

巷道交叉点应力集中区域加固处理方法

苏鹏

兖矿能源集团东滩煤矿, 中国·山东 济宁 273500

摘要: 巷道岔道由于断面突变且存在多条巷道压力叠加区域容易形成高压区而造成冒顶、坍塌、片帮等失稳隐患。论文依据弹塑性力学和破裂围岩理论系统分析了岔道高压区的特征及岔道高压区强化对于巷道的必要性, 分析显示 40% 的巷道事故集中在岔道区域, 岔道可以利用强化措施, 如高强度锚固、注浆加固、刚性支护、减压等方式大大提高岔道的安全稳定性。但还存在技术配合性差、施工质量不易控制、经济效益消耗大、环境适应性差的弱点, 所以进一步提出了岔道级地表分级强化、监测与控制智能化、全寿命费用控制和持久材料的设计方案。实例验证该方案后, 得出岔道寿命周期延长了 5 年, 全寿命费减少 22%; 论文为深层次突破复杂地质条件下巷道岔道强化提供理论技术支撑和实践指导。

关键词: 巷道交叉点; 应力集中; 加固处理; 高强预应力锚固; 注浆改良

Reinforcement Methods for Stress Concentration Areas at Roadway Intersections

Su Peng

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

Abstract: Roadway intersections, due to sudden cross-section changes and the existence of pressure superposition areas from multiple roadways, tend to form high-pressure zones, leading to potential instability hazards such as roof collapse, overall collapse, and rib spalling. Based on elastoplastic mechanics and the theory of fractured surrounding rock, this paper systematically analyzes the characteristics of high-pressure zones at roadway intersections and the necessity of reinforcing these zones for roadways. The analysis shows that 40% of roadway accidents are concentrated in intersection areas. Reinforcement measures such as high-strength anchoring, grouting reinforcement, rigid support, and pressure reduction can significantly improve the safety and stability of roadway intersections. However, there are still weaknesses including poor technical coordination, difficult control of construction quality, high economic cost consumption, and poor environmental adaptability. Therefore, further design schemes are proposed, including graded surface reinforcement at the intersection level, intelligent monitoring and control, full-life cost control, and the use of durable materials. After verifying the scheme through an actual case, it is concluded that the service life cycle of the intersection is extended by 5 years, and the full-life cost is reduced by 22%. This paper provides theoretical and technical support as well as practical guidance for in-depth breakthroughs in the reinforcement of roadway intersections under complex geological conditions.

Keywords: Roadway intersection; Stress concentration; Reinforcement treatment; High-strength prestressed anchoring; Grouting improvement

0 前言

地下深部的掘进深度逐年增大, 在交叉点稳定性不仅决定着矿山的安全和效益, 而且还是一个贯穿巷道、运输空气、货物、人员的通道。而该处由于巷道拐弯、断面变大以及多重应力场的作用, 可能出现比初始应力值高 3~5 倍的集中应力区, 造成围岩沿交角方向扩展成裂隙而发生“顶板拉裂—剪切复合破坏”或“帮部鼓起—底板凸出联合作用破坏”等典型的破坏形态。传统的加强施工不仅难适应复杂地形条件、对隐蔽工程实施不便、成本相对较高, 难以满足深部开采的要求。论文依据应力集中原理, 针对平煤十矿、华丰煤矿等实际情况, 从交叉点加强方案及措施、交叉点界面破碎及复合破坏等多方面着手, 旨在建立集安全、经济、

环保于一体的交叉点加强技术体系, 服务于地下工程的安全开发利用工作。

1 理论基础

1.1 巷道交叉点应力叠加原理与空间效应

因此, 隧道相互交叉处的压力积聚是多重力场之间的相互作用的结果。根据弹塑性力学规律, 若 2 条隧道以一定的角度相交, 那么它们的交叉点就会成为 3~5 倍初始压力的超高压力集聚区域。平顶山 10 号矿经实测, 在竖交点的顶板压力集聚系数达 4.2, 远超过单段巷的 1.8~2.5 倍。

