

川东矿区复杂煤层沿空护巷密封堵漏与围岩协同控制技术研究

李 浩

四川川煤华荣能源有限责任公司金刚煤矿 四川 达州 635756

【摘要】：针对川煤华荣公司斌郎煤矿、金刚煤矿等矿井复杂近水平煤层开采中沿空护巷面临的顶板应力集中、围岩变形控制难、资源回收率低及安全隐患突出等共性问题，依托斌郎煤矿“矿工钢巷道沿空支护技术及切顶卸压沿空护巷的研究与运用”项目，结合金刚煤矿地质赋存特征，研发适配川东矿区近水平煤层的“超前切顶卸压+矿用工字钢巷旁支护+巷内锚网索主动锚固”三位一体沿空护巷技术体系。通过系统优化切顶爆破参数、支护结构设计及施工工艺，在斌郎煤矿 N-1213 机巷、金刚煤矿 3115 运输巷开展工程实践，验证了该技术在控制巷道变形、降低护巷成本、提升资源回收率及安全生产水平方面的显著成效。研究成果为川煤华荣能源所属同类矿井及川东矿区近水平煤层沿空护巷提供了可复制、可推广的技术方案，对推动矿区煤炭资源高效安全开采具有重要意义。

【关键词】：川煤华荣能源；近水平煤层；沿空护巷；切顶卸压；矿用工字钢；围岩控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.008

1 引言

川煤华荣能源旗下斌郎煤矿、金刚煤矿等矿井均位于川东矿区，区内煤炭资源以近水平煤层（倾角 $<15^\circ$ ）为主，是公司煤炭生产的核心赋存煤层。沿空护巷技术作为实现无煤柱开采、提高资源回收率的关键手段，是该类矿井高效开采的核心环节。斌郎煤矿东翼、金刚煤矿北翼近水平煤层开采过程中，因煤层埋深大、顶板岩层胶结性差、水平应力突出，采空区顶板易形成大面积“悬臂梁”结构，导致巷道顶板下沉、两帮鼓出、底鼓等围岩变形问题频发；传统留煤柱、柔膜注浆等护巷工艺不仅造成大量煤炭资源浪费，还存在支护成本高、长期稳定性差、采空区漏风引发瓦斯与自然隐患等问题，严重制约矿井安全生产与经济效益提升。

为破解川东矿区复杂煤层沿空护巷技术难题，以斌郎煤矿为试验基地，联合矿区技术团队开展专项研究，创新研发“超前切顶卸压+矿用工字钢巷旁支护”技术体系，并结合金刚煤矿地质条件进行参数优化与工艺适配。本文依托斌郎煤矿、金刚煤矿的工程实践，系统分析川东矿区近水平煤层沿空护巷技术难点，详细阐述技术体系的原理、关键工艺及优化措施，通过现场监测数据验证技术应用效果，为矿区所属矿井及川东同类地质条件矿井提供技术参考。

2 川煤华荣能源近水平煤层沿空护巷技术难点

斌郎煤矿、金刚煤矿等矿井近水平煤层地质赋存具有埋深大、水平应力突出、顶板岩层稳定性差、采空区漏风通道发育等共性特征，结合现场开采实践，沿空护巷主要面临以下技术难点：

2.1 顶板结构稳定性差，应力集中显著

斌郎煤矿近水平煤层埋深 400~500m，金刚煤矿埋深 350~480m，煤层倾角均在 $5^\circ\sim 12^\circ$ 之间，开采后采空区顶板因倾角小、跨度大，无法实现自然垮落，易形成长距离“悬臂梁”

或“铰接岩梁”结构。该结构在自重及上覆岩层压力作用下，对巷道顶板产生持续的剪切力和弯矩，引发顶板离层、断裂甚至垮落。如斌郎煤矿 N-1213 机巷开采初期，未采取切顶卸压措施时顶板下沉速率达 50mm/d，金刚煤矿 3115 运输巷顶板局部冒顶次数年均达 3 次，严重威胁采掘作业安全。

2.2 水平应力突出，围岩变形协同控制难

川东矿区区域构造应力显著，近水平煤层水平应力分量远大于垂直应力，采动影响下巷道周边易形成“应力拱”结构，应力集中区向两帮及底板转移，导致两帮鼓出、底鼓变形。斌郎煤矿、金刚煤矿传统锚杆索单一支护体系难以有效抵抗水平应力，常出现锚杆拉断、锚索滑脱、围岩整体滑移等问题，巷道每月需修复 2~3 次，采掘衔接效率大幅降低。

