

附件 9

《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附
(征求意见稿)》

编制说明

《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》编制组

二〇二〇年五月

项目名称：污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附

项目统一编号：2016-59

承担单位：生态环境部南京环境科学研究所

江苏大地益源环境修复有限公司

北京建工环境修复股份有限公司

北京高能时代环境技术股份有限公司

编制组主要成员：龙涛，万金忠，黄剑波，梅志华，李书鹏，吕正勇，祝欣，魏丽，孙

尧，刘志阳，石佳奇，徐建

标准所技术管理负责人：姚芝茂

投资处项目管理负责人：岳子明、刘勇华

目 次

1 任务来源.....	1
2 标准制订的必要性.....	1
3 主要工作过程.....	2
4 国内外相关标准研究.....	2
5 同类工程现状调研.....	4
6 主要技术内容及说明.....	10
7 标准实施的环境效益与经济技术分析.....	17
8 标准实施建议.....	17

1 任务来源

原位热脱附技术是一项新兴的土壤与地下水污染修复技术，自 20 世纪 70 年代起被用于污染地块修复工程。我国目前对于该项技术还缺乏相关技术标准，对原位热脱附修复工程的组织和实施还缺乏规范要求，难以满足修复企业及管理部门对该项技术应用和管理方面的需求。为规范原位热脱附修复工程的技术要求，使得修复工程组织实施有据可依，原环境保护部《关于开展 2016 年度国家环境保护标准项目实施工作的通知》（环办科技函〔2016〕633 号）下达了《原位热脱附修复工程技术规范》的编制任务，项目编号为 2016-59。本标准由生态环境部南京环境科学研究所、江苏大地益源环境修复有限公司、北京建工环境修复股份有限公司、北京高能时代环境技术股份有限公司四个单位共同承担。2020 年 4 月，生态环境部科技与财务司主持召开了该标准征求意见稿技术审查会，依据专家建议将标准名称修改为《污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附》。

2 标准制订的必要性

我国土地资源短缺。随着城市化进程的加速，城市用地功能调整，大量污染企业外迁，留下大量农药、化工等高风险工业污染场地急需修复。目前我国场地修复市场已经初具规模，但相应的土壤修复及风险管控的相关标准还相对缺乏，难于科学、系统、规范地指导污染土壤的治理修复工作。2016 年，国务院发布了《土壤污染防治行动计划》（“土十条”），要求健全土壤污染防治相关标准和技术规范。《中华人民共和国土壤污染防治法》第十二条要求，加强土壤污染防治标准体系建设。

“土十条”第二十三条明确规定：治理与修复工程原则上在原址进行，并采取必要措施防止污染土壤挖掘、堆存等造成二次污染。因此，针对挥发性有机物、半挥发性有机物、农药类、多环芳烃类有机物污染的土壤和地下水的修复，原位热脱附技术具有广泛的应用前景。事实上，原位热脱附技术（例如电阻加热、热传导、蒸汽注入加热、热空气加热等）在土壤和地下水修复领域的应用发展很快，2013 年至今在我国也取得了迅猛发展。该技术对于存在污染源或非水相液体（Non-aqueous phase liquid, NAPL）的重污染土壤和地下水具有修复更迅速、更彻底的优势，特别适用于污染深度大或存在于建筑物以下，异位开挖施工难度大的污染区域。自 2014 年以来，国内土壤修复企业已经从不同国家引进了的数套原位热脱附系统，并在多个污染地块开展了示范工程及修复工程实践。然而，由于国内尚无原位热脱附相关的技术规范，各修复企业在工程项目的组织实施过程中存在处理技术不适宜、处理过程不规范、二次污染风险高等问题。随着原位热脱附技术应用越来越广泛，编制原位热脱附修复工程技术规范，将有效指导各修复企业规范施工，防范修复过

程的二次污染，对于解决我国土壤和地下水环境污染问题，保障《土壤污染防治行动计划》的实施，贯彻落实《土壤污染防治法》，推动国民经济的可持续发展具有重大的意义。

3 主要工作过程

(1) 编制组成立

2016年4月，原环境保护部下达《原位热脱附修复工程技术规范》的编制任务，生态环境部南京环境科学研究所组织相关单位及人员成立标准编制小组，确定参编单位及人员名单。

(2) 开题报告起草与论证

2016年5月，项目立项，签订任务书。

2016年6月，完成标准的开题报告和标准编制大纲。

2017年1月，完成《原位热脱附修复工程技术规范》及编制说明的初稿。

2017年10月，原环境保护部科技标准司主持召开了本标准的开题论证会议。

(3) 征求意见稿起草

2018年1月，完成《原位热脱附修复工程技术规范》及编制说明的第一次修订。

2018年4月，完成《原位热脱附修复工程技术规范》及编制说明的第二次修订。

2019年7月，组织国内原位热脱附专家及修复公司代表召开《原位热脱附修复工程技术规范》技术研讨会，全面征集行业内部意见；

2019年11月，经多次讨论并征求专家和相关管理者意见，形成征求意见稿初稿。

2019年12月，召开征求意见稿的预审会议，修改形成征求意见稿。

2020年4月，生态环境部科技与财务司主持召开了该标准征求意见稿技术审查会，与会专家一致同意该标准通过技术审查，并建议将标准名称修改为《污染土壤修复工程技术规范-原位热脱附》。编制组依据技术审查会专家意见，修改形成征求意见稿并提交公开征求意见。

