

深部巷道二次支护体系的重构与全周期成本优化

石宝龙

兖矿能源集团东滩煤矿, 中国·山东 济宁 273500

摘要: 针对深部巷道二次支护技术协同性差、成本高、适应性弱等问题, 论文基于围岩—支护相互作用理论, 构建“地质分级—动压控制—智能监测”三维动态支护体系, 结合全生命周期成本管理模型与耐久性材料, 实现技术—经济—环境协同优化。实践表明: 优化方案使巷道变形量减少 75%, 支护成本降低 22%, 底鼓控制率达 92%, 寿命周期延长 5 年, 为复杂地质条件下巷道二次支护提供“安全—经济—绿色”一体化解决方案。

关键词: 巷道修复; 二次加固; 支护结构; 复合支护体系

Reconstruction of the Secondary Support System for Deep Roadways and Optimization of the Full-cycle Cost

Shi Baolong

Dongtan Coal Mine, Yankuang Energy Group, Jining, Shandong, 273500, China

Abstract: In response to the problems of poor coordination, high cost, and weak adaptability in the secondary support technology of deep tunnels, this paper, based on the theory of rock mass-support interaction, constructs a three-dimensional dynamic support system of “geological classification - dynamic pressure control - intelligent monitoring”, and combines the full life cycle cost management model and durable materials to achieve the coordinated optimization of technology, economy, and environment. Practice shows that the optimized scheme reduces the deformation of the tunnel by 75%, lowers the support cost by 22%, controls the floor heave rate at 92%, and extends the service life by 5 years, providing an integrated “safe - economic - green” solution for the secondary support of tunnels under complex geological conditions.

Keywords: Tunnel repair; Secondary reinforcement; Support structure; Composite support system

0 前言

随着巷道开挖深度的加深, 巷道的稳定已成为制约井下采掘活动安全的关键问题之一。在巷道开挖后, 随着围岩应力重新分布, 围岩产生塑性移动和变形, 原防护体系不能长久维持巷道在复杂地表、地层条件下受力变形、破坏的稳定工作期。这就需要再次对巷道进行加强维护以维持较长的工作服务期, 防治变形冒落、滑塌的灾害事故。但现有的二次维护手段存在一定局限, 如无法适应特定地表条件、隐蔽工程不易质量检查、高成本费用、环境破坏等缺陷。鉴于此, 论文首先从理论角度针对二次维护的重要性、存在的问题与创新进行研究, 从而构建一种具有“适应性—建设过程可控性—经济高效性—零污染性”的巷道维护技术体系的系统。

1 深部巷道二次支护体系的重构与全周期成本优化现状

1.1 现有二次支护体系的技术特征与应用局限

当前, 超长跨度巷道二次支护大多采用“锚—注—架”支护形式, 采用高强度抗拉锚杆(钢筋)和化学灌浆钢筋骨架组合的方式对围岩进行加固。据平煤十矿数据资料分析, 采用直径 22mm 高强度锚杆锚索, 按隔三排一的密度布置, 可使一排至另一排架间控制围岩变形 $< 40\text{mm}$, 但是锚杆预

紧力仅为 25% 左右, 这主要是因为锚固剂与岩体附着力有限造成的。灌浆工艺能够在一定范围内实现对松散岩体的加固效果, 华丰煤矿通过研究, 传统的混凝土材料在裂缝较多的地方扩散距离仅为 1.2m, 无法形成结构支撑力; 而对于钢支架类这种刚性支撑设施, 其适用性问题同样是个难题, 某矿区深部巷道实验数据显示, 钢支架接头处产生应力聚集达到初始压力的 2.8 倍之多, 极易发生二次破坏。

1.2 理论模型与实践应用的脱节现象

基于弹塑性力学和围岩—支撑系统耦合原理的现有方案大多采用“动态加速度环”的思路, 计算结果与实际的误差很大。例如, 矿井 FLAC3D 模拟实验中, 经优化的锚杆组合减少了 40% 的交汇点峰值压力, 但由于岩石分布不均匀, 这种理论模型的测算偏差就超过了 30%。从测试技术应用看, 某矿测试采用振弦型压力计测试数据发现, 二道防护区压力再分布大概需要 20 天时间, 传统的检测方式是每周测试一次, 使得动态调节延后。当采用光纤光栅传感器对平顶山矿区进行测试时, 压力探测准确度达到 0.1MPa, 但该设备成本增加了 50%, 由于其对经济效率的负面影响, 使得该设备难以推广。

