

多环芳烃污染土壤泥浆生物反应器智能  
装备集成技术指南  
(征求意见稿)

编制说明

编制组

二〇二三年十二月

# 目 录

1	任务来源 .....	1
2	标准制定的必要性分析 .....	1
3	工作分工及过程 .....	2
3.1	工作分工 .....	2
3.2	主要工作过程 .....	3
4	国内外相关标准研究 .....	4
5	主要技术内容及说明 .....	5
5.1	适用范围 .....	5
5.2	规范性引用文件 .....	5
5.3	术语和定义 .....	6
5.4	通用原则 .....	6
5.5	装备集成 .....	6
5.6	智能控制 .....	7
5.7	设备运行及维护 .....	8
6	工程应用案例 .....	8
6.1	国外工程应用案例 .....	8
6.2	国内工程应用案例 .....	12
7	本标准实施建议 .....	13

## 1 任务来源

2020年11月，北京建工环境修复股份有限公司作为“国家重点研发计划”场地土壤污染成因与治理技术研究项目《“基于‘大智物云’的焦化污染场地生物修复一体化智能装备研究”（2020YFC1807900）》项目牵头单位及课题五《生物修复一体化智能装备及制造工艺研发（2020YFC1807905）》承担单位，承担了生物修复一体化智能装备的研发任务。课题组分析国内典型焦化污染场地多环芳烃污染物分布特征、国内外生物修复智能化装备现状、生物修复技术应用现状，开展了生物修复关键单元/模块研发、一体化装备集成、示范应用等研究，编制《多环芳烃污染土壤泥浆生物反应器智能装备集成技术指南》。

2022年2月，北京建工环境修复股份有限公司向中华环保联合会提交了标准立项申请表，经两次专家评审，于2022年6月该项团体标准获得批准立项，项目信息在全国团体标准信息平台网站（<http://www.ttbz.org.cn>）予以公示。

北京建工环境修复股份有限公司为标准承担单位，天津大学、青岛理工大学、北京化工大学、中国环境科学研究院、合肥东部新中心建设管理办公室、合肥东部新中心建设投资有限公司为标准协作单位，联合参与《多环芳烃污染土壤泥浆生物反应器智能装备集成技术指南》标准编制工作。

## 2 标准制定的必要性分析

我国焦化工业产量巨大、布局广泛，对经济和社会发展产生了极为重要的影响但近年来，随着产业结构调整，一系列焦化工业搬迁引发的场地污染问题日益突出。针对我国焦化污染场地生物修复技术普遍存在效率不高、工艺周期长、适应性不强，且现有装备化和智能化水平低等问题，提出焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复智能装备研发的目标，为提升我国工业场地污染管控和修复技术水平、坚持绿色可持续发展、促进我国生态文明提供一体化的技术和装备支持。

根据工程实践，中~低浓度多环芳烃污染土壤修复应用泥浆生物反应器智能装备每吨污染土壤的修复成本不高于380元、电耗不高于50kW·h，从修复经济成本方面优于其他多种修复技术。

本标准的制定，有利于进一步推进我国多环芳烃污染土壤的修复技术工作，有利于解决我国焦化污染场地生物修复技术普遍存在效率不高、工艺周期长、适应性不强，且现有装备化和智能化水平低等问题，符合绿色可持续发展理念，可为治理场地污染、改善环境质量、促进生态文明提供重要的技术和方案支持。

### 3 工作分工及过程

#### 3.1 工作分工

本标准主编单位为北京建工环境修复股份有限公司，参编单位有天津大学、青岛理工大学、北京化工大学、中国环境科学研究院、合肥东部新中心建设管理办公室、合肥东部新中心建设投资有限公司。具体工作分工如表1所示。

