

ISC13.020

B11

GRM

中关村绿色矿山产业联盟

T/GRMP-2023-03

有色金属采选冶遗留场地微生物原位 修复技术指南

Technical Guidelines for Microbial in Situ Remediation of Remaining Sites
in Non-ferrous Metal Mining, Dressing and Metallurgy

2023-08 - 30 发布

2023-09 - xx 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目录

1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语及定义	1
4 适用性评价及实施流程	2
4.1 微生物原位修复场地类型	2
4.2 微生物原位修复适用性评价步骤	2
4.3 实施流程	3
5 功能微生物选择及驯化	4
5.1 功能微生物选择	4
5.2 功能微生物驯化	4
6 可行性验证	4
7 工程参数的确定	5
8 工程措施	5
8.1 一般要求	5
8.2 工程施工	5
9 监测与分析	6
9.1 环境监测	6
9.2 样品保存和运输	6
9.3 监测项目与分析	6
10 验收要求	6
附录 A 工程施工作业	8

前言

本文件按照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。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟团体标准化工作委员会提出并归口。

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、中山大学、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。

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

1 范围

本文件规定了有色金属采选冶遗留场地微生物原位修复的术语和定义、适用性评价、技术路线、工作程序、微生物筛选及驯化、可行性验证、工程化设计、工程实施、监测与分析、验收要求等。

本文件适用于我国有色金属采选冶遗留场地的微生物原位修复工程方案设计、施工及验收。

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/T 12801 生产过程安全卫生要求总则

GB/T 14848 地下水质量标准

GB/T 32722 土壤质量 土壤样品长期和短期保存指南

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准

HG/T 20719 微生物法修复化工污染土壤技术规范

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则

HJ 493 水质 样品的保存和管理技术规定

HJ 1272 生态保护修复成效评估技术指南

HJ/T 415 环保用微生物菌剂环境安全评价导则

LY/T 1218 森林土壤渗透性的测定

3 术语及定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 有色金属采选冶遗留场地 Remaining Site of Nonferrous Metal Mining, Dressing and Metallurgy

有色金属采矿、选矿、冶炼遗留的对人体健康、生态环境产生危害或具有潜在风险的地块。

3.2 微生物原位修复 In-situ Bioremediation

指不经挖掘，直接在污染场地利用微生物的生长代谢作用长期有效地降解环境中有机物、固化重金属的过程。

3.3 重金属固化微生物 Heavy metal solidification microorganism

指能够在微生物自身或酶的作用下促进重金属由迁移态转变为稳定态，固化环境中重金属的微生物。

3.4 有机物降解微生物 Organic matter degrading microorganisms

指能通过微生物自身或酶的作用下促进的有机污染物降解的微生物。

3.5 微生物修复可行性验证 Microbial remediation feasibility

指通过小试实验和现场中试验验证遗留地块微生物原位修复的技术、经济、安全可行性。

3.6 重金属固化率 Heavy metal solidification rate

指微生物原位修复后污染场地样品中重金属浸出毒性浓度与初始浓度的比值，按如下公式计算，重金属固化率=（初始浓度-修复后浓度）/初始浓度×100%。

3.7 有机物降解率 Organic matter degradation rate

指微生物原位修复后污染场地样品中有机物变化浓度与初始浓度的比值，按如下公式计算，有机物降解率=（初始浓度-修复后浓度）/初始浓度×100%。

4 适用性评价及实施流程

4.1 微生物原位修复场地类型

微生物原位修复适用于渗透率高、污染物浓度为 GB 15618 和 GB 36600 中风险管制值 5 倍及 5 倍以下的污染场地。

4.2 微生物原位修复适用性评价步骤

微生物原位修复技术适用性评价可参照以下步骤进行：

（1）遗留地块污染状况调查。包括地块地理位置、污染物种类、微生物群落结构，明确修复目标。确认污染地块概况的技术流程和技术方法按 GB 36600 和 HJ 25.1

执行。确认的主要内容包括但不限于：污染物种类及理化性质、污染物浓度及分布范围、污染区域、场地使用历史情况、周边敏感受体及相对位置、场地规划类型等。

（2）根据遗留地块概况、土地再利用规划和功能属性等综合制定修复策略，确认现场是否允许原位修复，是否适合采用微生物修复技术等。

（3）根据修复策略比选并确认修复技术，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，判断微生物原位修复技术的可行性。

