ICS 13.030.01
CCS ZO5

T/SSSC

中 国 土 壤 学 会 团 体 标 准

T/SSSC 004—2024

污染场地原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复技术指南

Technical guideline for *in-situ* thermal conductive heating/ electrical resistance heating coupled with steam enhanced extraction for 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 3

5　技术要求 4

6　工艺设计 5

7　主要工艺设备与材料 7

8　施工与调试 9

9　运行与维护 10

10　监测与过程控制 11

11　职业健康与劳动安全 12

附　录 A　场地典型介质和流体的热性能参数 13

附　录 B　原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复系统监测指标 14

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。

污染场地原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复技术指南

1 范围

本文件提供了污染场地原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提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、施工与调试、运行与维护、监测与过程控制、职业健康与劳动安全等需要考虑的有关信息及要点。

本文件适用于具有高渗透性地层分布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。

GB 3096 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 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 50187 工业企业总平面设计规范
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
TSG 11	锅炉安全技术规程
DB32/T 4680	污染地块原位热脱附修复效果评估技术指南

3 术语与定义

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方式向地下输入热能，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，并通过抽提实现对目标污染物去除的技术，包括热传导加热、电阻加热和蒸汽注入加热。

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

蒸汽强化抽提 steam enhanced extraction

通过将高温水蒸汽注入污染区域，加热土壤和地下水，从而强化目标污染物抽提效果的处理过程。

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

原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复技术 *in-situ* thermal conductive heating/ electrical resistance heating coupled with steam enhanced extraction

通过原位热传导加热或者电阻加热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强化抽提技术，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抽提带至地表，从而提高修复效率的技术。

4 技术路线

4.1 一般原则

4.1.1 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复技术路线包括场地概念模型建立、技术/工艺设计、修复系统建设、运行与维护和修复效果评估。

4.2 场地概念模型建立

4.2.1 前期开展资料调研与收集，包括场地的基本信息、整个区域的水文地质条件、地球化学参数和污染物类型。

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分布建立精细化场地概念模型。

4.3 技术/工艺设计

4.3.1 根据不同的原位热处理技术特点筛选合适的加热技术，制定耦合修复方案，确定加热温度、蒸汽注入速率、井群布设空间耦合和加热顺序时间耦合等关键技术参数。

4.3.2 原位蒸汽强化抽提技术适用于处理各类挥发性有机污染物。特别适用于具有重度污染的场地，比如污染源区、存在非水相液体等的区域。原位蒸汽强化抽提技术一般适用于渗透系数高于 10^{-4} cm/s 的地层，对于包气带和饱和带均适用。

4.3.3 当污染物沸点高于 120 ℃时，宜选择原位热传导加热耦合蒸汽强化抽提修复技术。在当目标修复深度大于 25 m 时，不适于选择燃气热传导加热。

4.3.4 当污染物沸点低于 120 ℃时，可选择原位电阻加热或热传导加热耦合蒸汽强化抽提修复技术。根据场地地层条件，在低渗透区域包气带宜选择热传导加热，在低渗透区域饱和带宜选择电阻加热。在当目标修复深度大于 25 m 时，不适于选择燃气热传导加热。

4.3.5 宜开展小规模中试，验证修复技术方案可行性并根据中试结果优化关键修复技术参数。

4.4 修复系统建设

4.4.1 根据技术/工艺设计方案开展修复系统建设，安装调试所需修复设备，准备修复材料。

4.4.2 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复相关工程规范要求参考 HJ 1165。

4.5 运行与维护

4.5.1 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，分析评估修复进度。

4.5.2 运行过程宜注意关键节点控制，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 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提技术修复效果评估方案制定可参考 DB32/T 4680 执行。土壤样品修复效果评估方法可按照 HJ25.5 执行。地下水样品修复效果评估方法可按照 HJ25.6 执行。

4.6.2 若未达到修复目标则继续修复；若达到修复目标宜增加观测期，确定工程影响完全消除后仍达到修复目标。

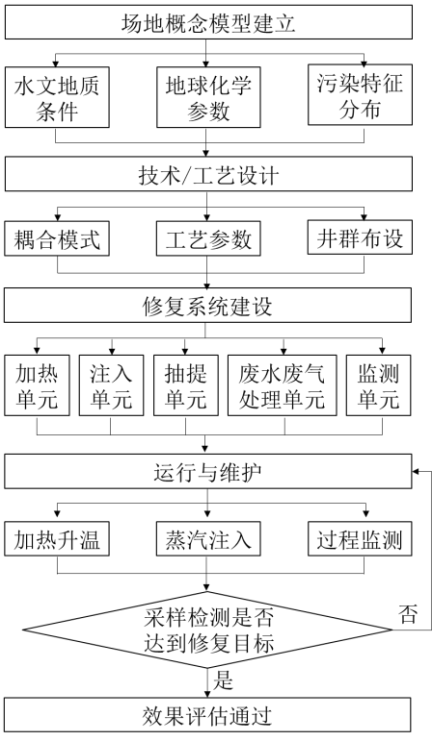


图 1 污染场地原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复技术路线

5 技术要求

5.1 一般原则

5.1.1 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复技术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，以保证热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复达到最优协同效果。

