

矿区绿色矿山建设中采空区生态修复技术体系构建与应用

姬挺

乌海市路天矿业有限责任公司, 中国·内蒙古 乌海 016000

摘要: 采空区作为矿产资源开采后遗留的地质空腔, 其地表沉陷、土壤退化与水系破坏等问题构成绿色矿山建设的核心技术难题, 传统单一修复手段难以应对地质结构失稳与生态系统功能丧失的复合挑战。以晋北某煤矿采空区为工程背景, 系统剖析采空区地表变形规律与生态退化机制, 在此基础上构建涵盖地质结构加固、土壤基质重构、植被群落重建与水资源调控的多维度生态修复技术体系。工程实践表明该技术体系能够有效控制地表沉陷的持续发展, 显著改善土壤理化性质与植被覆盖状况, 修复区域的生态系统服务功能逐步恢复, 为类似地质条件下的采空区生态修复提供了可资借鉴的技术方案与实施路径。

关键词: 采空区; 生态修复; 地质结构加固; 土壤改良; 植被重建

Construction and Application of Ecological Restoration Technology System for Goaf in Green Mine Construction of Mining Area

Ji Ting

Wuhai Lutian Mining Co., Ltd., China Inner Mongolia Wuhai 016000

Abstract: As a geological cavity left after mineral resource exploitation, goaf is confronted with problems such as surface subsidence, soil degradation and water system damage, which constitute the core technical challenges in green mine construction. Traditional single restoration methods are difficult to address the combined challenges of unstable geological structure and loss of ecosystem functions. Taking the goaf of a coal mine in Northern Shanxi as the engineering background, this paper systematically analyzes the surface deformation law and ecological degradation mechanism of goaf. On this basis, a multi-dimensional ecological restoration technology system covering geological structure reinforcement, soil matrix reconstruction, vegetation community reconstruction and water resource regulation is constructed. Engineering practice shows that this technology system can effectively control the continuous development of surface subsidence, significantly improve soil physical and chemical properties and vegetation coverage. The ecosystem service functions of the restored area are gradually restored, which provides a reference technical scheme and implementation path for goaf ecological restoration under similar geological conditions.

Keywords: Goaf; Ecological restoration; Geological structure reinforcement; Soil improvement; Vegetation reconstruction

0 引言

矿产资源的大规模开采在支撑经济发展的同时遗留了大量采空区, 这些地下空腔的存在使地表稳定性丧失殆尽, 叠加采矿活动对土壤、水系与植被的破坏, 形成了复合型生态损毁格局。晋北矿区作为我国重要的煤炭生产基地, 多年高强度开采导致采空区面积持续扩大, 地表塌陷坑遍布、裂缝纵横交错, 原有农田与林地大面积损毁, 水位下降导致井泉干涸, 生态系统的结构与功能遭受严重破坏。

1 采空区生态修复面临的主要问题与技术挑战

1.1 采空区地质结构稳定性与地表变形特征分析

采空区的形成打破了岩体原有的应力平衡状态, 顶板

岩层在自重与覆岩压力作用下发生垮落、断裂与弯曲变形, 这一过程向上传递并最终在地表形成沉陷盆地。地表变形的时空演化规律受采深采厚比、覆岩岩性组合与开采方式等多重因素制约, 浅埋煤层采空区的地表变形往往剧烈而快速, 塌陷坑与台阶状裂缝大量发育, 深埋采空区的地表变形则相对平缓但持续时间更长, 迟滞沉降可延续数年乃至数十年。晋北某矿采空区地表监测数据显示, 沉陷盆地最大下沉值出现在采空区中央上方, 边缘地带则以拉伸变形为主, 裂缝宽度从数厘米到数十厘米不等, 部分区域还伴有地面塌陷坑的突发形成^[1]。