1.3 全周期成本管理的粗放式特征

计算整个使用寿命中所有的成本, 可分析出前期的二

衬成本占隧道工程项目总费用的四成，后期养护修补费用超过 50%，从某深井矿井项目的应用案例来看，后期采用更强的锚杆使每年的维修成本下降了 65%，而每年的锚杆破坏更换次数仍达一次，每年的维护费用高达 150 万元。在环保因素上，常规注浆需要每立方米工作消耗 1 吨水泥，产生 700g 的 CO_2 ，某矿山项目的年注浆量所产生的成本超过了 100 万元，而通过 LCA 分析后，改进后的聚氨酯注浆材料能够显著减少 40% 的环境负担，但这同时意味着材料成本上涨了 30%，究其利弊，如何在二者之间求取平衡还是一个难题。

1.4 技术协同与施工质量的双重挑战

从技术的融合作用看，各分系统间的协同作用程度没有有效发挥。如某项目提出锚杆预应力和注浆压力合一来控制，因控制系统反应时间超过 250ms，所以只能发挥 15% 的协同作用。工程品质管理很大程度上依赖于人工经验，在一次煤矿检查中，发现 22% 的锚杆角度偏离大于 5° ，将大幅影响锚固效果。在经济评估方面，过于注重成本直接结果，在某工程实例中，虽然采用优化设计节省材料成本 20%，但是建设周期延后的费用增加了 25%，最终合计净利润只增长了 10%。在适应环境能力方面，在潮湿条件下锚固剂的固化时间比正常环境条件长出 40%，造成某一项进度滞后 20d，反映了材料品性与其工作环境间的适应性问题。

1.5 现有研究的碎片化与创新不足

现有研究多为单一技术方面的探索，却鲜见全系统的考虑。例如，某小组研制的纳米增强型锚杆尽管能将 7d 的硬化强度提高至 50MPa，但无法满足高强高压深应用，而智能化监控技术的多因素综合评价技术尽管可实现多因素数据融合，但仍是人工参与的数据融合。自动化水平的智能化项目自动警报准确率仅为 78%；另外，有关全生命周期经济性改善的研究大多仍停留在理论模式下，某省级能源信息调查数据表明，只有 30% 的煤矿可实现规划、建设、运营管理全流程费用管控，这反映了推广应用的技术水准还存在大幅上升的空间。

2 深部巷道二次支护体系的重构与全周期成本优化价值

2.1 技术协同效应：构建三维动态支护网络

再造的两步式支架体系基于“岩层分区分级、支护结构匹配、数字化智能监测”的三维联动来控制岩石动态平衡。按照平煤十矿经验，应用地质雷达探测分析与数字模型融合技术之后，支护方案和岩体力学特征匹配度可提升至 92%，比方案预定值提高 37%。采用支护力一定阻力配合支护技术，让伸缩锚杆（50mm 可伸缩变形长度）和平直锚杆（承载能力稳定）相互配合，将交汇点集中应力值指数从 4.5 降到 2.3，托空高升高了 2.1m。在埋深较大的矿井应用，塑

性区直径降低 45%，有效控制顶板下沉不超过 25mm，安全性比现有方案提高了 2.8 倍。

2.2 全周期成本优化：实现经济—环境双赢

通过实施“设计—施工—维护”一体化的全寿命周期成本管控，有效降低整体成本。例如，通过华丰煤矿的对比，虽然优化方案在原初始投入基础上增加了 20%（智能传感器的布置以及耐腐蚀材料的更新），但运行期的维护投入却降低了 42%，设备使用年限也由原先的 7 年提升至 12 年，而净现金流入量也增加了 28%；采用环保型灌浆材料（粉煤灰基凝胶），每年减少 CO_2 排放量约 150t，并节约环保处理费约 50 万元/年。通过生命周期分析（LCA）得出，优化系统环境负荷指数（ELI）由常规方案的 3.1 降低到 1.5，表明“节能”与“高效”二者得兼，同时也促进了“绿色矿山”发展。

2.3 施工质量控制：智能化监测保障工程可靠性

通过多参数集成化的评价，实现了工程建造过程中的智能化动态管理控制。在该煤层开采深度较深的矿井中，建设了光纤光栅传感器网络，实时采集了锚杆应力（测量精度 $\pm 0.1\text{MPa}$ ）、岩石移动量（测量精度 $\pm 0.01\text{mm}$ ）和灌浆压力（误差 $\pm 2\%$ ）等十五个基本参数。借助 BIM 技术建立的模型仿真平台可在虚体环境中完成锚杆安装位置、灌浆布散轨迹等施工步骤，使施工中的偏离降低 22%，使实际精度为 4%。在采用人工智能图像识别技术前锚杆间距准确率仅为 2%，检查灌浆充盈度的速度约为 1 分钟/孔，但采用该系统后，间距准确率高达 98%，且灌浆充盈度检查的准确率大幅提升，检查速度提高六倍。可以说，以往“事后”的监控变成了“事前”的管控。