5.1.2 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复技术理后的土壤和地下水中目标污染物浓度需达到修复目标值的要求。

5.1.3 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复技术的设计与实施宜遵循绿色可持续修复理念，判断耦合修复技术的适用性，避免能源和资源的浪费。

5.1.4 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。

5.1.5 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。
5.1.6 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 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复工程由主体工程、辅助工程和配套设施组成。
5.2.2 原位热传导/电阻加热主体工程、辅助工程、配套设施参考 HJ 1165。
5.2.3 蒸汽强化抽提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 总图布置

5.3.1 场址选择与总图布置参照 GB 50187 的规定执行。
5.3.2 宜结合原位热传导/电阻加热处理单元和蒸汽强化抽提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。
5.3.3 消防应急、二次污染防治、急救、警示等信息布置参照 HJ 1165。

6 工艺设计

6.1 一般原则

6.1.1 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复技术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、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，结合中试结果，确定原位热处理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 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提的加热模式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耦合联用。

6.2 设计资料收集

6.2.1 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提技术工艺设计前，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 针对修复范围内不确定性较大的区域的污染特征和水文地质条件，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。

6.3 工艺参数设计

6.3.1 根据场地污染特征、修复目标、修复时间和修复成本要求，计算场地加热理论所需热量。
6.3.2 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 ℃，蒸汽注入压力不宜超过 11 kPa/m（筛网上覆盖层深度），蒸汽可与空气混合注入，空气比例宜为

10%~20%。

6.3.3 场地中典型介质和流体的热性能参数见附表 A。

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。

6.4.3 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。

6.4.4 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。

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

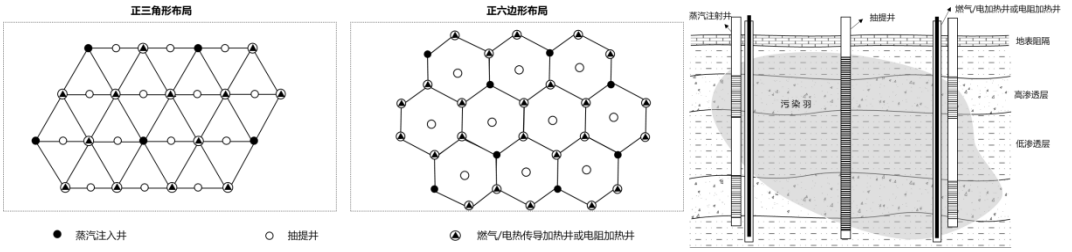


图 2 井群平面布设示例 1

6.4.6 处理地下水流影响的场地，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。

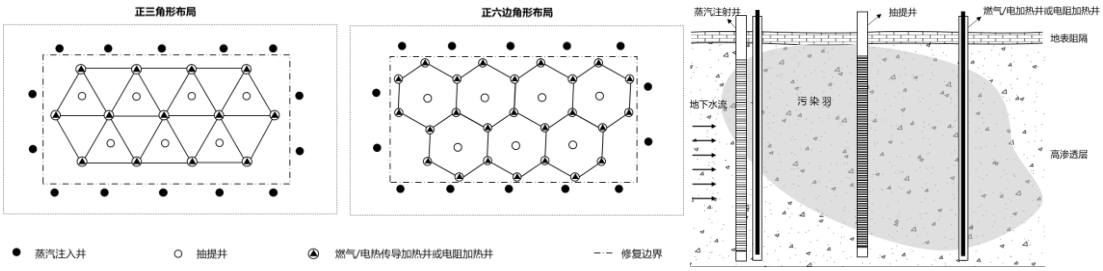


图 3 井群平面布设示例 2

6.4.7 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。

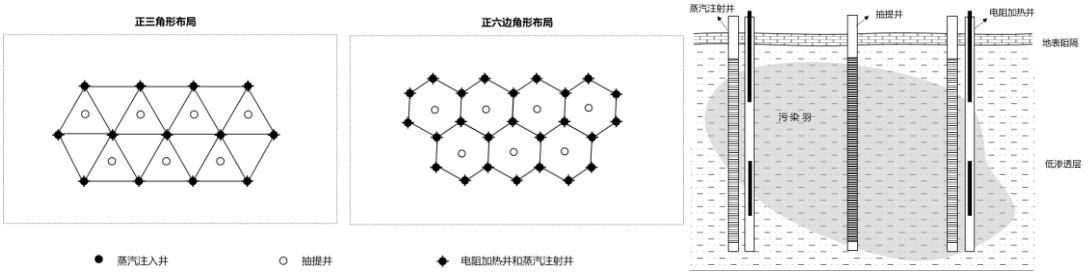


图 4 井群平面布设示例 3

6.5 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混凝土层，混凝土层的厚度宜在 10 cm～60 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 主要工艺设备与材料

