

ICS 13.020.01

CCS Z 05



团 体 标 准

T/GIA 031—2024

典型恶臭污染地块原位化学氧化修复工 程技术指南（试行）

Technical Guidelines for In-situ Chemical Oxidation Remediation of Typical
Malodorous Soil in Contaminated Land

2024-12-12 发布

2025-01-01 实施

中关村中环土壤地下水污染防控与修复产业联盟

发布

目次

前 言	II
1 适用范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 总体要求	2
5 工作内容和流程	3
6 修复方案制定	4
7 工程设计与施工	11
8 工程运行与检测	16
9 修复效果评估	18
10 工程验收	18
附录 A（资料性）某恶臭污染地块原位化学氧化修复工程案例	19

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。

本文件由中关村中环土壤地下水污染防控与修复产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院南京土壤研究所、北京高能时代环境技术股份有限公司、中船绿洲环保（南京）有限公司、南京尚土生态环境有限公司、苏州大学、河北工业大学。

本文件主要起草人员：杨兴伦、张海秀、倪鑫鑫、吕正勇、谷成刚、宋洋、张永良、王小峰、孙大伟、魏丽、苗竹、冯国杰、李炎璐、张琪、陶韬、徐庆锋、姚志刚、马小东、李本行。

本文件在实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中关村中环土壤地下水污染防控与修复产业联盟标准委员会，以便修订。

联系邮箱：cngpc_org@126.com

典型恶臭污染地块原位化学氧化修复工程技术指南(试行)

1. 适用范围

本文件规定了石油化工、农药等典型恶臭污染地块原位化学氧化处理技术的修复方案制定、工程设计与施工、工程运行与检测、修复效果评估、工程关闭等技术要求。

本文件适用于典型恶臭污染地块原位化学氧化修复工程的技术管理。

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）使用于本文件。

GBZ 1 工业企业设计卫生标准

GB 12268 危险货物物品名表

GB/T 14675 空气质量 恶臭的测定 三点比较式臭袋法

GB 15603 危险化学品仓库储存通则

GB 4387 工业企业厂内铁路、道路运输安全规程

GB 50160 石油化工企业设计防火规范

GB 50187 工业企业总平面设计规范

GB 6944 危险货物分类和品名编号

GBJ 87-85: 工业企业噪声控制设计规范

JGJ 79 建筑地基处理技术规范

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

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 905 恶臭污染环境监测技术规范

危险化学品目录

危险化学品安全管理条例

建设项目环境保护设计规定

废弃井封井回填技术指南（试行）（环办土壤函[2020]72号）

3. 术语和定义

下列术语和定义适合用于本文件。

3.1

高级氧化技术 advanced oxidation technology

通过加入活化剂或采用超声、紫外线、热等外加能量的方式来活化氧化剂，在短时间内产生强氧化性自由基并高效氧化降解目标污染物，降低其浓度及毒性，甚至使其完全矿化的化学修复技术。

3.2

原位化学氧化 in situ chemical oxidation (ISCO)

一类降低污染地块土壤及地下水中目标污染物的环境修复技术。该技术通过向地块和地下水直接注入化学氧化试剂，通过自身的氧化性能，或在碱、过渡金属等活化作用下产生自由基快速降解目标污染物，从而使污染物浓度降到修复目标值范围。

3.3

典型恶臭污染物 typical odorous pollutants

一切具有刺激嗅觉器官引起人们不愉快感觉及损害生活环境的污染物。恶臭污染地块中典型恶臭污染物主要指氯苯、二氯苯、三氯苯、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯甲烷、甲苯、二甲苯、苯乙烯、甲醛、三甲胺、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫、硫化氢、二硫化碳等。

3.4

自然氧化剂需求量 (natural oxidant demand)

单位质量土壤消耗氧化剂的量即为自然氧化剂消耗量。

4. 总体要求

4.1 典型恶臭地块原位化学氧化修复工程施工过程中产生的污染土体等固体废物的产生、运输、贮存、处理和处置的全过程及各个环节上都实行控制管理和开展污染防治工作。药剂的运输、储存应符合GB 50160\GB 15603规定，危险化学品的确定应按照《危险化学品目录》执行，运输管理还应符合GB 6944\GB 12268和《危险化学品安全管理条例》等的规定。

4.2 运输、装卸和贮存工程施工过程产生的有毒有害恶臭土壤等固体废物，应采取密闭措施或其它防护措施。宜建设充气膜结构大棚等专业性集中处置设施，对恶臭土壤等固体废物进行集中处置。

4.3 典型恶臭地块处理处置过程中应减少二次污染。对产生的二次污染，应执行国家和地方

环境保护法规和标准的有关规定，进行治理后达标排放，满足总量控制要求。

4.4 典型恶臭地块原位化学氧化修复工程的总图布置应符合《建设项目环境保护设计规定》的规定。主体设备和辅助设施等的总图布置应符合GBZ 1、GB 50187、GB 4387、JGJ 79 等国家及行业相关的防火、安全、卫生、交通运输和环保设计规范、规定和规程的要求。

