《污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南》

编制说明

一、工作简况

1.1 任务来源

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国土壤污染防治法》等法律法规，防治环境污染，改善生态环境质量，在减污降碳的双重目标下，提高修复效率、降低能耗与成本，指导污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术的设计、工程建设和运行，编制《原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南（试行）（征求意见稿）》（以下简称指南）。本指南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。

本文件由中国土壤学会团体标准工作管理委员会提出并归口。

1.2 协作单位及分工

本文件的主编单位为上海市环境科学研究院，参编单位为武汉大学、森特士兴集团股份有限公司和中科鼎实环境工程有限公司。

本文件的主要起草人员：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。杨洁、司马菁珂和叶春梅主要负责标准的范围、技术要求、工艺设计、监测与过程控制章节，毛旭辉负责术语和定义、修复原理及工艺流程章节，叶渊、尹立普和李彦希负责主要工艺设备和材料、施工与调试章节，周栋和陈窈君负责职业健康与劳动安全章节。

1.3 主要工作过程

2020 年-2022 年，编制组开展了国内外资料的调研，梳理了污染场地原位处理修复技术的国内外研究现状，相关的标准规范、技术导则要求和典型工程应用案例，并聚焦污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术的实验室室内研究、中试应用以及示范工程开展了相关研究，为指南的编制奠定了基础。

2023 年 1 月，主编单位组织召开了《污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南》编制启动会，成立标准编制小组。

2023 年 2 月-8 月，编制组撰写完成了“污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南大纲草案”。主编单位组织开展了内部交流会，在前期工作的基础上，编制组确定了本标准编制的适用范围、编制内容、任务分工、工作进度等内容，并于 2023 年 8 月完成了《污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南》（初稿）和编制说明的初稿。

2023 年 9 月，编制组向中国土壤学会团体标准工作管理委员会提交了《污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南》立项申请表。中国土壤学会团体标准工作管理委员会组织召开了《污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南》标准的标准立项评审会。申请单位对指南立项的背景、意义、可行性、主要技术内容、创新点等进行了汇报。与会专家经过质询与讨论，一致同意《污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南》立项。

2023 年 10-12 月，编制组根据立项咨询会专家的意见和建议逐条修改，并开展了多次内部讨论会，对各技术要点进行完善。随后，编制组再次将修改后的《污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南》通过通讯评审邀请专家审阅。经过为期一个月的再次修改完善，形成了《污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术指南》（征求意见稿）。

二、标准编制原则与编制内容

2.1 标准编制原则

本指南的制定工作遵本着规范性、合理性、可操作性和适用性的原则。

首先，本指南严格按照 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》的规则起草，确保编制程序、格式内容等规范。本指南作为国家和行业标准/指南的必要补充，符合有关法律法规的要求，并在突出原位热处理耦合蒸汽注入修复技术特点的同时，做好与现行相关标准/指南的衔接工作。其次，通过调研国内外污染场地单一原位热修复、蒸汽注入技术相关案例、标准/指南说明，并结合编制组已开展的原位热处理耦合蒸汽注入修复示范验证过程中获得的相关指标和参数，提出原位热处理耦合蒸汽注入修复技术的要求，

使指南内容及指标更加符合实际运用情况。此外，根据我国污染场地治理修复全过程管理实际情况，以保护人体健康和生态环境为出发点，通过定量和定性相结合的方式开展本指南制定，提出具有可操作性的实施流程。

2.2 标准编制内容

2.2.1 适用范围

本指南阐述了原位热处理耦合蒸汽注入修复的技术原理、工艺流程、技术要点，主要对原位热处理耦合蒸汽注入修复技术的工艺设计、工程建设和运行管理等关键过程提供可操作和实施的指导作用。

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，可作为工程设计、施工、运行及维护的技术指导文件。

2.2.2 技术原理

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。

污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术是将传统原位热处理和蒸汽注入修复技术进行耦合，实现优势互补。降低传统高温热处理所需能耗和成本，通过蒸汽注入传热传质增强污染物的溶解、脱附。通过精准控制加热和蒸汽注入，达到温度场的有效分布。原位热处理耦合蒸汽注入修复技术具有突破单一修复技术的瓶颈问题，与传统单一原位热修复技术相比降低能耗和碳排放的综合优势，是一种高效、绿色可持续的实用原位修复技术。

2.2.3 工艺流程

原位热处理耦合蒸汽注入技术工艺流程如图 1 所示，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。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，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。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。

