绿色开采理念下煤矿开采工艺优化路径探析

丁 峰

徐矿集团哈密能源公司生产技术部 新疆维吾尔自治区 哈密 839000

【摘 要】：在双碳战略以及能源绿色转型的大环境下，传统的煤矿粗放式开采工艺存在着资源利用率低、生态破坏严重、固废排放量大等一系列的弊端，不能适应煤炭行业的高质量发展需求。本文以绿色开采的核心内涵为基础，结合煤矿开采生产实际，从开采方式、固废处理、水资源保护、智能化融合、生态修复五个方面提出煤矿开采工艺优化路径，并结合矿区工程实践数据检验优化方案的可行性和有效性，提出相应的技术、管理、制度保障措施。研究成果能给煤矿绿色高效开采技术升级、矿山生态综合治理、行业绿色转型发展给予一些参照。

【关键词】：绿色开采；煤矿开采；工艺优化；智能化开采；生态保护

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.084

1 引言

煤炭是我国能源体系的主要能源，是保证国家能源安全、支撑工业经济发展的主要力量。目前我国大部分煤矿仍然采用传统的综采、炮采工艺，开采技术智能化、绿色化水平不高，工艺配套体系不健全，不能同时满足产能、效益和生态保护的要求。为了破解煤矿开采和生态保护之间的矛盾，推动煤炭产业的低碳绿色发展，需要从绿色开采的角度出发，对传统的开采工艺进行系统的优化升级，革新开采技术、改善生产流程、创建绿色生产体系，使煤炭资源开采的经济效益、社会效益和生态效益三者达到统一。

2 煤矿绿色开采核心内涵与工艺优化原则

2.1 绿色开采核心内涵

煤矿绿色开采是以先进的采矿技术和生态治理技术以及智能化的控制手段为依托，在煤炭开采全过程中实现可持续发展的开采方式。不同于传统的开采只重产能的发展模式，绿色开采以资源高效利用、生态精准保护、废弃物循环利用为重心，包含保水开采、充填开采、减沉开采、固废资源化利用、智能清洁开采等许多技术体系，可以有效地减少开采活动给矿区地质环境、水资源、植被生态带来的干扰，使煤炭开采由粗放消耗转变为绿色集约、低碳高效。

2.2 工艺优化基本原则

一是安全高效原则。工艺优化要以安全生产为底线，不能为了追求绿色效益而降低安全标准，通过技术升级提高开采稳定性、生产效率，实现安全、产能、绿色三者并重的发展。二是资源节约的原则。针对煤炭资源浪费问题，对开采参数和作业流程进行优化，提高资源回采率，减少边角煤、残留煤流失，最大限度地挖掘矿产资源的价值。第三是生态优先原则。严格控制开采全过程的生态扰动，有针对性地解决地表沉降、水体污染、粉尘超标、矸石堆积等生态问题，使开采扰动降到最低。第四是经济适配原则。根据不同的矿区地质条件和产能规模选择合适的优化工艺，控制改造成本，提高企业的生产经济效益，实现绿色技术的落地可持续。

3 绿色开采理念下煤矿开采工艺优化具体路径

3.1 构建安全高效低碳开采体系

针对传统煤矿开采参数固化、作业粗放、安全管控被动、资源损耗偏高的痛点，依托大数据、物联网、数字孪生等新一代信息技术，搭建现代化矿井智能精准开采体系，以智能化赋能安全生产与资源高效利用。摒弃传统人工调校开采参数的粗放模式，建立基于数字孪生的煤层动态感知系统，通过井下高精度传感器、三维地质建模技术，实时动态捕捉煤层赋存厚度、岩层应力变化、地质构造异动等核心数据，自动生成最优开采参数方案，实现采高、推进速度、煤柱尺寸、开采时序的智能动态自适应调节。



图 1 安全高效低碳开采体系

针对厚煤层、复杂地质煤层开采场景，推广智能化分层精准开采、无煤柱沿空留巷创新工艺，替代传

统预留宽煤柱的浪费模式，结合智能综采成套装备的自动化协同作业，实现边角煤、残留煤、薄煤层资源的精细化回收，大幅提升煤炭资源回采率。同时，嵌入智能安全预警模块，对工作面顶板垮落、瓦斯超限、片帮漏水等安全隐患进行实时监测、智能研判、提前预警，实现开采作业“无人值守、少人巡检、智能管控”，从工艺源头规避安全风险，达成现代化矿井“安全为先、智能提效、资源降耗”的开采目标。

3.2 推广智能低碳充填工艺

立足现代化矿井生态低碳治理要求，革新传统粗放式采空区处理工艺，打造“智能分选、原位充填、低碳消纳”的一体化绿色充填工艺体系，彻底根治地表沉降、固废堆存、生态破损三大难题。摒弃传统单一矸石充填模式，推广智能化膏体充填、高水速凝充填、掘采选充一体化智能工艺，搭建井下智能充填控制系统，通过自动化配比设备、智能输送调控装置，根据采空区岩层受力状态、空间形态，自动调节充填物料配比、充填密度、充填速率，保障充填体的稳定性与承压性，精准防控地表不均匀沉降、岩层变形等安全生态隐患。

