

金属非金属矿山地下开采巷道支护结构 优化设计方法研究

周 明¹ 刘晓明¹ 赵海龙²

1. 苏尼特右旗海軍萤石有限责任公司 内蒙古 锡林郭勒盟 011200

2. 内蒙古自治区新技术推广站有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要: 本文围绕金属非金属矿山地下开采巷道支护难题,剖析现有支护方式局限性,明确地质、工艺等关键影响因素。基于岩石力学理论,提出力学分析、动态设计等优化方法,结合新型支护技术与开采工艺协同策略。研究成果提升了巷道支护可靠性,降低成本,为复杂地质条件下的巷道支护设计与施工提供了科学依据与实践指导。

关键词: 金属非金属矿山; 地下开采; 巷道支护; 结构优化; 设计方法

引言

在金属非金属矿山开采领域,地下开采因资源利用率高被广泛应用,巷道支护是保障开采安全的关键。但随着开采深度增加,地质条件复杂化,传统支护方式难以满足需求,支护失效、成本过高等问题频发。因此,深入研究巷道支护结构优化设计方法,对提高矿山开采安全性、经济性和可持续性具有重要意义。

1 金属非金属矿山地下开采巷道支护现状

目前,金属非金属矿山地下开采巷道支护主要采用钢架支护、混凝土支护、锚杆支护及联合支护等方式。钢架支护具有强度高、承载能力强的特点,能较好地适应复杂地质条件下的巷道支护需求,尤其适用于围岩破碎、变形较大的巷道,但成本相对较高,且自重较大,对巷道底板承载能力有一定要求。混凝土支护凭借整体性强、耐久性好的优势,在大断面巷道及硐室支护中应用广泛,然而其施工周期长、自重较大,不利于快速掘进。锚杆支护通过将锚杆锚固在稳定岩层中,形成组合梁或悬吊作用,提高围岩稳定性,是当前矿山常用支护方式,但在破碎、软弱岩层中,单独使用锚杆支护效果欠佳。联合支护则结合多种支护方式的优点,如锚杆-喷混凝土联合支护,在复杂地质条件下能有效控制巷道变形,但设计与施工难度相对较大。总体而言,现有支护方式在适应性、经济性和安全性方面存在一定局限,亟需优化改进^[1]。

2 巷道支护结构优化设计关键因素分析

2.1 地质条件影响

(1) 地质条件是左右巷道支护设计的核心要素。岩性差异直接决定巷道自稳特性,坚硬完整的花岗岩、石英岩等岩体,结构致密整体性好,开挖后不易出现变形

失稳,仅需采取简单的喷混凝土或局部锚杆支护即可维持稳定。而页岩、泥岩等软弱岩层,自身强度低且遇水易软化,在开挖扰动下极易发生塑性流动,常出现顶板下沉、两帮鼓出等问题,必须采用强支护手段,如U型钢支架配合注浆加固。(2) 地质构造对巷道稳定性的影响同样不容忽视。断层破碎带附近岩体完整性遭到严重破坏,应力集中现象突出,巷道穿越时极易引发坍塌事故。褶皱构造区岩层产状复杂多变,会导致巷道受力不均,产生非对称压力,致使支护结构局部破坏。此外,地下水的存在会显著降低岩石强度,弱化结构面的抗剪性能,增加渗透压力,富水区域的巷道设计必须将防水、排水与支护措施有机结合,否则极易因水害导致支护失效。

2.2 开采工艺影响

(1) 开采工艺直接塑造巷道围岩的受力与变形状态。空场采矿法在采空区未处理前,会引起上覆岩层下沉移动,导致周边巷道承受较大的地应力变化,极易引发变形甚至破坏。与之相反,充填采矿法通过及时填充采空区,有效支撑围岩,显著降低巷道变形风险,保障巷道稳定。开采顺序与速度也是影响巷道稳定性的重要变量。(2) 下行式开采可减少上部采动对下部巷道的影 响,而上行式开采则可能导致下部巷道顶板冒落。开采速度过快会使围岩来不及释放应力,造成应力集中,引发突发性变形破坏;合理控制开采速度并及时进行支护,能有效抑制围岩变形。此外,爆破参数的选择对巷道围岩扰动程度影响显著,光面爆破技术通过精准控制爆破作用力,可减少 对围岩的损伤,为后续支护创造良好条件。

