

# 陶粒窑、异位化学氧化技术联用的 某修复工程实例研究

俞明\*, 毕宁, 王习羽

(宁波市生态环境科学研究院, 浙江宁波 315012)

**摘要:**浙江某金属制品厂地块受到重金属、多环芳烃等复合污染。根据复合污染物互相作用的特性及现场实际情况,采用陶粒窑协同处置和异位化学氧化联用技术对污染土修复施工,更高效、环保地去除污染物,达到预期的修复目标和修复效果,实现了修复后土壤的资源化利用。该修复工程实例的研究为其他复合污染场地修复工程提供了宝贵经验和 technical 支撑。

**关键词:**复合污染;陶粒窑;异位化学氧化;修复效果

**中图分类号:**X53

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2023)07-0228-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.07.043

## Study on a remediation engineering case using ceramsite kiln and ex-situ chemical oxidization technology jointly

YU Ming\*, BI Ning, WANG Xi-yu

(Ningbo Research Institute of Ecological and Environmental Sciences, Ningbo 315012, China)

**Abstract:** A metal products factory site in Zhejiang province, China is polluted jointly by heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. According to the interactions among co-pollutants and the actual situation at the site, ceramsite kiln and ex-situ chemical oxidization technologies are combined to remediate the polluted soil, which removes contaminants more efficiently and environmentally. The expected remediation target and effect have been achieved, and the remediated soil can be reused. The study on the remediation engineering case can provide valuable experience and technical support for other co-contaminated sites.

**Key words:** compound pollution; ceramsite kiln; ex-situ chemical oxidization; remediation effect

在环境污染问题日益严重的当今,因污染物来源及污染途径的复杂性,使得各种污染物之间发生直接或间接的相互作用,出现2种及2种以上污染物的复合污染情况。按照污染类型可分为有机复合污染、无机复合污染和有机-无机复合污染<sup>[1]</sup>。其中,最为常见的是重金属和多环芳烃的复合污染<sup>[2]</sup>,针对此类污染采用单一的修复技术无法同时有效去除重金属和多环芳烃污染物,因此考虑将多种修复技术联合应用,充分利用相关技术的优异性<sup>[3]</sup>,才能全面提高污染修复能力。

浙江某重金属制品厂主要从事不锈钢制品生产、金属工具加工等,由于前期环保意识不强,环保配套设施老旧<sup>[4]</sup>,在生产过程中产生的槽渣、废液因跑冒滴漏进入到土壤,导致该地块存在重金属及多环芳烃复合污染。本文将重点介绍采用陶粒窑协同处置+异位化学氧化联合技术对该污染地块实施的修复工程,主要内容包括修复技术工艺、施工过程及修复效果评价,为今后同类型修复项目提供治理经验和 technical 支持。

## 1 修复工程概况

根据前期详细调查及风险评估结果,该地块内土壤超风险污染因子包括镍、锌、苯并(a)芘、苯并(a)蒽和苯并(b)荧蒽。本项目修复面积约27 120 m<sup>2</sup>,修复土方量约76 500 m<sup>3</sup>,其中,单一重金属污染土方量为33 450 m<sup>3</sup>;单一有机污染土方量为27 528 m<sup>3</sup>;重金属和有机复合污染土方量为15 522 m<sup>3</sup>,全场地最大修复深度为6 m。

根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3—2019),通过健康风险评估计算关注污染物的风险控制值,并结合我国现已颁布的相关环境质量标准,将风险计算得出的土壤风险控制值与筛选值进行比较,综合考虑区域内的背景值及现场实际情况来选取合适的值作为后续修复目标的参考值。需要说明的是,由于本地块未来规划为居住用地,因此筛选值可参照《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)的第一类用地。本项目土壤修复目标值如表1所示。

收稿日期:2023-03-09;修回日期:2023-04-26

作者简介:俞明(1991-),男,硕士,工程师,研究方向为环境监理、场地调查、污染修复等,通讯联系人,302015815@qq.com。

表1 本项目土壤修复目标值 mg/kg

污染物	推荐风险控制值	筛选值	修复目标值
镍	284	150	284
锌	15017	3500	15017
苯并(a)芘	0.55	0.55	0.55
苯并(a)蒽	5.5	5.5	5.5
苯并(b)荧蒽	5.5	5.5	5.5

