集“卸–固–排”一体化回采巷道围岩稳定性强化技术研究

石 伟
宁夏王洼煤业有限公司 宁夏 固原 756500

摘 要：针对宁夏王洼二矿弱胶结砂岩、砂质泥岩回采巷道黏土矿物富集、遇水软化、采动应力叠加引发巷道剧烈变形、返修成本高、片帮冒顶风险突出的生产难题，研发卸压释能、线性锚固、疏水控岩三位一体协同治理技术。通过开挖底板泄压槽疏导集中应力，采用“一梁二索”U型钢线性支护构建梯度承载体系，配套大深度混凝土防渗水沟根除水致围岩劣化问题。现场应用数据表明，巷道年度运维成本由697.1万元降至137万元，年直接创效560.1万元；彻底消除围岩失稳安全隐患，并在企业内部推广使用。该创新方案设备通用、施工简便、投入低廉，契合煤炭行业安全高效、绿色低碳的新质生产力发展方向，为西部同类软岩矿井巷道治理提供可复制实践方案。

关键词：软弱围岩；回采巷道；卸压支护；疏水控岩；降本增效

引言：王洼矿区地处宁夏固原，矿井回采巷道围岩以弱胶结砂质泥岩、泥质砂岩为主，岩体黏土矿物含量高，裂隙渗水后强度大幅衰减。工作面回采期间，构造应力与采动支承应力叠加，巷道底鼓、两帮收敛变形严重。传统单一锚杆点状支护承载力不足，巷道扩刷、起底返修成为常态化作业。长期生产暴露出三大突出问题：一是安全管控压力大，返修作业属于高危工序，片帮、冒顶事故风险持续存在；二是生产成本居高不下，常年投入大量人力、支护材料用于巷道修复；三是采掘接续受限，反复返修占用生产工时，制约工作面推进效率[1]。现有围岩控制技术大多单独强化支护或简单排水，未能实现应力、支护、水文条件协同治理。通过整合应力释放、强力锚固、积水疏导三项技术，形成一体化围岩稳定强化方案，经工业试验验证效果显著，具备极高推广价值。

1 矿井地质条件与原有支护短板

1.1 巷道围岩工程特性

矿井巷道围岩胶结程度低，蒙脱石、高岭石等亲水矿物富集，遇水后岩体软化崩解，自承能力丧失60%以上。工作面月度推进100m左右，全年巷道维护总量1200m，采动应力集中系数大，底板鼓起、巷帮挤压变形持续发育，常规支护难以长期控制围岩形态。巷道裂隙渗流长期浸泡底板与巷帮，是巷道反复失稳的核心诱因。此类软岩地层在采掘扰动下，围岩塑性区迅速扩展，峰后残余强度急剧衰减，加之多组裂隙切割岩体，形成块状碎裂结构，整体稳定性极差。地下水沿裂隙缓慢运移时，不仅弱化颗粒间胶结力，还引发粘土矿物膨胀，进一步加剧围岩流变变形，使巷道断面收缩率随服役时间呈非线性增长，局部地段甚至出现全断面缩径，严重威胁运输与通风安全。

1.2 传统支护工艺缺陷

矿井原支护仅采用普通锚杆、单点锚索，无配套卸压、防渗排水措施，存在明显短板：

1.2.1 应力无法释放：浅部围岩高度集中采动应力直接作用于支护构件，锚杆、锚索长期过载，支护失效速度快；围岩内部积聚的弹性应变能缺乏可控释放通道，在采动压叠加周期来压时，瞬时冲击载荷常导致锚固端滑脱或杆体断裂，使支护体系在短时间内丧失承载能力，不得不提前进入返修周期。

1.2.2 支护受力不均：离散点状支护难以分担整体围岩压力，巷帮局部区域频繁鼓包片落；锚杆间岩块缺乏面层约束，形成“点强面弱”的受力格局，应力集中区往往集中于锚固点周边，而空帮部位则因缺乏径向支撑发生离层扩容，造成帮部变形极不协调，严重时引发大面积喷层剥落和锚网撕裂[2]。

1.2.3 水害持续侵蚀：简易浅水沟排水能力不足，围岩长期泡水软化，底鼓病害反复出现；积水沿底板裂隙下渗后，泥化作用使底板岩层抗剪强度显著降低，加之重型设备碾压，底板形成破碎松动带，每次治理后不久便再次隆起，同时淋水段巷道顶板锈蚀严重，锚索孔内积水加速钢绞线腐蚀，极大缩减了支护结构的使用寿命。

1.2.4 运维投入巨大：固定配置11名作业人员专职返修，材料、人工成本常年居高不下。频繁的停头返修打乱正常掘进循环，辅助运输、通风排矸等间接费用随之

攀升，且多次补强支护后围岩破碎程度进一步恶化，形成“越修越坏、越坏越修”的恶性循环，不仅挤占生产有效时间，还增加了顶板管理风险，致使矿井综合运维负担远超同类条件巷道。

