

露天开采矿山边坡生态修复治理技术

郝晓飞 齐书伟 邵 妍

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710100

摘 要：露天矿山开采形成的高陡边坡及大面积裸岩面，引发水土流失、视觉污染和生物多样性锐减等严重生态问题。边坡生态修复作为矿山修复的核心环节，其技术体系的适用性和协同性直接决定治理成效。本文系统分析了边坡复绿面临的生境极端性、坡面异质性和长效维持难等关键约束，据此将当前主流技术归纳为工程加固辅助类、植被生境构建类、生物促进演替类和综合集成工法类四大类型，从技术原理、适用条件和优劣维度进行深入解析。在此基础上，提出依据坡度分级、岩性差异和气候分区的技术适配策略，并构建涵盖前期评估、过程调控与后期养护的全周期质量管控框架。研究旨在为露天矿山边坡生态修复提供系统性技术参照。

关键词：露天矿山；边坡；生态修复；治理技术；植被恢复

引言

露天开采是我国矿产资源开发的主要方式之一，其剥离表土、爆破岩体的作业模式必然形成大量裸露高陡边坡。这些边坡不仅破坏原有地形地貌和植被覆盖，还诱发水土流失、滑坡崩塌、扬尘污染及景观破碎化等一系列生态连锁反应。随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入贯彻和绿色矿山建设标准的全面推行，边坡生态修复已从矿山企业的可选项转变为必选项。然而，露天矿山边坡不同于一般道路或市政边坡，其坡度大、坡面长、岩体破碎且缺乏土壤基质，加之不同矿种废弃岩土理化性质差异悬殊，使得复绿技术面临立地条件极端、植被选择受限和养护成本高昂三重难题。近年来，工程防护与生物修复相结合的综合治理思路逐渐占据主导，客土喷播、植被混凝土、高次团粒、厚层基材喷播、柔性生态袋等新工法不断涌现，但实践中仍存在技术选用盲目、施工粗放和后期退化严重等问题。

1 露天矿山边坡生态修复面临的关键约束

1.1 生境极端性与立地条件匮乏

露天矿山边坡经爆破开挖后，表面岩体新鲜裸露，基本丧失植被赖以生存的土壤层和有机质库。坡面持水能力极低，降雨迅速沿裂隙和坡面径流流失，干旱胁迫频繁；同时，岩体比热容小，夏季白天表面温度可达60℃以上，冬季则严寒冻胀，温差剧烈。更不利的是，硫化矿物（如黄铁矿）暴露后氧化产酸，重金属离子溶出，形成酸化或毒化微环境，多数普通植物无法在此类基质中建立有效根系。这种极端生境决定了复绿不能简单套用园林绿化或农业耕作手段，而必须首先进行生境改良，即人工构建具备一定保水、保肥和缓冲能力的植物生长基层层。

1.2 坡面异质性与治理难度差异化

露天矿山边坡并非均匀一致，而是存在显著的空间变异。按坡度划分，有缓坡（ $< 30^\circ$ ）、中陡坡（ $30^\circ \sim 50^\circ$ ）、高陡坡（ $> 50^\circ$ ）乃至近直立坡；按岩性划分，有坚硬花岗岩类、较软砂岩类、易风化页岩类及松散堆积体；按破坏程度划分，有完整岩面、破碎结构面和松散渣堆^[1]。不同类型坡面对复绿技术的锚固能力、基质附着厚度和水分入渗方式提出截然不同的要求。例如，缓坡可以采用机械整地后直接栽植乔灌木，但高陡裸岩必须依赖锚杆加固结合喷播或植生袋挂网工法。忽视坡面异质性的“一刀切”技术选择，往往导致部分坡面基质剥离或植被成片枯死。

1.3 长效维持困难与演替方向不确定性

边坡复绿不应追求短期“见绿”效果，而应以构建自我维持的稳定植物群落为目标。但在实践中，早期快速生长的先锋草本往往在2~3年后因养分耗竭和竞争劣势而衰退，而目标木本植物因根系发育迟缓未能及时接管，导致群落逆向演替，复绿面积持续缩减。此外，养护期结束后，边坡水肥供给中断，若无完善的集雨补灌系统和养分循环机制，植被极易重新退化。因此，复绿技术必须融合“先期快速覆盖—中期群落构建—后期自然维持”的三阶段理念，将基质配方中的缓释肥、微生物接种剂和适生乔灌草种配比作为一个动态系统来设计，而非一次性施工完毕即宣告结束。

2 边坡生态修复主要技术类型及分析

当前边坡复绿技术已发展出工程措施、生物措施和化学措施相互渗透的多元化技术谱系，以下按作用机理归类分析。

2.1 工程加固辅助类技术

此类技术的核心功能是为后续植被生长提供物理稳定的坡面基础,本身不直接贡献绿化,但不可或缺。主要包括:主动防护网(柔性钢丝网覆盖)、被动防护网(拦截落石)、锚杆框架梁和浆砌片石护坡等。对于高陡且岩体破碎的边坡,必须先实施锚固和清危,消除崩塌落石隐患,才能安全开展喷播或栽植作业。工程辅助措施的选择需根据边坡稳定性系数和岩体质量分级(RMR或BQ分级)确定,过度加固会大幅提高成本,而加固不足则可能导致复绿工程随坡面垮塌而毁于一旦。

