ICS 13.030.01
CCS ZO5

T/SSSC

中 国 土 壤 学 会 团 体 标 准

T/SSSC 006—2024

污染场地原位热处理耦合微生物修复技术指南

Technical guideline for *in-situ* thermal treatment coupled with bioremediation 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 8

8 施工与调试 9

9 运行与维护 9

10 监测与过程控制 12

11 职业健康与劳动安全 12

附 录 A 原位热处理耦合微生物修复过程检测参数或指标 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》规定起草。

请注意本文件的某些内容可能会涉及专利。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：中国科学院南京土壤研究所、森特士兴集团股份有限公司、中科鼎实环境工程有限公司、北京市科学技术研究院资源环境研究所。

本文件主要起草人：宋昕、王晴、尹立普、李彦希、闫松、杨宗帅、张转霞、杨苏才、叶渊、杨勇。

污染场地原位热处理耦合微生物修复技术指南

1 范围

本文件提供了污染场地原位热处理耦合微生物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要点内容。

本文件适用于中低浓度、容易发生生物转化的单一及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 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 13271	锅炉大气污染物排放标准
GB 14554	恶臭污染物排放标准
GB 15603	危险化学品仓库存储通则
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 37822	挥发性有机物无组织排放控制标准
GB/T 50087	工业企业噪声控制设计规范
GB 50058	爆炸危险环境电力装置设计规范
GB 50187	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
HJ 25.1	建设用地土壤污染状况调查技术导则
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 25.3	建设用地土壤污染风险评估技术导则
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/T 415	环保用微生物菌剂环境安全评价导则
HJ 1165	污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附
DZ/T0270	地下水监测井建设规范

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

原位微生物修复 *in-situ* bioremediation

通过生物刺激、生物强化等方法提高地下环境中原位土著微生物或外源微生物对污染物的生物转化速率，从而使得污染土壤和地下水得到修复的过程。

3.2

微生物强化修复 bioaugmentation

向地下环境中注入具有特殊代谢能力的微生物来提高生物修复效率。

3.3

微生物刺激修复 biostimulation

通过改善微生物的生存环境来提高生物修复速率，包括向地下环境中注入营养物质、生物表面活性剂、共代谢基质、电子受体或供体、改善氧化还原条件等方法。

3.4

电子供体 electron donor

在微生物修复电子传递过程中供给电子和被氧化的物质。

3.5

电子受体 electron acceptor

在微生物修复电子传递过程中接受电子和被还原的物质。

3.6

好氧微生物修复 aerobic bioremediation

在有氧条件下污染物直接被微生物氧化代谢的过程。

3.7

厌氧微生物修复 anaerobic bioremediation

在厌氧条件下污染物直接被兼性厌氧和厌氧微生物转化的过程，包括厌氧氧化和厌氧还原。

3.8

生物修复添加剂 bioremediation additives

能够促进污染物生物转化的营养物质/生物表面活性剂/共代谢基质/电子受体/供体等生物修复药剂或生物修复菌剂。

3.9

热水注入加热 heating with hot water injection

将已经加热的热水注入污染区域从而加热土壤和地下水的处理过程，其中热水可以通过电能、燃气燃烧、太阳能等方式对自来水或者经过处理的地下水进行加热获得。

3.10

原位热处理耦合微生物修复技术 *in-situ* treatment coupled with bioremediation

原位热处理微生物耦合修复技术主要通过原位电阻加热（ERH）、热传导加热（TCH）或热水注入等原位加热技术使土壤和地下水的温度提高并维持在 30~45℃，同时利用生物修复添加剂，增加污染物的生物有效性，增强功能微生物的数量和活性，促进污染物的生物转化速率，从而提高修复效率。

4 技术路线

4.1 一般原则

4.1.1 原位热处理耦合微生物修复技术路线图如图 1 所示，包括场地概念模型建立、技术/工艺设计、修复系统建设、运行和维护、采样监测和效果评估。

4.2 场地概念模型建立

4.2.1 收集资料并调研场地基本信息，包括场地的基本信息、水文地质条件、土壤热物性参数、地球化学参数、污染特征及微生物特性等，建立精细化场地概念模型。

4.3 技术/工艺设计

4.3.1 根据场地相关信息以及概念模型的分析，明确加热方式和目标温度、生物修复添加剂类别和注入量等技术参数。

4.3.2 细化井群布设方案，明确满足修复要求的加热、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，制定修复技术工艺实施方案。

