ICS 13.080
CCS Z 05

团 体 标 准

T/ACEF ×××—××××

锑矿区锑砷污染土壤原位矿化修复技术指南

Technical guidelines for in-situ mineralization remediation of antimony and arsenic contaminated soil in antimony mining areas

（征求意见稿）

××××-×-×发布 ××××-×-×实施

中华环保联合会 发 布

ACEF

目　　次

前言 II
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　总体要求 1
5　工作程序 2
6　工程设计与实施 2
7　监测与评估 5

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。

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。

本文件由有研资源环境技术研究院（北京）有限公司提出。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件起草单位：有研资源环境技术研究院（北京）有限公司、广西博世科环保科技股份有限公司

锑矿区锑砷污染土壤原位矿化修复技术指南

1 范围

本文件规定了锑矿区锑砷污染土壤原位矿化修复的总体要求、工作程序、工程设计与实施要点、监测与评估等内容。

本文件适用于锑采、选、冶区域及其周边的锑砷污染土壤的原位矿化修复。

2 规范性引用文件

下列文件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 32326 工业固体废物综合利用技术评价导则

HG/T 20719 微生物法修复化工污染土壤技术规范

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

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/T 415 环保用微生物菌剂环境安全评价导则

HJ 1282 污染土壤修复工程技术规范固化/稳定化

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

原位矿化 in situ mineralization

在锑矿区锑砷污染土壤的原始位置将土壤中锑砷污染物转化为稳定的矿物。

3.2

矿化材料 mineralized materials

能够通过化学或生物作用促进或参与土壤中污染物生成稳定矿物的材料。

4 总体要求

4.1 锑矿区锑砷污染土壤原位矿化应遵循“原位修复、长效稳定、成本低廉、环境友好”原则。

4.2 在进行修复前，应获取地块污染调查结果，应包括污染地块特征、土壤污染状况、矿化修复范围和矿化修复标准。

4.3 材料的选择、配比、投加量、投加方式、工艺设计和施工不应对地块及周边环境造成二次污染。

4.4 应根据土壤调查结果、用途规划与土壤功能，合理选择矿化工艺与矿化材料，因地制宜进行原位矿化修复工艺设计，使土壤原位矿化修复工程切实可行。

4.5 锑矿区锑砷污染土壤原位矿化工程设计与施工，应符合安全生产、职业健康、交通运输、消防安全等法规及标准规定，防止对施工人员、周边人群健康和其他生态受体产生危害。

5 工作程序

5.1 锑矿区锑砷污染土壤原位矿化修复技术的工作程序见图 1。

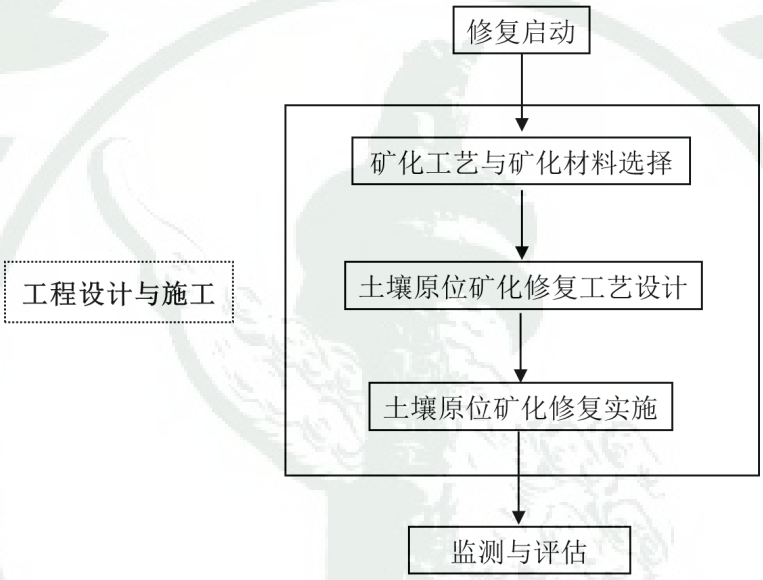

图 1 锑矿区锑砷污染土壤原位矿化修复技术的工作程序图

5.2 锑矿区锑砷污染土壤原位矿化修复技术的工作程序宜符合以下规定：

a) 工程设计包括矿化工艺与矿化材料选择和土壤原位矿化修复工艺设计，根据材料特征，工艺设计划分为微生物制剂矿化工艺设计、强化微生物矿化材料矿化工艺设计、胶凝材料矿化工艺设计，为技术实施提供依据。

