可利用注蒸汽为电阻加热单元补水，可将电阻加热井和蒸汽注入井耦合，保证加热区域良好的导电条件，相关布局示意可参考图 4。

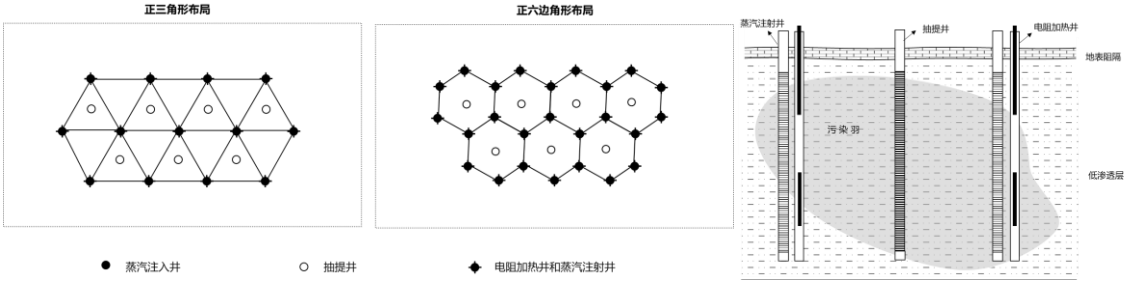


图 4 井群平面布设示例 3

6.4 工艺设备设计要点

6.4.1 蒸汽单元要点如下：

a) 软水制备模块可采用反渗透工艺、离子交换工艺等，处理能力与系统需水量相匹配；

b) 蒸汽锅炉宜根据蒸汽注入速率、目标温度及所需压力进行选型，锅炉给水泵宜具备自动进行给水、停泵，水位高、低自动报警功能，在水位极高、极低时锅炉燃烧机能自动停止运行；

c) 蒸汽注射管路宜具备温度、压力、流量的显示和记录，量程与系统处置能力相匹配；

d) 地表无硬化地面时，蒸汽注入井深度宜大于 1 m。

e) 蒸汽注射井的直径宜为 10~20 cm，钻孔直径宜为 20~30 cm。

f) 宜在埋地最低点处设置疏水阀，自动排出凝结水、空气及其它不凝结气体，防止蒸汽冷凝水堵塞管路并阻止水蒸汽泄漏。

6.4.2 热脱附单元设计要点如下：

a) 电阻加热模块：

——电极两端宜安装电气隔离盖，防止两端过热，电荷分布更均匀；

——电极两端宜设置注水口，以调节电极两端周边土壤的含水率，保持电路通畅；

——电阻加热井的直径宜为 10~20 cm，钻孔直径宜为 25~30 cm；

b) 燃气热传导加热模块：

——燃气管道上宜安装调压阀，确保进入燃烧器的燃气压力要求；

——助燃风机能经常保持在高效区内运行；

——助燃风机风量范围能满足系统风量变化要求；

——工作压力能满足最不利点所需风压的要求；

——燃气热传导加热棒内径宜为 8~11 cm，外径宜为 12~15 cm；

c) 电热传导加热模块

——加热井的井头宜喷涂防锈漆，井管与法兰现场焊接，法兰之间采用金属石墨垫密封；

——电加热井的直径宜为 5~9 cm，钻孔直径宜为 10~17 cm；

6.4.3 抽提单元设计要点如下：

a) 所选抽提泵能保持在高效区内运行；

b) 抽提泵的工作压力能满足最不利点所需真空度的要求；

c) 抽提井的井管直径宜为 10~20 cm，钻井孔的直径宜为 15~30 cm；

d) 抽提井的开筛缝宽度通常为 0.22 ~0.5 mm，具体根据场地土壤性质确定；

e) 水平抽提井位置根据场地特征确定，一般放置在地下范围 0.5 m 处。

6.4.4 废水废气处理单元设计要点如下：

a) 废气处理模块的处理能力同时满足预期的最大废气产生量、最高污染物负荷和废水排放限值要求，处理工程设计及施工符合 HJ 2000、HJ/T 389 等标准的相关规定；

b) 废气处理可采用吸附法、氧化法和燃烧法等，吸附法参照 HJ 2026 设计，催化燃烧法参照 HJ 2027 设计；

c) 废气处理模块的处理能力同时满足预期的最大废水产生量、最高污染物负荷和废水排放限值要求，处理工程设计施工符合 HJ 2015、 GB 50268 等标准的相关规定；