2.2 植被生境构建类技术

该类技术是边坡复绿的主体手段,旨在人工制造植物根系附着和营养吸收的介质层。代表性工法包括:

(1)客土喷播技术:将种子、肥料、保水剂、黏结剂和种植土按比例混合后,利用空压机和喷播机喷射至坡面,形成5~8cm厚的均匀覆盖层。适用于坡度 $<45^\circ$ 的稳定岩质或土质边坡,成本较低、施工快捷,但抗冲刷能力有限,在大暴雨条件下基质易流失。(2)厚层基材喷播技术:在客土喷播基础上增加纤维(稻草、椰丝)和有机质含量,喷播厚度达到10~15cm,并配合镀锌铁丝网或三维植被网加固。基材中掺入缓释复合肥和微生物菌肥,为植被中期生长提供持续养分。适用于坡度 $45^\circ\sim 60^\circ$ 的中高陡边坡,是目前应用最广泛的成熟工法^[2]。(3)植被混凝土技术:将种植土、水泥、有机质、保水剂和专用添加剂按特定配比搅拌后喷射,厚度一般为8~12cm。水泥提供初期强度以抵抗雨水冲刷,但随着时间推移,植被根系逐渐替代水泥发挥固坡作用,最终形成"植被—根系—基材—岩面"复合结构。该技术对坡度适应性较强,可达 $60^\circ\sim 70^\circ$,但水泥掺量控制不当易导致基材板结和pH偏高,限制植物生长。(4)高次团粒喷播技术:利用特殊乳化剂使混合浆液在喷射过程中形成内部多孔、具有团粒结构的基材层,孔隙率高达50%以上,兼具优良的保水性和透气性。该工法无需挂网即可附着于光滑岩面,且种子发芽率高,但材料成本偏高,且对施工环境温湿度敏感。

2.3 生物促进演替类技术

该方向侧重利用生物学机制加速植被恢复进程。微生物土壤改良技术通过接种固氮菌、解磷菌和菌根真菌,改善岩面风化层或客土基质的氮磷供给能力和根系吸收效率,在贫瘠矿山边坡中表现出显著的促生效果。植物物种选择与配置技术则依据本土植被调查结果,构建"草本先锋层—灌木过渡层—乔木目标层"的立体群落结构,草本选择狗牙根、高羊茅、白三叶等速生耐贫瘠品种,灌木选择紫穗槐、胡枝子、马桑等根系发达种类,

乔木根据气候带选择刺槐、侧柏、马尾松或旱冬瓜等,并要求各层植物在物候、根系深度和养分需求上形成生态位互补,减少种间竞争。

2.4 综合集成工法

近年来,将多种单项技术集成的复合工法逐渐成为主流。柔性生态袋技术将装有种植基质的土工袋沿坡面自下而上错缝堆叠,袋与袋之间通过连接扣固定,袋面预留植生孔。该工法将边坡支挡和植被培育合二为一,适用于坡面局部凹坑或破碎带修复,但施工人工成本较高。格宾笼覆绿技术以镀锌铁丝网箱填充块石,在笼顶和石缝中填充种植土并播撒种子,兼顾防冲刷和景观融合,多用于坡脚和台阶处。综合工法强调因坡施策,在同一坡面的不同区段采用差异化技术组合,以达到整体最优的复绿效果。

3 技术适配与集成优化策略

3.1 基于坡度分级的工法优选矩阵

边坡坡度是决定技术可行性的首要变量。缓坡($<30^\circ$)可采用机械整地(挖鱼鳞坑或水平阶)结合乔灌木直接栽植,辅以简易覆盖保墒;中陡坡($30^\circ\sim 50^\circ$)优先推荐厚层基材喷播或客土喷播+三维网,基材厚度不低于10cm,并配置深根性灌木;高陡坡($50^\circ\sim 70^\circ$)必须采用植被混凝土或高次团粒喷播,同时配合主动防护网和锚杆加固,基材中添加高韧性纤维以增强抗裂性能;超陡坡($>70^\circ$)及倒悬坡,单纯喷播难以附着,应重点采用柔性生态袋堆叠或格宾笼逐级支挡,形成多级种植平台,化整为零^[3]。需注意,坡度分级阈值并非绝对,还应结合坡面粗糙度和裂隙发育程度灵活调整。

