

有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术指南

编制说明

起草单位：中国地质大学（北京）

参编单位：中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司、昆明理工大学、西南科技大学、北京矿冶科技集团有限公司、中铝集团四川省会理县鹏程废渣利用有限公司、罗平锌电上市公司贵州省安顺市普定县向荣矿业有限责任公司、广西博世科环保科技股份有限公司

主要起草人：姚俊，李浩，李淼淼，华绍广，刘兴宇，董鹏，谌书，李泽海，刘建丽，闵宁，朱红祥，姜顺，李若飞，唐垂云，李克新，刘厚权，苏建。

2023 年 8 月 13 日

目录

一、工作简况	3
1、任务来源（同时说明列入团体标准制修订工作计划情况）	3
2、起草单位、参编单位	3
3、主要起草人（说明标准主要起草人及其所做的主要工作等）	4
2. 制定（修订）标准必要性和意义	4
3、主要起草过程	5
四、制定（修订）标准原则和依据	6
1、标准编制原则	6
2、标准参考的主要依据	7
五、与现行有关法律、法规和标准的关系	7
六、标准主要内容说明	7
1、术语和定义	8
2、适用性评价及实施流程	8
3、固体废弃物选择及组合	9
4、微生物筛选及驯化	10
5、工程参数的确定	10
6、工程措施	11
7、监测与分析	11
8、验收要求	11
9、预期的经济效果	11
七、重大分歧意见的处理经过和依据	12
八、采用国际标准或国外先进标准情况	12
九、贯彻标准的措施建议	13
十、其他应予说明的事项	13

一、工作简况

1、任务来源（同时说明列入团体标准制修订工作计划情况）

有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术规范，来源于由中国地质大学（北京）牵头的国家重点研发计划项目“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项——“西南有色金属选冶渣场影响区污染修复技术与工程示范”项目。该项目在云南、贵州、四川、广西建立的 4 个示范工程场地，根据其特殊的气候、地形地貌及水文地质条件，及其场地拥有的典型有色金属固体废弃物及其污染场地的特征污染，利用西南四省特征性的农林、钢铁和煤电等固体废弃物和低品位非金属矿物为原材料，结合强还原微生物功能菌群，开展典型有色金属选冶渣场污染综合治理规划治理的工程示范，实现有色金属矿区场地的土地安全利用和生态恢复。

为贯彻落实国家标准化委员会等十七部门联合印发的《关于促进团体标准规范优质发展的意见》中“建立以需求为导向的团体标准制定模式”、“发展团体标准充分释放市场主体标准化活力，优化标准供给结构，提高产品和服务竞争力，助推高质量发展”的精神，加强绿色矿山标准体系建设，提升引领高质量发展的能力，促进绿色矿山技术进步、工艺水平提高，推动矿业领域绿色低碳发展 2023 年中关村绿色矿山产业绿盟（以下简称中绿盟）发布了《关于征集 2023 年度团体标准计划项目的通知》。项目组按照中绿盟要求提交了《有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术规范》，方案经中绿盟决定立项，并于 2023 年发布于《中绿盟 2023 年度第一批团体标准立项计划》。

2、起草单位、参编单位

本文件起草单位：中国地质大学（北京）、中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司、昆明理工大学、西南科技大学、北京矿冶科技集团有限公司、中铝集团四川省会理县鹏程废渣利用有限公司、罗平锌电上市公司贵州省安顺市普定县向荣矿业有限责任公司、广西博世科环保科技股份有限公司。

3、主要起草人（说明标准主要起草人及其所做的主要工作等）

本文件主要起草人：姚俊，李浩，李淼淼，华绍广，刘兴宇，董鹏，谌书，李泽海，刘建丽，闵宁，朱红祥，姜顺，李若飞，唐垂云，李克新，刘厚权，苏建。

二、 制定（修订）标准必要性和意义

有色金属行业带来巨大经济效益的同时，也造成我国有色金属采选冶固体废弃物产量大，污染场地面积广。2020 年自然资源部编撰发布的《全国矿产资源节约与综合利用报告》显示，我国尾矿和废石累计堆存量超过 620 亿吨，且每年以 35 亿吨的产量逐年增加，工业与信息化部资料表明我国每年有 30 亿吨冶炼渣产生，然而，年均综合利用率仍低于 30%。传统治理方法价格昂贵，100 万 m³ 采选冶渣的处理成本超过 1 亿元，国家每年用于治理矿山固体废弃物的经费至少 3500 亿元以上。国家难以支付如此高昂的治理费用，按照《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》规定，矿山企业应当采取科学的开采方法和选矿工艺，减少尾矿、煤矸石、废石等矿业固体废弃物的产生量和贮存量，国家鼓励采取先进工艺对尾矿、煤矸石、废石等矿业固体废弃物进行综合利用。