d) 废水处理的技术工艺通常包括：油水分离、混凝、吹脱、高级氧化、活性炭吸附等。油水分离技术参照 GB/T 12917、 HJ 580，混凝法参照 HJ 2006，吹脱法参照 HJ2007，高级氧化法参照 HJ 1095；

e) 废水储存、处理设施敞开液面挥发性有机物逸散排放控制符合 GB 37822 的规定；

f) 废水废气处理单元产生的有利用价值的废油、水等宜进行回收，否则按照固体废物鉴别。

6.4.5 监测单元中纵向上监测点的设置间隔保证每个点位上有 3-10 个监测点。

6.4.6 辅助单元的设计要点如下：

a) 供能模块

——根据现场及周边能源供应条件确定供热能源，选用的能源满足国家及地方相关规定，能源需求量通过能量平衡计算确定；

——电加热可选用工频交流电；

——燃气燃油加热通常可选用管道天然气、压缩天然气、液化天然气、液化石油气、丙烷、柴油等；

——宜优先选用场地周边存在满足项目要求的蒸汽源，采用蒸汽锅炉时，其安装、施工和验收满足 GB 50273 等标准的要求，锅炉污染物排放满足 GB13271 要求。

b) 中控模块宜具有以下功能：
——控制和调节蒸汽单元的压力、流速、温度；
——控制和调节电阻加热模块的电压、功率和相位；
——调节燃气热传导模块的燃气量及熄火保护功；
——对电热传导模块加热元件的供电、断电、稳定电压、过流/过载保护、信号采集、温度控制、监管等功能；
——控制和调节抽提压力、流量等。
c) 地表阻隔：
——宜采用具有良好防渗和隔热的材料，导热系数低于 0.045W/(m·K)；
——一般从下至上依次为防渗层和混凝土层，混凝土层的厚度宜在 10 cm～60 cm。

6.4.7 原位热处理耦合蒸汽注入修复装备宜采用自动化、信息化、模块化和橇装化设计。

6.5 地表保温与阻隔

6.5.1 水平表面阻隔层面积宜大于修复区域，阻隔材料具有良好的隔热、防渗及防腐蚀性能。地表温度宜不高于 60℃（因夏季暴晒的地表升温除外）。一般从下至上依次为防渗层和保温层，防渗层厚度一般不小于 5 cm，保温层厚度一般在 10~20 cm。

6.5.2 采用电阻加热时，在防渗层和保温层之间设置等电位层。

6.6 固体废物与噪声

6.6.1 施工和运行过程中所产生的污染土壤等固体废物的处理符合国家、地方和相关行业规定。

6.6.2 噪声控制符合 GB 12348 和 GB/T 50087 的规定。

6.6.3 钻探、机房和处理设备的设计、安装、建设、运行采取有效的隔声、消声等降低噪声的措施。噪声和振动控制的设计符合 GB/T 50087 的规定；机房内、外的噪声分别符合 GB 3096 的规定；厂界环境噪声排放符合 GB 12348 的规定。

7 主要工艺设备和材料

7.1 一般原则

7.1.1 主要工艺设备的性能满足本标准第 6 条的相关要求。

7.1.2 井材、管道、阀门等满足 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，符合 GB 3836.1 及 GB 3836.15 的规定。

7.2 原位热处理耦合蒸汽注入修复技术工艺设备和材料

7.2.1 原位热处理耦合蒸汽注入修复系统主要包括蒸汽注入单元、热处理单元、抽提单元、废气废水处理单元、监测单元和辅助单元等。

7.2.2 蒸汽注入单元由软水制备模块、蒸汽锅炉、蒸汽缓冲罐、蒸汽过热器、压缩空气缓冲罐、空气压缩机、管路、蒸汽注入井等组成。

7.2.3 热处理单元可选电阻加热、燃气热传导加热、电热传导加热。电阻加热模块由电源、管路和电阻加热井组成。燃气热传导加热模块由燃气源、燃气管道、燃烧器、助燃风机和燃气热传导加热井组成。热传导加热模块由电源、管路 和电热传导加热井组成。

