

ICS 13.020.40

CCS Z 05

团 体 标 准

T/ACEF 000—2000

多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术 指南

Technical guidelines for enhanced ex-situ bioremediation of polycyclic aromatic
hydrocarbons-contaminated soils

(征求意见稿)

2000-00-00发布

2000-00-00实施

中 华 环 保 联 合 会 发 布

目 次

前 言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 通用原则	2
5 技术方案	2
5.1 工艺类型	2
5.2 工艺特点	2
5.3 化学预氧化协同生物堆工艺	3
5.4 化学预氧化协同泥浆生物反应工艺	4
5.5 过程控制	6
6 污染防治	6
7 修复效果评估	7
附录 A（资料性）化学预氧化协同泥浆生物反应工艺修复多环芳烃污染土壤案例	8

前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《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。

本文件由中华环保联合会提出并归口。

本文件起草单位：北京化工大学、天津壹鸣环境污染防治有限公司、武汉大学、天津大学、北京建工环境修复股份有限公司。

本文件主要起草人：徐仲均、纪涛、郭涛、毛旭辉、何理、林爱军、杨乐巍、肖勇、程熠晴、刘渊文、赵立坤、张健、丁浩然、张岳、段序、孙同、李晨洋。

多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术指南

1 范围

本文件提出了多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术通用原则、技术方案、污染防治、修复效果评估等技术指导。

本文件适用于多环芳烃污染土壤异位修复的工艺设计、工程运行管理和环境影响评价，其他有机污染土壤异位生物强化修复也可参照使用。

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）适用于本文件。

GB 8978	污水综合排放标准
GB 12348	工业企业厂界环境噪声排放标准
GB 16297	大气污染物综合排放标准
HJ 25.4	建设用地土壤修复技术导则
HJ 478	水质 多环芳烃的测定 液液萃取和固相萃取高效液相色谱法
HJ 682	建设用地土壤污染风险管控和修复术语
HJ 784	土壤和沉积物 多环芳烃的测定 高效液相色谱法
HJ 805	土壤和沉积物 多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法
HJ 1283	污染土壤修复工程技术规范 生物堆

3 术语和定义

HJ 682 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

土壤异位生物强化修复 enhanced ex-situ bioremediation of soil

将受污染的土壤转移到修复场所，通过筛分预处理对土壤进行减量化，化学预氧化降低污染负荷，进一步采用生物堆或泥浆生物反应器，并辅以通风、营养物质、表面活性剂等强化手段，缩短修复周期的复合型土壤修复技术。

3.2

生物堆 biopiling

将污染土壤挖出并堆积于装有渗滤液收集系统的防渗区域，提供适量的水分和养分，并采用强制通风系统注入空气（补充氧气），利用土壤中好氧微生物的呼吸作用将有机污染物转化为 CO₂ 和水，从而达到去除污染物的目的。

[来源：HJ 682—2019，2.5.43]

3.3

泥浆生物反应器 slurry bioreactor

污染土壤置于反应器中，与适量水、养分及药剂混合制成泥浆，并接种必要的好氧微生物，通过搅拌、通风及释氧剂等强化手段，加速土壤中有机污染物降解的土壤修复技术。

4 通用原则

4.1 土壤中的多环芳烃负荷以不抑制场地多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术中所使用微生物的生长为宜；综合考虑场地污染土壤特征、土壤中污染物的组成及各种污染物的浓度、修复目标、修复周期、周边环境敏感点及能源供给条件等，遵循 HJ 25.4，选择合理的土壤修复工艺及技术参数。

4.2 治理技术工艺设计成熟可靠、技术先进、兼顾经济性和安全性；工艺设计遵循绿色修复的理念，避免能源和资源浪费。

4.3 化学预氧化协同生物堆工艺适用于土壤有机质能满足微生物生长所需碳源的土壤，土壤 pH 在 7 左右为宜；化学预氧化协同泥浆生物反应工艺适用于非土壤组分含量较高的沙土、杂填土等，泥浆酸碱性易于调控，对土壤 pH 无要求。