构建井下固废智能闭环消纳体系，依托井下智能分选机器人、自动化破碎筛分设备，对采掘产生的煤矸石、粉煤灰、尾矿等固废进行就地智能分选、精细化处理，全部用于采空区充填作业，实现固废“零升井、零堆存、零外排”。同时优化采掘、分选、充填智能协同作业时序，通过矿井工业互联网平台实现多工序数据互通、联动调控，解决传统工序脱节、效率偏低的问题，在保障采场安全生产稳定的基础上，实现固废资源化低碳利用，契合现代化矿山循环绿色发展理念。

3.3 搭建智慧矿井水务管控体系

针对传统矿井水资源管控粗放、渗漏损耗大、处理效率低、回用率不足的问题，结合现代化矿井绿色节水发展要求，构建“智能防渗、精准处理、闭环回用、动态管控”的智慧保水开采工艺体系。采用智能化覆岩注浆加固机器人替代传统人工注浆作业，精准定位岩层裂隙、透水通道，实现定向封堵、精准加固，最大限度减少地下水流失与岩层水体扰动，从源头保护矿区地下水资源与水文生态环境。



图 2 智慧水务管控体系

搭建一体化智能矿井水处理回用系统，集成全自动沉淀、精密过滤、智能杀菌、重金属精准去除等新型工艺，搭载水质在线监测传感器，实时监测矿井水污染物指标，自动调节处理工艺参数，保障出水水质稳定达标。同时构建矿井水资源智能调度平台，根据井下防尘、设备冷却、巷道浇筑、地面绿化、矿区生产等用水需求，智能分配水资源，实现处理后矿井水的全域闭环循环利用，大幅降低矿井水外排量与新鲜水资源消耗量，彻底解决传统开采水体污染、水资源浪费问题，实现煤炭开采与水资源生态保护的协同共赢。

3.4 构建全流程清洁智能开采模式

以现代化智能绿色矿山建设为核心，推动人工智能、工业互联网、5G 技术与煤矿绿色开采工艺的深度融合，全方位升级传统清洁开采模式，实现开采全流程智能化、低碳化、清洁化管控。全面部署 5G+智能综采、智能掘进、智能运输成套装备，实现开采设备远程操控、自动联动、故障智能诊断，替代传统人工高强度作业，降低人工操作误差与设备能耗，减少开采过程中的无效能源消耗与生态扰动。



图 3 全流程清洁智能开采模式

创新智能化清洁降尘降噪工艺，在采掘、转载、运输、破碎等产尘产噪关键环节，布设智能感应喷雾、负压除尘、静音降噪一体化智能设备，可根据作业面粉尘浓度、噪音数值自动启停、调节运行功率，实现污染物精准治理。搭建矿区全域智能生态监测云平台，整合大气、水体、地质、噪音、植被等监测终端，实现矿区生态环境指标 24 小时实时监测、数据云端汇

总、异常智能预警，依托大数据分析动态优化开采工艺与环保治理流程，构建“开采智能管控、污染精准治理、生态实时防护”的现代化绿色开采体系。

3.5 创新智能生态修复工艺

打破传统“先开采、后修复”的滞后治理模式，贴合现代化矿山生态可持续发展理念，建立“采中防护、采后智修、长效管护”的全周期智能生态修复工艺体系。开采过程中同步采用智能围岩加固、裂隙智能封堵工艺，实时修复开采造成的浅层生态破损，从源头降低生态扰动强度。针对采空塌陷区、矸石废弃区、地表破损区域，推行差异化智能修复技术，结合无人机航拍、三维地形扫描技术，精准勘测矿区生态破损范围、土壤受损程度、植被生长条件，智能生成个性化生态修复方案。

优化矿区植被智能复种工艺，依托土壤智能检测设备分析土壤肥力、酸碱度、含水率等指标，因地制宜筛选耐旱、固土、抗逆性强的乡土绿植，采用智能化精准播种、滴灌养护设备开展植被复种。同时搭建生态修复智能管护系统，实时监测修复区植被覆盖率、土壤质量、水文环境等生态指标，动态调整修复工艺与养护方案，实现矿区生态修复的精准化、智能化、长效化，打造现代化煤矿开采生态治理闭环。

4 工程案例应用与效果分析

4.1 矿区工程概况

本次选择晋西地区年产 120 万吨的中型生产煤矿作为实践研究对象，矿区整体地质构造中等复杂，主采煤层厚度稳定，赋存深度适中，具备常规机械化开采条件。该矿一直使用传统的综合机械化开采工艺，采空区用自然垮落的方式处理，生产模式比较粗放。长期生产过程中，矿区逐渐暴露出现多项典型的缺陷，井下煤炭资源残留量大，总体回采率处于行业偏低的水平，采空区造成局部地表不均匀沉降，地面矸石堆场堆积量大，固废资源化利用程度低，矿井水处理回用体系不健全，水资源浪费和轻微水体污染并存，矿区整体绿色生产水平不能满足当前煤炭行业高质量发展和生态环保管控的要求。为了彻底解决生产与生态矛盾，该矿按照绿色开采的理念，从开采全流程入手，对开采工艺进行系统的优化升级。

