采区末区段巷旁支护参数优化与沿空护巷技术实践

谈德祥

四川川煤华荣能源有限责任公司金刚煤矿 四川 达州 635000

【摘　要】：在深部开采条件下，采区最末区段工作面没有边界通风巷，传统的砌块墙体、工字钢巷旁支护受到高采动压力的影响，容易出现墙体爆裂、构件弯曲，巷道下沉底鼓严重，劳动强度大，护巷综合成本偏高。选取金刚煤矿-3116 中厚煤层工作面机巷作为工程实例，对原有护巷技术存在的问题进行分析，确定钢管混凝土柱巷旁支护参数，配合超前深孔预裂爆破切顶卸压、巷道超前补强支护、阻燃珍珠岩逐级封闭通风治理技术。通过现场实践可知，优化后的支护体系围岩变形可控，没有出现支护构件破坏失效的现象，简化了现场施工，降低了作业劳动强度，解决了末区段无边界通风巷漏风瓦斯治理难题，取得了良好的安全、经济和社会效益，可以为同类矿井末区段沿空护巷提供参考。

【关键词】：采区末区段；沿空护巷；钢管混凝土柱；切顶卸压；逐级封闭

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.008

引言

沿空留巷是无煤柱开采技术的核心，可以减少巷道掘进工程量，提高煤炭资源回收率，缓解采掘接替紧张，降低冲击地压、瓦斯突出灾害风险，在国内各个煤矿得到了广泛的推广应用。常规沿空护巷一般用于中部区段工作面，具有边界通风巷道的条件。由于采区最末区段工作面受到边界条件的限制，没有专门的边界通风巷，护巷既要考虑围岩控制，又要考虑采空区通风漏风治理，技术要求较高。随着矿井开采向深部发展，矿山压力不断增大，传统的砌块墙体、工字钢巷旁支护方案存在支护强度不够、变形破坏严重、搬运作业劳动强度大等问题，不能满足深部末区段工作面护巷的要求。根据金刚煤矿-3116 工作面现场情况，对巷旁支护参数进行优化研究，形成超前补强支护、深孔预裂切顶卸压、钢管混凝土柱巷旁支护、逐级封闭通风的沿空护巷工艺，进行工业实践。

1 工作面工程概况

试验地点为金刚煤矿-3116 工作面，是-311 采区最末区段，工作面走向长度 980m，倾斜平均长度 227m，煤层倾角 21°～26°，平均 23°，属中厚煤层合层开采，平均采高 1.94m。直接顶为泥岩，普氏硬度系数为 3-4，老顶为细粒砂岩，普氏硬度系数为 6-8，顶底板属于中等坚硬条件。工作面采用综合机械化走向长壁后退式开采，全部垮落法处理采空区。

机巷为试验留巷巷道，巷道分两段，南段三心拱断面净断面 10.06m²，北段异形断面净断面 10.26m²。本工作面为采区最末区段，无边界通风巷，护巷后期通风控制条件差。矿井原采煤工作面护巷先后采用砌块墙体、工字钢加砌块墙体两种巷旁支护方式，在深部高应力条件下，护巷出现较多问题，主要问题汇总见表 1。

表 1 原有护巷方案主要问题汇总

项目	砌块墙体支护	工字钢+砌块墙体支护
主要构件参数	墙高 2.0～2.5 m，墙厚 0.5 m	墙高 2.0～2.5 m，墙厚 0.25 m
矿压显现破坏情况	来压后墙体爆裂，破碎失效	工字钢弯曲变形，砌块垮塌
巷道变形特征	顶板下沉量大，底鼓突出，后期维修量大	顶板下沉量大，底鼓突出，后期维修量大
施工特点	砌块搬运，劳动强度大，用工多	砌块搬运，劳动强度大，用工多
通风条件	无边界尾巷，采空区漏风难以管控	无边界尾巷，采空区漏风难以管控
综合成本	成本较高，每米投入大	成本较高，每米投入大

