

矿井设计中巷道掘进与支护技术的优化应用分析

李晓健

国电建投内蒙古能源有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017209

摘要：本文围绕矿井设计中巷道掘进与支护技术展开分析。首先介绍了掘锚一体机掘进、综掘机掘进、智能化掘进工艺等掘进技术分类及特点，阐述了巷道支护技术原理、作用与以锚索（杆）网支护为主的常见方式。接着分析技术应用现状，指出我国技术存在的问题。最后提出优化策略，包括加强地质勘探、研发先进设备与技术、改进支护材料与结构、发展联合与智能支护技术、强化安全管理与人员培训等，以提升矿井设计与施工水平。

关键词：矿井设计；巷道掘进；支护优化

1 矿井设计中巷道掘进技术分类

1.1 掘锚一体机掘进

掘锚一体机是集掘进、锚固、支护等功能于一体的综合掘进设备，其作业流程主要包括切割、装载、运输、锚杆锚索安装等环节。在掘进过程中，根据巷道的地质条件、断面尺寸等因素，合理设置切割参数与锚固参数。掘锚一体机的切割机构采用高强度截齿，可对煤层及中硬岩进行高效切割，切割后的物料通过装载机构进入运输机运出。同时，其配备的锚杆锚索钻机可同步完成顶板及帮部的锚杆、锚索安装作业，实现掘支平行作业。

常用的掘锚一体机按结构形式可分为纵轴式和横轴式，纵轴式适用于矩形或梯形断面巷道，横轴式则更适合拱形断面巷道。其优点是掘进与支护作业同步进行，大大缩短了循环作业时间，提高了掘进效率；采用机械化操作，降低了人工劳动强度，减少了作业人员数量，提升了作业安全性；对围岩扰动小，有利于巷道的稳定。但该设备也存在一些缺点，如设备结构复杂，购置及维护成本较高；在极坚硬岩石或地质条件急剧变化的巷道中，适应性有待提升。

1.2 综掘机掘进

综掘机即综合掘进机，是一种集切割、装载、运输、行走于一体的巷道掘进设备，主要由切割机构、装载机构、运输机构、行走机构、液压系统、电气系统等组成。其工作原理是通过切割头的旋转切割煤岩，切割下来的物料经装载机构收集后，由运输机构运至后续的转载设备。综掘机按适用煤岩硬度可分为煤巷综掘机、半煤岩巷综掘机和岩巷综掘机。在煤巷及半煤岩巷掘进中，综掘机表现出较高的效率，其切割速度快，能适应不同断面形状的巷道施工。与传统掘进方式相比，综掘机掘进具有连续作业性强、掘进速度稳定、对巷道成形

质量控制好等优点^[1]。同时，其配备的喷雾降尘系统可有效降低作业环境中的粉尘浓度，改善作业条件，但综掘机在单独作业时，支护作业需滞后于掘进作业，存在一定的空顶距，在松软破碎围岩中可能引发围岩变形。此外，其设备体积较大，在狭小巷道中转弯及移动灵活性受限。

1.3 智能化掘进工艺

智能化掘进工艺是在掘锚一体机、综掘机等设备基础上，融合物联网、大数据、人工智能等技术形成的自动化掘进系统。该工艺主要包括智能感知、自动控制、远程监控等环节。智能感知系统通过安装在设备上的各类传感器，实时采集掘进速度、切割载荷、围岩参数、设备状态等信息；自动控制系统根据感知数据及预设程序，自动调节切割头转速、推进速度、锚杆锚索安装位置等参数；远程监控系统则可实现地面对井下掘进作业的实时监控与远程操作；智能化掘进工艺的核心技术包括自动截割成形技术、定位导航技术、自适应控制技术等。自动截割成形技术通过三维建模与轨迹规划，确保巷道断面尺寸精准；定位导航技术采用惯性导航与激光导向相结合的方式，保证掘进方向的准确性；自适应控制技术可根据围岩硬度变化自动调整切割参数，避免设备过载。其优点是实现了少人或无人井下作业，极大提升了作业安全性；掘进参数精准控制，提高了巷道成形质量与掘进效率；通过数据实时传输与分析，便于及时发现并处理设备故障与围岩问题。但该工艺对地质条件的适应性要求较高，在复杂地质条件下，智能系统的决策准确性可能受影响；同时，系统的初始投入及后期维护成本较高。