表1 工作任务分工

编制内容	负责单位
前言	北京建工环境修复股份有限公司
适用范围	北京建工环境修复股份有限公司
规范性引用文件	北京建工环境修复股份有限公司
术语和定义	北京建工环境修复股份有限公司
通用原则	北京建工环境修复股份有限公司、北京化工大学、青岛理工大学、合肥东部新中心建设管理办公室、合肥东部新中心建设投资有限公司
设备构成	北京建工环境修复股份有限公司，天津大学、青岛理工大学、北京化工大学、中国环境科学研究院、合肥东部新中心建设管理办公室、合肥东部新中心建设投资有限公司
装备集成	北京建工环境修复股份有限公司，天津大学、青岛理工大学、北京化工大学、中国环境科学研究院、合肥东部新中心建设管理办公室、合肥东部新中心建设投资有限公司
智能控制	北京建工环境修复股份有限公司，天津大学、青岛理工大学、北京化工大学、中国环境科学研究院

编制内容	负责单位
设备运行及维护	北京建工环境修复股份有限公司，天津大学、北京化工大学、中国环境科学研究院
附录A、附录B	北京建工环境修复股份有限公司

### 3.2 主要工作过程

(1) 2020年12月科技部下达国家重点研发计划项目，其中考核指标任务内容包括编制《焦化污染场地一体化智能生物修复设备技术规范》指南。

(2) 2021年1-5月，成立编制组，开展文献资料调研工作。进一步确定指南大纲，明确了指南的适用范围。

(3) 2021年6-12月，编制组编制了《焦化污染场地一体化智能生物修复设备技术规范》初稿及《焦化污染场地一体化智能生物修复设备技术规范》立项申请表。

(4) 2022年2月，中华环保联合会组织专家对《焦化污染场地一体化智能生物修复设备技术规范》立项可行性进行了论证，并提出修改意见。

(5) 2022年3-5月，编制组根据专家意见，对初稿进行修改，继续完善指南内容，并将指南名字修改为《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复智能装备集成应用指南》。

(6) 2022年6月，中华环保联合会组织本文件立项评审会，经专家质询和论证，专家组一致同意本文件立项，会后编制组就与会专家提出的问题和建议继续开展调研论证及文本修改工作。

(7) 2022年7月-2023年8月，编制组依托“基于‘大智物云’的焦化污染场地生物修复一体化智能装备研究”项目组的研发成果，进一步完善指南内容并形成《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复智能装备集成应用指南》征求意见稿，同时完成《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复智能装备集成应用指南》编制说明。

(8) 2023年8月，编制组向中华环保联合会提交《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复智能装备集成应用指南》草案稿和《焦化污染土壤多环芳烃生物强化修复智能装备集成应用指南》编制说明，中华环保联合会组织专家并召开技术指南预评审会。会上专家听取了标准编制单位针对指南相关内容的汇报并提出修改意见，经专家组一致同意，将指南名字改为《多环芳烃污

染土壤泥浆生物反应器智能装备集成应用指南》。

(9) 2023年8月-12月, 编制组根据专家意见, 对标准名称进行了修改, 进一步完善修改了指南内容并形成《多环芳烃污染土壤泥浆生物反应器智能装备集成应用指南》草案稿, 同时完成《多环芳烃污染土壤泥浆生物反应器智能装备集成技术指南》编制说明, 并向中华环保联合会提交指南草案稿和编制说明, 召开技术指南评审会。

## 4 国内外相关标准研究

国外对微生物修复技术的研究已有许多年, 公开文献中最早进行有关“生物修复技术处理多环芳烃污染土壤”的研究或论述是在1994年由美国俄亥俄州阿克伦大学Teresa J. Cutright和Sunggyu Lee在Energy Sources公开的2篇文献“Remediation of PAH-Contaminated Soil Using *Achromobacter* sp.”和“Bioremediation: A Competitive Alternative for the Cleanup of Contaminated MGP Sites”, 初步论述了生物修复技术在多环芳烃污染土壤应用的可行性。泥浆生物反应器法是一种常见的生物修复技术之一, 具有处理周期短、易于人工调控的优点, 但对污染物降解的速率受微生物生长繁殖及生存条件的等诸多因素影响, 在欧美发达国家被使用, 但在中国且对于多环芳烃污染土壤工程化应用的生物修复技术装备研究几乎是空白。Grosser等人发现, 将微生物培养后, 再接种到污染土壤中可大大提高芘的降解率, Javed Iqbal 等人在“Temperature effects on bioremediation of PAHs and PCP contaminated south Louisiana soils: A laboratory mesocosm study”一文中研究发现经49天生物处理, 高温42℃+接种菌, 去除率为84%; 低温21℃+接种菌, 去除率为66%; 高温42℃+土著菌, 去除率为65%; 低温21℃+土著菌, 去除率为54%。

