

复杂地质条件下煤矿高效开拓布置与开采工艺优化

张乃川

中煤黄家沟(临县)煤业有限公司 山西 吕梁 033000

摘要: 复杂地质条件下煤矿开采面临构造破碎、水文危害及煤层稳定性差等挑战,需通过地质导向的开拓系统设计、动态参数优化及多系统协同实现高效安全生产。研究提出结合地质构造特征的开拓方式选择、巷道布局与支护动态匹配方法,构建涵盖地质建模、多方案比选及全过程反馈的优化流程;通过工艺适应性分析、智能化调控及效率-安全平衡策略,提升资源回收率,为复杂地质煤矿提供系统性技术解决方案。

关键词: 复杂地质条件;煤矿开拓优化;开采工艺协同;资源高回收率

引言

复杂地质条件下的煤矿开采常受构造断裂、水文异常及煤层赋存不稳定等因素制约,导致巷道支护难度大、灾害风险高、资源回收率低。为突破传统开采模式的技术瓶颈,需从开拓布置优化与工艺协同入手,结合地质特征分析、动态参数调控及多系统协同技术,探索适应复杂地质环境的开采方法,为矿井安全高效生产提供理论支撑与实践路径。

1 复杂地质条件特征及对煤矿开采的影响

煤矿地质环境复杂多变,构造形态多样与水文地质特殊性问题尤为突出,地质构造中断裂系统广泛发育,断层带周边岩体破碎严重,直接破坏煤层连续性与完整性;此类区域巷道围岩稳定性大幅降低,支护难度显著增加,需采取加强支护措施保障巷道安全。褶皱构造导致煤层产状剧烈变化,倾向频繁波动使综采工作面布置困难,设备适应性要求提高,推进效率受限。水文地质方面,富含水层与煤层存在密切水力联系,工作面易发生涌水甚至突水事故,水理作用进一步软化围岩强度,加剧巷道变形与底鼓现象,威胁作业安全;煤层赋存条件复杂,厚度不稳定且分叉合并现象普遍,回采工艺选择难度增大,资源回收率控制面临挑战。高瓦斯含量与煤层自燃倾向性增加了灾害防治复杂度,需构建涵盖瓦斯抽采、防火灭火的多系统协同防控体系,这些地质因素相互叠加作用,共同制约开采方案的科学设计与安全高效生产目标的实现^[1]。

2 复杂地质条件下煤矿高效开拓布置优化

2.1 开拓系统方案设计

(1)地质导向的开拓方式选择:需结合地质构造特征选开拓方式,浅埋、表土适中、水文简单区域用斜井开拓,施工简便投资少;深埋、冲积层厚或需快速到底时用立井开拓,提升高效通风好;山地丘陵地带平硐开拓

经济,自流排水运输方便;断层密集或褶皱严重区域综合开拓,适应地质分散风险。(2)与构造格局协同的巷道布局:要紧扣地质构造特征布局巷道,断层发育区将开拓大巷置于煤层底板稳定岩层,避开破碎带,方向不与主断层小角度相交;褶皱区利用背斜翼部稳定区布置主要运输大巷,避开向斜轴部高应力区;煤层倾角大时用伪倾斜巷道缓和坡度,适应运输设备需求。(3)基于灾害防控的系统分区:复杂地质条件有灾害威胁,方案要融入分区防控理念,高瓦斯煤层规划专用瓦斯抽采巷道系统,利于分区通风,方便火区封闭;水文地质复杂区域遵循先探后掘原则,设专门设施,预留防治水空间,实现源头控制与过程隔离。

2.2 开拓巷道布置参数优化

(1)巷道层位与轴向的精细化确定:巷道层位选择至关重要,煤层顶底板岩性差异大时,通过工程地质钻探与岩体力学测试评估层位稳固性,优先选厚层状砂岩或石灰岩层作大巷层位,服务年限长的巷道更应如此;巷道轴向结合地应力测量结果确定,优化轴线方向,受采动影响的需调整位置方向避开高应力区。(2)巷道断面形态与尺寸的适应性设计:断面形态根据围岩应力状态和岩体特性选择,顶压大侧压小用直墙半圆拱形,顶底板弱侧压显著用马蹄形或圆形,椭圆形长短轴依主应力比调整优化应力分布;断面尺寸满足通风运输等最小空间要求,考虑围岩变形预留量,软岩或高应力区适当扩大断面。(3)支护结构与参数的动态匹配:支护设计是参数优化核心,需依据围岩地质力学特征评估建立相互作用模型设计支护类型参数;稳定岩层采用主动支护体系,锚杆等参数依潜在冒落情况确定;破碎软弱围岩或高地应力用联合支护;建立现场监测反馈机制,动态调整支护,确保有效经济^[2]。

