

深部矿山高地压巷道围岩控制技术与支护优化研究

肖世鑫

山西宁武大运华盛庄旺煤业有限公司 山西 忻州 036700

【摘要】：我国煤炭资源开采逐步向深部延伸，多数矿井开采深度已突破 800m，高地压、高岩溶水压与高地温共同构成深部开采的典型环境特征，其中高地压引发的巷道围岩大变形、支护失效等问题最为突出。本文围绕深部高地压巷道的围岩控制需求，从赋存环境特征入手，分析围岩变形破坏的时空演化规律与传统支护的失效诱因，构建主动支护、分步支护与卸压技术协同的控制体系，提出支护参数动态优化方法与现场施工管控要点。研究表明，深部巷道围岩控制需摒弃单纯提升支护强度的思路，通过强化围岩自身承载能力、合理释放变形应力、动态调整支护参数，可实现巷道长期稳定，相关技术路径可为同类地质条件矿井提供工程参考。

【关键词】：深部矿山；高地压巷道；围岩控制；支护优化；卸压支护

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.049

引言

国内浅部煤炭资源逐年减少，多数国有重点煤矿进入深部开采阶段，部分矿井埋深已超过 1200m。深部开采过程中，地应力水平随埋深大幅提升，巷道围岩破碎范围扩大、变形速率加快，传统锚网索支护与刚性棚架的组合方案频繁出现失效，巷道返修率居高不下，既增加开采成本，也带来现场安全隐患。行业内针对深部高地压巷道的围岩控制已开展大量实践，但多数方案照搬浅部支护经验，未结合深部围岩的变形特性调整技术思路，支护与围岩变形的适配性不足。

1 深部矿山高地压巷道赋存环境与工程特性

1.1 深部开采地应力场分布特征

埋深超过 800m 的矿山进入深部开采范畴后，地应力水平随埋深增加呈现明显的非线性上升趋势，其中水平构造应力的占比逐步超过自重应力，成为影响巷道稳定性的主导因素。现场常用水压致裂法或应力解除法测试原岩应力，测试结果直接作为巷道布置和支护设计的基础依据，多数矿区的最大水平主应力方向与区域构造走向保持一致，偏差通常不超过 15 度。不同矿区因地层构造发育程度不同，地应力的方向和大小存在明显差异，靠近断层带或褶皱核部的区域，地应力集中系数可达到普通区域的 2 倍以上，巷道开挖后应力重新分布的幅度更大，局部位置甚至会出现应力叠加引发的岩爆风险。地应力场的非均匀分布特征直接决定了巷道不同帮部的变形差异，多数情况下巷道两帮的移近量大于顶底板，其中沿最大水平主应力方向布置的巷道变形量相对更小，这一规律在现场巷道布置阶段可直接参考，无需额外开展复杂的数值模拟验证。地应力随采掘活动动态变化，工作面回采产生的超前支承压力会叠加在原岩应力之上，使回采巷道的受力环境进一步恶化，部分受采动影响强烈的巷道，围岩应力峰值可提升 30%以上，变形速率出现阶段性陡增，回采影响范围通常超前工作面 100m 左右，剧烈影响段集中在超前 30 到 50m 区间。

1.2 巷道围岩岩性与结构面发育规律

深部巷道围岩多经历过长期的地质构造作用，岩体内部节理、层理、裂隙等结构面发育程度更高，岩体完整性系数普遍低于 0.6，属于破碎或较破碎岩体范畴。不同岩性的围岩表现出不同的变形特性，泥岩、粉砂质泥岩等软岩遇水后膨胀性明显，巷道开挖后围岩风化速度快，表层岩体很快出现碎胀剥落，而砂岩、灰岩等硬岩则更容易出现应力集中导致的岩爆或片帮现象。结构面的产状直接影响围岩的破坏形式，当结构面与巷道轴向呈小角度相交时，围岩容易沿结构面产生滑移变形，帮部出现阶梯状错动，顶板则易发生沿层理的离层垮落。深部围岩的岩性往往呈现互层分布特征，软硬岩层交替出现，支护过程中需兼顾不同岩层的承载特性，单一的支持参数难以适配全断面的围岩条件，这也是深部巷道支护设计需要重点考量的细节。部分矿区深部围岩含有黏土矿物成分，遇水后体积膨胀率可达 10%以上，巷道积水会显著加剧底鼓和帮部变形，现场排水措施的落实效果直接影响巷道整体稳定状态。

2 高地压巷道围岩变形破坏规律与控制瓶颈

2.1 围岩变形破坏的时空演化特征

高地压巷道开挖完成后，围岩变形并非一次性完成，而是呈现出明显的阶段性演化特征，开挖初期围岩应力快速释放，表层岩体产生瞬时变形，变形速率每天可达几十毫米，持续时间约 7 到 10 天。这一阶段若支护不及时，表层岩体很快会出现碎胀掉落，内部裂隙快速向深部扩展，后续即使补打支护，也无法恢复围岩的初始完整性。随后进入缓慢变形阶段，围岩内部裂隙逐步扩展，变形速率维持在每天几毫米的水平，这一阶段持续时间受围岩性质和支护强度影响，支护强度不足时缓慢变形阶段会持续数月，最终引发围岩失稳。当受到采动应力叠加影响时，围岩会进入加速变形阶段，变形速率再次快速上升，若未及时采取补强措施，短时间内就会出现巷道断面收缩、支护结构失效的情况。从空间分布来看，巷道围岩的破坏范围