表现形式: 此类空间效应。

三维应力重分布: 交叉点处主应力方向发生偏转, 最

大主应力由垂直巷道轴向转为沿交叉锐角方向分布, 导致剪切破坏面沿该方向发育。

主要分析影响断面形态: 矩形断面交角处应力集中系数比拱形断面的 30%, 直角交角处的应力集中系数为圆弧过渡交角处系数的 1.5 倍。交叉点在煤层与岩石交接地带, 由于不同弹性模量而引起的层间剪切错动加大了应力集中。

1.2 交叉点围岩破坏模式与失稳机制

将典型的地质灾害形态归结为“区域压力集聚—小裂缝展开—大断裂表面发育”。

同时受到顶板的拉应力和剪应力的综合作用, 在交叉锐角方向发育 V 形破断面的破坏形态, 平煤十二矿交叉点以该破坏类型占到了 65%^[1]。

参与部和底板整体稳固性崩溃: 因过大负荷致使两边石料被迫楔入隧道的内外空间中, 同时, 内外石料受到侧向负荷的影响而产生了位移变形, 便形成了“边侧窄收—底部扩展”的一致破坏形式。

受力方向改变, 引发端头剪切破坏, 这是交叉点处初次支护锚杆的交叉点支护失效的主要原因。据淮南矿区数据分析, 交叉点锚杆 80% 支护失效地点出现在距端头 1m 内^[2]。

1.3 加固材料力学性能与界面作用机理

交叉口支撑材料应具有强度高、抗压、抗腐蚀等诸方面特性, 且支撑材料与岩体之间接触过程决定着支撑性能。

大张拉锚索的有效作用: 采用直径 21.8mm 钢绞线锚索, 施加 150~200kN 预应力, 可使交叉点围岩弹性范围延展 30%, 可形成 1.5~2.0m 的有效压固圈。

当围岩变形时, 内置让压装置可通过压缩弹簧或橡胶体提供 100~150mm 的让压行程, 吸收冲击能量 $\geq 50\text{kJ}$ 。

注浆材料的流动性与固化性: 超微细水泥基液体在缝隙内的渗入范围可达 3~5m, 通过水灰比 (0.6~0.8) 来调节液体凝固时间 (4~24h), 实现活塞式加固^[3]。

2 巷道交叉点应力集中区域加固处理的重要性

2.1 安全保障: 构筑地下工程的风险防火墙

顶板冒落、片帮的经常性事故点主要集中在交叉点应力集中区。据统计, 中国煤层开采中巷道事故 40% 多发生在交叉点, 其中七成以上事故与应力集中相关。例如, 平顶山第十矿正交叉点未做有效强支护, 其顶板应力集中系数达到 4.2, 最终发生大面积冒落, 导致三人死亡事故, 而通过改造加强则大大减小了发生类似事故的概率。类似的做法如淮南地区实施了“锚索桁架+注浆加固”, 交叉点事故大幅减少 68%, 人员受伤事故减少 80%, 这是一种“预防性加固”, 其本质是建立地下建筑的安全冗余系统, 以确保人的安全, 是安全的煤矿工程做法。

2.2 生产连续性: 打通地下运输的“咽喉要道”

因交叉点是通风运输的必经之路, 其稳定情况直接影响矿井生产效率。如果出现不稳现象, 导致巷道缩窄甚至塌

陷密闭, 将制约正常生产。如华丰煤矿一交叉点因底鼓 1.5m, 使装载车停滞运行 2 天, 日损失数百万元。若加强变形控制使交叉点永久稳定的交叉点, 如东滩煤矿采用“反压式支架+底板锚杆”后, 交叉点服务年限延长了 5 年, 运输效率提升了 30%。如此“通道防护”作用, 使交叉点成为地下生产系统的“安全阀门”和“效益发动机”^[4]。

2.3 经济效益: 平衡初期投入与长期收益

运用交叉点加固的方法可以带来短期的投资收益, 表现为检修次数的降低和停产检修损失的减少。例如对平煤十二矿某一交叉点初次进行加固的初期投入 50 万, 采用常规维护的模式在 3 年时间需进行 3 次大面积修复工程, 每项修复费用 30 万左右; 而运用“让压锚索+恒阻锚杆”的加固工艺强化处理, 初期投入 80 万, 但是在整体寿命期内 (十年) 不需要进行大面积修复, 在整体成本上降低了 45%。这种“未雨绸缪”的“前期投资”方法符合地下建构物“治未病”的理念和一定的经济效益。此外, 安全稳定的提升也有利于设备消耗的降低, 节省能源, 提升价值^[5]。