2.3 传统支护工艺局限性凸显，资源与成本双重损耗

斌郎煤矿、金刚煤矿早期均采用留煤柱护巷工艺，煤柱宽度需达 8~10m 才能满足支护要求，单巷损失储量均超 3 万吨，资源回收率仅 75% 左右；柔膜注浆护巷工艺因矿区岩层裂隙发育，注浆效果差，柔膜易老化破损，长期支护效果不稳定，护巷成本达 5500~6000 元/m；钢管混凝土墩柱护巷材料成本高（单根成本约 2000 元），且矿区巷道断面相对狭小，大型安装设备难以进场，施工效率低，无法适应快速掘进需求。

2.4 采空区漏风严重，安全隐患叠加

斌郎煤矿、金刚煤矿近水平煤层巷道与采空区连通面积大，传统木垛、石墙等巷旁支护密封性差，采空区漏风率达 15%~22%，易引发采空区遗煤氧化自燃；同时，漏风通道成为瓦斯运移通道，导致巷道回风流瓦斯浓度波动大，金刚煤矿 3103 运输巷曾因采空区漏风出现瓦斯超限报警，斌郎煤矿东翼采空区多次出现气体遗出高温，通风管理与灾害防控难度大。

3 川煤华荣能源近水平煤层沿空护巷技术体系设计与工艺优化

针对斌郎煤矿、金刚煤矿等矿井的技术难点，以“切断应力传递、刚性支撑+主动锚固、多功能协同防护”为核心思路，构建“超前切顶卸压+矿用工字钢巷旁支护+巷内锚网索主动锚固”三位一体沿空护巷技术体系，并结合两矿地质条件进行差异化工艺优化，实现技术体系与矿区地质的精准适配。

3.1 技术体系总体设计

技术体系以“卸压-支撑-锚固”协同作用为核心，通过超前切顶卸压切断顶板悬臂梁应力传递路径，将上覆岩层压力向采空区转移，从源头降低巷道应力集中；利用矿用工字钢巷旁支护构建刚性支撑体，承担顶板垂直压力与水平应力，同时实现挡矸、堵漏风一体化；结合巷内锚网索主动锚固提升围岩自承能力，与巷旁支护形成协同，实现巷道全断面围岩变形控制。该体系在斌郎煤矿基础研究的基础上，针对金刚煤矿顶板岩层更破碎、漏风更严重的特征，优化了切顶爆破参数与密封堵漏工艺，提升技术适配性。

3.2 超前切顶卸压技术及矿区间差异化优化

采用聚能预裂爆破技术实现顶板定向卸压，核心通过聚能管将爆炸能量定向集中，在顶板形成规则裂缝，切断应力联系，两矿差异化参数设计如下：

定向预裂爆破原理：统一采用高强度PVC聚能管，内壁加工聚能槽，将爆炸能量利用率提升30%~50%，确保裂缝沿采空区侧定向扩展（偏差 $\leq 5^\circ$ ），避免爆破对巷道围岩的二次损伤。

斌郎煤矿爆破参数：在N-1213机巷采空区侧肩角布置单排炮孔，孔深6~8m（穿透直接顶进入老底0.5m），间距1.0m，仰角15~20°；单孔装药量1.6kg，间隔装药（药卷间距0.5m），毫秒延期雷管分段起爆（相邻炮孔延期50ms）。

金刚煤矿爆破优化：针对3115运输巷顶板砂质泥岩胶结性差的特征，将炮孔间距缩小至0.8m，孔深7~9m（穿透直接顶进入老底0.6m），单孔装药量降至1.4kg，采用微差起爆（相邻炮孔延期40ms），减少爆破振动对顶板的二次破碎，同时要求裂缝宽度 $\geq 4\text{mm}$ 、贯通率 $\geq 90\%$ ，未达标及时补孔爆破。

统一施工工艺要点：两矿均在工作面回采前40~60m实施切顶爆破，预留足够顶板垮落时间，确保垮落矸石形成有效支撑体（垮落高度达采高1.5倍以上）；采用钻孔窥视仪检测裂缝发育情况，实现爆破效果可视化管控。

