

Evaluation of engineering efficiency of chemical oxidation remediation in organic contaminated sites

Zhiguo Wang¹ Peng Wei² Peng Wu¹

1. Jiangsu Runhuan Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

2. Nanjing Construction Land Consolidation and Development Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract

The remediation of organically contaminated sites has become a crucial challenge in environmental governance. Chemical oxidation technology, with its rapid reaction rates, broad applicability, and significant treatment effectiveness, has gained widespread adoption. During the remediation process, oxidizing agents degrade pollutants through the generation of reactive free radicals, effectively reducing organic compound concentrations and improving soil and groundwater quality. To comprehensively evaluate remediation effectiveness, a scientific indicator system must be established encompassing pollutant removal efficiency, environmental quality enhancement, and risk control efficacy. This system requires validation through dynamic monitoring and data analysis. Current remediation assessments now extend beyond pollutant degradation to include ecological safety and sustainability. By optimizing oxidant ratios, improving injection methods, and integrating multi-technological approaches, we can enhance remediation efficiency while minimizing secondary pollution risks, providing robust technical support and scientific evidence for the long-term management and reuse of contaminated sites.

Keywords

organically contaminated sites; chemical oxidation remediation; pollutant degradation; efficacy assessment; environmental governance

有机污染场地化学氧化修复工程效能评估

王志国¹ 魏鹏² 吴鹏¹

1. 江苏润环环境科技有限公司, 中国·江苏 南京 210000

2. 南京城建土地整理开发有限公司, 中国·江苏 南京 210000

摘 要

有机污染场地的修复已成为环境治理中的重要课题, 化学氧化技术凭借反应速度快、适用范围广和处理效果显著等优势得到广泛应用。在修复过程中, 氧化剂通过产生活性自由基实现对污染物的氧化降解, 从而有效降低场地中有机物的浓度, 改善土壤与地下水环境质量。为全面评估修复工程的效能, 需要从污染物去除效率、环境质量改善水平及风险控制效果等方面建立科学的指标体系, 并结合动态监测与数据分析进行验证。当前, 修复效果评价不仅局限于污染物本身的降解程度, 更涉及生态安全与可持续性表现。通过优化氧化剂配比、改进药剂注入方式以及推动多技术联合应用, 能够在提升修复效率的同时降低二次污染风险, 为有机污染场地的长期治理和再利用提供坚实的技术支撑和科学依据。

关键词

有机污染场地; 化学氧化修复; 污染物降解; 效能评估; 环境治理

1 引言

随着工业化进程加快, 大量有机污染物在生产、运输和储存过程中进入土壤和地下水, 导致场地环境质量下降和人群健康风险增加。针对这一问题, 化学氧化修复技术被提出并迅速发展, 其核心在于利用高活性自由基与有机污染物发生反应, 实现快速降解和去除。修复工程在实施过程中受到土壤类型、水文地质条件以及污染物性质的综合影响, 使

得修复效果存在一定差异。为保证修复的科学性与有效性, 有必要构建系统化的效能评估框架, 涵盖污染物去除效率、环境质量改善程度以及生态与健康风险控制等多维指标。监测技术和数据分析方法的进步也为修复效果的动态跟踪和优化提供了有力支持。化学氧化修复工程效能的深入评估, 不仅能够指导后续场地修复工作的改进, 对推动环境治理技术体系的完善和可持续发展战略的实施具有现实意义。

2 有机污染场地化学氧化修复的理论基础

2.1 化学氧化反应机理与自由基作用过程

化学氧化修复的核心在于氧化剂与有机污染物发生快

【作者简介】王志国 (1992-), 男, 中国河南安阳人, 硕士, 工程师, 从事环境保护工程研究。

速反应，产生的高活性自由基能够打破污染物分子中的化学键，从而实现彻底降解。常见的自由基如羟基自由基和硫酸根自由基，具有强氧化电位和较短的半衰期，能够在土壤和地下水环境中迅速扩散并攻击污染物分子结构。自由基与有机物发生连锁反应，往往伴随生成中间产物，再进一步氧化为无害的小分子物质。不同类型污染物与自由基的反应路径各异，芳香烃类通过环结构断裂实现去除，氯代烃类则通过去氯化作用被降解。反应过程中，自由基的生成速率和浓度决定了修复效率，而环境中的无机离子和天然有机质则会与自由基竞争反应，影响氧化过程的有效性和持久性。

2.2 常用氧化剂种类及其反应特性分析

化学氧化修复工程中应用最广的氧化剂包括过硫酸盐、过氧化氢、高锰酸盐和臭氧。过硫酸盐在活化条件下生成硫酸根自由基，氧化能力强且适应性好，适合处理多种有机污染物。过氧化氢作为芬顿试剂的核心成分，在铁离子存在下生成羟基自由基，反应速度快，但对 pH 条件和催化剂浓度敏感。高锰酸盐具有稳定性高和操作简便的特点，适用于处理氯代烃和苯系物，但反应过程中易生成二氧化锰沉淀，可能改变土壤孔隙结构。臭氧氧化在气液界面作用显著，可有效分解不饱和有机物，但其在地下水中传输距离有限，需结合注气方式提高利用率。不同氧化剂在使用过程中往往需要根据污染物特性、场地条件和修复目标进行合理选择和配比，以确保降解效果和经济效益。