4 国内外相关标准研究

4.1 编制依据

国内现有污染场地管理法律法规框架：

(1) 《中华人民共和国环境保护法》(2015年1月1日起实施)

(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) 《污染地块土壤环境管理办法(试行)》(原环境保护部, 2016年)
- (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) 《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》(HJ 25.5-2018)
- (10) 《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》(HJ 25.6-2019)
- (11) 《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)
- (12) 《污染场地修复技术目录(第一批)》, 2014年

4.2 国内外相关技术标准、技术政策、指南制订情况分析

- (1) 原位热脱附设计规范(美国陆军工程兵部队)

-- Design: In Situ Thermal Remediation (US Army Corps of Engineers)

此规范是针对美国军方于2014年编制的,用于处置涉及有毒有害放射性物质时的原位热脱附技术设计参考文件。报告从技术原理介绍、场地特性分析、可实施性分析、小试方案,到项目具体设计、花费及竣工条件都给出了参考方法。规范文件内并没有指明哪些污染物或者场地适合应用原位热脱附技术,但通过场地特性分析及小试方案的指导,可协助确定具体方案的设计及实施。

- (2) 原位热处理经验总结(美国环保局)

-- Engineering Paper: In Situ Thermal Treatment Technologies: Lessons Learned (United States Office of Land Emergency Management Agency, USEPA)

美国环保局对其过去10年管理过的原位热脱附项目进行了总结,从热传导(TCH)、电加热(ERH)及蒸汽注入(SEE)等多种原位热脱附角度对技术应用过程中技术适用性、目标处理区区分、技术选择、项目设计、运行、监控及验收提出了经验总结,进而对未来的原位热脱附项目进行指导。

- (3) 原位热处理修复重污染区土壤和地下水技术导则(土壤、地下水和场地恢复创新中心,德国莱比锡)

--Guidelines: In situ thermal treatment (ISTT) for source zone remediation of soil and groundwater (Centre of Competence for Soil, Groundwater and Site Revitalisation – TASK, Leipzig)

此规范是德国 TASK 组织于 2013 年编制的，涉及的技术主要包括蒸汽-空气注入（TUBA）、加热井（THERIS）和射频能力加热技术（RF）。报告从技术原理和三种技术应用及局限等方面进行介绍分析。

（4）热脱附修复技术健康安全规范（美国劳工部职业安全与健康署 OSHA）

--Remediation technology health and hazards: thermal desorption. (US Department of Labor)

美国劳工部职业安全与健康署（OSHA）对包括原位和异位在内的多种热脱附技术现场可能存在的健康安全风险进行了分步骤分项的分析和罗列，内容包括处理过程中接触到的化合物、目标污染物、灰尘、热灼伤、电击、机械伤害、火灾、噪声等，并相对应的提出了避免办法及相关 OSHA 规范要求，为热脱附项目实施过程中现场人员安全提供保障。

（5）国内相关规范分析及发展现状

目前欧美国家已将土壤热脱附技术工程化，广泛应用于处理挥发性、半挥发性有机物和汞污染土壤、污泥等场地的修复。而我国热脱附修复污染场地研究尚处于起步阶段，相关规范仍处于编制阶段。在技术应用方面，目前主要问题包括：1.主要设备均依赖进口，相关设备投资成本过高、运行费用昂贵等问题尚未得到很好解决；2.由于对不同质地土壤，不同污染物的认识不够，导致其他二次污染物的产生；3.高粘土含量或湿度会增加处理费用，且高腐蚀性的进料会损坏处理单元；4.污染场地修复工程的实施过程当中会产生噪音和扬尘、粉尘污染等环境影响，成为一个新的污染源。上述问题需要国内产学研团队加强多学科交叉融合，团结协作以共同解决。发展不同污染类型土壤的前处理和脱附废气处理等技术，优化工艺并研发相关的自动化成套设备正是共同努力的方向。

5 同类工程现状调研

5.1 概述

重非水相液体（DNAPL）污染源处理是目前面临的最重要的修复挑战之一。因此，近年来原位修复技术的在 DNAPL 场地的研发和应用一直在增加。包括气相抽提、化学氧化、表面活性剂淋洗、生物降解等方法已经得到了开发和应用，取得了不同程度的成功。从这些场地最近的数据来看，即使采用了最新的上述修复技术，要完全去除 DNAPL 也是不太可能的。

热脱附技术和其竞争技术（表面活性剂淋洗，化学氧化和原位曝气）相比具有独特的优势，特别是，热脱附技术的修复效果几乎不受 DNAPL 污染源的地质分层和传质阻力的影响。原位热脱附修复土壤和地下水技术（例如，电阻加热，热传导加热，蒸汽加热等）近年来得到了迅速发展和应用。这些技术提供了更快速和更彻底的处理非水相液体

