

复杂地质条件下矿山工程开采管理技术

夏宇飞

贵州金益煤炭开发有限公司 贵州 习水 564600

摘要：复杂地质条件给矿山工程开采带来诸多挑战，如断层、高水压等易引发安全事故，制约开采效率。本文聚焦复杂地质条件下矿山工程开采管理技术，首先界定复杂地质条件的非均质性、不稳定性等特征，按地质构造、岩体力学特性及灾害风险类型进行分类。其次，阐述智能化掘进、综合机械化开采、支护及安全监测等关键技术的应用机制。最后，提出“技术-流程-机制”三位一体的协同管理体系，包括技术-经济优化、多专业协同及动态风险管控。研究为复杂地质条件下矿山安全高效开采提供了系统性技术与管理方案，对提升矿山工程开采管理水平具有参考价值。

关键词：复杂地质条件下；矿山工程开采管理；关键技术

引言：在复杂地质条件下矿山工程开采中，当前国内外在相关技术上虽有进展，但针对复杂地质的系统化管理仍待完善。本文结合煤炭开发实践，先分析复杂地质条件的特征与分类，再探讨智能化掘进等关键技术，最后构建协同管理体系，旨在为解决复杂地质下矿山开采管理难题提供技术支撑与管理思路，推动矿山开采的安全与高效发展。

1 复杂地质条件特征与分类

1.1 复杂地质条件的特征

复杂地质条件是指在自然地质作用与构造运动影响下，矿山岩体呈现出的非均质性、不稳定性及多因素耦合性特征，其核心表现可归纳为以下三个维度。（1）从地质构造角度，以断层、破碎带、褶皱为典型代表的构造发育是首要特征。断层带往往伴随岩体完整性破坏，形成宽度从数米到数十米的软弱夹层，导致岩体强度骤降，如煤矿开采中遇到的正断层常引发顶板突然垮落；破碎带则由风化或构造应力作用形成，内部岩体呈散体或碎块状，透水性强，易引发突水或瓦斯聚集。（2）岩体物理力学性质的极端化。高地应力环境下岩体易发生岩爆，如深埋金属矿山中，应力集中区的岩体会突然释放弹性势能，对开采设备和人员造成冲击；软弱夹层与坚硬岩层的交替分布形成显著的力学差异，导致巷道支护受力不均，增加支护设计难度。（3）多灾害源耦合。高水压与破碎岩体组合易引发突水事故，如金属矿山开采中，灰岩含水层与断层导通时，水压可突破岩体裂隙造成大规模涌水；瓦斯富集区与高地应力叠加则可能诱发瓦斯突出，而顶板破碎带与采空区组合会加剧顶板冒落风险，这些灾害因素相互作用，形成“一触即发”的连锁反应。

1.2 复杂地质条件的分类

基于矿山工程实践，复杂地质条件可按以下主导影响因素与工程危害类型进行分类，形成多维度分类体系。（1）按地质构造复杂性可分为构造破碎型、褶皱发育型和断层密集型。构造破碎型以岩体完整性系数低于0.3为标志，常见于沉积岩与岩浆岩接触带；褶皱发育型表现为岩层呈波状弯曲，背斜顶部易形成张裂隙，向斜核部则易聚集地下水；断层密集型指单位面积内断层条数超过5条，如我国西南地区金属矿山常受多组断层切割影响。（2）按岩体力学特性可分为高地应力型、软弱夹层型和坚硬岩体与松散层交互型。高地应力型通常存在于埋深超过800米的矿山，岩体初始应力超过20MPa，易引发岩爆或巷道变形；软弱夹层型含单层厚度大于1米的泥岩、页岩等软弱岩层，其单轴抗压强度低于10MPa，会导致支护结构失效；交互型则表现为坚硬砂岩与松散煤层交替出现，如华北部分煤矿的“两硬一软”地层结构。（3）按灾害风险类型可分为水害主导型、瓦斯突出型和顶板灾害型。水害主导型矿区多位于富水地层或岩溶发育区，如我国淮南矿区受奥陶系灰岩水威胁；瓦斯突出型常见于煤层瓦斯含量超过10m³/t的区域，开采时易发生瓦斯动力现象；顶板灾害型则因顶板岩层为厚层砂岩或砾岩，垮落时具有突发性和冲击性，对工作面安全构成严重威胁^[1]。

2 复杂地质条件下矿山开采管理关键技术

2.1 智能化掘进技术

智能化掘进技术通过融合自动化装备、实时感知系统与智能决策算法，实现复杂地质条件下巷道掘进的精准化与高效化。其核心构成包括以下智能掘进装备、动态参数调控系统及远程协同控制平台。（1）智能掘进装

