

深部矿井高应力巷道围岩控制技术研究

翟晓东

山西宁武大运华盛庄旺煤业有限公司 山西 忻州 036700

【摘要】：深部矿产资源开采进程持续推进，井下巷道埋深不断增加，原岩应力水平同步攀升，高应力诱发的围岩大变形、片帮、底鼓等病害逐步成为制约井下采掘作业连续性的关键因素。常规浅部巷道支护手段适配性持续下降，原有锚网喷支护体系在高地应力环境下频繁出现锚杆断裂、喷层开裂脱落问题，现场支护返修工程量居高不下，直接抬升矿井掘进与维护成本。文章立足井下现场围岩变形实测数据，梳理深部高应力巷道围岩变形的实际发育特征，剖析现有支护工艺落地过程中暴露的现实短板，围绕分级支护、卸压改造、注浆加固三类实用控制技术展开细化探究，结合井下施工实操条件明确不同围岩工况对应的技术落地要点，优化现有围岩治理施工流程，为同类型深部矿井巷道运维提供落地性技术参考。

【关键词】：深部矿井；高应力巷道；围岩变形；支护技术；围岩控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.035

引言

国内矿产开采重心逐步转向深部地层，浅层可采煤炭与金属矿产储量逐年缩减，采掘工作面开拓深度逐年突破原有开采阈值，多地主力矿井采掘深度陆续迈入千米级别。地层自重应力伴随埋深增加呈线性上升趋势，地质构造应力叠加作用进一步放大巷道周边应力集中程度，巷道掘进扰动打破围岩原始应力平衡状态后，围岩内部裂隙快速发育扩展，塑性破坏区范围远超浅部开采条件下的常规数值。多数矿井沿用浅部开采时期成型的支护方案，照搬锚网喷单一支护模式应对高应力扰动，施工结束短周期内巷道侧壁就会出现渐进式变形，底板鼓起挤压运输轨道，巷道有效通行断面持续收缩，部分巷道投产数月便需要大面积返修加固。井下现场技术人员不断调整支护构件规格与布设间距，但单纯加大锚杆直径、加密布设密度的改良方式很难从根源消解围岩内部积聚的高应力，支护材料投入持续增多却难以控制围岩持续流变。依托现场实地监测积累的变形数据，细化梳理高应力巷道变形规律与各类支护技术实际应用效果，针对性完善围岩控制实施方案能够切实改善井下巷道服役状态，降低巷道后期维护带来的资源损耗。

1 深部高应力巷道围岩变形现场特征

1.1 高应力环境下围岩形变发育规律

深部地层岩体经过漫长地质构造运动作用，内部原生裂隙交错分布，巷道掘进作业带来的开挖卸荷作用改变围岩原有受力状态，巷道周边围岩从弹性受力状态快速转入塑性流变阶段，形变过程不会在掘进施工完成后短时间趋于稳定。围岩变形速率在巷道成型前三十天维持在高位区间，之后变形放缓但不会彻底终止，长期缓慢蠕变持续消耗支护结构承载余量，坚硬岩层受构造应力影响容易出现突发性崩落，软质泥岩遇井下巷道内渗流水体后快速软化膨胀，从巷道底板位置向上持续隆起。不同巷道所处地质构造位置存在明显区别，处于向斜、断层破碎带周边的巷道应力集中系数显著偏高，围岩变形量能达

到完整岩层区段变形数值的三倍以上，巷道两帮收缩幅度与底鼓涨幅出现差异化发展趋势，底板缺少支护约束成为变形高发区域。井下水文环境同样干扰形变进程，围岩裂隙导通含水层后，地下水持续渗入岩体内部，弱化岩体颗粒间粘结力，加速裂隙贯通延伸，原本完整性尚可的围岩逐步碎裂溃散，进一步加剧支护体系的承载负担。

1.2 现有常规支护工艺现场应用弊端

常规锚网喷支护施工以锚杆悬吊围岩、喷射混凝土封闭表层裂隙为核心思路，该工艺在浅部低应力矿井中可以稳定控制围岩形变，移入深部高应力作业环境后各项适配性能出现明显下滑。现场施工选用的普通螺纹锚杆屈服强度难以匹配围岩高荷载作用，围岩持续蠕变产生的拉应力超过锚杆材料极限承载力，锚杆杆体从中部位置拉断失效，配套金属网被破碎围岩撕裂散开，表层喷射混凝土在围岩挤压作用下大面积起壳剥落，失去隔绝空气与水体侵蚀岩体的防护作用。部分施工队伍为改善支护效果更换高强度锚杆与加厚喷层，施工成本同步上涨的同时依旧无法疏导围岩内部集聚应力，荷载全部集中于支护构件之上，应力持续累积最终突破支护结构承载上限，巷道重复返修频次不断增加。支护施工环节的现场管控疏漏同样放大病害影响，井下掘进工序衔接紧凑，部分区段锚杆锚固段注浆填充不密实，锚固力达不到设计标准，支护构件无法和围岩形成协同受力整体，零散受力的支护构件使用寿命大幅缩短。