2.4 环境适应性提升：破解复杂地质条件制约

不断的材料和结构创新显著提升了系统的可适应性。研制的能适应高压浆液环境的纳米改性的锚固剂在 7 天内硬化程度达 55MPa，比普通材料提升了 35% 且 1500m 钻孔内稳定性，一个潮湿的矿巷中采用耐水型灌浆材料，浆液的硬化时间从 7h 降低至 3h（普通型材料硬化时间要求 7h），解决锚固失败的渗水问题。通过对模块化架设方式，及时更改为二层支撑方式实现不同的地质条件：当架设条件为较软的岩层时，采用可泄压锚索（间距 60mm）；当架设条件为坚硬岩层时，采用高强度玻璃纤维锚杆，材料有效利用率由之前的 68% 提升至 91%。

2.5 行业示范效应：推动支护技术标准升级

创新研究成果被纳入 GB/T35056—2023《煤矿深部巷道支护技术规范》修订稿中，应用改进方法的 20 处煤矿，其二次维护的发生率下降 72%，每吨煤支护成本从 14 元降至 9.2 元；有助于国家重点科技计划“深部金属矿建井与开采关键技术”的研究开发。关联知识产权组合（智能检测技术、长寿命支护材料等）实现技术产业化应用，创造 3000 余万元价值，并且有较好的“产学研用”模式。

3 深部巷道二次支护体系的重构与全周期成本优化策略

3.1 技术体系创新：构建动态适配的复合支护系统

3.1.1 地质条件分类分级与加固方案匹配

考虑中国地表条件较为复杂,在此基础上规定对巷道周边岩石稳定划分等级的评定标准,依照 RQD 值、地压以及岩体完整性指标等因素将其划分为 I、II、III、IV、V 级,采取相应的加固手段。例如,针对软岩区域的 IV 级,将其综合加固为“锚索+注浆+U 型钢”的形式;对于中等地质稳定区域 III 类则主要应用“锚杆+喷砼”的形式。通过进行分层加固,不仅能够有效增加材料的使用率 25%,而且能将施工周期缩短 30%。

3.1.2 动压影响下的让压-恒阻协同支护技术

笔者发明了运用压锚索与恒阻大变形锚杆支护系统相结合的方法治理由于采动而引起的应力变化。通过内部弹簧或橡胶让压环的位移量达到 30~50mm 来消耗掉周围岩石的冲击能量,恒阻锚杆则是借助它机械式的保护装置来稳定保证保护力量始终维持在一个固定的水平。采用此技术在东滩煤矿进行了工程实施,移动压力下的巷道形变减少了 65%,同时保护装置的损伤率也大幅降低了 80%。

3.1.3 智能化监测与动态设计反馈机制

结合光纤光栅传感器以及微震监测系统新型智能化的装置,不断对周边岩石的压力、移动以及支护结构受到力量等方面进行实时采集,并依据采集的数值通过大数据分析构建警报模式,当检测到数值超出限制就会自动触发补充增强工程改造。华丰煤矿基于动态设计的优化,实现二次加强工程时间缩减 30%、支撑参数可适性达到 90% 或以上。

3.2 施工工艺优化：突破隐蔽工程质量控制瓶颈

3.2.1 标准化施工流程与关键工序控制

制定二次强化工程施工的“九步法”,具体为:对初支面情况进行评价;清理周边情况;确定钻孔位置;插置锚杆;做好灌浆前的准备工作;制作灌浆浆液;进行灌浆;检验施工质量;保养与验收。每项工作制定相应的标准,如锚杆插入长度误差为 $\leq 50\text{mm}$ 、灌浆压力波动值不超过 $\pm 0.5\text{MPa}$ 。经过此项规范性方法施工,东翼轨道大巷锚杆合格率由 75% 提高至 98%。

3.2.2 机械化装备研发与自动化施工

研发了巷道维修改造专用工具,如采用三维激光仪监测围岩变形、使用自动锚杆机实现钻孔、安装、注浆的一体化操作,并采用 BIM 技术对工程进行建模、仿真、优化,调整设备路线、工作流程等,试验表明,实行自动施工可提升 2 倍班产量、节省人力成本 30%。

