

煤矿巷道顶板支护技术应用

彭俊¹ 易幼全²

1. 川南煤业泸州古叙煤电有限公司 四川 泸州 646500

2. 古蔺县宏达煤业有限责任公司 四川 泸州 646000

【摘要】：本文围绕煤矿巷道顶板支护技术展开系统研究，从煤岩体结构特征及顶板破坏机理出发，分析顶板失稳模式及影响因素，归纳锚杆支护、钢架组合支护、喷射混凝土支护及深部高应力巷道控制技术的原理、应用条件及优化策略，重点探讨支护体系与围岩变形协同作用机理，提出科学化设计与施工管理路径，结合数值模拟与现场监测方法实现顶板稳定性动态控制，为煤矿巷道安全开采提供理论依据与工程技术参考。

【关键词】：煤矿巷道；顶板支护技术；技术应用

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.030

引言

巷道顶板稳定性是煤矿安全生产的重要保障，其失稳风险直接影响采掘效率与人员安全。随着深部煤矿开采程度增加及复杂地质条件出现，传统支护模式在高地应力软岩及断层破碎带中逐渐显露局限性。本文从煤岩体结构特征与顶板破坏机理出发，系统梳理顶板支护技术演进过程，分析高应力软岩与复杂地质条件下支护适用性与技术瓶颈，探讨锚杆支护、钢架组合支护、喷射混凝土支护及深部高应力控制技术的综合应用方法，为实现巷道顶板安全、可控与长期稳定提供理论指导与工程实践参考。

1 煤岩体结构特征与顶板破坏机理分析

煤矿巷道顶板稳定性受控于煤岩体结构构造特征、力学性质参数及原岩应力场分布状态等多重因素，其结构特征主要表现为层状沉积结构、节理裂隙发育程度、层间弱面分布形式以及软硬互层组合特征。煤岩体在沉积成岩与构造变形过程中形成显著的各向异性力学性质，顶板岩层通常呈现薄层砂岩、粉砂岩与泥岩互层结构，岩性差异导致弹性模量、泊松比、抗压强度与抗拉强度等参数存在明显分异，从而在巷道开挖扰动条件下产生应力重分布与应变集中现象。围岩在原岩应力场作用下处于三向受压平衡状态，当巷道掘进破坏原有应力平衡后，围岩应力路径发生转移，顶板区域形成拉应力集中区与剪应力集中区，叠加构造应力与采动应力影响，易诱发顶板弯曲变形、层间滑移与裂隙扩展。根据岩体力学理论与弹塑性力学分析方法，顶板破坏过程通常经历弹性变形阶段、塑性屈服阶段与失稳破坏阶段，其破坏模式包括剪切破坏、张拉破坏与剪张复合破坏等类型。对于节理裂隙发育的顶板岩层，裂隙面作为应力弱化面，在法向应力降低与切向应力增大条件下产生滑移破坏，形成块体离层与冒落结构；对于软岩顶板，在高地应力与围压释放共同作用下，易出现流变变形与蠕变失稳现象，导致顶板下沉与围岩收敛持续发展。顶板离层破坏机理与岩层厚度、层间结合强度及锚固深度密切相关，当顶板厚度较小且存

在弱面时，弯曲拉应力超过岩石抗拉强度即发生离层破坏；当顶板厚度较大且整体性较强时，破坏形式则以拱形结构失稳与关键块体失稳为主。基于关键块体理论与结构面控制理论分析，顶板稳定性实质上取决于结构面几何组合关系与块体运动学条件，当结构面交线形成可移动块体且满足滑移判据时，即构成潜在失稳体。综合考虑地质构造条件、岩体结构类型与应力环境特征，可将顶板破坏机理归纳为应力集中诱导型破坏、结构面控制型破坏与软化流变型破坏三种基本模式，不同破坏模式对应差异化支护参数设计原则与支护结构组合形式，因此对煤岩体结构特征与顶板破坏机理进行系统分析，是实现巷道顶板支护技术科学设计与安全控制的理论基础。

2 煤矿巷道顶板支护技术发展现状分析

2.1 传统支护模式与联合支护体系演变

煤矿巷道顶板支护技术经历了由被动承载型支护向主动加固型支护、由单一构件支护向多元组合支护体系演变的发展过程。传统支护模式以木支架、型钢棚架及砌碇支护为代表，其理论基础主要建立在围岩压力假说与拱形承载理论之上，通过构建刚性支撑结构以抵抗顶板荷载传递，实现围岩变形的外部约束。然而，该类支护形式在围岩应力重分布与塑性区扩展条件下，易产生应力集中与支护构件失稳破坏，难以适应高地应力与复杂构造环境。随着岩体力学理论与围岩控制理论的发展，锚杆支护技术作为主动支护体系的核心构件得到广泛应用，其通过锚固作用将分散岩体整合为整体承载结构，形成组合拱结构与受力共同体，显著提升顶板整体稳定性。在此基础上，联合支护体系逐步形成，以锚杆支护、锚索支护、钢架支护与喷射混凝土支护为基本单元，通过合理配置支护参数、间距布置与锚固长度，实现围岩控制的分区分级管理。联合支护体系强调支护构件与围岩之间的相互作用机理，注重初期支护与二次支护的协同配置，依托弹塑性分析方法与数值模拟技术优化支护结构刚度与承载能力匹配关系，实现由单一抗力控制向变形协调控制的转变。支护体系演变过程体现出由经验设计