4.4 修复系统建设

4.4.1 开展加热单元、注入单元、抽提单元（可选）、废水废气处理单元、监测单元等现场建设，同时安装所需修复设备。

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 运行和维护

4.5.1 采用所选加热方式对地下环境进行加热并注入生物修复添加剂，通过对关键技术参数如温度、注入速率、注入压力及水质参数等进行全过程监测分析，反馈调节各阶段运行状态。

4.5.2 定期开展设备检查工作并及时进行维护，确保修复系统稳定运行可靠。

4.6 采样监测和效果评估

4.6.1 定期对土壤和地下水进行采样，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。

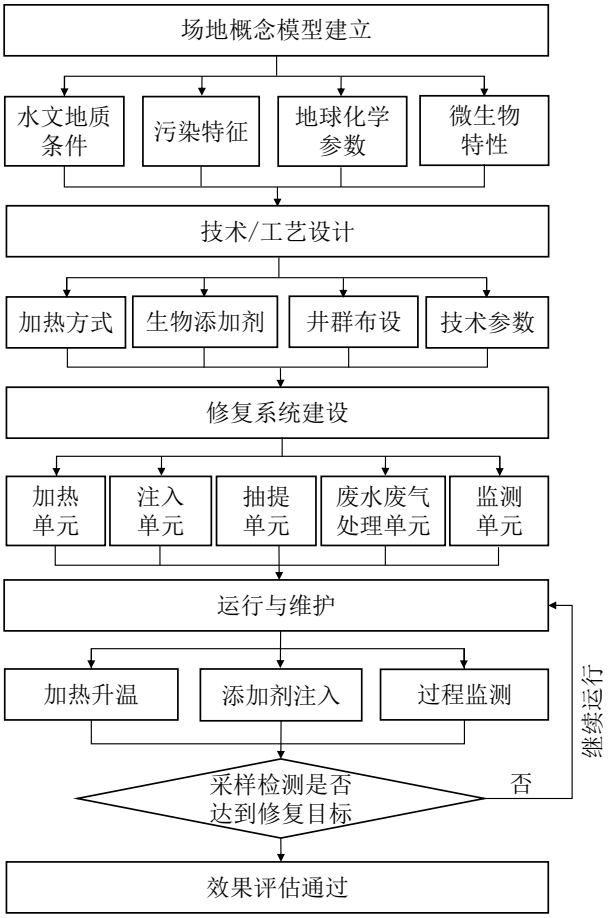


图 1 污染场地原位热处理耦合微生物修复技术路线

5 技术要求

5.1 一般原则

5.1.1 原位热处理耦合微生物修复技术工艺设计需综合考虑实际场地污染特征、修复目标值、水文地质条件、能源供给条件等因素，以保证耦合修复技术达到最优协同效果。

5.1.2 原位热处理耦合微生物修复处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 原位热处理耦合微生物修复技术需遵循绿色低碳可持续修复的理念，评估修复的环境经济效益和碳排放，判断原位热处理耦合微生物修复技术的适用性，避免能源和资源浪费。

5.1.4 原位热处理耦合微生物修复工程需因地制宜、科学合理，具备针对性和有效性。

5.1.5 原位热处理耦合微生物修复技术工艺设计本着成熟可靠、技术先进、经济适用的原则，并考虑节能、安全、操作简便等因素。

5.1.6 原位热处理耦合微生物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 3782、GB 13271、GB 16297、GB 14554、GB 12348 等国家、地方和相关行业排放标准要求。

5.1.7 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 原位热处理耦合微生物修复工程由主体工程、辅助工程和配套设施组成。
5.2.2 主体工程包括：加热单元、注入单元、抽提单元（可选）、废水废气处理单元、监测单元及控制单元等。加热单元主要为地上加热设备和地下加热井；注入单元包括地上生物修复添加剂溶配注入系统和地下注入井；抽提单元包括地下抽提和地面抽提单元；废水废气处理单元包括气液分离、冷凝、废水处理、废气处理等单元；监测单元包括温度、压力、流量、地下水水质参数和污染物浓度等运行参数的监测；控制单元包括温度、压力、流量和液位等运行参数的控制。
5.2.3 原位热处理耦合微生物修复辅助工程和配套设施参照 HJ 1165。

