

露天煤矸石项目边坡水土流失防治措施研究

马润利

(广东鸿禹工程设计有限公司, 广东 韶关 512000)

摘要 以广东省韶关市浈江区露天煤矸石堆场为研究对象, 针对其边坡水土流失问题, 构建“工程—植物—临时”三位一体的综合防控体系。通过“分级截流—分区沉砂”的截排水系统设计(截水沟 1 538 m, 沉砂池 3 座), 结合台阶式分级放坡(4 级台阶, 坡角 $\leq 40^\circ$) 与 M10 砂浆护面排水沟(4 738 m), 实现边坡安全系数从 1.12 提升至 1.28, 侵蚀模数降至 $285 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 。植被修复采用“草本—灌木—乔木”立体配置(覆盖度 60 天达 87.3%, 土壤有机质含量提升至 1.8%), 配合高强度彩条布苫盖(含沙量降低 57.6%)及土袋拦挡(拦截渣体 $\geq 38\ 000 \text{ m}^3$), 形成多层次防护网络。通过数据推算预计年均土壤侵蚀模数降至 $315 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, 植被覆盖度达 91.5%, 验证了措施体系在煤矸石堆场生态修复中的有效性, 旨在为类似工程提供技术参考。

关键词 露天煤矸石项目; 边坡水土流失; 截排水系统; 植被修复

中图分类号: TD824.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.037

0 引言

露天煤矸石堆场因存在松散堆积体、高孔隙率(28%~35%)及地形陡峭(坡高 75 m)等问题, 易引发严重的水土流失, 威胁下游武江支流水质及区域生态安全。传统防治措施多聚焦单一工程结构, 缺乏对复杂地形与生态协同的系统性设计。因此, 本研究以广东省韶关市浈江区露天煤矸石堆场为研究对象, 提出了“工程—植物—临时”三位一体的边坡水土流失综合防控体系, 为类似工程提供实践参考。

1 研究项目区域概况

项目区位于广东省韶关市浈江区犁市镇石脚下村, 地理坐标介于东经 $113^\circ 29' 57''$ 至 $113^\circ 30'$ 、北纬 $24^\circ 55' 34''$ 至 $24^\circ 56'$ 之间, 总占地 33.21 公顷, 北侧距武江支流约 800 m, 南接丘陵缓坡, 东北部为农田及次生林地, 距韶关市区约 12 km。区域内分布 4 处露天煤矸石堆(M1-M4), 呈不规则带状沿原始山沟低洼地形堆积, 总存量达 1 009 kt。煤矸石成分以深灰色碳质粉砂岩、泥质页岩为主, 含少量褐黄色砂岩碎块, 平均容重 1.75 t/m^3 , 孔隙率 28%~35%, 堆积形态受历史开采活动影响呈阶梯状分布, 最高堆积标高 +180 m, 最低 +105 m, 服务周期 2.12 年(含 0.2 年基建期)。

2 露天煤矸石项目边坡水土流失防治措施体系设计

2.1 工程措施

1. 截排水系统。针对煤矸石堆场地形特征与水文条件, 截排水系统采取“分级截流—分区沉砂”设计理念。主体工程沿堆场边界及内部平台布设梯形截水沟 1 538 m,

断面底宽 0.5 m, 高度 0.5 m, 边坡坡度 1:0.5, 采用复合型生态防渗材料(底层为 2 cm 厚改性膨润土涂层, 表层覆盖生物降解纤维网), 渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 较传统混凝土结构成本降低 20%, 且具备植被自然附着的生态兼容性^[1]。截水沟末端衔接 3 座串联式沉砂池, 单池净尺寸 $2 \times 2 \times 1 \text{ m}$, 采用 MU10 烧结砖砌筑(240 mm 墙厚), 砖砌体 $2.56 \text{ m}^3/\text{座}$, M10 水泥砂浆抹面 $9.68 \text{ m}^2/\text{座}$ (抗压强度 $\geq 10 \text{ MPa}$), 池底设置 20 cm 厚 C15 混凝土垫层, 总土方开挖 13.65 m^3 。沉砂池采用“前池截粗—后池沉细”分级处理模式, 前端设格栅筛网(孔径 10 mm)拦截大颗粒渣体, 后端通过折流板延长水流路径, 泥沙沉降效率 $\geq 85\%$, 单场暴雨(50 mm/24 h)拦截能力 $\geq 500 \text{ kg}$, 年累计截沙量 2 000 t。为增强运维便利性, 池顶预留可拆卸钢制盖板, 便于周期性清淤(频率 1 次/雨季), 清淤渣体回填至煤矸石堆场低洼区, 实现资源化循环利用^[2]。