3.3 矿用工字钢巷旁支护技术及密封堵漏强化

选用标准化矿用工字钢构建巷旁刚性支护体，兼顾支撑、挡矸、堵漏风功能，针对矿区漏风严重问题，强化密封堵漏工艺设计，核心参数与工艺如下：

工字钢选型与架设：两矿统一选用11#矿用工字钢（高度110mm，腿宽90mm，腰厚7mm），单重18.9kg/m，抗弯强度设计值215MPa，满足矿区支护强度要求；沿采空区侧每隔0.6m架设，采用“亲口棚”形式，底部挖设200mm深槽沟并填充C30混凝土固定，顶部采用14#槽钢做垫板，通过20mm锚杆（间排距800mm \times 800mm）与顶板锚固，形成刚性连接。

挡矸与密封堵漏设计

基础挡矸：工字钢内侧铺设10#钢筋网（网孔50mm \times 50mm），搭接长度 $\geq 200\text{mm}$ ，16mm钢筋压条（间距1.0m）固定，防止矸石涌入。

斌郎煤矿密封：喷射100mm厚C20混凝土形成密封墙，将漏风率降至5%以下。

金刚煤矿密封强化：针对漏风通道发育特征，在钢筋网与混凝土之间增设阻燃柔性密封膜（风筒布），混凝土喷射厚度增至120mm，底部浇筑350mm高、550mm宽混凝土挡矸坎，漏风率可降至4%以下。

3.4 巷内锚网索主动锚固协同支护

结合两矿围岩变形特征，优化巷内锚网索支护参数，提升围岩自承能力，与巷旁支护形成协同控形，核心设计如下：

锚杆支护：两矿统一采用22mm \times 2400mm左旋无纵肋螺纹钢锚杆，斌郎煤矿间排距700mm \times 700mm，金刚煤矿因两帮煤体更破碎，间排距缩小至600mm \times 600mm，均配合钢筋托梁和菱形金属网，及时约束围岩浅部变形。

锚索加强支护：顶板增设17.8mm \times 7300mm锚索，斌郎煤矿间排距1600mm \times 1400mm，金刚煤矿间排距1500mm \times 1300mm，锚固力均 $\geq 200\text{kN}$ ，深入顶板深部稳定岩层，将浅部围岩与深部稳定岩层连接为整体，两矿巷道围岩自承能力均提升40%以上。

施工协同要求：两矿均遵循“巷内锚固先行、巷旁支护跟进、切顶爆破收尾”的施工顺序，确保工字钢架设时巷道围岩已形成初步稳定结构，避免爆破振动对未支护围岩造成损伤。

4 斌郎煤矿、金刚煤矿工程应用与效果分析

4.1 斌郎煤矿 N-1213 机巷工程应用

该巷道为近水平煤层巷道，埋深450m、煤层厚1.8m、倾角15°，直接顶为5m砂质泥岩，老顶为8m中砂岩，矩形断面4.2m \times 3.5m。原采用8m柔膜护巷，巷道变形频发且每月需修复2次，护巷成本5000元/m，采用本技术后实现无煤柱沿空护巷。6个月监测显示，顶板最大下沉185mm、平均速率1.03mm/d，较传统工艺降低65%，两帮收敛280mm、底鼓42mm，较未支护时减少82%；护巷总成本降至3000元/m；采空区漏风率降至4.5%，瓦斯浓度稳定在0.3%以下，顶板事故率为0。

4.2 金刚煤矿 3115 运输巷工程应用

该巷道埋深 420m、煤层厚 2.8m、倾角 15°，直接顶为 4.5m 破碎砂质泥岩，老顶为 7m 中砂岩，矩形断面 4.0m×3.3m。原砌块护巷成 4800 元/m，漏风率 20%且两帮变形严重，优化技术后实现无煤柱开采。顶板最大下沉 172mm、平均速率 0.95mm/d，较传统工艺降低 68%，两帮收敛 256mm、底鼓 36mm，较原工艺降低 85%；护巷总成本 3200 元/m，双层密封工艺使漏风率降至 3.8%，瓦斯浓度稳定在 0.28%以下，消除自燃隐患且无灾害事故。