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 宜结合原位热处理耦合微生物修复技术的工艺特点和场地现状对办公区、耦合修复区、设备控制区、能源供应区、生物修复添加剂存储区和配置区、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 中的相关规定执行。
5.3.4 生物修复添加剂存储相关要求参照 GB 15603 的规定执行。

6 工艺设计

6.1 一般原则

6.1.1 原位热处理耦合微生物修复工程针对污染土壤和地下水进行治理，总体设计参照 HJ 25.1、HJ 25.2、HJ 25.3、HJ 25.4、HJ 25.5、HJ 25.6 的规定执行。
6.1.2 通过原位热处理耦合微生物修复实验室小试试验，对加热的目标温度、生物修复添加剂类别和浓度等进行筛选，通过中试试验对加热/抽提/注入井布设方案、加热和注入过程等相关参数进行筛选。
6.1.3 根据场地污染特征、水文地质条件、修复目标、修复周期、周边环境敏感点、能源供给条件等，并结合调研、小试、中试结果，确定加热单元、注入单元、抽提单元（如有）、监测与控制单元、废水废气处理单元等设计方案。

6.2 设计资料收集

6.2.1 原位热处理耦合微生物修复技术工艺设计前，应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、土壤和地下水地球化学参数、土壤热物性参数、修复目标、微生物群落及活性等相关信息和资料。
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。

6.3 工艺设计要求

6.3.1 根据场地污染特征、水文地质条件、修复时间和修复成本、能源匹配条件等要求，确定原位热处理耦合微生物修复工程的加热模式，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。其中加热方式包括 ERH、TCH 和热水注入加热，耦合修复区地下环境目标温度为 30~45℃。

6.3.2 供热能源参照 HJ 1165 中的相关规定。其中热水注入加热所需的热水可采用电加热、燃气锅炉加热以及太阳能加热等。

6.3.3 根据水文地质条件、修复成本和注入生物修复添加剂的理化性质等条件，选择适宜的微生物修复添加剂。

6.3.3.1 好氧氧化生物修复是在氧气的存在下微生物对污染物的直接代谢氧化。

a）氧气的注入可以分为两种方式：通过生物通风、地下水曝气等物理方式将其直接注入到地下；注入溶解或分解后可以释放氧气的化合物，主要包括钙和镁的过氧化物、过氧化氢和臭氧。

b）适用的污染物包括石油烃、多环芳烃及其他非卤化有机污染物等。

6.3.3.2 厌氧氧化生物修复是在缺氧环境下微生物对污染物的直接代谢氧化，常见于地下水污染修复过程中。

a）在缺氧条件下，生物修复添加剂可选择硝酸盐、锰(IV)、铁(III)、硫酸盐和碳酸盐，具体可根据现场实际情况确定。

b）适用的污染物包括苯系物、石油烃、多环芳烃和氯代烃类等污染物。

6.3.3.3 厌氧还原生物修复在缺氧条件下进行，可将有机碳等生物修复添加剂应用于地下水中，既可通过有机碳的好氧代谢来促进氧气消耗以创造和维持厌氧条件，同时提供电子供体促进污染物生物降解。

a）生物修复添加剂可分为水溶性和缓释型两种。常用的水溶性生物修复添加剂包括乳酸、丁酸盐、甲醇、乙醇、苯甲酸钠、糖浆和乳清等，常用的缓释型生物修复添加剂包括乳化植物油等。