(NAPL) 污染源的方法。

5.2 原位热脱附技术的发展

原位热脱附技术是通过直接或间接加热的方式，将土壤中的有机污染组分加热至足够高的温度，使其挥发成气态并与土壤分离的过程，挥发出的污染物被收集或直接焚烧裂解。原位热脱附技术包含两个基本过程：第一阶段，加热待处理物质，使目标污染物挥发成气态从土壤或地下水分离；第二阶段，将含有污染物的尾气进行冷凝、收集以及焚烧等处理至达标后排放。美国环保署（EPA）发布的《场地清理处理技术：年度状态报告（第12版）》中，给出了在1982至2005年美国超级基金所开展的场地修复项目中技术的采用情况，共有69个项目采用了热脱附技术，占比8%。该报告中还指出了热脱附技术已被成功用于下列污染物相关的污染场地修复项目中：多环芳烃、其他非卤代半挥发性有机物、苯系物、其他非卤代挥发性有机物、有机农药和除草剂、其他卤代半挥发性有机物、卤代挥发性有机物、多氯联苯。热脱附技术的主要适用范围是半挥发性和挥发性的有机污染物，包括多环芳烃、有机农药和杀虫剂、多氯联苯等。相比于其他污染土壤修复技术，热脱附技术具有污染物处理范围宽、处理速率高、修复后土壤可再利用等优点。特别是对于PCBs这类含氯有机污染物低温热脱附能够显著降低二噁英的生成。

热脱附技术在发达国家已有二三十年的发展历史，国外热脱附技术种类齐全，已经成为污染土壤修复领域的重要力量。根据对从1993年到2007年的179篇原位热脱附文献的收集和回顾，其中87篇为电阻加热，46篇为蒸汽加热，23篇为传导加热，23篇为其他加热技术，同时发现其中90%是1995年后完成的，其中50%是2000年以后完成的，说明原位热脱附得到了越来越多的应用。美国在过去十几年中，通过热脱附技术处置的规模化项目和采用焚烧处置的项目数基本持平，平均年处理量达到上百万吨。美国海军设施工程服务中心（Naval Facilities Engineering Service Center）的研究报告综述了美国热脱附技术的发展过程（NFESC，TR-2090-ENV，1998）。热脱附技术经历了从处理成分单一、沸点低、无氯有机污染物，最终发展到目前污染组分复杂、沸点高、含氯的有机污染物。

5.3 实际工程案例调研情况分析

欧美国国家开展了大量的污染场地热脱附修复工程，在我国，热脱附修复污染土壤研究处于起步阶段，国内修复行业骨干企业依靠引进的热脱附技术及设备，在宁波率先开展了有机物污染土壤热脱附工程。下面是国内外热脱附修复污染土壤典型案例。

5.3.1 美国案例

美国是原位热脱附技术研究和应用最早和规模最大的国家。仅 1980 年至 2012 年间，美国关于原位热脱附修复工程的案例已有近 200 个，其中实际工程规模案例近 100 个，以电阻加热技术（ERH）应用最为广泛。处理的污染物对象主要为 VOCs 居多（89%），特别是氯代溶剂和石油碳氢化合物。



图 5-1 美国原位热脱附工程案例统计

典型的工程案例如表 5-1 所示。

表 5-1 美国原位热脱附修复工程案例

编号	地块名称	采用技术	项目规模	工程规模	工程进展	污染物	修复深度 (m)
1	前马雷岛海军造船厂-加利福尼亚瓦列霍	TCH	示范试验	面积为 46.5m ² 地下水埋深 4.57m 至 7.62m	达到海军环境质量研发要求	PCB – Aroclor	-0.30
2	海军设施森特维尔海滩-加利福尼亚费尔代尔	TCH	修复工程	土壤 510 m ³ 地下水埋深至 18.3m	通过验收	PCB-Aroclor; PCDD / Fs	-4.57
3	前壳散货码头-俄勒冈州尤金	TCH	修复工程	土壤 4000 m ²	通过验收	苯、GRO、DRO、NAPL	-3.65
4	氯化溶剂-生产设施-印第安纳州波特兰	TCH	修复工程	-	通过验收	四氯乙烯、顺式 1,2-二氯乙烯、三氯乙烯	-5.8
5	密苏里州电气工程站点 (MEW) -密苏里海角吉拉多	TCH	示范试点	面积 25900m ² 地下水埋深 9.14m	通过验收	PCB – Aroclor	-1.22
6	塔纳帕格村遗址整治-NMI (西太平洋) 塞班岛 Tanapag 村	TCH	修复工程	土壤 765m ³	通过验收	PCB – Aroclor	-

