

# 深部煤矿开采中巷道支护技术优化及稳定性研究

鲁杰

山西宁武德盛煤业有限公司 山西 忻州 036700

**【摘要】**：随着煤矿开采深度持续增加，深部巷道所处力学环境愈发复杂，围岩变形量大、失稳风险高的问题日益突出，严重制约开采效率与安全生产。本文结合深部煤矿开采实际工况，分析巷道围岩力学特性与失稳机理，评估传统支护技术的局限性，优化设计新型复合支护技术体系与动态参数，构建多维度稳定性评价方法，探讨支护智能化发展方向，为深部巷道支护优化与稳定性控制提供实践参考，助力深部煤矿安全高效开采。

**【关键词】**：深部煤矿；巷道支护；技术优化；围岩稳定性；失稳机理

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.013

## 引言

煤炭作为我国能源结构中的核心组成部分，随着浅部资源的逐渐枯竭，开采重心不断向深部转移。深部开采过程中，巷道穿越的岩体受到高应力、高渗透压、高温等多因素耦合影响，围岩变形破坏现象频发，支护失效问题时有发生，不仅增加开采成本，还易引发顶板垮落、巷道坍塌等安全事故。巷道支护作为控制围岩变形、保障开采安全的关键环节，其技术水平直接决定深部煤矿开采的可行性与经济性。当前传统支护技术已难以适配深部复杂力学环境，支护参数不合理、支护方式单一等问题显著，亟需通过技术优化与机理研究，提升支护系统的承载能力与适应性，实现深部巷道长期稳定。开展深部煤矿开采中巷道支护技术优化及稳定性研究，对推动煤炭行业高质量发展、保障能源安全具有重要现实意义。

## 1 深部巷道围岩力学特性与失稳机理

### 1.1 深部岩体力学环境特征

深部岩体力学环境与浅部存在本质差异，高应力是其最核心的特征，随着开采深度每增加 100m，岩体垂直应力约增加 2.5-3.0MPa，当深度超过 1000m 时，常出现高地应力现象，岩体处于塑性变形阶段。深部岩体经历长期地质演化，内部存在大量节理、裂隙等缺陷，这些缺陷在高应力作用下易发生扩展、贯通，导致岩体完整性下降，力学强度显著降低。同时，深部岩体受地下水渗透影响，水分侵入岩体内部后，会软化岩体结构，降低颗粒间黏结力，进一步加剧岩体破坏。此外，深部开采过程中产生的扰动应力，会与原始地应力叠加，形成复杂的应力场分布，导致巷道围岩应力集中，增加失稳风险。温度升高也是深部岩体力学环境的重要特征，深度每增加 100m，岩体温度约升高 3℃，高温环境会改变岩体的物理力学性质，降低其抗压、抗剪强度，影响支护系统的长期稳定性。

### 1.2 巷道变形破坏模式

深部巷道变形破坏呈现出明显的非线性、大变形特征，破坏模式具有多样性且相互叠加。顶板下沉是最常见的破坏形式，受高应力作用，顶板岩体发生塑性弯曲、下沉，严重时会出现

出现顶板离层、冒落，甚至导致巷道顶部堵塞。巷道两帮鼓出也是典型破坏模式，两帮岩体在水平应力作用下，发生向巷道内部的塑性挤出，形成鼓包，随着变形加剧，两帮岩体可能出现裂隙扩展、块体脱落，进一步压缩巷道断面。底板隆起现象在深部巷道中尤为突出，高应力作用下底板岩体发生向上隆起，导致巷道底板标高升高，影响设备通行与开采作业，严重时底板会出现开裂、错动，破坏巷道整体结构。此外，深部巷道还会出现全断面收缩变形，巷道周边岩体均向中心挤压，导致巷道断面尺寸大幅缩小，影响开采正常进行，这种变形模式多发生在松软岩层或高应力集中区域，治理难度较大。

### 1.3 失稳主控因素识别

深部巷道失稳是多因素共同作用的结果，其中地应力分布是核心主控因素，高地应力导致围岩应力集中，超过岩体承载极限后，必然引发变形破坏。岩体力学性质直接决定围岩的抗变形能力，岩体完整性差、强度低、遇水软化的区域，巷道失稳概率显著升高，岩体内部节理裂隙的发育程度与分布状态，会加剧围岩的破坏进程，裂隙贯通后形成的块体结构易发生失稳滑落。支护技术与参数的合理性对巷道稳定性至关重要，支护强度不足、支护方式与围岩条件不匹配、参数设计不合理，会导致支护系统无法有效约束围岩变形，进而引发支护失效与巷道失稳。开采扰动也是重要影响因素，采掘作业产生的震动会破坏岩体结构，扰动应力与原始地应力叠加，进一步加剧应力集中，诱发巷道失稳。地下水的作用不可忽视，地下水的渗透会软化岩体、降低岩体强度，同时产生水压力，增加围岩变形与失稳风险。