而在中国, 最早的公开文献是在1999年由中国农业大学和北京市环境保护监测中心的张文娟、韩清鹏、孟明宝等在“应用与环境生物学报”发表的“堆制处理过程中的多环芳烃降解”, 用实验室模拟方法研究了高分子多环芳烃采用生物修复的堆制法的降解过程, 研究了多环芳烃(高环/低环)的污染程度对其去除率的影响, C/N比、温度对多环芳烃生物降解的影响。中国科学院沈阳应用生态研究所的李培军等在“生物反应器法处理PAHs污染土

壤的研究”一文中研究发现利用泥浆生物反应器法，在10、20、30℃条件下，运行13d后，土壤中菲和芘去除率分别为93.96%、96.6%、97.04%和37.3%、60.99%、64.57%。中国科学院南京土壤研究所骆永明等在“利用改进的生物反应器研究不同通气条件下土壤中菲的降解”一文中研究发现，生物反应器法条件下，实验室土著菌对污染物去除率最高为72.6%，最优通气量为8L/h。

通过国内外文献调研发现，针对多环芳烃污染土壤的微生物修复，实验室研究大部分采用小型泥浆生物反应器装置或采用堆肥法/预制床法。国外采用泥浆生物器装备治理多环芳烃污染场地的工程应用案例较少，大多为小试或中试规模。国内目前尚无采用泥浆生物反应器修复技术治理的工程应用案例，仅见生态环境部发布的《污染土壤修复工程技术规范 生物堆》（HJ1283-2023），其主要针对石油烃污染治理有效，装备化和集成化程度较低。尚未见团标、行标及国标对我国焦化污染土壤生物修复智能装备发布过规范性或指导性标准。

综上，国内外均未发现焦化场地多环芳烃污染土壤泥浆生物反应器修复技术的相关标准。因此，通过本团体标准的制定、实施和完善有望进一步形成行业标准。为泥浆生物反应器智能装备集成和智能控制提供技术支持。

## **5 主要技术内容及说明**

### **5.1 适用范围**

本文件提出了多环芳烃污染土壤泥浆生物反应器智能装备集成技术的通用原则、装备集成、智能控制、运行及维护等技术指导内容。

本文件适用于多环芳烃污染土壤泥浆生物反应器修复工程的装备设计、集成、智能控制、运行和维护等，同时可为异位微生物修复工程实施全过程的智能化管理提供指导。其他有机污染土壤泥浆生物反应器装备的集成技术相关工作也可参照本文件执行。

### **5.2 规范性引用文件**

本节列出了规范条文中出现的标准。引用了与本标准密切相关的法规、规范、标准和文件。同时，有关建设工程涉及配套专业和工程施工、安装、调试、验收规范均成为本标准的引用文件。

## 5.3 术语和定义

本节列出了本标准《多环芳烃污染土壤泥浆生物反应器智能装备集成技术指南》涉及到的有关术语及定义，便于标准条文的理解。

## 5.4 通用原则

规定了泥浆生物反应器智能装备集成技术的针对性、达标性、高效性原则。多环芳烃的组分（如高环、低环）和污染程度、土壤的土质条件和理化性质、环境气温等影响土壤微生物修复效果，装备集成过程应充分考虑以上因素的影响作用。应对泥浆生物反应器装备运行过程中产生的废气、废水进行必要的治理，达到国家、地方和相关行业排放标准。泥浆生物反应器智能装备的处理能力由生物反应器的单体大小和数量决定，应根据异位微生物修复工程的规模、工期、成本等因素合理选择泥浆生物反应器单体规格和数量，以保证系统的高效运行。

