

煤矿掘进支护技术在复杂地质条件下的应用分析

韩振东

鄂尔多斯市国源矿业开发有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017100

【摘要】：随着我国煤炭资源开采深度不断加大，复杂地质条件下煤矿掘进作业也越来越多，支护技术是保证煤矿掘进安全、提高施工效率的关键环节，支护技术的适配性、可靠性直接影响到煤矿开采的安全性和经济性。本文根据复杂地质条件的主要特点，对目前常用的煤矿掘进支护技术的适用原理和应用要点进行了系统的分析，研究了支护技术应用过程中存在的共性问题，提出了相应的优化措施，为复杂地质条件下煤矿掘进支护工作科学开展提供理论依据和技术支持。

【关键词】：煤矿掘进；支护技术；复杂地质；围岩稳定；优化策略

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.041

煤炭是我国能源结构的核心，对国民经济起着重要的作用。浅部煤炭资源枯竭之后，开采向深部推进，掘进工作面地质愈加繁杂，软弱夹层、破碎带、断层等状况频繁出现，围岩强度低、结构松散、应力不均，容易造成巷道坍塌等安全事故，危及人员安全，拖延工期、增添成本，限制煤炭产业的可持续发展。掘进支护的主要目的就是控制围岩变形、加固岩体，给作业提供安全保证。复杂的地质条件对于支护技术的适应性、强度以及工艺要求更高，传统的支护技术已经不能满足需要了。因此，系统研究它的应用、明确它的适用场景、解决技术难题，对提高掘进的安全性、效率，推动煤炭产业的高质量发展有重大意义。本文根据复杂的地质条件以及支护技术现状，对它的应用进行研究，给工程实践提供借鉴。

1 复杂地质条件的核心特征及对掘进支护的影响

1.1 复杂地质条件的核心类型与特征

煤矿复杂地质条件是影响掘进作业安全、制约支护效果的各种地质现象的总称，结合我国煤矿开采实际，核心分为四类。第一类是软弱围岩，以泥质岩、页岩为主，岩体强度低、胶结性差，遇水极易软化膨胀，完整性与自稳能力弱，掘进扰动下易产生塑性变形，给支护结构带来持续荷载。第二类是破碎围岩，多分布于断层、褶曲等构造发育区，受构造运动影响岩体节理裂隙密布，整体性严重破坏呈松散状，自稳时间极短，易坍塌掉块，支护难以找到可靠受力点。第三类高应力地质，随开采深度增加，自重与构造应力显著提升，围岩易剧烈变形甚至发生冲击地压。第四类含水地质，地下水会大幅降低岩体强度，静水压力带来额外荷载，还可能引发突水、突泥等重大灾害。

1.2 复杂地质条件对掘进支护的核心影响

复杂地质条件对煤矿掘进支护的影响贯穿施工全过程。大幅降低围岩自稳能力，显著增加支护难度。复杂地质下的岩体普遍存在强度低、完整性差、遇水软化等问题，掘进作业中极易发生变形、坍塌，支护结构需承担更大荷载，且必须在极短时间内完成作业以防止围岩失稳，对支护技术的及时性与可靠

性提出了更高要求。加剧支护结构受力的复杂程度，极易导致支护结构失效。复杂地质中应力分布不均且呈动态变化，支护需同时应对围岩压力、地下水、瓦斯等多重因素，常出现结构变形、断裂、脱落等问题，如破碎围岩中普通锚杆易托盘脱落、锚索预应力快速损失。

2 复杂地质条件下常用煤矿掘进支护技术的应用分析

2.1 锚杆支护技术

锚杆支护技术是煤矿掘进支护中最常用的技术之一，它的基本原理就是用锚杆将锚杆植入围岩内，利用锚杆和围岩之间的摩擦力、粘结力，把松散、破碎的围岩锚固成一个整体，提高围岩自承能力，控制围岩变形。该技术施工方便、造价低、支护效果好，适用于复杂的地质条件下使用，但是需要根据地质情况来确定参数。软弱围岩地质中锚杆支护要重点解决锚固力不足问题，一般采用高强度锚杆配合树脂锚固剂，增加锚杆长度，加密锚杆布置，保证锚杆能深入稳定的岩层中形成有效的锚固。

2.2 锚索支护技术

锚索支护技术属于高强度支护技术，其原理同锚杆支护相似，但是锚索的长度更长，承载能力更强，主要用在复杂的地质条件下围岩压力大、变形量大的巷道支护上，能有效地控制深部围岩变形，弥补了锚杆支护在高强度支护方面的不足。锚索支护一般与锚杆支护配合使用，形成锚网索联合支护体系，增大支护强度和可靠程度。高应力、大断面巷道掘进时，锚索支护可以深入到稳定的岩层里，把围岩的压力传给深部稳定的岩体，减小浅部围岩的应力集中，控制巷道顶板下沉。

