

生物质、粉煤灰联合用于赤泥土壤化修复的技术规程 编制说明的内容

1.工作简况

1.1 任务来源

赤泥是氧化铝工业产生的一种强碱性大宗固体废渣。据统计，目前全球赤泥平均年产生量约 1.2-1.5 亿 t，累计堆存量已超过 40 亿 t；我国年产赤泥约 6000 万 t，累计堆存量已逾 4 亿 t。赤泥强碱性、高盐分、细粒度，使其资源化综合利用面临诸多难题，其大量堆存的环境安全问题不仅严重制约者氧化铝工业高质量发展，也给区域生态保护带来严峻挑战。近年来，赤泥堆场的植被绿化被认为是一种成本低廉、可从根本上解决赤泥堆存的环境安全问题的最为有效方法。在国家《大宗工业固体废弃物资源化利用》的多个“五规划”中也将“强化赤泥无害化安全堆存，鼓励赤泥库复垦”作为破解赤泥大量堆存问题的处置策略之一。

然而，目前国内外尚无专属的赤泥土壤化改良及修复技术标准，致使国内外相关赤泥土壤化修复理论及技术研究成果，无法在生产实践中得以推广和应用。为规范赤泥土壤化修复治理的技术方法，减少人们对赤泥土壤化修复效果及意义的争议，急需建立赤泥土壤化修复的技术规范，促进赤泥堆场的植被绿化复垦，评价其安全性，为行业发展和环境保护提供技术支撑。为此，山东理工大学资源与环境工程学院的刘爱菊教授作为标准发起人，由山东理工大学主持承担团体标准《生物质、粉煤灰联合用于赤泥土壤化修复的技术规程》的编制工作。

1.2 主要工作过程

按照《山东硅酸盐学会团体标准标准管理办法》，我们填报了《团体标准项目立项书》，并于 2024 年 10 月 25 日上报至标准技术归口单位山东硅酸盐学会。

学会组织专家对立项书进行评估同意标准立项，确定立项之后，项目负责人立即成立了标准编制小组，对所承担的任务进行资料收集、方案定制、试验材料准备等前期工作，同时参考了国内外矿山废弃地、尾矿坝的土地复垦、生态修复

等方面的法律法规以及技术方法。并结合本单位进行的相关试验，在经过多次的讨论修改之后，于 2024 年 12 月形成了征求意见稿。

1.3 主要起草单位及工作组成员

由山东理工大学组织成立了《生物质、粉煤灰联合用于赤泥土壤化修复的技术规程》标准编辑起草工作小组，包括：山东理工大学、淄博禾富农业有限公司、山东省尾矿资源化利用工程技术研究中心等单位联合起草，成员及其所承担工作，详见征求意见稿。

2.标准编制原则和主要内容

2.1 编制原则

本标准的编制遵循 GB/T 1.1—2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构与编写规则》和 GB/T 20001.4—2015 《标准编写规则 第 4 部分：试验方法》和《标准文件编写指南(第 2 版)》的要求进行编写制订的。

2.2 主要内容

2.2.1 技术原理

除高盐碱性外，赤泥颗粒细、易板结、营养贫瘠是限制土壤化生态修复的关键因素。适当增加有机质以及 Ca、Mg 等必需元素含量，有利于促进赤泥颗粒团聚和 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ 离子交换，维持微生物正常代谢以及对外界环境的适应能力，并可通过有机质生物降解产酸实现赤泥盐碱性的持续调控。

2.2.2 改良剂的选择及预处理

遵照“以废治废、节能环保、成本低廉”的原则，先后选择生活污水处理厂活性污泥、园林落叶和玉米作物秸秆为赤泥基质有机质添加改良剂。其中，采用常规土壤理化指标分析的方法，分析各改良剂对赤泥 pH、EC、保水能力、容积密度等理化性质的改良效果。综合考虑基质理化指标改良效果和材料来源丰富度等因素，本标准选择（预处理）玉米秸秆生物质作为赤泥基质的有机质添加剂，

