

# 深部开采巷道围岩稳定性控制技术研究与应用

屈 鹏

山西华泰矿业管理有限公司 山西 朔州 036000

**摘 要:** 随着我国矿产资源开采深度的不断加大,深部开采已成为保障国家能源安全和资源可持续利用的重要途径。然而,深部巷道所处的高地应力、高渗透压、高温以及复杂地质构造等“三高一复杂”环境,使得围岩稳定性问题日益突出,严重威胁矿山安全生产与经济效益。本文系统梳理了深部巷道围岩失稳的力学机理,归纳总结了当前主流的围岩稳定性控制技术体系,并结合典型工程案例分析其应用效果。在此基础上,对深部巷道围岩控制技术的未来发展趋势进行了展望,旨在为深部资源安全高效开发提供理论支撑与技术参考。

**关键词:** 深部开采; 巷道围岩; 稳定性控制; 支护技术; 卸压技术

## 引言

进入21世纪,我国浅部矿产资源渐枯,矿井开采深度不断增加,全国超50座煤矿开采深度超800米,部分突破1500米。深部开采面临高地应力等极端物理环境,还有复杂地质构造,使巷道围岩出现强度劣化等特征。因此,深入研究深部巷道围岩稳定性控制技术,揭示失稳演化机制,发展高效支护与卸压方法,对保障深部矿山安全生产、延长巷道服务年限、降低维护成本意义重大。“双碳”目标下,提高深部资源回收率等是绿色矿山建设关键。此外,深部岩体工程与国家战略紧密相关,研究成果外延价值广泛。近年来,深地探测计划推进,对深度岩体力学行为理解需求迫切,更凸显了相关课题的战略地位。

## 1 深部巷道围岩失稳机理分析

### 1.1 深部围岩力学特性变化

随着埋深增加,围岩所受原岩应力显著升高。垂直应力近似按增长(为容重,为埋深),而水平构造应力在某些区域可达垂直应力2-3倍。高应力环境下围岩特征明显:浅部脆性的岩石在深部高压下力学行为转变,内部微裂隙先闭合,局部应力集中超临界值会迅速扩展贯通致宏观断裂;含软弱成分岩层塑性流动能力增强,长期荷载下产生显著蠕变变形,巷道断面持续收敛;温度效应不可忽视,深部地温梯度25-30°C/km,埋深超1000米环境温度超40°C,高温加速岩石内部化学反应,削弱围岩结构稳定性。这些因素使深部围岩呈现“高强度但低韧性、高承载但易突变”特性,稳定性控制难度大。

### 1.2 主要失稳模式与驱动机制

深部巷道围岩失稳主要有以下模式及驱动机制:(1)整体结构性失稳:多见于层状岩体或断层带附近。因岩层间有软弱夹层或节理面,高应力下围岩沿结构面滑移、错动甚至塌落。如某倾斜煤层巷道,采动扰动使泥岩夹层软化,上覆砂岩块体滑移,引发冒顶。(2)高应力诱导大变形:完整硬岩巷道中,高应力集中于肩角,诱发劈裂、片帮甚至岩爆;均质软岩巷道里,围岩持续流变,两帮内挤、底板鼓起,断面缩径<sup>[1]</sup>。(3)能量驱动型失稳:侧向顶板断裂运动向锚固围岩输入大量能量,超过围岩可抵抗能量时即失稳。(4)渗流-应力耦合失稳:多见于含水软岩巷道,地下水降低结构面抗剪强度、改变矿物组成,孔隙水压力使围岩更易塑性流动,高水压巷道围岩甚至“泥化”。

### 1.3 影响因素综合分析

深部巷道围岩稳定性受地质条件、开采扰动、支护时效和环境因素多重影响。地质条件是基础,岩性、节理发育、断层分布分别决定围岩力学性能、完整性和应力传递路径。开采扰动是诱因,回采时支承与侧向应力叠加,使邻近巷道荷载远超原岩应力。支护时效关键,滞后则难控变形。环境因素通过物理化学作用劣化围岩性能。这些因素相互耦合、动态演化,如采动加剧裂隙扩展,促进水-岩反应,削弱围岩强度形成恶性循环。故需系统思维,综合考量各因素交互作用,以准确预测变形并制定有效控制策略。