2.3 喷射混凝土支护技术

喷射混凝土支护技术是通过喷射设备将混凝土混合料均匀喷射至巷道围岩表面，形成一层坚硬的混凝土层，包裹围岩，起到封闭、加固、防护的作用，其核心原理是利用混凝土的强度和黏结力，阻止围岩风化、掉块，控制围岩变形，同时为锚杆、锚索支护提供辅助支撑。该技术具有施工速度快、适应性

强、封闭性好等优势，在复杂地质条件下的软弱围岩、破碎围岩巷道中应用广泛。在软弱围岩地质中，喷射混凝土可快速封闭围岩表面，防止围岩遇水软化、风化，减少围岩变形，提升锚固效果。

2.4 型钢支架支护技术

型钢支架支护技术属于刚性支护技术，主要用工字钢、U型钢等型钢加工成支架结构，在巷道内安装使用，承受围岩压力，控制巷道变形，适用于围岩压力大、变形剧烈、破碎严重的复杂地质条件，如高应力、破碎围岩、软岩巷道等。该技术具有支护强度大、抗变形能力强等特点，能很好地抵抗围岩剧烈变形、坍塌的风险。高应力地质环境下的型钢支架可以承受较大的围岩压力，防止巷道变形太大，保证巷道空间稳定。型钢支架在破碎的围岩地质中可以迅速形成支护结构，支撑围岩，防止围岩坍塌，给后续支护作业提供安全保障。

2.5 复合支护技术

复杂地质条件下，单一支护技术往往难以满足支护需求，因此复合支护技术得到广泛应用。复合支护技术是将两种或两种以上的支护技术结合使用，充分发挥各类支护技术的优势，实现优势互补，提升支护的整体性、可靠性和抗变形能力，适用于各类复杂地质条件，尤其是极端复杂地质环境。锚网索联合支护是将锚杆、锚索、金属网结合使用，锚杆负责浅部围岩的加固，锚索负责深部围岩的控制，金属网负责防止围岩掉块，三者协同作用，提升支护强度和可靠性，适用于高应力、破碎围岩、软岩等复杂地质条件。

3 复杂地质条件下煤矿掘进支护技术应用存在的问题

3.1 支护方案设计缺乏针对性

目前部分煤矿在复杂的地质条件下掘进支护方案设计上还存在照搬照抄简单地质条件支护方案的情况，没有对地质情况进行详细的勘察和分析，没有根据具体的地质情况来调整支护参数和支护方式。部分矿井支护设计仍然以经验为主，支护密度普遍偏大，造成支护材料的浪费。同时对于围岩的应力状态、破碎程度、含水情况等关键参数掌握不够全面，造成支护方案和实际地质条件不匹配，出现支护强度不够或者过度支护的情况。支护强度不够会造成围岩变形、支护失效，造成安全事故。过度支护会增加施工成本，降低施工效率。

3.2 施工质量控制不到位

施工质量是保证支护效果的前提，在实际施工中，部分煤矿存在着施工质量控制不到位的现象。锚杆、锚索施工质量不合格，钻孔精度不够、锚固剂搅拌不充分、锚杆预紧力不足、锚索注浆不饱满等都会造成锚杆、锚索的锚固效果不好，不能起到支护的作用。喷射混凝土施工质量存在缺陷，混凝土配合比不合理、喷射厚度不均、表面空鼓、开裂等，使混凝土层封

闭性差、强度低，不能有效地保护围岩。型钢支架安装不规范，支架与围岩之间存在间隙没有被填充充实，造成支架受力不均，容易产生变形、断裂。

3.3 支护技术智能化水平偏低

随着煤矿智能化的发展，掘进支护技术的智能化水平也逐渐提高，但是在复杂的地质条件下仍然存在着智能化水平低下的问题。目前大多数煤矿的掘进支护工作仍然以人工操作为主，施工效率低、劳动强度大、容易受人为因素的影响，施工质量不稳定。支护效果监测大多依靠事后检测，缺少实时动态的反馈机制，不能迅速对围岩变形的风险作出反应，不能及时发现支护结构的失效隐患，当围岩出现异常变形的时候，不能及时采取应对措施，容易造成安全事故。智能化支护设备应用范围小，部分设备的适配性差，不能适应复杂的地质条件动态变化，不能实现支护参数的实时调整与优化。

3.4 支护材料性能有待提升

支护材料的性能影响支护效果，在复杂的地质条件下，支护材料的强度、韧性、抗腐蚀性、抗水性等性能要求也更高。目前大部分煤矿使用的支护材料强度、韧性不足，容易在高压的作用下发生断裂。喷射混凝土的抗渗性、抗风化性较差，在含水、风化的地质条件下容易开裂、脱落。型钢支架抗腐蚀能力差，在潮湿的环境下很容易生锈，使用寿命短。新型支护材料研发与应用不广，部分新型支护材料成本高，不能大范围推广使用，造成支护材料性能不能满足复杂地质条件下的支护要求。