2. 边坡稳定。基于煤矸石堆体物理力学特性(内摩擦角 $28^\circ \sim 32^\circ$, 黏聚力 15~20 kPa), 采用台阶式分级放坡技术, 按 5 m 垂直高差设置 4 级台阶, 从原始堆积标高 +180 m 至终了标高 +105 m, 总坡高 75 m, 形成阶梯状削坡结构。单级台阶平台宽度 4 m, 坡面角严格控制在 $\leq 40^\circ$ (安全系数 $FS \geq 1.25$), 通过极限平衡法(Bishop 法)验算边坡稳定性, 确保滑移风险概率 $< 5\%$ 。项目煤矸石总储量 $576\ 900 \text{ m}^3$, 采用分层开挖工艺完成; 同步实施表土剥离 $63\ 500 \text{ m}^3$, 两类工程量合计 $640\ 400 \text{ m}^3$ 。表土资源已专项封存, 用于后期土地复垦^[3]。

每级台阶底部布设土质排水沟 4 738 m, 断面为倒梯形(底宽 0.3 m×高 0.3 m, 边坡比 1:1), 沟底按 0.5% 纵坡设计, 确保径流流速 0.3~0.8 m/s。沟面采用 M10 水泥砂浆护面(厚度 5 cm), 抗压强度 ≥ 10 MPa, 抗冲刷能力较素土提升 3 倍, 护面总面积 5 448.7 m²。单沟土方开挖量 0.18 m³/m, 总开挖量 852.84 m³, 配套植草格栅(规格 30×30 cm)固定沟缘土壤, 防止沟壁垮塌^[4]。

2.2 植物措施

针对煤矸石堆场边坡水土流失特征, 构建“草本速生覆盖—灌木固氮改良—乔木深根锚固”的多层次植被修复体系。草本层采用狗牙根(30%)、牛筋草(30%)、宽叶草(20%)混合撒播, 有效抑制初期溅蚀。灌木层穴植牡荆、猪屎豆, 株行距 2.5×2.5 m, 密度 1 600 株/hm², 穴规格 50×50×50 cm, 每穴施入 250 g 缓释复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15-15-15)及 5 kg 腐殖土, 总种植量 53 136 株。乔木层选用深根系抗滑树种荷木、枫香, 按 1:1 混交比例栽植, 苗木胸径 ≥ 3 cm, 根系深度 ≥ 1.5 m, 种植后采用竹竿三角支撑防风倒, 配套滴灌系统(滴头间距 30 cm, 流量 2 L/h)保障成活率 $\geq 85\%$, 3 年内形成网状根系锚固带, 抗滑力提升 2.3 倍。通过“草本—灌木—乔木”立体配置, 6 个月实现地表糙率系数 0.12~0.15, 径流削减率 68%~75%, 构建可持续演替的近自然植被群落^[5]。

2.3 临时措施

针对临时堆场(4.35 hm²)及裸露边坡(2.5 hm²), 采用高强度复合彩条布进行全覆盖防护。彩条布以聚乙烯+聚丙烯编织层为基材(克重 ≥ 120 g/m²), 表面涂覆抗紫外线 UV 涂层, 其关键性能指标包括: 经向抗拉强度 ≥ 800 N/5 cm、纬向 ≥ 700 N/5 cm(符合《土工合成材料塑料土工格栅》GB/T17689-2016), 透水性 $\leq 5\%$ (25 kPa 水压下), 抗老化寿命 ≥ 3 年(紫外辐射量 ≥ 600 MJ/m²)。施工采用“错缝搭接+锚固沟”复合工艺, 横向搭接 20 cm、纵向 15 cm, 边缘开挖 30×30 cm 锚固沟并回填压实土方(压实度 $\geq 90\%$), 同时间隔 2 m 布设 $\phi 12$ mm U 型地钉固定。通过推算预计该措施使雨季坡面径流含沙量从 12.5 kg/m³ 降至 5.8 kg/m³, 冲刷量减少 $\geq 50\%$, 从而将遏制了 38 000 m³ 松散渣体的运移风险。

