

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

西北干旱区有色金属矿尾矿综合污染修复 技术规范

Technical specification for comprehensive pollution remediation of nonferrous metal
mine tailings in arid area of northwest China

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2023 年 12 月 29 日）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发 布

西北干旱区有色金属矿尾矿综合污染修复技术规范

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。

本文件由中国科学院新疆生态与地理研究所提出。

本文件起草单位：中国科学院新疆生态与地理研究所、浙江工业大学、新疆瀚科利达生态科技有限公司和新疆维吾尔自治区环境保护科学研究院。

本文件主要起草人：靳正忠，何崭飞，李芳国，徐新文，袁新杰，潘响亮，张道勇，黄斌，文方，杨小亮，施建飞，王鑫，徐伊婷。

本文件为首次发布。

1 范围

本文件规定了西北干旱区有色金属矿尾矿综合污染修复的技术原理、微生物菌剂、尾矿固化与表面胶结、尾矿库周边土壤重金属修复等。

本文件适合于西北干旱区有色金属矿尾矿综合污染修复。

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 13078 饲料卫生标准

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）

HJ/T 20 工业固体废物采样制样技术规范

HJ/T 166 土壤环境监测技术规范

HJ 557 固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法

JGJ/T 338 建筑工程风洞试验方法标准

NY/T 395 农田土壤环境质量监测技术规范

NY/T 1377 土壤pH的测定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 有色金属矿酸性尾矿 (Acid tailings from nonferrous metal mines)

有色金属矿石经过矿或者收有价元素后留下的呈酸性的固体废弃物。

3.2 尾矿渗滤液 (Tailings leachate)

尾矿中含硫矿物在氧气和水的共同作用下,经风化、淋溶和微生物作用,同时在降水和地下水的渗流作用下产生的,具有低pH值、高电导率、高硫酸盐和高重金属浓度的水溶液。

3.3 土壤原位修复 (Soil in-situ remediation)

不移动受污染土壤,在场地发生污染位置,对原地修复或处理的土壤修复技术。

3.4 微生物固化 (Microbial solidification)

利用微生物诱导产生碳酸钙晶体 (Microbially induced carbonate precipitation, MICP) 胶结、固化松散颗粒,改善堆体力学特性,减少水和空气侵入,降低污染物浸出的过程。

3.5 微生物胶结 (Microbial cementation)

利用微生物及其产物的胶结功能,对土壤、砂子、尾矿等堆体表面的胶结强化。

3.6 微生物菌剂 (Microbial agents)

目标微生物或有效菌)经工业化生产扩繁后,制成的固化松散颗粒,改善堆体力学特性活菌制剂。

3.7 解脲菌 (Ureolytic bacteria)

分泌脲酶,快速水解尿素为铵和碳酸根离子的微生物类群。

3.8 植物纤维毯 (Plant fiber blanket)

由上下两层固定网固定秸秆等植物纤维层并缝合制造的,具有抗风蚀、抗水蚀、固化地表、防治水土流失、储存地表水分等功能的毯状物。

3.9 植被恢复 (Vegetation restoration)

在已恢复林业生产条件的土地上,通过植物种植和配置,恢复或重建植物群落或天然更新恢复植物群落的过程。

4 技术原理

微生物诱导碳酸盐沉淀 (Microbially induced carbonate precipitation, MICP) 是基于微生物碳酸盐成矿的生物胶结、重金属钝化技术。解脲菌快速水解尿素生成 CO_3^{2-} ,并提高微环境pH;在局部高pH条件下, CO_3^{2-} 与细胞表面吸附的 Ca^{2+} 形成方解石 (CaCO_3) 沉淀;方解石有效胶结以硅酸盐为主要矿物相的尾矿颗粒。细胞表面大量产生的 CO_3^{2-} 与尾矿和土壤中的重金属阳离子形成碳酸盐沉淀,方解石晶格同时扣留重金属阳离子和阴离子,实现重金属污染修复。