资源化利用年堆存量超过 1 亿吨的农林、钢铁和煤电等固体废弃物作为有色金属行业复合污染修复的原材料，协同生物（尤其是微生物）作用，实现以废治废，是开展大宗固体废弃物无害化和资源化利用与矿山污染治理的突破口，从而高效固化及稳定化有色金属行业的复合污染。由于有色金属矿区场地固体废弃物量大、面广、堆存混杂问题严峻、情况更为复杂，利用固体废弃物与微生物协同固化及稳定化技术进行修复，一方面微生物可以参与生物成矿，将游离的阴阳离子，通过多复盐效应，形成溶度值较低的复盐矿物沉淀，另一方面农林、钢铁和煤电多固体废弃物基材料可以通过吸附、沉淀的方式固化重金属，同时能够为微生物提供碳源、氮源和还原环境，为硫酸盐还原菌等功能微生物菌群提供硫源，促进体系硫循环，增大强还原微生物菌群对重金属的固化及稳定化作用，从而构建高效靶向低成本微生物与多固体废弃物协同的固化及稳定化技术体系。尽管国内外学者开始在工业固体废弃物利用和微生物固化矿区重金属复合污染方面开

展了一些探索性研究，目前尚无针对有色金属矿区场地利用固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术制定标准，面对有色金属矿区场地污染范围广、持续时间长、污染隐蔽性、污染物种类多样化的特点，固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复未被充分利用，亟需成熟的、规范的技术标准。

本标准是根据《中华人民共和国环境保护法》和相关环境保护法律、法规，结合我国有色金属矿区场地固体废弃物材料与微生物联合修复技术的实际情况而制定的，主要适用于有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术的实施、监测和效果评价。本标准规定了固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复的适用范围，固体废弃物选择及组合，微生物筛选及驯化，操作条件的验证和规定，以及修复效果评价方法。

三、主要起草过程

自立项后，由中国地质大学（北京）牵头组织成立标准编制工作组，编制工作组成员如下：中国地质大学（北京）等多家单位，明确了工作指导思想，制订了工作原则，确定了起草组成员和任务分工，并确定了由中国地质大学（北京）牵头负责标准文本的初稿起草、意见汇总和修改工作，其他单位共同参与规范编制。

本文件的起草过程中根据各阶段任务的工作要求，组织了相关领域的调研，并召开了讨论会，参与研讨的人员来自高校教师和一线管理人员。通过对文件内容的修改和完善，形成了目前的文件文本。主要编制过程包括以下几个阶段：

1、准备阶段

2023年1月-3月，组织开展标准立项前的项目调研工作。

2、资料整理与初稿拟定

2023年5月-6月，进行国内外有关固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术的文献资料的查询、收集和整理工作，查阅前人对固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复的研究情况和目前科学界对固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术的研究进展。调研了目前固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复污染土壤的相关标准，以及国内采用固体废弃物与微生物协同固化及稳

定化修复技术的应用场地情况及案例，在充分调研和分析总结的基础上，标准编制组按要求起草了标准初稿。

3、试验论证

2023年6月-8月，针对固体废弃物选择及组合、微生物的筛选及驯化、可行性验证、工程参数的确定进行实验验证，确定工程参数、工程措施、监测与分析、验收要求，并对文件初稿进行内容补充和完善。

4、内部研讨

2023年9月，标准起草组就标准初稿召开内部讨论会，根据试验结果与最新文献对标准进行反复修改，形成文件的工作组讨论稿与编制说明。

5、征求意见阶段

2023年10月，项目组向高校、研究所、国家重点实验室等单位及专家发送《有色金属采选冶遗留场地微生物原位修复技术规范》的工作组讨论稿，根据专家意见对讨论稿进行进一步的完善，形成征求意见稿。