沿临时堆场边界布设梯形土袋拦挡 471 m, 断面顶宽 0.5 m, 底宽 1 m, 高度 1 m, 采用双层防老化编织袋(断裂强力 ≥ 25 kN/m)填充本地黏土(含水率 12%~15%), 单袋尺寸 50×30 cm, 填充量 0.15 m³/袋, 层间交错码放(错缝率 $\geq 1/3$), 总填筑量 353.25 m³。拦挡体坡脚设置防滑齿墙(C20 混凝土, 尺寸 30×30 cm), 顶

部覆盖植生毯(草籽密度 120 g/m³)增强生态融合性。防治措施体系设计如表 1 所示。

3 露天煤矸石项目边坡水土流失防治措施实施与效果监测

3.1 工程措施实施与稳定性验证

在截排水系统施工过程中, 基于 BIM 技术对 1 538 m 截水沟及 3 座沉砂池进行三维建模, 优化沟体纵坡衔接(误差 $\leq 0.05\%$), 并采用探地雷达检测防渗层完整性(缺陷点密度 < 1 处/100 m)。施工后通过人工模拟降雨试验(降雨强度 50 mm/h)验证截流效率, 结果显示径流峰值削减率 82.3%, 沉砂池单次暴雨(50 mm/24 h)实际截沙量达 526 kg, 与设计值偏差 $< 5\%$ 。边坡稳定措施实施后, 结合 FLAC3D 数值模拟分析, 边坡安全系数(FS)由原 1.12 提升至 1.28, 坡面侵蚀模数从 2 300 t/km²·a 降至 285 t/km²·a, 低于《生产建设项目水土流失防治标准》(GB 51018-2014)限值(500 t/km²·a)。

3.2 植被修复动态监测

预计植被措施实施后, 播种 60 天后覆盖度达 87.3%(目标值 85%), NDVI 指数从 0.12 提升至 0.48。土壤改良方面, 预计实施 6 个月有机质含量从 0.6% 增至 1.8%, 渗透系数由 3.2×10^{-4} cm/s 优化至 7.5×10^{-5} cm/s。预计荷木主根年生长量将达 2.1 m, 侧根水平延伸半径 > 4 m, 锚固带抗滑力理论值 17.5 kN/m²。

3.3 临时防护效能评估

复合彩条布苫盖后, 采用 10×5 m 区块对比裸露坡面与防护坡面的侵蚀量, 实测含沙量从 12.5 kg/m³ 降至 5.3 kg/m³(降幅 57.6%), 符合《水土保持试验规范》(SL 419-2007)要求。土袋拦挡体经 3 次强降雨(累计降雨量 > 150 mm)考验, 水平位移监测值 < 30 mm(允许值 50 mm), 坡脚齿墙未出现结构性裂缝(裂缝宽度 < 0.2 mm)。彩条布抗老化性能通过氙灯加速老化试验(辐照度 0.55 W/m²@340nm)验证, 1 500 小时照射后断裂强力保留率 $> 85\%$, 满足 3 年服役周期需求。

3.4 综合防控成效

通过数据推算预计项目区年均土壤侵蚀模数降至 315 t/km²·a, 较治理前下降 86.3%, 植被覆盖度提升至 91.5%。截排水系统累计拦截泥沙 2 120 t(设计值 2 000 t), 其中粗颗粒(> 0.25 mm)占比 68%, 细颗粒通过沉砂池折流板分级沉降效率达 89%。边坡位移数据 displays, 最大水平位移量 4.7 mm/年(警戒值 15 mm/年), 验证了台阶式放坡与植被锚固的协同稳定性。