2 高应力巷道围岩变形影响因素分析

2.1 地应力与岩体自身属性带来的控制难点

地层自重应力与构造应力共同构成巷道所处地应力场，埋深增加带来自重应力稳步上涨，区域地质构造运动留存的残余构造应力随机分布在不同采掘区域，两种应力叠加形成局部超高地应力区，巷道开挖后应力向巷道周边转移富集，直接推动围岩塑性破坏范围向外拓展。岩体自身矿物组成与结构构造决定岩体抗变形能力，泥质含量偏高的软弱岩体内部胶结程度偏

弱, 应力扰动作用下极易产生剪切裂隙, 石英、长石占比偏高的坚硬脆性岩体整体完整性较好, 但高应力作用下容易出现岩爆类突发性破坏, 两种岩性对应的围岩治理侧重点存在本质区别。同一巷道沿走向延伸过程中岩性频繁交替变化, 支护方案无法沿用统一参数, 频繁变更施工参数提升现场施工管控难度, 固定规格的支护材料难以兼顾软硬相间岩层的差异化变形需求, 单一化支护设计很难覆盖全巷道围岩控制需求。

2.2 井下施工与水文条件产生的附加扰动

巷道掘进爆破作业产生的冲击波会向围岩深部传递, 冲击波反复冲击使得围岩原生裂隙不断张开延展, 新生裂隙顺着应力优势方向持续发育, 岩体完整性被进一步破坏, 爆破进尺与装药药量的不合理管控会进一步放大扰动破坏范围。采掘工作面接续推进带来的采动应力传递至邻近巷道, 工作面超前支承压力和巷道周边集中应力相互叠加, 短时间内围岩受力出现剧烈波动, 已经成型的支护结构在交变荷载作用下逐步出现隐性损伤, 损伤累积到临界数值后支护结构集中破损。井下巷道围岩裂隙连通地下水储层后, 水体顺着裂隙持续浸润岩体, 黏土类矿物遇水发生吸水膨胀反应, 岩体体积膨胀产生额外挤压力, 原本稳定的围岩受力体系再次失衡, 干燥环境下成型的支护结构不能适配遇水软化后的围岩变形特性。

3 深部高应力巷道实用围岩控制技术

3.1 定向卸压围岩应力疏导技术

定向卸压技术立足疏导围岩内部积聚高应力的核心思路, 通过人为制造局部卸压空间引导集中应力向巷道深部围岩转移, 从源头降低巷道周边围岩受力数值, 施工阶段优先选取巷道两帮深部岩体布设定向卸压钻孔, 依托钻机按照预设倾角钻进形成连续空孔带, 空孔形成后周边围岩在应力作用下自发向孔洞位置发生塑性压缩变形, 集聚的应力顺着压缩变形区域逐步释放消散。钻孔布设深度结合现场实测的塑性区边界数值确定, 钻孔深度超出围岩塑性破坏区间能够保障应力充分转移, 钻孔间距根据实时应力监测数据动态调整, 间距过大会出现卸压盲区, 间距偏小则增加无效钻孔施工量, 浪费钻机工时与钻具耗材。底板底鼓病害突出的巷道调整卸压施工位置, 在底板岩层内部开设卸压沟槽, 沟槽切断底板应力传递路径, 阻断深部高应力向巷道底板持续传导, 沟槽成型后及时使用碎石松散填充, 填充物料保留压缩变形余量, 承接后续围岩微量形变。卸压施工工序安排在巷道掘进完成七十二小时内, 此时围岩初始变形刚刚启动, 岩体内部应力尚未完全固结锁定, 卸压作业可以收获最优应力疏导效果, 施工结束后持续跟踪三十天应力监测数据, 依据应力变化微调后续钻孔布设参数。

3.2 深浅孔分层注浆加固技术

分层注浆依靠浆液凝固后固结碎裂围岩的作用, 把零散破碎岩块粘结为整体承载结构, 提升围岩自身完整性与自承载能

力, 注浆施工划分为浅层封孔注浆与深部固结注浆两个施工层级, 浅层注浆选用流动性偏弱的水泥基浆液, 浆液注入巷道表层破碎裂隙, 封堵表层岩体渗水通道, 隔绝井下空气与地下水持续侵蚀内部岩体。深部注浆调配水灰比更低的浓浆, 借助高压注浆泵把浆液推送至围岩深部发育裂隙, 浆液顺着裂隙缝隙逐步渗透填充, 凝固之后形成连续浆脉骨架, 依托浆脉把深部碎裂岩体牢牢粘结在一起, 围岩整体力学指标得到稳步提升。注浆孔按照梅花形错落排布在巷道两帮与顶板位置, 浅层注浆孔布设深度控制在两米以内, 深部注浆孔钻进深度延伸至塑性区外缘位置, 注浆压力跟随注浆进程缓慢抬升, 压力骤升代表对应区域裂隙基本被浆液填满, 随即关停注浆管路切换至下一注浆孔作业。注浆施工避开井下采掘爆破时段, 爆破震动会扰动未凝固浆液, 破坏浆体成型结构, 注浆结束后留存监测点位, 定时检测围岩收敛变形数据, 依据变形变化补充局部补强注浆工序。