备采用模块化设计,针对硬岩、软岩及破碎带等不同地质条件,配备自适应截割机构,通过截割头转速与推进速度的无级调节,实现对岩体的差异化破碎。装备搭载的多光谱岩性识别装置,可实时分析掌子面前方岩体的抗压强度、裂隙发育程度,为截割参数优化提供数据支撑。装备集成的姿态感知系统,通过激光定位与惯性导航组合,实现掘进轨迹的厘米级控制,避免因地质构造突变导致的巷道偏移。(2)动态参数调控系统基于掘进过程中的实时监测数据,构建截割效率与能耗的动态平衡模型。当遭遇断层或破碎带时,系统自动启动防卡堵程序,通过调整截割头摆角与推进力,减少刀具磨损与装备过载。针对高瓦斯或富水地层,系统可联动通风与排水设备,同步调节掘进速度与辅助系统功率,确保作业环境安全。(3)远程协同控制平台通过5G或光纤传输技术,实现掘进装备的异地操控与多设备协同作业。平台集成三维地质模型与实时掘进数据,可对掘进路径进行预演与修正,并通过数字孪生技术模拟不同地质条件下的掘进效果,提前制定应对方案。

2.2 综合机械化开采技术

综合机械化开采技术通过整合以下采煤机、刮板输送机、液压支架等设备的协同运作,实现复杂地质条件下矿山资源的连续化高效开采。(1)采煤机(或采矿机)采用变频调速与电液控技术,可根据煤层厚度、倾角及硬度自动调整截割高度与牵引速度。针对薄煤层或急倾斜煤层,装备采用矮机身设计与防滑制动系统,通过多自由度截割臂实现对复杂煤层形态的适应。在破碎顶板条件下,采煤机搭载的顶板状态监测装置可实时反馈支护需求,联动液压支架进行同步护顶。(2)刮板输送机采用高强度耐磨链条与中部槽,通过伸缩机尾与弯曲段优化设计,适应工作面的起伏与推进方向变化。其驱动系统采用多电机功率平衡技术,可根据负载分布自动调节各电机输出扭矩,避免因局部卡阻导致的停机。在高瓦斯环境中,输送机配备防爆型驱动单元与温度监测系统,确保运行安全。(3)液压支架作为综合机械化开采的核心支护设备,采用高工作阻力设计与快速移架技术,移架速度可达6-8秒/架。针对松软底板,支架底座采用防滑防陷结构,通过增大接触面积与注浆加固相结合,减少支架下沉。在断层带或煤层变薄区,支架具备伸缩梁与护帮板的联动控制功能,可快速调整支护范围,保障采煤机通行空间。(4)综合机械化开采技术还包括工作面设备的智能联动控制系统,通过工业以太网实现采煤机、输送机与液压支架的实时通信,构建“采-支-运”一体化作业流程^[2]。

2.3 支护技术

复杂地质条件下的支护技术以围岩稳定性控制为核心,通过材料创新、结构优化与工艺改进,构建动态自适应的支护体系,涵盖以下主动支护、被动支护及联合支护等多种形式。(1)主动支护技术以高强度锚杆、锚索为核心,通过施加预紧力使围岩形成承载结构。锚杆采用左旋无纵筋螺纹钢材质,配合树脂药卷锚固,在软岩地层中可实现全长锚固,锚固力不低于200kN。锚索则采用高碳钢绞线,长度根据围岩松动圈厚度确定,通过张拉设备施加150-300kN的预紧力,控制深部岩体位移。针对高应力地层,可采用让压型锚杆(索),其通过套筒式结构实现分级让压,避免支护体因应力集中而破坏。(2)被动支护技术主要包括钢支架、U型钢棚及喷射混凝土等,用于围岩完整性差或破碎带的临时或永久支护。钢支架采用可缩性结构设计,通过搭接处的滑块装置实现轴向收缩,适应围岩的变形压力。喷射混凝土采用钢纤维或聚丙烯纤维增强材料,配合速凝剂使用,初凝时间控制在5-10分钟,终凝时间不超过30分钟,早期强度可达10MPa以上,能快速封闭围岩表面,防止风化与剥落。(3)联合支护技术是复杂地质条件下的主流方案,通过主动与被动支护的协同作用提升支护效果。在断层破碎带,常采用“锚杆+锚索+喷射混凝土+钢拱架”的复合支护形式,先以喷射混凝土封闭表面,再通过锚杆锚索加固深部岩体,最后用钢拱架承担局部集中应力。在软岩巷道中,可采用“注浆加固+锚杆支护+锚索补强”技术,通过注浆改良岩体力学性能,再结合锚杆锚索形成立体支护体系。