2.3 开拓布置合理性评价指标

(1)技术适应性指标:用于评价开拓布置与地质开采技术条件的匹配度,包括巷道稳定性指数,通过数值模拟或经验预测主要巷道服务期变形及维护需求;系统可靠性,评估通风运输排水等子系统流畅和抗干扰能力;施工复杂度,考量特殊地质段施工难度;对后续采区接续适应性,看方案是否利于矿井中后期开拓。(2)安全保障性指标:着重考量开拓布置对矿井灾害预防控制能力,涵盖灾害规避能力,评估主要巷道布置在稳定岩层、避开高风险地质构造的情况;防灾系统完备性,评估通风分区、避灾路线等设计水平;潜在风险等级,综合评估开拓系统面临瓦斯突出等风险的综合情况。(3)经济效益性指标:从全生命周期成本角度评价,包含初期建设投资,涉及开拓巷道掘进支护等一次性投入;运营维护成本,考虑巷道维护等长期支出;万吨掘进率,反映巷道布置集中高效程度;投资回收期与净现值,用于动态分析经济效益。(4)资源回收率指标:评价开拓布置对煤炭资源充分采出的贡献,主要是采出率,分析各类保护煤柱留设是否合理,能否在保障安全前提下最大限度减少煤炭损失,优化开拓布置应提高资源利用率。

2.4 开拓布置优化流程构建

(1)地质信息集成与建模:优化流程先全面精准获取解读地质信息,综合运用三维地震勘探、物探钻探等手段,查明矿区构造位置产状性质,掌握煤层等空间变化规律,获取地应力等数据;基于多源数据构建高精度三维地质与地质力学模型,为后续工作提供可靠地质原型。(2)多方案生成与初步筛选:依托集成地质模型与开采条件,结合经验与创新思维,生成开拓方式差异明显的多个备选方案;用评价指标体系对各方案初步定性定量分析对比,剔除有明显技术或安全可靠性缺陷的方案,保留有优化潜力的可行方案。(3)数值模拟与深入分析:用先进数值模拟软件对可行方案开展详细采动响应模拟,模拟涵盖巷道掘进及受采动影响时的围岩应力位移等情况,以及通风网络阻力稳定性、瓦斯运移等专项;借此预测工程问题与安全风险,获取关键评价参数。(4)综合评价与方案决策:将数值模拟定量数据与其他定性因素输入综合评价指标体系量化评分,采用多目标决策方法确定指标权重并计算方案得分;组织多专业专家对评分结果综合评议,权衡利弊,选出技术安全经济资源综合最优的开拓布置方案。(5)动态反馈与持续优化:选定方案实施时,全面监测采集巷道收敛等工程数据,与预测结果对比验证,若出现偏差或新地质情况,及时反馈至地质与设计模型,调整优化后续未施工巷道布置或支护参数,实现全过程优化^[3]。

3 复杂地质条件下煤矿开采工艺优化

3.1 工艺适应性分析

(1)针对地质构造的适应性:断层密集发育区域,长壁综采工作面推进受阻,过断层时顶板管理难且设备损坏风险大,短壁综采、连采或巷采工艺更灵活,能绕开小型断层或快速通过断层带;宽缓褶皱区域,长壁综采可调整工作面伪斜布置或用大功率变频调速采煤机适应煤层变化;紧密褶皱或煤层倾角剧变区域,则需考虑分层或倾斜长壁开采等变种工艺。(2)针对煤层稳定性与围岩条件的适应性:煤层厚度稳定性影响工艺选择,中厚及厚煤层首选长壁综采,厚度变化大的煤层需评估分层、放顶煤开采或选用调高范围大的采煤机,极薄煤层对设备与开采空间要求苛刻;顶底板岩性影响支护与安全,坚硬顶板需强力支架和切顶措施,松软底板要求支架底座面积大,三软煤层要选特定液压支架,可能还需配合特殊开采工艺参数。(3)针对灾害条件的适应性:高瓦斯煤层开采工艺要利于瓦斯预抽与采动卸压瓦斯治理,长壁综采常用U型通风配合走向高抽巷或顶板定向长钻孔,短壁开采通风系统复杂,要重点防范瓦斯积聚;具冲击地压倾向煤层,选开采工艺要考虑规避应力集中区、执行卸压措施,有时要调整工作面布置方向与推进速度,水文地质复杂区域,工艺要保证工作面排水能力并利于探放水。

