

地下矿山巷道围岩变形规律与支护技术优化

黄 彬

内蒙古寅泰建设工程有限公司 内蒙古 呼和浩特 010050

摘 要：为有效处理地下矿山巷道围岩变形失稳、支护结构失效等安全生产问题，本文先探析巷道围岩的基础力学性能，再梳理地质条件、地应力状态、开采扰动作用以及支护体系布设四类核心影响因素，归纳围岩阶段性、部位差异化、条件分化及开采动态变形特征，进而从支护设计理念、复合支护结构选型、施工工艺参数调控、动态监测迭代机制四个维度，提出适配性较强的巷道支护技术优化方法。

关键词：地下矿山；巷道围岩；变形规律；支护技术；优化策略

引言：巷道是地下矿山开采的核心基础设施，围岩稳定状态会直接关乎矿山作业安全与生产效率，随着矿山开采深度逐步增加，井下岩体应力环境发生改变，巷道易产生变形、失稳等问题，传统支护方式难以适配复杂井下工况，本文基于巷道围岩力学特性，分析其变形影响因素与演化规律，开展支护技术优化研究，能够为矿山围岩稳定管控提供相应的理论与技术支撑。

1 地下矿山巷道围岩基础力学特性

地下矿山巷道围岩为岩块与各类地质结构面组合形成的复杂地质体，结构面的发育状态与空间特征会直接决定围岩力学性能及破坏程度，完整岩体的整体稳定性与承载能力更强，破碎岩体则易出现变形失稳问题，结构面与巷道的空间位置关系也会影响围岩应力传递；巷道开挖会打破岩体原始地应力平衡状态，浅部围岩受力以自重应力为主，深部围岩受构造应力影响更显著，临空面应力重分布与应力集中会引发岩体塑性变形与破坏^[1]。围岩变形会依次经历弹性、塑性及失稳破坏三个阶段，变形会从可逆状态逐步转为不可逆破坏；围岩具备时间相关的流变变形特征，变形会随时间分阶段发展，该特性也是巷道后期变形、支护失效的主要诱因。

2 地下矿山巷道围岩变形核心影响因素

2.1 地质条件因素

地质条件能够从根本上控制巷道围岩的变形特性，主要包括岩体自身属性、地质构造形态以及地下水环境三类影响要素，不同类型岩体的力学表现存在明显区别，软岩整体强度较低、孔隙发育且水稳性较差，变形幅度和流变效应相对突出，硬岩结构完整、承载能力更强，一般只会高应力位置发生脆性破坏，各类不良地质构造会打乱岩体应力分布状态，显著提升巷道围岩的

破坏概率，地下水能够渗入岩体裂隙当中，弱化结构面力学性能，还会通过水压作用促进裂隙发育，进一步增加围岩失稳的可能性。

2.2 地应力环境因素

巷道围岩的变形发展主要受地应力数值及分布状态的控制，开采深度和构造应力场可以直接影响井下巷道的整体应力环境，矿井开采深度不断增加的过程中，岩体自重应力会随之上升，深部构造应力也会明显增强，岩体受力差异会持续增大，浅部巷道应力水平相对偏低，围岩仅会产生小幅浅层位移，深部巷道的塑性破坏区域会明显拓展，围岩变形程度会显著增加，还会产生各类动力灾害，地应力和巷道断面的相对角度，也会改变应力集中情况，造成巷道不同位置变形程度存在差异。

2.3 开采扰动因素

井下采矿产生的动态干扰，是诱发围岩变形和岩体破损的主要外部原因，矿山掘进、爆破作业以及工作面回采的施工过程，都会干扰岩体原有应力平衡，爆破冲击会损伤表层岩体，催生新生裂隙并削弱岩体整体强度，快速掘进会造成围岩应力瞬间释放，加重前期巷道变形，采空区会带动周边应力重新分布，让邻近巷道受到多次应力扰动，不合理的开采布置和重复施工扰动，也会扩大岩体损伤范围，让巷道变形问题不断加重。

2.4 支护体系因素

巷道围岩的控制效果会受支护体系施工时效、配置合理性与运行稳定性的直接影响，支护作业也是防控围岩失稳的重要人工措施^[2]。施工支护开展不及时，会让围岩初期变形持续发展，岩体裂隙不断发育贯通，造成

岩体自稳能力下降, 支护参数设置不当, 会无法有效抵抗围岩应力作用, 造成巷道变形加剧, 也会产生不必要的施工资源损耗, 支护结构选型不当、施工质量不达标以及支护整体协同性不足, 都会造成支护失效, 引发围岩持续性变形破坏。