## 2 修复工艺介绍

本项目针对单一重金属污染土壤采用的修复技术为陶粒窑协同处置技术,单一有机污染土壤采用的修复技术为异位化学氧化技术,重金属及有机复合污染土壤先经氧化修复后再外运至陶粒窑协同处置。采用2种结合的修复技术,能够使污染土壤得到有效的处置与消纳,合理、有效地将工期和总投资控制在可接受范围内。

### 2.1 异位化学氧化修复

异位化学氧化修复技术是指将氧化剂添入污染土中,通过充分化学反应使污染物转化为低毒、无毒、无害的物质。该技术适用于多种有机污染物,包

括石油烃、酚类、多环芳烃类、多氯联苯、有机农药等<sup>[5]</sup>,但不宜用于单一重金属污染物。化学氧化修复常用的氧化剂主要为高锰酸盐、过硫酸钠、芬顿试剂及臭氧4种。

为选择最适宜的氧化剂及添加比例,以达到最佳的污染土修复效果,本项目在修复前通过试验分别加入碱活化后的过硫酸钠和芬顿试剂处理污染土,氧化药剂添加梯度按照土壤重量的1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%和10%的比例设计,共设计10个处理组,同时每个组设置2个空白样品。按照不同比例配置的药剂和土壤充分混匀,土壤的含水率调整至50%,经反应完全的土壤在养护7d后进行污染物含量检测。根据试验检测结果,添加比为2%的过硫酸钠药剂可使本项目有机污染土的修复效果最好,在现场施工过程中还需根据实际情况对施工参数进行调整和优化,以保证修复达标。

异位化学氧化修复有机、复合污染土壤的修复工艺包括有机、复合污染土的开挖及转运、污染土筛分及破碎预处理、氧化反应、检测及资源化利用。修复工艺流程如图1所示。

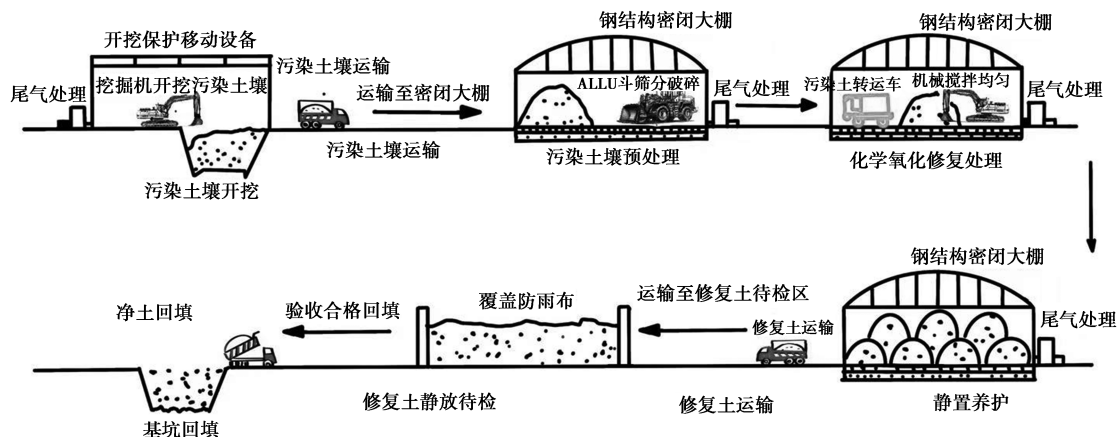


图1 化学氧化修复工艺流程

### 2.2 陶粒窑协同处置

陶粒窑协同处置是将污染土作为一部分原料添加到黏土中进行回转窑煅烧,在高温条件下使污染物固定在陶粒中或气化后通过尾气处理装置消除。该技术适用于重金属、半挥发性和难挥发性有机物污染土的处置,但不适合有机氯和无机氯的固体废物,以免对陶粒产品质量和烟气排放产生不利影响。陶粒窑处置过程中污染土的投加比例是影响陶粒产品质量及安全性能的关键因素<sup>[6]</sup>,本项目根据污染物平均浓度和陶粒窑系统污染物最大允许投加量,综合计算确定陶粒窑协同处置过程中的污染土壤投