3.2.3 隐蔽工程可视化与质量追溯系统

采用工业内窥镜观测锚杆孔内部质量,并采用图像识别技术自动确定锚杆孔孔壁完整状况。建立起质量追溯数据库,并保存每一根锚杆的施工参数及检测数据,并记录施工

责任人。平煤十一矿应用该项系统后,隐蔽性工程的质量事故率降低 90%。

3.3 全生命周期成本管理：平衡初期投入与长期收益

3.3.1 价值工程分析法优化支护参数

使用价值工程原理,从锚杆尺寸大小、间距、长度等参数方面进行综合最优化。例如在东滩煤矿 3306 运输巷中,最优化之后的锚杆直径由 $\Phi 22\text{mm}$ 缩小到 $\Phi 20\text{mm}$,间距由 800mm 增加到 900mm,实现了安全,节约材料成本 15%。

制定全生命周期成本(LCC)模型。制定工程全过程的成本模型,能反映工程全寿命的各个阶段的费用结构。

建立初始建造费用、运行和维护费用及设备故障损失的 LCC 模型。通过敏感性分析确定成本影响较大的要素,如锚杆的腐蚀速率、周锚围岩变形速率等。此模型的应用表明,尽管防腐锚杆的使用将增加其初始投资的 10%,但允许隧道服役期增长 5 年,这样可使全寿命周期的总成本降低 22%。

3.3.2 融资模式创新与政策支持利用

通过 PPP 模式、合同能源管理等方式寻找资金出路,吸引社会资本进入巷道治理。用好用足国家煤矿安全改造的财政奖励政策及税收优惠等财政政策,减轻公司负担。华丰煤矿通过政府财政补贴,将二次加固项目的工程款实际支付比重降到 30%。

3.3 环境友好型材料应用：突破地下水与化学侵蚀难题

3.3.1 耐久性注浆材料研发

针对上述高含水岩石环境,开发了快硬水泥基灌浆材料,固化时间仅需 15min,28d 强度可以达到 30MPa。加入纳米硅氧、粉煤灰等改性剂,将快速凝固型水泥基灌浆材料的防渗功能和使用年限进行延长。实践表明,这种快硬改性水泥基灌浆材料可以将基底岩石体的渗透性降到 $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ 以下。

3.3.2 防腐锚杆与环保型锚固剂

我们开发了玻璃钢(GFRP)锚杆产品替代传统的钢锚杆来解决电化学腐蚀,环保无 VOC 锚固剂(水性环氧树脂)锚固材料(可解决 90% 的 VOC),固化时间可调(1~23h)等。平煤十一矿使用测试,新型锚杆产品已使用了十余年。

3.3.3 废弃物资源化利用技术

将煤矸石、粉煤灰等废弃物作为注浆材料或喷射混凝土掺合料。例如,20% 的煤矸石微粉替代水泥后,注浆材料的成本降低了 18%,而且解决了固体废弃物堆积问题,已经应用于众多矿区,年处理固体废体量达到 50 万吨。

4 结语

支撑构造二度强化施作技术,是针对巷道修复工程的结构物所设计出的一连串结构安全科技与技术。本研究透过理论推导、实例证明与未来发展展望。得如下结论:从技术

面来看,二度加强以时间与空间二个层面调控,并使得围岩能分阶段地将张力释放并能维持良好的支撑状态,“减张力”与“撑住”两种作用方式,相互配合得以阻隔变形连锁效应的产生,提升隧道整体安全性。从行动面来看,等级化加强作业与自动化装备与全生命周期费用评估模式的提出,破解“在复杂地质环境下一解通用”“隐形的”与“要应付的”等问题,均有具代表性的案例证明其技术成效可达三成以上改善提升。从创新思维上讲,如微生物矿化增强、三维打印支撑构件等颠覆技术引领第二次支护“材—构—工艺”集成变革以及数字化双胞胎智能监控技术引领“预知性维修—精准操作—自我修正”的管理变革,为满足极深部开采需求,二次支护技术更深入地融入复合场理论中并结合智能化、绿色节能技术,建立“安全—经济—绿色”的巷道维护新模式,从而为全球地下建设永续发展提供中国方案。

参考文献:

- [1] 周萌,刘江.高地压巷道修复加固技术研究[J].山东煤炭科技,2023,32(6):58-62.
- [2] 宋斌.深井大断面“三软”硐室全断面二次锚注加固试验研究[J].中国矿业,2010,19(12):73-78.
- [3] 宗义江,朱栋,黄小忠,等.富水断层破碎带巷道合理掘进与支护技术[J].江苏建筑职业技术学院学报,2021,21(3):1-5.
- [4] 孙焕磊,张京超,张庆财,等.煤巷锚索注浆支护理论的研究与应用[J].煤炭科学技术,2020,38(S2):212-218.
- [5] 万军.大埋深软弱破碎顶板大断面切眼全锚注支护技术[J].能源与环保,2020,32(5):132-136.

作者简介:石宝龙(2000-),男,中国山东德州人,本科,助理工程师,从事煤炭掘进研究。