2 围岩控制机理与支护参数优化

2.1 沿空护巷围岩运动分析

工作面回采结束之后，采空区顶板会依次经过前期垮落活动、过渡期破断旋转和后期缓慢沉降这三个过程。前期垮落阶段巷旁支护主要承受直接顶及其悬臂岩层的重量；过渡期基本顶发生破断回转下沉，支护体要具有较高的支护阻力和一定的可缩让压性能；后期上覆岩层趋于稳定，支护要保持岩体结构平衡。深部采区末区段受到侧向支承压力的叠加，巷道承受动压的作用更加明显，单纯的被动砌块墙体不能抵抗动压载荷，必须采用主动卸压加高刚度巷旁支护的协同控制思路。采用深孔预裂爆破切顶卸压技术，在巷旁将顶板岩层定向切断，改变上覆岩层传递路径，把长悬臂岩梁变成短悬臂结构，减小巷旁支护所受的载荷。巷内采用锚网索做基础支护，巷旁用钢管混凝土柱做高早期支护阻力，适应顶板前期、过渡期剧烈矿压显现，配套挡矸防护结构阻挡采空区矸石涌入巷道。末区段无边界通风巷，采取分段逐级密闭的方法控制采空区漏风，消除瓦斯积聚隐患。

2.2 超前补强支护参数优化

利用原有巷道掘进支护的基础上，在工作面超前范围内做顶板补强加固。顶板用锚索和 T 型钢梁组合补强支护，T 型钢梁长3400mm；锚索为Φ17.8mm，长5250mm，锚索排距800mm，间距 1600mm，每排 3 根锚索，T 型钢梁沿巷道顶板倾斜方向布置，钢梁下端头抵到巷道低帮，不留间隙，提高巷道顶板整体完整性，降低回采动压引起的顶板离层风险。

2.3 深孔预裂爆破切顶卸压参数优化

炮孔布置在巷道高帮下方 0.2m 处，单排布置，炮孔沿工作面走向成一直线，孔距 0.6m；炮孔与铅垂线夹角 5°～15°，炮孔深度 13m；每孔装药长度不小于 6.0m，配用聚能管，用水炮泥封孔，剩余孔段全部用炮泥封实；预裂爆破施工位置超前工作面距离控制在 40m 之内。深部末区段工作面围岩应力叠加效应明显，常规支护不能消除顶板集中应力，深孔预裂爆破切顶卸压是主动控压的主要技术，能准确切断巷道上方顶板岩层应力传递通道，改变上覆岩层力学结构，把超长悬臂顶板变成可控短悬臂结构，释放围岩集中应力。定向爆破只切断预定顶板岩层，不破坏巷道原有的支护系统和围岩的完整性，比传统全面爆破卸压更安全、更有针对性。采用超前预裂卸压可以大大减小工作面回采动压对沿空留巷巷道的扰动，从源头上减少顶板下沉、巷道底鼓、支护构件受压变形等现象，给钢管混凝土柱巷旁支护创造稳定的围岩环境，完美适应本矿井大倾角中厚煤层深部开采的复杂矿压条件。定向预裂，切断巷旁顶板，达到切顶卸压的目的，减小巷旁支护和巷道本体受到的矿压。

2.4 钢管混凝土柱巷旁支护参数优化

采用 8 寸钢管制作支护柱，钢管底部焊 10mm 厚、边长 400mm 的方形钢板底座，钢管内灌 C50 混凝土，钢管顶部焊 10mm 厚顶板钢板。巷旁钢管混凝土柱紧靠巷道高帮布置，柱中心间距 1000mm，支护布置保证留巷有效宽度不小于 3.4m，支护柱距离工作面支架最大距离控制在 2.4m 以内；柱顶用半圆木、木楔背实接顶。为了防止支护柱倾倒，在柱中部巷道侧沿走向铺设 18 kg/m 废旧钢轨，钢轨外侧架设单体液压支柱做侧向约束，钢轨单根长度不小于 3.0 m。采空区侧设置挡矸防护体系，用 8mm 钢筋加工的经纬挡矸网沿高度上中下三处铺 18kg/m 钢轨做挡矸钢梁，用 8 号铁丝把钢筋网和钢轨捆扎固定在钢管混凝土柱上；采空区侧悬挂阻燃挡风皮带，防止漏风和矸石。工作面超前煤壁 10m 处打设折叠式 L 型钢筋网，网片两端长度分别为 1000mm、800mm，用长度为 1.8m 的锚杆固定在顶板上，随着工作面的推进将网片展开，覆盖巷道和采空区交界处的顶板，防止肩角位置顶板破碎冒落。工作面端头配套走向、倾向密集单体液压支柱，单体初撑力不小于 90kN，全部配备防倒保护。