编号	地块名称	采用技术	项目规模	工程规模	工程进展	污染物	修复深度 (m)
7	前木材处理区-AOC-2-加利福尼亚阿罕布拉	TCH	修复工程	土壤 11500m ³	通过验收	PAHs; 五氯苯酚 (PCP); 二恶英和呋喃; 石油烃	-
8	粘性特种燃料的热处理-美国佐治亚州亚特兰大	ERH	修复工程	-	-	由喷气燃料和柴油燃料组成的粘性特种燃料	-
9	朗讯科技-伊利诺伊州斯科基	ERH	修复工程	-	通过验收	三氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷及其相关的生物降解和水解子化合物	-
10	艾利丹尼森-伊利诺伊州沃基根	ERH	修复工程	土壤 12034m ³	通过验收	二氯甲烷	-7.62
11	佛罗里达州拉哥市 Young-Rainey STAR 中心 A 区 (以前的 DOE 设施) -佛罗里达拉哥	ERH	修复工程	面积 929 m ²	通过验收	三氯乙烯, 顺式 1,2-二氯乙烯, 二氯甲烷, 甲苯和石油烃	-

5.3.2 国内案例

我国的原位热脱附修复工程应用起步较晚，但发展极为迅速。从 2013 年苏州某化工厂污染场地第一个原位热脱附修复中试至今，我国已完成或正在开展的原位热脱附修复工程已有 20 多个。在长三角、京津冀、中部和南方等地区均有应用。其中热传导加热（TCH，包括燃气和电加热）和电阻加热（ERH）的应用规模较大。国内尚无蒸汽加热的工程规模应用案例。处理的对象主要为高深度高污染的农药和石油焦化行业场地，污染物类型包括 VOC、多环芳烃和农药等。

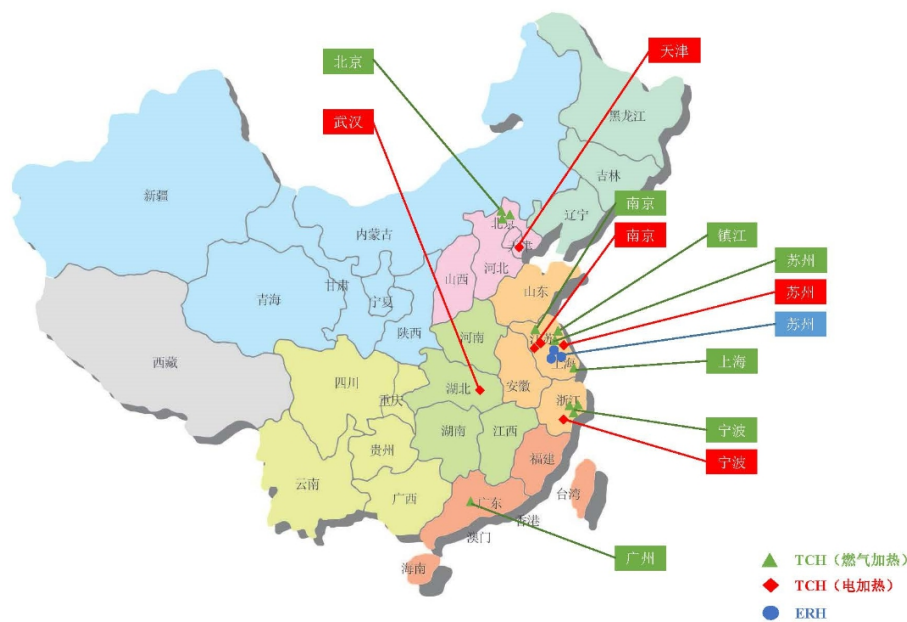


图 5-2 国内原位热脱附工程案例分布情况

国内的典型原位热脱附工程案例如表 5-2 所示。

表 5-2 国内原位热脱附工程案例

编号	地块名称	采用技术	项目规模	工程规模	工程进展	污染物	修复深度 (m)
1	苏州某化工厂地块	ERH	修复工程	土壤方量 272214m ³ , 地下水 70065m ³	通过验收	苯、氯苯	-18
2	苏州某化工厂地块	ERH	修复工程	土壤方量 403097m ³ , 地下水 59230m ³	准备	氯仿、四氯化碳、苯、氯苯	-18
3	南京某化工厂地块	TCH (电加热)	修复工程	土壤方量 36767m ³ , 地下水 53665m ³	进行	VOCs、SVOCs	-7
4	苏州某化工厂地块	TCH (燃气)	中试	土壤方量 1800m ³	通过验收	苯、氯苯	-18
5	宁波某化工厂地块	TCH (燃气)	修复工程	土壤方量 6400m ³	通过验收	VOCs, SVOCs	最深-12
6	宁波某化工厂地块	TCH (燃气)	修复工程	土壤方量: 6504m ³ , 地下水: 94635 m ³	通过验收	PAH、杀螟松、SVOCs	-7.5
7	广州某化工地块	TCH (燃气)	修复工程	土壤方量 24864m ³ , 地下水 977.5m ³	通过验收	VOCs、PAHs	-16
8	北京某化工地块	TCH (燃气)	修复工程	土壤方量 36454 m ³	通过阶段性验收	VOCs、PAHs	最深-5