加比例在20%~40%。在入窑前还需对污染土进行重金属有害组分的检测,控制限值及检测周期见表2。

表2 干基固体废物有害组分控制限值及检测周期表

控制项目	总控制限值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	检测周期
汞(Hg)	<15	每批次进厂检测 1次,若来源稳定每月 测1次
铅(Pb)	<1200	
镉(Cd)	<45	
锌(Zn)	<10000	
铬(Cr)	<1500	

陶粒窑协同处置污染土的修复工艺包括污染土的预处理、陈化、造粒、煅烧、检测、成品等。陶粒窑协同处置工艺流程见图 2。

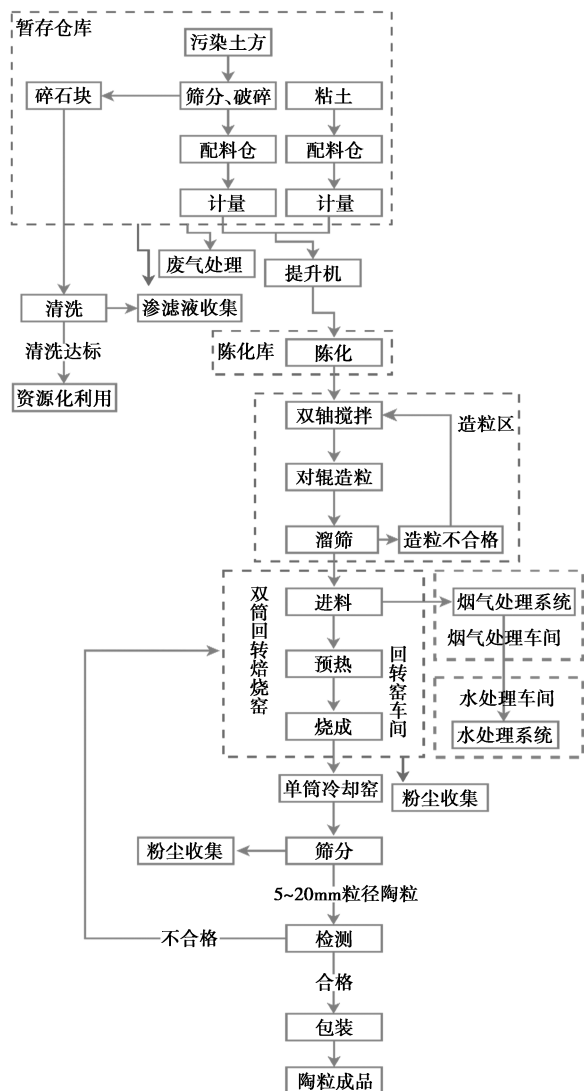


图 2 陶粒窑协同处置工艺流程

具体工艺环节如下。

(1) 污染土转运至陶粒窑厂的密闭设施内筛分预处理,并配备有防渗措施及尾气净化设备,确保贮存期间产生的废气和渗滤液经处理达标后排放。

(2) 污染土与黏土按照一定比例混合均匀后经皮带机提升到陈化库顶部皮带,物料在陈化库高处落入陈化区堆放。

(3) 陈化后物料经取料后运送至箱式给料机,再经双轴搅拌机搅拌均匀,溜筛去除不合格生陶粒。

(4) 采用双筒回转窑设备进行陶粒烧结,首先在烘干段慢慢加热,最后到煅烧段内培烧成陶粒,烧成后陶粒进入单筒冷却机冷却,后从出料端卸出。

(5) 检测陶粒的产品性能及重金属浸出毒性,确保陶粒成品符合验收标准,用作建筑轻骨料或其他功能性材料的资源化利用<sup>[7]</sup>。

### 3 修复工程实施

根据修复技术方案确定的修复范围、工程量及修复技术工艺,结合施工组织设计及施工进度要求,在现场施工条件基础上实施修复工程,施工的重点内容包括污染土壤清挖、深基坑支护、暂存及预处理、化学氧化修复、污染土外运处置及基坑回填。