4.5 典型恶臭地块原位化学氧化修复工程的设计、施工、运行和验收除符合本标准规定外，还应遵守国家现行的有关法律、法令、法规、标准和行业规范的规定。

5. 工作内容和流程

5.1 工作内容

5.1.1 修复方案制定

基于场调精细概念模型和地块调查污染物类别，选择适当的化学氧化技术，进行可行性分析，确定土壤地下水原位化学氧化修复技术方案。

5.1.2 工程设计与施工

根据确定的修复方案，开展原位化学氧化修复工程设计与施工。主要包括注入井、监测井的布置与施工、药剂注射方案等。工程设计分为初步设计和施工图设计。

工程施工应满足工程设计方案及相关施工技术规范要求，包括施工方案编制、施工过程控制及设备安装与调试。

5.1.3 工程运行与监测

典型恶臭地块原位修复工程运行及监测应包括工程运行与维护、运行效果监测以及工程运行状况分析。

根据运行效果监测结果，评估修复工程的运行状况，保障修复目标可达，当发现问题时，应根据实际情况及时调整。

5.1.4 修复效果评估

修复工程经初步判断达到修复目标后，开展协同工程修复效果评估，确定工程修复是否满足修复目标或地块风险是否达到可接受水平。

5.1.5 工程验收

通过修复效果评估，工程修复满足修复目标或地块风险达到可接受水平后，可关闭修复工程。

5.2 工作流程

典型恶臭地块原位化学氧化修复的工作流程如图 1 所示。

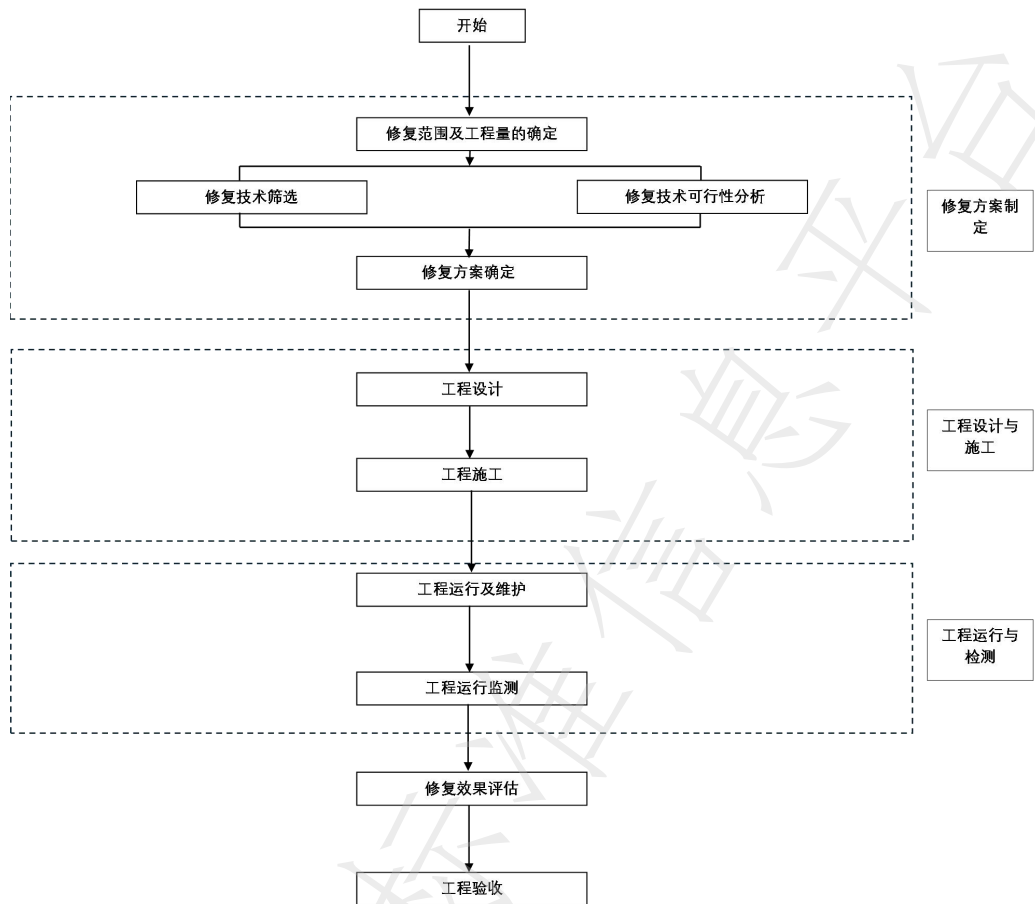


图 1 典型恶臭地块原位化学氧化修复工程的工作流程图

6. 修复方案制定

6.1 修复范围和总工程量

6.1.1 修复范围

6.1.1.1 在地块概念模型基础上，土壤及地下水修复范围按照 HJ 25.3、HJ 25.6 中规定的方法确定，应根据不同深度的污染程度分别划定，修复范围图应提供拐点坐标、分层图示，总体修复范围需在总图上确定。