7.2.4 抽提单元由抽提泵、管路、抽提井组成。

7.2.5　废水废气处理单元由气液分离器、废水处理模块和废气处理模块组成。
7.2.6　监测单元由监测井、压力传感器、温度传感器等、数据接收记录仪等组成。
7.2.7　辅助单元由供能模块、中央控制模块、地表阻隔等组成。中央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。

8　监测与过程控制

8.1 修复系统监测

8.1.1　在原位热处理耦合蒸汽注入修复实施过程中，对加热单元、蒸汽注入单元及目标污染物浓度等参数进行实时和定期监测，具体监测指标见附表 A。根据监测数据对修复效果进行评估，并据此对系统运行参数进行优化和调整，以提高修复效率。
8.1.　原位加热、地下温度监测、废气排放监测、周边土壤与地下水监测操作等参数或指标参照 HJ 1165-2021 中的相关规定执行。其中修复系统运行过程还宜记录累积能源消耗（电力或燃气消耗总量）。
8.1.3　在蒸汽注入过程中宜对蒸汽注入入口处的蒸汽温度、蒸汽压力、蒸汽发生器总流量、蒸汽出气流量实时监测，计算每口单井的日注入量及累计注入量，根据该数据实时调整各个注入井注入量大小，确保每口注入井的总注入量基本一致。
8.1.4　在运行实施过程中，可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、溶解氧、氧化还原电位，以及地下水水位埋深进行每日监测。

8.2 过程控制

8.2.1　监测系统宜实时监测土壤和地下水的温度、压力，流量、液位、水质参数宜传输到控制系统。加热与注入的过程控制宜结合土壤温度、地下水水质参数、污染物浓度、尾气浓度等进行动态调节。
8.2.2　控制系统配有安全联动装置，在发生突发情况时，可以关闭加热系统或注入系统。

9　施工与调试

9.1　施工

9.1.1　设备、材料、器件等具备产品的合格证书、产品性能检测报告。
9.1.2　施工过程可参照 HJ1165-2021 中的相关规定执行。

9.2　调试

9.2.1　工程安装、施工完成后宜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。
9.2.2　整体调试要求：各单元运转正常，技术指标达到设计要求。
9.2.3 系统调试宜采取循序渐进方式，避免出现较大的工况波动。系统调式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)　上电测试对各类仪器、仪表，确保接线正确、量程设置准确，测控性能稳定；
e)　根据工艺流程进行分项调试和整体调试；
f)　现场各设备仪表与中控系统逐一对点，匹配各仪控系统要求；

9.2.4 调试期间宜对工程运行进行性能试验，主要包括以下内容：

a) 污染区域升温情况；
b) 抽提单元的最大抽提量；
c) 废水废气处理单元的处理效率；
d) 能源和材料的消耗试验；
e) 运行稳定性试验。

10 运行和维护

10.1 一般原则

10.1.1 修复系统运行之前做好安全技术交底，建立应急处置办法。
10.1.2 建立完整的台账制度，包括签到表、运行参数记录表、运行日志、周报等。

10.2 系统启动

10.2.1 原位热处理耦合蒸汽注入修复工程运行在系统通过整体调试、各环节运转正常、技术指标达到设计要求后启动运行。
10.2.2 系统的启动顺序宜为废气废水处理单元—抽提单元—供能单元—热处理单元—蒸汽注入单元。

10.3 运行管理

10.3.1 原位热处理耦合蒸汽注入修复技术运行管理分为原位加热过程运行管理和原位蒸汽注入过程运行管理，充分掌握各过程运行要点及控制节点。
10.3.2 原位加热过程运行时，宜实时关注主体加热区域冷点温度和加热边缘冷点温度，达到设定温度并保持稳定时，可降低或停止能源输入，保持土壤温度。
10.3.3 原位蒸汽注入运行过程，当蒸汽注入总量及单井注入量达到设计要求，且蒸汽注入井周边温度监测井和压力监测井的监测数值与设计目标接近，地下水和抽提废水中污染物浓度、抽提废气中污染物浓度按趋势变化，蒸汽注入达到要求。
10.3.4 运行状态调节：原位热处理耦合蒸汽注入修复各阶段运行过程中，通过监测系统收集地层不同深度温度、压力、地下水水质等关键数据，并结合实际情况及时调整运行参数，以达到温度场的均匀有效分布。
10.3.5 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。
10.3.6 运行操作人员上岗前进行的专业培训包括但不限于以下内容：