3.5 掘支协同性差

复杂地质条件下，掘进与支护作业的协同性直接影响施工效率和支护效果。巷道要求对顶板和两帮及时支护，掘进和支护反复交叉换位作业，相互干扰，不能实现平行作业，形成有效作业线。部分煤矿存在掘进进度与支护进度不协调的问题，要么掘进速度过快，支护作业跟不上，导致围岩长时间处于无支护状态，增加坍塌风险。要么支护进度过慢，影响掘进效率。临时支护技术存在短板，现有临时支护主要有前探梁、支柱加横梁、机载临时支护装置和交叉迈步式自移支架等，这些临时支护只起临时防护作用，不能主动支护围岩。

4 复杂地质条件下煤矿掘进支护技术的优化策略

4.1 优化支护方案设计

首先要加强地质勘察，用先进的技术全面了解掘进工作面的围岩强度、应力状态、破碎程度等主要参数，建立详细的地质数据库，给设计提供科学的依据。同时按照就高不就低的原则，根据井工煤矿地质类型划分标准来确定支护等级。其次根据地质条件优化方案，针对不同的复杂地质类型设计个性化的支护方案，确定适合的支护技术和参数以及方式，杜绝简单地质条件下的支护模式。另外建立动态调整机制，在掘进过程中

实时监测地质变化,当围岩参数超出设计范围时,及时调整支护参数和方式,用数值模拟技术预测围岩变形趋势,保证方案一直与实际地质相适应。

4.2 强化施工质量控制

施工质量控制是保证支护效果的重要手段,要从各方面加强控制。规范施工工序,明确锚杆、锚索、喷射混凝土等各道支护技术操作规范,严格按照设计要求施工,保证钻孔精度、锚固质量、喷射厚度等关键工序合格。提升施工人员的专业水平,加强培训和考核,普及复杂的地质条件下支护施工要点和质量要求,增强操作技能和责任意识,防止由于人的因素而造成质量问题。创建完备的质量检测体系,运用先进的检测手段,就锚杆锚固力、锚索预应力、混凝土强度等重要指标实行全程监测,及时找出并纠正质量上的隐患,保证支护结构稳固可靠。

4.3 推动支护技术智能化

推广智能化支护设备,采用锚杆钻机、喷射混凝土机器人等设备,实现支护作业的自动化、机械化,减少人工操作,掘锚一体机掘支平行作业提高效率和质量稳定性。创建智能化监测预警体系,采用传感器、物联网等手段对围岩变形、支护应力等实施监测,创建数据云平台,依靠算法剖析变形规律和受力特点,出现异常情况时立刻开展分级预警,从而尽早找出失效隐患。推进技术深度融合,开发智能支护决策系统,用勘察、监测数据自动调节参数方案,用远程控制方式减少井下作业人数,全方位提高支护作业智能化程度和安全性能。

参考文献:

- [1] 唐永志.煤矿复杂地层 TBM 掘进巷道新型装配式支护结构工程实践[J].煤炭科学技术,2024,52(08):1-9.
- [2] 张建国.基于地质条件的煤矿掘进支护工艺优化研究[J].煤矿开采,2025,30(06):123-128.
- [3] 李建明.复杂地质条件下煤矿掘进支护技术创新与应用[J].煤炭学报,2023,48(05):1678-1686.
- [4] 王浩.煤矿软岩巷道复合支护技术研究与应用[J].中国煤炭,2023,49(08):98-103.
- [5] 刘军.复杂地质条件下煤矿掘进智能化支护技术研究[J].煤炭科学技术,2024,52(11):45-53.

4.4 优化掘支协同流程

改善掘支协同作业程序,是达成复杂地质条件下提升隧道施工速度的关键方法。首先要科学安排施工进度,根据地质情况和支护要求来制定准确的施工计划,动态协调掘进和支护的进度,防止围岩因长期没有支护而发生失稳,也防止支护滞后影响掘进作业。第二要改进临时支护技术,推进快速喷涂、机载式临时支护等新工艺的运用,给掘支平行作业留出空间,缩减工序间的干扰。还要创建掘进、支护、监测全流程的联动机制,消除衔接障碍。重点推行掘锚一体化作业模式,把钻孔、锚固、喷浆等工序连贯起来形成连续作业流,大幅缩短了工序转换的时间,实现了掘锚的高效联动,全面提高了施工的整体效率。

5 结语

在复杂的地质条件下,煤矿掘进支护遇到围岩自稳差、支护难、风险大、效率低等问题,支护技术的适应性和可靠性决定掘进的安全性和经济性。锚杆、锚索、喷射混凝土、型钢支架和复合支护属于常用技术,要根据地质合理选择。随着开采向深部推进,地质条件越来越复杂,支护技术的要求也越高。未来支护技术将会向着智能化、高效化、绿色化、个性化方向发展,会把智能技术融入支护全过程的智能控制当中,研发出适合复杂地质条件的新型技术及材料,提高方案的精确度,改善掘支协同的衔接,加强理论与实践研究,促进技术创新,给煤矿掘进支护提供强有力的支撑,保障国家能源安全。