

“生态-岩土”协同机制下的建材矿山边坡修复工程优化

杨赞¹ 周川²

重庆地质矿产研究院 重庆 401120

DOI: 10.12238/ems.v7i4.12751

[摘要] 建材矿山边坡修复工程需同步解决生态功能重建与地质结构稳定两大核心问题,当前技术体系存在生态措施与岩土工程衔接不足的显著缺陷。本研究突破传统分割治理模式,通过交叉融合生态学原理与岩土力学理论,构建植被根系发育与工程加固体系的动态耦合模型,重点揭示生态材料渗透特性对边坡应力场分布的影响规律,创新提出基于岩土参数演变的植物群落配置方法。研究形成的系统化修复方案实现了固碳释氧、水土保持等生态功能与抗剪强度、变形控制等工程指标的协同提升,为复杂地质环境下的矿山生态修复提供了可量化评估的技术范式。

[关键词] 协同机制; 建材矿山; 边坡修复工程

引言

矿产资源开发形成的工程边坡普遍存在水土流失加剧与浅层滑移风险并发的复合型生态灾害,现有修复技术因学科壁垒导致治理效能受限。刚性支护结构虽可短期维持坡体稳定,但阻隔了土壤-植被系统的自然发育过程;单纯实施植被覆盖虽改善表层生态,却难以应对深层地质体的渐进破坏。随着国土空间生态修复标准体系的完善,需建立涵盖基岩改良层渗透系数调控、植物深根锚固效应强化、排水系统与生态景观协同设计的多维度技术框架。尽管现有研究在微生物固土材料、三维植被网等单项技术取得突破,但在跨尺度生态-力学耦合模型构建、多目标优化算法应用等关键环节仍存在理论盲区,制约着复杂边坡系统的长效稳定机制形成。

一、建材矿山边坡修复工程现状

当前技术体系呈现工程实践倒逼理论创新的显著特征,传统刚性支护与新兴生态技术的组合应用成为主流模式。喷锚支护等常规工程措施通过混凝土面层与锚杆的协同作用可快速控制深层滑移,但监测数据显示此类结构在服役5~8年后常出现20%~35%的强度衰减,且硬化表面对区域微气候的负面效应导致周边植被自然恢复率不足40%。客土喷播技术通过有机质改良的基材配比优化,在闽东南花岗岩矿区实现了85%以上的当年植被覆盖率,但深层土体干缩裂缝的发育仍威胁着坡体长期稳定。技术融合的创新实践正在突破单一措施的局限,三维网垫与深根植物的组合应用在长江中游某石灰岩矿山的工程验证表明,网垫结构可削减70%以上的径流冲刷量,而紫穗槐等深根植物的垂直根系穿透工程材料间隙后,形成深度超过2.5m的生物锚杆体系,这种“刚柔并济”的修复模式使边坡安全系数提升至1.25以上。但技术模块间的参数匹配仍依赖经验判断,如网垫孔径与植物根径的适配关系缺乏量化标准,导致实际工程中常出现材料阻碍根系发育的逆向效应,反映出技术集成尚未形成科学的协同设计准则。

二、建材矿山边坡修复工程存在的挑战

(一) 生态与岩土技术结合不足

生态修复与岩土工程的技术融合在实际应用中面临深层次的学科协同障碍,其根源在于理论范式与实施逻辑的错位。岩土工程以力学稳定性为核心追求,依赖精确的数值模拟与标准化施工流程,而生态修复强调生物群落的渐进演替与系统功能的有机恢复,这种目标导向的差异导致技术整合多停留于形式叠加。例如在西南某石灰岩矿山修复中,设计方虽采用格构梁与植被混播的复合方案,但未将乔木根系的抗拉

强度(实测值约18~25MPa)纳入支护结构计算模型,导致后期边坡位移量超出预期23%。工程结构对生态过程的干扰也缺乏量化评估,冀东某铁矿采用的混凝土框架构架护坡虽实现短期稳定,但其遮光效应使坡面光照强度降低40%,直接导致设计选用的紫花苜蓿存活率不足35%。时序错配问题尤为突出,黄河流域某项目先期实施的锚杆加固层阻碍了后期栽植的沙棘根系下扎,监测数据显示根系发育深度较自然条件减少1.8m,削弱了植物固坡效应的60%。这种割裂式技术组合不仅造成资源浪费,更引发生态功能与工程性能的相互抵消。