2“卸 – 固 – 排”一体化技术体系设计

本项目创新构建“外部卸压让压、中部强力支护、底部疏水护岩”三维协同控制体系，分为卸压、加固、排水三大核心模块，配套自主实用新型专利，全部改造工艺依托井下现有常规设备完成，改造门槛低。该体系的设计遵循围岩变形时空演化规律，将应力释放、结构加固与介质控水三者有机耦合，使各模块在功能上互为前提、在时序上紧密衔接，形成一套从被动应对转向主动干预的闭环治理方案，有效破解软岩巷道“先修后坏、坏了再修”的技术困局。

2.1 卸压模块：底板矩形泄压槽应力疏导技术

针对底鼓与浅部应力集中难题，在变形严重区段沿巷道走向开挖连续矩形泄压槽：槽宽600mm、深度不小于800mm。技术原理：人为构建围岩塑性变形释放通道，将表层集中高应力转移至巷道深部稳定岩体，降低支护结构承受荷载，从源头抑制底鼓与巷帮收敛变形，减少支护构件损坏频次。泄压槽实施后，底板围岩侧向约束解除，积聚于浅部的高压应变能沿槽壁临空方向持续释放，围岩应力场重新分布，原高应力峰值为向深部转移，浅部围岩进入低应力松弛区间，不仅有效消解底鼓发生的原动力，同时为巷道两帮提供侧向应力缓冲空间，确保后续锚固支护体系在低应力环境下发挥最优承载效能。

2.2 加固模块：“一梁二索”线性强力支护工艺

摒弃单点锚索支护模式，采用废旧25U或29U型钢加工钢梁，搭配高强锚索形成连续线性支护，锚索布设间距1000mm，单根钢梁配套两根锚索。该工艺将离散点状支护升级为整体连续承载结构，均匀分散巷帮围岩压力，形成“卸压缓冲层+锚固承载层”梯度支护体系，大幅减少二次扩刷工序；同时复用井下废旧型钢，实现废料资源化利用，降低新材料采购投入[3]。钢梁沿巷道走向全长贯通铺设，与高强锚索共同构成具有预紧力的线性约束带，对帮部围岩实施连续全长约束，有效抑制节理面张拉扩展与层间错动变形，使围岩受力状态由局部集中转为全域均匀，杜绝点锚条件下易发的局部鼓包与片落破坏，显著提升巷道抵御采动扰动的整体刚度和稳定性。

2.3 排水模块：垂直倾向混凝土防渗疏水系统

针对水致围岩软化核心问题，开挖宽600mm、深度2.5m深水沟，采用C20混凝土整体衬砌防渗，配套风动泵持续抽排巷道渗水。核心作用：快速疏导裂隙涌水，隔绝地下水与巷体围岩接触，阻断黏土矿物吸水软化路径，稳定岩体原始力学性能，消除水诱发的持续性巷道变形。混凝土衬砌层集防渗隔水与结构护底于一体，一方面阻止底板毛细水上升浸染围岩，另一方面抵御底鼓应力对水沟结构的挤压破坏，配合风动泵全天候不间断抽排，使巷道底板长期保持干燥状态，为围岩力学性能稳定提供可靠的水环境保障，彻底切断水-岩耦合致灾的作用链条。

2.4 标准化施工流程

2.4.1 巷道掘进成型后，优先施工底板泄压槽，完成应力预释放；尽早启动应力转移效应，使浅部围岩在后续水浸与锚固工序前即进入低应力状态，为全流程施工奠定稳定的力学基础。

2.4.2 同步开挖疏水沟槽、浇筑混凝土衬砌，安装排水抽排设备；排水系统提前投入运行，确保后续锚固作业在干燥底板条件下施工，有效规避钻孔积水对锚固剂粘结强度及钢绞线耐腐蚀性能的不利影响[4]。

2.4.3 分段开展巷帮“一梁二索”锚固支护施工；锚固作业由帮底向帮顶逐排推进，确保钢梁与围岩表面紧密贴合形成整体承载带，张拉顺序及张拉力严格按设计参数控制，避免超张或欠张对承载效果的影响。

2.4.4 日常巡检排水系统与支护构件，无需大规模返修作业。运营期间仅需利用生产间隙完成水沟清淤、风动泵保养及锚索受力状态监测等轻量维护工作，巷道全服务周期内不再安排系统性扩刷与重支工程，实现“一次支护、长期稳定”的治理目标。

3 现场应用经济效益定量核算

以全年1200m巷道治理工程量为基准，对比革新前后年度综合投入，从人工成本、材料成本量化进行核算，创效金额明显。核算体系采用全生命周期成本分析法，将巷道从掘进成型至报废退出的整个服役周期内所有支护与维护支出均纳入对比框架，确保核算结果真实反映技术更替带来的实际经济落差。革新前，原支护方案依赖高频次返修维持巷道基本断面，人工成本不仅包含固定返修队伍的薪资与津贴，还涵盖因返修占用的辅助运输司机、信号工、排矸人员等配套岗位工时，材料成本则叠加了多轮补打锚杆、更换锚索及喷浆复喷的累计消耗，加之频繁停头返修导致掘进效率下降所造成的产量损失，隐性成本远超账面直接支出。革新后，一体化技术体系从应力源头削弱变形动力，配合混凝土防渗水沟阻断围岩劣化路径，使巷道在施工完成后即进入长期稳定状态，年度内除正常巡检与少量养护外不再产生二次