a）必要的工艺技术知识、安全知识；
b）启动前的检查和启动要求条件；
c）设备的正常运行维护，包括设备的启动和关闭；
d）控制、报警和指示系统的运行和检查，以及必要时的纠正操作；
e）最佳运行条件参数的调节；
f）设备运行故障的发现、检查和排除；
g）事故或紧急状态下人工操作和事故处理；
h）设备日常和定期维护；
i）设备运行及维护记录，以及其他事件的记录和报告；
j）常用有毒有害化学品运输、使用知识及防毒、防腐蚀、防火等安全知识和技能培训；

k）地下水采样及水质监测技能培训。

10.3.7 建立修复系统运行状况、设施维护等的记录制度，主要记录包括但不限于以下内容：

a）系统的启动、停止时间；

b）材料进场质量分析数据、数量、时间；

c）系统运行工艺控制参数；

d）地下水质监测参数；

e）主要设备维修情况；

f）运行事故及处理、整改情况；

g）定期检验、评价及评估情况；

h）废水、废气排放处置情况。

10.4 维护

10.4.1 制定修复工程设备的定期维护计划，对现场设备设施进行定期检查，并记录检查内容与结果。

10.4.2 维护人员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。

10.4.3 准确、完整填写系统的运行日志、设备缺陷记录、故障处置记录和维护保养记录，并对采集、记录的数据进行分析，及时发现潜在问题。

10.4.4 根据设备的技术资料制定详细的维护保养规定，建立“点检”制度，及时有效地更换部件。

10.4.5 对标识牌、围挡、等进行管理和维护。标识牌保持清晰、完整，围挡确保无损坏、倾斜与缺失，地表覆盖保持完好。当发现损坏、颜色污染或有变化等现象，及时修复和更换。

10.4.6 定期更新备品备件库的规格、型号、备品数量等信息，按热脱附装备构成分类整理。重点保障采购周期长、价格高的进口或非标备件供应。

10.4.7 对各标志点和进行巡检、观测、记录，观测有无位移、裂缝、沉降、倾斜、腐蚀、变形等现象。

10.5 系统停止和拆除

10.5.1 运行和维护人员可根据现场的数据，包括加热温度、地下水中污染物采样结果、抽提管道尾气浓度等，判断系统的停止时间。

10.5.2 根据修复效果评估建议，可保留监测系统，持续获取温度、地下水水质参数等信息，最后拆除。

10.5.3 拆除装置设施前，对作业过程进行危险识别和风险评估。包括但不限于以下作业过程：

a）清洗、清理及拆除特殊作业（动火作业、受限空间作业、高处作业、吊装作业、临时用电作业、动土作业、断路作业）；

b）使用大型机械拆除；

c）装卸及运输作业；

d）拆卸人员个人防护。

10.6 事故应急处理

10.6.1 宜制订切实可行的原位热处理耦合蒸汽注入修复工程事故应急预案，事故发生后，立即依照有关法律、法规、规章的规定采取相应的处置措施，尽可能地降低事故影响。

10.6.2 原位热处理耦合蒸汽注入修复工程事故应急措施内容至少包括以下内容：

a) 排放超标应急处理措施；

b) 事故停机应急处理措施；

c) 重要设备/系统故障应急处理措施；

d) 火灾事故应急处理措施；

e) 触电事故应急处理措施；
f) 突发停水/停电应急处理措施；
g) 人员伤亡应急救援措施等。

10.6.3 事故发生后，做到迅速切断和控制污染源，防止污染蔓延扩散，并标明危险区域，封锁危险场所，划定警戒区；立即疏散、转移可能受到危害的人员，并进行妥善安置，根据需要及时、安全地将重症伤病员转运到有条件的医疗机构加强救治；做好有毒有害物质和消防废水、废液等的收集、清理和安全处置工作。