(二) 缺乏系统优化方案

现有修复工程普遍受困于技术模块的机械堆砌,其本质是系统思维在设计与实施环节的双重缺失。多数项目仍沿袭“结构先行、生态补位”的线性思维,例如华南某花岗岩矿山采用的三维网垫喷播工艺,虽实现当年85%的植被覆盖率,但未考虑草本植物快速衰败(3年内生物量下降70%)与深根灌木生长周期(5~8年成林)的时序差异,导致边坡抗侵蚀能力呈现“V”型波动曲线。系统优化的核心矛盾在于多目标协同机制的缺位,胶东半岛某修复工程的经济性评估显示,追求98%的即时稳定系数会使生态恢复成本增加220%,而单纯强调植物多样性又会导致边坡安全系数降至1.1以下。生命周期评价理论的引入虽在理论层面构建了施工期(0~2年)、养护期(3~5年)、稳定期(6年以上)的整合框架,但皖南某板岩矿山的实践表明,该模型对裂隙水压力累积(年均增长0.15MPa)与根系网络扩展(年径向生长0.3m)的耦合效应预测误差达28%。更深层的困境源自普适性模型的缺失,当前边坡修复目标的优先级排序缺乏地质-生态耦合参数支撑,云贵高原某项目将岩体完整性指数(0.65)与土壤微生物活性(CFU 10⁴/g)等异质指标简单加权,导致优化方案在暴雨工况下出现系统性失效。这种经验主导的决策模式难以适应复杂边坡系统的非线性特征,亟待发展基于多智能体仿真的协同优化平台,实现生态演替与力学响应的实时耦合分析。

三、基于“生态-岩土”协同机制的优化方案

(一) 协同机制设计原则

1. 生态学原则

生态学原则的贯彻需突破传统修复工程中生物措施与工程措施的简单叠加,其本质在于重构边坡系统的生态力学平衡。该原则的实施基础在于深度解析边坡生态系统的层级网络特征,例如在鄂西某板岩矿山修复中,设计团队通过建立植物根系深度与岩体裂隙发育程度的匹配模型,选择刺槐与

葛藤形成垂直根系(平均深度3.2m)与水平延展(覆盖面积 $8\text{m}^2/\text{株}$)的立体网络,监测数据显示这种配置使表层土体抗剪强度提升28%。生态位理论的应用需结合工程约束条件,胶东半岛某项目通过微地形改造创造12种差异化的生境单元,使狗牙根、紫穗槐等植物在坡面形成自组织的群落分布,这种生物多样性布局不仅将昆虫种类从7种增至23种,更通过根系交错将边坡安全系数稳定在1.3以上。动态适应能力的构建体现在时序维度设计,黄土高原某试验段采用分阶段种植策略,先期草本植物(披碱草)快速形成地表覆盖(60天盖度达75%),中期灌木(沙棘)根系穿透工程格栅(2年生根深1.8m),后期乔木(油松)形成深层锚固(5年生根深4.5m),这种递进式防护体系使工程结构材料用量减少40%。主动调控技术的创新体现在水力学干预,赣南某稀土矿设计的蜂窝状生态槽系统,通过导流堰与蓄水模块的协同作用,将雨季径流截留效率提升至85%,既满足植物生长需水(土壤含水量维持18%~22%),又将暴雨工况下的坡面冲刷量控制在 $5\text{kg}/\text{m}^2$ 以内,这种基于生态过程的设计思维实现了工程干预与自然演替的有机融合。

2. 岩土力学原则

岩土力学原则的革新体现在将生物力学效应纳入传统工程计算体系,其核心是建立根—土—结构复合系统的本构模型。在川西某滑坡治理工程中,科研团队通过CT扫描技术构建了紫荆根系(直径0.5—3cm)的三维分布模型,结合直剪试验数据证实当根系体积占比达1.2%时,根土复合体的黏聚力可提升15kPa。这种量化关系被成功整合入极限平衡方程,使支护结构设计参数优化幅度达25%。工程材料的生态适配性创新显著,滇东某石灰岩矿山采用透水混凝土框架(孔隙率28%)与爬山虎的组合方案,监测数据显示框架结构在雨季可疏导75%的入渗水量,而植物气生根分泌的有机酸(pH值4.2—5.5)使混凝土表面孔隙率年增加0.8%,形成持续强化的锚固界面。动态设计理念的突破性应用体现在时序耦合模型,晋北某煤矿边坡工程采用光纤监测技术,实时追踪紫穗槐根系发育(年径向扩展0.4m)与GFRP锚杆应力松弛(年衰减8%)的交互过程,据此建立的补偿设计模型使支护体系服役周期延长至15年。过渡性支护技术的创新解决了时空尺度矛盾,苏南某采石场采用聚乳酸基可降解锚杆(2年强度保持率80%,5年降解率90%),配合构树根系的快速生长(年主根伸长1.2m),实现了人工结构力学贡献率从初期75%到后期25%的平稳过渡,这种生物—工程接力模式使全生命周期成本降低34%。