6.1.1.2 拟采用原位化学氧化修复技术的地块，应尽量满足以下特征，方可划定为拟采用原位化学氧化技术的修复范围。

6.1.1.2.1 土壤具有中高渗透性即沙土以及沙壤土，便于氧化剂的传输分布；而渗透性极低的粘土则不适合采用原位化学氧化技术；

6.1.1.2.2 土壤异质性程度低，便于氧化剂均匀传输和分布；

6.1.1.2.3 土壤有机质含量低于 1%，对氧化剂的自然需求量低，利于提高氧化剂的修复效率；

6.1.1.2.4 土壤地下水位在地表下 3-10 m 范围内，污染区的最大深度一般不超过 20 m，利于地块施工以及注入井、监测井的施工。

6.1.1.2.5 污染区无大量吸附态和流动态重非水相液体（DNAPL），若存在大量 DNAPL 则应在采用原位化学氧化技术之前采用挖掘或抽提方法去除。

6.1.1.2.6 污染区地上和地下尽量无公共设施。

6.1.2 总工程量

土壤修复总工程量应根据不同层面上的污染范围及深度确定，地下水修复总工程量应根据污染范围、含水层厚度及渗透系数等确定。

污染物总修复量根据地块概念模型计算的修复土方总量、地下水修复总量以及修复目标值来计算。

6.2 修复技术筛选

6.2.1 氧化药剂筛选

地块化学氧化修复技术常采用的氧化试剂及特点如表 1 所示，可以根据目标恶臭污染物类型、氧化剂的持久性、施工难易程度、二次污染的忍受程度等参数来进行选择。

表 1 ISCO 常用氧化药剂的优缺点

	Fenton 试剂	高锰酸盐	过硫酸盐
持久性	持久性差，在地下水及土壤中易分解	在土壤及地下水中非常稳定	在土壤及地下水中非常稳定
活化剂	Fe ²⁺	不需要	H ₂ O ₂ 活化、螯合 Fe ²⁺ 活化、热活化、NaOH 活化
活化条件	pH 小于 5	不需要	pH>12 时 NaOH 活化效果才能保持
工作 pH 范围	在较宽的土壤 pH 范围内都有效，但要考虑碳酸根离子、氢氧根离子浓度的影响	在较宽的 pH 范围内都有效	在较宽的土壤 pH 范围内都有效，但要考虑碳酸根离子、氢氧根离子浓度的影响
药剂注入时组成	H ₂ O ₂ 与 FeSO ₄ 混合溶液	一定浓度的高锰酸盐溶液（1%-10%）	过硫酸盐溶液与 H ₂ O ₂ 或者螯合 Fe ²⁺ 溶液或者 NaOH 溶液按照一定比例的混合溶液
适用的污染物	活化产生羟基自由基，对污染物进行非选择性氧化	含不饱和化学键的烯烃、卤代烯烃等，但不能氧化烷烃	活化产生硫酸根自由基、羟基自由基和超氧自由基等，对污染物进行非选择性氧化
潜在的不利	产生气体、产生热量，容	产生 MnO ₂ 固体，导致土体	产生 SO ₄ ²⁻ 、H ₂ S 等化学

	易气爆,可能导致地块重金属离子的迁移	的渗透性降低,	物质、土壤 pH 改变,可能导致地块重金属离子的活性改变
--	--------------------	---------	------------------------------

6.2.2 氧化药剂输送技术筛选

地块原位氧化修复药剂的输送方式主要是直推注入和注入井注入。

6.2.2.1 直推注入技术

以 Geoprobe 为代表的直推注入技术,可以在地块上灵活选择直推注入点位和垂直注入深度。在饱和含水层中,直推注入药剂一般采用压力 20-30 psi、每分钟 4-8 L 药剂的速度注入土层中,且在垂直方向上直推注入一般采用 15-50 cm 间隔喷射药剂,在水平方向直推注入点位间隔一般采用 1.5-3 m。当污染物在包气带中,直推注入技术可采用高压旋喷头进行药剂注入,促进药剂在土体中水平迁移分布。直推注入技术概念如图 2 所示。

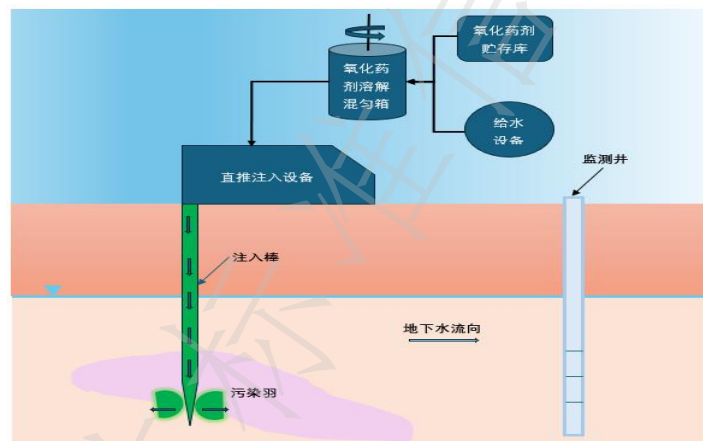


图 2 直推注入技术示意图

6.2.2.2 注入井技术

注入井可以定点反复多次向含水层注入氧化药剂。注入井的井下工具如封隔器、配注器和堵塞器等可以实现药剂的分层注入、注入量和注入压力控制、以及进行必要的洗井和维护操作。在渗透低的地层可以通过抽水促进药剂的传输和分布。注入井技术概念如图 3 所示。

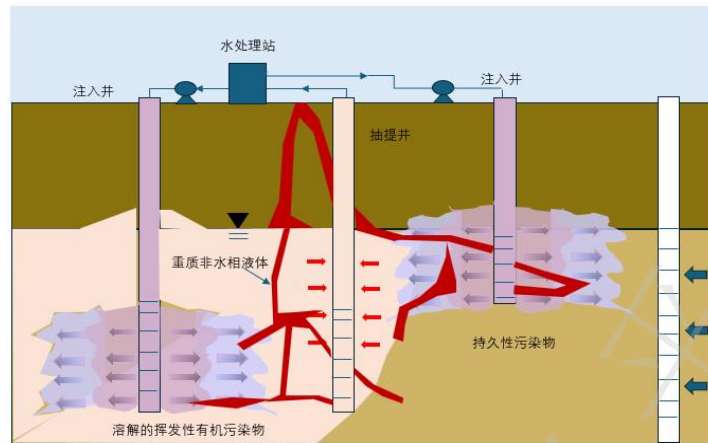


图 3 注入井技术示意图

6.2.2.3 注入-循环井技术

包括注入井、回收井和地表污水净化装置。在低渗透区地层，该技术可以有效提高氧化药剂的迁移和分布。但该技术中的地下水抽提以及其地表净化处理会产生巨大的修复成本。注入-循环井技术概念如图 4 所示。