b）适用的污染物包括卤化有机物、六价铬等部分溶解性重金属、高氯酸盐和硝酸盐等。

6.3.3.4 生物修复菌剂的选择和使用参照 HJ/T 415 中的相关规定执行。

6.3.4 根据水文地质条件、修复成本和生物添加剂的理化性质等条件选择适合的注入方式。

6.3.4.1 直接注入：

a）注入井注入：通过注入井将生物修复添加剂注入到地下环境中，根据现场实际情况可以采用单井多次注入，也可采用多井少次注入。

b）直推式注入：通过直推式设备将生物修复添加剂注入到地下环境中，其常用方式为 Geoprobe 直推。

6.3.4.2 循环注入：

a）通过注入井将生物修复添加剂注入到地下环境中，同时采用地下水抽提井将地下水抽出并循环回注。

6.3.5 生物修复添加剂注入的主要工艺参数包括添加剂注入浓度、注入流速、注入压力和注入量等，其工艺参数设置根据修复过程中的监测数据进行动态调整。

6.3.6 生物修复添加剂注入浓度需要根据添加剂性质、场地特征等因素确定。其中如注入有机碳源修复区域地下水中总有机碳浓度达到 1000 至 2000 mg/L 为宜。

6.3.7 注入单元在低温下运行时采取保温措施，每批次注入结束后排空系统，避免药液残留

造成管道冻裂和流体机械损坏。

6.4 井群布设

6.4.1 根据场地污染特征、水文地质条件、修复目标、修复周期等要求，确定加热井、抽提井、注入井和监测井的数量及位置。

6.4.2 加热井和注入井呈正三角形交叉布置，间距不小于 1m，抽提井宜布设在以加热井和注入井为顶点构成的正三角形中心位置。

6.4.2.1 加热井和抽提井的布设、构造和安装以及废气和废水处理单元参照 HJ 1165 中的相关规定。

6.4.3 注入井布设

6.4.3.1 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影响半径以及注入井间距。

6.4.3.2 注入井排布间距应小于生物修复药剂扩散半径，并形成水平或垂直方向上的重叠区域以保证生物修复添加剂与污染物充分接触。

6.4.3.3 注入井的建井深度应超过最大污染介质深度，一般向下延伸 1~2m 左右。

6.4.3.4 注入井需要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；若修复区深度超过 4m 或包含多个含水层或渗透系数相差大于两个数量级的地层，则注入井分层建井、开筛，其要求根据 DZ/T0270 执行。

6.4.3.5 注入井构造及安装如下：

a）热水和生物修复添加剂注入井主要由封闭段、注入段和沉砂段组成。

b）井管种类包括井壁管、过滤筛管和沉砂管，井壁管安装在场地非污染层，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。

c）井管材料需采用耐高温、耐腐蚀的材料建造，内壁平整圆滑，接头能弥合，连接后无弯曲。

d）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生物修复添加剂注射和出水量的作用。

6.4.4 监测井布设

6.4.4.1 温度监测井通常安装在加热井旁、加热井的远点和冷点位置，以监测内部温度及边界温度。根据深度设置每口井纵向上的温度监测点，一般不少于 3 个。

6.4.4.2 温度监测井至少高于修复区顶部 1 m、深至修复区底部 1 m。

6.4.4.3 地下水监测井一般设置于药剂注入井的中心区域、调查阶段发现的污染相对严重区域以及修复区上下游

6.4.4.4 地下水监测井垂直方向上深至修复区底部，并避免穿透至下部非修复区的含水层，分层设井要求根据 DZ/T 0270 执行，并和注入井的分层相同。

6.4.5 原位热处理耦合微生物修复技术典型井平面布设示意图如图 2 所示。

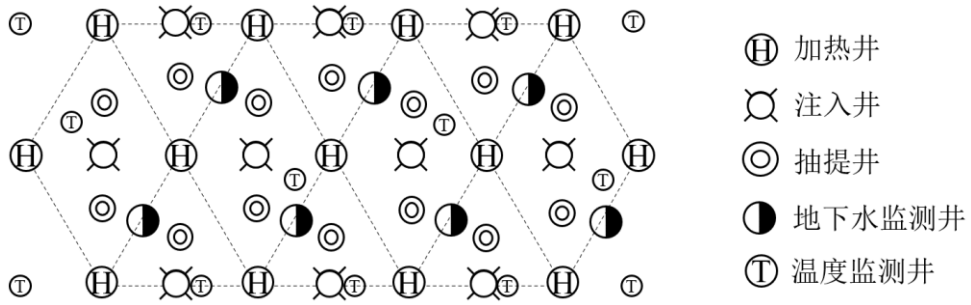


图 2 原位热处理耦合微生物修复典型井平面布置示意图

6.5 地表保温与阻隔

6.5.1 电阻加热或热传导加热时水平表面阻隔层面积需大于修复区域，阻隔材料需具有良好的隔热、防渗及防腐蚀性能。地表温度不高于 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 采用电阻加热时需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参照国家、地方和相关行业规定。