向理论指导设计、由静态承载理念向动态调控理念的转型特征，为深部巷道顶板控制提供了系统化技术框架。

2.2 高应力软岩条件下支护技术适用性分析

在高地应力与软岩围岩条件下，顶板岩体表现出低强度、高塑性与显著流变特征，其力学响应具有明显的非线性与时效性特征，常规支护体系面临承载能力不足与变形协调失衡问题。软岩顶板在原岩应力释放与采动扰动作用下，塑性区迅速扩展，围岩收敛变形呈持续增长趋势，若支护结构刚度配置不当，易产生锚杆拉断、锚固失效与钢架屈曲等失稳现象。因此，高应力软岩条件下支护技术应以提高围岩整体强度与增强抗剪抗拉能力为核心目标，采用高预应力锚索支护技术、全长锚固技术与高强度喷射混凝土支护技术相结合的综合控制模式。高预应力锚索支护通过施加初始张拉力改善顶板应力状态，抑制裂隙扩展与层间滑移，全长锚固技术通过增强锚固体与围岩之间的粘结强度，提升围岩整体性与抗变形能力。与此同时，应加强围岩变形监测与应力监测技术应用，依托岩体蠕变模型与弹塑性分析模型对支护效果进行动态评估，优化支护参数配置，实现支护结构与围岩变形的协调发展。高应力软岩条件下支护技术的适用性分析强调支护体系柔性匹配原则，通过构建高强度与高延性相结合的支护结构体系，确保顶板稳定性与巷道长期安全运行。

2.3 复杂地质条件下顶板支护技术瓶颈问题

在断层构造、褶皱构造及岩性突变等复杂地质条件下，顶板岩体结构破碎程度高，节理裂隙发育密集，围岩应力场分布呈显著不均匀状态，顶板破坏机理呈多模式耦合特征，给支护技术设计与实施带来显著挑战。复杂地质条件下支护技术瓶颈主要体现在支护参数确定缺乏精确性、支护构件布置难以覆盖潜在失稳区域以及施工质量控制难度较大等方面。由于结构面几何组合复杂，关键块体识别与运动学分析难度增加，传统经验法难以准确判定潜在失稳块体规模与运动方向，导致支护结构承载能力与实际荷载匹配不足。此外，断层带及破碎带岩体力学性质离散性显著，锚固体粘结强度与围岩强度差异较大，易产生局部失效与连锁破坏。复杂地质条件下顶板支护还面临施工空间受限与设备布置受限问题，影响支护构件安装精度与张拉质量。针对上述瓶颈，应加强地质超前探测技术、地质雷达探测技术与围岩分类评价技术应用，构建以精细化地质信息为基础的支护设计体系，通过数值模拟分析与现场监测反馈实现支护参数动态优化。同时，应完善施工工艺标准化管理与质量检测体系，强化支护构件材料性能控制与施工过程监测，提升支护体系整体可靠性。复杂地质条件下顶板支护技术瓶颈问题的突破，是实现煤矿巷道安全高效开采的重要技术前提。

3 煤矿巷道顶板支护技术应用

3.1 锚杆支护技术在顶板稳定中的应用

锚杆支护技术作为煤矿巷道顶板控制体系中的核心主动支护形式，其理论基础建立在围岩控制理论、组合拱理论与加固拱效应理论之上，通过锚固体与围岩之间的粘结作用、摩擦作用及机械咬合作用，将离散岩块整合为具有整体承载能力的受力结构，从而实现顶板稳定性提升。在具体应用过程中，应依据围岩分类结果与原岩应力分布特征，科学确定锚杆长度、间距、排距、锚固方式及预紧力参数，确保锚固段穿越潜在离层面与弱结构面，实现有效锚固深度覆盖塑性区范围。全长锚固技术与端部锚固技术的合理选择，对锚固体受力传递路径与抗剪抗拉性能具有决定性影响；高预应力锚杆支护通过施加初始压应力改善顶板应力状态，抑制裂隙扩展与层间滑移，增强围岩整体性。结合锚索支护技术构建多层次锚固体系，可实现浅部围岩加固与深部围岩控制的协同作用，形成承载结构连续性与应力分布均衡性相统一的支护格局。同时，应强化锚杆施工质量与拉拔试验检测，通过应力监测与变形监测手段评估锚固效果，优化支护参数，实现顶板稳定的动态控制与长期稳定。