## 5.5 装备集成

### 5.5.1 造浆单元集成

将解泥设备、筛分设备、混合设备等模块集成，实现污染土壤粒径分级、减量化和均质化。该单元集成需考虑后续氧化单元反应时间、废水处理单元、泥浆生物反应器单元的处理能力和反应周期等因素。设置重力传感器、流量计和压力变速器等，用于控制进料量和泥浆量。

### 5.5.2 氧化单元集成

将自动加药设备和氧化反应设备等模块集成，实现细颗粒污染土壤的预氧化处理。该单元集成需考虑前端造浆单元和后续废水处理、泥浆生物反应器的流量负荷。设置温度、酸碱度（pH）、氧化还原电位（ORP）等工艺参数监测传感器，以及流量计、电动阀和液位计等，用于控制氧化反应关键工艺参数、反应时间和药剂量。

### 5.5.3 泥浆生物反应器单元集成

将泥浆生物反应器组及菌剂自动投加设备、泥浆调理设备、曝气增氧设备等辅助模块集成，实现微生物修复过程的自动投加药剂/菌剂/营养物质、智能曝气、保湿增温等功能。该单元集成化难度高：反应器组（若干单体组

成)主体单元与其辅助模块(化学/生物药剂自动投加模块、泥浆调理模块、传感器实时监测模块、智能曝气模块等)的集成,泥浆生物反应器单元与其他工艺单元(造浆单元、氧化单元、废水处理单元、脱水单元、废气净化单元)的集成,需进行物料平衡核算(多流体)和工艺参数联调测试。泥浆生物反应器组为微生物修复主体单元,其内部设置温度、溶解氧(DO)、pH、ORP等关键工艺参数监测传感器,用于实时监测微生物反应条件。

#### **5.5.4 脱水单元集成**

该单元由若干台/套板框压滤机或带式压滤机设备集成,设备数量根据微生物反应周期、修复工程规模和工期确定。

#### **5.5.5 废水处理单元集成**

该单元废水处理工艺根据具体修复工程土壤污染情况和废水进料条件确定。

#### **5.5.6 废气净化单元集成**

该单元废气处理工艺根据具体修复工程土壤污染情况和微生物降解情况确定。

### **5.6 智能控制**

#### **5.6.1 造浆单元控制**

该单元通过智能控制进料的水土比和表面活性剂投加量等参数,实现调整泥浆比重及含固量,均化泥浆,为提高生物有效性和传质效率创造有利条件。

#### **5.6.2 氧化单元控制**

该单元通过智能控制氧化药剂投加量、温度、pH和ORP等关键工艺参数控制,初步调节泥浆状态和降低污染负荷,有利于后续微生物反应。

#### **5.6.3 泥浆生物反应单元控制**

该单元为全套集成装备的核心控制单元。通过监测反应器组中单体的温度、pH、DO和ORP等参数,通过信号传输、云平台等信息技术实时反馈,进行工艺参数调控,保证微生物反应保持在适宜条件范围内。

## **5.7 设备运行及维护**

### **5.7.1 设备运行**

泥浆生物反应器集成装备运行前进行各单元的清水联调测试，确保生物修复的造浆、氧化、微生物反应、脱水、废水处理、废气净化等各工序及流程贯通。泥浆反应器集成装备间歇修复过程中，做好修复效果和微生物活性相关取样检测工作。