5 微生物菌剂

5.1 菌种选择与检验

解脲菌应从微生物菌种保藏中心购买，菌种适应性检验可参照附录A执行。

5.2 菌剂规模化扩培

菌剂规模化扩培时，应取检验合格的菌剂，依次进行小规模摇瓶扩培和大规模发酵罐扩培，方法见附录B。

5.3 菌粉生产与保藏

菌粉扩培获得的菌液应通过喷雾干燥方法，将制成。菌粉封装后，应放置于阴凉干燥处，应避免潮湿和阳光直射，有效期应为1年。

6 尾矿固化与表面胶结

6.1 尾矿分析与诊断

- a) 尾矿采样应按HJ/T 20执行；
- b) 尾矿pH值分析应按NY/T 1377执行；
- c) 尾矿粒径应利用粒度分析仪测量；
- d) 尾矿淋滤液浸提应按HJ 557执行；
- e) 淋滤液重金属测量与污染程度诊断应按GB 8978执行；
- f) 尾矿最小起沙风速应通过风洞试验测量，最小起沙风速小于20 m/s，应判定存在尾矿风蚀扩散风险。

6.2 尾矿固化与表面胶结施工步骤

6.2.1 微生物固化胶结液配置：糖蜜培养基应按附录B的方法配置，再添加2%菌粉（w/w）和2%尿素（w/w），获得微生物固化胶结液，应在施工现场现用现配。

6.2.2 场地分区：场地分区应根据每日配置的微生物固化胶结液体积确定，方法见附录C。

6.2.3 场地平整：施工前应清除场内杂物，并对起伏较大处平整。

6.2.4 生石灰施加：对于 $\text{pH} \leq 6.5$ 的尾矿，应按附录D方法对pH调节。

6.2.5 微生物固化胶结液施加：a) 对于淋滤液超过GB 8978限定值的尾矿，应进行固化处理，应按25 L/m³的比例加入并搅拌微生物固化胶结液，方法见附录E；b) 对于最小起沙风速小于20 m/s的尾矿，应进行表面胶结处理，应按5 L/m²的比例喷洒微生物固化胶结液，方法见附录E。

6.2.6 固化体表层处理：a) 对于尾矿固化，应首先用振动棒振捣，直至尾矿表面无明显塌陷、有泥浆出现、不再冒气泡时，结束该部位振捣，并立即进行下一部位振捣；b) 振动棒应垂直于尾矿表面插入，插入深度不应小于30 cm，插点间距不应大于0.5 m，并快插慢拔均匀振捣；c) 可用刮泥板对尾矿表面粗糙部位修补、刮平。

6.2.7 胶结体植物纤维毯铺设：a) 对于尾矿表面胶结，应铺设植物纤维毯；b) 铺设时，两张相邻的植物纤维毯边缘应重叠，下风向的植物纤维毯应铺设在下层，重叠宽度不小于10 cm，并用专用锁扣

相互搭接，锁扣间距不应大于100 cm；c)应用锚固钉固定，锚固钉可选用U型钉或T型竹签，间距不应大于100 cm。

6.3 尾矿处理效果评估

6.3.1 尾矿样品采集：处理前后1、3、6、12和24个月，尾矿采样应按HJ/T 20执行。

6.3.2 监测指标与方法：a)固化体的无侧边抗压强度应利用万能试验机测量；b)淋滤液浸提应按HJ 557执行，pH值与重金属含量应按GB 8978测量；c)尾矿胶结层厚度应利用游标卡尺测量，硬度应利用土壤硬度计测量，抗剪切强度应利用三头抗剪仪测量；d)最小起沙风速测量应按JGJ/T 338执行。

7 尾矿库周边土壤重金属修复

7.1 土壤污染调查与诊断

- a) 土壤采样应按NY/T 395执行；
- b) 土壤pH、盐度和重金属分析应按GB 15618和NY/T 395执行；
- c) 土壤酸碱性、盐渍化和重金属污染程度划分方法见附录F。

