

复杂地质条件下的采矿掘进支护技术及应用

范清武

宁夏王洼煤业有限公司银洞沟煤矿 宁夏 固原 756599

摘要: 复杂地质条件下的采矿掘进面临断层、褶皱、高应力、软岩及高渗透水压等多重挑战,影响围岩稳定性。锚杆(索)支护、注浆加固、钢拱架与喷射混凝土、可缩性支护及联合支护体系等技术,通过主动锚固、注浆改性、刚度匹配与动态让压等机制,实现支护-围岩协同承载。结合地质分级、掘进时序及智能化监测,形成动态匹配与适应性设计,保障掘进安全。

关键词: 复杂地质条件;采矿掘进;支护技术;动态匹配;联合支护

引言: 采矿掘进中,复杂地质条件如断层破碎带、高地应力、软岩大变形及高渗透水压等,严重威胁巷道稳定性与施工安全。传统支护技术难以满足动态地质变化需求,易引发支护失效与巷道坍塌。本文系统阐述复杂地质条件特征、支护技术分类与原理,并探讨支护参数动态匹配、掘进时序协同优化及智能化监测反馈机制,为复杂地质条件下采矿掘进支护提供理论支撑与技术参考。

1 复杂地质条件的主要类型与特征

1.1 地质构造复杂性

地质构造活动塑造的断层、褶皱、节理裂隙,直接改变岩体结构完整性。断层作为地壳断裂面,两侧岩体发生显著位移,形成破碎带与应力集中区。当采矿掘进遇断层时,破碎岩体极易垮落,巷道顶部失去有效支撑,引发坍塌风险。褶皱构造使岩层弯曲变形,在褶皱核部与转折端,岩体受张力作用裂隙发育,结构强度大幅下降,削弱围岩自稳能力。节理裂隙如同岩体内部的“隐形伤口”,将岩体切割成大小不一的岩块,破坏岩体连续性,降低其整体承载性能。岩体破碎带与软弱夹层在空间分布上无规律可循。破碎带由断层错动、风化作用形成,岩性松散、胶结程度差,常含大量岩屑与黏土矿物。软弱夹层多由页岩、泥岩等软质岩层构成,力学强度低、抗剪性能差。两者在采矿巷道揭露时,易发生片帮、冒顶现象,若支护不及时,破碎岩块与软弱夹层会持续变形,挤压支护结构,导致支护失效。

1.2 地应力与岩爆风险

高地应力环境下,围岩变形遵循弹性、塑性、流变不同阶段的力学规律。弹性变形阶段,岩体在应力作用下产生可逆形变,当应力超过岩体弹性极限,进入塑性变形阶段,岩体内部结构发生不可逆破坏,出现裂隙扩展与塑性流动。流变阶段中,岩体在长期应力作用下缓

慢变形,即使应力低于岩体强度,仍会发生蠕变现象,导致巷道持续收缩、断面变小。岩爆发生于岩体内部能量积聚与瞬时释放。深部开采时,高地应力使岩体储存大量弹性应变能。当采矿掘进扰动打破应力平衡,岩体中薄弱部位首先破裂,积聚的能量瞬间释放,引发岩块弹射、爆裂等现象。岩爆过程中,高速飞射的岩块不仅威胁作业人员安全,还会破坏巷道支护结构,甚至导致巷道坍塌,严重影响采矿进度与安全。

1.3 软岩与膨胀性围岩

软岩具有显著的流变特性。蠕变现象表现为岩体在恒定应力作用下,变形随时间持续增长,初期变形速率较快,随后逐渐趋于稳定,但在应力变化或外界扰动下,变形会再次加速。膨胀特性常见于含蒙脱石等亲水性矿物的软岩,遇水后矿物颗粒吸水膨胀,产生膨胀压力,挤压巷道支护结构。遇水软化则使软岩强度急剧降低,原本可承担一定荷载的岩体,在水的作用下变得松软,失去承载能力,导致巷道变形加剧^[1]。膨胀性围岩的体积变形随含水量变化而改变,引发支护压力动态波动。围岩吸水膨胀时,对支护结构产生巨大压力,若支护强度不足,巷道会出现底鼓、两帮内挤等变形。当围岩失水收缩,支护压力减小,但多次干湿循环会使围岩结构进一步劣化,支护结构反复承受拉压应力,加速结构损坏,增加支护难度与维护成本。

1.4 水文地质条件

高渗透水压对围岩与支护结构产生多重侵蚀作用。水压直接作用于围岩表面,削弱岩体颗粒间的胶结力,降低岩体强度。在地下水流动过程中,携带的细小颗粒不断冲刷岩体裂隙,使裂隙逐渐扩大,加速岩体破碎。对于支护结构,高水压会产生渗透力,若支护材料抗渗性能差,水会渗入结构内部,侵蚀水泥水化产物,导致支护结构强度下降、耐久性降低。地下水渗流与围岩劣