2.4 技术挑战: 推动地下工程技术的创新突破

同时, 由于存在交叉点复杂应力集中, 使人们在采取不同的支撑技术过程中提出了更高的要求, 促使人们在材料技术上, 力学原理, 施工技术等等方面对这些问题展开技术上的革新与创新。例如在压力问题的研究中, 人们设计出了压环锚索与大变形恒阻型锚杆相结合的综合保护系统, 依靠内部弹簧或橡胶的伸缩功能使压环产生 30~50mm 的移动, 以起到缓冲压力的效果, 并消耗掉周围岩石吸收的冲击能量。而在多水环境中, 人们又研究出了能够在短时间凝结的, 28 天时可以达到 40MPa 强度的混凝土基础灌浆快凝材料。这一项创新性技术不仅仅是解决了交叉点的加固问题, 还在一定程度上解决了处理深度开挖、软岩破坏区等方面存在的问题, 完善了相关地下建筑技术^[6]。

3 巷道交叉点应力集中区域加固处理方法

3.1 主动支护技术: 高强预应力锚固体系

交错点区域的拉剪混合破坏损伤形式可采用“锚杆+锚索+减压”的联合支护方案。选用 22mm 高强螺栓作为锚杆, 间距为 0.8m \times 0.8m, 与 M5 金属网共同组成网格状保护带。锚索选取 21.8mm 钢丝绳直径, 长度 8~12m, 呈“三瓣花”状布置在顶板和两帮, 施加 150~200kN 预紧压力形成压角。根据淮南矿区实践应用情况来看, 可通过该组合将交错点部位顶板下沉量控制在 85% 以内, 侧帮缩量减小 70%。

3.2 注浆加固技术: 裂隙充填与介质改良

采用“渗透注浆+压密注浆”联合注浆工艺处理破碎围岩, 注浆材料采用 P.O42.5 水泥与超细浆液, 水灰比为 0.6~0.8, 掺入 5% 的微膨胀剂, 进行分段注浆法填充裂缝。交叉点注浆完成, 该地点岩石的完整系数由 0.25 增长至 0.65, 其单轴抗压强度可恢复至原有的 2 倍多。对高含水地段, 则

用水泥-水玻璃双液浆,并将凝固时间控制在 45~60s,以防止浆液流失。

3.3 刚性支护技术: 高强让压支护结构

将“U 型钢可收缩式支护+钢筋混凝土支护”混合式支护形式应用于极软岩段交界面,U 型钢每间隔 0.5m 安装 1 根,并加装减压装置,允许变形量为 300~500mm;内衬厚度为 300mm 并安置 2 根 $\phi 20\text{mm}$ 的钢筋网。经华丰煤矿实践,该组合方式抵抗的地压力为 35MPa,下部鼓出量只有 0.15m^[7]。

3.4 卸压技术: 应力转移与能量释放

在冲击危险区域我们采用“穿孔泄压+爆破凿裂”的综合方法,开挖穿爆交汇点及其附近的 1 个直径 110mm 的泄压孔(深 15~20m,间距 2m 左右),形成一个保护隔离圈;然后采用聚能爆炸物对顶部硬岩进行爆破凿裂,爆破凿裂高度不小于巷道宽度的一半以上。通过东滩煤矿的成功实践,冲击地压的发生次数已下降为月发生 3 次左右减少到 5/2 次,电磁辐射强度降低了 82% 以上。

3.5 联合加固技术: 多技术协同与动态优化

较为普遍的技术方案是采用“锚网索喷、注浆、U 型钢”的五合一组合,首先是采用锚网索的主动支护体系,然后采用周边岩石喷 50mm 厚的混凝土形成闭环保护,待强度达到 70% 开始注浆增强,然后搭设 U 型钢围挡,底板浇筑基础。平顶山十矿运用此技术后,交叉点的服务周期延长至 8 年以上,每吨煤的支持成本降低 35%^[8]。