编号	地块名称	采用技术	项目规模	工程规模	工程进展	污染物	修复深度(m)
9	南京某化工厂地块	TCH (燃气)	修复工程	土壤方量 67138 m ³ , 地下水 41735m ³	进行	VOCs、 SVOCs、 PAHs	
10	宁波某农药厂地块	TCH (燃气)	修复工程	土壤: 7255m ³ , 地下水: 25356 m ³	通过验收	PAHs	-16.5
11	武汉某化工厂区块	TCH (电)	修复工程	土壤: 66000m ³	进行	农药、SVOC	-12
12	天津某化工厂地块	TCH (电)	修复工程	土壤: 29391.2m ³ , 地下水: 138743.4 m ³	进行	VOCs	-13.5
13	南京某化工厂地块	TCH (电)	修复工程	土壤: 69830 m ³ , 地下水: 3184m ³	进行	VOCs、 PAHs、石油 烃	-8
14	重庆某地块	SEE	中试	土壤: 1000 m ³	通过验收	苯、PAHs 以及 TPH	-10
15	苏州某化工厂地块	ERH	修复工程	土壤方量 25939.44m ³	进行	甲基丙烯酸甲 酯	-7.2
16	苏州某化工厂地块	TCH (电)	修复工程	土壤方量 212157.96 m ³ , 地下水 68993.15 m ³	进行	VOCs	-16
17	上海某化工厂地块	TCH (燃气)	中试	土壤方量 300m ³ , 地下水 150m ³	通过验收	VOCs、 SVOCs、TPH	-14

5.4 原位热脱附工程中存在的主要问题

目前欧美国家已将土壤热脱附技术工程化, 广泛应用于处理挥发性、半挥发性有机物和汞污染土壤、污泥等场地的修复。而我国热脱附修复技术污染场地应用尚处于起步阶段, 相关规范仍处于编制阶段。由于缺乏相关工程技术规范的约束, 很多企业甚至没有设备制造的企业标准, 在工艺设计上基本上以经验为主, 缺乏计算依据和设计规范, 工艺设计水平难以固化和提高, 在具体项目设计上随意性较大。技术应用方面, 目前主要设备均依赖进口, 诸如相关设备投资成本过高、运行费用昂贵等问题尚未得到很好解决; 由于对不同质地土壤, 不同污染物的认识不够, 导致其他二次污染物的产生; 高粘土含量或湿度会增加处理费用, 且高腐蚀性的进料会损坏处理单元; 而且污染场地修复工程的实施过程当中还会产生噪音和扬尘、粉尘污染等环境影响, 成为一个新的污染源。此外, 在技术研发能力方面, 我国和国外相比在新技术的研究与开发方面已经滞后, 在关键技术上存在较大的差距。

6 主要技术内容及说明

6.1 适用范围

本节规定了本标准的主要内容和适用范围，明确了标准对原位热脱附修复工程全过程的技术指导作用。本标准适用于原位热脱附修复工程，可作为工程设计、施工、运行及维护的技术依据。

6.2 规范性引用文件

本节列出了规范条文中出现的标准。

6.3 术语和定义

本节规定了原位热脱附修复工程技术规范涉及到的有关术语及定义，给出了原位热脱附、热传导加热、电阻加热、蒸汽强化抽提、爆炸极限、爆炸极限下限、土壤气相抽提、多项抽提 8 个术语的定义。原位热脱附、热传导加热、电阻加热和蒸汽加热主要参考了《热脱附修复技术健康安全规范（美国劳工部职业安全与健康署 OSHA）》及国内表述习惯。爆炸极限、爆炸极限下限参考了《催化燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》（HJ 2027-2013）中对相关术语的定义。土壤气相抽提参考了《污染场地术语手册》（HJ 682-2019）中对相关术语的定义。多相抽提参考了《污染场地修复技术目录（第一批）》中对相关术语的定义。

6.4 污染物与污染负荷

本节规定了原位热脱附技术适用的污染物类型。同时规定了根据工程设计需要，需对污染地块进行全面和深入的调查，收集相关资料。此外本节明确了原位热脱附修复工程中的二次污染。

原位热脱附技术适用于污染土壤和地下水中挥发性有机物、半挥发性有机物、总石油烃、多氯联苯、二噁英等污染物的治理。

原位热脱附工程实施前，应对目标污染场地进行全面深入的调查。根据工程设计需要，收集相关资料，主要包括场地污染特征、场地地质和水文地质条件、区域气象气候条件、地下构筑物及分布、地块用途（现状及规划）、周边敏感点及分布、能源供应条件。

结合国内相关工程经验，热传导加热技术的加热温度通常在 100℃ 以上。电阻加热技术的加热温度通常在水的沸点以下。为保证加热区域良好的导电条件，一般需要对加热区

进行补水。蒸汽强化抽提技术的加热温度通常不超过 170 °C。为保证蒸汽传输和加热效果，应保证土壤的渗透系数在 10^{-4} cm/s 以上。

从设备运行安全性考虑，土壤或地下水治理修复过程中，加热区及系统内部的污染物蒸气浓度应低于爆炸极限下限，并设置相应的爆炸监测预警及应急装置。当场地存在加热条件下可裂解产生大量剧毒物质的污染物时，应谨慎采用原位热脱附技术。

