

高原低气压环境下金属矿井巷支护技术应用研究

齐宏洋

(新疆金能昆仑矿业有限责任公司, 新疆 维吾尔自治区 848500)

摘要 本研究聚焦高原低气压环境下金属矿井巷道支护技术的适用性与优化路径, 围绕低气压、大气稀薄、气候特殊等因素对巷道支护系统造成的复杂影响展开系统分析。探讨了高原环境对岩体应力、围岩破坏模式及支护结构稳定性的干扰作用, 评估了锚杆锚索、喷混支护、钢拱架等主流技术在高原条件下的适应性表现, 并进一步提出结构参数调整、材料工艺改进、通风支护协同与智能监测系统集成等针对性优化路径。通过多角度的技术剖析与系统性路径构建, 以期高原金属矿井巷道支护提供实践参考。

关键词 高原环境; 低气压; 金属矿井; 巷道支护

中图分类号: TD85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.041

0 引言

随着金属矿产资源开发强度的不断加大, 高原地区金属矿井的安全与稳定问题日益突出。受限于特殊的自然环境条件, 尤其是低气压、稀薄空气、昼夜温差大等因素, 传统巷道支护技术在高原区域应用中面临显著挑战^[1]。围岩失稳、材料老化、支护结构耐久性不足等问题频繁出现, 严重制约了矿井生产效率与安全水平。因此, 围绕高原低气压背景下支护系统的适应性展开研究, 不仅能为提升矿山工程安全提供路径参考, 也对推动高原资源高效利用与绿色开采具有积极作用。

1 高原低气压环境对矿井巷道支护的影响分析

1.1 大气压力变化对岩体应力的影响

高原地区因海拔较高, 导致常年处于低气压状态, 大气压力明显低于平原地区。这种气压环境不仅改变了岩体内部孔隙中的气液平衡关系, 也对地应力分布产生间接干扰。在封闭或半封闭的巷道结构中, 围岩与空气之间的压差增大, 容易促使原本稳定的结构发生微变形, 从而导致应力集中加剧。特别是在存在节理、裂隙发育或软弱层的岩体中, 原有的应力场分布受到扰动后可能发生不均衡应力释放, 引发局部破坏或失稳。这种应力扰动往往隐蔽性强, 不易在前期探测中显现, 却对支护结构的适应能力提出更高要求。

1.2 低气压对围岩破坏的诱导作用

在低气压条件下, 岩体孔隙水的蒸发加速, 导致围岩含水率波动频繁, 使岩石微结构失稳风险增加。

尤其是在裸露岩面处, 围岩体易受到干湿循环交替与气压骤变的共同作用, 进而诱发微裂隙的扩展与连接, 逐步演化为显著的结构破坏。这一过程中, 围岩的原始稳定状态被打破, 初期破裂多呈现出以剥落、崩落为主的形式, 随后可能发展为大规模的坍塌或变形。因此, 在这种诱导作用下, 支护系统所承担的不仅是传统意义上的静载荷约束, 更要具备动态适应围岩状态突变的能力^[2]。

1.3 气候条件对支护稳定性的影响

高原地区气候变化剧烈, 昼夜温差大、风速高、湿度变化明显, 这些因素都会对支护材料和结构性能产生复杂影响。在昼夜循环中, 温度剧烈起伏容易引起支护材料的热胀冷缩, 加速其疲劳损耗过程。当支护体系中存在钢材构件时, 更容易因温差循环而出现微变形或连接部位的疲劳裂缝。同时, 高原空气中的含氧量低、紫外线强, 也可能加快部分材料的老化速度, 尤其对表面裸露的支护喷层或锚固胶体影响明显。这些因素共同作用下, 使得原本设计寿命内的支护结构出现早期性能衰减, 影响巷道长期稳定性。

1.4 稀薄空气对施工支护的限制

在高原施工环境中, 稀薄空气不仅对人员体能和施工效率造成直接影响, 也间接限制了支护技术的正常实施。受限于低氧条件, 施工人员操作精度与持续作业能力下降, 喷浆作业、锚杆安装等关键环节易出现技术细节缺失, 增加隐患。同时, 设备运行效率亦受到制约, 部分气动或电动工具在高原表现出动力不足、稳定性差的问题。此外, 稀薄空气对材料固化反

应也有潜在影响,部分化学锚固剂在低气压下反应过程延缓,降低早期强度形成速度。这些问题在短时间内或许影响不明显,但在长距离或深井作业过程中,往往会在局部节点积累形成系统性隐患,对支护安全构成长期挑战。

2 现有支护技术在高原低气压环境中的适应性

2.1 锚杆锚索支护的适应性分析

在高原金属矿巷道中广泛使用的支护形式包括树脂锚杆、锚索加预应力系统、组合式托盘锚杆等类型。以 $\Phi 20$ mm树脂锚杆为例,其锚固剂在高原地区气压偏低、温度变化大的环境下固化速度减缓,早期强度形成滞后,锚固效果存在不确定性。高原岩体含水率波动大,易导致锚固体与孔壁之间结合力降低,引发锚杆松动脱落^[3]。对于锚索支护系统,如使用 $\Phi 15.2$ mm钢绞线,预应力释放与保持能力受低气压条件制约,张拉过程中若未及时调整张拉力与回弹量,极易产生残余变形。联合使用的W钢带+树脂锚杆系统在高原软弱围岩段存在托盘受力不均问题,加上人为操作误差,整体支护刚度下降。这些问题说明常规锚杆锚索系统需在锚固剂反应温度适配、钢材耐腐蚀处理和张拉技术稳定性方面进行适应性优化。