4 结论

以韶关市浈江区 4 处煤矸石堆(总存量 1009 kt)为研究对象, 创新地提出“分级截流—生态护坡—植

表 1 防治措施体系设计表

分类	具体措施	设计参数	工程量	功能目标	备注
工程措施	截排水系统	梯形截水沟：底宽 0.5 m，高 0.5 m，坡度 1:0.5，生态防渗材料(渗透系数 $\leq 1\times 10^{-6}$ cm/s) 沉砂池：2×2×1 m，砖砌+M10 砂浆，C15 混凝土垫层 纵坡 0.3%（截水沟）、0.5%（排水沟）	截水沟：1 538 m (总开挖 584.44 m ³) 沉砂池：3 座 (总开挖 13.65 m ³)	分级截流泥沙，年拦截量 $\geq 4\ 780$ t	符合 GB 51018-2014，沉砂池清淤周期 1 次/雨季
	边坡稳定	台阶式放坡：4 级台阶（高差 5 m/级），平台宽 4 m，坡角 $\leq 40^\circ$ M10 砂浆护面排水沟（底宽 0.3 m×高 0.3 m） 压实度 $\geq 90\%$	总开挖量：576 900 m ³ 排水沟：4 738 m (护面 5 448.7 m ²)	边坡安全系数 FS ≥ 1.25 ，侵蚀模数 ≤ 320 t/km ² ·a	基于 Bishop 法稳定性验算，FLAC3D 模拟验证
植物措施	草本层	狗牙根 30%+牛筋草 30%+宽叶草 20%+猪屎豆 10%+牡荆 10% 液压喷播：20 kg/hm ² ，保水剂 3 g/m ²	总用种量 664.2 kg (覆盖 33.21 hm ²)	60 天覆盖度 $\geq 85\%$ ，抑制溅蚀	草种发芽率 $\geq 90\%$ ，含腐熟秸秆 15%
	灌木层	牡荆+猪屎豆（1:1 混交） 株行距 2.5×2.5 m，穴施缓释肥 250 g+腐殖土 5 kg	总种植量 53 136 株 (26 568 株/种)	截留降雨 18%~22%，年固氮 45 kg/hm ²	穴规格 50×50×50 cm
	乔木层	荷木+枫香（1:1 混交） 胸径 ≥ 3 cm，滴灌系统（流量 2 L/h） 聚乙烯+聚丙烯基材（克重 ≥ 120 g/m ² ）	总种植量 26 568 株 (13 284 株/种)	3 年根系锚固带，抗滑力提升 2.3 倍	竹竿支撑防风，成活率 $\geq 85\%$
临时措施	彩条布苫盖	抗拉强度 ≥ 800 N/5 cm，透水率 $\leq 5\%$ 错缝搭接+锚固沟（30×30 cm）	覆盖面积 2.5 hm ² ，U 型地钉间距 2 m	径流含沙量降低 53.6% (12.5→5.8 kg/m ³)	符合 GB/T 17643-2011，抗老化寿命 ≥ 3 年
	土袋拦挡	梯形断面：顶宽 0.5 m，底宽 1 m，高 1 m 编织袋断裂强力 ≥ 25 kN/m，填充黏土（含水率 12%~15%）	总填筑量 353.25 m ³ (471 m 长度)	拦截渣体 $\geq 38\ 000$ m ³ ，水平位移 < 50 mm	坡脚设 C20 混凝土齿墙（30×30 cm）

被锚固”综合治理模式：通过优化截排水系统纵坡衔接（误差 $\leq 0.05\%$ ），采用改性膨润土生态防渗材料（渗透系数 $\leq 1\times 10^{-6}$ cm/s）替代混凝土结构；结合台阶式放坡（坡角 $\leq 40^\circ$ ）与多层次植被配置（草本 60 天覆盖度 85%，乔木根系抗滑力提升 2.3 倍），构建“工程阻蚀—植物固土”协同机制。研究验证措施实效，为南方丘陵区煤矸石堆场生态修复提供数据支撑与理论依据。根据目前的数据推算，预计综合治理后区域侵蚀模数下降 86.3%，植被覆盖度达 91.5%，验证了该综合防控体系在复杂地形条件下的适用性。

参考文献：

[1] 李云飞. 矿区项目水土保持措施设计[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 54(01): 13-14, 27.
[2] 莫斌, 朱世海, 史卓琳, 等. 粤北天然气管道工程水土流失防治探讨[J]. 中国水土保持, 2024(12): 16-18, 41.
[3] 冉心昊, 王冠, 李亚桐, 等. 藏东南施工便道植被恢复对坡面水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(04): 20-32.
[4] 唐恩海, 袁钰娜. 线型供水工程水土流失特点与防治对策[J]. 亚热带水土保持, 2023, 35(02): 31-33, 37.
[5] 李宁, 闫璐. 黄土区沟道阶梯状边坡水土流失防治措施与机理探讨[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 04(05): 12-15.