3 地下矿山巷道围岩整体变形规律

3.1 围岩变形阶段性规律

从岩体力学响应和时间变化特征来看, 巷道围岩的变形过程可以划分为四个连续的发展阶段, 各阶段变形状态依次递进且特征相对明确, 巷道完成开挖作业后会首先进入瞬时变形阶段, 岩体内部应力会快速释放, 围岩会产生弹性位移, 整体变形速度较快, 持续时长较短, 岩体表面一般不会出现裂隙发育的情况, 应力重新调整后围岩会进入塑性变形发展阶段, 岩体受力会超出弹性极限, 内部裂隙会不断产生并延展, 围岩位移量会稳步增加, 变形速度逐渐放缓, 该阶段也是巷道支护施工的关键时期, 之后围岩应力会逐步趋于平衡, 进入变形相对稳定的流变阶段, 围岩整体变形速度较慢且变形量缓慢积累, 能够维持巷道基本稳定, 当围岩变形达到极限状态、支护结构失效或受到二次开采扰动时, 围岩变形速度会突然加快, 岩体裂隙快速贯通破损, 最终引发各类巷道失稳破坏问题。

3.2 巷道不同部位变形差异规律

巷道各部位的围岩变形状态并不统一, 这类差异主要由岩体应力分布特点和临空面结构形式所决定, 巷道顶板岩体长期受到上部岩层自重应力与水平构造应力的共同作用, 会产生岩层下沉、裂隙发育以及层间分离等现象^[3]。岩体破损后容易出现冒顶隐患, 其变形形式多表现为垂直位移, 变形区域也集中在顶板表层岩体, 竖向结构的巷道巷帮主要承受水平应力的挤压作用, 岩体容易出现凸起、剥落和片帮问题, 高应力环境会进一步扩大巷帮塑性变形范围, 巷道底板属于无支护约束的自由临空结构, 在水平应力挤压和岩体流变的共同作用下, 会持续产生底鼓现象, 该问题在软岩及深部巷道中表现得更为突出, 且修复难度相对较大, 高应力破碎巷道普遍会同时出现顶板下沉、巷帮鼓出、底板隆起的整体变形特征。

3.3 不同围岩条件变形分化规律

不同结构和强度的岩体, 会让巷道围岩表现出不一样的变形模式与变形程度, 岩体自身条件的差异, 会直接改变围岩的整体变形特性, 结构完整的硬质岩体整体性能较好, 变形形式多为弹性变形, 塑性变形占比相对

较小, 基本不会出现长期流变变形, 只会在应力集中位置产生局部脆性开裂, 整体结构相对稳定, 裂隙发育的破碎岩体整体性较差, 岩体变形以塑性松散变形为主, 裂隙扩展速度更快, 整体变形量偏大且分布不均匀, 容易发生局部岩体掉落问题, 软岩岩体普遍存在流变特性, 变形持续周期更长, 变形累积量也相对更大, 低应力环境下依旧会产生持续变形, 极易造成支护结构受压损坏, 断层及破碎带区域的岩体结构松散、应力分布混乱, 围岩变形没有固定规律, 巷道突发失稳的风险会大幅提升。

3.4 开采扰动下动态变形规律

矿山长期开采产生的动态扰动作用, 会让巷道围岩变形产生动态波动与持续累积的变化特点, 巷道掘进过程中, 围岩变形主要由初始地应力释放所导致, 变形现象多集中在掘进工作面周边区域, 且会随着掘进作业的推进不断向前延展^[4]。工作面回采阶段, 采空区域会诱发大范围的岩体应力迁移, 邻近巷道围岩会受到二次应力的扰动影响, 围岩塑性区范围会进一步扩张, 整体变形量会明显增大, 同时会出现变形速率骤然上升的情况, 多次开采扰动的区域内部, 围岩岩体损伤会不断叠加积累, 岩体裂隙会反复扩张、贯通, 岩体自身力学强度逐步降低并形成损伤累积效应, 围岩变形模式也会由局部变形转变为整体变形, 巷道整体稳定性持续弱化, 除此之外, 爆破作业与机械掘进产生的瞬时动态荷载, 能够诱发围岩振动变形, 进而加重岩体损伤程度, 加快巷道围岩的失稳发展速度。

4 地下矿山巷道支护技术优化策略

4.1 优化支护设计理念

巷道支护的整体设计思路需要做出针对性调整, 施工中应当摒弃传统的刚性支护与被动防护模式, 以此建立适配围岩变形发展规律的主动支护、协同支护与动态支护体系, 矿井巷道施工需要遵循科学的作业准则, 把控好支护施工的有效时间节点, 工作人员可以在围岩进入塑性变形初期开展支护作业, 以此限制岩体裂隙的延伸发育和塑性变形的持续发展, 支护设计工作可以结合围岩不同阶段的变形特点采用差异化施工方式, 巷道开挖初期可利用柔性支护结构释放部分弹性变形, 规避刚性支护结构受压破损的问题, 围岩进入稳定流变阶段后, 可采用高强度主动支护方式约束岩体持续变形, 施工人员还可以根据巷道不同位置的变形差异, 采用非对称支护设计方式, 对应力集中明显、变形程度较大的巷帮和底板位置提升支护强度, 让支护形式可以和围岩实际变形特征相互适配, 提升整体支护稳定性。