2.2 喷混技术在高原地区的应用表现

当前常见的喷混支护技术以湿喷混凝土为主,常配合聚丙烯纤维增强型C25混凝土配比,并采用速凝剂A型或B型控制初凝时间。在海拔超过3 500 m的工况中,混凝土表面蒸发加速,喷层内水分迅速流失,未固化部位极易产生裂缝,纤维易外露、界面结合力减弱,影响粘结性能。以诺顿诺华干湿一体喷浆机为代表的施工设备在高原高寒地区表现出流速不稳、风压不足的问题,导致喷层厚度难以均匀控制。部分矿区尝试引入高性能聚羧酸系减水剂与复合型缓凝剂对配合比进行调整,但仍难以解决夜间低温冻结对早期强度的不利影响。此外,高原地区施工中泵送距离常因地形限制变长,加剧了喷浆材料的离析与沉淀风险,整体支护性能大打折扣。因此,喷混技术在高原地区的应用需要在外加剂体系、施工设备适应性和喷层早期养护机制上系统升级。

2.3 钢拱架及联合支护的适用性

钢拱架支护常见类型包括U29、U36热轧槽钢拱架,以及与喷混、锚杆组合形成的“拱一喷一锚”联合支护结构。在高原深埋巷道和断层破碎带等地质复杂区域,该结构能有效分散围岩压力,提升整体支护强度。实际工程中使用的U36拱架虽具备良好承载性能,但

在高原富水矿区,因氧气稀薄与空气干湿剧变,构件腐蚀速率显著加快,影响其使用寿命。高原地区施工中常用手工电弧焊接拼装,受限于气压低、电流波动等条件,焊缝质量难以保障,一旦产生焊接裂纹,支护系统承载力迅速下降。部分矿区尝试改用螺栓连接式拼装或热镀锌处理拱架以延缓腐蚀,但安装周期延长、人工成本上升,限制了推广效率。因此,钢拱架在高原地区的适用性虽具优势,但其使用需建立在可靠的防腐处理、拼装工艺和地质适应性匹配的基础之上。

2.4 工艺与材料对环境的响应性

高原矿井支护材料主要包括树脂类锚固剂、硅酸盐水泥、复合型外加剂和钢结构构件,其性能受环境变化影响显著。以M20快固树脂为例,在低气压下其固化时间延长30%以上,早期粘结力不稳定,尤其在低温下表现出脆化现象。喷混用C25硅酸盐水泥若缺乏有效保温养护措施,温差引起的体积变化将导致早期开裂。钢构件在含水率大、氧气含量低的环境中容易形成电化学腐蚀,加快锈蚀进程,特别是埋入围岩的锚杆部分最为脆弱。在施工工艺方面,锚孔清理、注浆均匀性和喷浆厚度控制在高原作业中常因操作疲劳和设备效率下降而出现偏差,直接影响支护整体质量^[4]。因此,在高原低气压条件下,支护系统对材料性能、固化环境和施工工艺提出了更高适配性要求,不仅需对材料配比做出调整,更应配合智能化施工设备以提升作业精度。

3 高原低气压环境下支护技术的优化路径

3.1 支护结构参数的优化设计

面对高原低气压环境下岩体应力场分布的不稳定性与围岩自稳能力普遍偏弱的现实,支护结构设计不再适合沿用平原地区的标准参数体系,而应根据实际地应力测量与围岩等级划分结果进行动态优化。在软岩与破碎岩层较为集中的高原金属矿巷道中,建议优先采用高强度组合型结构体系,如将传统单一锚杆支护升级为“ $\Phi 22$ mm左旋等强螺纹钢锚杆+W钢带+钢拱架+湿喷层”的复合式联合支护结构,合理控制锚杆间距在0.8 m以内,锚固长度应根据围岩自稳圈深度设置,一般延伸至2.5 m以上,以确保锚固体穿透潜在破坏带。拱架间距由原标准的1.0 m缩减至0.6~0.8 m之间,增强整体支护刚度,同时增设加强环与连接板提升连接部位的稳定性。在参数配置过程中,还应参考现场监测数据持续优化结构布置,结合围岩收敛变形速率实施动态调整,以实现支护系统的刚柔结合与主被动控制统一^[5]。