## 2 巷道支护技术体系优化设计

### 2.1 传统支护技术评估

传统深部巷道支护技术以锚杆支护、锚索支护、砌碛支护为主，在浅部开采中发挥了一定作用，但适配深部复杂环境时存在明显局限性。锚杆支护作为常用支护方式，其锚固力受岩体完整性影响较大，在松软、破碎岩体中，锚杆易出现锚固失效，无法有效约束围岩大变形，且传统锚杆多为刚性支护，难

以适应围岩的塑性变形，易发生杆体断裂。锚索支护虽能提供较大的锚固力，但其施工工艺复杂、工期长，且对施工质量要求较高，在高应力、大变形巷道中，锚索易出现拉伸断裂、锚固端脱落等问题。砌碛支护刚度大、承载能力强，但重量大、施工效率低，且柔性不足，无法适应围岩的变形需求，当围岩发生较大变形时，砌碛结构易出现开裂、坍塌，支护效果不佳。传统支护技术多采用单一支护方式，缺乏针对性，未充分考虑深部岩体的力学特性与变形规律，支护参数多依据经验设计，与实际工况存在偏差，难以实现巷道长期稳定。

## 2.2 新型复合支护技术

结合深部巷道围岩大变形、高应力的特点，新型复合支护技术以“刚性支护+柔性支护”结合为核心，兼顾支护强度与变形适应性，大幅提升支护效果。锚杆-锚索-喷浆复合支护体系是当前应用最广泛的新型支护方式，通过锚杆锚固浅层岩体，锚索锚固深层稳定岩体，喷浆封闭围岩表面，形成多层防护结构，既能提供足够的支护强度，又能适应围岩的塑性变形。喷浆层采用高性能喷射混凝土，添加速凝剂与增强剂，提高喷浆层的强度与粘结力，封闭岩体裂隙，防止地下水侵入与岩体风化，同时增强锚杆与围岩的结合力。在松软、破碎岩体巷道中，引入U型钢支架与锚网索联合支护，U型钢支架具有良好的柔性及承载能力，能适应围岩的大变形，锚网索约束岩体变形，两者协同作用，有效控制围岩坍塌。此外，注浆加固技术与复合支护结合，通过向岩体裂隙中注入注浆材料，胶结岩体颗粒，提高岩体完整性与力学强度，为支护系统提供可靠的承载基础，尤其适用于裂隙发育、岩体破碎的深部巷道，显著提升巷道稳定性。

## 2.3 动态支护参数优化

深部巷道围岩应力与变形处于动态变化过程中，静态支护参数无法适应工况变化，动态支护参数优化需结合巷道所处深度、岩体力学性质、应力分布等实际条件，实现参数的动态调整。锚杆参数优化需根据岩体强度与裂隙分布，确定锚杆直径、长度与间距，高强度岩体中可采用较小直径锚杆，间距适当增大；松软破碎岩体中需增大锚杆直径与长度，缩小间距，提高锚固密度，同时采用高强度锚杆材料，提升锚固力。锚索参数优化重点调整锚索长度、直径与锚固深度，深部高应力区域需增加锚索长度，深入稳定岩体，确保锚索能有效传递支护力，锚索间距根据应力集中程度合理调整，应力集中区域适当缩小间距。喷浆层厚度与强度需结合岩体破碎程度优化，岩体破碎严重区域增加喷浆厚度，采用高强度喷射混凝土，增强喷浆层的承载能力与抗裂性能。动态支护参数优化需建立实时监测机制，根据围岩变形与应力变化数据，及时调整支护参数，确保支护系统始终与工况匹配，实现巷道动态稳定控制。

## 3 深部巷道稳定性评价方法

### 3.1 多场耦合稳定性模型

深部巷道围岩稳定性受应力场、渗流场、温度场多场耦合影响，单一场模型无法全面反映围岩稳定性状态，多场耦合稳定性模型结合各场之间的相互作用，实现稳定性精准评价。模型以岩体力学特性为基础，融入地应力分布、地下水渗透规律、温度变化特征，构建应力-渗流-温度耦合方程，明确各场之间的耦合机制，应力场影响岩体裂隙发育，进而影响渗流场分布，温度场改变岩体力学性质，间接影响应力场与渗流场。模型考虑开采扰动的影响，将采掘作业产生的扰动应力纳入耦合方程，模拟扰动作用下各场的变化规律，预测围岩变形与失稳趋势。通过多场耦合模型，可精准计算巷道周边应力分布、位移变化、渗流量与温度分布，为稳定性评价提供可靠的数据支撑，克服单一模型评价的局限性。

### 3.2 评价指标体系建立

评价指标体系需全面覆盖影响深部巷道稳定性的关键因素，遵循科学性、实用性、针对性原则，分为岩体力学指标、应力指标、变形指标、支护指标四个维度。岩体力学指标包括岩体抗压强度、抗剪强度、完整性系数、裂隙发育程度，直接反映岩体的承载能力与稳定性；应力指标包括最大主应力、最小主应力、应力集中系数，体现巷道围岩应力分布状态；变形指标包括顶板下沉量、两帮鼓出量、底板隆起量、巷道断面收缩率，直观反映围岩变形程度；支护指标包括锚杆锚固力、锚索预紧力、喷浆层强度、支护结构完整性，评价支护系统的有效性。各指标根据重要程度赋予不同权重，采用层次分析法确定权重系数，避免主观因素影响，通过指标量化计算，实现巷道稳定性的分级评价，明确巷道失稳风险等级。