6.6.2 噪声控制参照 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、运行需采取有效的隔声、消声等降低噪声的措施。

6.6.4 噪声和振动控制的设计参照 GB/T 50087 的规定；机房内、外的噪声分别参照 GB 3096 的规定；厂界环境噪声排放参照 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需满足本标准第 6 条的相关要求。

7.1.2 当治理具有腐蚀性污染物或使用腐蚀性的生物修复添加剂时，管道、阀门等需满足相关防腐要求。

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，需参照 GB 3836.1 及 GB 3836.15 的规定。

7.1.4 修复过程中若使用特种设备需遵循特种设备使用管理规则。

7.1.5 当治理具有挥发性的有毒污染物时，需满足相关污染物处置及防护要求。

7.1.6 当使用管制的生物修复添加剂时，需满足相关存放要求及防护要求。

7.2 工艺设备与材料

7.2.1 加热单元的主要工艺设备和材料可参照 HJ 1165 中的相关规定执行。其中原位热处理耦合微生物修复技术中热水加热单元主要工艺设备包括：软化水设备、热水锅炉以及控制设备等。

7.2.2 注入单元的主要工艺设备有溶配药罐、混合比例泵、注入泵、注入井、流量及压力监测设备等。主要材料有管材、阀门、精密仪表和井填料等。主要功能与性能需满足以下要求：

7.2.2.1 溶配药罐需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。

7.2.2.2 混合比例泵的量程及功率能够满足生物修复添加剂融配及注入需求。

7.2.2.3 注入泵的选型需根据其所输送生物修复添加剂的理化性质、注入压力和注入流量来选定，工作压力能满足注入设计影响半径的要求。

7.2.2.4 流量和压力监测设备需满足量程要求。

7.2.2.5 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热和耐腐蚀性的金属/非金属材料，防腐蚀要求参照 GB 50727 的规定。

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 应用的设备、材料、器件等参照国家相关标准，需具备产品的合格证书、产品性能检测报告。

8.1.3 加热单元施工过程参照 HJ 1165 中的相关规定执行。

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和整体调试。

8.2.2 整体调试要求：各项系统运转正常，技术指标达到设计要求。

8.2.3 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） 抽提系统最大抽提量；
c） 生物修复添加剂溶液配制浓度与频次；
d） 注入井的最大注入流量；
e） 废水和废气系统处理效率；
f） 能源和生物修复添加剂消耗；
g） 运行稳定性。

9 运行与维护

9.1 一般原则

9.1.1 原位热处理耦合微生物修复工程的运行、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 原位热处理耦合微生物修复工程运行应在系统通过整体调试、各环节运转正常、技术指标达到设计要求后启动。

9.2.2 原位热处理耦合微生物修复系统的启动顺序为：监测与控制单元—废水废气处理单元—抽提单元—加热单元—注药单元。

9.3 运行管理

9.3.1 修复区域土壤及地下水加热运行过程，当主体加热区域及其边缘区域的最低温度均达到 30~45℃并保持稳定时，可降低或停止能源输入，保持土壤和地下水温度。

9.3.2 修复区域生物修复添加剂注入过程，当添加剂注入总量及单井注入量达到设计要求，且地下水中总有机碳、电导率、pH、氧化还原电位以及添加剂浓度变化情况和分布范围等达到设计要求，此时认为生物修复添加剂注入达到要求。

9.3.3 生物修复添加剂注入初始阶段可使用较低浓度的稀释溶液以保证添加剂的安全使用及操作，也可以防止微生物过度生长造成的土壤孔隙和筛管的堵塞现象。

9.3.4 原位热处理耦合微生物修复各阶段运行过程中，通过监测系统收集地层温度、地下水水质、水位和生物修复添加剂注入量等关键数据，并结合监测数据实时调整运行参数，以达到传热均匀和生物修复添加剂扩散均匀的要求。