修复过程中的二次污染主要包括废气、废水和固体废物污染。

6.5 总体要求

6.5.1 一般规定

(1) 法规政策要求

规定了原位热脱附修复工程的设计和运行应该遵守国家相关法律法规和国家及行业标准的规定，切实做到依法建设、依规运营。

(2) 环境管理要求

规定了原位热脱附修复工程在运行过程中所产生的各种二次污染问题所应满足的环境管理要求。

6.5.2 工程构成

介绍了原位热脱附修复工程的三大构成：主体工程、辅助工程及配套设施。

典型的原位热脱附系统（TCH）构成如图 6-1 所示。

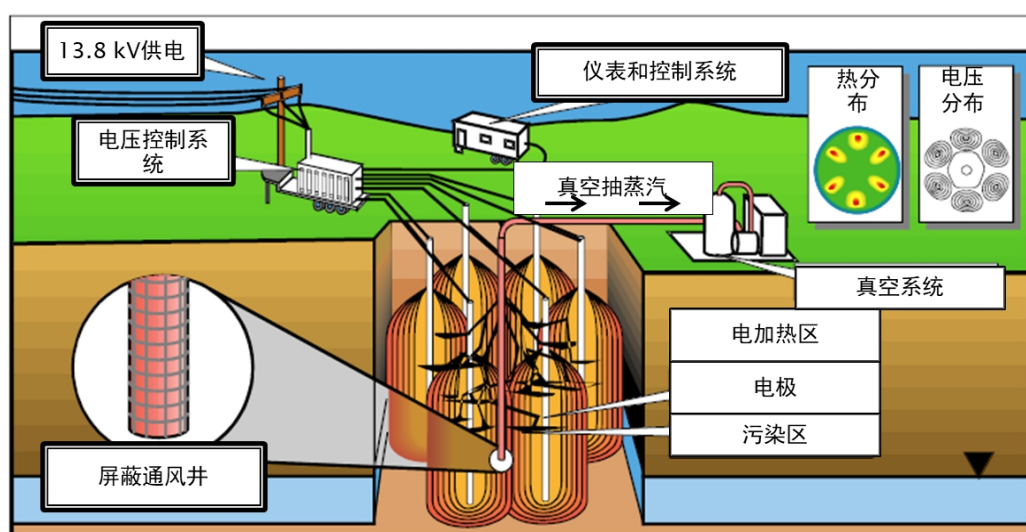


图 6-1 典型原位热脱附系统构成

6.5.3 总平面布置

对场址选择、总图布置等应遵循的原则和标准进行了规定。工程平面布置应进行分区布置，办公区与修复区应分开。修复区内，加热区、控制设备区、能源供应区、废水废气处理区和危废暂存区等也应合理布置，降低环境影响、方便施工及运行维护。

6.6 工艺设计

6.6.1 一般规定

本节规定了原位热脱附修复工艺设计的依据、方案设计内容、能源结构选择及中试要求等。

蒸汽强化抽提需要蒸汽输入到污染区，地下有构筑物会显著影响传质通道。同样，电阻加热需要电流流经整个加热区，有绝缘性质的构筑物或地下结构影响内部加热。因此，修复工程设计前，应对地下构筑物或埋藏物进行彻底的排查，同时排除地下有大量易燃易爆存储物质带来安全隐患。

原位热脱附修复具有较强的技术工程复杂性，受场地水文地质、污染分布特征影响较大，简单的小试试验难以模拟场地技术应用效果。因此，本标准要求对于原位热脱附修复工程要开展中试试验，确定技术适用性、加热模式、加热/抽提井布设方案、系统运行参数等。

在调研国外及国内相关案例及经验、综合考虑成本和预期目标的基础上，建议中试规模为：加热井宜不少于 12 口；采用热传导或电阻加热工艺的，中试面积宜不小于 60m²；采用蒸汽加热原位热脱附中试面积宜不小于 200m²。表 6-1 为美国典型的原位热脱附修复中试规模信息，供参考。

表 6-1 原位热脱附修复中试的工程规模调研

编号	项目名称	中试规模	采用技术
1	Former Mare Island Naval shipyard Bay Area Defense Conversion Action Team (BADCAT)	46.5m ²	TCH
2	Missouri Electric Works Site (MEW)	12 个加热抽提井，三角形布设，井间距 1.52m	TCH
3	NASA Marshal Space Flight Center	79.7m ²	TCH
4	Petro-Chemical System (AKA Turtle Bayou)	12 个加热井	ERH
5	Confidential Midwest	19 个加热井	ERH
6	Operating Industrial Manufacturing Facility, Confidential Location	36.2 m ²	ERH
7	Savannah River Site	66 m ²	SEE

编号	项目名称	中试规模	采用技术
8	NAS Alameda Point Site 5 Steam Pilot	232.3 m ²	SEE
9	Cape Canaveral Steam	348.4 m ²	SEE
10	Ft. Hood/Robert Gray Army Field	83.6 m ²	SEE

