

快速掘进支护技术在大断面煤巷中的应用

逯富红

宁夏王洼煤业有限公司银洞沟煤矿 宁夏 固原 756000

摘要：文章聚焦快速掘进支护技术在大断面煤巷中的应用。阐述了该技术的重要性，分析了大断面煤巷特点及传统支护技术问题。深入探讨了快速掘进支护技术原理与优势，包括掘支一体化作业模式、高强度支护材料作用等。详细介绍了该技术在断面煤巷中的具体应用，涵盖掘进设备选型、支护材料选择、支护参数设计及围岩变形监测与动态调整，为大断面煤巷高效、安全施工提供理论支持与实践指导。

关键词：快速掘进支护技术；大断面煤巷；应用

引言

在煤矿开采不断向深部推进的背景下，大断面煤巷的应用愈发普遍，以满足大型设备通行和高效开采需求。然而，大断面煤巷掘进与支护面临诸多难题，传统支护技术难以适应。快速掘进支护技术作为一种创新解决方案，通过优化施工工艺、采用先进设备与支护材料，有望解决大断面煤巷施工中的效率与安全问题。深入研究该技术在断面煤巷中的应用，对提升煤矿开采水平、保障安全生产具有重要意义。

1 快速掘进支护技术在大断面煤巷中的重要性

在煤矿开采领域，大断面煤巷的应用日益广泛，其对于满足大型采掘设备通行、提升煤炭开采效率意义重大。大断面煤巷掘进与支护面临诸多挑战，快速掘进支护技术的重要性也愈发凸显。大断面煤巷断面面积大，掘进时围岩暴露面积广，应力重新分布复杂，围岩自稳能力差，极易发生冒顶、片帮等地质灾害，严重威胁作业人员生命安全与煤矿生产安全。快速掘进支护技术能及时为围岩提供有效支护，增强围岩稳定性，降低事故发生概率，为安全生产筑牢根基。从生产效率角度看，传统支护方式工序繁琐，掘进与支护衔接不紧密，导致掘进速度缓慢，无法满足煤矿高效生产需求。快速掘进支护技术将掘进与支护有机结合，实现平行作业，减少工序间等待时间，提高设备利用率，明显提升掘进速度，缩短巷道掘进周期，加快工作面接替，保障煤矿持续稳定生产。快速掘进支护技术有助于降低生产成本。一方面，快速掘进减少了设备闲置时间，降低了设备折旧与维护成本；另一方面，有效支护减少了巷道维修次数与维修工作量，节省了维修费用。该技术还能提高煤炭资源回收率，减少资源浪费，提升煤矿经济效益。

2 大断面煤巷特点及传统支护技术问题

2.1 大断面煤巷特点

大断面煤巷以其超过 15m^2 的明显断面面积，在煤矿开采工程中呈现出独特的力学与工程特性。因断面尺寸大幅增加，巷道开挖后围岩应力重分布现象加剧，应力集中系数可达常规巷道的1.5-2.0倍，导致巷道周边煤岩体承受更高的压应力作用。在高地应力环境下，顶底板岩层受挤压产生塑性变形，两帮煤体在水平应力作用下易发生片帮破坏，尤其在松软煤层中，顶板下沉量和两帮收敛量可达常规巷道的2-3倍。巷道顶板和两帮的大面积暴露，使得围岩与空气的接触面积显著增大，加速煤岩体风化、氧化进程，降低其力学强度。大面积临空面导致围岩自稳能力急剧下降，开挖后若未及时支护，极易引发冒顶事故。根据岩体力学理论，巷道跨度越大，顶板岩层所形成的悬露结构越不稳定，在自重及上覆岩层压力作用下，易产生弯曲下沉，当超过岩层极限强度时，便会发生垮落。大断面煤巷的通风阻力和散热面积也随之增加，对矿井通风系统和热害控制带来新的挑战^[1]。

2.2 传统支护技术问题

(1) 大断面煤巷支护中，传统锚杆技术受力学性能制约，难以有效控制围岩变形。常规锚杆100-200kN的锚固力，无法抗衡高地应力与围岩大变形产生的作用力；在松软破碎岩层中，锚固基础稳定性差，易引发锚固失效及支护结构失稳，且其对浅层围岩作用显著，对深部岩层加固效果有限，难以抑制顶板整体下沉。(2) 锚索支护虽抗拉强度高，但施工工艺复杂，钻孔、安装、张拉锁定等环节致使单次施工耗时达2-3小时，与快速掘进设备协同效率低；施工精度要求严苛，钻孔角度与深度偏差会削弱锚固效果和支护力。(3) 传统支护设计多为静态模式，缺乏围岩变形实时监测与动态反馈机制。在巷道掘进及服务周期内，无法依据围岩应力变化和变形特征调整支护参数，易出现支护不足或过度的问题，既增加支护成本，又难以保障巷道长期稳定。

