

煤矿深部软岩巷道变形机理及支护措施

于 波

甘肃万胜矿业有限公司 甘肃 庆阳 745000

摘 要：深部软岩巷道之所以变形，根本原因在于软岩本身强度低、塑性强、会流变，再加上高地应力和采动应力叠加作用。水的作用会诱发黏土矿物膨胀软化，岩体里结构面一多，完整性就下降，而岩石的蠕变特性又让变形不停发展。针对这些机理，一般采用动态设计。具体做法上，可以综合运用锚杆支护、注浆加固、卸压让压和联合支护技术，把锚杆、锚索和注浆的参数定合理。初次支护和二次支护的时序要优化，施工时注意减震，底板也要治理。效果好不好，就看变形监测、受力和松动圈测试的结果。把这些手段结合起来，就形成了一套能真正落地的支护体系。

关键词：煤矿；巷道变形机理；支护措施

引言：深部煤矿软岩巷道的围岩变形控制，一直是矿井安全高效生产里比较头疼的技术难题。随着开采深度不断增加，地应力水平明显上升，软岩巷道在高应力、强扰动和地下水的共同作用下，会出现严重的变形破坏，底鼓、收敛、顶板下沉这些问题频繁发生，巷道的服役寿命被大大缩短。软岩本身物理力学性质特殊，传统支护手段往往效果不好，所以很有必要系统地把变形机理搞清楚，再建立起有针对性的支护措施。

1 煤矿深部软岩巷道变形机理

1.1 软岩自身物理力学特性

软岩的物理力学性质摆在那里，它在深部巷道里就是容易发生显著变形。软岩整体强度低，刚度也不够，受力的时候塑性变形能力很强，围岩一旦承受载荷，就很难维持原来的形态。软岩里头还广泛分布着蒙脱石、高岭土这类黏土矿物，吸水膨胀的特性很明显。一旦跟水接触，矿物晶格间距就会变大，产生内部膨胀应力，把围岩体积撑大，进而诱发变形。另外，软岩还有典型的流变性特征，就算应力条件不变，它的变形量也会随着时间的推移慢慢增长。这种随时间发展的变形行为，意味着巷道开挖之后很长一段时间里，围岩都还在持续运动，控制的难度自然就大大增加了^[1]。上面说的这几条物理力学特性，是深部巷道变形发展的重要内在原因，而且它们之间还会相互影响、共同起作用，最终形成复杂又持续的变形过程。

1.2 地应力作用与应力重分布

地应力是驱动深部软岩巷道围岩变形的核心外部动力。原岩应力主要由上覆岩层重力形成的自重应力和地质构造运动产生的构造应力构成，当这些应力数值超过软岩自身的强度极限时，围岩便会发生明显的变形破坏。巷道开挖行为打破了原岩应力的初始平衡状态，导

致围岩内部应力场重新分布，这种应力重分布过程会在巷道周边特定区域形成高应力集中区。在高应力集中条件下，围岩分别承受拉伸应力和剪切应力的作用，促使拉张变形和剪切滑移相继出现。深部开采环境中，原始地应力水平本来就较高，再叠加采动引起的附加应力，多应力场之间相互耦合、叠加，使得巷道周边应力环境更加复杂剧烈。

1.3 水理化学作用

水的作用是诱发和加速深部软岩巷道围岩变形的重要因素之一。地下水通过各种通道进入软岩内部后，会跟岩石基质发生物理化学作用，软岩的力学性能明显下降，最直接的表现就是强度和刚度都掉了许多。软岩里的黏土矿物遇水就膨胀，矿物晶层之间吸附水分子，体积大幅增加，产生的膨胀压力直接推动围岩变形^[2]。地下水的运动也不是均匀的，它主要沿着岩体里的节理、裂隙这些结构面走。渗透水流持续作用于结构面附近的围岩，让围岩慢慢软化，结构面两侧岩体的抗剪强度和整体承载能力也跟着削弱。随着水理化学作用不断进行，软岩的力学性质越来越差，原本稳定的围岩开始变形，已经发生的变形则会进一步加快扩展。水这么一搅和，软岩巷道的变形过程就变得更加复杂，也更难控制了。

1.4 结构面与岩体破碎特征

软岩岩体里头发育着各种各样的结构面，这是控制巷道围岩变形规律的关键因素。层理、节理这些结构面的存在，明显降低了岩体的整体性和连续性，岩体不再是均质完整的介质，而是被分割成多个相对独立的块体。这些结构面本身的力学强度比较低，外力一来，它们就容易成为优先变形的弱面，进而主导围岩的整体变形模式。结构面的空间组合特征，包括产状、密度、延展性，还有不同结构面之间的交切关系，这些因素共同