6.6.2 工艺路线及流程

本节介绍了原位热脱附的技术工艺分类、系统构成及工艺流程、规定了工艺确定的原则和依据。

根据加热方式的不同，原位热脱附系统可采用热传导加热、电阻加热以及蒸汽加热等。

原位热脱附系统主要包括加热单元、抽提单元、废气废水处理单元和监测控制单元等。三种原位热脱附工艺的主要区别在于加热单元，热传导的加热单元为加热井，电阻加热的加热单元为电极井，蒸汽强化抽提的加热单元为蒸汽注入井。

在技术适用性方面，三种技术工艺加热的最高温度有较大差别（见附录 A），所能处理的污染物类型也有差异，热传导能处理的污染物范围较广。对不同地层的适用性也有一定差别，如蒸汽强化抽提不适用于粘土等低渗透地层。

6.6.3 工艺设计

6.6.3.1 加热模式

主要对加热模式的内涵和选择依据进行了介绍和规定。

6.6.3.2 供热能源

本节规定了原位热脱附修复工程能源类型、选择的原则和需求测算。供热能源的选择由现场及周边能源供应条件确定，常用的能源包括电能、燃气燃油和高温蒸汽。

6.6.3.3 加热井/抽提井的布设

本节规定了原位热脱附系统加热井和抽提井布设的依据、原则、推荐的数量及相关要求等。

加热井的间距设置决定了场地内的加热井数量。美国工农兵技术手册《Design: In Situ Thermal Remediation》中给出 ERH 的井间距推荐值为 2.6m~6.1m，德国《Guidelines: In situ thermal treatment (ISTT) for source zone remediation of soil and groundwater》给出 SEE 的井间距值为 4m~15m。本标准所给出的加热井间距综合考虑了国外相关技术规范文件提

出的推荐指，最终确定为热传导加热和电阻加热的加热井间距一般为 2m~6 m，蒸汽注入井间距一般为 6m~15m。

根据加热井和抽提井的配置方式，抽提井可与加热井设置在同一点位或靠近加热井设置，也可布设在以加热井为顶点构成的正六边形或正三角形的中心位置。加热井和抽提井的数量比例宜在 4:1~1:1 之间。一般按正三角形和正六边形设计（见标准图 2 和图 3），即加热井位于正三角形或正六边形的定点，中心设置抽提井。对于 TCH 和 ERH，正三角形布设方式最为常见。对于 SEE，也有采用正方形设置。

考虑到加热的边际效应（上下边缘及四周热量损失），建议加热范围要覆盖到目标修复区域的横向和纵向范围以外。如美国工农兵技术手册《Design: In Situ Thermal Remediation》要求横向上加热范围要向目标加热区以外延伸 1.5m，垂向上要向目标深度范围上下分别延伸 0.6m。结合国内现有工程实施及设计经验，本标准提出原则要求：有效加热及抽提范围应在水平及垂直方向上完全覆盖目标修复区块边界，并适度扩展，以确保达到修复效果。

6.6.3.4 地下加热单元的构造及安装

本节规定了三种加热技术地下加热单元的构造（其中 TCH 又分为燃气加热和电加热）、加热井的成孔方式和安装方法等。

各种加热方式对应的加热井构造、底部密封、材质要求和填料设置均有所不同。ERH 通常还需要设置补水单元。

加热井可采用先成孔再置入的方式或直推置入的方式进行安装。当加热井和抽提井协同设置时一般采用成孔再置入方法。具体的成孔钻进方法可有螺旋钻进、冲击钻进、清水/泥浆回转钻进等方法，其中螺旋钻进是最常用的方法。

6.6.3.5 抽提单元

本节规定了抽提单元的组成、水平和垂直抽提井的结构、建井方法、材质要求、工艺参数（抽提速率）及二次污染防控等设计要求。

抽提井的布设和抽提速率是抽提单元的关键参数，其中抽提井的布设在“加热井和抽提井的布设”已有说明。对于 SEE，美国工农兵手册推荐抽提速率一般为蒸汽注入速率的 1~3 倍，推荐的真空压力为 51 kPa（0.5 atm）。因国内尚无成熟的 SEE 案例，本标准参照上述经验，真空压力适当放宽范围，建议为 20 kPa~60 kPa（0.2 atm~0.6 atm）。

6.6.3.6 地下水控制

本节规定了为保障原位热脱附修复效果的地下水控制要求及方法。

当地下水入渗影响修复区域加热温度及修复效率时，应对修复场地进行地下水控制。地下水控制可采用阻隔或地下水位控制等方法。目前国内工程经验以止水帷幕等阻隔措施较多。

6.6.3.7 水平阻隔

本节规定了原位热脱附修复工程水平阻隔设置的技术要求，包阻隔层范围，阻隔材料及阻隔效果等。水平阻隔的要起到的作用主要有（1）防渗，防止污染蒸气逸散至地表造成二次污染；避免雨水等地表水大量入渗影响升温效果；（2）保温，降低地下热量损失，同时保证地表温度处于安全范围，避免造成烫伤事故；（3）对于电加热（电热传导和电阻加热），水平阻隔层还起到绝缘防护作用，避免地表电压过高引发人员触电危险。