#### 3.1 污染土清挖

为保证污染土清挖工作的顺利开展,首先清除场地内的建筑垃圾及其他障碍物,完成场地控制点和高程点的交桩工作<sup>[8]</sup>。在污染土清挖前由测量人员对开挖区域进行测量放线和标识,测量成果经监理单位认可后进行开挖工作<sup>[9]</sup>。开挖顺序按照“分层开挖,分区开挖”的原则,将整个污染区域分成若干个区块,每个区块按照由浅至深的顺序向场地出口倒退开挖。

为防止处于地下水下游的基坑开挖后会受到上游污染物的二次污染,按照设计并利用专业挖掘机械进行由北至南(地下水方向)的开挖,并进行必要的基坑护坡处理。0~1 m 开挖土层不放坡,1~2 m 开挖土层放坡系数为 1:0.5,2~3 m 开挖放坡系数为 1:0.7。

#### 3.2 深基坑支护

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)的规定,开挖深度超过 4 m(含 4 m)的基坑应采取深基坑支护措施。本项目最大开挖深度为 6 m,在保证施工安全的前提下,采用拉森钢板桩作为基坑支护措施。深基坑支护施工工序为:打拉森钢板桩→污染土基坑开挖→围檩及支撑施工→净土回填→拆除围檩支撑→拉森钢板桩拔除。

为保证板桩打入的精度和垂直度,易于咬口闭合<sup>[10]</sup>,本项目采用屏风式打入法进行钢板桩施工,在插打过程中进行实时测量,确保每块板状的倾斜角在 2% 以内。钢板桩采用拉森 IV 型 400 \* 170,桩长为 15 m,围檩采用 400 \* 400 \* 21 \* 13H 型钢,支撑采用型号 609 \* 16 的钢管,深基坑支护剖面如图 3。

#### 3.3 暂存及预处理

开挖后的污染土短驳至密闭大棚内进行分类暂存及预处理,在筛分、破碎过程中为保证粉尘及废气



## 5 结论

(1) 本项目采用陶粒窑协同处置+异位化学氧化修复联合技术共修复方量为 76 500 m<sup>3</sup>, 修复深度为 6 m。该技术通过异位化学氧化有效去除有机及复合污染土中的有机污染物, 再使用陶粒窑协同处置修复重金属污染物, 降低了修复成本, 缩短了修复工期, 大大提高后续的污染物去除效率, 同时在处置复合污染土时避免产生有毒有害的有机废气造成对周边环境的影响。

(2) 为保证达到修复目标, 同时降低药剂添加过量带来二次污染, 本项目最终确定过硫酸钠的药剂添加比例为 2%。陶粒窑协同处置污染土壤投加比例在 20%~40%, 更有利于陶粒产品质量及性能的稳定, 实现高效的污染土处置能力。

(3) 采用逐一对比法对基坑及异位修复土进行效果评估, 所有点位目标污染物含量均低于修复目标值, 修复效果评估合格。整个修复过程的环保措施均得到了有效落实, 未发生环境污染事故及居民投诉事件。

## 参考文献

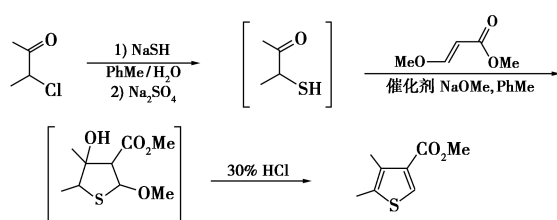
[1] 杨强. 有机物-重金属复合污染土壤植物修复技术研究[D]. 杭

州: 浙江大学, 2004.

