

深部煤矿采矿工程关键技术挑战与解决方案

赵鹏 李建峰

山西襄矿晋平煤业有限公司 山西长治 046203

【摘要】随着浅部煤炭资源的逐步枯竭,我国煤炭开采正向深部迈进。深部煤矿采矿工程因其特殊的地质环境和应力条件,面临着地压剧烈、通风降温困难、水害威胁严重、灾害易发等一系列技术挑战。本文系统分析了当前深部采矿过程中存在的关键问题,并结合国内外的研究与实践,提出了针对性的解决策略,包括地压控制技术优化、智能化通风与热害治理、深部防水技术的创新、信息化与自动化采矿系统的建设等。研究认为,只有通过多技术融合和系统性协同创新,才能实现深部煤矿采矿的安全、高效与绿色发展。

【关键词】深部采矿;地压控制;通风降温;水害防治;智能化采矿

【中图分类号】TD40 **【文献标识码】**A

Key Technical Challenges and Solutions in Deep Coal Mining Engineering

Zhao Peng Li Jianfeng

Shanxi Xiangkuang Jiping Coal Industry Co., Ltd. Changzhi City, Shanxi Province 046203

【Abstract】 With the gradual depletion of shallow coal resources, China's coal mining is advancing into deeper geological layers. Deep coal mining engineering faces a series of technical challenges due to its unique geological environment and stress conditions, including intense ground pressure, difficulties in ventilation and cooling, severe water hazards, and frequent disasters. This paper systematically analyzes key issues in current deep mining processes and proposes targeted solutions based on domestic and international research and practices. These include optimizing ground pressure control technology, intelligent ventilation and thermal hazard management, innovation in deep waterproofing technology, and the development of information-based and automated mining systems. The study concludes that only through the integration of multiple technologies and systematic collaborative innovation can safe, efficient, and green development in deep coal mining be achieved.

【Key words】 deep mining; ground pressure control; ventilation and cooling; water hazard prevention and control; intelligent mining

引言

煤炭作为我国一次能源的重要组成部分,长期以来在国民经济发展中发挥着不可替代的作用。随着浅部资源的日益枯竭,煤炭采掘不断向深部延伸,部分矿井开采深度已超过1000米,甚至接近1500米。深部煤矿采矿不仅意味着资源储量的增加,也带来了更复杂的工程环境和更严峻的技术挑战。与浅部相比,深部采矿面临更高的地应力、更复杂的地质构造、更大的热害和更频繁的灾害风险。这些问题直接影响矿井的安全生产、经济效益及作业人员的健康,成为制约我国煤炭工业转型升级的瓶颈。本文旨在深入分析当前深部煤矿采矿工程面临的核心技术挑战,并结合已有研究与工程实践,探索可行且可推广的解决路径,以期为深部煤炭资源的高效开发与利用提供理论依据与技术支持。

1 深部煤矿采矿工程的技术挑战

1.1 高地应力与剧烈矿压显现

随着煤矿开采深度的持续增加,地层应力显著增强,引发的矿压活动也愈加剧烈,表现为巷道围岩破坏、顶板垮落、煤与瓦斯突出以及冲击地压等复杂现象。这类问题具有突发性强、破坏力大、应对窗口期短等典型特征,严重威胁现场人员的生命安全和井下结构的稳定性。深部矿压显现呈现出高频率、高强度、区域性突变的特点,传统的经验式支护方式往往难以及时、有效应对。更为复杂的地质构造和应力环境也对采掘工艺提出了更高要求。许多矿井因无法科学预测应力集中区或矿压活动区域而造成重大经济损失,甚至被迫停产。因此,建立基于实时监测数据的矿压动态评估与预测模型,优化支护结构并实现柔性控制,已成为当前深部开采过程中亟待突破的关键技术瓶颈。

1.2 通风与热害问题突出

深部煤矿作业面通常距离地表较远,通风系统不得不覆盖更长的距离,而随着井筒加深和巷道延伸,风流路径复杂

化、摩擦阻力上升,导致有效通风能力下降。此外,地温随深度升高,井下环境热量积聚严重,导致作业区温度常年维持在30℃以上,部分高热区甚至突破35℃。这种超常高温不仅极大地降低了矿工的作业效率和舒适度,也对人身健康构成长期威胁,易引发中暑、脱水等职业病。同时,设备在高温环境下运行稳定性差,故障率提升,检修难度加大,进而影响全矿井的生产节奏。不仅如此,热害还会促使瓦斯涌出量增加,增强其活跃性,使瓦斯爆炸与煤自燃的风险显著提升。高温高湿的复合工况,已成为深部矿井安全生产的最大隐患之一,也对热害治理与精准通风技术提出更高要求。