决定了围岩在外力作用下的变形和破坏规律。如果结构面组合对围岩稳定不利,岩体就更容易沿着这些软弱面发生滑移、张开或者闭合。破碎的岩体因为块体之间咬合作用减弱,整体承载能力大幅下降,一受到外力扰动就容易失稳甚至垮落。

1.5 时间效应与蠕变特性

软岩巷道的围岩变形有一个很明显的特点:它跟时间关系很大,这一点跟硬岩巷道不一样。巷道刚挖完的时候,变形速率通常比较快,应力调整很剧烈,围岩很快就往巷道空间里挤。时间一长,变形速率虽然会慢下来,但不会真的停住,而是进入一个持续缓慢增长的状态。这种随时间不断发展的变形行为,说到底还是因为软岩本身有蠕变特性就算应力水平不变,变形量也会随着时间慢慢累积增加。蠕变的存在意味着巷道挖完之后很长时间内,围岩都还在动来动去,不可能短期内就稳定下来。长期累积下来的蠕变变形量可能相当可观,会一直给支护结构施加载荷和变形压力。所以,在设计深部软岩巷道的支护方案和控制措施时,一定要把时间因素考虑进去,把围岩的长期变形行为贯穿到设计、施工和维护的全过程当中。

2 煤矿深部软岩巷道支护措施

2.1 支护原则与策略

深部软岩巷道支护首先需要确立科学的原则与整体策略。动态设计原则要求支护工作必须紧密结合地压活动的发展规律,随着围岩变形和应力分布状态的变化实时调整支护参数,形成卸压、加固与锚喷联合支护相互配合的体系。这种动态调整避免了支护形式一成不变带来的适应性不足问题。综合治理思想强调不能依赖单一支护手段解决所有问题,而应统筹考虑巷道选址时地质条件的优劣、巷道断面形状与尺寸的合理性、施工工艺对围岩的扰动程度以及底板区域的专门治理措施。单一措施往往只能缓解局部或某一阶段的变形,难以全面控制围岩稳定性^[3]。长期监控要求是在巷道使用周期内持续开展围岩变形量测工作,通过监测数据掌握围岩变形活动的动态变化规律,为确定二次支护的最佳时机和具体参数提供可靠依据。只有将动态设计、综合治理与长期监控三者有机结合,才能形成适应深部软岩复杂条件的支护策略体系。

2.2 支护技术体系

(1) 锚杆支护技术;高强度锚杆配上较高的预紧力,打在围岩表面上,能主动控制围岩早期的变形发展。预紧力让锚杆周围的岩体处于三向受压状态,围岩的自承载能力明显提升,松动范围扩展的速度也降下来

了。锚杆杆体本身还可以兼作注浆管路,锚固作业完成后直接往围岩内部注浆,实现锚固与注浆一体化施工。浆液从锚杆端部出口进入围岩裂隙,把空隙填起来,破碎的岩体也被胶结住,围岩的完整性和残余强度进一步提升。这种锚注一体化技术简化了施工流程,围岩加固效果也更好了。(2) 注浆加固技术;注浆加固的做法是往围岩裂隙系统里注入浆液,浆液扩散开、填满裂隙空间,把破碎岩体胶结成一个整体。注浆之后,巷道周围会形成一定厚度的连续加固圈,这个加固圈能明显提高围岩的整体承载能力和抗变形能力。多维度注浆技术则根据围岩不同深度区域的破碎程度差异,分别匹配不同的注浆压力和浆液浓度。浅部区域用较低压力和较稀的浆液,深部区域则提高注浆压力和浆液浓度,这样能有效稳定围岩内部的小结构。(3) 卸压与让压技术;超深孔切顶卸压技术是在巷道顶板特定位置打超深钻孔,然后做切顶爆破,人为切断顶板岩层的连续性,改变采动应力的传递路径,降低采动活动对巷道围岩的附加应力扰动。这项技术能有效限制顶板大结构的过量运动,减少应力集中程度。可缩性支架用型钢制作,本身具备一定的可缩变形能力。当围岩产生较大变形时,支架通过自身的可缩特性释放一部分变形压力,不会因为承受过高的刚性载荷而破坏。(4) 联合支护技术;锚杆、锚索和金属支架组成的复合支护体系,把三种支护手段结合起来了:锚杆控制浅部围岩变形,锚索锚固深部稳定岩层并提供悬吊作用,金属支架提供整体承载框架^[4]。三者共同形成一个高阻力、可缩性的承载结构,既能适应围岩变形,又能保持足够的支护阻力。锚网喷与架后充填相结合的做法是在金属支架后方充填材料,让支架和围岩紧密接触,消除空顶空帮的区域,提高支护体系的整体稳定性和协调变形能力。