- [2] Song Y F, Wilke B M, Song X Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and heavy metals (HMs) as well as their genotoxicity in soil after long-term wastewater irrigation [J]. *Chemosphere*, 2006, 65 (10): 1859-1868.
- [3] 赵述华. 土壤环境中重金属与有机物复合污染修复对策研究[J]. *广东化工*, 2019, 46(4): 119-121.
- [4] 陈博, 王凌燕. 某有色金属冶炼厂场地土壤铅、砷污染修复技术及修复效果评估[J]. *绿色科技*, 2021, 23(20): 153-154.
- [5] 林雅洁, 胡靖琳. 有机污染场地化学氧化处置方法综述[J]. *环境工程*, 2016, 34(S1): 1003-1007.
- [6] 刘贤力, 侯昭胤. 重金属污染土壤回转窑协同处置和资源化利用[J]. *化工进展*, 2020, 39(S1): 279-285.
- [7] 马明亮, 孙晓南, 权宗刚, 等. 我国工业固废制备陶粒资源化利用的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(8): 2492-2500.
- [8] 周虹, 欧阳晶, 袁芳沁, 等. 湖南某锰渣工业污染场地综合治理工程实例[J]. *广东化工*, 2020, 47(14): 131-136.
- [9] 袁芳沁. 西南某铝厂污染场地异位修复工程案例[J]. *湖南有色金属*, 2021, 37(1): 58-62.
- [10] 全旭. 拉森钢板桩基坑支护的应用探讨[J]. *四川建材*, 2012, 38(3): 43-44.
- [11] 赖冬麟, 张奇, 陈亭亭, 等. 张家口市某机械厂原址电镀污染场地土壤修复工程实践[J]. *环境工程*, 2022, 38(6): 75-80.
- [12] 孟祥瑞, 许超, 杨远强, 等. 云南某铬渣污染场地土壤修复工程实例[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(12): 6547-6553. ■

(上接第 227 页)

案例 9 采用“一锅煮”工艺制备噻吩化合物时, 三步反应采用共同的溶剂甲苯。第一步的巯基化反应在甲苯/水两相中反应, 反应完成后, 分相得到的甲苯萃取液必须用干燥剂(无水硫酸钠、无水硫酸镁、分子筛、氯化钙等)进行吸附干燥, 以便除去甲苯相中溶解的和漂浮的少量水分, 然后才能投入下步反应原料进行环合加成反应。因为环合加成反应对水和质子型杂质非常敏感, 质子的存在会大量形成中间体, 大幅度降低环合反应的收率。仅仅凭借仔细分相来避免甲苯相中混入水分, 在工业放大时几乎是不可能的, 只能通过吸附干燥这种非常保险的方式除去甲苯相中存在的水分才行<sup>[6]</sup>。



## 参考文献

- [1] Richard H, Yu Lisa, Schultze M, *et al.* Process optimization in the synthesis of 9-[2-(diethylphosphonomethoxy) ethyl] adenine: Replacement of sodium hydride with sodium tert-butoxide as the base for oxygen alkylation[J]. *Organic Process Research & Development*, 1999, 3(1): 53-55.
- [2] Timothy J N Watson, Stephen W Horgan, Ramnik S Shah, *et al.* Chemical development of mdl 103371: An N-methyl-d-aspartate-type glycine receptor antagonist for the treatment of stroke[J]. *Organic Process Research & Development*, 2000, 4(6): 477-487.
- [3] 李爱军. 有机合成工艺研发: 副反应抑制法[M]. 北京: 中国石化出版社, 2019, 420-421.
- [4] James E, Ellis Edward M, Davis Gary J, *et al.* Development of a scalable process for CI-1020, A novel endothelin antagonist1[J]. *Organic Process Research & Development*, 2001, 5: 266-233.
- [5] Mitchell D, Cole K P, Pollock P M, *et al.* Development and a practical synthesis of the JAK2 inhibitor LY2784544[J]. *Organic Process Research & Development*, 2016, 16(1): 70-81.
- [6] Phillips, Fevig T L, Lau P H, *et al.* Process research on the synthesis of siltthiofam: A novel fungicide for wheat[J]. *Organic Process Research & Development*, 2002, 6(4): 357-366. ■