4.3 实施流程

有色金属采选冶遗留场地微生物原位修复按以下技术流程图实施。

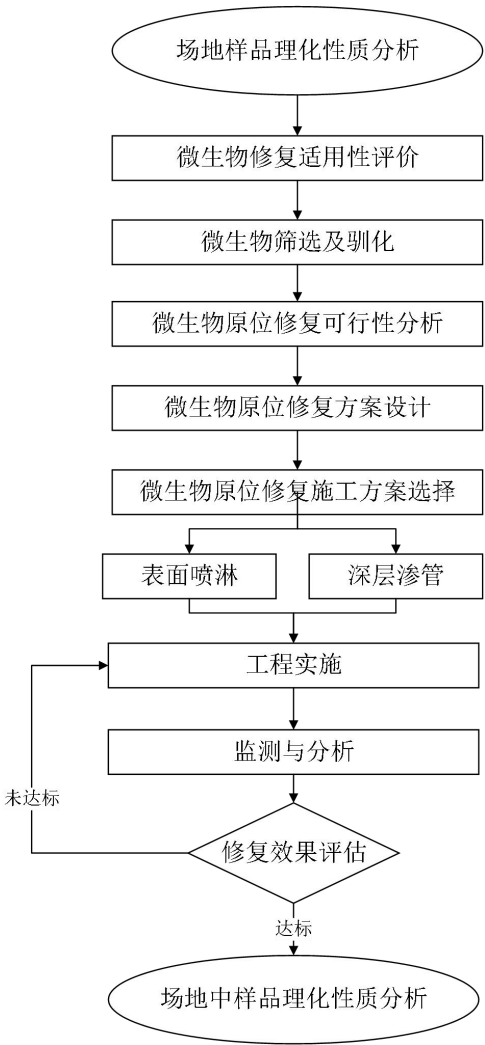


图 1 有色金属采选冶遗留场地微生物原位修复实施流程

5 功能微生物选择及驯化

5.1 功能微生物选择

5.1.1 功能微生物包括工程微生物和筛选的土著微生物，一般包括硫酸盐还原菌、铁还原菌、解磷菌、解硅菌、有机物降解菌等。

5.1.2 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。

5.1.3 按照 HJ/T 415 进行安全性评价，分析功能微生物菌剂及其使用过程中的代谢产物对人畜健康及生态环境的有害影响和潜在危害，保证使用的功能微生物菌剂安全、有效。

5.2 功能微生物驯化

5.2.1 功能微生物驯化包括重金属固化微生物驯化、有机物降解微生物驯化、复合污染修复微生物驯化。

5.2.2 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。

5.2.3 有机物降解微生物驯化体系中，根据场地有机物污染浓度，将降解有机物浓度设置一系列浓度梯度，将有机物作为单一碳源或辅助碳源，由低到高进行菌株的驯化。

5.2.4 复合污染修复微生物驯化体系中，根据场地有机物污染浓度，将重金属和待降解有机物设置一系列浓度梯度，由低到高进行菌株的驯化。

6 可行性验证

可行性验证按下列步骤进行：

(1) 计三组重复，其中三组修复组，三组对照组。

(2) 修复组中添加 1000 g 土壤样品和 200-300 mL 菌液，搅拌均匀；对照组中添加 1000 g 土壤样品和 200-300 mL 培养基，搅拌均匀。

(3) 修复组中每隔 7 d 补充一次新鲜菌液，对照组中每隔 7 d 补充一次新鲜培养基，添加量每次为 50 mL。

(4) 在自然条件下，功能微生物生长 7 d 后，定期取样 50 g（不同取样深度取样后混合均匀）土壤样品，用于重金属固化率、有机物降解率的检测。若 30 d 内修复效果（重金属固化率、有机物降解率>50%），则可应用于工程试验。

(5) 重金属和有机物检测具体要求参照 GB 36600。

7 工程参数的确定

工程参数按下列因素确定：

(1) 微生物修复周期。每隔 7 d 取样测定重金属固化率、有机物降解率，确定在微生物原位修复体系中最佳修复时间和目标污染物的动态变化规律。

(2) 温度。根据当地历史气温条件，设置不同的温度梯度进行重金属固化、有机物降解效果试验，确定最佳的温度范围，结合当地气温条件确定适宜实施修复的季节。

(3) pH。根据当地历史降雨的 pH，设置不同的 pH 梯度进行重金属固化、有机物降解效果试验，确定最佳的培养基 pH。

(4) 菌液添加量。分别设置不同的菌液添加量的重金属固化、有机物降解效果试验，确定单位体积土壤进行修复/风险管控所需的最低菌液添加量。

(5) 渗透系数。参照 LY/T 1218 方法，确定菌液在修复土壤中的渗透系数。

8 工程措施

8.1 一般要求

8.1.1 有色金属采选冶遗留场地微生物原位修复主要可以采用表面喷淋法和深层渗管法。

8.1.2 表面喷淋法适宜于渗透性好（渗透系数 $k > 6.0 \times 10^{-4}$ cm/s），或污染物主要集中于浅表层（0 cm < 深度 < 30 cm）的遗留场地，或仅要求表面植被生态恢复的遗留地块。

8.1.3 深层渗管法适宜于土壤渗透性差（ 6.0×10^{-5} cm/s < $k < 6.0 \times 10^{-4}$ cm/s），或污染物主要集中于深层（深度 > 30 cm）的遗留场地，菌液通过表层喷淋难以达到目标污染区域的场地。

8.1.4 微生物的放大培养。放大培养的微生物作用效果应达到可行性验证的基本要求，原则上微生物放大培养至每毫升不低于 10^5 个，具体要求参照 HG/T 20719。