6、确定终稿

2023年11月，在相关讨论和修改的基础上，结合试验结果、数据统计，确定征求意见稿终稿。

四、制定（修订）标准原则和依据

1、标准编制原则

（一）实用性原则

本标准是在充分收集相关资料和文献，分析固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复研究成果，坚持与现行有关国家标准、行业标准、地方标准、团体标准协调一致，结合中国地质大学（北京）等科研院所和相关生产企业多年关于固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术的研究经验和成果，开展标准起草工作。标准内容符合有色金属矿区修复的发展方向和市场需求，标准条款切实可行，具有较强的实用性和可操作性。

（二）协调性原则

本标准编写过程中尊重知识产权，同时也注意做好有色金属矿区场地固体废

弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术规范与相关法律法规的衔接,在内容上与现行法律法规、标准协调一致。

(三) 规范性原则

本标准严格按照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，标准涉及的专业术语、技术要求、处理工艺、治理效果检测与评估等内容表达准确，引用数据来源真实可靠，指标科学、论证充分，保证标准质量。

2、标准参考的主要依据

编制工作查阅并收集了国内有关固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术相关文献资料。并借鉴了以下相应标准：

- (1) DB43/T 1165-2016 《重金属污染场地土壤修复标准》
- (2) HJ1282—2023 《污染土壤修复工程技术规范固化/稳定化》
- (3) DB 45/T 2144—2020 《工业企业重金属污染地块修复技术规范》
- (4) HJ/T 166 -2004 《土壤环境监测技术规范》
- (5) 《石油污染土壤微生物修复技术规范》（征求意见稿）
- (6) 《污染场地土壤修复技术导则》（征求意见稿）
- (7) 《微生物法修复化工污染土壤技术规范》（报批稿）

五、与现行有关法律、法规和标准的关系

本文件符合 GB/T 1.1-2020 的规定，与现行法律、法规和强制性国家标准无抵触关系，是落实有关《中华人民共和国环境保护法》《“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划》的必要补充。

六、标准主要内容说明

团体技术标准《有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术指南》主要章节内容包括：术语和定义、适用性评价、技术路线、工作程序、多种固体废弃物的选择及组合、微生物筛选及驯化、操作条件的验证和规定、

