

复杂地质条件下煤矿巷道支护技术优化研究

杜崇阳 420503199005021819

摘要：我国煤炭资源开采深度随浅层资源枯竭持续增加，复杂地质条件下的巷道开挖面临高地应力、破碎围岩、地下水侵蚀等多重安全风险，传统支护技术常出现变形超限、支护失效等问题，严重威胁煤矿开采作业安全。本文结合复杂地质条件巷道围岩的变形破坏特征，分析现有支护技术应用存在的不足，从支护参数设计、组合支护工艺、现场监测调控三个维度提出支护技术优化方案，结果表明优化后的支护体系能够有效控制围岩变形，提升巷道稳定性，为同类复杂地质条件下的煤矿巷道支护工程提供参考。

关键词：复杂地质；煤矿巷道；支护技术；优化设计

一、复杂地质条件下煤矿巷道围岩特征与支护难点

我国煤炭主产区普遍存在构造运动活跃现象，深部开采巷道常遭遇断层破碎带、软岩夹层、高承压水等复杂地质条件，此类围岩与常规地质条件下的完整围岩存在显著差异，其力学特性与变形规律更难把控。首先，复杂地质条件下围岩整体完整性差，岩体被节理、裂隙分割为离散块体，围岩自身承载能力大幅降低，开挖后快速出现应力重分布，容易引发片帮、冒顶等突发性灾害。其次，深部复杂地质环境通常伴随较高的原岩应力，软岩围岩具有明显的流变性，开挖完成后变形会长期持续发展，传统刚性支护难以适应围岩的变形特性，容易出现锚杆断裂、钢架扭曲等支护破坏问题。最后，地下水侵蚀会进一步软化围岩，降低岩体结构面摩擦系数，加剧围岩变形速率，同时会腐蚀支护构件，缩短支护结构的使用寿命，增大长期维护成本。

受上述地质特征影响，复杂地质条件下煤矿巷道支护存在三大核心难点：第一，围岩变形量预估难度大，复杂地质构造导致不同区域围岩力学参数差异明显，常规地应力测量结果偏差较大，支护参数设计容易出现强度不足或过度支护问题，既增加了施工成本也埋下安全隐患。第二，单一支护技术适应性差，传统锚杆支护、U型钢支护等单一形式难以同时应对围岩破碎、高地应力、地下水侵蚀多重挑战，经常出现局部支护失效进而引发整体破坏。第三，动态调控机制缺失，多数煤矿支护工程完成后未建立持续的围岩变形监测体系，无法及时发现变形异常并采取补强措施，容易小问题演变为大的安全事故。

二、现有煤矿巷道支护技术应用存在的问题

当前我国多数煤矿针对复杂地质条件巷道仍沿用传统支护工艺，应用过程中暴露出来诸多问题。首先是参数设计不合理，部分工程仍依托经验设计，未结合实际地质勘探结果进行针对性计算，锚杆长度、锚固力、间排距等核心参数要么冗余浪费，要么无法满足围岩控制要求。例如部分煤矿为控制成本盲目缩小锚杆间排距，导致支护密度不足，围岩变形在短时间内超过允许值，不得不进行二次扩修，反而增加了总体成本。

其次，单一支护体系适配性不足，传统的锚喷支护在完整围岩中应用效果良好，但在破碎软岩巷道中，喷浆层容易因为围岩持续变形开裂，锚杆锚固力也会因为围岩破碎无法有效发挥，最终出现整体垮落。而 U 型钢支护属于被动支护，支撑刚度大，无法让围岩释放一定的应力，在高地应力环境下容易被压弯变形，维护成本极高。

最后，现场监测与动态调整机制不完善，很多煤矿仅在支护施工完成后进行一次验收监测，后续开采过程中未持续跟踪围岩变形情况，部分巷道在回采扰动下出现变形加速，无法及时采取补强措施，最终诱发安全事故。同时，很多监测数据仅用于事后分析，没有实现施工过程中的动态调整，导致支护方案无法匹配实际地质条件变化。

三、复杂地质条件下煤矿巷道支护技术优化策略

（一）基于地质勘探的支护参数精细化设计

优化支护技术的首要前提是获取准确的地质参数，施工前应通过钻探、物探结合的方式，全面掌握巷道沿线的围岩结构、地应力大小、地下水分布情况，针对不同地质段划分支护等级，实现差异化参数设计。对于断层破碎带、软岩段等复杂区域，应适当增加锚杆长度，提高锚固等级，将锚杆锚固端设置在稳定岩层内部，保证锚固力满足要求；对于完整围岩段可适当减小支护密度，降低施工成本。同时，应采用数值模拟软件对不同参数下的围岩变形情况进行模拟计算，对比不同方案的控制效果，优选出既满足安全要求又经济合理的支护参数，改变传统经验设计的盲目性。

（二）推广组合式协同支护工艺

针对单一支护技术的不足，复杂地质条件下应采用主动支护与被动支护结合的组合协同支护体系，充分发挥不同支护方式的优势。当前应用效果较好的组合

支护形式为“锚网索-喷射混凝土+钢架”联合支护，该体系中锚杆锚索属于主动支护，能够提前调动围岩自身的承载能力，控制围岩早期变形；金属网能够防止破碎围岩掉落，形成完整的表面防护；钢架能够提供即时的支撑力，限制围岩大变形，喷射混凝土能够封闭围岩，防止地下水侵蚀软化，同时将各个构件连接为整体，共同受力。

（三）建立动态监测与调控机制

支护工程完成后并不意味着管控结束，应建立全周期的围岩变形监测体系，在巷道关键位置布置表面位移测站、顶板离层仪、锚杆应力传感器等监测设备，实时跟踪围岩变形与支护结构受力变化，设定变形预警阈值，当变形速率超过预警值时及时采取补强措施。例如当监测发现顶板离层量超过允许值时，可以在离层区域补打锚索，强化顶板支护；当帮部变形速度过快时，可以补打锚杆并架设帮部钢架，限制帮部变形。通过动态监测与调控，能够及时消除安全隐患，避免支护失效引发的灾害事故。

四、工程应用效果分析

某煤矿埋深 850m 的运输巷道穿过多条断层破碎带，围岩为泥质砂岩，强度低且遇水软化，原设计采用单一锚网支护，施工完成后三个月内顶板最大下沉量达到 380mm，帮部变形量达到 420mm，存在冒顶风险。采用本文提出的优化方案进行补强改造，首先补充地质勘察明确了破碎带分布范围，然后采用“锚网索+U 型钢+喷浆”联合支护优化参数，同时建立了监测体系，改造完成后六个月监测数据显示，顶板最大下沉量稳定在 85mm，帮部最大变形量稳定在 92mm，均满足巷道使用要求，未再出现变形超限问题，证明优化后的支护技术能够有效控制复杂地质条件下的围岩变形，应用效果良好。

五、结论

复杂地质条件下煤矿巷道支护是保障深部煤炭开采安全的核心环节，传统单一支护技术难以适应复杂围岩的变形特性，容易出现支护失效问题。通过精细化地质勘察实现支护参数差异化设计，推广组合式协同支护工艺，建立动态监测与调控机制，能够有效提升支护体系对复杂地质条件的适应性，大幅降低围岩变形量，提升巷道稳定性。该优化方案在工程应用中取得了良好效果，可为同类煤矿巷道支护工程提供借鉴，未来还需要进一步结合智能化监测技术，提升支护优化的动态响应速度，推动煤矿巷道支护技术向精准化、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649-664.
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [3] 柏建彪, 侯朝炯. 深部煤矿巷道围岩控制理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.