8.1.5 有色金属采选冶遗留场地微生物原位修复在设计、施工过程中，应遵守安全技术规程和相关设备安全性要求的规定，应符合 GB/T 12801 的要求。

8.2 工程施工

8.2.1 采用土地平整和机械翻耕等工程措施对场地进行预处理，保证土壤平整和

松散，原则翻耕土壤深度一般不超过 30 cm。

8.2.2 根据遗留场地的污染情况和土壤渗透性，选择合适的微生物原位修复的方法。

8.2.3 管道间距应确保微生物喷淋/渗透范围覆盖全部修复区域。

8.2.4 在管道铺设的基础上，可根据现场需求安装和调控设备，包括水泵、电缆、喷头、阀门和接头等。

8.2.5 表面喷淋法和深层渗管法的具体施工作业详见附录 A。

8.2.6 微生物喷淋/渗透的周期和菌液量，根据工程参数实验确定，同时可结合现场监测数据进行调整。

9 监测与分析

9.1 环境监测

9.1.1 环境监测采样方式包括监测井采样法、人工钻井采样法、机械钻孔采样法。

9.1.2 主要监测内容包括：

- (1) 修复开始前的本底环境状况监测，通常采用场地调查评估数据；
- (2) 修复过程中修复效果的基础监测；
- (3) 为判断是否可以终止监测而进行的监测。

9.1.3 环境监测的对象应包括场地渗滤液、场地土壤样品、地下水样品，监测指标应包括但不限于 pH、氧化还原电位、重金属总量、重金属浸出毒性、重金属有效态、有机污染物浓度等，出具相应的监测报告。

9.2 样品保存和运输

- (1) 采集的样品检测前应低温保存和运输。
- (2) 有机挥发性样品应参照 GB/T 32722、HJ 493，采取冷藏及密封性措施，降低挥发性有机物在存储、运输过程中的逃逸。
- (3) 对污染物检出限有特殊要求，应采用满足低检出限分析方法对样品前处理要求的保存方法。

9.3 监测项目与分析

若地块存在污染，参照 GB 36600、GB 15618 和 GB/T 14848 中污染物分析方法进行检测，检测指标根据修复或风险管控目标确定。

10 验收要求

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。存在污染的遗留地块，以地块调查评估、修复方案或实施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，可参照 GB 36600、GB 15618 和 HJ 25.5、HJ 1272。

附录 A 工程施工作业

1. 表面喷淋法施工作业

表面喷淋法施工作业按照下列程序进行：

（1）根据条件优化实验确定拟喷淋区域菌液用量，结合喷淋面积、作业周期和喷头喷淋半径等，确定需要布设的喷头和管道直径、间距，计算水泵、电缆、喷头、管道及接头规格和数量；

（2）施工之前，施工人员应按照设计方案熟悉菌液喷淋布局，对所有水泵、电缆、喷头、管道和接头的规格及材质进行核对，严格按照设计方案进行施工；

（3）管线布设应远离易燃、易爆和强烈腐蚀性材料，不能与其它的管道或电缆同沟铺设；

（4）塑料材质软管通常采用卡箍进行连接，塑料管道与金属管道连接应采用法兰连接或转换接头连接；

（5）菌液喷头须固定于支撑桩柱上，喷头管垂直于地面，且桩柱高度不得超过喷嘴高度；

（6）安装完毕后，检查连接是否牢固，无明显缺陷再按规定要求进行喷淋测试，检查是否有漏液、喷淋盲区等，若不合格应及时处理；

（7）根据作业周期，做好相应的喷淋施工组织以及作业区域每天喷淋量记录；

（8）若微生物在修复过程中需要厌氧状态的，可在微生物喷淋后覆盖密封材料或物料。

2. 渗管法施工作业

深层渗管法施工作业按照下列程序进行：

（1）根据条件优化实验确定拟修复区域所需菌液用量，结合地下水水位、土壤渗透系数、渗透半径、修复时间需求，确定需要布设的渗管直径和管道间距，计算水泵、电缆、渗管、管道及接头规格和数量；

（2）施工之前，安装人员应熟悉菌液渗管布设，对所有管材、管件的规格和材质进行核对，严格按照设计方案进行施工；

（3）在待修复土壤范围内打渗管安装孔，孔直径须保证管道顺利竖直安装；

（4）按照确定的渗孔数量、布局和直径要求在渗管上打孔，渗管应有防止渗孔堵塞的工程措施；

- （5）渗管一端封闭，封闭端向下植入待修复土壤渗管安装孔内，将渗管安装孔和渗管之间的缝隙填实，渗管口应高出地面 0.1-0.2 m，渗管口安装备用盖（保护帽）；
- （6）按照设计将渗管、菌液输送泵和菌液培养容器通过管道连接；
- （7）安装完毕后，检查管道连接，进行开泵测试，若有漏液及时处理；
- （8）根据修复区域所需菌液用量及渗透速度计算每个区域总的渗透时间，做好相应的施工组织；