化相互耦合。渗流作用改变围岩应力状态,动水压力使岩体受到附加作用力,增加岩体失稳风险。渗流携带的化学物质与岩体发生化学反应,进一步破坏岩体结构。例如,酸性地下水会溶解岩体中的碳酸盐矿物,使岩体变得松散破碎。这种耦合效应使围岩稳定性问题更加复杂,对支护技术与施工工艺提出更高要求。

2 采矿掘进支护技术的核心分类与原理

2.1 主动支护技术

2.1.1 锚杆(索)支护

锚杆(索)支护通过锚固作用将不稳定围岩与深部稳定岩体相连。端锚方式将锚杆(索)末端锚固于稳定岩层,依靠锚固段与岩体的粘结力传递拉力;全锚则使锚杆(索)全长与岩体紧密粘结,提供均匀锚固力;预应力锚固通过预先张拉锚杆(索),在围岩中形成压应力区,主动限制围岩变形。力学传递路径上,锚杆(索)受力后,将围岩荷载经杆体传递至锚固段,再由锚固段分散至稳定岩体,实现应力重新分布。锚杆(索)与围岩协同变形基于两者的力学耦合。当围岩发生变形时,锚杆(索)产生约束拉力,阻止围岩位移。随着变形量增加,锚杆(索)拉力相应增大,直至达到极限承载力。这种协同作用使锚杆(索)与围岩形成共同承载体系,提高围岩整体稳定性,避免局部破坏引发的大规模垮塌。

2.1.2 注浆加固技术

注浆加固技术依据注浆材料特性分为化学注浆与水泥基注浆。化学注浆适用于细微裂隙封堵,其浆液流动性强、渗透能力好,能在低压下渗入细小裂隙,快速固化后有效阻断地下水通道,防止围岩因水蚀劣化。水泥基注浆则侧重提升围岩强度,粗颗粒水泥浆液在压力作用下填充较大裂隙与空洞,凝结硬化后与岩体形成整体,增强岩体完整性与承载能力。注浆参数直接影响围岩改性效果。扩散半径决定浆液覆盖范围,较大扩散半径可使更多围岩得到加固,需匹配合理注浆压力,压力过大会导致岩体劈裂破坏。凝胶时间控制浆液固化速度,短凝胶时间适用于动水条件下快速止水,长凝胶时间则便于浆液充分扩散。合理调整注浆参数,可优化围岩力学性能,降低巷道变形风险。

2.2 被动支护技术

2.2.1 钢拱架与喷射混凝土

钢拱架通过自身刚度提供支护阻力,控制围岩变形。不同型号钢拱架刚度各异,需根据围岩压力大小选择适配型号^[2]。在变形控制上,钢拱架可及时承担围岩释放的荷载,限制巷道断面收缩。喷射混凝土具有封闭

性、早强性及抗渗性特点。喷射施工使混凝土紧密贴合岩面,封闭围岩表面裂隙,阻止风化与水侵蚀;早强特性使其能在短时间内形成强度,快速发挥支护作用;抗渗性能有效阻隔地下水,维持围岩稳定。

2.2.2 可缩性支护结构

恒阻大变形锚杆、U型钢支架等可缩性支护结构具备让压机制。恒阻大变形锚杆在承受高应力时,通过杆体特殊结构产生可控变形,吸收围岩变形能量,避免应力集中导致锚杆断裂。U型钢支架的搭接结构在围岩压力作用下可产生相对滑动,释放围岩变形压力。支护-围岩能量耗散过程中,可缩性支护结构通过自身变形消耗围岩释放的能量,使支护与围岩达到动态平衡,防止因支护刚性过大引发围岩突然失稳。

2.3 联合支护体系

锚杆-钢拱架-注浆联合支护发挥协同作用。锚杆提供主动锚固力,改善围岩力学性能;钢拱架承担即时荷载,控制围岩初期变形;注浆加固填充裂隙、提高岩体强度,三者相互补充。锚杆将围岩荷载传递至深部稳定岩体,减轻钢拱架压力;注浆使钢拱架与围岩紧密结合,增强整体稳定性;钢拱架为注浆提供支撑骨架,防止注浆过程中围岩坍塌。分层支护与分区支护策略针对不同地质条件与风险等级实施。分层支护根据围岩特性分层设置支护结构,对浅层破碎围岩采用喷射混凝土封闭,深层岩体通过锚杆锚固;分区支护在高风险区域强化支护,增加钢拱架密度、采用高强度锚杆(索),在低风险区适当降低支护强度。这种差异化支护方式,既能保障巷道安全,又可优化资源配置,降低支护成本。

3 支护技术的动态匹配与适应性设计

3.1 地质条件与支护参数的耦合关系

围岩的稳定性是决定支护方式与参数设置的基础因素之一。不同类型的岩石具有不同的物理力学性质和破坏特征,其承载能力和变形行为存在显著差异。围岩分级系统如RQD值、Q系统和RMR分级等,为支护方案的选择提供了理论依据。这些分级方法综合考虑了岩体完整性、节理发育程度、地下水影响、岩块强度等多个指标,能够较为全面地反映围岩的整体稳定状况。在完整性强、自稳能力较高的硬岩区域,支护需求相对较低,可采用局部锚固或薄层喷射混凝土进行防护;而在破碎带、软弱夹层或高应力区等地质条件下,围岩容易发生大范围变形甚至失稳,需要布置高强度支护体系,如组合锚杆、钢拱架与喷层协同作用的复合支护结构^[3]。支护参数的设计应充分考虑围岩的变形特性,避免盲目加大支护强度造成资源浪费,也防止支护不足引发安全隐