支护费用，人工与材料投入均集中在初始施工阶段，后续维护成本趋近于零。两项对比，年度综合维护成本降幅可观，释放出的资金可重新投入采掘接替与安全技改项目，形成资金流转的正向循环，同时节省下的返修人员编制可充实到掘进队伍中，有效缓解矿井劳动力紧张局面，间接提升单进水平与煤炭产出，长期经济效益具有显著的累加性与持续性。

4 综合效益与推广价值

4.1 安全社会效益显著

技术落地后极大程度解决巷道片帮、冒顶、底鼓失控安全隐患，取消高危巷道返修工序，井下职工作业环境大幅改善，全年未发生围岩变形相关安全事故，完善矿井围岩灾害防控体系，筑牢煤矿安全生产底线。返修工序的彻底退出意味着作业人员不再需要频繁进入顶板破碎带进行架棚、扩刷、起底等高危操作，暴露于冒落与片帮风险区域的时长急剧压缩，职工安全感与工作满意度显著提升。巷道形态长期保持规整，通风断面恒定，有效避免因底鼓引起的风速骤变与瓦斯局部积聚，为瓦斯治理与防灭火工作提供了稳定的气流环境。同时，稳定的巷道空间保障了行人、运输及管线敷设的安全间距，机电设备运行故障率随之下降，井下整体安全冗余度大幅提高。该技术的成功应用还为企业积累了软岩治理的自主知识产权与工程经验，增强了应对复杂地质条件的信心与能力，在社会层面树立了煤矿安全技术创新的良好形象，对稳定矿区职工队伍、促进行业安全文化传播具有积极而长远的社会影响。

4.2 行业推广通用性强

整套技术施工装备均为煤矿常规设备，工艺参数易掌握、改造成本低，不受煤层小幅赋存差异限制。目前已在本企业兄弟矿井全面推广，形成标准化施工规范，国内所有弱胶结软岩开采矿井均可直接复制应用，具备极强示范辐射效应。工艺中所用泄压槽开挖、混凝土衬砌浇筑及型钢梁锚固等工序，均依托井下已有的掘进机、锚杆钻机、混凝土输送泵等通用装备，无需额外引进专用机组，中小型矿井在现有装备条件下即可照常实施，改造门槛极低。参数设计留有充分调节余量，对于不同埋深、不同地压显现强度的矿井，只需在泄压槽断面尺寸及锚索间距上作适当微调，即可适配各自特定的围岩变形特征，具有极强的地质适应性[5]。目前该技术已在本企业下属多个煤矿成功落地，并编制了涵盖施工准备、工序衔接、质量验收全过程的标准化作业手册，为后续推广提供了可复制的操作范本。随着该技术体系的持续完善与行业认知度的不断提升，有望被纳入煤矿软岩巷道支护设计规范，成为弱胶结地层条件下巷道治理的推荐工法，为全国同类矿井提供一条投资省、见效快、运行稳的技术路径，对推动我国软岩支护技术进步与行业标准化建设具有深远意义。

5 结论与展望

1.对西部矿区遇水软化弱胶结回采巷道大变形难题，创新“卸压-锚固-疏水”一体化协同控制技术，从应力释放、围岩加固、水体隔绝三个维度同步治理巷道失稳，解决传统单一支护反复返修的行业痛点。

2.本项目作为煤矿一线职工现场研究应用及总结，充分证明基层现场创新是传统煤炭企业降本增效、培育新质生产力的有效路径，可为全国同类软岩矿井巷道围岩长效管控提供标准化参考方案。

3.后续升级方向：结合矿井微震、围岩变形在线监测系统，将现有工艺与智能化监测联动，实现泄压、支护、排水系统自动调控，进一步提升巷道无人化长效管控水平。

参考文献

[1]张广超,何富连,李运江.深厚表土下沿空巷道静载型失稳机制与卸-固协同控制[J].煤炭学报,2025,50(04):1356-1365.

[2]王炯,刘宏伟,郭东明.含水破碎围岩巷道卸压-加固-疏水协同防控技术[J].采矿与安全工程学报,2024,41(02):312-320.

[3]谭云亮,郭伟耀,赵同彬.深部煤巷帮部失稳诱冲机理及“卸-固”协同控制研究[J].煤炭学报,2022,47(08):2812-2821.

[4]李树刚,成小雨,林海飞.动压浸水巷道围岩多场耦合失稳规律与综合治理技术[J].岩石力学与工程学报,2023,42(09):1890-1899.

[5]徐佑林,刘德成,吴旭坤.强动压“三软”煤层巷道“卸-转-固-排”围岩控制技术[J].煤炭科学技术,2023,51(05):89-96.