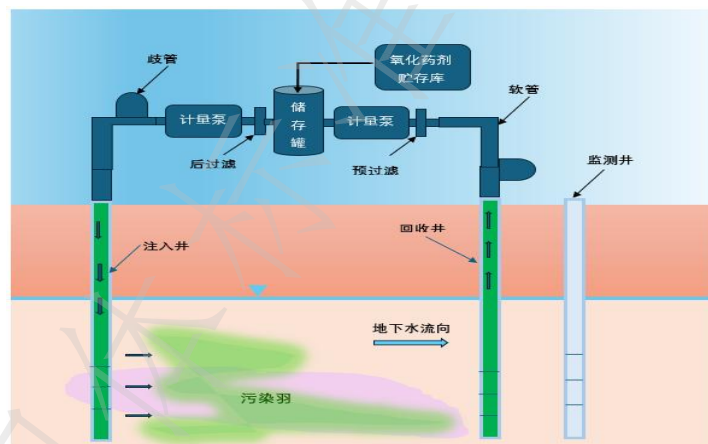


图 4 注入-循环井技术示意图

6.2.2.4 水力压裂技术

一种在渗透系数低的地层，采用水力压裂产生裂痕再注入氧化剂的输送技术，该技术可以提高氧化药剂在低渗透地层中的迁移和分布，概念如图 5 所示。

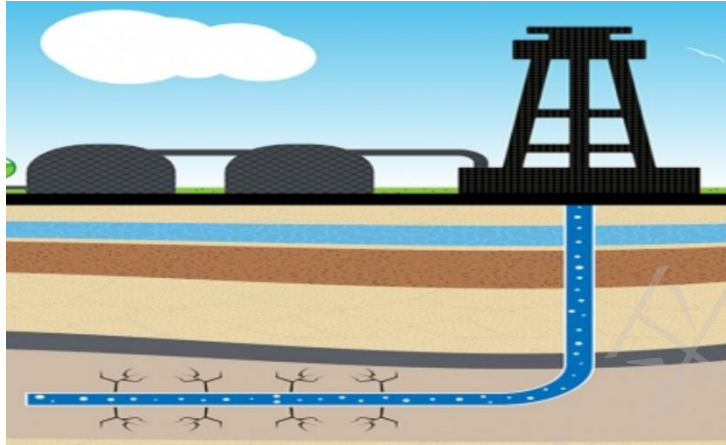


图 5 水力压裂注入技术示意图

6.2.2.5 土壤混合技术

采用土壤搅拌桩或挖掘机直接搅拌氧化药剂和土壤使其充分混合反应。适用于污染土壤主要集中在地表和近地表包气带、其深度小于 5 m 的污染土壤，也适合于土建工程挖掘集中的污染土壤。对于恶臭污染地块土壤，宜将其集中运输到地块上搭建的充气膜结构大棚内。概念如图 6 所示。

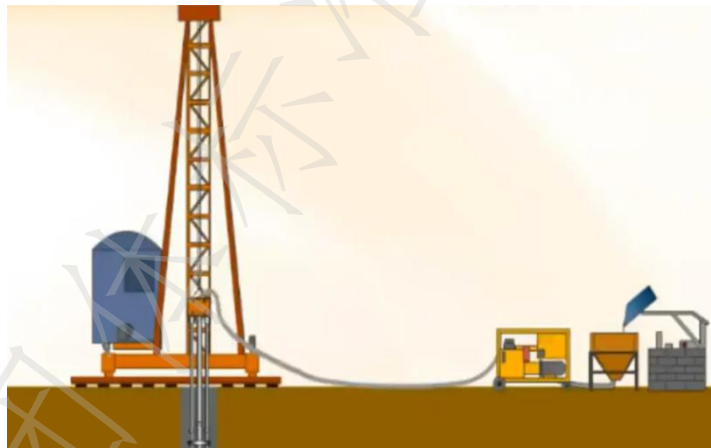


图 6 土壤混合氧化剂技术示意图

6.3 修复技术可行性分析

原位化学氧化技术的应用需要了解原位化学氧化反应的规律、机制和传质过程。应用该技术之前，需通过实验室小试研究确定药剂处理效果和投加量，并进行中试试验进一步确定和优化设计参数，确定注入点的水平和垂向有效影响半径、土壤结构分布、污染去除率、反应产物等。

6.3.1 实验室小试可行性分析

6.3.1.1 小试实验的目的

一是确定所采用的氧化剂是否能够降解目标恶臭污染物且在地块可行，二是通过与污染

物反应预估单位质量土壤氧化剂的消耗量。实验室小试反应条件应该与地块尽可能相似，如反应 pH、温度、氧化剂浓度等；样品应该采用目标地块污染土壤、地下水以及不同深度的含水层介质。

6.3.1.2 小试实验具体操作

每个采集的地块土壤样品至少有 250 g 土壤和 250 mL 地下水。每一个氧化剂降解处理实验至少有 50 g 土壤，氧化剂浓度至少 3 个浓度梯度，反应体系土水比为 1:2，反应时间至少 48h。建议监测参数：目标恶臭污染物反应前后体系中固、液、气中的浓度、降解产物、氧化剂的残留量和消耗量。

6.3.2 地块中试可行性分析

6.3.2.1 地块中试的目的

确定氧化药剂注入速率、注入压力、评估药剂注入策略、评估药剂的分布以及寿命、评估污染物反弹、评估污染物降解产物、评估药剂的效果、以及评估药剂注射过程中可能出现的问题等。

6.3.2.2 地块中试具体操作

在中试地块中，布设好注入井和监测井后，先从低浓度区域到再到污染相对严重区域依次注入添加了示踪剂的氧化药剂。等待足够长时期后，从监测井中收集地下水；为减少地块异质性带来的不确定性，需从每个注入井旁 5 m 内依次采集大量土壤及含水层土壤样品。通过样品分析，确定药剂需求量、药剂影响半径以及药剂迁移反应所需时间等重要信息。