b) 宜根据确定的土壤原位矿化修复工艺，开展修复技术实施。

c) 宜根据监测结果，评估土壤矿化效果是否达到要求。若未达到修复效果，则需对局部区域重点开展矿化修复。

6 工程设计与实施

6.1 一般规定

6.1.1 矿化材料的选择应满足污染土壤原位矿化后毒性浸出浓度符合管控要求，且绿色环保。

6.1.2 矿化修复工艺设计与实施内容主要包括矿化材料制备、矿化材料施加、过程监控、长期维护。

6.1.3 矿化修复工程实施前应进行场地清理，探测并清除可能影响施工的障碍物，确保施工安全和工艺流程的顺畅。

6.1.4 矿化材料的制备流程与处理参数，应根据小试、中试实验确定，必要时可开展模拟实验并根据其结果确定。

6.1.5 矿化修复工程实施的过程监控主要包括处理后运行工艺参数、土壤污染物毒性浸出浓度、赋存形态。

6.2 矿化工艺与矿化材料选择

6.2.1 矿化工艺选择

6.2.2.1 应根据锑矿区锑砷污染土壤的用地规划和土壤特征选择不同组合的矿化材料（微生物制剂、强化生物矿化材料、胶凝材料）：

——土壤用途规划为农业用地、工业用地、商业用地等，且需保证其土壤功能，宜利用微生物制剂、强化生物矿化材料；优先选用低成本的微生物制剂，当微生物矿化效果不足以达到修复指标时，协同一种或多种强化材料形成强化生物矿化材料，以提高污染物矿化效率；

——土壤用途规划为工业用地、商业用地（除农业用地）等，锑砷总量高且无需保留土壤功能，宜选用胶凝材料，原位加固硬化污染土壤形成矿化污染物的工程土方材料。

6.2.2 矿化材料选择

6.2.2.1 微生物制剂的选择宜符合以下规定：

a）微生物制剂宜选用具有矿化锑、砷功能的菌株。根据土壤中锑的价态及污染深度分布，可选用易于实现锑矿化的锑氧化功能菌或锑还原功能菌。砷矿化功能微生物宜选用砷氧化功能菌。

b）当锑、砷共存时，宜选用同时满足耐受锑、砷、可共存生长、不存在拮抗作用的菌群，不存在拮抗作用可通过混合菌群作用效果强于单菌作用效果进行判定。

c）微生物的安全性应符合 HJ/T 415 的要求。

6.2.2.2 强化生物矿化材料的选择宜符合以下规定：

a）适用于强化生物矿化锑的强化材料包括但不限于：铁化合物、锰化合物等化学药剂、粉煤灰、蒙脱石、沸石、锰渣等天然或改性矿物材料及固体废物等，适用于强化生物矿化砷的强化材料包括但不限于：铁化合物、锰化合物等化学药剂、铁基、锰基矿物材料及其改性材料等。

b）工艺设计初期宜对微生物与强化材料之间的潜在协同效应进行详细评估，确保所选强化材料能够增强微生物的矿化能力，且对微生物的生长无毒害作用。

c）强化材料宜综合考虑高效性、经济性、生物相容性及环境安全性。

d）当锑、砷等污染物共存时，宜选用不存在拮抗作用的强化材料，不存在拮抗作用可通过强化材料作用效果强于单一强化材料作用效果进行判定。

6.2.2.3 胶凝材料的选择宜符合以下规定：

a）胶凝材料原料需富含能够促进锑、砷等污染物矿化反应的活性组分（如含钙、硅、铝等矿物），能协同促进生成具有一定结构强度及锑、砷等污染物矿化的胶凝物质，可选用原材料包括但不限于：钢渣、高炉矿渣、脱硫石膏、粉煤灰、尾矿等。

b）因地制宜选取胶凝材料原料，主要考虑高效性、经济性、易获取性及环境安全性等因素。

c）选用的固废作为胶凝材料原料，应符合 GB/T 32326 的要求，且不引入二次污染。

6.3 土壤原位矿化修复工艺设计

6.3.1 微生物制剂的矿化工艺设计

6.3.1.1 微生物的筛选、驯化、培养、接种宜参考 HG/T 20719 的规定。

6.3.1.2 宜综合考虑微生物与土壤的匹配性，必要时可调节污染土壤的理化性质，包括但不限于：调节土壤 pH 值、增加必要的营养物质、改善土壤结构等，确保微生物能够有效地进行生物修复活动。