其粉碎粒度为 2-5mm，添加质量百分比为 3%。

2.2.3 赤泥基质改良方案确定

对于赤泥基质的改良，除有机质改良剂外，常选取含钙量较高的磷石膏、粉煤灰等作为赤泥碱性调控剂。我们前期试验研究表明，较磷石膏，粉煤灰不仅可提供丰富的钙离子，同时具有质轻、多孔、吸附活性高等优势，在赤泥物理性能改良及盐碱性调控方面均优于磷石膏。因此，本研究选用 3%玉米秸秆与 2%燃煤发电厂循环流化床锅炉燃烧收集的粉煤灰作为赤泥土壤化改良的配方方案。

2.2.4 改良赤泥先锋植物筛选及景观绿化构建

选择对盐碱性耐受性高，根系发达植物 2-3 种，通过在改良赤泥基质上构建植物-微生物联合修复系统。本研究选用披碱草、狗尾草等生物量大，根系发达的植物品种，作为先锋植物，以粉黛乱草子、马蔺等作为景观绿化植物种类，改良赤泥基质上建立了植物-微生物生态恢复系统，并结合水肥管理，构建了赤泥土壤化改良复垦的技术管理体系。该改良技术措施操作简单，可实现赤泥盐碱性的持续调控，植被复垦成活率高，且重金属等污染物释放风险低，能满足土地复垦质量控制标准（TD/T 1036）以及赤泥堆场环境安全管理的相关要求。

2.2.5 赤泥土壤化改良复垦管理措施确定

在赤泥基质改良处理后，先灌水至饱和后，盖上草垫子预培养 1 个月，期间维持基质含水量维持在最大持水量的 75%左右；但播种先锋植物后，按照常规的草地绿化养护管理措施，进行养护管理；先锋植物生长季结束后，翻耕播种景观绿化植物，构建赤泥土壤化复垦植被系统，除在苗期需要一定的时期的水肥管理和养护外，其余时间均采用免养护的自然发展阶段。

2.2.6 赤泥土壤化改良效果评价及环境风险监控与管理

本研究，依据土地复垦质量控制标准（TD/T 1036）中土地复垦质量标准，

对赤泥土壤化改良复垦效果进行评价；在赤泥土壤化复垦植被系统构建阶段及绿化复垦后，依据《危险废物的鉴别标准-浸出毒性鉴别》（GB5085.3）中所规定的相关方法，定期对复垦赤泥基质中苛性钠、重金属等污染物释放情况进行监控。

3 主要试验（或验证）情况分析

本标准中产品技术指标的数字修约应符合GB/T 8170 的规定；产品质量合格判定应符合GB/T 1250 中修约值比较法的规定。

3.1 改良处理后赤泥基质的理化改良效果

按照本研究所确定改良处理方案对赤泥进行土壤化改良修复，以验证赤泥土壤化改良修复效果。本研究方案对赤泥土壤化修复改良效果如下表1 所示。

表 1 各赤泥土壤化改良处理的理化指标变化

| 理化指标 | 处理 | 培养时间（d） | | | 参照土壤 |
|-----------|------|-------------|-------------|-------------|------|
| | | 30 | 180 | 540 | |
| 容重（g/cm3） | RM | 1.21±0.45a | 1.18±0.36a | 1.22±0.26a | 0.96 |
| | F-RM | 1.01±0.25a | 1.05±0.18a | 1.03±0.22a | |
| 孔隙度（%） | RM | 36.43±4.26a | 34.01±5.17a | 37.65±2.07a | 57.5 |
| | F-RM | 53.53±6.21b | 54.37±5.76b | 58.15±4.10b | |
| pH | RM | 11.25±0.09a | 10.17±0.12a | 9.78±0.12a | 8.51 |
| | F-RM | 10.70±0.10b | 9.13±0.16b | 8.49±0.17c | |
| EC（mS/cm） | RM | 1.05±0.03a | 0.97±0.04a | 0.67±0.04a | 0.11 |
| | F-RM | 0.82±0.03b | 0.50±0.03b | 0.35±0.01b | |
| 盐碱度 | RM | 79.40±6.09a | 71.53±9.21a | 62.34±9.64a | 9.12 |
| （ESP，%） | F-RM | 66.23±7.47b | 19.74±3.38c | 8.02±0.75b | |