2.3 支护材料性能

支护材料性能对支护结构承载能力与可靠性影响重大。高强度、高韧性的锚杆材料,可在复杂地质中提供强锚固力,约束围岩变形。新型喷射混凝土材料早期强度高、收缩率低,能快速封闭围岩表面,阻止风化破碎,与围岩形成共同承载体系。可伸缩性支护材料可适应围岩大变形,持续提供支护阻力,避免应力集中破坏。自进式中空注浆锚杆集钻孔、注浆、锚固功能于一身,适用于破碎松散岩体,注浆后能提高岩体整体性与强度,形成复合承载结构。柔性纤维网替代传统金属网,可更好吸收围岩变形能,防止喷射混凝土开裂剥落,提升耐久性。钢架支护用高强度钢材制作,抗压抗弯性能佳,能为巷道提供可靠支撑^[2]。

2.4 经济性考量

经济性考量是巷道支护优化设计的关键。在保障巷道安全稳定的前提下,降低支护成本至关重要。不同支护方式与材料成本差异大,钢架支护强度高、适应性强,适用于复杂地质永久支护,但成本高;混凝土支护整体性、耐久性好,却施工周期长、成本高,多用于永久巷道;锚杆支护成本适中、应用广,复杂地质需联合其他方式。施工工艺复杂程度影响成本,联合支护效果好但成本高。通过精准力学计算与现场监测,可避免过度支护浪费。在稳定岩层简化支护结构,复杂地质采用优化方案,兼顾安全与成本。合理安排支护时机,如及时初支、适时二衬,能减少后期维护成本,提升经济效益。

3 巷道支护结构优化设计方法

3.1 基于力学分析的设计方法

(1) 基于力学分析的巷道支护设计以岩石力学、弹性力学及塑性力学理论为核心,通过构建巷道围岩力学模型,系统解析巷道开挖后应力重分布与变形演化规律。在实际工程中,巷道开挖打破原岩应力平衡状态,引发围岩应力集中,致使局部区域应力超过岩体强度而产生塑性变形,严重时甚至导致巷道失稳坍塌。(2) 在理论建模方面,常采用连续介质力学模型与非连续介质力学模型。连续介质模型适用于完整性较好的岩体,如基于弹性力学的圆形巷道轴对称解析解,可快速计算出巷道周边应力分布;非连续介质模型则针对节理裂隙发育岩体,通过离散元方法(DEM)模拟岩块间的相互作用。数值模拟软件在力学分析中发挥关键作用,FLAC3D凭借有限差分算法,能够有效模拟岩体大变形与塑性流动,对支护结构与围岩相互作用过程进行动态分析;ANSYS基于有限元法,可精确计算复杂边界条件下巷道围岩的应力应变场,二者相互补充验证。(3) 在锚杆支护参数优化研究中,某金属矿山通过FLAC3D模拟

不同锚杆长度(2m、2.5m、3m)与间距(0.8m×0.8m、1.0m×1.0m、1.2m×1.2m)组合工况,发现当锚杆长度为2.5m、间距1.0m×1.0m时,巷道顶板下沉量减少32%,两帮收敛量降低28%,有效控制了围岩变形。通过力学分析确定的支护参数,不仅保障了巷道稳定性,还避免了过度支护造成的材料浪费,为工程设计提供量化依据。

3.2 动态设计与信息化施工

(1) 动态设计与信息化施工强调支护设计随开挖进程中地质条件变化进行实时调整,通过先进监测技术获取围岩动态信息,实现支护参数的动态优化。在巷道掘进过程中,地质条件常与勘察结果存在差异,尤其是遇到断层破碎带、软弱夹层等不良地质体时,传统静态设计难以适应围岩力学特性的突变。(2) 地质雷达利用电磁波反射原理,可探测前方10-30m范围内的岩体完整性与含水情况,其分辨率可达厘米级;声波探测仪通过测量岩体波速,判断围岩松动圈厚度,为支护强度设计提供依据。某非金属矿山在巷道施工中,采用地质雷达探测发现前方8m处存在富水破碎带,立即调整支护方案,将原有的普通锚杆支护改为超前注浆锚杆+钢拱架联合支护,有效避免了突水坍塌事故。(3) 信息化施工平台集成了监测数据采集、分析与反馈功能。通过布设位移计、应力传感器等监测设备,实时获取巷道收敛变形、支护结构受力等数据,并运用灰色预测模型、卡尔曼滤波算法对围岩变形趋势进行预测。当预测变形量接近预警值时,系统自动触发设计调整流程,实现支护参数的动态优化。某煤矿巷道通过信息化施工,将支护成本降低15%的同时,确保了巷道变形始终处于可控范围^[3]。