5 技术方案

5.1 工艺类型

多环芳烃污染土壤异位生物强化修复技术工艺主要包括化学预氧化协同生物堆和化学预氧化协同泥浆生物反应两种工艺。

5.2 工艺特点

5.2.1 化学预氧化协同生物堆工艺

生物堆中的土壤没有流动性，其中的污染物依靠微生物生长渗透降解，故修复周期较长。

即使接种外源微生物，添加营养物质并强化通风，微生物对污染物的降解仍受到传质限制，反应时间较长。通过前置的化学预氧化强化，可以破坏土壤结构及氧化降解部分有机物，包括对微生物有毒害作用的有机污染物，降低土壤的生物毒性；进一步接种外源高效降解菌，通过通风、营养物质及其他药剂强化，可有效缩短土壤修复周期。

5.2.2 化学预氧化协同泥浆生物反应工艺

将土壤与足量水混合制成流化态泥浆，可显著增强污染物传质效果。通过筛分去除不含有机污染物的砾石和粗颗粒，减少后续处理量，同时有利于造浆过程。由于泥浆处于流化状态，可以通过投加表面活性剂，将有机污染物萃取到水相，进一步提升化学氧化降解和微生物捕获降解效果。前置的化学预氧化强化，可以解离与土壤胶粒及土壤有机质结合的污染物，特别是高环多环芳烃与土壤结合牢固，化学预氧化可以将其解离并部分降解，在表面活性剂作用下进入水相，有利于被后续接种的微生物捕获，提高降解效率，缩短土壤修复周期。

5.3 化学预氧化协同生物堆工艺

5.3.1 化学预氧化协同生物堆工艺流程

污染土壤首先进行化学预氧化，然后加入水、外源碳氮磷、表面活性剂、pH 调节剂（可选），并接种微生物，搅拌混合后制成生物堆，通风强化生物堆的好氧化，降解土壤中的多环芳烃。该工艺流程如图 1 所示。

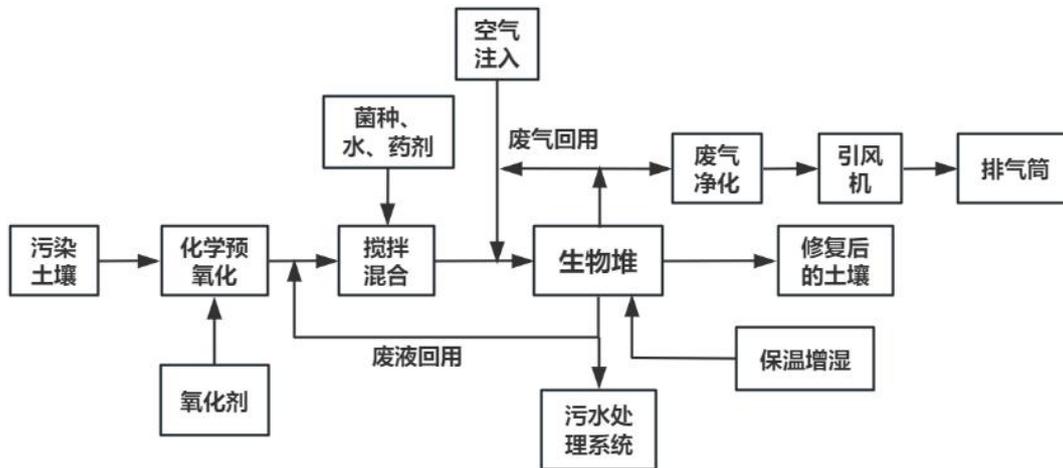


图 1 化学预氧化协同生物堆工艺流程

5.3.2 工艺参数

化学预氧化协同生物堆工艺参数包括但不限于：

- a) 化学预氧化可选用过氧化氢、过硫酸钠、高锰酸钾、臭氧及其他氧化剂，可加入适

量催化剂提高氧化效果，氧化剂用量见表 1。

b) 化学预氧化后的土壤 pH 值调节到表 1 推荐范围内；主要营养物质碳、氮、磷的投加比例见表 1；表面活性剂可选用吐温 80 或其他功能相当的表面活性剂，用量参照表 1；接种多环芳烃高效降解菌。