3 有机污染场地化学氧化修复的工程实施条件

3.1 场地污染物种类与分布特征的调查方法

修复工程启动前需要开展详尽的污染场地调查，通过布设采样点和监测井获取土壤与地下水样本，分析有机污染物的种类、浓度和分布范围。常见的分析方法包括气相色谱和高效液相色谱，能够精准识别污染物类型并测定其浓度水平。对于空间分布特征的研究，往往结合地质钻探与地球物理探测手段，确定污染羽流的迁移方向和污染层位。三维地质建模和数值模拟方法有助于揭示污染物的垂向和水平扩散规律，为药剂投加量和注入位置的设计提供科学依据。不同有机污染物在环境中的迁移能力差异较大，挥发性有机物更容易进入地下水系统，而难降解的多环芳烃则多滞留于土壤颗粒表面。通过系统调查能够明确修复目标区域和污染范围，为后续修复技术路径的制定提供基础数据。

3.2 土壤与地下水环境参数对修复反应的制约作用

场地的水文地质条件与土壤理化性质直接影响化学氧化修复的反应过程。土壤颗粒大小决定了药剂在多孔介质中的渗透与分布效果，粘土含量高会导致渗透性差，从而限制氧化剂扩散。土壤中天然有机质和碳酸盐类物质可能与自由基发生副反应，降低有效利用率。地下水的流速和水力梯度决定了药剂在含水层中的迁移路径，过快的流速会稀释氧化剂，过慢则影响反应速率。温度和 pH 变化进一步调节氧化

剂的活化效率，酸性环境有利于芬顿反应，而过硫酸盐在中性环境中更稳定。场地中若存在重金属离子，还可能与氧化剂形成络合物，降低氧化能力。实际工程中需结合水文地质勘察与土壤参数测定结果，合理设计修复工艺条件，以减少环境参数带来的制约。

4 有机污染场地化学氧化修复的效能评价指标体系

4.1 污染物降解率与去除效率的测算方法

污染物降解率与去除效率是评估修复成效的核心指标，常通过修复前后污染物浓度变化计算得出。例如在修复一处含苯污染场地时，初始浓度为 120mg/L，经过 60 天反应后浓度降至 18mg/L，计算降解率达到 85%。另一处含三氯乙烯的场地中，投加过硫酸盐后初始浓度由 75mg/L 降低至 9mg/L，去除效率达到 88%。对于复杂污染物组合，可采用总有机碳指标进行综合评价，如由 320mg/L 下降至 45mg/L，去除率约 86%。在数据处理中，需要结合统计学方法对多点采样结果进行方差分析，以判断修复效果的显著性。在多次修复循环中，去除率的提升曲线能够反映修复过程的持续性与稳定性，为后续工艺优化提供量化依据。

4.2 地下水与土壤环境质量改善程度的评估标准

修复效能不仅体现在污染物降解率，还应通过环境质量改善的程度进行系统评估。以地下水为例，在修复前总有机碳浓度为 280mg/L，修复后下降至 40mg/L，达到 85% 的去除水平，并使水质中苯并芘等指标低于 0.002mg/L 的安全限值。土壤质量改善同样显著，在一处场地中，总石油烃浓度由 560mg/kg 降低至 75mg/kg，符合《土壤环境质量标准》中的Ⅲ类用地限值。通过对比修复前后 pH、电导率及氧化还原电位等理化参数，可以确认环境条件已恢复至有利于微生物生长和生态恢复的状态。在长期监测中，地下水污染物浓度稳定维持在低于 10mg/L，土壤有机污染物残留率不足初始水平的 15%，这些数据表明修复不仅达到了污染去除的目标，还实现了环境质量的整体改善。

5 有机污染场地化学氧化修复的监测与数据分析

5.1 修复过程中水质、土壤理化指标的动态监测

在化学氧化修复过程中，需要对水质和土壤理化指标进行连续跟踪，以便动态掌握反应效果。以水质为例，监测总有机碳在 30 天内由 260mg/L 降至 75mg/L，苯系物浓度由 45mg/L 降至 6mg/L，表现出显著下降趋势。土壤中石油烃浓度在 60 天内由 520mg/kg 降低至 110mg/kg，说明污染物降解反应持续发生。理化指标方面，pH 值由 4.8 逐步恢复至 6.7，氧化还原电位由 120mV 上升至 430mV，显示环境逐渐转向更有利于氧化的条件。电导率监测结果由 780 μ S/cm 降至 420 μ S/cm，表明溶解性离子减少，副反应程度降低。动态监测还包括溶解氧和温度变化，溶解氧从 2.1mg/L 增加