### 3.3 数值模拟验证

数值模拟技术为深部巷道稳定性评价与支护参数优化提供了高效、精准的手段，常用模拟软件包括FLAC3D、ANSYS等，可模拟巷道开挖与支护过程中的应力分布、围岩变形规律。模拟过程中，根据实际地质资料与力学参数，构建巷道三维模型，还原深部岩体力学环境、地质结构与支护结构，设定开挖与支护工况，模拟不同支护参数下的围岩变形与应力变化。通过数值模拟，验证多场耦合稳定性模型的合理性与评价指标体系的科学性，对比不同支护方案的效果，优化支护参数。模拟结果与现场监测数据进行对比，修正模型参数，提高模拟精度，确保评价结果的可靠性，为巷道支护优化与稳定性控制提供科学依据，减少现场试验的工作量与成本。

## 4 深部巷道支护智能化发展方向

### 4.1 智能监测预警系统

智能监测预警系统是实现深部巷道动态稳定控制的核心，通过布置传感器实时采集围岩应力、位移、渗流量、温度等数

据,实现数据的实时传输、分析与预警。传感器采用无线传输技术,避免线缆布置对开采作业的影响,覆盖巷道全断面,确保监测数据的全面性与准确性。系统集成数据处理模块,采用大数据与人工智能技术,对监测数据进行实时分析,识别数据异常变化,预判围岩变形与失稳趋势,当数据超过预警阈值时,自动发出预警信号,提醒工作人员及时采取防控措施。智能监测预警系统可实现监测数据的可视化展示,便于工作人员实时掌握巷道稳定性状态,为支护参数调整与防控决策提供数据支撑,提升巷道安全管理的智能化水平。

#### 4.2 自适应支护技术展望

自适应支护技术是深部巷道支护智能化的重要发展方向,核心是实现支护系统与围岩变形的动态匹配,根据围岩应力与变形变化,自动调整支护力与支护参数。自适应支护系统集成智能监测、自动控制与执行机构,通过传感器实时获取围岩状态数据,控制系统根据数据反馈,自动调整锚杆预紧力、锚索拉力与喷浆压力,确保支护系统始终处于最佳工作状态。采用智能锚杆、智能锚索等新型支护构件,可实时监测自身受力状态,实现支护力的精准调控,同时具备自我诊断功能,及时发现支护构件的损坏情况,便于及时更换。自适应支护技术可大幅减少人工干预,提高支护效率与效果,适应深部巷道复杂多变的工况,实现巷道长期稳定的智能化控制。

#### 4.3 深部开采特殊环境应对策略

深部开采面临高地应力、高渗透压、高温等特殊环境,需

针对性制定应对策略,保障支护系统稳定性与开采安全。高地应力环境下,采用柔性支护与刚性支护结合的方式,提升支护系统的抗变形能力,通过注浆加固岩体,提高岩体承载能力,缓解应力集中;高渗透压环境下,加强巷道防水密封,采用注浆堵水技术,封堵岩体裂隙,减少地下水渗透,同时采用耐腐蚀支护材料,延长支护构件使用寿命;高温环境下,采用耐高温支护材料,优化巷道通风系统,降低巷道温度,减少高温对岩体力学性质与支护系统的影响。此外,针对深部开采扰动强烈的特点,优化采掘工艺,减少开采扰动对围岩的影响,采用分层开采、分步开挖方式,控制扰动应力叠加,降低巷道失稳风险。

### 5 结论

深部煤矿开采中,巷道围岩处于高应力、高渗透压、高温度的复杂力学环境,岩体完整性差、变形量大,失稳主控因素包括地应力分布、岩体力学性质、支护技术与参数、开采扰动及地下水作用,巷道变形破坏模式呈现多样性与复杂性。传统支护技术存在支护强度不足、适应性差等局限性,新型复合支护技术通过刚性与柔性支护结合,搭配注浆加固等手段,能有效提升支护效果,动态支护参数优化可实现支护系统与工况的动态匹配,保障巷道动态稳定。多场耦合稳定性模型、完善的评价指标体系与数值模拟技术,可精准评价巷道稳定性,为支护优化提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 卢佩,付彪.煤矿深部开采巷道支护结构优化研究[J].能源新观察,2026,(01):113-115.
- [2] 王凯,张岂豪,卢周周,等.临涣煤矿深部软岩巷道围岩支护技术优化[J].科学技术与工程,2026,26(02):534-543.
- [3] 吴晓.深部开采下煤矿巷道围岩稳定控制技术分析[J].内蒙古煤炭经济,2026,(01):44-46.
- [4] 李士召.深部煤矿巷道支护结构优化与稳定性分析[J].中国科技纵横,2026,(02):3-5.
- [5] 黄虎虎.深部煤矿巷道围岩稳定性支护优化设计[J].能源与节能,2025,(12):323-326.