3.3 多方案比选与综合评价

(1) 多方案比选与综合评价针对具体巷道工程,从安全性、经济性、施工便捷性等多维度对候选支护方案进行量化评估,筛选最优设计方案。在复杂地质条件下,单一支护方式往往难以满足工程需求,需通过组合不同支护手段形成多种可行方案。(2) 构建科学的评价指标体系是综合评价的基础。安全性指标包括围岩稳定性系数、支护结构安全储备;经济性指标涵盖材料成本、施工成本、维护成本;施工便捷性指标涉及施工效率、设备需求、技术难度。采用层次分析法(AHP)确定各指标权重,通过专家打分构建判断矩阵,计算指标权重向量。某铅锌矿巷道支护方案比选中,运用AHP法确定安全性权重为0.45,经济性权重为0.3,施工便捷性权重为0.25。(3) 模糊综合评价法结合模糊数学理论,解决评价指标的模糊性问题。以某铜矿巷道支护方案评价为例,构建“优、良、中、差”四级评语集,对锚杆

支护、混凝土支护、锚杆-锚索联合支护三个方案进行评价。结果显示,锚杆-锚索联合支护方案综合得分最高,在保障安全的前提下,经济性与施工便捷性均满足工程要求,最终被确定为实施方案。

3.4 新型支护技术应用

(1) 新型支护技术的应用为复杂地质条件下巷道支护难题提供了创新解决方案,通过材料性能提升与结构优化,显著增强支护体系的适应性与可靠性。高预应力强力锚杆支护技术基于主动支护理念,通过提高锚杆预紧力,在围岩内部形成连续压应力区,有效抑制围岩松动变形。某金矿采用高预应力强力锚杆(预紧力不低于150kN)支护后,巷道顶板下沉量较传统锚杆支护减少40%以上。(2) 自进式中空注浆锚杆将钻孔、注浆、锚固功能一体化,特别适用于破碎松散岩体。在钻进过程中同步注浆,浆液渗透填充裂隙,提高岩体整体性,同时锚杆与岩体形成复合承载结构。某隧道工程穿越断层破碎带时,采用自进式中空注浆锚杆支护,成功控制了围岩大变形。柔性网喷支护技术采用高强度聚酯纤维网替代传统金属网,与喷射混凝土协同工作,在允许围岩适度变形的同时提供持续支护力,有效避免刚性支护的应力集中问题。钢架支护结合新型材料和工艺,如采用高强度合金钢制作钢架,并对其进行防腐处理,提高了钢架的使用寿命和支护效果。(3) 新型支护技术的应用需结合矿山实际条件进行改进创新。在高寒矿区,需研发抗冻型注浆材料;在高应力软岩巷道,可将可伸缩支架与新型锚杆联合应用,形成刚柔耦合支护体系。通过技术创新与工程实践结合,推动巷道支护技术的发展^[4]。

3.5 与开采工艺协同优化

(1) 巷道支护结构优化与开采工艺协同是降低围岩应力集中、提升支护效果的关键策略。不同采矿方法对巷道围岩应力环境影响显著,空场采矿法形成的大面积采空区会导致围岩应力重新分布,增加巷道变形风险;

充填采矿法通过充填体支撑围岩,有效改善巷道受力状态。(2) 开采顺序的合理规划对巷道稳定性至关重要。下行式开采可避免上部采动对下部巷道的影响;间隔开采能够减少相邻采场应力叠加。某铁矿采用间隔开采方式,将采场间留设合理宽度矿柱,使巷道周边应力集中系数降低25%,显著减小支护压力。开采速度的控制直接影响围岩变形速率,过快的开采速度导致围岩来不及释放应力,易引发突发性失稳;过慢则影响生产效率。通过现场监测与数值模拟,可确定合理开采速度。(3) 支护与开采的协同还体现在施工时序优化。在巷道开挖后及时进行初支,利用初支的及时性抑制围岩早期变形;待围岩变形基本稳定后施作二衬,形成多层承载结构。某锰矿巷道采用“快速初支+适时二衬”施工工艺,将巷道维护成本降低20%,同时保障了开采作业安全高效进行。

结语

本研究系统提出了金属非金属矿山巷道支护结构优化设计方案,有效解决了支护适应性、经济性问题。然而,面对深部开采的高温、高应力等复杂挑战,现有技术仍存局限。未来需进一步融合人工智能、大数据等技术,研发智能自适应支护体系,推动矿山开采行业向安全、高效、绿色方向发展。

参考文献

- [1]王平尤.金属非金属矿山采空区现状与治理对策分析[J].世界有色金属,2023,(02):190-192.
- [2]王梓铭.地下金属矿山采矿技术进展及研究方向[J].中国金属通报,2021(01):21-22.
- [3]孙好想,李晓昭,卞夏,等.金属非金属矿山地下空间现状及开发利用研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(02):375-385.
- [4]郭玉杰.金属非金属矿山采矿工程中充填采矿技术的有效运用[J].中国金属通报,2024,(02):43-45.