可行性验证、工程参数的确定、工程措施、监测与分析、验收要求。标准主要内容及依据来源说明如下：

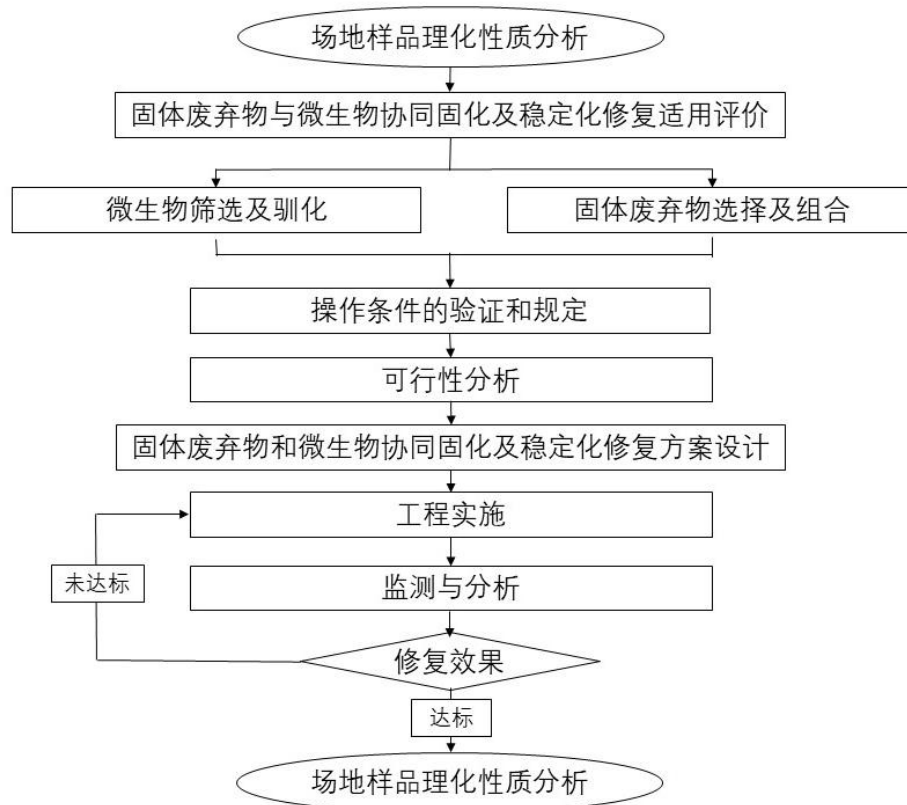
1、术语和定义

标准编制工作组在查阅总结了相关标准、著作、论文、科技期刊等文献资料的基础上，对术语和定义、适用性评价、微生物筛选及驯化、多种固体废弃物选择及组合、可行性及方案设计、工程措施、监测与分析所涉及的概念进行统一定义、确立术语。

2、适用性评价及实施流程

固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复适用于同时存在重金属污染矿区 and 大宗工业固废堆存的区域。应结合污染分布范围与深度、修复过程污染物的排放、修复时间要求、运输条件和限制因素，以及修复成本、效益等各种因素，判断固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术的可行性。

结合文献及相关的标准，指定固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复按以下技术流程图执行。



3、固体废弃物选择及组合

本标准规定的用于有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术的方案要求主要依据来源于中国地质大学（北京）在有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术的研究，主要以硫酸盐还原菌、铁还原菌为重金属固化及稳定化的强还原微生物为主，结合待修复区域存在的钢铁、煤电、农林行业的固体废弃物，应用于重金属污染防治实践工程，达到以废治废的目的。

根据场地重金属污染特征及其地质环境背景特点，对场地周边农林、钢铁、煤电等固体废弃物进行采样。参照 GB/T 39198-2020 进行分类，记录采样的时间、地点、环境条件、含水率等。将样品进行干燥后密封保存。将前述采集的样品进行粉磨并进行矿物相分析、粒径分析、微观形貌分析等，并参照 HJ 557 测定所采样品的浸出毒性，保证使用的农林、钢铁、煤电等固体废弃物安全、有效。选取具有活性的固体废弃物或对样品进行物理或化学处理后增强固体废弃物的活性。以前述筛选的本土农林-钢铁-煤电业固体废弃物为主要原料、辅以当地非金

属矿物等材料，在原料组成、性能研究基础上，开展多种固体废弃物材料复配试验，通过物理化学手段优化粒径分布与反应物粒度集配，确定固体废弃物组合种类。将多种固体废弃物原材料与取回的试样按不同配方比例混匀，置于实验容器中，模拟当地湿度和温度进行重金属固化及稳定化研究，采用重金属浸出检测等方法分析，考察重金属有效态含量、浸出毒性，优化多固废协同修复配方，优化技术参数，构建因地制宜的有色金属矿区场地重金属污染高效、靶向多固废组合。

4、微生物筛选及驯化

强还原微生物包括工程微生物和筛选的土著微生物，主要是硫酸盐还原菌、铁还原菌等。微生物筛选步骤应包括样品采集与储存、菌悬液的制备、富集培养筛选、效果检测、菌种保存等，具体要求参照 HG/T 20719。按照 HJ/T 415 进行安全性评价分析和评价强还原微生物菌剂及其使用过程中各类代谢产物对人畜健康及生态环境可能产生的有害影响和潜在危害，保证使用的强还原微生物菌剂安全、有效。重金属固化微生物驯化体系中，根据场地总金属有效态浓度，将重金属浓度设置一系列浓度梯度，由低到高进行菌株的驯化，驯化过程定期转接。

5、工程参数的确定

本文件规定了在工程应用前，需根据场地实际情况来选择合适固体废弃物，设置不同比例的多种固体废弃物对污染重金属有效性的降低效果试验，确定修复过程中添加多种固体废弃物的最佳比例。同时对微生物修复周期、温度、pH、菌剂比例进行优化调试，设置不同微生物菌剂的比例对降低尾矿中重金属有效性的效果试验，确定修复过程中添加微生物菌剂的最佳比例。确定最佳固液比例添加量，设置不同多种固体废弃物与微生物菌液的比例的固体培养基对降低尾矿中重金属有效性的效果试验，确定修复过程中添加固体培养基的最佳固液比例。分析不同工程参数对固体废弃物与微生物之间的协作固化及稳定化关系的影响，确保对固体废弃物与微生物协同。