6.6.3.8 废气处理单元

废气处理单元是原位热脱附二次污染防治的重要单元。本节规定了原位热脱附的废气处理单元的处理对象、处理工艺设计要求、排放标准、处理流程及技术等。对废气处理单元产生的废油处置提出了相应的回用或管理要求。

6.6.3.7 废水处理单元

本节规定了原位热脱附的废水处理单元的处理对象、处理工艺设计要求、排放标准及技术等。对废水处理环节产生的废油处置提出了相应的回用或管理要求。

6.6.4 二次污染控制措施

本节规定了原位热脱附修复工程施工和运行过程中污染防控措施，重点关注所产生废水、废气、污染土壤等固体废物和危险废物等的处理处置和排放控制要求、施工过程中的二次污染监测要求等。

6.7 主要工艺设备与材料

本节对主要设备材料的防腐防爆性能提出要求，并提出了三种加热技术热传导（分为燃气加热和电加热）、电阻加热和蒸汽加热的主要工艺设备和材料。三种技术工艺的通用设备包括抽提泵、气液分离器、温度、压力监测仪等。在加热设备及材料上三种工艺有较大差别。存在腐蚀性污染物时，应选择耐腐蚀材质。

6.8 检测与过程控制

本节分别规定了三种原位热脱附工艺修复过程中的监测要求。过程监测的重要参数包括设备和地下温度、压力、重要位置的尾气温度及污染物含量排、能反应能源消耗的相关

指标（燃气流量、电流、蒸汽流量/压力等）。对温度和压力监测点的设置提出了指导性要求。在环境（二次污染防治）监测方面，对尾气及场地周边大气的监测指标和方法进行了规定，对修复过程中土壤和地下水热取样的过程提出了具体要求。

6.9 辅助工程设计

本节规定了原位热脱附修复工程的电气、给排水和消防的基本要求。

6.10 劳动安全与职业卫生

原位热脱附修复工程在建设、运行过程中会产生各种二次污染及安全隐患，对运行人员及周边群众健康造成危害，为保护人身安全和公众健康，标准对执行国家现行环境保护、劳动安全、职业卫生方面相关标准提出了明确要求。

劳动安全主要涉及到用电安全、燃气等易燃易爆品安全、蒸汽高温烫伤及防爆等。

职业卫生防护要重点关注场地修复过程中的有毒有害气体的浓度控制及劳动防护。本标准都做了相应的规定。

6.11 施工与调试

施工与调试是原位热脱附修复工程的重要环节。本章规定了原位热脱附修复工程的施工应符合国家和行业相应专项工程施工规范、施工程序、设备材料选择、管理文件及调试的要求。

6.12 运行与维护

运行达标是修复工程的目的，维护和管理是保障系统长期正常运转的关键。本章包括运行管理总则、系统启动、人员与运行管理、维护保养、事故应急处理措施、系统停止和效果评估。

本标准在技术力量配置、上岗人员的技能培训、运行目标、运行维护应达到的技术管理指标、效果评估等方面进行了明确的规定，要求运行部门或单位应制定一系列操作规程和巡检制度，建立系统运行记录制度。明确应记录的主要内容，规定了记录格式、填写和管理要求。运行人员应按照制度履行好自己的职责，确保系统经济稳定运行。

标准同时规定了应建立原位热脱附修复工程运行状况、设施维护和生产活动等记录制度。制定原位热脱附修复工程事故应急措施，当原位热脱附修复工程出现紧急事故时，应

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、财产损失和环境破坏等，事故处理时应做好记录、分析原因，防止同类事故重复发生。原位热脱附修复工程效果评估应按污染场地治理修复的相关规范以及本标准的有关规定进行。

7 标准实施的环境效益与经济技术分析

本标准是针对原位热脱附修复工程而制定。经过三十年的发展，原位热脱附和其竞争技术包括表面活性剂淋洗、原位化学氧化和原位曝气技术相比具有独特的优势，特别是热脱附技术的修复效果几乎不受 DNAPL 污染源的地质分层和传质阻力的影响。欧美国家有关热脱附修复污染土壤的研究已较为深入，在原位热脱附修复污染场地方面，已形成了完整的成套技术和设备，并广泛应用于高污染的场地有机污染土壤的原位热脱附修复。而我国在这方面则处于起步阶段，国外设备引进费用较高，需要研发我国具有自主知识产权的原位热脱附技术装备以及积累相关的设计、运行维护及管理等方面的经验。因此本标准制订以后可以规范及指导我国原位热脱附工程涉及的工艺设计、工程建造、设备检验检查、运行维护与管理等，并将推进我国土壤修复治理工作。

8 标准实施建议

本标准为首次制定，建议在实施过程中先试运行一段时间，根据实际应用情况，进行进一步的修订完善，以满足指导利用原位热脱附工艺进行治理修复的工程要求。