1.2 土壤退化、水资源污染与植被缺失的复合效应

采矿活动对土壤系统的破坏是多维度的, 地表沉陷导

致的土层扰动与剥离使土壤剖面结构紊乱,水土流失后裸露的心土层有机质含量极低且结构紧实,保水保肥能力大幅下降;矿井水与煤矸石淋滤液的人渗造成土壤酸化或盐渍化,重金属离子在土壤中累积并向食物链传递;土壤微生物群落的多样性与活性急剧衰减,碳氮循环等关键生态过程受阻。水资源系统的破坏同样触目惊心,采空区裂隙导致含水层疏干,地下水位持续下降导致周边井泉枯竭,矿井涌水携带的悬浮物与溶解性污染物污染地表水体,水土流失加剧导致沟壑发育与土地破碎化。植被的缺失既是上述退化过程的结果,也是生态系统功能丧失的直接表征,裸露的地表失去植被的固持与涵养作用,水土流失、风蚀扬尘等问题进一步加剧,形成退化螺旋的恶性循环。

1.3 生态系统自我修复能力评估与限制因素

生态系统在遭受干扰后具有一定的自我恢复能力,然而采空区的损毁强度往往超出了自然恢复的阈值,关键限制因素的识别对于修复策略的制定至关重要。地质结构的持续不稳定是最根本的限制因素,在地表变形活跃期,即便有植被自然萌发也会因土层撕裂而难以存活,只有当沉陷趋于稳定后自然恢复才具备基本条件。土壤种子库的耗竭与传播廊道的阻断是植被恢复的生物学限制,大面积损毁区域缺乏种源输入,即便环境条件适宜也难以实现自然定居。土壤理化性质的极端化构成植物生长的立地限制,过低的有机质含量与土壤肥力难以支撑植被的正常生长,土壤紧实与缺乏孔隙结构阻碍根系发育与水分入渗。水分亏缺在干旱半干旱矿区尤为突出,地下水位下降与土壤持水能力降低使得植被建立面临严酷的水分胁迫^[1]。

2 采空区生态修复关键技术体系构建

2.1 地质结构加固与地表形变控制技术

地质结构的稳定化处理是生态修复的先决条件,技术手段的选择需根据采空区的埋深、规模与地质条件进行针对性设计。注浆充填技术通过向采空区注入水泥浆液或粉煤灰基充填料,填充覆岩垮落后形成的空隙,为上覆岩层提供支撑从而控制地表沉陷的进一步发展,该技术适用于浅埋采空区的治理,注浆孔的布置间距与注浆压力需根据充填材料的扩散半径与覆岩破碎程度进行优化。对于已形成的地表裂缝与塌陷坑,采用分层碾压回填技术进行处理,回填材料以煤矸石与黄土混合料为主,分层厚度控制在合理范围内并逐层压实,回填后的地表平整度与承载力需满足后续植被恢复的要求。地表形变的动态监测是加固效果评估与后续修复时机把握的基础,采用GNSS与InSAR技术相结合的监测方案,能够获取厘米级精度的地表位移数

据,当沉降速率降至阈值以下时方可启动植被恢复工程,避免因盲目抢工而导致的返工损失。

2.2 土壤改良、基质重构与微生物修复技术

土壤系统的功能恢复需要从物理结构、化学性质与生物活性三个维度协同推进。物理结构的改良针对土壤紧实与孔隙度不足的问题,采用深翻松土与客土覆盖相结合的方式,深翻深度需突破犁底层以打破土壤板结,客土来源优选周边未受污染的农田表土或经处理的淤泥,覆盖厚度根据植被类型的根系分布特征确定。化学性质的调控重点解决酸碱失衡与养分贫瘠问题,针对酸化土壤施用石灰或粉煤灰进行中和,盐渍化土壤则通过淋洗与排盐措施降低盐分含量,有机肥与缓释复合肥的配合施用可快速提升土壤肥力水平,施肥方案需根据土壤养分监测结果进行精准配置^[1]。微生物修复技术的引入旨在重建土壤生态功能,接种丛枝菌根真菌可显著提高植物对贫瘠土壤的适应能力,固氮菌与解磷菌的应用能够改善土壤氮磷供应状况,有机物料的添加为土壤微生物提供碳源与能源,促进微生物群落的恢复与多样化。