1.3 水害威胁严重

随着采矿深度的不断延伸,煤层所处的地层常与高压含水层密切接触,一旦开采扰动激发隐蔽导水构造或破坏隔水层,极易引发突水、突泥等水害事故。尤其在断裂构造发育密集区域,受采动应力影响,水力连通性增强,进一步加剧水害发生的可能性。突水灾害不仅带来巨量的水流冲击力,瞬间淹没作业面,还常伴随顶板垮塌和泥沙流动,破坏力极强。加之深部水文地质条件复杂多变,传统的地质勘查手段在识别含水层及导水通道方面存在盲区,致使预测预警手段滞后,存在极大的工程风险。一旦发生突水事故,现场排水能力常常难以应对,加之水体携带的悬浮物堵塞通道,使得抢险难度大幅上升,成本高昂。因此,亟需引入高精度地质探测设备和三维建模技术,提升对潜在含水层分布及其动态变化的掌控力,推动水害风险前移防控。

1.4 瓦斯灾害频发

深部煤层具备高瓦斯、高压、高地温的特性,其瓦斯含量远高于浅部煤层,瓦斯压力也更具爆发力,导致突出风险显著增加。在深部高地应力的挤压作用下,煤层内部裂隙封闭性好,储气能力强,一旦采掘扰动突破临界条件,极易发生大规模瓦斯涌出或猛烈的煤与瓦斯突出事故。此外,高温环境使煤体热解加速,促使瓦斯的解吸速率提升,导致抽采难度加大。传统瓦斯抽采系统面临着抽采不均匀、时效性差、穿透力不足等问题,难以适应深部高压瓦斯快速释放的实际需求。同时,抽采设备长期运行在高温高湿环境中,设备老化和故障频率增高,进一步加剧安全隐患。加强区域性瓦斯治理、优化抽采工艺参数、发展高效密封钻孔与分段抽采技术,并建立实时监控与智能预警系统,已成为保障深部煤矿安全生产的迫切任务。

1.5 装备适应性与智能化水平不足

深部煤矿面临高温、高湿、高压、强扰动等极端作业条件,对采掘、运输、通风、监测等各类设备提出了更高的环境适应性要求。然而,目前大量矿井使用的设备多基于浅部作业标准设计,缺乏耐热、防潮、防爆、抗冲击等针对性技术适配,设备故障率居高不下。更为严重的是,在智能化建

设方面,大部分深部矿井仍处于初级阶段,作业依赖人工巡检和经验操作,信息采集延迟、数据传输不稳定,缺乏成体系的远程控制与自动化运行系统。井下设备分散运行、互联互通不足,导致信息孤岛问题突出,难以实现整体协同与动态优化调度。受地质条件限制,5G通信等新技术在井下部署存在技术瓶颈,成为智能矿山发展的现实障碍。因此,未来需加快推进本质安全型、智能协同型矿山装备的开发与部署,构建“透明矿井”与数字孪生系统,实现从“人控”向“智控”的根本转变。

2 关键技术解决方案

2.1 地压控制与巷道围岩稳定技术

在深部煤矿中,地应力显著增强,支护系统必须应对更大的变形与冲击载荷。当前,应用新型高强度支护材料,如高预应力锚杆、钢带、锚索等,已成为提升围岩稳定性的基础措施。同时,结合注浆加固与喷锚网一体化支护技术,可有效封闭围岩裂隙、提高整体承载能力。对于冲击地压频发区域,传统刚性支护难以满足耗能抗冲击的双重需求,因此引入可变形支架和吸能锚杆等新型结构,能在一定变形范围内分散冲击载荷,避免能量集中导致支护系统失效。另一方面,采用智能地压监测系统,布设应力感应器、位移传感器和数据记录装置,可实现对地应力场变化的实时监控。结合数值模拟与数据拟合技术,构建预测预警模型,提前发现高风险区域,为调整采掘方案、支护策略提供科学依据,从源头减少矿压灾害的发生概率。

2.2 通风与热害综合治理技术

深部煤矿热害已成为制约安全生产的主要难题之一。随着采深增加,地温升高显著,井下热量来源包括地层传导、设备散热和人员活动等多种因素,传统通风系统因路径长、阻力大,面临送风效率降低与风阻升高等问题,难以形成有效风流,导致局部区域热量堆积严重。为此,需系统优化通风布局,采用分区通风和局部强制送风相结合的手段,通过双回路系统形成闭合通风网络,既降低通风能耗,又提升风流覆盖效率。同时,在井筒或主要通风节点设置高效热交换系统,可通过空气换热器或水冷壁装置调节风温,缓解高温困扰。在热害特别严重区域,还需引入集中式降温设施,如地面制冷站、冷水循环装置、冰浆制冷系统等,与空调送风系统配合使用,保障井下环境温度稳定在人体可接受范围内。配备个体降温装置如冷却背心、便携式冷风机等,可为一线工人提供额外防护。为降低高温作业对人体健康的伤害,应推行分时作业制度,对高温区域实行轮岗作业,合理控制单次工作时长,并加强作业人员健康监测,从组织机制上避免中暑或热应激等生理风险的发生。