4.2 工艺优化实施方案

一是改进主要的开采工艺。重新安排工作面布置结构，合理调节煤柱预留尺寸、工作面推进速度、采高控制等重要生产参数，采取分层有序开采方式，对井下边角煤、残留煤资源实施回收，大幅度提高煤炭资源的采出率。另外还要对多煤层开采的开采顺序进行优化，避免采矿和掘进作业相互影响，减小岩层的破坏程度。

二是充填工艺的升级换代。淘汰传统的采空区自然垮落处理方式，建设井下矸石破碎输送系统和膏体充填系统，实行掘采选充一体化作业。将井下采掘产生的煤矸石、矿区粉煤灰等固废物料就地破碎配比，利用专用输送设备回填到采空区，达到采空区有效支护和固废就地资源化处置的目的。

三是水资源循环体系的建立。建设一体化矿井水处理站，加装多级沉淀、精密过滤、深度净化装置，把矿井水集中处理，除去矿井水中的悬浮物、微量重金属等污染物。经过处理的达标水资源全部回用到井下防尘喷雾、设备冷却、巷道支护浇筑和矿区地面绿化养护等场所，形成一个闭环用水系统。

四智能清洁开采升级。采用智能综采控制系统来使采掘设备达到自动化运行、工艺参数自动调节的效果。在采掘、运输、转载等产尘关键点上安装智能喷雾降尘和负压除尘设备，建立矿区环境智能监测系统，对大气、水体、地表沉降等指标进行实时监测，实现生产全过程的绿色智能控制。

4.3 优化效果数据对比分析

该矿工艺优化改造完成后稳定运行半年，收集整理出各项生产、环保、生态核心指标，并与改造前数据进行对比分析，具体指标变化情况见下表。

表 1 具体指标变化情况

核心指标	优化前	优化后	优化提升效果
煤炭资源回采率	78.2%	89.5%	提升 11.3 个百分点
地表沉降量	最大 216mm	最大 42mm	沉降降幅 80.6%
煤矸石资源化利用率	32.5%	98.2%	提升 65.7 个百分点
矿井水回用率	45.8%	92.1%	提升 46.3 个百分点
矿区粉尘浓度	8.3mg/m³	2.1mg/m³	降幅 74.7%

4.4 综合效益分析

经由系统工艺改良革新，矿区的生产、生态以及经济各方面综合效益得到了全方位的改善。从生产效益角度来说，煤炭资源回采率明显提高，很好地利用了井下残留的煤炭资源，减少了资源浪费，智能化设备和协同作业流程大大提高了开采作业效率，降低了

人工操作的误差和劳动强度。从生态效益角度来说，充填开采工艺很好地解决了采空区塌陷的隐患，地表岩层的稳定性大大提高，煤矸石实现了井下就地消纳，彻底杜绝了地面堆放污染的问题，矿井水闭环循环利用大大减少了外排污染，矿区粉尘污染得到了有效的控制，生态环境质量得到持续改善。经济效益上固废资源化利用、水资源循环使用可以降低污染物处置成本和资源采购成本，生产效率提高又会增加矿区产能收益，整体生产效益提高百分之十八，实现了安全稳产、资源集约、生态保护、经济增收的协同效应，充分证明了本次绿色开采工艺优化路径的科学性、实用性。

6 结论

绿色开采是新时代煤炭行业高质量发展所必然要走的途径，工艺优化是实现煤矿绿色转型的手段。本文通过对传统煤矿开采工艺资源、生态、技术三方面存在的问题进行分析，根据绿色开采的理念，从核心开采工艺升级、充填开采推广、水资源管控、智能绿色融合、采后生态修复五个方面提出系统的工艺优化途径，并通过工程案例验证优化方案可以提高资源利用率、减少生态扰动、实现废弃物资源化利用，具有经济效益和生态效益。

参考文献：

[1] 陈力,魏梦元,王科洋.基于绿色开采角度的地质矿产勘查与找矿技术[J].世界有色金属,2025,(3):76-78.

[2] 杨红武,余万荣,翟金元.矿山绿色开采技术体系的构建与发展研究[J].世界有色金属,2024,(24):114-116.

[3] 王莉.绿色开采理念下煤矿工程管理与环境影响评价研究[J].工矿自动化,2024,50(S2):242-245.

[4] 杨德海.绿色开采技术在现代采矿工程中的创新应用与实践[J].世界有色金属,2024,(13):64-66.

[5] 冯勇强.刍议露天煤矿实现绿色开采的路径[J].新疆钢铁,2024,(1):58-60.