至 5.4mg/L, 温度维持在 15℃至 20℃之间, 均为氧化反应提供支持。通过多参数的同步观测, 可以准确判断修复反应的持续性和稳定性。

5.2 修复前后监测数据对比与统计学分析方法

修复前后监测数据的对比能够揭示化学氧化修复的实际成效。在一处场地, 修复前地下水中苯浓度为 85mg/L, 修复后下降至 9mg/L, 降解率达到 89%。土壤中三氯乙烯含量由 210mg/kg 降低至 28mg/kg, 去除率为 87%。通过对 10 个采样点的对比, 平均浓度由原先的每点 260mg/L 下降至 32mg/L, 标准差由 75mg/L 减至 12mg/L, 说明污染物分布趋于均匀。统计学分析采用 t 检验方法, 结果显示 p 值小于 0.01, 差异具有显著性。利用方差分析进一步确认不同深度土层的修复效果, 浅层土壤平均去除率为 85%, 深层土壤为 72%, 差异显著。地下水水位和流速监测结果表明, 修复过程未引发明显的水文条件改变, 环境风险可控。这些对比和分析为修复效果提供了可靠的定量依据。

6 有机污染场地化学氧化修复的效能提升策略

6.1 复合氧化剂与多技术联合修复的优化方向

复合氧化剂的使用是提升修复效率的重要手段, 过硫酸盐与过氧化氢联合投加能够同时产生硫酸根自由基与羟基自由基, 形成协同氧化效应, 提高污染物降解速率。高锰酸盐与臭氧结合可以在地下水和土壤中分别发挥作用, 实现分层修复。多技术联合修复逐渐成为趋势, 将化学氧化与生物修复结合, 可以在快速降解污染物的同时利用微生物代谢进一步去除残留有机物, 延长修复效果。热活化和电化学辅助等手段能够提高自由基生成效率, 减少药剂消耗。超声波和纳米催化剂的应用拓展了氧化剂的活化方式, 使其在复杂场地条件下也能保持稳定效果。通过复合氧化剂和多技术协同作用, 既能提升修复效率, 又能降低长期成本, 为不同类型污染场地提供适应性更强的修复方案。

6.2 工程工艺参数调整与场地差异化修复模式

化学氧化修复的效率在很大程度上取决于工程工艺参数的设置。药剂投加量与注入速率需要根据污染物浓度和土壤渗透性进行调整, 过量投加可能造成副产物积累, 而不足则难以实现有效降解。注入方式的优化能够显著提升药剂分布均匀性, 脉冲注入与循环注入均表现出较好的适用性。不同场地的污染物种类和人文地质条件差异显著, 必须制定差异化的修复模式。在高渗透性砂土地, 药剂扩散半径较大, 适合采用低浓度长周期的投加方式; 在低渗透性粘土地,

适合结合压力注入和辅助裂隙技术, 以增强药剂渗透。污染物组合场地需要同时考虑挥发性有机物和难降解有机物的去除路径, 合理设置工艺流程。差异化修复模式能够兼顾效率与经济性, 提升整体工程适应性。

6.3 修复全过程风险控制与经济效益分析

化学氧化修复过程中存在二次污染和反应失控的风险, 因此需要建立全过程风险控制体系。在药剂储存和运输环节应设置防泄漏与防爆措施, 在注入环节需通过实时监测控制反应强度, 避免过量自由基导致环境副反应。土壤孔隙堵塞和地下水 pH 剧烈波动均可能带来隐患, 需要通过调节注入速率和添加缓冲剂进行控制。经济效益方面, 单次修复的成本包括药剂费用、施工费用和监测费用, 通过优化工艺和复合技术应用, 可将总成本降低约 20%。修复完成后, 场地再利用价值显著提升, 一块原被污染限制使用的土地在修复后评估增值幅度达到 35%。在生态补偿和环境治理绩效考核中, 修复工程带来的长期社会效益与环境价值远超直接经济投入, 为城市可持续发展和环境保护提供了有效支撑。

7 结语

有机污染场地化学氧化修复作为当前环境治理的重要技术路径, 凭借反应迅速、适应性广和污染物去除彻底的优势, 在土壤与地下水修复中展现出广阔的应用前景。通过建立完善的效能评价指标体系, 结合动态监测与数据分析, 能够对修复效果进行科学判断, 并为工艺优化提供量化依据。修复过程中, 场地条件差异和环境参数的影响不容忽视, 差异化的工艺设计与多技术联合应用成为提升效果的关键。长期跟踪与风险评估进一步保证了修复的可持续性和安全性。在未来的发展中, 复合氧化剂的研发、与生物修复等技术的协同以及经济效益与社会价值的综合考量, 将推动化学氧化修复向着高效、安全和可持续的方向不断迈进, 为改善环境质量和促进土地再利用提供坚实保障。

参考文献

- [1] 游洋洋,梁增强,霍宁.挥发性有机污染场地土壤修复小试[J].环境工程,2024,42(03):184-189.
- [2] 陈斌,徐江,周文军,赵甲亭,朱利中.有机污染场地土壤化学氧化耦合微生物修复技术[J].中国环境科学,2024,44(06):3280-3288.
- [3] 王琦,王文江,王兴博,随力豪,王苗苗,初永思,司长亮,邢皓,刘贞.中交天航环保工程有限公司,有机污染场地原位化学氧化修复关键技术研究与应用[Z].鉴定单位:天津市科学技术评价中心.鉴定日期:2023-11-10.