从表层向深部逐步延伸,表层破碎区的范围可达1.5到3m,塑性区范围则能达到5到8m,远大于浅部巷道的破坏深度,其中两帮的破坏深度通常大于顶板和底板,底鼓现象在深部高地压巷道中尤为普遍,且治理难度远大于帮部和顶板变形。围岩变形的空间分布还受断面形状影响,矩形巷道的顶角位置容易出现应力集中,破坏程度高于其他位置,而圆弧拱形巷道的应力分布相对均匀,整体稳定性更优,断面尺寸越大,围岩破坏范围也会相应扩大,大断面巷道的支护难度呈几何级上升。

2.2 传统支护体系的失效诱因分析

浅部矿山常用的锚网索加U型钢棚的支护体系,应用到深部高地压巷道中时,普遍出现支护失效的问题,最直接的表现是锚杆拉断、锚索破断、钢棚弯曲变形,部分巷道还会出现网兜、片帮等局部破坏。传统支护设计多基于经验类比法,支护参数照搬浅部巷道的经验,锚杆长度、锚固力、锚索预紧力等参数均未根据深部围岩的破坏深度进行调整,锚杆锚固段往往处于围岩破碎区内,无法有效锚入稳定岩体,支护作用无法充分发挥。刚性支护结构的让压性能不足,高地压作用下围岩产生的大变形会直接作用在支护结构上,当变形量超过支护结构的允许变形量后,支护构件就会发生塑性破坏,失去承载能力。多数传统支护方案只注重初期支护强度,忽略了围岩自身承载能力的强化,开挖后围岩表层很快破碎,内部裂隙持续扩展,围岩自身的承载结构逐步解体,最终全部压力都转移到支护结构上,超出支护体系的承载极限。施工过程中的质量管控不到位也会加剧支护失效,比如锚杆钻孔角度偏差过大、锚固剂搅拌不充分、锚索预紧力不足等问题,都会使实际支护强度远低于设计值,进一步降低支护体系的可靠性。

2.3 深部巷道围岩控制的核心矛盾

深部高地压巷道围岩控制的核心矛盾,集中在高地应力引发的大变形需求与支护结构承载能力有限之间的冲突,单纯提升支护强度无法从根本上解决问题,反而会大幅增加支护成本。围岩变形过程中包含可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形,其中塑性变形占比超过60%,这部分变形必须通过合理的让压措施释放,否则无论支护强度多高,最终都会被变形压力压垮。另一个矛盾在于围岩破碎范围大与锚杆锚索有效锚固长度不足的冲突,深部围岩的塑性区深度远超普通锚杆的长度,常规2.4m长的锚杆完全处于塑性区内,只能起到约束表层碎胀的作用,无法将荷载传递到深部稳定岩体,支护体系的悬吊作用基本失效。采动应力的动态叠加与支护参数静态设计之间也存在矛盾,巷道服务周期内会受到多次采动影响,围岩受力状态持续变化,而一次性设计完成的支护参数无法动态调整,在采动影响强烈的阶段就会出现支护强度不足的问题。这些矛盾相互交织,共同导致深部高地压巷道的支护难度大幅提升,单一的技术手段难以实现长期稳定控制,需要构建多技术协同的控制体系。

3 高地压巷道围岩控制技术体系与支护优化

3.1 主动支护与围岩强化技术路径

深部高地压巷道的围岩控制需转变思路,从被动承受围岩压力转向主动强化围岩,充分调动围岩自身的承载能力,这也是当前行业内的主流技术方向。锚杆锚索预紧力的提升是主动支护的核心手段,通过提高预紧力可在围岩表层形成一定厚度的压应力区,抵消部分拉应力,抑制围岩裂隙的扩展,常规巷道的锚杆预紧力可提升至80kN以上,锚索预紧力不低于150kN,具体数值需结合围岩岩性进行调整。锚杆统一选用左旋无纵筋螺纹钢杆体,配套高强度螺母与托盘,保证预紧力有效传递到围岩内部,避免预紧力损耗在构件变形上。全长锚固锚杆的应用可进一步强化支护效果,相比端部锚固,全长锚固锚杆能沿整个杆体长度向围岩提供约束力,限制围岩内部的滑移和离层,尤其适合破碎围岩条件,锚固剂需采用树脂加长锚固的方式,确保锚固段与岩体充分粘结。围岩注浆加固是强化破碎围岩的有效手段,通过向围岩内部注入水泥浆或化学浆液,填充岩体内部的裂隙,提升岩体的完整性和强度,注浆孔的深度需穿透塑性区进入稳定岩体,孔径通常为42mm,注浆压力控制在2到4MPa,避免压力过高导致围岩开裂。对于软岩巷道,还可采用喷射混凝土封闭围岩表面,防止围岩遇水膨胀和风化剥落,喷射混凝土的厚度不宜过厚,通常控制在100到150mm,过厚的喷层会降低支护体系的让压性能,反而不利于变形释放。