2.5 逐级封闭通风封堵参数

由于-3116 为采区末区段无边界通风尾巷，工作面回采后采空区全部处于巷道单侧敞口状态，极易造成漏风紊乱、瓦斯局部积聚、有害气体滞留等通风控制问题，常规密闭方式不能满足末区段沿空护巷的通风控制要求。因此本次研究用阻燃珍珠岩袋进行逐级封闭密闭施工，形成分段式密闭通风控制体系。距离工作面切顶线不大于 5m 处设置临时隔离墙，迅速封堵采空区敞口，阻止工作面回采期间瞬时漏风和瓦斯涌出通道，保证回采作业安全。沿巷道走向每隔不小于 75m 就设一道珍珠岩永久密闭墙，分级控制尾巷敞口段长度，逐步封堵采空区空间，减少采空区漏风风量，抑制瓦斯异常涌出和扩散。所选珍珠岩密闭材料具有阻燃、轻质、密封性好、施工方便、抗压强度高等优点，适合井下潮湿、动压扰动的环境，不容易开裂漏风。建立常态化的通风巡检制度，瓦斯检查人员每天对密闭墙体的完整性、巷道气体浓度进行全覆盖的检查，发现异常立即停止工作处理，从各方面构筑末区段沿空护巷通风安全屏障。

3 现场工业实践

3.1 工业试验概况

-3116 工作面机巷于 2024 年 10 月开始进行优化护巷工艺工业试验，至 2025 年 11 月工作面累计推进 800m 左右，全部完成了成套护巷技术现场应用及试验验证。为了准确掌握留巷围岩变形规律和支护体系运行状态，本次试验按照均匀布点、全面监测的原则，在留巷全程布置多组监测测站，分别对巷道上帮、中部、下帮关键部位进行顶底板移近量动态监测，充分考虑大倾角煤层巷道围岩变形不均匀的特点，保证监测数据的真实性、有效性。

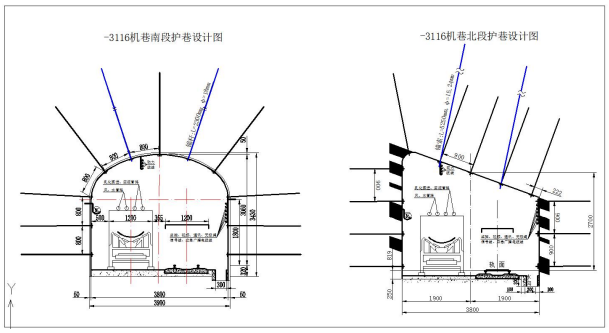

图 2 -3116 机巷断面图

3.2 现场应用效果分析

现场长期监测结果表明，优化后的成套护巷技术适应深部高应力采区末区段工作面复杂的地质条件。核心支护构件钢管混凝土柱处于稳定的状态，没有出现弯曲、断裂、变形等失效现象，巷道整体的完整性、稳定性较好。相比于原工字钢加砌块组合护巷工艺，巷道顶板下沉、底板鼓起的问题得到了根本性的解决，巷道围岩变形量大大减小，后期巷道卧底、修护等

维护工作量也大大减少。

同时新工艺也对现场施工模式进行了大幅的优化，抛弃了传统的砌块人工转运、分层码砌的高强度作业方式，钢管混凝土柱在地面进行标准化预制加工，在井下只需要准确就位架设、固定防护，施工工序简单，作业流程高效，大大降低了井下作业人员的劳动强度，提高了沿空护巷施工效率和作业安全性。