7.2 土壤修复施工

7.2.1 微生物修复液配置：糖蜜培养基应按附录B的方法配置，再添加2%菌粉（w/w）和0.5%尿素（w/w），获得微生物修复液，应在施工现场现用现配。

7.2.2 场地分区：场地分区应根据污染程度确定，每个分区不应大于2500 m²。

7.2.3 生石灰施加：对于pH≤6.5的土壤，pH调节应按附录D执行。

7.2.4 盐结皮铲除：对于盐渍化土壤，应铲除土壤表面的盐结皮。

7.2.5 修复助剂施加：修复助剂应根据土壤重金属污染程度（见附录F），施加粒径1~2 mm的（0.2~0.5）kg/m²的骨炭。

7.2.6 微生物修复液施加：微生物修复液宜采用旋耕机对土壤旋耕，利用喷洒装置按附录G的比例喷洒。

7.2.7 植被恢复：a)土壤修复2个月后，在重度污染土中可种植补血草、滨藜等低积累植物，在盐碱土中可种植碱蓬、滨藜等耐盐植物；b)应铺设植物纤维网和滴灌带等设施。

7.3 土壤修复效果评估

7.3.1 土壤和植物样品采集：a)修复前后1、3、6、12和24个月，土壤采样应按NY/T 395执行；b)植被恢复后6、12和24个月，应采集植物地上部分。

7.3.2 监测指标与方法：a)土壤pH值与可提取态重金属含量分析应按GB 15618、NY/T 395和HJ/T 166执行；b)植物重金属测量应按GB 13078执行。

附录 A (资料性)

菌种适应性检验方法

- a) 将尾矿、土壤和纯水以1:1:4的质量比例混合，磁力搅拌15分钟后，沉淀4小时，收集上清液，获得尾矿-土壤溶液。
- b) 按培养基说明书配置NB培养基，培养基高温灭菌后，以20%的体积比加入上述尾矿-土壤溶液，以1%体积比的接种率接种解脲菌。
- c) 在好氧、30℃、pH和转速150 r/min条件或按菌种说明书培养条件下摇瓶培养48小时，测量菌液OD₆₀₀值。
- d) OD₆₀₀值大于0.5应为合格，可进行后续流程；否则应更换菌剂，重复上述步骤。

附录 B (资料性)

菌剂的规模化扩培方法

取合格的菌剂，首先在实验室摇瓶中扩培，获得2 L菌液。培养过程如下：按照培养基说明书配置20 L规模的NB培养基（或菌种说明书上推荐培养基），培养基高温灭菌后，以1%体积比的接种率接种菌剂，在好氧、30℃、pH和转速150 r/min条件下摇瓶培养48小时。

取上一步获得的菌液，然后再次在实验室摇瓶中扩培，获得20 L菌液。培养过程如下：将糖蜜10 g/L、硫酸铵5 g/L、碳酸氢钠5 g/L、磷酸二氢钾0.5 g/L和氯化钠5 g/L依次溶解在纯水中，配置20 L糖蜜培养基；培养基高温灭菌后，以2%接种率接种上一步菌液，在好氧、30℃、pH和转速150 r/min条件下摇瓶培养48小时。

取上一步获得的菌液，最后在工业发酵罐中扩培，获得工程所需规模的菌液。培养过程如下：按照上一步方法，在1吨规格的发酵罐中配置1立方糖蜜培养基；培养基高温灭菌后，以2%接种率接种上一步菌液，在好氧、30℃、pH、转速200 r/min和曝气量1.0 L/min条件下发酵培养48小时。可采用更大规格的发酵罐或多次发酵，获得工程所需规模的菌液。

附录 C (资料性)

场地分区方法

对于尾矿固化，按照下式计算每块场地分区的面积：

$$A_p = V_{ms} \div k_{ms} \div dt$$

其中， A_p 为每个场地分区的面积，m²； V_{ms} 为每日配置的微生物固化胶结液体积； k_{ms} 为微生物固化胶结液的施加比例，建议为25 L/m³； dt 为尾矿固化深度，m。

对于尾矿表面胶结，按照下式计算每块场地分区的面积：

$$A_p = V_{mc} \div k_{mc}$$

其中， A_p 为每个场地分区的面积，m²； V_{mc} 为每日配置的微生物固化胶结液体积； k_{mc} 为微生物固化胶结液的施加比例，建议为5 L/m²。

附录 D (资料性)