3.6 数值模拟辅助设计方法

采用 FLAC3D 进行交叉点模型三维建模,施加地应力条件、围岩本构材料和支护结构数据,模拟不同支护措施作用效果及应力状态,通过试验调整锚杆间距、注浆范围等参数,使设计方法更适应工作实际、取得 90% 以上吻合度。

4 巷道交叉点应力集中区域加固处理存在的问题

4.1 技术适配性不足: 复杂地质条件的“适应性困境”

中国的地形千变万化,既有北方易采区的煤炭开采地质条件,又有南方发达的喀斯特地下水系统等种类的地质条件,不同的地质条件会令传统的支撑加固方法达不到要求。对于较深区域,使用锚网索支撑时存在锚杆折弯或锚索预压力损失的情况。如某煤矿平顶山地区的某交叉点使用锚索加固后,锚索深部存在软岩流动的现象,锚索预压力损失了 40%,无法对交叉点起应有的保护效果。同时,受到动载荷的影响,损坏的交叉点难以补强。因为在采动影响下,周边岩石的应力场分布发生改变,使得原有的设计参数并不能真实反映现在的真实应力场分布,导致加固结构过早损坏或加固结构过冗余。

4.2 施工质量控制难: 隐蔽工程的“质量黑洞”

对于交叉点加固工程而言,其涉及一些无法眼见的环

节,例如锚杆安装角度和注浆压力的控制等,所以其质量控制存在较大的难度。就注浆加固而言,浆液比例、注浆压力及最终标准均会对加固效果起到至关重要的作用,而由于工作人员业务能力高低的差异,使得上述各项往往调至距离设计值很远的位置,如在淮南煤田某交叉点注浆工程中,由于浆液水灰比没有合理调控,导致注浆体强度仅为设计强度的 60% 左右,而造成加固失败。同时,交叉点内空间较小,机械设备操作受限,易出现锚杆位置误差大和锚固材料不密实现象,增加了质量控制风险。

4.3 经济成本制约: 高投入与效益的“平衡难题”

至于深度巷道交汇处强支护应用,所使用强化材料成本也较高,好的锚杆、特殊改性树脂、特殊的混凝土基座等均属高端产品。如果按深度巷道交汇处强支护计算,普通锚杆就需要伸长 3.5m,将使材料成本增加 60% 左右。并且采用此种方法实施时间长,势必使巷道的使用期延长,对生产的连续性和效率也会产生一定的影响。例如,华丰煤业一交叉点强力支护工作由于施工作业时间长而导致工作面交接滞后 15d,由此造成的直接经济损失在 100 万美元以上。

4.4 环境适应性差: 地下水与化学侵蚀的“双重挑战”

在含水量较大的地层处加固容易发生建筑物被地下水侵蚀现象。在高渗透压的环境中,以往的混凝土基底灌注材料固结缓慢,抗压强度较低,极易发生灌浆浆液的流失现象。例如,在东滩煤矿交汇处进行了灌浆加固,由于地下水流量的对灌浆体造成的破坏导致其破坏了原有的三分之一强度,使得增强效果大幅度降低。其次,化学反应的突出表现,如煤炭内的硫化氢气和蒸汽相混合加速锚杆氧化进程导致使用寿命缩短。

4.5 监测与反馈机制滞后: 动态调控的“信息壁垒”

目前的加固方法都不具有实时监测和动态响应能力,不能根据周岩变化情况对加固参数进行修正;传统检测方法如收敛计、多个位置位移计数据采集速度太慢,无法反映受压的变化信息。例如,平煤十二矿一个过巷处的加固后未设置实时监测设备,上顶脱离 25cm 后才发出报警,险些造成塌方事故。此外,缺少监测数据向加固设计的反馈通道,致使加固设计在工程实际工况中不能得以改进。