4.2 完善复合支护结构体系

单一的巷道支护方式存在适用范围有限、支护强度不足、长期稳定效果较差等问题,矿井施工可以通过整合各类支护工艺的优势,搭建多结构协同作业的复合支护体系,以此实现对巷道围岩的全方位稳定控制,普通浅部完整岩体巷道可以采用锚杆搭配喷射混凝土的基础支护方式,锚杆能够固定深部稳定岩体,喷射混凝土可以封闭表层裂隙,减少空气和水体对岩体的侵蚀作用,有效提升围岩整体完整性,深部高应力破碎巷道可以采用锚杆、锚索、金属网与喷射混凝土相结合的支护模式,锚索能够加大锚固深度抵御高地应力,金属网可以约束表层松散岩体,避免围岩出现剥落片帮现象,软岩巷道以及底鼓问题突出的巷道,可增设底板锚杆配合注浆加固工艺,注浆体能够填充岩体内部裂隙,固结松散岩体并提升基体强度,有效改善岩体流变变形与巷道底鼓问题,形成多层位协同防护的整体支护格局。

4.3 优化支护施工工艺与参数

巷道支护的施工工艺和各项参数,需要结合现场地质条件与围岩变形的实际规律进行优化调整,能够有效提升整体施工质量与围岩支护效果,工作人员可以依据巷道围岩塑性区的实际范围^[5]。合理设定锚杆锚索的锚固力度、布设间距与整体长度,让支护构件可以有效固定在深部稳定岩体内,规避锚固深度不足带来的支护失效问题,施工人员可以对应力集中较为明显的顶板和巷帮区域调整锚固角度,采用倾斜锚固的施工方式,提升应力传递效率,增强对围岩的约束效果,喷射混凝土作业需要统一施工标准,规范材料配比、喷射厚度和均匀程度,保障表层围岩的封闭作用,减少施工缺陷的产生,巷道掘进作业完成后,施工单位需要按照规范时序开展初喷、锚杆锚索施工与复喷加固工序,以此抑制围岩初期变形和裂隙发育,同时整套支护施工流程需要做到标准化管控,落实常态化质量检测工作,规避各类不规范施工行为。

4.4 构建动态监测与支护迭代优化机制

矿山巷道的长期稳定管控工作,可以结合智能监测

技术搭建围岩动态监测体系,该体系能够对围岩变形状态进行实时采集,也可以完成安全风险预警与支护方案的动态调整,施工人员可在巷道关键位置布置监测设备,持续收集围岩变形量、变形速度及岩体应力变化等基础数据,以此掌握围岩变形的动态发展趋势,工作人员可以依托监测数据判断围岩整体稳定状态,对支护薄弱和变形异常的区域及时开展补强作业,能够有效避免变形持续积累引发的巷道失稳问题,矿山需要建立常态化的支护优化机制,结合巷道地质条件、开采扰动特点和变形规律,归纳各类支护方式的应用效果,不断调整和完善支护结构与施工参数,针对深部开采及复杂地质条件带来的支护难题,现场可以引入智能施工设备和精准注浆等新型工艺,持续改善巷道支护的整体效果,保障井下巷道长期安全稳定运行。

结束语

综上所述,地质条件、地应力大小、开采扰动作用以及支护体系状态,均会对巷道围岩变形产生控制作用,其变形过程具备阶段性、部位差异化、条件分化与动态波动的特点,通过对巷道支护方案、复合结构形式、施工参数以及动态监测机制进行合理优化,能够契合围岩的实际变形规律,改善巷道支护失效的现状,增强井下巷道围岩的整体稳定性,可为地下矿山安全生产提供有效技术保障,具备一定的矿山现场推广应用价值。

参考文献

- [1] 习洲勇,韩明玉.采动影响下巷道围岩变形分析及支护技术研究[J].当代化工研究,2025(19):139-141.
- [2] 张富魁,任国胜,申阳平.基于复杂地质条件下的巷道围岩变形及控制技术研究[J].现代矿业,2025,41(11):232-236+242.
- [3] 史圩.巷道深部围岩承载层支护技术研究[J].凿岩机械气动工具,2025,51(4):160-162.
- [4] 王超.磷矿地下开采巷道围岩裂隙发育特征对支护效果的影响[J].凿岩机械气动工具,2025,51(12):101-103.
- [5] 任檬.深部矿山巷道围岩变形监测与控制分析[J].石材,2026(5):33-35.