2 巷道支护技术原理及作用

巷道支护技术是保障矿井巷道安全稳定的关键技术。其原理是通过在巷道周边设置以锚索（杆）网支护

为主的支护结构,对围岩施加一定的支护力,限制围岩的变形和破坏,从而维持巷道的稳定。巷道开挖后,围岩原有的应力平衡状态被打破,会产生应力重新分布。在应力作用下,围岩会发生变形和破坏。当围岩的变形和破坏发展到一定程度时,会导致巷道失稳,引发安全事故;锚索(杆)网支护是目前矿井巷道支护的主要方式,其作用机制如下:锚杆通过锚固力深入围岩内部,将浅层围岩进行加固,形成组合拱,提高围岩的自承能力;锚索则锚入深部稳定岩层,通过施加预应力,为浅层围岩及锚杆提供强大的拉力支撑,有效控制围岩的深层变形;金属网铺设在围岩表面,可拦截破碎岩块,防止围岩风化剥落,同时将锚杆、锚索的支护力均匀传递到围岩表面,形成整体支护体系;除锚索(杆)网支护外,在特殊地质条件下还会采用锚索(杆)网+喷浆支护、锚索(杆)网+钢带支护等联合支护方式。喷浆可封闭围岩表面,进一步防止围岩风化,增加支护结构的整体性;钢带则能将多个锚杆、锚索连接成一个整体,提高支护结构的承载能力,巷道支护技术的作用不仅在于保障巷道的安全稳定,还能提高矿井的生产效率^[2]。稳定的巷道环境有利于矿井设备的正常运行和人员的安全作业,减少因巷道失稳导致的停产整顿和事故处理时间,从而降低生产成本,提高经济效益。

3 矿井巷道掘进与支护技术应用现状

3.1 掘进技术应用现状

目前,掘锚一体机在我国煤矿巷道掘进中的应用日益广泛,尤其在中厚煤层及地质条件相对稳定的巷道中,其掘支平行作业的优势显著,单进尺可达到传统掘进方式的1.5~2倍。综掘机则在各类煤巷、半煤岩巷中占据主导地位,随着技术的发展,其切割功率不断提升,已能适应部分中硬岩巷道的掘进需求。智能化掘进工艺处于快速发展阶段,部分大型矿井已建成智能化掘进工作面,实现了远程操控、自动截割、智能支护等功能。例如,某矿应用的智能化掘进系统,通过三维扫描与自动规划,使巷道成形误差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内,掘进效率提升30%以上。然而,我国矿井巷道掘进技术仍存在问题。一是部分矿井的智能化掘进设备与系统兼容性不足,不同厂家的设备数据难以共享,形成信息孤岛;二是在复杂地质条件下,如断层、破碎带等区域,智能化设备的自适应能力较弱,仍需人工干预;三是掘锚一体机与综掘机的维护保养技术相对滞后,设备故障率高,影响掘进连续性。

3.2 支护技术应用现状

锚索(杆)网支护已成为我国煤矿巷道支护的主流

方式,在大部分地质条件下支护效果良好。随着技术进步,高强度锚杆、高预应力锚索、大孔径树脂锚固剂等材料的应用,使支护结构的承载能力大幅提升。例如,采用直径22mm、强度1000MPa的锚杆,配合1×19股高强度锚索,可有效控制埋深500m以上巷道的围岩变形。但支护技术应用中也存在一些问题,部分矿井在支护设计时,对地质条件变化的预判不足,导致支护参数不合理,如在破碎围岩中仍采用常规锚杆间距,造成支护强度不够;锚索(杆)的安装质量控制不严,存在锚固力不足、角度偏差过大等问题,影响支护效果;金属网的搭接长度与连接质量不符合规范,易出现漏矸现象;此外,支护与掘进的协同性有待提高,部分矿井因支护作业速度滞后,制约了掘进效率的提升^[3]。

4 矿井巷道掘进与支护技术优化策略

4.1 加强地质勘探,精准掌握地质信息

地质条件作为影响掘进与支护技术选择的核心要素,其复杂性与多变性给施工带来诸多挑战。为此,需积极采用先进的地质勘探技术。可运用三维地震勘探与随掘地震波超前探测相结合的方式,全方位、深层次地剖析地下地质结构,构建精细化的地质模型,从而精准预判巷道前方的岩性变化、断层分布、含水层位置等关键信息;在巷道掘进过程中,借助地质雷达与红外探测技术开展实时监测,及时捕捉地质条件的细微变化。将实时监测数据与预先构建的地质模型进行动态融合,依据融合结果,科学调整掘锚一体机、综掘机的切割速度、深度等参数,同时优化支护方式。例如,当监测到即将进入断层破碎带时,提前降低切割速度与深度,避免对破碎围岩造成过度扰动,并加密锚索(杆)网的支护密度,为巷道提供更可靠的支撑,保障施工安全与高效推进。

4.2 研发与应用先进掘进设备与技术

为了进一步提升煤矿开采效率与安全性,我们需加大对掘锚一体机与综掘机核心技术的研发力度,致力于提高这些设备的可靠性与适应性。具体来说,应聚焦于切割头的创新设计,开发具备大扭矩、高转速特性的新型切割头,并配套采用高性能的耐磨截齿,以显著延长设备的使用寿命。另外,还需对液压系统与电气控制系统进行深度优化,旨在使设备的响应速度得到20%以上的提升,同时故障率降低15%,从而确保掘进作业的高效与稳定。在智能化掘进技术的集成与创新方面,建立统一的数据接口标准,打破设备与系统间的信息壁垒,实现真正的互联互通。更进一步地,我们应研发基于深度学习的自适应控制算法,使掘进设备能够智能地根据围岩