3.2 改良赤泥基质的肥力变化情况

按照本研究所确定改良处理方案对赤泥基质的肥力培育效果，见下表2。

表2. 各改良处理组肥力分析

| 处理组 | 营养元素 | | | |
|------|-----------|------------|------------|------------|
| | 有机质（mg/g） | 速效钾(mg/kg) | 速效氮（mg/kg） | 速效磷（mg/kg） |
| RM | 3. 65 | 20. 56 | 30. 17 | 2. 66 |
| F-RM | 13. 42 | 106. 33 | 133. 31 | 9. 33 |
| 自然土 | 11. 42 | 222. 65 | 189. 54 | 17. 91 |

3.3 改良赤泥颗粒团粒结构变化

按照本研究所确定改良处理方案对赤泥颗粒结构改良效果，见下图1。

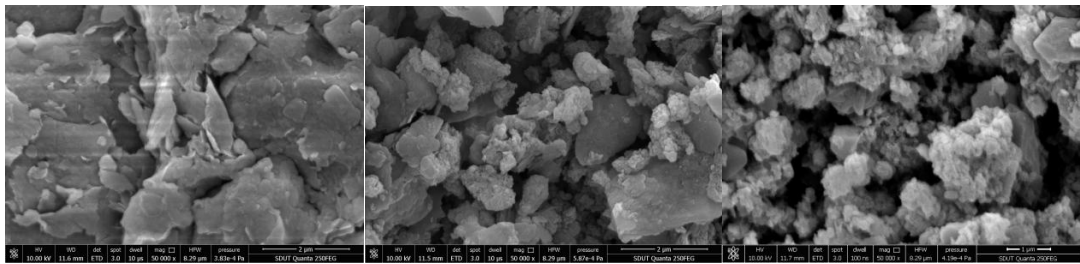


图1 各改良处理颗粒团粒形态分布特征

3.4 改良赤泥中重金属释放风险情况

按照本研究所确定改良处理方案对赤泥基质的重金属有效性情况，见下表3。

表3 各赤泥土壤化改良处理组重金属生物有效性分析

| 重金属 | 处理 | 培养时间（d） | | | 土壤环境风险筛选值 (mg/kg) |
|-----------|------|---------|-------|-------|----------------------|
| | | 30 | 180 | 540 | |
| As（ug/kg） | RM | 0. 14 | 0. 25 | 0. 80 | 25 |
| | F-RM | 0. 17 | 0. 22 | 0. 28 | |

| | | | | | |
|--------------|------|-------|------|------|-----|
| Cd (μ g/kg) | RM | 0.02 | 0.02 | --- | 0.6 |
| | F-RM | 0.02 | 0.01 | -- | |
| Pb (ug/kg) | RM | 0.57 | 0.55 | 0.15 | 240 |
| | F-RM | 0.16 | 0.13 | 0.07 | |
| Cr (ug/kg) | RM | 0.41 | 0.32 | 0.36 | 350 |
| | F-RM | 0.14 | 0.15 | 0.20 | |
| Ni (ug/kg) | RM | 0.25 | 0.19 | 0.10 | 190 |
| | F-RM | 0.36 | 0.18 | 0.13 | |
| | F-RM | 16.73 | 5.73 | 4.42 | |

注：本标准未检测赤泥土壤的放射性水平，但土壤化修复改良赤泥主要用于园林绿化或矿区复垦土壤源，依据已有文献资料（李洪达，等，2020. 赤泥放射性的研究现状与进展），其放射性水平符合 GB 45437—2025 中规定的土壤中残留放射性可接受水平的筛选值。

4 标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明

本标准中无涉及已发明的专利。

5 产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况

该标准为首次制定，暂未涉及产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况。

6 采用国际标准和国外先进标准情况

与国际、国外同类标准水平的对比情况，国内外关键指标对比分析与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况；

本标准未采用国际标准和国外先进标准，国内外无相关指标分析和测试，故无法比较。

7 与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准按照国家标准 GB/T1.1《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和

编写规划》进行起草制定，本标准无相关强制性标准可参考。

8 重大分歧意见的处理经过和依据；

在制定标准过程中未曾出现重大分歧意见。

9 标准性质的建议说明

本标准为您推荐性标准，标准的实施对推进地方赤泥规模化安全处理与利用具有重要的参考意义。

10 贯彻标准的要求和措施建议

本标准为首次制定，建议在实施过程中先试行一段时间，根据实际应用情况，作进一步修订完善，以适应发展要求。

11 废止现行相关标准的建议；

本标准为新制定标准，无废止现行相关标准的建议。

12 其它应予说明的事项。

无