3 快速掘进支护技术原理及优势

3.1 快速掘进支护技术原理

快速掘进支护技术突破传统施工模式，以“掘支一体化”为核心构建高效施工体系。其核心在于通过先进的机械设备实现掘进与支护的动态协同作业，代表性设备如掘锚一体机集成了截割、装运、锚杆锚索安装等多项功能模块。在掘进过程中，截割头按设计断面轮廓进行破岩作业，支护机构可在掘进工作面后方2-5米的安全距离内，同步完成锚杆钻孔、锚固剂安装、锚杆旋紧及锚索张拉等工序。这种紧凑的工序衔接有效避免了传统施工中“先掘进后支护”模式导致的空顶时间过长问题。从力学作用机制来看，该技术采用的高强度支护材料通过主动支护原理强化围岩稳定性。以屈服强度达600MPa以上的高强度螺纹钢锚杆为例，配合高预紧力施工工艺（预紧力矩通常 $\geq 400\text{N}\cdot\text{m}$ ），可在围岩内部形成连续的压应力区，将松散岩体联结成具有承载能力的整体结构。预应力锚索深入稳定岩层，以悬吊作用连接不稳定顶板与深部岩体，单根锚固力达300-600kN。快速掘进支护依托信息化系统，激光导向精准校准方向断面，自动定位装置确保支护构件安装契合设计参数，优化施工工艺。

3.2 快速掘进支护技术优势

（1）快速掘进支护技术在大断面煤巷施工中，通过并行化作业模式实现掘进效率的显著提升，其单日巷道进尺可达8-12米，较传统工艺提升幅度达40%-60%。设备的高度集成化设计大幅削减辅助设备配置与人员投入，有效规避设备频繁调度带来的时间损耗，促使设备综合利用率攀升至75%以上，缩短巷道建设周期。（2）该技术在支护质量控制方面，依托高强度支护材料与高预紧力工艺的协同作用，能在围岩开挖后短时间内形成有效支护力，及时抑制围岩初期变形。研究数据表明，与传统支护方式相比，快速掘进支护技术可降低巷道顶板下沉量40%-60%、两帮收敛量30%-50%，其预应力支护体系构建的立体承载结构，能有效遏制围岩塑性区扩展，尤其在地应力区域，可将巷道返修率从25%降至8%以下，降低后期维护成本。（3）施工安全层面，快速掘进支护技术通过缩短空顶时间、减少人员暴露风险，大幅提升作业安全水平。自动化支护设备替代人工完成高危区域作业，使工人在空顶区暴露时间减少70%以上，结合实时围岩监测系统与快速响应的应急支护装置，形成多层次安全防护体系。标准化的施工流程与操作规范，降低人为操作失误引发的安全事故概率，为井下作业提供可靠安全保障^[2]。

4 快速掘进支护技术在大断面煤巷中的具体应用

4.1 掘进设备选型

大断面煤巷的特殊工程需求对掘进设备提出了严苛标准，合理选型是实现快速掘进支护的基础。掘锚一体机凭借高度集成化的功能设计，成为大断面煤巷施工的核心设备。其截割部通常配备大功率横轴式或纵轴式截割头，功率可达300-500kW，通过优化截齿排列与切割轨迹，可实现对不同硬度煤岩的高效破岩，截割速度最高可达1.2-1.8m³/min。在大断面（15-30m²）施工中，该设备能够一次性完成全断面掘进，避免分层开挖带来的效率损耗。支护集成系统是掘锚一体机的关键优势所在。其锚杆钻机数量通常配置4-6台，可同步进行多排锚杆安装，单根锚杆安装时间缩短至1-2分钟。锚索施工模块采用液压自动推进装置，能够精准控制锚索钻孔深度与角度，单根锚索张拉时间控制在5-8分钟。运输系统采用连续式刮板输送机与带式转载机组合，运输能力可达600-1000t/h，有效解决大断面巷道出矸量大的问题。设备智能化控制系统显著提升施工效能。激光导向系统精准校准掘进方向，误差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 内；截割头自动适配断面参数调整轨迹。远程操控与故障诊断实现人机隔离、快速排障，自适应截割模式可随煤岩硬度调节参数，保障施工安全高效^[3]。

4.2 支护材料选择

（1）支护材料性能关乎快速掘进支护技术在大断面煤巷的实施效果，选型需考量巷道受力与围岩条件。高强度螺纹钢锚杆屈服强度 $\geq 600\text{MPa}$ ，延伸率 $\geq 18\%$ ，锚固力达200-300kN，搭配树脂锚固剂可快速稳固围岩，控制初期变形。（2）深部围岩稳定性增强依赖预应力锚索，常用 $\Phi 17.8\text{-}\Phi 21.6\text{mm}$ 规格钢绞线，设计破断力可达260-500kN。于破碎带或高地应力区域，锚索深入稳定岩层3-5m发挥悬吊效应，单根承载上覆岩层重量可达30-50t。新型可回收锚索技术的应用，在满足支护要求的同时，降低材料消耗与巷道后期修复难度。（3）护表构件中，W型钢带由高强度合金钢轧制而成，较传统钢带截面惯性矩提升30%-50%，可高效传递锚杆、锚索支护力，构建连续承载结构；菱形金属网采用 $\Phi 6\text{-}\Phi 8\text{mm}$ 高强度钢丝编织，80-100mm网孔尺寸既能防止岩块脱落，又能与锚杆托盘紧密贴合，提升支护系统整体性。在软弱围岩条件下，柔性纤维网的复合应用可增强护表效能，抑制围岩剥落现象。