5 巷道交叉点应力集中区域加固处理的优化策略

5.1 技术适配性优化: 构建动态设计体系

5.1.1 地质条件分类分级与加固方案智能匹配

巷道相交区围岩稳定程度划分为等级标准,从 RQD 值、巷道围压及围岩完整性系数等方面对围岩进行等级划分,分成 I ~ V 级,然后结合不同的等级采取相应加固方案;IV 级软弱岩质相交区,采取“索+锚+灌”+“U 型钢”组合支护,III 级地稳定区主要采用“锚+喷”。同时,搭建了智能配合比系统,仅需提供地质信息即可形成设计,据平煤

十一矿试用显示可将设计效率提升 60%，同时可提高材料效益 25%。

5.1.2 动压影响下的让压 - 恒阻协同支护技术

为解决由于采动导致的不均匀应力，采用压锚索、恒阻大变形锚杆相结合的方法。利用内部弹簧或橡胶导致压环实现 30~50mm 可变形空间缓冲周边岩体所受到的爆破能量；恒阻锚杆依靠机械式稳定支撑设备维持恒定的支护力量。实施后东滩煤矿顺槽变形滑移带变形量降低 65%，支护系统失效率降低 80%。

5.1.3 数值模拟与人工智能融合的动态设计

将交叉点三维模型建立在 FLAC3D 软件上，施加地应力场、岩体物理力学性质等参数以及支撑系统相关参数，分别对不同方案的围岩变形、应力进行数值模拟，基于深度学习的算法优化数值模拟结果，得到最优化强化方案，华丰煤矿支护系统适应性提高 90% 以上，工期缩短 30% 左右。

5.2 施工质量控制：标准化与智能化并重

5.2.1 标准化施工流程与关键工序控制

笔者采取“十二步法”策略开展交叉点加固作业，分别包含：地质核查、旧支撑结构评判、清除周石、定位钻孔、安置锚杆、注浆前准备、配制注浆浆料、实施注浆、质检结果核查、安装支架、混凝土养护、保养及验收。每个环节的实施均具有相应的标准要求，如锚杆孔深度误差在 50mm 以内的不合格率。通过标准的应用，笔者将东翼轨道的大巷中锚杆的达标率由之前的 75% 提升到 98%。

5.2.2 机械化装备研发与自动化施工

在研究和应用了巷道修复专用工具（如通过三维激光扫描仪对围岩变形进行监测；借助全自动锚杆钻机完成打眼、安装、灌浆环节）的基础上，通过对设备行走路线、工艺流程等进行 BIM 仿真实现优化，自动化施工可提升工程进尺 50% 以上，降低人工成本 40% 左右。

5.2.3 隐蔽工程可视化与质量追溯系统

采用工业内窥镜检测锚杆孔内部质量，采用图像识别自动判别孔内壁的完整性，建设质量追溯数据库记录每根锚杆的施工参数、检测参数和责任人，平煤十一矿运用本系统后，隐蔽工程质量事故率降低了 90%。

5.3 经济成本优化：全生命周期成本管理

5.3.1 价值工程分析法优化支护参数

依据价值工程原理对锚杆的尺寸、间距和锚杆长度等相关参数做系统全面的最优化处理。如原处于东滩煤矿 3406 运输巷采用的锚杆尺寸为 $\Phi 22\text{mm}$ ，间距 800mm，经系统优化处理后，锚杆尺寸采用 $\Phi 20\text{mm}$ ，间距采用 900mm，不仅满足安全要求，而且材料费用节省 15%。

5.3.2 全生命周期成本（LCC）模型构建

制定了包括原始建设成本、运维维修成本和故障报废成本的 LCC 模型。通过敏感度分析确定主要的成本驱动因素，如锚杆腐蚀率、锚固周围岩石的蠕变速率等。模型的应用表

示使用抗腐蚀锚杆虽然会使初始投资成本增加 10%，但可使隧道使用寿命提高 5 年，使总体生命周期成本降低了 22%。

5.3.3 融资模式创新与政策支持利用

寻求 PPP 模式、合同能源管理等筹资方式，引进社会资本共同出资巷道修复。利用国家对煤矿安全改造的资金补助、税收优惠等方面的扶持政策，降低企业的资金压力。华丰煤矿通过政府补助的方式，二次加固项目实际投资比例降到 40%。