c) 加氧方式可采用压缩空气或鼓风机鼓入空气给氧，土壤空气中的氧气含量范围见表 1。

d) 采用雾化装置补水，采用通风或翻堆控制堆体温度，土壤湿度和温度参数见表 1。

表 1 化学预氧化协同生物堆工艺参数

项目		参数
氧化剂用量	过氧化氢 (wt%)	0.5–3.0
	过硫酸钠 (wt%)	1.0–6.0
	高锰酸钾 (wt%)	1.0–8.0
	臭氧	浓度 (mg/m ³)
流速 (m/s)		0.2–1.0
表面活性剂用量 (wt%)		0.1–1.0
营养物质碳、氮、磷比例		100:10:1–100:10:0.5
土壤 pH 值		6.0–8.5
土壤含水率 (wt%)		10–20
氧气含量 (v/v%)		≥ 10
土壤温度 (°C)		20–40

5.3.3 工艺参数监测指标

工艺参数监测指标包括但不限于：

a) 构建生物堆前需检测土壤 pH，必要时需使用调节剂控制土壤 pH。

b) 生物堆堆体温度、湿度及氧气含量监测，按 HJ 1283 规定设置在线监测仪；通过实时监测，确保堆体湿度、温度及氧气含量适宜微生物生长。

c) 工艺废气和废液流量分别采用气体和液体流量计实时监测；废气 VOCs 浓度、恶臭浓度采用在线监测，确保废气达标排放；废液 COD 采用在线监测，废液中的多环芳烃浓度按 HJ 478 规定检测，废液经处理至 COD 和多环芳烃达标后排放。

5.4 化学预氧化协同泥浆生物反应工艺

5.4.1 化学预氧化协同泥浆生物反应工艺流程

污染土壤经加水、解泥、筛分，去掉土壤泥浆中的砾石和粗颗粒，加入表面活性剂，搅拌分散后形成土壤泥浆；再加入氧化剂进行化学预氧化，降解土壤中的部分多环芳烃；预氧

化后的土壤泥浆进入泥浆生物反应器，根据需要进行 pH 调节和补充外源碳氮磷，并接种微生物，在补风保温条件下进行好氧化，降解土壤中的多环芳烃。泥浆生物反应完成后，对土壤泥浆进行脱水，得到修复后的土壤。该工艺流程如图 2 所示。

