

赋存软弱夹层磷矿山巷道破坏模式及演化规律研究

朱晓飞

武汉工程大学资源与安全工程学院 湖北 武汉 430074

摘要: 本文聚焦于赋存软弱夹层条件下的磷矿山巷道, 系统性地探究其破坏机理与演化规律。研究首先从软弱夹层的工程地质特性入手, 阐明其对巷道围岩应力场、位移场和渗流场的扰动机制; 其次, 分类并阐述了由软弱夹层主导或参与的典型巷道破坏模式, 包括底鼓-帮裂型、顶板离层-冒落型、非对称大变形型及复合型破坏; 进而, 深入剖析了巷道破坏从初始损伤、局部失稳到整体垮塌的全过程演化阶段及其内在力学逻辑; 最后, 针对不同破坏模式与演化阶段, 提出了相应的防控原则与技术思路。本研究旨在为深部复杂地质条件下磷矿山巷道的科学设计、精准支护与安全高效开采提供理论支撑。

关键词: 磷矿山; 软弱夹层; 巷道破坏模式; 演化规律; 围岩稳定性

引言

随着浅部磷矿资源枯竭, 开采深度不断增加, 高地应力、高水压及复杂地质构造使巷道围岩控制难度剧增。其中, 软弱夹层(如页岩、泥岩、断层泥等)因其低强度、高塑性、强流变性和水敏性, 成为影响巷道长期稳定的关键“短板”。开挖卸荷后, 夹层易发生压缩、剪切滑移、膨胀或软化, 引发围岩应力重分布与集中, 导致失稳破坏。磷矿床多赋存于沉积环境, 矿体与顶底板常夹有不同厚度、倾角和力学特性的软弱层, 使围岩呈非均质层状或块裂结构。在此条件下, 巷道破坏表现出显著的结构性、非线性和时间依赖性, 传统基于均质假设的支护理论难以应对大变形、冒顶、片帮等灾害。因此, 深入揭示含软弱夹层磷矿巷道的破坏模式与演化规律, 已成为矿山岩石力学亟待突破的核心问题, 对保障安全生产、经济效益及矿工生命安全具有重大意义。

1 软弱夹层的工程地质特性及其对巷道围岩的扰动机制

1.1 软弱夹层的基本工程地质特性

软弱夹层是一类强度显著低于上下盘围岩的薄层状地质体, 其核心特性可概括为以下几点: ①低强度与高塑性: 其单轴抗压强度和抗剪强度远低于磷矿石及坚硬围岩, 泊松比大, 屈服后表现出显著的塑性流动而非脆性断裂。②强流变性: 在长期恒定应力作用下, 会发生持续的、不可恢复的蠕变变形, 且蠕变速率随时间、应力水平和含水率的增加而加快。③显著的水敏性: 多数软弱夹层(尤其是泥质岩类)遇水后, 其内部粘土矿物发生水化、膨胀, 导致强度急剧下降(软化效应), 体积增大(膨胀效应), 渗透性改变。④各向异性: 其力学性质沿层面方向与垂直层面方向存在显著差异, 抗剪强度

主要受层面间的摩擦-粘聚特性控制。

1.2 对巷道围岩应力场的扰动

巷道开挖打破了原岩应力平衡状态, 形成了以巷道为中心的二次应力场。软弱夹层的存在, 使得这一应力重分布过程变得极为复杂。由于软弱夹层的弹性模量远低于围岩, 根据弹性理论, 在夹层附近会产生明显的应力屏蔽效应, 即垂直于夹层方向的应力被大幅削弱, 而平行于夹层方向的切向应力则可能在夹层端部或与坚硬围岩交界处发生高度集中^[1]。这种非均匀的应力集中, 为剪切滑移和张拉破坏提供了力学驱动力。

1.3 对巷道围岩位移场的控制

软弱夹层是围岩变形的“优先通道”和“放大器”。在应力作用下, 夹层本身会发生显著的压缩和剪切错动, 直接导致巷道在该区域产生过量的收敛变形。例如, 当软弱夹层位于巷道底板时, 极易引发严重的底鼓; 当其位于两帮时, 则可能导致帮部位移失控。此外, 夹层的流变特性使得巷道变形具有明显的时间效应, 表现为初期快速变形后, 进入一个漫长的、持续增长的蠕变阶段, 给支护结构带来长期的、渐进式的荷载。

1.4 对巷道围岩渗流场的影响

地下水是诱发软弱夹层劣化的关键外部因素。巷道开挖形成的渗流场会促使地下水向巷道周边汇集。当水流经软弱夹层时, 一方面会加速其软化和泥化过程, 进一步降低其力学性能; 另一方面, 水压力本身也会对夹层产生劈裂和润滑作用, 降低其抗剪强度。这种“水-岩”耦合作用, 极大地加速了巷道围岩的劣化进程, 使得破坏更具突发性和灾难性。

2 赋存软弱夹层磷矿山巷道的典型破坏模式

根据软弱夹层在巷道断面中的空间位置(顶板、底

板、两帮)、几何形态(水平、倾斜、褶皱)及其与巷道轴线的相互关系,可将巷道破坏模式归纳为以下几类:

2.1 底鼓-帮裂型破坏

这是当软弱夹层赋存于巷道底板时最常见的破坏模式。在上覆岩层压力作用下,强度极低的底板软弱夹层首先发生压缩屈服和塑性流动,导致巷道底板向上隆起(底鼓)。底鼓的发生改变了巷道原有的断面形状和应力状态,使得两帮围岩的侧向约束减弱,水平应力向两帮转移并集中。当集中应力超过两帮围岩(特别是若两帮也存在次级软弱面时)的强度极限,便会引发帮部岩体的张裂、剪胀和片帮。此过程往往形成恶性循环:底鼓加剧帮裂,帮裂又进一步释放了对底板的约束,从而促进更严重的底鼓。

2.2 顶板离层-冒落型破坏

当软弱夹层位于巷道顶板,或作为顶板岩层中的一层弱面时,极易发生此类破坏。巷道开挖后,顶板岩梁在自重和上覆载荷作用下发生弯曲下沉。由于软弱夹层的抗拉和抗剪强度极低,它首先在拉应力或剪应力作用下与上覆坚硬岩层发生脱粘,形成离层空隙。随着离层范围的扩大和空隙内碎胀岩块的积累,离层带下方的岩体自稳能力急剧下降^[2]。一旦离层带跨度超过其极限跨距,或者受到采动、爆破等动载扰动,离层带下方的岩体便会瞬间失稳,发生分层、断裂并最终冒落,形成冒顶事故。

2.3 非对称大变形型破坏

此类破坏多发生在巷道穿越倾斜或褶皱状软弱夹层带时。由于夹层两侧围岩的力学性质和所受应力状态不对称,导致巷道两帮或顶底板的变形量和变形速率存在显著差异。例如,一侧帮部因紧邻软弱夹层而发生剧烈内移,另一侧则相对稳定,造成巷道断面严重扭曲、支架歪斜甚至折断。这种非对称变形不仅破坏了巷道的使用功能,也给支护结构带来了复杂的弯-剪-扭复合受力,极易导致支护失效。

2.4 复合型破坏

在实际工程中,单一的破坏模式较为少见,更多的情况是多种模式的叠加与耦合,形成复合型破坏。例如,一个同时赋存顶板和底板软弱夹层的巷道,可能在经历初期的底鼓和顶板离层后,随着变形的持续发展,最终演变为整个断面的缩径、扭曲乃至闭合。这种复合破坏模式的机理更为复杂,其演化过程涉及多个弱面的协同作用和能量的多路径释放,治理难度极大。

3 巷道破坏的动态演化规律与阶段划分

巷道从开挖到最终失稳并非一蹴而就,而是一个具有清晰阶段特征的动态演化过程。

3.1 初始损伤与微破裂阶段(I阶段)

巷道开挖后的极短时间内(数小时至数天),围岩因应力瞬时释放而产生弹性回弹,并在应力集中区(如巷角、软弱夹层端部)萌生大量微裂纹。此阶段变形速率快但总量小,宏观上巷道尚能保持稳定。对于赋存软弱夹层的巷道,此阶段的微破裂主要集中于夹层与坚硬围岩的界面处,为后续的宏观破坏埋下隐患。

3.2 局部失稳与加速变形阶段(II阶段)

随着时间推移(数天至数周),在持续的地应力和可能的流变效应作用下,初始微裂纹开始贯通、扩展,特别是在软弱夹层内部及其界面处,形成宏观的剪切滑移带或张开裂隙。巷道在软弱夹层控制的区域(如底板、顶板)开始出现明显的、加速的非线性变形^[3]。此阶段是破坏演化的关键转折点,若能及时采取有效的加固措施(如注浆、锚索等),尚有可能阻止其向下一阶段发展。

3.3 整体失稳与垮塌阶段(III阶段)

当局部失稳区域的范围不断扩大,或变形量达到某一临界阈值时,围岩的承载结构发生根本性破坏,应力向未破坏区域大规模转移,引发连锁反应。此时,巷道变形速率急剧增大,短时间内即可发生大范围的冒顶、片帮、底鼓闭合等灾难性后果。此阶段具有突发性强、能量释放大、难以挽回的特点,是巷道破坏演化的最终形态。

整个演化过程体现了从“量变”到“质变”的哲学规律,其驱动力是围岩系统内部储存的弹性应变能的逐步释放。软弱夹层的存在,极大地降低了这一能量释放的门槛,并引导了能量释放的路径和形式。