3.2 优化技术应用

(1)地质保障与精准探测技术:优化需精准掌握地质条件,井下槽波地震、无线电波透视等物探手段,配合随钻测井与精细地质编录,可超前探测工作面前方数十米至上百米内的隐伏构造、煤层变薄带等地质异常,基于这些数据构建动态地质模型,能为开采工艺参数实时调整提供决策支撑。(2)智能化开采与自适应控制技术:综采工作面智能化系统借助安装在采煤机、液压支架及运输设备上的众多传感器,实时感知设备姿态、煤岩识别、支护状态等信息,依据预设算法模型,系统能实现采煤机记忆截割、液压支架自动跟机移架等功能,遇地质变化,可辅助或自动调整采高、速度,减少对地质条件的依赖,保障生产平稳。(3)工艺参数动态调控技术:开采工艺要依据揭露地质信息动态优化,根据顶板压力监测数据调整支护强度与推进速度;按煤层硬度与夹矸情况优化采煤机截割牵引速度、滚筒转速;依据瓦斯涌出监测情况调整通风风量与抽采参数;结合煤岩识别结果优化放顶煤工艺的放煤步距与开口大小,提升回收率、降低含矸率。(4)特殊工艺的改进与创新:针对特定难题,工艺持续优化创新,放顶煤开采优化放煤顺序与工

艺改善回收效果；坚硬顶板引入高压水射流预裂技术降低老顶来压强度；软岩巷道采用联合支护与柔性让压元件控制变形，为工作面端头区域提供稳定空间^[4]。

3.3 效率与安全平衡

(1)风险预控与工艺决策：工艺选择和参数调整要以系统风险评估为基础，对已识别的高风险区域如断层破碎带、高瓦斯区等，工艺优化要优先落实安全措施，像降低推进速度、加强支护等，效率目标需适当让步安全，建立基于风险等级的工艺调整预案，让安全风险可控可防。(2)可靠性设计与冗余保障：复杂地质环境下，设备与系统可靠性是保障安全与效率的基础，选用高可靠性且具备故障自诊断功能的装备，虽初期投入大，但能减少非计划停机，利于长远生产效率；在通风、监测监控等关键安全系统设置必要冗余，确保局部失效时整体功能不受影响，为事故预防和应急响应留出空间。(3)人-机-环协同：优化工艺系统需与人员操作和作业环境紧密配合，通过人机工程学设计改善操作界面，降低工人劳动强度和误操作概率；加强人员培训，让其理解优化工艺原理和应急程序；营造良好作业环境，如做好粉尘治理、控制温湿度，既保障工人健康，又提高设备可靠性和人员工作效率，间接保障安全。(4)经济性综合评价：平衡效率与安全要做全生命周期经济性分析，不能只看初始投资或瞬时产量，要综合考虑安全投入降低风险的效益、设备可靠性提升减少的成本和中断、资源回收率提高的收益；安全投入不足的方案，一次灾害事故就可能造成巨大损失，综合经济性不如安全投入充分的方案。

3.4 工艺系统协同优化

(1)采掘衔接协同：开采工艺及推进速度影响采掘接续，高产高效综合机械化开采对巷道掘进速度要求更高，需优化掘进工艺，如用综掘机、掘锚一体机，让工作面准备速度跟上回采节奏；回采工艺优化也要考虑对邻近巷道围岩稳定性的影响，防止采动压力给后续采区巷道维护带来困难。(2)采-运系统协同：工作面高产能

力要与矿井运输系统提升能力适配，优化开采工艺时，要评估煤炭从工作面到地面的运输链条瓶颈环节，通过协调工作面出煤节奏、优化煤流控制、保障运输系统可靠，避免运输能力不足限制开采效能。(3)采-通风系统协同：开采工艺和通风系统相互制约影响，工作面布置、推进方向与速度决定采空区形态和矿山压力分布，影响瓦斯涌出和通风网络稳定性；优化开采工艺需与通风系统设计联动，确保通风网络合理、风量充足稳定，有效处理采空区瓦斯，特殊通风方式更需紧密配合。(4)信息流与决策协同：构建统一生产信息管理平台，集成地质、测量等多源数据，是实现系统协同优化的技术基础，通过数据融合分析，为开采工艺实时调整、灾害早期预警、生产调度优化提供支持，实现从单点工艺优化到全矿井一体化智能协同优化，达成复杂地质条件下安全高效高回收率开采目标^[5]。

结束语：复杂地质煤矿的高效开拓与开采需以地质适应性为核心，通过动态优化的布置设计、智能化工艺调控及多系统协同技术，实现灾害防控、效率提升与资源高回收率的协同目标。研究提出的优化方法可有效应对构造、水文及灾害挑战，提升矿井全生命周期经济性与安全性，为同类条件矿井技术升级与可持续发展提供可复用的实践范式。

参考文献

- [1]李明.复杂地质条件下的煤矿开采技术优化研究[J].煤炭工程,2020,35(4):23-28.
- [2]王强.地质雷达在煤矿开采中的应用与实践[J].煤炭学报,2021,40(3):45-50.
- [3]李鑫.关于复杂地质条件下的煤矿掘进支护技术及其运用探讨[J].内蒙古煤炭经济,2024(21):178-180.
- [4]王小勇,王照明.较复杂地质条件下煤矿快速掘锚并行工艺应用研究[J].智能矿山,2022,3(12):66-71.
- [5]柴韶华.复杂地质条件下采空区老空水远距离探放技术[J].煤,2023,32(4):100-101,104.