3.3 新旧护巷方案综合对比

使用优化过的成套护巷技术，钢管混凝土柱没有发生弯曲、断裂破坏的情况，巷道整体完整性较好。与原工字钢加砌块护巷相比，巷道顶板下沉、底鼓得到明显的抑制，巷道后期维修工作量大大减少。传统的护巷方式要对大量的砌块进行人工搬运码放，工人的劳动强度大，新方案的钢管混凝土柱在地面预制加工完成，井下只需要就位架设，大大减少了井下搬运作业量。

表 2 新旧护巷方案效果对比

对比项目	原工字钢+砌块护巷	优化后钢管混凝土柱护巷
巷旁构件破坏情况	工字钢弯曲、砌块爆裂频发	钢管混凝土柱无弯曲断裂
巷道变形	下沉、底鼓严重，卧底维修量大	围岩变形可控，维修量显著减少
施工劳动强度	砌块转运码砌，劳动强度大	预制构件井下架设，劳动强度低
通风治理	无尾巷，漏风管控难度大	珍珠岩逐级密闭，漏风得到控制
每米直接成本/元	4617 元	3886 元

4 经济效益与社会效益分析

4.1 经济效益

钢管混凝土柱加逐级封闭护巷比原工字钢砌块护巷每米节约成本 731 元，- 3116 机巷合计护巷长度可以节约直接投入 183.6 万元。但是传统的护巷方式巷道底鼓严重，需要大量的卧底维修，原来的-3116 风巷维修费用为 325.4 万元，改进后的护巷方式只需要 92.2 万元，节省了 233.2 万元。两项合计节约资金 416.8 万元，经济效益明显。

4.2 社会效益

实现无煤柱开采，取消区段保护煤柱，提高煤炭资源回收率，减小巷道掘进工程量，改善采掘接替紧张状况。防止跳采造成孤岛工作面问题，减少孤岛工作面高应力、冲击地压、瓦斯突出灾害风险。解决了采区最末区段无边界通风巷沿空护巷的技术难题，提出了主动卸压和高强巷旁支护相结合的围岩控制方式，为矿井深部水平中厚煤层此类条件下沿空护巷的施工打下了基础，具备了向外推广使用的基本条件。

5 结论

根据采区最末区段无边界通风巷的特殊性，提出超前锚索补强、深孔预裂切顶卸压、钢管混凝土柱巷旁支护、阻燃珍珠岩逐级封闭成套沿空护巷技术，实现围岩控制和采空区漏风瓦斯治理协同处理。8 寸钢管内浇筑 C50 混凝土制作巷旁支护柱，柱间距 1000mm，配套钢轨-单体抗倾倒结构、钢筋网挡矸体系，地面预制构件，减少井下现场浇筑砌筑作业，降低工人劳动强度，支护整体刚度高，适应深部工作面剧烈采动压力。深孔预裂切顶炮孔深度为 13m，孔距 0.6m，超前工作面 40m 施工，可以切断巷旁顶板，减小巷旁支护承受的矿山压力。用珍珠岩逐级密闭，密闭间隔不大于 75m，解决末区段无尾巷通风控制问题。金刚煤矿-3116 工作面现场实践表明，优化护巷方案支护构件无失效破坏，巷道变形得到控制，直接成本和后期维修成本大大降低，安全、经济性明显，对同类型采区末区段沿空护巷有借鉴意义。

参考文献：

[1] 王兵建,吴迪,郭佳鑫,等.小煤柱沿空巷道密集钻孔切顶护巷技术研究与应用[J].中国矿业,2026,35(S1):284-289.

[2] 武祥,鲁爱朋,贺丽峰,等.沿空留巷工作面末采通道水力切顶护巷设计研究[J].建井技术,2026,47(2):61-67.

[3] 田海波.综放工作面沿空巷道护巷煤柱宽度及支护技术研究[J].西部探矿工程,2026,38(3):156-158+161.

[4] 黄玉鹏.煤层大巷煤柱护巷技术[J].山西焦煤科技,2026,50(2):41-45.

[5] 陈晓祥,王冬冬.厚硬顶板巷道切顶卸压机理及小煤柱护巷围岩控制技术研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2026,45(2):97-106.