酸性尾矿和土壤的pH调节方法

对于酸性（pH≤6.5）尾矿和土壤，需施加生石灰将pH调节至6.5~7.5之间。可通过现场小试实验确定生石灰用量，步骤如下：取尾矿或土壤10 g，加入90 mL纯水，震荡；加入10滴溴百里酚兰溶液（0.1%的20%乙醇-水溶液），缓慢加入生石灰（细度>100目），并持续震荡，直至溶液黄色变为绿色，记录生石灰用量；最后计算每千克尾矿或土壤所需生石灰量。每平方尾矿或土壤所需的生石灰用量可根据下式计算：

$$M = d \times \rho \times m$$

其中，M为每平方尾矿或土壤所需的生石灰用量，kg/m²；d为尾矿固化或土壤修复深度，m；ρ为尾矿或土壤的堆积密度，g/cm³；m为每千克尾矿或土壤pH中和所需的生石灰量，kg/kg。

附录 E (资料性)

微生物固化胶结液施加方法

尾矿固化：针对颗粒粗（粒径<50 μm的比例小于5%）的尾矿，可采用渗透灌浆的方法将微生物固化胶结液注入尾矿堆中，灌浆孔以等边三角形排列，孔距设为2 m，灌浆压力为0.5 MPa；针对颗粒细（粒径<50 μm的比例大于5%）、深度大（>1 m）的尾矿，可采用高压旋喷法将微生物固化胶结液注入尾矿堆中，注浆孔以等边三角形排列，孔距设为1 m，注浆压力为20 MPa；针对颗粒细（粒径<50 μm的比例大于5%）、深度小（<1 m）的尾矿，直接喷洒微生物固化胶结液，并采用表面机械搅拌的方法将微生物固化胶结液和尾矿混合。微生物固化胶结液的施加比例为25 L/m³尾矿。

尾矿表面胶结：利用喷洒装置，以后退的移动方式将微生物固化胶结液均匀地喷洒在尾矿表面，施用量为5 L/m²。根据喷洒装置的喷洒覆盖宽度、喷洒流量，计算喷洒装置的移动速度，公式如下：

$$v = Q \div W \div K$$

其中，v为喷洒装置的移动速度，m/min；Q为喷洒流量，L/min；W为喷洒覆盖宽度，m；K为固化胶结液施用量，L/m²。

附录 F (资料性)

土壤酸碱性、盐渍化和重金属污染程度的划分方法

土壤pH<5.0为强酸性土壤；5.0~6.5为酸性土壤；6.5~7.5之间为中性土壤；7.5~8.5为碱性土壤；>8.5为强碱性土壤。

土壤含盐量0.1%~0.3%为轻盐土；0.3%~0.6%为中盐土，>0.6%为重盐土。

根据土壤重金属含量，计算地质累积指数，并诊断土壤重金属污染程度。地质累积指数计算公式如下：

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5 BE_i} \right)$$

其中，I_{geo}为地质累积指数；C_i为重金属i在土壤中的含量，mg/kg；BE_i为重金属i在当地的地质背景值，mg/kg。

根据地质累积指数，土壤污染程度共分为7级，分别为I_{geo}<0，污染级别0级，表示无污染；0≤I_{geo}<1，污染级别1级，表示无污染到中度污染；1≤I_{geo}<2，污染级别2级，表示中度污染；2≤I_{geo}<3，污染级别3级，表示中度污染到强污染；3≤I_{geo}<4，污染级别4级，表示强污染；4≤I_{geo}<5，污染级别5级，表示强污染到极强度污染；I_{geo}≥5，污染级别6级，表示极强污染。

附录 G (资料性)

微生物修复液用量计算方法

MICP技术固定重金属的基本原理是尿素水解产生碳酸根，碳酸根与钙离子和重金属离子形成沉淀，因此尿素的用量是钝化土壤重金属的关键参数。微生物修复液中尿素与菌剂的比例固定，因此菌剂用量随尿素用量变化而等比例变化。根据尿素用量，可利用下式计算每平方污染土壤的微生物修复液用量：

$$V = \frac{d \times \sum n_{HM} \times k \times 60 \text{ g/mol}}{20 \text{ g/L}}$$

其中，V为每平方土壤微生物修复液用量，L/m²；d为土壤修复深度，一般取0.2~0.4 m；Σn_{HM}为可提取态重金属的总摩尔量，mol；k为尿素的过量倍数，一般取5~20倍；60 g/mol为尿素的摩尔质量；20 g/L为修复液中尿素的含量。