

# 深部矿井复杂地质条件下巷道支护技术研究与应用

甘柱恩

江西贤友教育咨询有限公司 江西南昌 330000

**摘要:** 本文聚焦深部矿井复杂地质条件下的巷道支护问题。通过对深部矿井复杂地质条件的特点分析,探讨了现有巷道支护技术的适用性与局限性。研究并提出了一系列适用于该条件的新型巷道支护技术,并结合实际工程案例进行了应用效果分析。结果表明,新型支护技术在保障巷道稳定性、提高生产效率等方面具有显著优势,为深部矿井的安全高效开采提供了有力的技术支持。

**关键词:** 深部矿井; 复杂地质条件; 巷道支护技术; 应用

## 引言

随着浅部煤炭资源的逐渐枯竭,煤矿开采逐渐向深部延伸。深部矿井面临着高地应力、复杂地质构造、围岩破碎等复杂地质条件,给巷道支护带来了巨大挑战。巷道支护的稳定性直接关系到矿井的安全生产和经济效益,因此,开展深部矿井复杂地质条件下巷道支护技术的研究具有重要的现实意义。本研究旨在深入分析深部矿井复杂地质条件对巷道支护的影响,探索适合该条件的高效巷道支护技术,提高巷道支护的可靠性和安全性,减少巷道维护成本,保障深部矿井的正常生产。

## 一、深部矿井复杂地质条件分析

### (一) 高地应力特征

深部矿井由于上覆岩层厚度大,地应力显著增加。高地应力会导致巷道围岩产生较大的变形和破坏,如巷道顶板下沉、两帮收敛、底板鼓起等。不同的地质构造和岩性条件下,高地应力的分布和作用方式也有所不同<sup>[1]</sup>。例如,在断层附近,地应力会发生集中,对巷道支护造成更大的威胁。

### (二) 复杂地质构造影响

复杂地质构造如断层、褶皱等会破坏岩体的完整性,使围岩的力学性质变得更加复杂。断层带附近的岩体破碎,裂隙发育,巷道在穿过这些区域时容易发生冒顶、片帮等事故。褶皱构造会导致岩层的倾角和走向发生变化,使巷道围岩的受力状态更加复杂,增加了支护的难度。

### (三) 围岩特性

深部矿井的围岩通常具有强度低、节理裂隙发育、遇水软化等特点。这些特性使得围岩在受到开采扰动后容易发生变形和破坏,而且变形速度快、持续时间长。

例如,泥岩等软岩在遇水后会迅速软化,强度大幅降低,导致巷道支护结构失效。

## 二、现有巷道支护技术综合分析

### (一) 传统支护技术特点及适用性分析

木支护作为一种历史悠久的支护方式,其最显著的优势在于经济性和施工便捷性。这种支护方式采用原木或方木作为主要支撑材料,在浅部矿井或临时性工程中表现出较好的适用性。然而,木材本身的物理特性决定了其存在诸多缺陷:抗压强度较低,在长期载荷作用下易发生蠕变;耐腐蚀性能差,在潮湿的矿井环境中容易发生腐朽;耐火性不足,存在安全隐患。特别是在深部开采条件下,随着地应力增大和围岩变形加剧,木支护结构往往难以维持稳定,容易发生断裂或整体垮塌<sup>[2]</sup>。

砌碇支护是通过砖石、混凝土等刚性材料构筑拱形结构来实现巷道支护的技术。该技术具有较高的结构强度和长期稳定性,能够提供可靠的支撑力。但其施工过程存在明显不足:需要大量人工砌筑,施工周期长;材料运输和砌筑成本较高;对巷道断面形状要求严格。更为关键的是,砌碇支护属于刚性支护体系,当围岩发生较大变形时,砌体结构内部会产生较大应力集中,导致开裂、剥落甚至整体失稳,在深部高应力条件下这一问题尤为突出。

型钢支护主要采用工字钢、U型钢等金属构件作为支撑骨架,兼具一定强度和可缩性。相比传统支护方式,其安装相对便捷,能够适应一定的围岩变形。然而,型钢支护也存在明显局限性:钢材价格较高导致支护成本上升;在高应力环境下,型钢的可缩量往往不能满足围岩大变形需求;长期使用中易发生锈蚀,影响支护效果。特别是在深部复杂地质条件下,型钢支护常常出现局部

屈曲、整体失稳等问题。

## (二) 新型支护技术发展现状分析

锚杆支护通过将锚杆锚固于围岩深部，形成组合拱承载结构，具有施工快捷、经济性好等优势。该技术能够主动加固围岩，提高岩体自承能力。但在深部复杂条件下，由于围岩破碎、应力集中等因素，常规锚杆面临诸多挑战：锚固剂与破碎围岩粘结强度不足；锚杆杆体在高应力下易发生破断；长期流变作用下锚固力逐渐衰减。这些问题都限制了锚杆支护在深部矿井中的应用效果<sup>[3]</sup>。