2.3 深部水害防治关键技术

深部水害是当前煤矿安全生产中的重大隐患,其复杂性与突发性主要源于深部地质构造的不确定性和含水层水力联系的隐蔽性。为有效预防和控制此类灾害,必须在探测与治理两个层面实现技术突破。在探测方面,三维地质建模与水文探测技术的集成应用是关键。通过综合利用地质雷达、三维地震勘探、瞬变电磁法等高分辨率物探手段,可以在不开挖的前提下,对煤层周边的含水层分布、断裂构造及导水通道进行立体成像。这种多源信息融合构建的地下三维模型,能够清晰反映水体空间分布与通流路径,为制定有针对性的治理措施提供精准依据。特别是在断裂密集或断层复杂的区域,该技术能有效识别“隐蔽水害源”,极大提升了前期勘查的准确性和时效性。在治理层面,注浆隔水与突水封堵技术已成为矿井水害防控的核心手段。具体做法是在发现潜在突水通道后,迅速开展高压注浆作业,利用高粘度浆液充填裂隙和导水通道,形成具有强阻水性能的隔水帷幕。同时,针对不同水力条件,可采用双液注浆技术,其特点是浆液在导水通道中快速反应凝固,封堵效果更强,适用于高压突水情形。在采掘工作面推近前,提前进行区域预注浆加固,可有效增强围岩的整体致密性和防水能力,减少施工扰动引起的突水风险。这一系列技术的集成应用,不仅提高了对水害的预测预控能力,也为深部煤矿实现安全、高效、可持续开采奠定了坚实的技术基础。

2.4 瓦斯治理与安全技术创新

在深部煤矿中,瓦斯含量高、压力大且赋存条件复杂,传统抽采方式难以满足快速、高效治理的需求。因此,区域瓦斯抽采技术成为关键突破口。通过优化钻孔布置设计,不再采用单一方向或集中布孔方式,而是结合定向钻进、多分支水平钻孔等先进技术手段,实现抽采孔对煤层及其裂隙系统的全覆盖,扩大瓦斯抽采半径。多分支钻孔不仅能显著提高煤体的渗透性,还能降低井下布孔工作量,提高作业效率。针对低渗透煤层,还可结合水力压裂或CO₂脉冲解吸技术,增强瓦斯流动能力,从而在采掘前期实现快速降压、降浓,显著减少采掘期间的瓦斯突出现象,保障作业安全。

另一方面,瓦斯治理不仅依赖抽采效率,更需要强大的实时监控系統提供信息支撑。智能瓦斯监控系统通过在井下

布置高灵敏度传感器网络,实现对甲烷浓度、风速、负压、温度等多项参数的连续采集。监测数据通过边缘计算节点进行初步分析,再上传至地面控制中心进行大数据汇总与建模,实时生成风险等级评估与变化趋势图。该系统不仅能在瓦斯超限时自动触发报警,还可联动风机调速、断电停机应急系统快速响应,形成集“监测—预警—处置”于一体的智能闭环控制机制,大大提升了深部煤矿的本质安全水平。

2.5 智能化采矿技术体系建设

随着深部矿山开采条件日益恶劣,传统人工密集型作业模式已难以满足高效、安全生产的需求。推动矿井智能化转型,是实现深部煤矿本质安全的重要路径。首先,在装备方面,应加快推广高可靠性采掘设备,如具备远程操控功能的掘进机、防爆型电动运输车辆、智能化液压支架系统等。这些设备在适应高温、高湿、高压环境的同时,具备状态自诊断、参数调节等功能,减少人工干预。其次,打造“透明矿井”体系,以物联网为核心,将井下人员、设备、环境信息进行实时感知与集成,通过5G通信将数据同步至地面调度中心,实现远程可视化管理。在此基础上,借助人工智能分析能力和数字孪生平台,矿方可模拟多种采掘方案,评估其安全性与效率,进行最优决策部署。逐步推动无人化作业区建设,尤其在高风险区域,以智能系统代替人工进入,降低人员井下暴露率,提高整体安全保障水平,是深部开采的未来方向。

结束语

深部煤矿采矿作为我国煤炭工业发展的必然趋势,正在面临前所未有的技术挑战。从地压控制到通风降温,从水害治理到智能化采掘,每一个环节都需要持续的技术创新与系统优化。本文在梳理深部采矿关键技术难题的基础上,提出了多项可行性解决策略,强调应以安全为核心,以科技为支撑,推动煤矿从“人力密集”向“技术密集”转型。未来,应加强跨学科融合与产学研协同,推动智能、安全、绿色深部开采技术体系的建立,为实现我国能源安全与矿业可持续发展提供坚强支撑。

参考文献

- [1]穆利明. 采矿工程中煤矿深部岩巷围岩稳定与支护策略[J].能源与节能, .2024.08.067.
- [2]张喜成. 采矿工程中煤矿深部岩巷围岩稳定与支护策略[J].矿业装备, 2023, (12): 7-9.
- [3]徐梦萍. 浅析芦岭煤矿采矿权深部勘查区地质构造[J].西部探矿工程, 2023, 35(06): 126-128+132.