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 工艺设备与材料

7.2.1 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复系统主要包括热传导/电阻加热单元、蒸汽注入单元、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 热传导/电阻加热单元可选电热传导加热、燃气热传导加热或电阻加热。电热传导加热模块由电源、管路和电热传导加热井组成。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。电阻加热模块由电源、管路和电阻加热井组成。

7.2.3 热脱附单元要点如下：

a) 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；

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；

7.2.4 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。

7.2.5 蒸汽注入单元要点如下：

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，锅炉满足 TSG 11 标准的相关规定；

c) 蒸汽注入管路宜具备温度、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) 蒸汽注入井的直径宜为 10~20 cm，钻孔直径宜为 20~30 cm。

f) 宜在设备管道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。

7.2.6 抽提单元由抽提泵、管路、抽提井组成。

7.2.7 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) 对于包气带以气相抽提为主，对于饱和带以多相抽提为主；

f) 水平抽提井位置根据场地特征确定，可设置在包气带。

7.2.8 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。

7.2.9 废气废水处理单元要点如下：

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) 废水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。

7.2.10 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。

7.2.11 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。

7.2.12 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，能源需求量可通过能量平衡计算确定；

——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；

——电加热可选用工频交流电；

——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；

——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；

——调节燃气热传导模块的燃气量及熄火保护功；

——控制和调节抽提压力、流量等。

7.2.13 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复装备宜采用自动化、信息化、模块化和橇装化设计。

8 施工与调试

8.1 施工

8.1.1 施工中采用的工程技术文件、承包合同文件对施工质量验收的要求不得低于国家相关专项工程规范的规定。

8.1.2 设备、材料、器件等具备产品的合格证书、产品性能检测报告。

8.1.3 施工过程可参照 HJ1165 中的相关规定执行。

8.2 调试

8.2.1 工程安装、施工完成后宜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 整体调试要求：各单元运转正常，技术指标达到设计要求。

8.2.3 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；

8.2.4 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。

9 运行与维护

9.1 一般原则

9.1.1 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复工程的运行、维护和安全管理除执行本文件外，还应参照国家现行的有关标准及文件的要求。

9.1.2 在满足设计工况的条件下运行，并根据工艺要求，定期对设备、电气、仪器仪表和建（构）筑物进行检查维护，确保修复系统稳定可靠运行。。

9.2 系统启动

9.2.1 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提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。

9.2.2 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。

9.3 运行管理

9.3.1 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提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，宜充分掌握各过程运行要点及控制节点。

9.3.2 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，保持场地温度。

9.3.3 原位蒸汽注入运行过程时，宜关注蒸汽注入总量及单井注入量，达到设定蒸汽注入量和设定目标温度并保持稳定时，可降低或停止蒸汽注入，保持场地温度。

9.3.4 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提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。

9.3.5 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。

9.3.6 运行操作人员上岗前进行的专业培训可参照 HJ1165 中的相关规定执行。

9.4 维护

9.4.1 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。

9.4.2 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。

9.4.3 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。

9.4.4 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。

9.4.5 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。

9.4.6 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。

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

9.5 修复效果评估

9.5.1 经综合分析运行过程的定期检测结果后，若判断修复达到目标值，可开展修复效果评估。
9.5.2 修复效果评估宜在系统拆除前开展，总体满足 HJ 25.5 的技术要求。
9.5.3 效果评估过程中，土壤采样点数量和布置位置需结合实际运行过程中温度、污染物浓度和水质参数的监测结果确定，重点设置在冷点区域和污染物浓度较高区域等修复薄弱区。

9.6 系统停止和拆除

9.6.1 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。
9.6.2 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。
9.6.3 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。

9.7 事故应急处理

9.7.1 宜制订切实可行的原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提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。
9.7.2 事故应急措施内容总体参照 HJ 1165 中的相关规定执行。
9.7.3 事故处理时做好记录、分析原因，防止同类事故重复发生。
9.7.4 确保配备二次污染防范与控制应急物资，建立台账，定期检查，做好清单管理，按照应急预案建立高效的应急物资调配程序。

10 监测与过程控制

10.1 修复系统监测

10.1.1 在原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提技术修复实施过程中，对热传导/电阻加热单元、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 B。根据监测数据对修复效果进行评估，并对系统运行参数进行优化和调整，以提高修复效率。
10.1.2 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 中的相关规定执行。其中修复系统运行过程宜记录累积能源消耗（电力或燃气消耗总量）。
10.1.3 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。

10.1.4 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。

10.2 过程控制

10.2.1 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。

10.2.2 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。

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）

场地典型介质和流体的热性能参数见表A。

表 A 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·℃）	热扩散系数（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

附 录 B
（资料性）

原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复系统监测指标见表B。

表 B 原位热传导/电阻加热耦合蒸汽强化抽提修复系统监测指标表

系统模块		监测指标		监测频次	备注
加热单元	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	/
	燃气热传导加热	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	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	