作为锚杆支护的升级形式，锚索支护采用高强度钢绞线，具有更大的锚固深度和承载能力。该技术能有效控制顶板下沉和两帮收敛，特别适用于大跨度巷道支护。但其技术复杂性显著增加：需要专用张拉设备；钻孔精度要求高；施工工艺复杂；材料成本昂贵。这些因素都制约了锚索支护的推广应用。

喷锚网联合支护技术综合了喷射混凝土的封闭作用、锚杆的加固作用和金属网的连接作用，形成了复合支护体系。喷射混凝土能及时封闭围岩，防止风化剥落；金属网增强了混凝土层的整体性。然而在深部高应力条件下，该技术仍存在明显不足：混凝土喷层易开裂脱落；锚杆锚固力难以保证；整体支护结构对大变形适应性有限。特别是在软岩或强采动影响区域，支护效果往往不理想。

## (三) 现有支护技术面临的主要挑战

综合分析表明，现有巷道支护技术在应对深部矿井复杂地质条件时存在系统性不足。传统支护方式在强度、可缩性和耐久性等方面难以满足要求；新型支护技术虽然有所改进，但在锚固可靠性、经济性和施工便捷性等方面仍有提升空间。具体表现在：支护结构与围岩变形不协调；长期稳定性难以保证；支护成本居高不下；施工工艺复杂等。这些问题的存在，迫切要求研发更具适应性的新型支护技术体系。

## 三、深部矿井复杂地质条件下巷道支护技术研究

### (一) 新型锚杆锚索材料研究

#### 1. 高强度锚杆锚索

针对深部矿井高地应力环境，重点研发具有超高强度的锚杆锚索材料，通过优化材料成分和热处理工艺，显著提升其抗拉强度和锚固性能。例如，可采用微合金化高强度钢材或碳纤维复合材料制作锚杆锚索，这些材料不仅具有优异的力学性能，还能在复杂应力条件下保持稳定的承载能力。同时，通过表面防腐处理技术，延长材料在潮湿环境中的使用寿命。

#### 2. 可伸缩锚杆锚索

创新设计具有自适应调节功能的可伸缩锚杆锚索系统，采用多级缓冲结构和智能变形机构，能够根据围岩变形量自动调节长度。该系统通过内置的阻尼装置实现能量的渐进式释放，既能有效控制围岩变形，又能避免支护结构因突然过载而失效<sup>[4]</sup>。此外，可伸缩锚杆锚索还配备可视化变形指示装置，便于现场人员实时掌握支护状态。

## (二) 联合支护技术优化

#### 1. 锚杆-锚索-喷浆联合支护

深入研究三种支护方式的协同作用机理，建立科学的参数匹配关系。通过数值模拟和现场试验，优化锚杆的间排距、锚索的预紧力以及喷浆层的配合比。特别注重喷浆材料的高韧性改性，使其既能有效封闭围岩，又能与锚杆锚索形成整体受力体系。同时，开发新型速凝喷浆材料，提高施工效率，确保支护及时性。

#### 2. 围岩注浆加固与支护联合

系统研究注浆材料在深部裂隙岩体中的扩散规律，开发适用于不同地质条件的特种注浆材料系列。重点突破高压注浆工艺技术，实现浆液在破碎围岩中的均匀渗透。注浆后采用分阶段支护策略，先施作临时支护控制变形，待注浆体达到设计强度后再进行永久支护。建立注浆效果评价体系，通过声波测试等手段验证加固质量。

## (三) 智能监测与反馈支护技术

#### 1. 巷道围岩监测系统

构建多参数、立体化的实时监测网络，集成位移传感器、应力计、微震监测等多种监测手段。采用分布式光纤传感技术，实现巷道表面和深部变形的同步监测<sup>[5]</sup>。开发专用的数据采集与传输系统，确保监测数据的实时性和可靠性。建立基于云平台的监测数据中心，实现多源数据的融合分析和可视化展示。

#### 2. 反馈支护决策

研发智能支护决策支持系统，基于监测数据建立围岩稳定性评价模型。系统能够自动识别围岩变形特征，预测发展趋势，并给出最优支护方案。开发移动端应用，实现预警信息的即时推送和应急响应。建立支护效果后评估机制，通过对比分析优化决策算法，形成闭环的智能支护管理体系。