9.3.5 为了维持微生物的高活性，原位加热过程中避免出现局部区域温度过低或过高的现象。当地下环境温度和生物修复添加剂含量降低达不到设计要求时，可再次启动加热（尤其是热水注入加热）和生物修复药剂注入工作。

9.3.6 整个系统设专人管理和运行，并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。

9.4 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组件、水平阻隔层和添加剂注入组件等。

9.4.3 维护人员做好相关维护保养记录。

9.5 修复效果评估

9.5.1 综合分析运行过程的定期检测结果，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、生物修复添加剂扩散边界区域和初始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监测数据，包括加热温度、生物修复添加剂注入量和地下水中污染物采样结果等，判断系统的停止时间。

9.6.2　停机的顺序要求为：注入单元—加热单元—抽提单元—废水废气处理单元—监测与控制单元。

9.6.3　根据修复效果评估结果，可保留监测系统，持续获取温度、地下水水质参数及污染物浓度等数据。

9.6.4　装置设施拆除前，需对作业过程进行危险识别和风险评估。识别的范围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。

9.6.5　装置设施拆除过程中注意污染防控，主要包括：

a）尽量减少废水的产生，物料放空、拆解、清洗和临时堆放等区域设置适当的防雨、防渗、拦挡等隔离措施，必要时设置围堰，防止废水外溢或渗漏；

b）尽量减少固体废物的产生，一般工业固体废弃物分类集中暂存，宜回收或资源化利用；危险废弃物做好防扬防散、防流失、防渗漏等措施，并及时委托具有资质的单位处置，参照危险废物相关管理要求；

c）收集挥发或半挥发性遗留物料或残留污染物时，需在相对封闭空间内操作，设置气体收集系统和净化处理装置，必要时可搭建密闭大棚；

d）采取必要措施保证设备或管道中未能排空的物料及污染物有效收集，避免造成二次污染。

9.7　事故应急处理措施

9.7.1　制定原位热处理微生物耦合修复工程事故应急预案，当出现紧急事故时立即采取相应措施进行处理，尽可能地降低事故影响，包括对主体工程运行安全、人员伤亡、财产损失和环境污染和破坏等。

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 在原位热处理耦合微生物修复实施过程中，需要对加热单元、注入单元、抽提单元、废水废气处理单元和监测单元中的参数进行实时和定期监测，具体监测指标见附录 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。

10.1.2 原位加热、地下温度监测、土壤与地下水监测操作等参照 HJ 1165 中的相关规定执行。其中修复系统运行过程还需记录累积能源消耗（电力或燃气消耗总量）。

10.1.3 在生物修复添加剂注入过程中应对其注入浓度、压力、流速、流量进行定期监测，计算单井的日注入量及累计注入量，根据该数据实时调整单井注入量大小，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，应对修复区域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进行每日监测，如果连续监测几日后的数值变化稳定在 10%以内，可延长监测周期。

10.1.5 地下水水质参数还需要对总有机碳、亚铁、锰离子、硫离子、硫酸根离子和硝酸根离子等参数进行重点监测，其他相关水质参数的监测可根据现场具体情况进行确定。

10.1.6 实际系统运行及地下水监测参数及频率可根据修复实施进程及效果评估结果进行调整。例如，当修复效果趋于稳定时，地下水水质参数监测频率可降低到每 1-2 月进行一次；当地下水中还原条件持续稳定时，可以停止对亚铁、锰离子、硫离子等还原性离子的取样监测；氧化条件持续稳定时，可以停止对硝酸根离子和硫酸根离子的取样监测。

10.1.7 修复区域土壤和地下水样品定期采集，对目标污染物及其降解产物、微生物群落及目标污染物对应的功能基因等进行分析检测。

10.1.8 在原位热处理耦合微生物修复实施过程中可能产生的二次污染如废气（如燃料燃烧产生的废气、无组织排放的废气等）进行定期监测，参照 HJ 1165 中的相关规定执行。废水（如建井施工过程产生的废水、抽出的污染地下水等）经过处理达标后再排放。

10.2 过程控制

10.2.1 监测系统应实时监测土壤和地下水的温度、压力、流量、液位、水质参数并传输到控制系统。

10.2.2 控制系统应配有安全联动装置，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 制定原位热处理耦合微生物修复技术设备安装、调试、运行和维护职业健康管理制度、职业危害因素识别和职业危害告知制度。