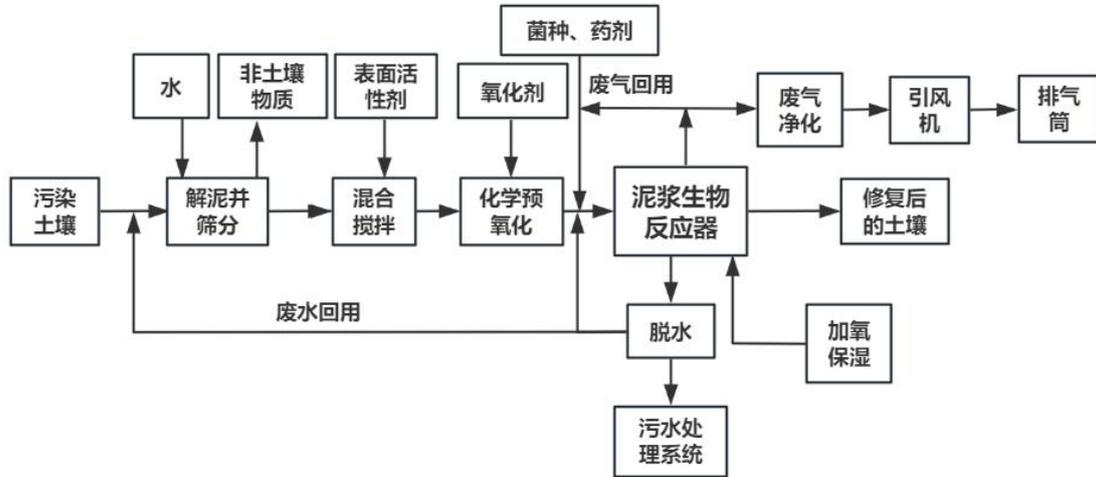


图 2 化学预氧化协同泥浆生物反应工艺流程

5.4.2 工艺参数

表 2 化学预氧化协同泥浆生物反应工艺参数

项目		参数
氧化剂用量（相对泥浆固体）	过氧化氢（wt%）	0.5–3.0
	过硫酸钠（wt%）	1.0–6.0
	高锰酸钾（wt%）	1.0–8.0
	臭氧	浓度（mg/m ³ ）
流速（m/s）		0.2–1.0
表面活性剂用量（wt%）		≤ 1
营养物质碳、氮、磷比例		100:10:1–100:10:0.5
降解菌活菌数（cuf/mL）		≥ 10 ⁹
泥浆颗粒粒径（mm）		≤ 3
泥浆含固率（wt%）		10–25
泥浆 pH 值		6–8
泥浆 ORP（mV）		≥ 100
泥浆溶解氧（mg/L）		≥ 2
泥浆温度（℃）		20–30

化学预氧化协同泥浆生物反应工艺参数包括但不限于：

- 污染土壤经加水、解泥并筛分，筛下泥浆颗粒粒径及适宜的泥浆含固率如表 2 所示。
- 化学预氧化可选用过氧化氢、过硫酸钠、高锰酸钾、臭氧及其他氧化剂，可加入适量催化剂提高氧化效果，氧化剂用量见表 2。

c) 化学预氧化后的泥浆 pH 值调节到表 2 推荐范围内；主要营养物质碳、氮、磷的投加比例见表 2；表面活性剂可选用吐温 80 或其他功能相当的表面活性剂，用量参照表 2；接种多环芳烃高效降解菌，泥浆生物反应周期内活菌数量见表 2。

d) 泥浆 ORP 值按表 2 控制在一定范围内。

e) 泥浆生物反应加氧方式可采用曝气或者释氧剂，泥浆中的溶解氧含量建议控制在表 2 所示范围内。

f) 采用保温或增温装置将泥浆温度控制表 2 所示范围内。

g) 修复结束后，泥浆生物反应器中的多余水分可借助土壤重力自然固液分离或采用压滤机压滤去除。

5.4.3 工艺参数监测指标

工艺参数监测指标包括但不限于：

a) 接种微生物前需检测泥浆 pH，必要时需使用调节剂控制 pH。

b) 可采用 OD600 及三磷酸腺苷（ATP）等手段，对泥浆活菌数进行监测。

c) 泥浆生物反应器宜安装在线温度传感器，通过实时监测，精准控制泥浆温度。

d) 工艺废气和废水流量分别采用气体和液体流量计实时监测；废气 VOCs 浓度、恶臭浓度采用在线监测，确保废气达标排放；废水 COD 采用在线监测，废水中的多环芳烃浓度按 HJ 478 规定检测，废水经处理至 COD 和多环芳烃达标后排放。