6.3.3 地块化学氧化技术可行性分析

恶臭污染地块化学氧化技术可行性分析需要在恶臭污染地块原位修复地块特征数据收集基础上开展。常规数据收集如表 2 所示。

6.3.3.1 氧化药剂在地块中的注入点位可行性分析

6.3.3.1.1 根据污染源、注入井影响半径等确定注入点和注入点密度。位于饱和含水层中的高浓度的污染源宜作为化学氧化药剂注入点，且宜采用高浓度的氧化药剂注入。

6.3.3.1.2 位于含水层污染源下游扩散羽区域，除以拦截污染物继续扩散为目标以外，一般不宜考虑注入点位。

6.3.3.1.3 饱和含水层是渗透系数高的沙土和壤土则宜作为药剂注入点。

6.3.3.1.4 位于包气带中的污染源，一般宜采用搅拌桩将土壤与氧化药剂搅拌混合，不宜设注入点。

6.3.3.1.5 氧化药剂垂直传输速率是水平传输速率的 10 倍以上，可能存在药剂水平分布较差的情况，可适当提高注入点位的密度，或采用高压旋喷方式强化药剂水平分布。

6.3.3.2 氧化药剂对目标污染物适应性分析

应采用抽提等技术先将地块中的非水相液体去除，再注入氧化药剂。若非水相液体在土体空隙中处于不流动的残留饱和态，采用氧化法经济高效。

6.3.3.3 氧化药剂对地表特征适宜性分析

采用示踪法可以鉴定监测井之间的联系、地下水的输运、停留时间等重要信息。采用钻孔水文探测方法可以评估污染物在空隙中的运移状况，避免通道对氧化药剂注入带来的问题。

表 2 恶臭污染地块原位修复地块特征数据收集

参数	数据信息的目的
目标污染物 分布 类型 赋存形态	根源目标污染物选择适合的氧化药剂 根据分布确定入注点 根据污染物赋存形态评估热点区是否需要先采用抽提技术去除流动型非水相液体；估计污染物总量；评估氧化药剂用量。
地质与水文	根据含水层水文特征评估氧化药剂注入速率；根据水力梯度预估药剂注入后的运移方向和速度。
土壤渗透性	高渗透性土壤有利于药剂的均匀分布，更适合使用原位化学氧化技术。由于药剂难以穿透低渗透性土壤，在处理完成后可能会二次释放污染物，导致污染物浓度反弹，因此需采用长效药剂（如高锰酸盐、过硫酸盐）来减轻污染物反弹。
含水层土壤和地下水位	原位化学氧化技术通常需要一定的压力以进行药剂注入，若地下水位过低，则系统很难达到所需的压力。但当地面有封盖时，即使地下水位较低也可以进行药剂投加。
pH,缓冲性	评估在修复时是否有必要调整含水层土壤酸碱度；碳酸根以及碳酸氢根离子含量，评价其是否会对自由基类氧化反应起到猝灭作用。
Eh	初步评估氧化药剂自然使用量
还原性无机离子	溶解性铁锰离子，硫离子，评估含水层还原状态。
地下基础设施	若存在地下基础设施（如电缆、管道等），则需谨慎使用该技术。

6.4 最终修复方案制定

6.4.1 修复方案

确定修复土方总量、估算氧化药剂种类和需求量、明确药剂输送技术、确定药剂注入施工点位数量。

6.4.2 费用估算

修复费用估算包括地块准备（水电管线铺设、设备安装平台搭建、注入井建设费用、监测井建设费用）、移动费用（运输、存储、安装、拆卸）、设备购买或租赁费用、所选择化学氧化药剂费用、设备运行费用、监测费用和后期维护费用等。

6.4.3 周期估算

周期估算应根据调查时间、工程量、工程设计、建设和运行时间、效果评估和后期环境监管要求等来估算。就药剂注入环节而言，对于大多数地块，直推式注入3天内能够完成；而循环式注入井注入需要4-8周才能完成。就整个修复工程而言，通过原位化学氧化修复技术修复需要半年至1年。

7. 工程设计与施工

7.1 工程设计

通过建立地块概念模型指导工程设计。进行原位化学氧化修复系统设计时，需重点考虑注入井布设点、布设间距和深度、监测井布设的间距和深度、药剂注入量等。还要注意工人的培训、化学药剂的安全操作以及修复产生废物的管理。

7.1.1 初步设计和施工图设计

7.1.1.1 初步设计文件应根据修复方案进行编制，满足编制施工图、采购或租赁主要设备、修复工期、控制工程投资的需要。

7.1.1.2 初步设计说明书应包括设计总说明、专业设计说明、主要设备材料表；

7.1.1.3 初步设计图应包括总图、工艺、给排水等专业图纸，原位化学氧化修复技术工程设计应开展总图、工艺专业图纸设计。

7.1.1.4 初步设计概算书应包括编制说明、编制依据、工程总概算表、单项工程概算表和必要的说明。

7.1.2 工艺流程设计

恶臭污染地块原位化学氧化技术工艺中最重要的是注入井工艺，注入井工艺概念如图7所示。



图 7 地块原位化学氧化直推注入 (A) 和建井注入 (B) 工艺流程设计图

7.2 工程施工

7.2.1 一般规定

7.2.1.1 典型恶臭地块原位化学氧化修复工程应按工程设计图纸、技术文件、设备图纸等组织施工。

7.2.1.2 典型恶臭地块原位化学氧化修复工程施工单位，应具有与该工程相应的资质等级。

7.2.1.3 典型恶臭地块原位化学氧化修复工程建设单位应专门成立项目管理机构，参与设计会审、设备监制、施工质量检查，制定运行和维护规章制度，培训工人，组织、参与工程各阶段验收、调试和试运行，建立设备安装及运行档案。