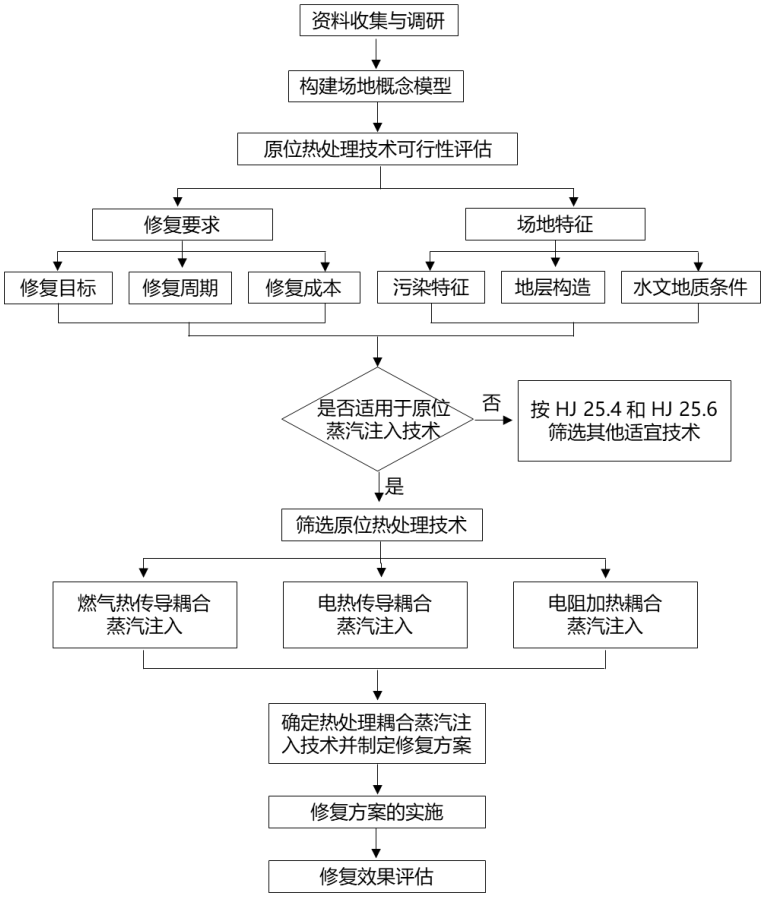


图 1 原位热处理耦合蒸汽注入抽提技术工艺流程

2.2.4 主要技术要点说明

工艺设计章节中工艺参数设计是制定污染场地修复方案的重要环节。原位热处理耦合蒸汽注入修复工程中，最为关键的技术参数包括“场地修复所需热量，修复过程中蒸汽注入流量、燃气流量、电加热功率、电阻加热电流、抽提速率”等。参考了《Design: In Situ Thermal Remediation》（设计：原位热修复）（EM-200-1-12）和《污染土壤原位热传导修复工艺设计指南》（T/CAEPI 55-2023）、《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》（HJ 1165-2021）等国内外指南，调研了原位热脱附相关文献，并结合编制单位开展的原热处理耦合蒸汽注入修复技术参数实验室研究、中试应用和工程示范，制定了相关参数的范围及计算方式。

本指南所提出的加热井的数量、间距，加热井和抽提井的配置方式等主要参

考了《Design: In Situ Thermal Remediation》（设计：原位热修复）（EM-200-1-12）、《Guidelines： In situ thermal treatment for source zone remediation of soil and groundwater》（原位热处理修复重污染区土壤和地下水技术导则），以及我国的《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》（HJ 1165-2021）等标准指南的相关要求。本指南耦合加热井群的平面布设和垂直布设方式主要是对国内外研究及工程应用案例的归纳总结，以及编制单位开展的原热处理耦合蒸汽注入修复技术中试应用和工程示范中相关工艺参数经验。

本指南所提出的工艺设备设计要点中电阻加热井、热传导加热的井管直径和钻孔孔径参考了美国 TerraTherm 公司总结的经验："ERH 电极的直径通常为 4~8 英寸，需要一个 10~12 英寸的大钻孔，用石墨或钢丸等导电材料回填，以最大限度地提高与土壤的电连续性；TCH 加热器套管的直径通常为 3.5 英寸，在用导热高温灌浆回填之前，可以安装在直径为 6 英寸的钻孔中"。蒸汽注射井、燃气加热井、抽提井的管径、钻孔孔径等参考了相关工程案例中及专利文件中的工程参数，并结合编制单位开展的原热处理耦合蒸汽注入修复技术参数实验室研究、中试应用和工程示范中相关工艺参数经验。

主要工艺设备和材料章节主要参考了《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》（HJ 1165-2021），并结合了本课题自主研发的原位热处理耦合蒸汽注入设备在示范工程运行中涉及的系统构成和各单元组成要点等。