### **5.7.2 设备维护**

设备安装、拆卸及运行过程中，定期维护关键设备易损元件、清洗传感器探头和校准仪表，做好维护保养记录。

## **6 工程应用案例**

### **6.1 国外工程应用案例**

欧美等发达国家污染土壤生物修复工程应用案例报道较多，但泥浆生物反应器工程规模集成装备案例较少，以下汇总中试或工程规模泥浆反应器系统相关修复项目应用案例，见下表。

表2 国外泥浆生物反应器运行情况

设备供应商/ 项目	处理能力	系统工艺/组成	污染物	处理效果	来源
Innovative Bio- Systems	中试规模, 64 L	搅拌罐、气提装置 等	多环芳烃、石油烃污染土 壤	a) 14天后, 土壤中PAHs含量降 低 87%以上, TPHs 含量减少约 89.3%; b) 12周后, 低环(2~3环) PAHs 浓度下降98%以上(从1490mg/kg 下降至35mg/kg); c) 高环(4~6环) PAHs浓度下降 了 72%(从 960mg/kg 下降至 270mg/kg)	<i>US EPA. Pilot-scale demonstration of a slurry-phase biological reactor for creosote- contaminated soil[OL]. 1993. EPA / 540/ S5- 91/ 009.</i>
Southeastern Wood Preserving	工程规模, 50t/d	动力筛、泥浆混 合罐、4个生物反 应器和脱水装置	萘、苯并(a)芘污染土壤	a) 平均总PAHs从8545mg/kg降低 至634mg/kg, 降低90%; b) 苯并(a)芘从467mg/kg下降至 152mg/kg, 降低67%; c) 此结果说明对于低环的PAHs 处理效率较高, 高环的处理效率低	<i>US EPA. Federal remediation technologies roundtable. Remediation case studies: bioremediation and vitrification. [OL]. 1997. EPA / 542/ R-97/ 008.</i>
French Limited	工程规模,	两个处理单元,	苯并(a)芘、PCBs、氯	11个月后苯并(a)芘达到修复目标	<i>US EPA. Federal</i>

设备供应商/ 项目	处理能力	系统工艺/组成	污染物	处理效果	来源
Superfund	500t/d	每个处理单元可容纳 1700 万加仑； Mixflo™ 曝气系统将溶解氧浓度维持在 2.0mg/L	乙烯等	(0.9 mg/kg)	<i>remediation technologies roundtable. Remediation case studies: bioremediation. Slurry-phase bioremediation at the French limited superfund site, Crosby, Texas [OL]. 1995. EPA / 542/ R-95/ 002.</i>
Biotrol, Inc	中试规模	进料储存罐、反应罐脱水系统	土壤淋洗后黏粒的处理	/	<i>US EPA.Engineering Bulletin Slurry Biodegradation [OL]. 1990. EPA / 542/2-90/ 016.</i>
ECOVA Corporation	工程规模	移动式	杀虫剂、五氯酚等污染土壤	13天内，800 mg/kg 2,4-氯苯氧基乙酸、4-氯-2-甲基苯氧基乙酸降至20mg/kg以下；24天内，PCP去除率 99%	

设备供应商/ 项目	处理能力	系统工艺/组成	污染物	处理效果	来源
Environmental Remediation, Inc	工程规模, 130吨/月	/	杂酚油污染土壤	21天内, 含油率降低 62%	
Environmental Solutions, Inc	工程规模, 80000 吨/年	/	石油烃、PAHs 污泥	/	
Groundwater Technology, Inc	工程规模	气浮罐、反应罐、澄清/沉淀塔	处理PAHs 污染土壤	/	
Remediation Technology, Inc	工程规模, 80 吨 / 周	地理式、串联式生物反应罐	杂酚油、五氯酚污染土壤及含油污泥	PCP、PAHs 去除率≥99%	

## 6.2 国内工程应用案例

国外微生物修复技术发展了近50年，国内仍处于起步阶段，国内尚未报道土壤泥浆生物反应器技术的工程应用案例，北京建工环境修复股份有限公司曾在安徽某钢铁焦化污染场地成功应用泥浆生物反应器中试研究和工程规模示范应用。