7.2.1.4 施工使用的材料、半成品、部件应符合国家现行标准和设计要求，并取得供货商的合格证书，严禁使用不合格产品。

7.2.1.5 设备安装之前应对土建工程按安装要求进行验收，验收记录和结果应作为工程竣工验收资料之一。设备的安装应符合相应的安装规范。

7.2.1.6 对国外引进专用设备应按供货商提供的设备技术规范、合同规定及商检文件执行，并应符合我国现行国家或行业工程施工及验收标准要求。

7.2.1.7 压力容器、压力管道的安装应在地级市以上的技术监督部门监督下实施。

7.2.2 工程构成

7.2.2.1 典型恶臭地块化学氧化技术工程由主题工程、辅助工程和配套设施组成

7.2.2.2 典型恶臭地块化学氧化技术工程主体工程主要包括药剂配置/储存系统、搅拌混合、高压注入机械、注入井、监测井等。其中，药剂注入系统包括药剂储存罐、药剂注入泵、药剂混合设备、药剂流量计、压力表等组成；药剂通过注入井注入到污染区，注入井的数量和深度根据污染区的大小和污染程度进行设计；在注入井的周边及污染区的外围还应设计监测井，对污染区的污染物及药剂的分布和运移进行修复过程中及修复后的效果监测。可以通过设置抽水井，促进地下水循环以增强混合，有助于快速处理污染范围较大的区域。

7.2.2.3 辅助工程包括给排水系统、配电室、化学品仓库、围墙等

7.2.2.4 配套实施主要包括办公室、休息室、卫生间等生活设施。

7.2.3 工程平面布置

7.2.3.1 总平面布置应满足 GB 50187 的要求。应根据工艺和施工流程、地块内运输、安全和二次污染防控等的要求合理布置保证工艺历程顺畅，物料运送便捷，施工、维护和检修方便，处置设施应与办公和生活服务设施格力艰涩，化学品库应单独布置。

7.2.3.2 典型恶臭地块化学氧化技术工程应按照施工区、药剂存储区、道路及办公区等功能区化进行布置。

7.2.3.3 当典型恶臭地块化学氧化技术工程为地块修复方案中的一个组成部分时，其平面布置应作为总体工程的一部分纳入总体工程平面布置。

7.2.3.4 原位注入点/注入井平面布置。一般情况下注入井的影响半径需要根据前期的地块调查信息确定，一般情况下，注入井对砂壤土层的影响半径不超过 5 m，对黏土层的影响半径约 1.5 m。注入点/注入井平面布置如图 8。

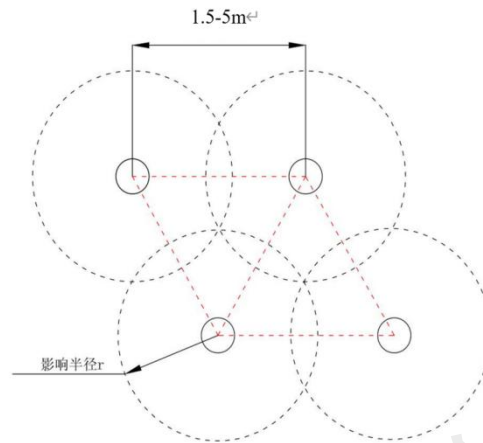


图 8 注入井平面布置示意图

7.2.4 物料准备

7.2.4.1 典型恶臭地块化学氧化修复工程相关设施的防腐设计及施工应满足 GB 50046 及 GB 50212 的要求，各单元所采用的设备、连接管道及相应材料应具有相应的耐酸碱和抗氧化腐蚀能力。

7.2.4.2 药剂投配系统中以及溶解池应具有耐酸碱和抗氧化腐蚀能力。

7.2.4.3 药剂投配系统的设备、管道应根据药剂的性质采取相应的保温措施。

7.2.4.4 药剂投配系统重加药泵等均应采用耐腐蚀材质。

7.2.4.5 机械搅拌机部件宜采用 316 L 型不锈钢材质、玻璃钢材质。

7.2.4.6 药剂输送管道宜采用 PE、PP 或 UPVC 材质的管路和管件。药剂输送管应设置必要的过滤器，放置计量泵和管路堵塞。

7.2.5 机械设备进场

机械设备进场后经理部机电工程师审查作业机械的合格证、检修证明及使用、保养记录，检查其工作状态，以确保投入作业的机械设备状态良好；安全工程师检查作业机械设备是否存在安全隐患，以上均满足要求后上报监理工程师并获得监理工程师的批准方能施工。

7.2.6 设备调试

确定供电系统是否满足系统运行负荷要求、确定系统管道密封情况；确定各项压力值、流速值等参数。

7.2.7 主体工程施工过程

施工过程中做好工程动态控制工作没通过落实安全和安置保证措施，控制工程施工进度和建设安装成本，保证安全、质量、进度、成本等目标的全面实现。

7.2.7.1 注入井系统建设：将钻机安置在现场精确测设的孔位上，使钻头对准孔位中心。钻

机安装定位要准确、水平、稳固。为保证钻孔达到设计要求的垂直度，钻机就位后须作水平校正，使其钻杆轴线垂直对准钻孔中心位置。钻杆垂直度 $<0.5\%$ 。钻孔的目的为了将注浆管插入预定的地层中。钻孔位置与设计孔位偏差不得大于 50 mm，施工中应逐个进行编号、记录，发现偏差即停钻孔，查明原因，调整好位置后方可继续施工。

7.2.7.2 药剂注入过程：喷射注浆管插入预定深度后，由下至上同时喷射高压水及低压空气，利用高压水喷射流和气流同轴喷射冲切土体，形成较大孔隙。注浆时随时检查浆液初凝时间、浆液流量、浆液压力、旋转提升速度、水压力、水流量及空气压力、空气流量等参数是否符合设计及规范要求，并随时做好记录。