2.4 安全监测技术

安全监测技术通过构建多维度、实时化的感知网络,实现复杂地质条件下矿山开采过程中风险因素的全面监控与预警,具体如下:(1)监测参数体系涵盖地质力学、环境与设备状态三大类。地质力学参数包括围岩应力、位移、裂隙开合度及支护结构受力,通过埋入式应力传感器、光纤光栅位移计及测缝计实现采集,采样频率不低于1Hz。环境参数涉及瓦斯浓度、粉尘含量、空气温度及水质指标,采用红外瓦斯传感器、激光粉尘仪及水质在线监测仪,监测范围覆盖采掘面、巷道及通风系统。设备状态参数包括电机电流、轴承温度、液压系统压力等,通过加装传感器实时捕捉装备运行数据,判断是否存在异常磨损或故障隐患。(2)监测系统架构采用“分布式采集+集中式处理”模式。前端监测设备通过无线传感网络(如LoRa、ZigBee)或有线传输(如光纤)将数据上传至地面服务器,传输时延控制在100ms以

内。数据处理平台搭载机器学习算法,可对监测数据进行趋势分析与异常识别,例如通过围岩位移速率的突变判断潜在冒顶风险,通过瓦斯浓度与风速的关联性分析预警积聚隐患。平台集成三维可视化功能,将监测数据与地质模型叠加,直观展示风险区域的空间分布。(3) 预警机制采用分级响应模式,根据风险等级自动触发相应措施。一级预警(低风险)通过系统弹窗提示操作人员关注;二级预警(中风险)自动调整生产参数,如降低掘进速度或增强通风量;三级预警(高风险)立即启动停机程序,并联动应急广播系统通知人员撤离^[3]。

3 复杂地质条件下矿山开采的协同管理体系构建

复杂地质条件下的矿山开采管理需突破单一技术层面,构建“技术-流程-机制”三位一体的协同体系,通过以下多要素联动实现安全、效率与可持续性的动态平衡。(1) 技术-经济协同优化机制。建立地质条件与开采成本的动态关联模型,基于三维地质模型与开采工艺参数,量化断层处理、支护强化等特殊工序对成本的影响系数,形成“地质复杂度-技术投入-产出效益”的量化评估矩阵。针对高风险区域,采用边际效益分析法,在资源回收率与安全投入间建立平衡点,例如对断层带残留矿体,通过经济阈值计算确定是否采用充填开采回收,避免过度投入导致的效益损耗。引入全生命周期成本理念,将后期生态修复费用纳入前期开采方案设计,通过资源回收率提升与环境治理成本下降的耦合分析,优化开采技术组合。(2) 多专业协同作业流程。要打破传统工种界限,构建地质、采矿、安全、机电多专业的实时会商机制。依托数字平台实现地质数据、开采进度、监测结果的跨专业共享,建立“地质异常预警-技术方案调整-现场执行反馈”的快速响应链条。在掘进与回采衔接阶段,地质部门提前72小时提交掌子面前方构

造预报,采矿部门同步调整支护参数与回采顺序,机电部门根据岩体硬度变化优化设备配置,通过工序节点的时空精准匹配,减少因地质条件突变导致的停工待料。

(3) 动态风险分级管控机制。基于地质条件动态变化更新风险等级,建立“基础风险评估-实时风险修正-应急资源联动”的管理闭环。基础风险评估结合地质勘查数据,按构造发育程度、灾害可能性等指标将开采区域划分为高、中、低三级风险区,对应不同的开采强度与安全投入标准。实时风险修正通过安全监测系统的实时数据,动态调整风险等级,应急资源联动机制则整合井下避难硐室、救援物资与地面应急队伍,根据风险等级预设响应路线与资源调配方案,确保高风险区域突发状况时,救援力量能在45分钟内抵达现场^[4]。

结束语

本文研究了复杂地质条件下矿山工程开采管理技术。明确了复杂地质的特征与分类,阐述了多项关键技术的应用,构建了协同管理体系。这些成果为矿山应对复杂地质挑战提供了有效方案。但技术在极端地质条件下的适应性及管理体的动态调整精度仍需提升。未来可深化智能化技术融合,优化管理机制,以适应更复杂的矿山开采环境,促进矿山工程可持续发展。

参考文献

- [1]钱民国,李田丰.复杂地质条件下矿山工程开采管理技术研究[J].中国金属通报,2021(17):203-204.
- [2]宋晶.复杂地质条件下矿山工程开采管理技术[J].世界有色金属,2023(9):55-57.
- [3]刘志强,宋朝阳,程守业,等.复杂地层条件智能化建井关键技术及发展趋势[J].建井技术,2023,44(1):1-7.
- [4]刘浩伟.采矿工程中的采矿技术与施工安全管理研究[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2020(1):1910-1911.