硬度、裂隙发育情况等地质条件自动调整切割参数与推进速度,如在探测到岩石硬度增加时,设备能自动降低推进速度、提高切割扭矩,以避免截齿的损坏,进一步提升掘进作业的智能化与自动化水平。

4.3 改进支护材料与结构设计

在支护材料方面,研发高强度、耐腐蚀的锚杆锚索材料,如碳纤维复合材料锚杆,其重量仅为钢锚杆的1/4,强度却提高50%,且具有良好的抗腐蚀性,适用于高水害矿井。优化树脂锚固剂性能,开发快硬、早强型锚固剂,缩短锚固等待时间,提高支护效率;在结构设计上,根据不同地质条件优化锚索(杆)网支护参数。对于松软围岩,采用“短锚杆+长锚索”的组合方式,锚杆间距缩小至0.8-1.0m,锚索长度增加至8-10m;对于稳定围岩,可适当加大锚杆间距至1.2-1.5m,降低支护成本。同时,推广应用高强度金属网,如菱形网与经纬网复合结构,提高网片的抗撕裂能力。

4.4 发展联合支护与智能支护技术

在煤矿等地下工程领域,为提升支护效果,需大力推动联合支护与智能支护技术的发展。将锚索(杆)网支护与其他支护方式有机结合,构建高效联合支护体系是关键举措。在断层破碎带等地质条件复杂的区域,采用锚索(杆)网+注浆支护的方式成效显著。先通过注浆作业,使水泥浆液等填充围岩裂隙,加固围岩,极大提高其整体性;再进行锚杆锚索支护,增强围岩的稳定性。实践表明,这种联合支护方式可使围岩变形量减少40%以上。同时,积极发展智能支护技术,在锚杆锚索安装设备上加装各类传感器,实时精准监测锚固力、安装角度等关键参数,并将数据及时传输至地面监控中心。借助大数据分析和智能算法,实现支护质量的在线监测与预警,提前发现潜在问题。此外,开发自动锚索(杆)网铺设机器人,与掘锚一体机紧密配合,实现支护作业的全机械化,减少人工在危险环境中的作业时间,降低劳动强度,提高支护效率与质量稳定性,为工程安全高效推进提供有力保障^[4]。

4.5 强化安全管理与人员培训

安全是地下工程作业的重中之重,强化安全管理与

人员培训刻不容缓。要建立健全智能化掘进与支护设备的安全生产管理制度,制定详细、科学的设备操作规程与应急预案,为设备的安全运行提供明确指引。定期对设备进行全面维护保养与安全检查,从设备的机械部件到电气系统,不放过任何一个细节,及时消除设备隐患,确保设备始终处于良好运行状态。加强对作业人员的培训是提升安全管理水平的核心环节。开展智能化设备操作、故障诊断、应急处理等专项培训,邀请行业专家进行授课,结合实际案例进行深入讲解,培养一批既懂掘进技术又掌握智能系统的复合型人才。通过模拟仿真系统进行实操培训,模拟不同地质条件下的作业场景,让操作人员熟悉设备操作要点,提高应对复杂情况的能力。同时,建立科学合理的绩效考核机制,将掘进效率、支护质量、安全指标等与员工薪酬紧密挂钩,激励员工严格规范操作,不断提升作业水平,形成人人重视安全、人人参与安全管理的良好氛围。

结束语

矿井巷道掘进与支护技术是保障矿井安全高效生产的核心要素,当前,我国在相关技术应用上虽有进步,但仍面临诸多挑战,如设备性能局限、支护设计不够精准等。通过加强地质勘探以精准把握地质状况,研发先进设备与技术提升作业效能,改进支护材料与结构增强支护稳定性,发展联合与智能支护技术适应复杂环境,强化安全管理与人员培训筑牢安全防线等优化策略,能够有效突破现有瓶颈,推动矿井掘进与支护技术迈向新高度,为矿井的可持续发展和安全生产奠定坚实基础。

参考文献

- [1]夏金刚.煤矿井下顶板支护质量研究[J].黑龙江科学,2021,12(14):112-113.
- [2]蔡海峰.煤矿井下巷道掘进顶板的支护技术[J].江西化工,2020,(03):365-366.
- [3]赵芹香.巷道支护技术在煤矿井下掘进中的应用[J].精品,2020,000(001): P.197-197.
- [4]任高岭.巷道支护技术在煤矿井下掘进中的应用[J].石化技术,2020,v.27(09):301+305.