4.3 支护参数设计

支护参数设计是保障大断面煤巷稳定的核心环节，需综合考虑地质条件、巷道尺寸与施工工艺等多因素。

锚杆参数设计时,间距与排距的确定需遵循“围岩压力均匀分布”原则,在中等稳定围岩中,通常采用 $0.8-1.0\text{m}\times 0.8-1.0\text{m}$ 的布置方式;锚杆长度依据松动圈厚度确定,一般为 $2.0-2.4\text{m}$,确保锚固端深入稳定岩层 $0.5-0.8\text{m}$ 。预紧力设置对支护效果影响显著,通过现场试验发现,当锚杆预紧力矩达到 $400-500\text{N}\cdot\text{m}$ 时,围岩裂隙扩展速率降低 $60\%-70\%$ 。锚索参数设计需重点考虑悬吊作用与承载能力。锚索间距一般为 $1.5-2.0\text{m}$,排距 $2.0-2.5\text{m}$,确保有效覆盖顶板关键承载区域;锚索长度根据顶板岩层结构确定,通常为 $6-8\text{m}$,锚固长度不小于 1.2m 。预应力施加值需兼顾围岩稳定性与支护材料强度,一般控制在 $150-250\text{kN}$,过高的预应力可能导致顶板岩层出现劈裂破坏。数值模拟与现场监测的结合为参数优化提供了科学依据。利用FLAC3D、UDEC等数值模拟软件,可建立不同地质条件下的巷道支护模型,分析围岩应力分布与变形特征,初步确定支护参数范围。现场工业性试验则通过调整锚杆锚索密度、预紧力等参数,对比监测数据,形成最终优化方案^[4]。

4.4 围岩变形监测与动态调整

围岩变形监测是保障快速掘进支护系统有效性的关键手段,通过实时获取围岩状态信息,实现支护参数的动态优化。顶板离层仪作为基础监测设备,通过深部基点与浅部基点的位移差,精确测量顶板不同深度的下沉量,监测精度可达 0.1mm 。当离层值超过预警阈值(一般设定为 $10-15\text{mm}$)时,系统自动报警,提示采取补强支护措施。锚杆测力计用于监测锚杆受力状态,可实时显示锚杆轴力变化曲线。在正常工况下,锚杆轴力应保持稳定且低于设计承载能力;当轴力出现异常波动或超过设计值 80% 时,需分析原因并调整支护参数。轴力持续上升可能表明围岩压力增大,需加密锚杆或增加锚索支护。多点位移计与应力传感器的联合应用,能够全

面监测围岩内部变形与应力分布。在大断面巷道中,沿巷道周边布置 $3-5$ 个监测断面,每个断面设置 $3-5$ 个监测点,实时获取围岩位移与应力数据。基于监测数据,利用灰色预测模型、神经网络等算法,对围岩变形趋势进行预测,提前采取针对性措施。动态调整机制根据监测结果分为三级响应。一级响应针对轻微变形(顶板下沉量 $<20\text{mm}$),采用增加锚杆预紧力、补打单体支柱等措施;二级响应针对中度变形($20-50\text{mm}$),实施加密锚杆、增设锚索等补强支护;三级响应针对严重变形($>50\text{mm}$),启动应急预案,暂停掘进,采用注浆加固、架设金属支架等综合措施。通过这种动态调整策略,可有效控制围岩变形,保障巷道长期稳定。

结束语

快速掘进支护技术在大断面煤巷中的应用取得了显著成效。通过合理选型掘进设备、科学选择支护材料、精准设计支护参数以及实时监测围岩变形并动态调整支护措施,有效提高了掘进效率,增强了围岩稳定性,降低了施工安全风险。未来,随着煤矿开采技术的不断发展,快速掘进支护技术将不断优化完善,为大断面煤巷的安全高效施工提供更有力的技术支撑,推动煤矿开采行业持续进步。

参考文献

- [1]杨成.快速掘进支护技术在大断面煤巷中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2025(4):166-168.
- [2]刘翠.快速掘进支护技术在大断面煤巷中的应用[J].能源与节能,2024(7):215-217+274.
- [3]和平.探索煤矿快速掘进技术中的锚杆支护应用[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(6):0001-0003.
- [4]翟灵俊.某矿煤巷快速掘进中锚杆支护技术的改进与应用[J].山西化工,2024,44(11):220-221+251.