10.6.4 事故处理时做好记录、分析原因，防止同类事故重复发生。

11 职业健康与劳动安全

11.1 职业健康

11.1.1 职业卫生符合 GB 12801 的有关规定。

11.1.2 对操作人员、技术人员和管理人员进行相关专业技术、安全防护、应急处理等理论知识和操作技能的培训。

11.1.3 工程中有可能发生急性职业损伤的有毒、有害工作场所，设置报警装置，配备现场急救用品、冲洗设备、应急撤离通道和必要的泄险区。

11.1.4 在高温区域设置安全警示标志，防止操作人员烫伤灼伤。

11.1.5 修复技术实施过程中，现场施工人员佩戴符合国家职业卫生标准的防护用品。防护用品根据不同岗位合理配备，并依据质量或质保期换新。

11.1.6 制订切实可行的人员伤害急救处置预案，并进行必要的训练和演习。

11.2 劳动安全

11.2.1 制定火灾、爆炸、自然灾害等意外事件的应急预案。生产作业区配备消防器材，明显位置配有禁烟、防火、危险防护等警示标识和安全标志。

11.2.2 注意用电安全，电气系统设计满足 GB 50058 的要求，电气设备由专业电气人员操作，电气装置满足 GB 19517 的要求。采用电阻加热的修复区域，跨步电压小于 15 V。

11.2.3 高温设备和管道设置保温绝热层，地面管道、装置外表面温度宜不高于 60 ℃。现场设置明显标志，严禁明火。

11.2.4 燃气的运输、卸载、储存及气化站内的操作等工作由专业人员执行。操作人员穿戴防静电防护服。

11.2.5 燃气设备的位置符合 GB 50494 等国家或相关行业标准规定。燃气管道设计及安装符合 GB 50028、 GB 50494 的要求。

11.2.6 蒸汽输送管道、抽提管道、输送泵的设计安装满足 GB/T 20801 的要求。

11.2.7 在设备安装和检修时有相应的防爆炸、烫伤及触电等安全保护措施。

附 录 A
（资料性）

原位热处理耦合蒸汽注入修复系统监测指标见表A。

表 A 原位热处理耦合蒸汽注入修复系统监测指标表

系统模块		监测指标		监测频次	备注
热处理单元	电阻加热	加热电流		实时监测	/
		地层电阻率		实时监测	/
		加热区地表电压		实时监测	/
	燃气热传导	燃气流量			
		管道压力		实时监测	燃烧器进口处管道压力宜大于3.4 kPa
		燃烧器出气温度		实时监测	/
		燃烧器出气 CO 含量		实时监测	%
	电热传导	加热棒功率		实时监测	/
		加热棒温度		实时监测	
蒸汽注入单元		入口处的蒸汽温度		实时监测	/
		入口处的蒸汽压力		实时监测	/
		蒸汽发生器总流量		实时监测	/
		蒸汽出气流量		实时监测	/
抽提单元		抽提井口温度		实时监测	/
		抽提井口压力		实时监测	/
		抽提井口目标污染物浓度		实时监测	/
废水废气处理单元		废水排放口污染物浓度		1~4 周/次	废气排放符合 GB 16297、GB 14554 的要求，废水排放符合 GB 8978 的要求
		废气排放口污染物浓度		1~4 周/次	
监测单元		修复区地下温度		实时监测	/
		修复区地下压力		实时监测	/
辅助单元		各单元的能源消耗		1 日/次	/
修复区域		修复区地下水水质	温度	1~2 周/次	
			pH	1~2 周/次	
			溶解氧	1~2 周/次	
			氧化还原电位	1~2 周/次	
		修复区热损失		1~2 周/次	
		大气污染物无组织排放		1~3 月/次	监测指标及频次参考 HJ819，排放符合 GB 16297 的要求
		目标污染物浓度	土壤	修复结束采样 1 次	/
			地下水	1~2 周/次	/
		厂界噪声	施工阶段	实时监测	符合 GB 12348 的要求，夜间生产的要监测夜间噪声。
			运行阶段	1 季度/次	

附 录 B
（资料性）

场地典型介质和流体的热性能参数见表B。

表 B 场地典型介质和流体的热性能参数

介质/流体	热导率（W/m·℃）	比热容（kJ/m³·℃）	扩散系数（m²/s）	密度（g/cm³）
石英砂	8.79	2008	4.38×10^{-6}	2.66
粘土矿物	2.93	2008	1.46×10^{-6}	2.65
有机质	0.25	2510	9.96×10^{-6}	1.30
粉质砂（干）	1.23	1906	9.76×10^{-7}	1.52
粉质砂（湿）	1.41	4359	5.82×10^{-7}	1.80
淤泥（干）	0.96	1078	1.29×10^{-6}	1.44
淤泥（湿）	1.26	5030	4.77×10^{-7}	1.90
水	0.57	4184	1.36×10^{-7}	1.0
空气	0.0028	1.3	1.68×10^{-5}	0.0013