患。支护强度与围岩变形速率之间的匹配遵循“刚柔并济”的原则。对于变形速率较小且趋于稳定的围岩，适当采用柔性支护可以允许其适度释放应力，发挥围岩自身的承载能力；而对于变形速率较快或持续发展的围岩，则需提高支护刚度，迅速提供足够的支撑力以控制变形扩展。这种动态匹配机制有助于提升支护体系的整体适应能力，确保掘进过程中的安全可控。

3.2 掘进工艺与支护时序的协同优化

掘进方式的选择直接影响围岩的扰动程度和变形发展趋势。不同的掘进速度、爆破参数会对围岩产生不同程度的冲击和应力重分布。高速掘进虽然能加快施工进度，但可能因震动效应加剧围岩裂隙扩展，导致稳定性下降；低速掘进虽能降低扰动，却会延长围岩暴露时间，增加失稳风险。必须根据实际地质情况合理调控掘进节奏，使掘进与支护之间形成良好配合。支护时机的把握是保障围岩稳定的重要环节。围岩在开挖后通常具备一定的自稳能力，如果支护滞后时间过长，可能导致变形超过临界值，进而引发局部塌方或整体失稳。针对不同类型的围岩，应设定合理的支护滞后距离。例如，在软弱破碎地带，应尽量缩短支护滞后时间，必要时采取超前支护措施，如超前锚杆、管棚支护等，提前加固前方围岩，减少掘进过程中的突发风险。对于自稳能力较差但尚可临时维持的区域，则应设置临时支护结构，为后续永久支护创造安全作业条件。掘进与支护之间的协调不仅体现在时间上，还包括空间上的合理布局。例如，在断面较大的巷道中，可采用分步开挖与分段支护相结合的方式，先对关键部位进行初期支护，再逐步完成整体支护结构的封闭。这种分阶段、分层次的施工策略，有助于在保证安全的前提下提升施工效率，同时降低支护成本。

3.3 智能化监测与支护反馈调整

多种监测技术为围岩变形监测提供保障。微震监测通过捕捉岩体破裂产生的震动信号，定位岩体内部损伤位置，预判围岩失稳趋势。光纤传感技术利用光纤应变感知围岩变形，实现长距离、分布式监测，对巷道整体变形进行实时监控^[4]。三维激光扫描则快速获取巷道表面三维形态，对比不同时期扫描数据，精确分析围岩变形

量与变形区域。基于监测数据建立支护效果实时评估机制。将监测所得的围岩位移、应力变化等数据，与设计阈值对比，判断支护结构是否满足要求。若监测数据显示围岩变形速率加快、应力超限，系统自动触发预警。根据评估结果，启动参数动态修正机制，对支护结构进行调整，如增加锚杆数量、提高喷射混凝土厚度，或调整支护时间间隔，确保支护体系始终适应围岩变化，保障采矿掘进安全。支护反馈调整还应结合施工全过程的信息流进行闭环管理。从地质勘察到施工实施，再到后期维护，每个阶段都应建立完整的数据采集与分析流程。智能化系统的引入，使得支护技术不再是静态的工程措施，而是能够主动适应地质变化的动态控制体系。在整个掘进过程中，支护技术的动态匹配与适应性设计贯穿始终。从地质条件的初步判断到支护参数的设定，再到施工过程中的时序控制与监测反馈，各个环节紧密衔接，形成闭环管理。通过科学调配支护资源、精准把控施工节奏、及时调整支护策略，能够有效提升支护体系的稳定性与安全性，为复杂地质条件下的采矿作业提供有力保障。

结束语

复杂地质条件下的采矿掘进支护需综合考虑地质构造、地应力、软岩特性及水文条件，通过锚杆（索）支护、注浆加固、刚柔并济的被动支护及联合支护体系，实现支护-围岩协同变形控制。结合地质分级、掘进时序优化及智能化监测反馈，形成动态匹配与适应性设计，可有效提升支护体系稳定性与安全性，为深部及复杂地质采矿提供可靠保障。

参考文献

- [1]侯永.复杂地质条件下的煤矿采煤掘进与支护技术[J].内蒙古煤炭经济,2023,12(4):187-189.
- [2]康二愣.复杂地质下的煤矿采煤掘进支护技术及实践探析[J].当代化工研究,2022,25(12):80-82.
- [3]白腾飞.浅谈复杂地质条件下采矿掘进支护技术及应用[J].中国金属通报,2023,(05):31-33.
- [4]杨海鹏.复杂地质条件下采矿掘进支护技术及应用探究[J].当代化工研究,2023,(16):108-110.