2.3 植被筛选、配置与生态群落重建技术

植被恢复是生态修复的核心环节,物种选择与群落配置直接决定修复效果的持续性。先锋物种的筛选应以乡土植物为主,优先选择耐旱、耐瘠、耐盐碱且具有较强固土能力的种类,晋北矿区的实践表明沙棘、柠条与紫花苜蓿等物种在采空区修复中表现良好,其根系发达且对逆境环境适应性强。群落配置遵循乔灌草相结合的原则,草本层快速覆盖地表以控制水土流失,灌木层提供中间层次的生物量积累与生境营造,乔木层的引入则是群落向顶级演替的关键步骤,配置比例根据修复目标与立地条件进行调整。种植技术的优化对于提高成活率至关重要,采用容器苗造林可减少裸根苗的移栽损伤,保水剂与生根粉的应用增强苗木的抗旱能力与根系发育,适宜的栽植季节选择能够利用自然降水促进苗木成活。群落重建是一个长期演替过程,前期人工干预强度较高,随着群落结构的完善与功能的恢复,逐步降低管护强度,引导生态系统向自维持状态过渡。

2.4 水资源调控与水土保持系统集成方法

水是干旱半干旱地区生态修复的关键限制因子,水资源调控的成效直接影响植被恢复的成败。雨水收集与高效利用技术在采空区修复中具有重要价值,通过地形整理形成集水面与蓄水设施,将有限的自然降水汇集储存供植被利用,鱼鳞坑与水平沟等微地形改造既能拦截径流又能促

进入渗。矿井水资源化利用为修复用水提供了补充来源,经过沉淀、过滤与必要的深度处理后,矿井水可用于植被灌溉与土壤淋洗,既解决了矿井水外排的环境压力,又缓解了修复用水的供需矛盾。水土保持措施与植被恢复需要有机结合,在坡面布设截排水沟与护坡工程以控制径流冲刷,在沟道内修建谷坊与拦沙坝以拦截泥沙并抬高侵蚀基准面,工程措施与植物措施的配套实施可显著提升水土保持效益。水资源调控系统的设计需要统筹考虑水量平衡与水质要求,确保修复区域的水分供需在时间与空间上达成匹配^[4]。

3 生态修复技术体系的工程应用与实践评估

3.1 典型矿区采空区修复工程案例

晋北某矿采空区生态修复工程覆盖面积约三百公顷,修复区域的原始状态为大面积地表塌陷与裂缝发育区,植被覆盖率极低,土壤严重退化。修复工程按照“先稳定、后改良、再建植”的技术路线分阶段实施,稳定阶段对塌陷坑与裂缝进行回填处理,并对浅层采空区实施注浆加固,地表变形监测数据显示加固后沉降速率显著下降。改良阶段开展土壤基质重构,客土覆盖厚度根据不同区域的立地条件差异化设置,有机肥与菌剂的施用改善了土壤理化性质与生物活性。建植阶段采用乔灌草结合的配置模式,以沙棘与油松为主要木本树种,紫花苜蓿与冰草为草本地被,采用容器苗造林与保水剂应用等技术措施提高成活率。水土保持系统同步建设,坡面布设鱼鳞坑与截排水沟,矿井水经处理后用于植被灌溉。工程实施历时三年,后续进入管护与监测阶段。