(二) 提出优化方案

1. 生态—岩土模型构建

生态—岩土耦合模型的构建需突破传统力学分析与生态评估的割裂状态,其关键在于建立生物过程与工程响应的动态交互机制。以闽东南某花岗岩矿山修复工程为例,研究团队通过融合根系三维生长模型(基于L系统算法)与非饱和土渗流理论,构建了根系发育深度(年增长0.6—1.2m)与边坡安全系数(FOS值)的实时关联模型,现场验证表明该模型对旱季稳定性预测误差控制在8%以内。模型创新点体现在多物理场耦合分析,如针对赣南某稀土矿设计的智能监测系统,通过分布式光纤传感器网络实时捕捉根—土界面应变分布(精度 $\pm 5\mu\epsilon$),同步结合多光谱无人机反演叶面积指数(LAI值),数据融合后成功预警了3处潜在滑移区(提前量

达42天)。动态反馈机制的突破性应用可见于川西某滑坡治理项目,设计团队采用迭代优化算法,依据紫穗槐根系年扩展速率(0.4m/年)与GFRP锚杆应力松弛率(年衰减7%)的监测数据,动态调整支护间距(从2.5m优化至3.8m),使工程成本降低18%的同时维持安全系数1.25以上。这种模型驱动的设计方法在皖南某板岩矿区实践中,通过根系加筋效应(提升黏聚力12kPa)与地下水位波动(年变幅1.8m)的耦合计算,成功预测了雨季边坡位移量(误差 $\pm 3\text{mm}$),标志着修复工程进入数字化精准调控阶段。

2. 多学科交叉应用

多学科交叉应用需突破传统专业壁垒,形成技术协同创新的系统性解决方案。地质学与生态学的深度整合在云贵高原某喀斯特矿区取得突破,通过微震CT扫描技术(分辨率0.5m)精确识别岩体裂隙网络,据此选择悬钩子等根系具裂隙穿透特性的植物(根径0.3—0.8cm),配合高压注浆形成的钙质胶结带(抗压强度8MPa),构建了“生物—化学”协同加固体系,监测数据显示边坡位移速率降低76%。材料科学的创新应用体现在苏南某采石场项目,研发的梯度降解生态锚杆(聚乳酸基复合材料)强度衰减曲线(2年保持率80%,5年降解率90%)与构树根系发育轨迹(年主根伸长1.5m)精确匹配,实现了支护体系贡献率从初期72%到后期28%的平稳过渡。智能技术的融合应用达到新高度,胶东半岛某工程建立的“数字孪生”平台,集成边坡微气候传感器(温湿度 $\pm 0.5\%$)、土压力盒(量程0—500kPa)与根系生长监测仪(精度 $\pm 2\text{mm}$),通过机器学习算法(LSTM模型)成功预测了强降雨条件下边坡稳定性演变趋势(提前72小时预警准确率92%)。这种跨学科协同模式在晋北某煤矿生态修复中形成标准化流程,从爆破阶段即采用数值模拟优化开挖面形态(起伏度控制 $\pm 15^\circ$),到施工期植入生态模块预制件(透水率35%),最终实现修复工程综合效益提升40%的技术跨越。

四、结语

综上所述,构建的“生态—岩土”协同技术体系,通过揭示根系加筋效应与柔性支护的耦合机制,实现边坡修复工程中生态恢复与岩土稳定的动态平衡。创新应用梯度降解材料与智能监测技术,形成植物根系发育与工程结构性能衰减的时序匹配模式,突破传统刚性支护对生态过程的抑制瓶颈。未来需深化根土互作机理研究,构建全周期稳定评估模型,推动矿山修复从经验决策向智能调控转型。

【参考文献】

- [1]魏宸昌,马增,张忠光,等.大直径抗滑桩在矿山边坡治理中的应用[J].矿业研究与开发,2025,45(02):132-138.
 - [2]赵晗旭,张冉,韩天为,等.废弃矿山边坡修复技术概述[J].矿业工程,2025,23(01):55-59.
 - [3]沈益源,龚泉冰.大型绿色砂石矿山高边坡稳定性分析与监测设计研究[J].科学技术创新,2025,(06):125-128.
 - [4]张承,赵黎,王明,等.基于多方法联合的露天矿终了边坡稳定性研究[J].采矿技术,2025,25(01):120-126.
- 作者简介:杨赞(1987-),女,汉族,重庆綦江人,学士,高级工程师,主要研究方向:矿山生态修复、土地复垦、土地开发整理等;
- 周川(1987-),女,汉族,重庆永川人,硕士,高级工程师,主要研究方向:矿山生态修复、土地复垦等。