4.3 两矿应用效果综合对比

技术体系在两矿的应用验证了其适配性，实现三大提升：围岩变形指标较传统工艺降低 65%以上，彻底解决巷道变形难题；护巷成本降至 3000~3200 元/m；采空区漏风率控制在 4.5%以下，瓦斯与自燃隐患彻底管控，顶板事故、瓦斯超限率均为 0。

5 技术创新点与矿区推广价值

5.1 技术创新点

矿区间差异化参数优化：基于斌郎煤矿、金刚煤矿的地质赋存差异，对切顶爆破、密封堵漏、锚网索支护等关键参数进行针对性优化，实现技术体系与矿区地质的精准适配，解决了单一技术难以适应不同矿井地质条件的问题。

多功能一体化支护设计：巷旁工字钢支护体兼具支撑、挡矸、堵漏风三重功能，将传统工艺中独立的支护、挡矸、密封工序整合为一体，实现“一材多用”，简化施工流程，两矿施工工期较传统工艺均缩短 30%以上。

低成本标准化支护模式：采用标准化 11#矿用工字钢作为核心支护构件，无需定制化加工，材料回收率≥85%，且施工仅需常规钻机、混凝土喷射机等设备，无需大型专用设备，大幅降低设备投入与人工成本，适合矿区中小断面巷道施工。

密封堵漏强化技术：针对川东矿区采空区漏风严重的共性问题，创新提出“钢丝网+柔性密封膜+混凝土”双层密封工艺，实现采空区漏风的全方位管控，漏风控制效果优于传统单一密封工艺。

参考文献：

- [1] 邓国军.近水平煤层沿空护巷技术的研究与应用[J].工程技术研究,2025,7(10):22-24.
- [2] 周光勇.倾斜极薄煤层沿空留巷支护技术应用与研究[J].建筑技术科学,2020(11):78-82.
- [3] 王鑫.薄煤层沿空留巷切顶卸压技术探讨[J].建筑技术科学,2023(09):91-95.
- [4] 张东升.煤矿沿空留巷支护理论与实践[M].北京：煤炭工业出版社,2018.
- [5] 川煤华荣能源有限责任公司.川东矿区近水平煤层开采技术规范[Z].2024.

5.2 矿区推广价值

该技术体系在斌郎煤矿、金刚煤矿的成功应用，为川煤华荣能源所属其他矿井及川东矿区近水平煤层沿空护巷提供了可复制的技术方案，具有显著的行业示范与工程推广价值：

适配性强：技术体系可根据不同矿井的埋深、顶板岩层特征、煤层厚度等参数进行灵活优化，适用于川东矿区各类近水平煤层地质条件；

经济性好：低成本、高回收率的技术特征契合矿区煤炭开采的经济效益需求，节约护巷成本超 2000 万元，经济效益显著；

安全性高：从源头解决了顶板应力集中、采空区漏风、瓦斯与自燃隐患等核心安全问题，提升了矿井安全生产水平，符合矿区智能化、安全化开采的发展方向；

施工便捷：工艺简单、设备要求低，无需大型专用设备，适合川东矿区巷道断面狭小、施工空间有限的开采条件，便于大规模推广应用。

6 结论

针对川煤华荣能源斌郎煤矿、金刚煤矿等矿井近水平煤层沿空护巷的核心技术难点，研发的“超前切顶卸压+矿用工字钢巷旁支护+巷内锚网索主动锚固”三位一体技术体系，通过矿区间差异化参数优化与密封堵漏强化，实现了与川东矿区地质条件的精准适配，有效控制了巷道围岩变形，顶板下沉、两帮收敛、底鼓等指标均较传统工艺降低 65%以上。

该技术体系在斌郎煤矿、金刚煤矿沿空护巷工程实践表明，可实现无煤柱开采，资源回收率提升 18%~19%，护巷总成本降至 3000~3200 元/m，较传统工艺每米节约 2300~2700 元，同时将采空区漏风率控制在 4.5%以下，顶板事故率、瓦斯超限率均降至 0，兼具显著的资源效益、经济效益与安全效益。

技术体系的差异化优化、多功能一体化、低成本标准化、密封堵漏强化四大创新点，解决了川东矿区近水平煤层沿空护巷的共性与个性问题，为矿区无煤柱开采技术升级提供了核心支撑。