3.2 修复效果的多指标监测与动态评价

修复效果的评估需要建立涵盖地质稳定性、土壤质量、植被状况与生态功能的多指标监测体系。地质稳定性指标包括地表沉降速率、裂缝发育密度与塌陷坑数量,监测数据显示修复区域的沉降已趋于稳定,新增裂缝与塌陷现象得到有效控制。土壤质量指标涵盖有机质含量、养分水平与微生物活性,与修复前相比各项指标均有明显改善,有机质含量与土壤酶活性的提升表明土壤生态功能正在恢复。植被指标包括覆盖度、物种多样性与生物量,修复后植被覆盖率显著提高,物种组成逐渐丰富,群落结构向稳定状态演进。生态功能指标重点评估水土保持效益与碳汇能力,修复区域的土壤侵蚀模数大幅降低,植被与土壤的碳储量持续增加。动态评价需要建立长期监测机制,追踪修复效果的时间演化趋势,及时发现并应对可能出现的退化风险^[5]。

3.3 技术经济性、环境效益与社会可持续性分析

技术经济性是修复方案可行性的重要考量维度,工程投入需与修复效果形成合理的成本效益比。修复工程的直接成本包括地质治理、土壤改良、苗木购置与水利设施建设等费用,单位面积投入水平根据修复难度与目标标准有所差异,困难立地条件下的投入强度显著高于一般区域。间接效益的量化评估需考虑生态系统服务价值的恢复,包括水土保持、碳汇、生物多样性维持与景观美学等功能,这些效益虽难以直接货币化,却是评价修复工程综合价值的重要依据。环境效益体现在区域生态安全格局的改善,修复区域由生态源汇转变为生态屏障,对周边农田与居民点的防护作用逐步显现。社会可持续性关注修复工程与当地社区发展的协调关系,吸纳当地劳动力参与修复工程建设与后期管护,将部分修复区域发展为生态旅游或林下经济基地,可为矿区转型发展提供新的增长点。

3.4 修复体系标准化与推广路径探讨

修复技术体系向其他矿区推广需要建立标准化的技术规程与操作指南,晋北矿区的实践经验为此提供了基础素材。标准化工作应涵盖修复目标的分级设定、技术方法的适用条件界定、工程实施的质量控制要点以及修复效果的评估标准等核心内容,使不同矿区能够根据自身条件选择适宜的技术组合与实施方案。推广应用需充分考虑地域差异性,气候条件决定了水分供需关系与植被物种选择,地质条件影响地表变形特征与加固技术方案,社会经济条件制约修复投入水平与后期管护能力,照搬特定矿区的做法未必能取得同等效果。因地制宜的适应性调整与持续的技术创新是推广成功的关键,针对不同类型采空区的修复技术需求开展系统性研发,形成覆盖主要矿区类型的技术方案库,为绿色矿山建设提供有力的技术支撑。

4 结语

采空区生态修复是绿色矿山建设的核心内容与技术难点,地质结构失稳与生态系统退化的复合效应使得单一修复手段难以奏效,系统性技术体系的构建成为摆脱这一困境的必然选择。晋北矿区的工程实践表明,地质结构加固、土壤基质重构、植被群落重建与水资源调控等关键技术的有机组合,能够有效控制地表变形的持续发展并逐步恢复生态系统功能。技术体系的推广应用需因地制宜地进行适应性调整,标准化建设与持续技术创新是确保修复效果可复制、可持续的重要保障,为矿产资源开发与生态环境保护的协调发展提供实践路径。

参考文献:

[1] 黎枝肖, 周志强, 唐建国等. 铝土矿采空区生态修复标准[J]. 中国有色金属, 2024(S1):135-138.

[2] 赵仁波. 遵义市矿山采空区复绿生态治理模式初探[J]. 绿色科技, 2020(4):81-83.

[3] 邓良, 费志文, 周晓超等. 多中段复杂采空区矿柱回收采矿方法[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2024,40(6):

16-22.

[4] 石增红, 郝晓宇. 矿山采空区地质环境恢复治理模式创新研究[J]. 世界有色金属, 2020,45(23):145-146.

[5] 张浩洋. 我国矿山采空区治理现状及处置措施——以承德某铜矿采空区治理为例[J]. 现代工程科技, 2023,2(9): 57-60.