监测与过程控制章节分别提出了原位热处理耦合修复工程的监测方案。在《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》（HJ 1165-2021）所要求的原位热脱附应监控的工艺参数的基础上，增加了电加热井功率，抽提进口温度、压力、目标污染物浓度，修复区域地下水水质指标，修复区域热损失，厂界噪声等指标。并规定了各类指标的监测频次，各指标应符合的要求等。

三、基础研究与经济效益分析

3.1 基础研究

在国家重点研发计划项目"复合机污染场地原位热处理耦合修复技术与装备"（2019YFC1805700）课题二"原位热脱附-蒸汽强化抽提耦合修复技术与装备研发"（2019YFC1805702）的支持下，针对典型氯代烃、石油烃和多环芳烃复合有

机污染场地，阐明了原位热处理耦合蒸汽注入修复的作用机制及其影响因素，研发了原位热处理耦合蒸汽注入修复技术工艺，研制了原位热传导/电阻加热耦合蒸汽注入修复装备 2 套，并分别在上海和甘肃开展了原位热传导和原位蒸汽强化抽提修复中试验证，在广州和苏州开展了原位热传导/电阻加热耦合蒸汽注入修复规模化示范验证，建立了原位热处理耦合蒸汽注入修复技术与装备体系。在本项目的支撑下，已发表第一标注 SCI 论文 4 篇、中文论文 5 篇，申请发明专利 10 项，掌握了关键理论基础和技术参数，并积累了丰富的工程实施经验。此外，编制团队梳理并总结了污染场地单一原位热处理修复技术相关的标准规范、技术导则和典型工程应用案例等，为指南的编制奠定了基础。基于此，本指南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，为污染场地原位热处理耦合蒸汽注入修复技术及工程实施提供了指导和建议。

3.2 经济效益分析

随着我国社会经济的快速发展、城市化进程的加快，用地需求不断增加，土壤修复产业的规模越来越大。此外，我国相继颁布了《土壤污染防治行动计划》和《中华人民共和国土壤污染防治法》等相关法律法规，并且相关政策、技术、监管也在逐步提升，行业结构不断完善和调整，进一步加快了我国污染场地修复行业的发展。在政策的引导和各地政府的积极推进下，我国修复市场呈现良好发展的态势，未来千亿规模的空间有望加速释放。原位热处理耦合蒸汽注入修复技术经济有效、无二次污染，并且适用范围广、绿色可持续性，具有广泛的应用前景和市场。本指南的实施将能更好的使该技术进行推广和应用，从而节省了大量的人力、物力和财力，并将显著提升我国污染场地原位修复行业的技术，以及相关配套产品和装备产业化水平，推动土壤修复产业的发展，从而达到保护土地资源、恢复土地生态经济功能、提高土地利用率的目的。随着土壤修复产业规模的扩大，以及“减污降碳、协同增效”政策的需求，本指南的应用将会持续地产生良好的经济效益。

四、标准涉及的相关知识产权说明

本技术指南版权归土壤学会所有，由土壤学会统一负责团体标准的出版和发行事宜。标准中涉及专利的问题按照国家相关规定处理。

五、与现行标准、法规的关系

本指南与相关标准及法律法规协调一致，没有冲突。国内现有相关标准及法律法规如下：

(1) 《中华人民共和国环境保护法》（2014 年修订，2015 年 1 月 1 日起施行）

(2) 《中华人民共和国土壤污染防治法》（2019 年 1 月 1 日起实施）

(3) 《土壤污染防治行动计划》（国发〔2016〕31 号）

(4) 《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB36600-2018）；

(5) 《建设用地土壤污染状况调查 技术导则》（HJ25.1-2019）

(6) 《建设用地土壤污染风险管控和修复 监测技术导则》（HJ25.2-2019）

(7) 《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ25.3-2019）

(8) 《建设用地土壤修复技术导则》（HJ25.4-2019）

(9) 《污染场地挥发性有机物调查与风险评估技术导则》（DB11/T 1278-2015）

(10)《土壤环境检测技术规范》（HJ/T 166-2004）

(11)《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）

(12)《地下水环境监测技术规范》（HJ/T 164-2020）

(13)《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）

(14)《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》（HJ 25.5-2018）

生态环境部于 2021 年 4 月 30 日发布并实施的标准《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》（HJ 1165-2021）与本申请标准对于原位加热系统相关的内容有一定的关联，但该标准仅针对单一的原位热脱附工程规范制定，与本次申请标准从技术原理、主要机理、目标对象、经济生态效益等方面均有本质性的区别。

六、重大意见分歧的处理经过和依据

本指南无重大意见分歧。

七、其他应予说明的事项

无。