3.2 钢架与组合支护技术应用

钢架支护技术作为刚性支护体系的重要组成部分，在破碎围岩与高变形巷道条件下发挥关键承载作用，其结构形式包括工字钢支架、拱形钢架及可缩性钢架等类型，依托拱形承载理论与结构力学分析方法形成稳定受力体系。钢架支护通过构建连续受力框架，对顶板荷载进行均匀分配，抑制局部失稳与大变形发展。然而单一钢架支护在高应力环境中易产生应力集中与构件屈曲风险，因此在实际应用中通常与锚杆支护、锚索支护及喷射混凝土支护相结合，形成刚柔耦合的组合支护体系。组合支护技术强调支护构件之间的力学协同关系，通过锚杆提供主动加固作用、钢架承担集中荷载、喷射混凝土形成封闭受力壳体，实现围岩控制的多层次结构化管理。支护参数设计应结合数值模拟分析结果与现场监测数据，优化钢架间距、截面尺寸与连接方式，确保结构稳定性与变形协调性。通过实施初期支护与永久支护的分阶段布置，构建承载能力渐进增强的支护结构体系，提高顶板控制效果与巷道服务年限。

3.3 喷射混凝土支护技术应用

喷射混凝土支护技术在巷道顶板控制中承担封闭围岩表面、增强整体刚度与防止风化剥落的重要功能，其作用机理基于壳体结构理论与粘结加固机理，通过在围岩表面形成连续受力层，实现应力重新分布与裂隙封闭。喷射混凝土材料性能参数如抗压强度、抗拉强度与弹性模量直接影响支护效果，应根据围岩类别与应力环境合理选择配合比与厚度设计。钢纤维喷射混凝土技术通过提高材料延性与抗裂性能，增强喷层抗冲击

与抗剪切能力,适用于破碎围岩与高应力巷道环境。喷射混凝土与锚杆支护联合应用,可形成锚喷支护体系,通过锚杆提供内在加固作用,喷层形成外部封闭壳体,实现内外协同控制机制。施工过程中应严格控制喷射厚度均匀性与粘结质量,避免空鼓与脱层现象,结合回弹率控制与强度检测技术,确保喷层结构完整性与承载能力。通过建立喷射混凝土支护质量评价体系与耐久性评估机制,可提升顶板长期稳定效果与安全保障水平。

3.4 深部高应力巷道顶板控制技术应用

深部煤矿巷道在高地应力与高地温环境下呈现围岩强烈变形与能量积聚特征,顶板稳定控制面临应力集中显著、塑性区扩展迅速及冲击地压风险增加等复杂问题。深部高应力巷道顶板控制技术应以应力调控与能量释放为核心理念,构建多元化主动支护与卸压技术相结合的综合控制体系。高强度锚索支护与超长锚固技术通过增强深部围岩整体承载能力,实现深浅层协同控制;应力卸压孔布置技术通过改变围岩应力分布,降低局部应力集中程度,减少冲击地压发生概率。结合数值模拟

分析与地应力测试结果,优化支护结构刚度与承载能力匹配关系,实现围岩变形控制与能量释放调控的协调统一。同时,应强化顶板离层监测、围岩应力监测与微震监测技术应用,构建动态预警机制与实时反馈系统,为支护参数调整提供科学依据。通过综合应用高强度支护技术、应力调控技术与监测预警技术,可实现深部高应力巷道顶板稳定的系统化控制与安全高效运行目标。

4 结语

本文通过对煤岩体结构特征、顶板破坏机理及巷道顶板失稳模式的系统分析,阐明了围岩应力分布、裂隙扩展及块体运动对顶板稳定性的影响,全面总结了锚杆支护、钢架组合支护、喷射混凝土支护及深部高应力控制技术的应用方法与优化策略,提出基于围岩力学特性与支护结构协同作用的技术路径,结合监测与数值模拟手段实现支护参数动态优化,为煤矿巷道顶板支护设计提供科学依据,推动巷道安全开采与支护技术体系化发展。

参考文献:

- [1] 杜永刚.煤矿巷道掘进施工及顶板支护技术研究[J].能源与节能,2024,(04):181-184.
- [2] 赵忠强.煤矿巷道掘进施工及顶板支护技术研究[J].能源与节能,2023,(11):108-110.
- [3] 周效文.煤矿巷道掘进支护技术存在的问题及对策[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(17):240-241.
- [4] 刘岩.浅谈煤矿井下巷道掘进顶板支护技术[J].技术与市场,2018,25(03):102-103.
- [5] 刘虎.煤矿井下巷道掘进顶板支护技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2020,(12):29-30.
- [6] 金雷委.煤矿巷道支护技术的研究及应用[J].内蒙古煤炭经济,2019,(21):52-53.