1、中试研究：试验区域为某退役钢铁厂，污染场地包括带钢车间、炼钢车间、连轧辅助车间、石灰厂、制氧车间、焦化厂、烧结厂炼铁厂、炼钢厂、热轧厂、冷轧厂和非生产区等，修复地块污染因子包括PAHs、重金属、TPH等，符合典型的焦化污染场地特征，场地土壤以杂填土、黏土为主。所选择区域土壤的pH平均为 $8.78 \pm 1.19$ ，呈弱碱性；含水率为 $17.9\% \pm 5.66\%$ ；土壤呈灰黄/黑色，质地由松散到稍密，局部夹杂淤泥质土壤。颗粒组成为： $0.5 \sim 2$  mm，占 $0.0\% \sim 8.9\%$ ； $0.5 \sim 0.25$  mm，占 $0.0\% \sim 14.5\%$ ； $0.25 \sim 0.075$  mm，占 $15.1\% \sim 33.2\%$ ； $0.075 \sim 0.005$  mm占 $43.6\% \sim 69.2\%$ 。土壤中有机质含量为 $1\% \sim 3\%$ 。

2、工程示范应用：示范区域是我国典型焦化污染场地，生产历史近60年，占地约332亩。该场地污染类型为有机、重金属及其复合污染，主要针对苯并[a]芘等多环芳烃污染土壤开展示范研究。地层分布情况如下：①层杂填土（ $Q_4^{ml}$ ）：灰黄、灰黑、杂色，松散~稍密，稍湿~湿，含铁渣，大量混凝土碎块，局部夹淤泥质土，主要成分为粘性土，上部多为混凝土地坪。层厚 $1.20 \sim 6.50$ m。该层在场地内分布普遍。②层粘土（ $Q_4^{al+pl}$ ）：灰黄、褐黄色，硬塑状态（局部坚硬状态），摇振反应无，光泽反应有光泽，干强度高，韧性高，含少量Fe、Mn质结核。

表3 国内泥浆生物反应器应用案例

序号	应用场地	规模	核心装备	主要目标污染物	运行周期
1	安徽某钢铁焦化污染场地	中试研究	泥浆生物反应器中试设备（2个单体）	苯并（a）蒽、苯并（b）荧蒽、苯并（a）芘等	运行6~8周可满足一类用地的修复目标

序号	应用场地	规模	核心装备	主要目标污染物	运行周期
2	安徽某钢铁焦化污染场地	工程规模	泥浆生物反应器智能集成装备（6组单体）	苯并（a）芘	运行2~3周可满足一类用地的修复目标



图1 安徽某焦化场地泥浆生物反应器中试设备照片



图2 安徽某焦化场地泥浆生物反应器智能集成装备工程示范照片

## 7 本标准实施建议

（1）建议各级环境保护部门及相关监督管理部门、各修复企业在污染场地修复项目管理和日常环境监督管理等工作中积极采用本技术指南，以加强对污染地块异位微生物修复运行的监管，同时建议其他类型的有机污染土壤异位微生物修复工程应用也可参考执行。

（2）鉴于目前我国“双碳”背景下对绿色低碳修复技术及装备的迫切需求，尤其以多环芳烃为特征污染物的焦化污染场地的生物修复装备的智能

化、集成化有待提升。鉴于此，建议尽快将本标准发布实施。

（3）本标准的实施建议与生态环境部颁布的《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》（HJ 25.2-2019）、《建设用地土壤修复技术导则》（HJ 25.4-2019）、《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）《污染土壤修复工程技术规范 生物堆》（HJ 1283-2023）等污染地块相关标准相配套。

（4）本标准为首次制订，随着经济的不断发展和技术的进步，以及对环保技术研究的不断深入及实践经验的积累，本标准的内容应不断得到完善、拓展、深入和更新，以适应环境标准制修订工作的要求，使其实用性和可操作性与时俱进，不断满足环境管理和地块异位微生物修复工程技术装备的需要。