4 基于破坏模式与演化规律的防控对策

深刻理解破坏模式与演化规律,是制定有效防控策略的前提。

4.1 针对不同破坏模式的防控原则

①对于底鼓-帮裂型:防控核心在于“固底控帮”。应优先采用底板锚杆/锚索、底板注浆加固等措施,提高底板软弱夹层的整体强度和抗变形能力;同时,加强帮部支护的强度和刚度,抑制帮部位移。②对于顶板离层-冒落型:防控核心在于“悬吊组合梁”。应采用长锚索穿透软弱夹层,将下部不稳定岩层悬吊于上部稳定岩层;或采用高强预应力锚杆/锚索形成组合梁结构,增强顶板岩层的整体性,防止离层。③对于非对称大变形型:防控核心在于“差异化支护”。需根据两帮或顶底板不同的地质条件和预期变形量,设计非对称的支护参数(如锚杆长度、密度、预紧力),以适应不均匀变形^[4]。④对于复合型破坏:防控核心在于“系统协同”。必须采取“顶-帮-底”一体化的联合支护体系,并辅以深孔注浆等区域

性加固手段,全面提升围岩的整体承载能力。

4.2 基于演化阶段的动态防控思路

①在I阶段:重点是加强监测预警。通过在巷道关键部位(如软弱夹层露头处、巷角、拱顶)布设高灵敏度的多点位移计、锚杆(索)测力计、围岩应力盒以及声发射传感器网络,可以实时、连续地捕捉围岩内部微破裂事件的发生位置、频次和能量级别,以及宏观位移的细微变化趋势。这些数据经过专业软件的分析处理,能够有效识别出围岩从稳定状态向不稳定状态过渡的早期信号,为后续的干预决策提供宝贵的时间窗口和科学依据。②在II阶段:重点是及时干预。干预措施应具有快速、精准、高效的特点。例如,可迅速在变形加速区域补打高强预应力锚索,对关键部位进行化学或水泥基材料的快速注浆封堵,或者架设临时的钢拱架进行紧急支撑。这些措施旨在迅速抑制局部变形的进一步发展,重新建立局部区域的力学平衡,将破坏控制在萌芽或初期状态,避免其向灾难性的整体失稳阶段演进。③在III阶段:重点是避险与重建。应立即启动最高级别的应急预案,组织所有人员迅速、有序地撤离危险区域。在确认人员全部安全后,方可对垮塌段进行风险评估,并制定周密的清理和重建方案。此阶段的教训总结至关重要,需深入分析垮塌原因,为未来类似地质条件下的巷道设计和施工提供反面教材和改进方向。

4.3 强化源头控制与综合治理

超越被动的支护与应急响应,最根本、最经济的防控策略在于源头控制与综合治理。在矿山规划与巷道设计的最初阶段,就应投入足够的资源进行高精度的地质勘探,利用三维地震、钻孔雷达等先进技术,精细刻画软弱夹层的空间几何形态、连续性及其物理力学参数。在巷道选线时,应秉持“能避则避”的原则,尽可能将主要运输巷道、硐室等关键工程布置在远离大型、连续软弱夹层带的稳定岩层中。对于那些因矿体赋存条件限制而无法完全绕避的情况,则必须在设计阶段就将其视为重大风险源,进行专门的稳定性分析,并据此预留足

够的安全系数,采用超前的、强化的支护设计方案。此外,水是软弱夹层的“天敌”,因此严格的水害防治是综合治理不可或缺的一环。必须在巷道系统内构建完善的防水、排水网络,包括在巷道周围施工止浆墙、帷幕注浆带以隔绝外部水源,在巷道底部设置通畅的排水沟和集水井,及时抽排渗入的地下水。通过有效控制巷道内的湿度环境,可以最大限度地减缓或阻止软弱夹层的水化、软化和膨胀过程,从源头上维持其力学性能的相对稳定,为巷道的长期安全运营构筑一道坚实的防线。

5 结语

赋存软弱夹层是深部磷矿山巷道工程面临的核心地质挑战,其独特的工程地质特性深刻地扰动了巷道围岩的应力、位移与渗流场,诱发了复杂多样的破坏模式和动态演化的失稳过程。本文系统地识别并阐述了底鼓-帮裂型、顶板离层-冒落型、非对称大变形型及复合型等典型破坏模式,揭示了其从初始损伤、局部失稳到整体垮塌的三阶段演化规律。研究表明,有效的巷道稳定性控制,必须建立在对具体地质条件下破坏机理的深刻认知之上。未来的研究与实践,应致力于将这种机理认知转化为精准的监测预警指标、智能化的支护设计方法和动态化的风险管理流程。唯有如此,才能在复杂的深部开采环境中,确保磷矿山巷道的安全、稳定与高效运行,为国家战略性矿产资源的可持续开发保驾护航。

参考文献

- [1]李涛,李树建,王宗勇,等.富水磷矿山复杂岩性巷道围岩稳定性评价研究[J].采矿技术,2024,24(02):195-202.
- [2]曾春梅,杨志全,李树建,等.基于组合赋权-改进可拓云模型的磷矿山岩性巷道围岩稳定性评价[J].化工矿物与加工,2025,54(09):44-52.
- [3]凡奥奇.爆破载荷下磷矿山巷道变形破坏机理及支护技术研究[D].中国矿业大学,2025.DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2025.000793.
- [4]林锐旭.深部磷矿山开采环境监测与时空演化特性[J].科技与创新,2024,(24):12-16.