5.5 过程控制

5.5.1 修复工艺尽可能采用自动监控系统，对温度、湿度、通风系统、废气及废液（水）回用状态等实现有效监测和控制。

5.5.2 修复工艺可根据需要，在水储罐、营养液储罐和废液（水）池内设置液位自动控制器，可自动及手动控制泵的启停。

5.5.3 温控系统宜与在线温度监测耦合，以实现温控系统的自动化运行。

5.5.4 工艺控制系统可采用中控室集中控制系统或分站就地控制系统。

5.5.5 自动控制系统应设配电柜和控制柜，控制柜具备自动和手动互切换双回路控制系统，并具有自动保护和声光报警功能。

6 污染防治

6.1 工艺过程产生的废液（水），可作为工艺补水循环利用；排入污水处理系统的废液（水）

需要进行必要处理，排放符合 GB 8978 要求，有地方标准的，还应满足地方标准的相关要求。

6.2 工艺过程产生的废气收集后可考虑循环利用；废气净化可选择生物处理、吸附及高温焚烧等方式，结合实际情况选择合理工艺；废气排放符合 GB 16297 要求。

6.3 工艺过程产生的砾石及其他固体废物应进行清洗，清洗后可按建筑垃圾处理处置，清洗过程产生的废水收集后，用于工艺补水或进入污水处理系统处理后达标排放。

6.4 工艺设备的安装、运行采取有效的隔声、消声等降低噪声的措施，噪声控制符合 GB 12348 要求。

7 修复效果评估

7.1 工艺运行前，测定土壤中多环芳烃含量。

7.2 化学预氧化结束后，测定土壤中多环芳烃含量，评估化学预氧化降解多环芳烃效率。

7.3 自生物单元运行 1 周起，每 2-7 天测定 1 次土壤或泥浆中多环芳烃含量，评估生物单元降解多环芳烃效率，直到土壤或泥浆中多环芳烃含量小于目标修复值，工艺运行结束。

7.4 修复过程中多环芳烃含量检测方法：随机采集不少于 3 个土样，按 HJ 784 或 HJ 805 规定的方法测定其中多环芳烃含量。

附录 A

(资料性)

化学预氧化协同泥浆生物反应修复多环芳烃污染土壤案例

A.1 案例背景

多环芳烃污染土壤位于天津市静海区某场地，面积约 44 万平方米。该场地土壤中主要有有机污染物为苯并(a)蒽、苯并(a) 芘、苯并(b)荧蒹、萘、可萃取性石油烃 C10-C40、挥发性有机物 1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯、1,2-二氯丙烷、1,1,2-三氯乙烷、氯乙烯及苯，其中苯并(b)荧蒹、苯并(a)芘超标，最大超标深度 6 m。

A.2 修复过程

设备单次处理污染土壤量 ≤ 500 kg。将 410 kg 含有多环芳烃土壤置于进料斗上，开启进料，系统设备开始运行。通过滚筒解泥机筛除砾石等较大颗粒，进一步通过湿法振动筛（2.5mm 孔径筛网）进行粗颗粒筛分，筛下土壤进入淋洗反应器，此过程的用水约为 1630 L，形成的泥浆水土比约 8:1。淋洗反应器中再添加吐温 80 形成 1 wt%浓度淋洗液，淋洗运行周期 2 h；淋洗后的泥浆进入预氧化反应器中，再通过加药装置加入 20 L 30%的 H_2O_2 溶液和 10 kg 硫酸亚铁溶液，进行化学预氧化反应，反应周期 2 h；氧化反应后，泵送泥浆进入混合罐中，加入 20 L 微生物菌液，混合搅拌 2 h；再泵送到生物泥浆反应器中，进行微生物降解反应，反应周期 30 d。反应结束，泥浆通过泵送到板框压滤机中进行压滤处理，压滤后的土饼经检测达标后回填。泥浆生物反应过程中的其他参数控制遵照指南 5.5 执行。

A.3 修复效果

检测结果表明，土壤原样中的总多环芳烃含量为 32 mg/kg 干土，其中苯并(b)荧蒹、苯并(a)芘的含量分别为 14.5、5.5 mg/kg 干土。化学预氧化单元苯并(b)荧蒹、苯并(a)芘去除率分别为 58.4%、45.0%，总多环芳烃去除率为 43.0%；全工艺流程苯并(b)荧蒹、苯并(a)芘去除率分别为 96.4%、96.6%，总多环芳烃去除率为 97.0%。