5.4 环境适应性提升：耐久性材料与绿色施工

5.4.1 耐久性注浆材料研发

针对该地质条件高含水的特点，开发了一款凝结时间仅为 15 分钟、28d 胶凝强度可达到 40MPa 的低水化热早期高强水泥基灌浆材料，并在配方中添加纳米硅酸盐、粉煤灰等改性材料提升浆液抗渗性与寿命，灌浆材料可以实现将基底岩石的渗透系数控制在 $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ 以下。

5.4.2 防腐锚杆与环保型锚固剂

新型玻璃纤维复合材料（GFRP）锚杆的研制是将普通金属钢锚杆用新型纤维玻璃锚杆进行替代，以解决电化学腐蚀问题；绿色环保型水基环氧树脂锚固剂是将含挥发性有机物的锚固剂的含量由占 80% 左右降至 9%，凝固时间范围由 1~24 小时任意调节，已在平煤十一矿使用几年，使用寿命可达十多年以上。

5.4.3 废弃物资源化利用技术

将煤矸石、粉煤灰等工业废弃物改用于注浆料或喷射混凝土掺合料。例如煤矸石微粉部分取代水泥 20% 后注浆料成本降低 18%，并同时消除了固体废弃物堆积。该项技术已大面积推广应用，每年消纳固体废物 50 万吨。

5.5 监测与反馈机制完善：智能预警与动态调控

5.5.1 智能监测网络与实时预警系统

架设光纤光栅传感器与微震监测系统等智能化装备，采集围岩应力、变形和支护结构受力等监测数据。建立大数据分析的报警模型，当监测的数值超过预定值时，就进行加渣的动态优化修改。华丰煤矿通过动态优化，第二次加渣时，时间和加渣参数的一致性分别提高了 30% 和 90% 以上。

5.5.2 数字孪生与虚拟现实（VR）技术

开发可视化、数字化的双模巷道维修系统，采用 VR 技术对巷道进行施工仿真及员工培训，员工通过虚拟化操作锚杆的打设、注浆，让工人练习熟练的操作方式以及安全规程。

6 结语

对于交叉点处巷道压力集中进行支护，这是一门地下工程安全的科学和工程技术结合的学问，本研究经过理论研究、现实应用和趋势展望，有以下主要结论：从工程技术的角度要采取“控制应力—结构补强—适应性”三级模式对交叉点进行支护，避免发生变形联动效应，其减压—保抗的设

计方式能有效提升周边岩体本身强度。从工程建设的角度出发,利用分层强化理念+自动化建设装备+寿命周期费用管理模式的应用,突破复杂地形环境下“单一类型化方案难以通吃”及“隐蔽项目难以控制”的瓶颈难题,示范性成果表明该技术可增加 30% 以上的经济性效益。

参考文献:

- [1] 邓振宇,王将豪,张文博,等.迎采动巷道区域应力场演化规律及支护技术[J].煤炭技术,2024,43(11):12-16.
- [2] 周勇.龙滩矿采动巷道非对称破坏特征与控制方法[J].煤炭与化工,2024,47(6):18-22.
- [3] 刘文超,赵毅鑫,郭继鸿.新街矿区厚硬顶板条件邻空巷道冲击地压机理与控制[J].煤田地质与勘探,2024,52(10):153-165.
- [4] 王建华,高永,秦绍龙,等.多宝山铜矿非稳固巷道岩爆倾向性与楔形体稳定性分析[J].金属矿山,2024(11):37-44.
- [5] 简涛.建筑主体结构检测及加固措施研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2024(12):116-119.
- [6] 郑江,鲁文妍,陈亮,等.某在建高桩梁板码头横梁补强方案研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(S2):346-349.
- [7] 樊帆.双侧采动大巷底鼓机理及修复技术[J].江西煤炭科技,2024(4):40-43.
- [8] 曹芳山,林益芄,颜世尧,等.近采空区工作面过断层应力传播规律及防治技术研究[J].煤矿现代化,2025,34(4):124-128+133.

作者简介: 苏鹏(1994-),男,中国河北衡水人,本科,助理工程师,从事煤炭掘进研究。