7.2.7.3 注入管提升：钻杆的旋转和提升必须连续不中断，提杆应缓慢有序，拆卸钻杆继续旋喷时，其搭接长度不小于 100 mm。

7.2.7.4 注入施工完毕后，冲洗干净注浆管等机具设备，管内机内不得残存药剂液体。将钻机等机具设备移至新孔位。

7.2.7.5 污染土壤和地下水原位化学氧化修复过程监测以及修复后的监测。主要包括对污染物浓度、pH、氧化还原电位等参数进行监测，如果污染物浓度出现反弹，可能需要进行补充注入。

7.2.8 技术要求

施工前先做 1~2 根试验桩，以确定旋喷桩有关的施工参数。

7.2.8.1 钻杆就位后，须校正钻机主要立轴二个不同方向的垂直度。使用回转钻机，须校正导向杆。垂直度误差不得超过 0.5%。

7.2.8.2 插管时，水压不宜大于 1 MPa。

7.2.8.3 旋喷作业时，应检查注浆流量、压力、旋转提升速度等。

7.2.8.4 注浆管进入预定深度后，进行喷射。在桩底部边旋转边喷射 1 min 后，再进行边旋转、边提升、边喷射，由下而上喷射注浆。喷射管分段提升的搭接长度不得小于 100 mm。施工顺序为先喷浆后旋转和提升。

7.2.8.5 旋喷作业前检查高压设备和管路系统，其压力和流量须满足设计要求。注浆管及喷嘴内不得有任何杂物。注浆管接头的密封圈必须良好。

7.2.8.6 灌浆作业应全孔自下而上作业，当中途拆卸喷射管时，搭接段应进行复喷，复喷长度不小于 0.2 m。

7.2.8.7 发生故障时立即停止提升和旋喷，以防桩体中断，同时立即进行检查排除故障。恢

复灌浆施工时，应进行复喷，搭接复喷长度不小于 0.5 m。

7.2.8.8 高压喷射注浆过程中若发现地下有块石等障碍物时，喷浆时提升速度应控制在 10 cm/min 以内，下部卵石层时提升速度应控制在 15 cm/min 以内。一次喷浆达不到设计要求时，可进行第二次复喷。

7.2.9 二次污染防控

根据国家和地方环境管理法律法规标准，结合工程施工工艺特点以及工程周边环境，对修复治理实施全流程的二次污染防控，防范钻探、地面设备安装、注入化学药剂等施工过程中造成的地下水、土壤、地表水、空气、噪音等二次污染。

8. 工程运行与检测

8.1 工程运行及维护

8.1.1 运行维护方案编制

原位化学氧化修复工程应编制运行维护方案，包括工程运行管理、设备操作、设备维护保养、安全运行管理制度建立、设备检修等内容。同时对氧化药剂及相关材料的运输、存储、使用等环节。

8.1.2 运行内容

工程运行过程中，主要运行内容包括：对设备设施运行记录，包括计量仪器仪表读数、材料使用情况等；对设备实施运行过程中可能产生环境事故的但愿进行定期检查，设备设施运行异常时，及时检修、更换或调整。

8.1.3 维护内容

工程的维护内容主要包括：对设备设施进行维护保养，包括设备清洁、润滑和保养，以及易损件的更换等；对现场的药剂和材料进行检验、核实、登记；对药剂和材料的存储、使用进行管理。

8.2 工程运行监测

8.2.1 运行监测

监测包括修复过程监测和效果监测。修复过程监测通常在药剂注射前、注射中和注射后的时间内进行，监测参数包括药剂浓度、温度和压力等。若修复过程中产生大量气体或地块正在使用，则可能还需要对挥发性有机污染物、爆炸下限（LEL）等参数进行监控。效果监测的主要目的是依据修复前的背景条件，确认污染物的去除、释放和迁移情况，监测参数为

污染物浓度、副产物浓度、金属浓度、pH、氧化还原电位和溶解氧。若监测结果显示污染物浓度上升，则说明地块中存在未处理的污染物，需要进行补充注入。

8.2.1.1 土壤中应对重点区域加密和分段采样，监测目标污染物的变化情况；注入井应使用流量计、压力计等仪表设备检测，反映注入井的运行状态。

8.2.1.2 在工程运行监测过程中，土壤和地下水的检测点位布设基本原则包括：土壤采样点布设在污染源范围附近，根据实际情况确定；涉及地下水原位化学氧化技术修复工程，在其污染羽中心及下游地段，设置采样点，采样点数量不少于4个。

8.2.1.3 土壤中目标污染物和中间产物应至少在验证周期中期和末期采样1批次样品。地下水中目标污染物和中间产物至少在验证周期中期和末期采集2批次样品。

8.2.1.4 土壤及地下水样品采集后，应立即向样品中添加适当的抗坏血酸钾（针对高锰酸盐为氧化剂）、硫代硫酸钠（针对过硫酸盐作为氧化剂），以消除样品中氧化剂与目标污染物继续反应而使数据失真的可能。

8.2.1.5 工程运行过程中的监测指标主要指效果评估指标，包含污染物指标和工程性能指标。污染物指标包括修复方案中确定的目标污染物、修复过程中可能产生的中间产物和二次污染物；工程性能指标包括工程设施连续性、稳定性等。

8.2.1.6 工程修复效果达标的判断标准是，土壤和地下水的污染物修复效果达标按照HJ25.5和HJ25.6执行。

8.2.2 趋势预测

8.2.2.1 获取工程运行监测数据后应及时进行趋势预测，可以根据监测指标中的全部或部分进行趋势预测，趋势预测可采用图表、数值模拟或统计学等方法。

8.2.2.2 处理周期预测：根据监测结果，结合污染物特性，污染土壤及地下水的埋深和分布范围等预测处理周期。一般而言，使用该技术清理污染源区的速度相对较快，通常需要3-24月的时间。修复地下水污染羽流区域通常需要更长的时间。