11.1.2 建立原位热处理耦合微生物修复技术设备安装、调试、运行与维护的职业危害日常监测管理制度，保证检测系统处于正常工作状态，并委托有资质的相关单位每年至少进行一

次职业危害因素检测。

11.1.3　定期对职工进行职业卫生教育，提高职工自我保护意识和能力，督促职工遵守操作规程。

11.1.4　对长期从事生产作业的人员建立职业健康监护档案管理制度。落实职工职业健康检查、职业健康监护档案管理工作。

11.2　劳动安全

11.2.1　对施工人员开展劳动安全教育，明确施工现场危险源与安全操作规范。

11.2.2　现场施工人员根据不同岗位合理佩戴专业防护用品，并依据质量或质保期换新。

11.2.3　生物修复添加剂根据类别分开存放并设专人管护登记，制定详细可行的领用制度、防护措施和应急预案，根据 GB 15603 和《危险化学品安全管理条例》的要求进行储存和使用。

11.2.4　作业现场需有必要的警示线、安全防护措施和警示标识。

11.2.5　产生有害气体、易燃气体和和异味的场所采取通风措施并设置报警装置。

11.2.6　高温设备和管道需设置保温绝热层，同时在现场高温区域设置警示标志。

11.2.7　岗位作业场所保持通风并防火、防爆、防触电、防塌库。

11.2.8　电气设备由专业电气人员操作，电气装置满足 GB 19517 的要求。

11.2.9　对产生粉尘的设备或场所采取除尘措施，扬尘点应设置抑尘或吸尘设施。

11.2.10　对于噪声较大的设备采用减震、隔声等消音措施，使噪声符合国家标准。

附 录 A
（资料性）

原位热处理耦合微生物修复过程检测参数或指标

原位热处理耦合微生物修复过程中需要监测的参数或指标见表 A.1，根据实际情况进行调整。

表A.1 修复过程监测参数或指标

系统模块	监测指标		单位	数值
加热单元	电阻加热	加热电流	A	
		地层电阻率	Ω·m	
		加热区地表电压	V	
	电热传导	加热棒功率	W	
		加热棒温度	℃	
	燃气热传导	燃气流量	m^3/h	
		管道压力	kPa	
		燃烧器出气温度	℃	
	热水注入	热水出水温度	℃	
		热水锅炉压力	kPa	
		热水总流量	m^3	
		热水瞬时流量	m^3/h	
注入单元	每日生物修复添加剂注入量		m^3/h	
	累计生物修复添加剂注入量		m^3	
	注入井压力		kPa	
	添加剂注入比例		%	
	添加剂消耗量		t	
	水资源消耗		m^3	
抽提单元	抽提速率		kg/h	
	抽提井口温度		℃	
	抽提井口压力		kPa	
	抽提井口目标污染物浓度		mg/L	
废水废气处理单元	废水排放口污染物浓度		mg/L	
	废水处理总量		m^3	
	废气排放口污染物浓度		mg/L	
	废气处理总量		kg	
监测单元	修复区地下水温度		℃	
	修复区地下压力		kPa	
	电力消耗		kWh	
	燃气消耗		m^3	
	水资源消耗		m^3	
	水质参数	pH	/	
		溶解氧	mg/L	
		氧化还原电位	mV	
		电导率	ms/cm	
		浊度	NTU	
	目标污染物浓度	土壤	mg/kg	
		地下水	mg/L	
	无机离子	总有机碳	mg/L	
		硝酸盐	mg/L	
		亚硝酸盐	mg/L	
		硫酸根	mg/L	
		硫化物	mg/L	
		总铁	mg/L	
		亚铁离子	mg/L	
		锰离子	mg/L	
	土壤气体	VOCs	mg/m^3	

系统模块	监测指标		单位	数值
		甲烷	mg/m^3	
		二氧化碳	mg/m^3	
	微生物	微生物群落组成	/	
		功能基因	/	
	厂界噪声		dB	
	修复区热损失		$KJ/(h·m^2)$	
	厂界大气污染物无组织排放		/	