3.2 依据岩性与气候的差异化配方调整

岩性决定了基材与岩面的粘结机理和养分交换潜力。酸性火成岩(花岗岩、玄武岩)表面致密光滑,需在喷播前进行高压水射流拉毛处理并增加黏结剂掺量;沉积岩(砂岩、页岩)具有一定吸水性和粗糙度,可降低黏结剂比例,但需注意页岩遇水软化引起基材整体滑移的风险;对于含硫化物较高的酸性岩面,基材中必须添加石灰石粉或粉煤灰进行酸碱缓冲,使基层pH维持在6.0~7.5的适宜范围。气候条件影响基材保水设计和种源选择:干旱半干旱区应大幅提高保水剂掺量(5%~8%)并配置耐旱灌木为主;湿润区则重点解决基质排水问题,防止根系涝渍,可添加珍珠岩或蛭石改善透气性。

3.3 乔灌木空间配置与演替调控

合理的物种搭配是复绿长效性的核心。建议采用"三带五层"立体配置模式:垂直方向上分草本覆盖层、低矮灌木层、高灌木层和稀疏乔木层,水平方向上分坡

顶截水林带、坡面绿化带和坡脚防护林带。在种子配比上,初期先锋草本(如黑麦草、狗牙根)占比控制在30%~40%,快速郁闭减少地表蒸发;中期灌木占比40%~50%,逐步建立主导根系网络;目标乔木占比10%~20%,作为最终稳定群落。为引导正向演替,可在施工后第2~3年进行人工干预:对退化草本区域补播乡土灌木种子,对过密区域进行间伐,同时追施有机肥激活土壤种子库,加速向近自然植被群落过渡。

4 质量管控要点与长效养护机制

4.1 施工前勘查设计与材料控制

复绿工程启动前必须完成详细的立地条件调查,包括坡面地质雷达扫描探测裂隙分布、岩面pH和重金属含量检测、周边自然植被群落结构调查等,据此编制"一坡一策"设计方案,明确基材配比试验要求,每种配方须提前在试验段喷播验证,观测2~3个月的发芽率和基质稳定性后方可全面施工^[4]。材料入场应执行批次检验制度,黏结剂粘度、保水剂吸水倍率、纤维长度及种子净度、发芽率等关键指标逐批抽检,严禁使用过期或劣质材料。

4.2 施工过程工艺参数监控

喷播作业过程中,需严格控制水灰比(0.4~0.5为宜)、喷射压力(0.3~0.6MPa)和喷播厚度偏差($\pm 1\text{cm}$),每100m²设置检测点进行厚度抽检。挂网施工时确保网片与坡面间距保持在5~7cm,锚固件间距不超过1.5m×1.5m,且锚固深度在完整岩体中不低于30cm。喷播完成后及时覆盖无纺布或草帘,保证14天内日均喷水2~3次维持基材湿润,避免高压直冲造成沟蚀。施工记录应详细留存影像和检测数据,作为质量追溯的依据。

4.3 养护期分级管理与成效评估

复绿验收不应以施工结束为节点,而应设置至少两年的管护期。第一年为强制管护期,重点补种缺苗、追肥、防病虫害和极端天气防护;第二年进入半自然管护,逐步减少人工干预,观测群落自我维持能力。建立

定量评估指标体系,涵盖植被盖度($\geq 85\%$)、物种多样性指数(Shannon-Wiener指数不低于周边参照样地的70%)、基质流失厚度(每年 $< 5\text{mm}$)及目标木本植物成活率($\geq 80\%$)等硬性指标。对评估不达标的坡段,应及时启动补喷或人工补植,并根据问题类型调整基材配方或物种组成,杜绝出现"一年绿、两年黄、三年裸"的失败循环。

5 结语

露天开采矿山边坡生态复绿是一项融合岩土工程、土壤科学、植物生理和生态学的系统工程,不存在放之四海而皆准的万能技术。本文所梳理的工程加固辅助类、植被生境构建类、生物促进演替类和综合集成工法,各有其适用边界和技术长短。实现高质量复绿,关键在于严格遵循"坡面分级、岩性分类、气候分区"的差异化适配原则,在精准立地诊断基础上,进行基材配方、物种组合与施工工艺的靶向设计,并配套覆盖施工与养护全过程的严格质量管控。唯有将技术科学性与工程严谨性紧密结合,才能推动矿山边坡从"人工强制绿化"稳步走向"自然生态修复",真正实现废弃矿山的绿色重生。未来技术发展应进一步融合智能化监测和自适应养护手段,使复绿系统具备自我诊断和动态调整能力,持续提升生态修复的效率和韧性。

参考文献

- [1]陈永贵,张洪江.矿山高陡岩质边坡植被恢复关键技术研究进展[J].水土保持学报,2025,39(2):1-10.
- [2]刘晓明,吴长文.植被混凝土技术在露天矿山边坡生态修复中的应用[J].环境工程,2024,42(5):188-195.
- [3]黄志强,王金满.高次团粒喷播基材性能调控及其在岩石边坡复绿中的适应性[J].中国水土保持科学,2024,22(3):91-99.
- [4]王树森,李青丰.干旱区露天矿边坡植被恢复物种筛选与配置模式研究[J].草业科学,2025,42(1):132-141.