## 四、巷道支护技术应用案例分析

### (一) 工程概况

选取山西晋煤集团胡底煤业1101巷道作为研究对象。该巷道理深达700米，处于强矿压区域，围岩为泥岩与砂质泥岩互层，节理裂隙发育，地应力高达25-

30MPa, 且受多次采动影响, 巷道变形速率曾达80mm/天, 传统支护方案(锚网喷、U型钢支架等)难以控制围岩稳定性, 年巷修成本超7000万元。

## (二) 支护方案设计

针对复杂地质条件, 采用钢管混凝土支架+锚网索主被动协同支护技术, 具体如下: 在主动支护体系方面, 顶板及两帮使用 $\Phi 22\text{mm} \times 2400\text{mm}$ 高强度螺纹钢锚杆, 其间距为 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ , 并配合 $\Phi 17.8\text{mm} \times 8300\text{mm}$ 预应力锚索, 锚索间距 $1.6\text{m} \times 1.6\text{m}$ , 预紧力不低于200kN, 以此形成“锚杆-锚索-钢带”联合承载结构; 底板采用 $\Phi 25\text{mm} \times 3000\text{mm}$ 底角锚索, 间距 $1.6\text{m} \times 1.6\text{m}$ , 可有效控制底鼓变形。在被动支护体系方面, 架设 $\Phi 325\text{mm} \times 10\text{mm}$ 钢管混凝土支架, 支架内填充C50微膨胀混凝土, 支架间距0.8m, 形成刚性支撑框架; 该钢管抗压强度达80MPa, 混凝土轴心抗压强度45MPa, 能使整体支护刚度提升3倍。在注浆加固方面, 采用水泥-水玻璃双液注浆材料, 注浆压力控制在4-6MPa, 对围岩裂隙进行充填, 以提高岩体完整性, 注浆扩散半径可达2.5m。

## (三) 应用效果分析

本支护方案在围岩变形控制、支护结构受力和经济效益等方面均取得了显著成效。

在围岩变形控制上, 方案效果显著。巷道顶板最大下沉量从原支护方案的420mm大幅降至85mm, 两帮收敛量从580mm降至110mm, 底鼓量从350mm降至70mm, 变形控制效果提升80%以上。同时, 采用光纤光栅监测系统实时监测, 支护后6个月内围岩变形速率稳定在1-2mm/月, 能满足巷道长期使用要求。

支护结构受力方面表现良好。锚索测力计显示, 预应力损失率小于5%, 锚索工作应力稳定在150-180kN, 可有效承担围岩荷载。钢管混凝土支架应变监测表明, 其最大应力为45MPa, 仅为设计强度的56%, 具备充足的安全储备。

经济效益十分可观。尽管初期支护成本增加约30%(约9000万元), 但巷道维护周期从6个月延长至5年以上, 累计节约巷修费用超9000万元。此外, 工效提升50%, 单班作业人数从12人减至6人。该项目成果经中国煤炭工业协会鉴定达到国际先进水平, 已在晋能控股集团10余处矿井推广应用。

## (四) 技术创新亮点

主被动协同机制: 锚杆锚索主动加固围岩, 钢管混

凝土支架提供刚性支撑, 形成“内固外撑”复合承载体系, 解决了强矿压巷道支护难题。

材料性能突破: 钢管混凝土支架抗压强度较传统U型钢支架提升2.5倍, 耐腐蚀性能增强, 使用寿命延长至10年以上。

智能监测体系: 集成光纤光栅、应力传感器、位移监测仪等设备, 实现支护结构与围岩变形的实时预警, 指导动态优化支护参数。

该案例为强矿压矿井巷道治理提供了可复制的技术范式, 其经济效益与安全效益显著, 对推动煤炭行业深部开采支护技术升级具有重要示范意义。

## 五、结论与展望

深部矿井复杂地质条件对巷道支护提出了严峻挑战, 现有支护技术存在一定局限性。不过, 新型锚杆锚索材料和联合支护技术的研究与应用, 能有效提高巷道支护的可靠性和安全性, 适应深部矿井复杂地质条件下围岩的大变形。智能监测与反馈支护技术可实现巷道的动态管理, 增强支护的针对性和有效性。实际工程案例也验证了新型巷道支护技术在深部矿井复杂地质条件下具备良好的应用效果和经济效益。

展望未来, 首先要进一步深入研究深部矿井复杂地质条件下巷道围岩的力学性质和变形规律, 从而为支护技术的优化提供更准确的理论依据。其次, 需研发更先进的锚杆锚索材料和支护结构, 提升支护技术的自动化和智能化水平。最后, 要加强巷道支护技术的现场试验和应用推广, 在实践中不断总结经验, 逐步完善支护技术体系。

## 参考文献

- [1] 李桂臣, 杨森, 孙元田, 许嘉徽, 李菁华. 复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 29-45.
- [2] 吕磊. 复杂地质条件下大断面煤巷锚网支护技术研究[J]. 山西冶金, 2022, 45(1): 118-120.
- [3] 刘俊. 基于复杂地质条件巷道顶板支护技术要点分析[J]. 山西化工, 2022, 42(4): 81-82.
- [4] 崔成芳. 复杂地质条件下煤矿巷道掘进支护技术的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(9): 206-207.
- [5] 马华成. 深部开采巷道支护技术研究[J]. 河南科技, 2021, 40(12): 65-67.