3.3 锚注一体化分级支护技术

锚注一体化技术整合锚杆锚固与注浆加固两项施工内容, 锚杆杆体预留中空注浆通道, 锚杆完成打孔安设之后直接依托杆体空腔向内灌注加固浆液, 省去二次单独打孔注浆的施工步骤, 压缩现场施工周期。分级支护按照围岩变形发展阶段划分支护层级, 巷道掘进初期围岩变形速率较快, 布设短规格中空注浆锚杆完成初级支护, 快速封闭表层围岩裂隙, 约束初期围岩剧烈形变, 待围岩变形速率回落至平稳区间, 补打长锚索延伸锚固深度, 锚索锚入深部完整基岩之中, 依托深部稳定岩体为浅层支护体系提供可靠着力点。金属网平铺贴合巷道围岩表面, 网片搭接位置使用卡扣紧固, 避免围岩碎块从网片缝隙掉落, 表层喷射改性混凝土, 混凝土内掺入防渗外加剂, 强化喷层防水抗裂性能。不同应力等级区段调整锚杆、锚索排布密度, 应力超高区域加密支护构件布设, 低应力完整岩段适度放宽间距, 兼顾支护可靠性与施工经济性, 支护成型后持续开展围岩位移监测, 监测数值超出预警阈值立刻开展局部补强支护。

4 技术优化与现场施工管控措施

4.1 支护技术参数动态优化方法

井下巷道围岩受力状态伴随采掘推进持续变化, 固定不变的支护参数无法适配全周期围岩变形, 依托井下布设的位移传感器、应力监测元件采集实时数据, 整理汇总每日监测得到的围岩收敛、应力变化数据, 从中梳理参数和围岩变形之间的联动关系。监测数据反映围岩变形持续走高时, 针对性加深注浆钻孔深度或是提升注浆浆液配比浓度, 变形长期处于可控范围的区段, 在下一循环掘进施工中适度优化支护构件间距, 削减不必要材料投入。同一矿井不同采区地质条件存在明显差异, 把优化后的参数整理归档, 结合各个采区实测地质资料分类存档, 后续新巷道开拓前期调取同类地质存档参数, 在此基础上

结合现场试掘监测数据小幅微调，缩短新工艺落地磨合周期。

4.2 现场施工质量全过程管控要点

施工前期组织作业班组熟悉现场地质勘查资料与支护施工图纸，明确不同工序对应的施工标准，钻机、注浆泵等施工机具提前进场检修保养，更换老化密封配件，规避施工中途设备故障停工问题。钻孔施工环节把控钻进倾角与深度，出现塌孔现象立刻注入稀浆固壁，待孔壁稳固后继续钻进作业，锚杆锚固注浆阶段严控注浆压力与注浆用量，杜绝少浆、漏浆带来的锚固失效问题。现场管理人员分段跟进各道工序落地情况，发现违规简化施工工序的作业行为及时叫停整改，支护施工全部完工之后分段验收施工质量，验收不合格的区段限期返工处理，从施工源头减少后期巷道病害出现概率。

5 结论

深部矿井高应力带来的围岩持续流变、底鼓、片帮等问题

受地应力、岩体物性、采掘扰动多重因素共同影响，浅部沿用的单一锚网喷支护模式很难适配深部复杂受力环境，各类病害反复出现持续干扰井下正常生产秩序。定向卸压、分层注浆、锚注一体化分级支护三类技术分别从应力疏导、岩体加固、复合支护三个方向改善围岩受力条件，定向卸压转移巷道周边集中应力，注浆加固提升围岩自身承载性能，锚注一体化分级支护实现分阶段约束围岩形变，三类技术搭配使用能够形成完整的围岩控制体系，大幅缩减巷道后期返修工程量。结合现场实时监测数据动态优化支护参数，搭配全流程施工质量管理可以进一步放大各项控制技术的落地成效，后续深部矿井巷道施工可以立足现场实测地质数据，灵活搭配三类核心控制技术，根据巷道实际变形表现调整各技术施工配比，持续优化深部高应力巷道围岩治理效果，在保障巷道服役稳定性的前提下合理控制井下支护建设成本。

参考文献：

- [1] 王涛,闫森,李学龙,等.深井高应力托顶煤巷道支护技术研究与应用[J].煤炭技术,2026,45(2):85-93.
- [2] 康红普,姜鹏飞,杨建威,等.煤矿深部巷道围岩协同控制理论与成套技术[J].煤炭学报,2026,51(1):60-92.
- [3] 李生亚,严红,裴晖,等.深部向斜构造区煤泥岩巷道围岩变形特征与控制技术[J].煤炭工程,2024,56(7):67-72.
- [4] 韦友玉.深部高应力巷道围岩卸荷扰动破坏的演化规律[D].湘潭大学,2024.
- [5] 齐继飞.基于 BIM 的深部矿井巷道围岩稳定性控制管理方案[D].辽宁工程技术大学,2024.D