6.3.1.3 接种设计应需考虑土壤异质性，精准设计微生物接种剂量，采用多点接种或深层注射技术，以实现微生物在污染土壤中的均匀分布和高效定殖，确保在修复区域形成有效的生物种群。

6.3.1.4 微生物制剂长期维护方案设计宜包括：土壤微生物多样性和功能的定期评估、土壤生物群落重建和植被恢复评估，以维持微生物修复效果和土壤生态系统的健康。

6.3.2 强化微生物矿化材料的矿化工艺设计

6.3.2.1 兼顾微生物生长周期和代谢动力学，确定微生物、强化材料的最佳配比和施用时机，以实现污染物矿化效率的最大化。

6.3.2.2 综合考虑环境因素（如 pH 值、营养物质、土壤结构等）对微生物活性和强化材料效能的影响，通过工艺设计实现环境条件的优化调控，确保矿化过程的稳定性和高效性。

6.3.2.3 微生物制剂相关的工艺设计应依据 6.3.1 执行。

6.3.3 胶凝材料的矿化工艺设计

6.3.3.1 宜考虑胶凝材料在极端环境下的稳定性，确保其在矿化后能够维持矿化效果。

6.3.3.2 宜根据胶凝材料的使用场景选择适宜的锑、砷等污染物浸出浓度评价方法。

6.3.3.3 宜制定详细的施工方案，主要包括：胶凝材料的施用方法、施加用量、过程监控等。

6.3.3.4 设计胶凝材料长期维护方案，定期评估胶凝材料的矿化效能。

6.3.3.5 胶凝材料的搅拌与养护设计应依据 HJ 1282 执行。

6.4 土壤原位矿化修复实施

6.4.1 微生物制剂及强化生物矿化材料的实施要点如下：

a) 在施用强化生物矿化材料时，宜优先施加强化材料，强化材料的施加方式依据 HJ 1282 执行；

b) 菌剂的施加方式依据 HG/T 20719 执行；

c) 实施过程中应实时监测土壤的温度、湿度、pH 值、氧化还原电位等关键环境参数，及时调整施加计划，以维持微生物活性和矿化反应的最佳条件。

6.4.2 胶凝材料的实施要点如下：

a）宜沿平面布置的线路方向安装导墙，利用开挖设备开挖污染土壤至设计深度；

b）采用原位搅拌法混合胶凝材料与污染土壤，形成混合均匀的浆体；

c）沿导墙构筑混合浆体模块，考虑土壤增容膨胀的影响，根据地形、土地利用等进行模块整形；

d）可采用表层覆盖等方式养护混合浆体模块，直至完全凝固，形成硬化工程土方材料；

c）可根据用地规划需求在硬化工程土方材料上方覆土、建设等。

7 监测与评估

7.1 微生物修复过程需建立监测体系，监测微生物活性、土壤中锑砷等污染物的浓度、毒性浸出浓度及潜在的生态风险，制定详尽的风险管理计划，以预防和控制修复过程中可能出现的微生物生态风险和二次污染问题。

7.2 应对矿化处理前后的污染土壤进行采样检测，采样点位置和数量宜符合 HJ 25.2 及 HJ 25.5 的规定，采样点的位置和深度覆盖整个修复范围及其周边潜在影响区域。

7.3 矿化效果监测指标包括但不限于：锑、砷等污染物的含量、毒性浸出浓度、赋存形态等，除土壤锑、砷等污染物的含量和毒性浸出浓度需达到相关标准外，应检测到含污染物的（类）矿物形态。

7.4 矿化修复技术实施过程中监测频次宜满足及时反映矿化效果、便于调整矿化材料用量的要求和时限，土壤矿化效果满足地块修复指标要求视为修复工程结束。土壤原位矿化修复工程完成后 1 年内，采样监测周期宜 1 个季度 1 次，完成 1 年后半年 1 次，完成 3 年后视为进入长期监测期，长期监测宜 1 年或 2 年 1 次。

7.5 施工现场应采取污水、扬尘、生活垃圾、施工固废等处理措施，避免对生态环境造成二次污染。

7.6 宜建立锑矿区锑砷污染土壤原位矿化修复环境管理台账，定期/不定期开展锑矿区土壤和地下水监测，并按照规定公开环境污染治理的相关信息。

7.7 通过对土壤矿化效果监测结果的分析，评估污染物水平现状，且宜与预先设置的参数指标（如毒性浸出浓度、矿物赋存形态等）比较。未达要求的，应采用局部重点加强的方式继续开展土壤矿化修复，直至全部地块达到预先设置要求。