3.2 材料抗性与工艺的改进

高原地区独特的气候与低气压环境对支护材料性能提出了更加严格的要求,因此,传统材料体系与标准配比需进行改良与再设计。在喷混材料方面,应采用 C30 以上强度等级的湿喷混凝土,并添加体积含量 0.9% 以上的聚丙烯纤维,以提升早期抗裂能力和变形适应性。为了应对水分蒸发过快导致的表面干裂问题,可引入三组分复合缓凝型速凝剂(如 NAH-PCE-GY 型),在保证初凝时间可控的前提下提升喷层均匀性与附着性^[6]。锚固剂则推荐使用 M30 型快硬树脂,具有较强的温度适应性与固化稳定性,其在低气压条件下表现出更好的早期强度增长曲线,适合高原低温环境下快速锚固作业。钢结构构件如锚杆、拱架应优先选用耐候钢 Q420NH,并进行双层热镀锌+环氧涂层处理,以抵抗氧含量低与紫外辐射强导致的腐蚀加速问题。在工艺方面,应实施“喷前湿润、分层施工、两次成型”的施工流程,利用多通道喷头实现连续作业,提升厚度控制精度并降低回弹率,确保支护层结构致密性与力学稳定性。

3.3 通风与支护的协同优化

由于高原地区空气密度低、含氧量不足,通风系统对作业空间中的粉尘扩散、材料固化、施工温度控制等多个环节具有间接主导作用,需将通风系统纳入巷道支护整体规划之中。在支护作业区域内,应采用局部送风与负压排风组合的分区通风模式,配置变频风机与智能风量调节装置,实现风压、风量实时调控,以适应不同工序对空气流速与湿度的需求变化^[7]。在锚杆注浆作业中,风流过大会导致浆液反喷与粉尘干扰,需设置锚固工位遮蔽风幕,有效控制气流扰动,提升注浆质量。在喷浆施工阶段,推荐设置封闭式喷浆舱体结构,通过循环空气加湿系统控制喷层环境湿度在 80% 以上,并配合远程监控系统实现喷头位置精确定位与喷层厚度实时反馈。在高原重点矿区,如西藏某铜矿已试点部署风压联动式喷浆控制系统,其通过气压传感器判断最佳喷射窗口,显著降低了喷层开裂与附着不良率,反映出通风与支护施工协同融合的显著技术优势^[8]。

3.4 支护系统的智能化监测

高原环境的不确定性使得巷道支护的长期安全性难以通过单一静态设计方案保障,因此,构建以“传感感知—数据采集—智能分析—动态反馈”为主线的支护监测体系已成为支护技术发展的必然趋势。在锚杆锚索支护中,应布设基于 FBG 传感技术的应力监测

光纤系统,实时感知锚杆内部轴力变化、塑性变形进度与结构松动征兆,结合数据采集仪定时上传,构建锚杆失效趋势图。在拱架支护区域,建议应用无线荷载传感器与位移监测仪(如 SRR-A 型结构应变计),监测拱架受力分布程度与变形位移同步演化过程。喷混层可安装表面裂隙成像监测系统,通过高清摄像头与 AI 图像识别算法识别早期喷层开裂与渗水迹象,实现自动报警。为提升监测响应速度,系统需集成 LoRa 无线网络模块并接入矿井调度平台,实现支护状态数据云端可视化展示与移动端访问。在高原实际应用中,已有项目实现基于 BIM+GIS 融合的“支护状态三维展示平台”,将支护数据与地质信息融合展示,辅助施工与运维过程中的精准决策,形成高原矿井支护从“经验判断”向“数据驱动”过渡的有效路径^[9]。

4 结束语

高原低气压环境对矿井巷道支护技术提出更高要求。未来应在适应性强的新型材料研发、多源环境数据驱动下的智能支护系统构建以及支护装备与监测技术的高度集成方向持续推进,推动巷道支护从结构抗力主导向“结构—环境—监测”三位一体融合发展。同时,应加强现场工况反馈机制,形成“设计—施工—监控”一体化闭环系统,不断提升高原矿山工程的安全性、可靠性与运行效率,为复杂生态区资源开发提供稳定技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨小聪,蒋合国.新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采:以毛坪铅锌矿深部开采实践为例[J].中国矿业,2024,33(05):9-21.
- [2] 于志钢,王龙,孙韶男.采矿工程中支护质量管理及其监测技术的运用[J].中国金属通报,2023(09):16-18.
- [3] 王宏江.金属矿蚀变岩体变形特征及最佳支护时间研究[J].山西冶金,2023,46(01):105-107.
- [4] 许金成,张绍江,李岗,等.金属矿破碎带巷道围岩支护优化设计[J].中国矿山工程,2021,50(06):92-96.
- [5] 王龙浩.金属采矿工程巷道掘进和支护应用[J].世界有色金属,2020(22):45-46.
- [6] 费旭东.高海拔地区金属矿井人工增氧装置的通风扩散规律实例研究[D].长沙:中南大学,2022.
- [7] 邓红卫,钟智明,田广林.高原矿井分段式增氧通风数值模拟研究[J].黄金科学技术,2021,29(05):698-708.
- [8] 姚银佩,蔡泽山,王辉林,等.高原矿井通风参数及风机选型研究与应用[J].黄金,2020,41(10):37-39.
- [9] 张国梁,蒋仲安,姚尚辉,等.高原环境下的矿井通风机性能变化与修正[J].矿业研究与开发,2020,40(07):100-105.