8.2.2.3 处理成本预测：根据工程监测数据和相应处理周期预测，结合注入井/监测井的建造费用、药剂费用、样品检测费用以及其他配套费用，进行成本预测。

8.2.3 工程运行状况分析

工程运行状况分析应根据土壤和检测数据及趋势预测结果看展，分析土壤和地下水修复或风险管控工程运行阶段的有效性、目标可达性、经济可行性等，判断技术方案、工程设计、施工、运行有无调整和优化的必要。

9. 修复效果评估

9.1 目标恶臭污染物修复评估

对目标恶臭污染物及其他相关因子的修复效果达标判断，按照 HJ 905 和 GB/T 14675 的相关要求执行。

9.2 工程竣工评估

9.2.1 工程完工后，施工单位向建设单位提交工程竣工验收申请。验收程序和内容按建设项目竣工验收程序执行。

9.2.2 工程竣工评估依据：主管部门的批准文件、设计文件和设计变更文件、合同及其附件、设备技术文件等。

9.2.3 工程环境保护评估

9.2.3.1 竣工环境保护评估应执行《建设项目竣工环境保护验收管理办法》和行业环境保护验收规范。

9.2.3.2 验收监测应符合《建设项目环境保护设施竣工验收监测技术要求》的规定。

9.2.3.3 污染治理设施的自动连续监测及数据传输系统，应与典型恶臭地块原位化学氧化修复工程同时进行环境保护评估。

10. 工程验收

10.1 若通过修复区域土壤及其周边监测井地下水的采样、监测，确定污染物浓度已经达到修复目标值水平，且通过了相关工程竣工验收，修复工程不再继续时，可选择关闭原位氧化修复工程。

10.2 关闭修复工程后，应对相关构筑物、处理设备设施等进行拆除，废弃井可根据《废弃井封井回填技术指南（试行）》（环办土壤函[2020]72号）进行回填，妥善处置固体废物，防止二次污染，逐步恢复地块条件。若需要开展后期环境监管的地块，应保留必要的地下水环境监测井，并本剧后期环境监管要求，地下水每年至少应开展一次监测，土壤必要时开展抽检。

10.3 关闭和拆除活动应符合相关法律法规及标准要求。

附录 A
(资料性)

某恶臭污染地块原位化学氧化修复工程案例

1 地块概况

该地块位于某大型综合炼化企业，2014 年经污染调查发现该地块土壤和地下水受恶臭污染物苯系物污染。地块地层结构分为 4 层：(1) 杂填土，(2) 粉质粘土，(3) 卵石层，(4) 泥质砂岩。地块内地下水位平均埋深 1.61 m，地下水属于松散岩类孔隙水，富水性中等。区域地下水从河谷外围接受降水补给，向河中央径流，最终排泄于黄河。

2 污染概况

该地块土壤中主要污染物为苯，地下水中主要污染物为苯、乙苯。

3 修复设计

根据该地块的具体情况，综合考虑环境风险、修复效果、工程投资及国内外工程经验等因素，设计土壤及地下水原位修复的工艺路线。

- (1) 对不能开挖的污染土壤采用原位注入化学氧化药剂的方式进行原位化学氧化。
- (2) 对污染地下水采用原位注入化学氧化药剂的方式进行原位化学氧化。

4 修复实施方案

(1) 注入井建设实施

由于修复区域主要为渗透性较好的砾石和卵石含水层，采用注射井方式注入药剂。根据设计，共需建设注入井 25 口。注入井钻机成孔采用符合技术要求的钻机施工作业，最大开孔直径 150 mm，终孔直径 76 mm。

(2) 原位注入系统

原位注入系统包括注入泵、混合药剂输送管、快速接头、分流装置、总压力表和流量计，其中注入泵的入口通过混合药剂输送管与三通相连接，注入泵的出口与混合药剂输送管的一端相连，混合药剂输送管之间连接流量计和压力表，混合药剂输送管的另一端通过快速接头与分流装置主管路相连接，分流装置分支管路通过快速接头与混合药剂输送管的一端相连接、混合药剂输送管的另一端通过快速接头及转换接头与注入井相连接。

(3) 注入系统试运行

注入系统连接完成后，对整套系统进行试运行。包括系统吹扫水洗、试压试密、加药试运行。

1) 系统吹扫水洗

吹洗前，拆除设备，管线上的压力表、流量计、安全阀暂不安装，对仪表进行保护。对不可以拆除的可在出入口断开。吹洗时，阀门要全开。吹洗顺序是先主管，后支管，最后各排净、放空线。吹洗入口选用设备的预留接头，出口通过预留接头。吹洗过程中发现问题，应停止吹洗，泄压处理完毕后继续吹洗。吹洗时，在吹洗管线中的最后一道阀门排空，最后低点放净、最高点排空，在最后一道阀门处检测吹洗质量。水洗时，排出端的水色、透明度与入口处目测一致为合格。水洗结束后，需要吹干的管道应用压缩风吹干，完成仪表等安装。

2) 加药试运行

按照设计方案药剂配置浓度配制氧化药剂进行加药试运行。试验混合药剂的泵送，记录管道中药剂溶液压力、分支管道中药剂溶液压力、流量等，特别注意气动源系统是否能够满足群井注入药剂压力、药剂剂量及原位注入系统对注入量的控制，满足各区域群井注入要求。

5 注入工艺实施及效果评估

该地块原位化学氧化注入实施分区进行，按照设计进行药剂的多次注入施加。原位修复注药修复后，通过长期降水及整个地块原位注入后水质监测结果数据对比分析，目标污染物去除率约 85%，土壤及地下水水质得到明显改善。