6、工程措施

有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术施工应符合《有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术标准》要求，主要包括一般要求、工程措施等。

7、监测与分析

规定了有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术环境监测内容、监测方法及监测内容，以实际监测数据作为固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复效果的指标。主要的监测指标及分析方法，可参考 DB43/T 1165-2016 《重金属污染场地土壤修复标准》。

8、验收要求

有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复过程中不应产生二次污染和污染物转移，治理前、后的水、土、气环境质量不变。验收要求应以地块调查评估、修复方案中确定的修复目标值为主对项目修复效果进行评估和验收。

验收应符合国家现行标准《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》GB36600、《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》HJ 25.5 的要求。

9、预期的经济效益

（1）环境效益

本标准实施以后，能够带来重大环境效益。废弃尾矿堆积经雨水冲刷会带出大量的重金属，同时产生高浓度酸性重金属废水。当它们随着废液、固体废物、尾矿淋滤等进入水和土壤环境后，即使浓度很低也会造成环境污染。此外，有废弃尾矿堆积的区域，还存在大量尚未消减的农林、钢铁和煤电等大宗工业固体废弃物，工业固体废弃物数量巨大，其消极堆放不仅占用土地，而且污染土壤、水源和大气，严重影响作物生长，进而严重危害人体健康。因此，如何综合利用矿区周边大宗工业及农林固体废弃物，并有效结合绿色低成本的生物修复技术，实

现以废治废，对于降低尾矿堆放造成的环境污染，解决大宗工业固体废弃物的出口问题至关重要。

在此背景下，开展有色金属矿区场地固体废弃物-微生物协同固化及稳定化修复治理，对于减轻土壤和地下水的重金属污染、高效利用固体废弃物、改善环境质量和保护人民群众的身体健康意义重大，对保证矿区周边社会经济可持续发展和生态系统良性循环具有积极作用。

（2）经济效益

大宗工业固体废弃物，如钢铁、煤电行业产生的钢渣、煤矸石，以及金属冶炼、矿产开采后留下的废弃物等。现今少部分大宗工业固体废弃物获得了开发应用，而相当数量的尾矿依旧堆放在土地上，占用了大量的土地资源，其中包括大量的农用、林用土地。此外，部分受污染的土地由于存在的潜在风险，甚至直接处于空置状态，其利用价值和所带来的经济效益大大降低。但这些固体废弃物尚存在硅酸盐、磷酸盐、有机质等有效成分。根据的工业固体废弃物的实际情况，选取合适的处理方法，能够低成本的有效地为微生物创建良好的生存环境和营养条件。同时通过固体废弃物的综合利用，可有效的解决生产企业工业固体废弃物堆存问题，提高单位效益，促进循环经济发展。同时，通过结合强还原微生物固化及稳定化修复重金属污染区域。还降低了矿山生产企业解决环境问题的修复成本。

七、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准研制过程中无重大分歧意见。

八、采用国际标准或国外先进标准情况

目前，国内外尚无用于有色金属矿区场地固体废弃物与微生物协同固化及稳定化修复技术的标准。

九、贯彻标准的措施建议

组织措施：在中关村绿色矿山产业联盟的组织协调下，以标准起草单位和起草人员为主，成立标准宣贯小组。

技术措施：积极在有色金属采选冶企业开展标准宣贯、培训工作和标准技术应用实践。

本标准无其他措施建议。

十、其他应予说明的事项

本文件编制说明由中关村绿色矿山产业联盟提出。

本文件编制说明由中关村绿色矿山产业联盟标准化工作委员会归口。

本文件编制说明主要由中国地质大学（北京）、中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司、昆明理工大学、西南科技大学、北京矿冶科技集团有限公司、中铝集团四川省会理县鹏程废渣利用有限公司、罗平锌电上市公司贵州省安顺市普定县向荣矿业有限责任公司、广西博世科环保科技股份有限公司负责起草。

本文件编制说明主要起草人：姚俊，李浩，李淼淼，华绍广，刘兴宇，董鹏，谌书，李泽海，刘建丽，闵宁，朱红祥，姜顺，李若飞，唐垂云，李克新，刘厚权，苏建。