3.2 支护参数的动态优化方法

支护参数优化不能依赖经验类比,需结合现场地质条件和围岩变形数据进行动态调整,形成“设计—施工—监测—优化”的闭环流程。锚杆长度的确定以穿透破碎区、进入稳定岩体不小于0.5m为原则,针对深部巷道两帮破碎深度大的特点,两帮锚杆长度可适当加长至2.8到3.0m,顶板锚杆维持在2.4到2.6m即可,无需全断面统一加长,避免造成材料浪费。锚杆间排距的调整需结合预紧力大小,预紧力提升后可适当增大间排距,通常情况间排距控制在800×800mm到1000×1000mm之间,破碎严重区域缩小至700×700mm,保证压应力区的连续性。锚索的布置方式采用长短结合的形式,短锚索用于加固浅层围岩,长度控制在6到8m,长锚索深入深部稳定岩体,长度可达10到12m,锚索间距根据顶板岩性确定,完整岩层可放大到2m,破碎岩层缩小至1.5m,锚索托盘需采用高强度可调心托盘,适应围岩变形产生的角度偏移,避免锚索出现剪切破坏。支护参数优化过程中可参考相似地质条件矿井的实践数据,但不能直接照搬,必须通过现场试验段进行验证,在试验段内设置不同的参数组合,通过监测变形数据和支护构件受力情况,筛选出最适配的参数方案,再向全巷道推广。

3.3 分步支护与卸压协同控制方案

针对深部高地压巷道大变形的特点,采用分步支护的方式替代一次性支护,可有效协调围岩变形与支护承载的关系,实现“边变形边承载”的控制效果。第一步为初期支护,巷道开挖后及时打设锚杆挂网,提供初步的支护阻力,约束围岩表层的瞬时变形和碎胀,允许围岩产生一定量的变形,释放部分应力。第二步为加强支护,当围岩变形速率逐步放缓后,打设锚索并进行注浆加固,提升围岩的整体承载能力,控制围岩的缓慢变形。第三步为采动补强,在工作面回采前,对受采动影响的巷道段进行支护补强,补打锚索或架设可缩性支架,应对采动应力叠加带来的加速变形。卸压技术的应用可从源头上降低围岩应力水平,常用的卸压手段包括帮部卸压钻孔、底板卸压槽和顶板爆破卸压,其中帮部卸压钻孔应用最为广泛,钻孔直径通常为 100 到 150mm,孔深 8 到 12m,间距 1 到 1.5m,钻孔可在围岩内部形成应力释放空间,使高应力向深部转移,降低支护结构承受的压力。卸压措施需与支护措施协同配合,卸压程度过大会导致围岩过度破碎,增加支护难度,卸压不足则无法达到应力释放的效果,现场实施时需根据应力监测数据调

整卸压参数,保证卸压后围岩应力处于支护体系的承载范围内。底鼓严重的巷道可结合底板卸压槽和底板锚杆进行治理,卸压槽深度不小于 1.5m,底板锚杆长度控制在 2.5m 左右,共同约束底板的隆起变形。

4 结论

深部高地压巷道的围岩控制是深部开采面临的核心工程难题,其本质是高地应力环境下围岩大变形与支护承载能力的适配问题。单纯依靠提升支护强度无法解决根本问题,需转向“主动强化围岩、合理释放应力、动态调整参数、协同控制变形”的技术思路。主动支护与围岩注浆强化可有效提升围岩自身承载能力,充分发挥围岩的自稳作用;分步支护配合卸压技术,可协调变形释放与支护承载的关系,避免支护结构因刚性抵抗发生破坏;支护参数需结合现场地质条件动态优化,针对不同区域采用差异化方案,兼顾稳定性与经济性。现场施工管控与变形监测是支护方案落地的保障,严格管控关键工序质量、建立常态化监测调整机制,才能确保围岩控制效果达到预期。

参考文献:

- [1] 杜军凯.矿山建设阶段锚喷支护参数优化与原位检测技术[J].凿岩机械气动工具,2026,52(6):83-85.
- [2] 杨坤尧,于兴社,顾章恒,等.破碎采场巷道分级支护优化及工程应用[J].矿业工程,2026,24(3):14-18.
- [3] 孙琳琳,杨坤尧,连欢超,等.矸卡岩巷道吸湿劣化规律研究及支护改进[J].矿业工程,2026,24(3):5-9+13.
- [4] 曾令江,苏振楠,赖伟平.阿舍勒铜矿深部软弱围岩巷道支护方案对比研究[J].有色矿冶,2026,42(3):8-11+25.
- [5] 赵同彬,李龙飞,邢明录,等.矿山锚杆支护两类工程问题及锚固性能测试方法研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2026,8(3):121-135.