2.3 关键支护参数设计

支护参数的科学设计是确保深部软岩巷道支护效果的核心环节。锚杆参数主要包括锚杆长度以及锚杆之间的排距和间距,这些参数需要根据巷道断面的具体尺寸和围岩的实际条件进行确定。锚杆长度过短难以锚固到有效岩层中,过长则造成材料浪费,排距和间距过大则锚固区无法形成连续稳定的承载层,过密则增加施工工作量。锚索参数方面,锚索长度通常设计为锚杆长度的数倍,以确保锚索能够穿过浅部破碎区而深入深部相对稳定的岩层中。对锚索施加预应力可以主动优化围岩的受力状态,将拉应力分布调整为更加有利的压应力分布形式。注浆参数包含浆液的材料类型、注浆时施加的压力大小以及浆液在围岩中的扩散范围,这些参数必须与

围岩的破碎程度相匹配。围岩越破碎,需要的注浆压力范围和浆液扩散控制越精细,只有参数匹配合理,才能形成有效的注浆加固区,真正改善围岩的物理力学性能。

2.4 施工工艺优化

施工工艺的合理优化对于深部软岩巷道支护效果的实现具有直接影响。初次支护与二次支护的时序安排需要科学把控,初次支护应在巷道开挖后及时施作以迅速封闭围岩表面,防止围岩因暴露时间过长而进一步劣化。二次支护则需根据围岩变形监测的结果选择适当时机进行补强,过早施作可能承受过大的变形压力,过晚则围岩已产生过量变形。减震施工措施要求在整个施工过程中尽可能减少对围岩的震动扰动,爆破作业应采用控制爆破技术,机械作业应避免剧烈冲击。这是因为软岩本身强度较低,过大的施工震动会进一步破坏围岩结构,使其强度进一步降低。底板治理技术是施工工艺中不可忽视的环节,底鼓现象在软岩巷道中十分普遍,若不加以治理,底板持续隆起会改变巷道断面形状,导致两帮和顶板支护失效。通过向底板岩层注浆提高其整体性,或在底板中打入锚杆增强底板抗变形能力,能够有效提高底板强度,防止底鼓引发巷道的全面失稳。

2.5 支护效果评价方法

支护效果评价是检验支护措施到底管不管用、同时指导后面怎么优化的必要环节。围岩变形监测这块,用的是多种测量工具,定期观测巷道关键部位的位移,重点看顶板有没有离层、两帮围岩水平方向移了多少。这些监测数据能直接反映出围岩的变形速率和累积变形量,判断支护效果就有了直接依据。支护结构受力分析是在锚杆和锚索上安装压力传感装置,实时获取锚固构件的受力状态。有了这些数据,就能评估支护结构实际承受的载荷大小以及变化趋势,判断锚杆和锚索是不是

还在安全受力范围内、有没有发挥出预期的承载能力。松动圈测试用得比较多的是声波探测法或者钻孔内窥视法,目的是确定巷道周围围岩的松动范围。声波在不同完整程度的岩体里传播速度不一样,分析波速变化就能推断出围岩的松动深度。钻孔窥视技术则是用光学设备直接看钻孔内壁的岩体完整情况^[5]。松动圈测试的结果能揭示围岩破碎区的空间分布特征,给调整锚杆长度、注浆深度这些支护参数提供科学依据,做到支护方案的精确定制。

结束语:深部软岩巷道变形机理复杂,是多因素耦合作用的结果。软岩低强度与强塑性为变形提供了内在条件,高地应力与采动应力叠加提供了外部驱动力,水理作用和结构面发育进一步加剧了围岩劣化,时间效应使变形呈现长期持续性特征。针对上述机理,动态设计原则配合锚杆支护、注浆加固、卸压让压及联合支护技术能够有效控制围岩变形。科学确定锚杆锚索及注浆参数是支护设计的关键环节,优化施工时序、实施减震措施、加强底板治理可从工艺层面提升支护效果。

参考文献

- [1]朱传根.高应力软岩巷道群交岔点变形破坏机理及支护技术研究[D].山东:山东建筑大学,2024.
- [2]吴彦辰.寺河煤矿高应力软岩巷道底板破坏特征及控制研究[J].陕西煤炭,2026,45(4):44-49.
- [3]康琦.相邻巷道采动影响下围岩变形与支护模拟分析[J].江西煤炭科技,2025(1):16-19,24.
- [4]余中浩.软岩巷道棚-索协同支护补强技术分析[D].安徽:安徽理工大学,2022.
- [5]张杰,高守世,李通,等.软岩巷道底板破坏特征及控制研究[J].煤炭科学技术,2023,51(3):21-28.