表1: 不同埋深下围岩力学参数统计

埋深范围(m)	平均垂直应力(MPa)	围岩单轴抗压强度(MPa)	松动圈厚度(m)	典型变形特征	巷道返修率(%)
300-500	7-12	45-65	0.8-1.5	轻微收敛,局部片帮	< 10
500-800	12-20	35-50	1.5-2.5	明显两帮内挤,底鼓初现	15-25

续表:

埋深范围(m)	平均垂直应力(MPa)	围岩单轴抗压强度(MPa)	松动圈厚度(m)	典型变形特征	巷道返修率(%)
800-1200	20-35	20-40	2.5-4.0	大变形、流变显著、非对称变形	25-40
> 1200	> 35	< 25	> 4.0	极限流变、泥化、突发失稳	> 40

数据来源: 综合自《煤炭学报》2024-2026年相关文献及国家矿山安全监察局年报

从表1可见,随着埋深增加,围岩强度呈下降趋势,松动圈厚度显著增大,巷道变形特征由局部破坏向整体失稳演变,返修率急剧上升。这充分说明深部巷道围岩控制必须采取更高强度、更系统化的技术对策。

## 2 深部巷道围岩稳定性控制技术体系

### 2.1 支护加固技术

#### 2.1.1 高性能锚杆锚索支护

核心思想是通过施加高预紧力,使锚杆与围岩形成紧密耦合的整体结构,充分发挥围岩自承能力。现代锚杆多采用屈服强度600MPa以上的高强螺纹钢,配合专用扭矩扳手或液压张拉设备,确保预紧力达到设计值的80%以上。全长粘结锚固技术通过使用树脂或水泥基浆液,使锚杆与钻孔壁全程粘结,显著提高锚固界面的剪切强度与耐久性<sup>[2]</sup>。在实际应用中,常采用分层分级支护策略:初期快速安装短锚杆封闭表层围岩,防止风化与松动;中期施加长锚索形成深部承载拱;后期根据监测数据补强薄弱区域。锚-网-带-索协同作用体系则通过金属网覆盖表面、钢带连接锚杆、锚索提供深层约束,形成三维立体支护结构,有效抑制围岩非对称变形。

#### 2.1.2 注浆加固技术

原理是通过高压注入水泥基或化学浆液,填充围岩裂隙,胶结松散颗粒,从而提高整体强度与抗渗性。实践中,常采用“浅孔封阻止浆+深孔减隙加固”的组合工艺:先在表层布置密集浅孔,注入快凝浆液形成止浆层,防止深孔注浆时浆液流失;再在深部松动圈内布置长孔,注入高流动性浆液,实现深层加固。分区注浆则依据围岩松动圈测试结果,对顶板、两帮、底板分别采用不同浆液配比与注浆压力,做到“按需加固”。针对底鼓严重的巷道,超挖锚注回填技术展现出良好效果:先将鼓起底板超挖一定深度,清理松散岩体后,铺设钢筋网并施打底板锚杆,再注入高强速凝混凝土回填,既恢复断面尺寸,又形成抗底鼓结构。

#### 2.1.3 联合支护结构

典型方案为“锚网索+U型钢棚+喷浆”三位一体支护。U型钢棚提供刚性支撑,抵抗初期大变形;锚网索系统形成柔性承载层,适应后期流变;喷浆则封闭表面,

防止风化与渗水。某矿2294运输平巷原采用普通锚网支护,两帮收敛量达600mm以上,后优化为联合支护:缩小U型钢棚间距至0.6m,增加锚索预应力至150kN,延长锚索长度至8m,并在棚间喷射100mm厚混凝土。实施后,两帮最大收敛量降至220mm,巷道服务寿命显著延长。

### 2.2 应力卸压技术

#### 2.2.1 巷道布置优化

巷道布置优化是从源头控制围岩荷载的根本措施。理想情况下,应将巷道布置于采空区下方、边缘或应力降低区,避开高应力集中带。例如,在沿空留巷技术中,利用已采工作面形成的卸压区布置下一工作面顺槽,可大幅降低巷道所受侧向支承压力的<sup>[3]</sup>。然而,受地质条件与开采布局限制,完全避让高应力区往往难以实现,此时需辅以主动卸压措施。

#### 2.2.2 近场卸压

近场卸压是在巷道周边实施小范围应力释放,以缓解局部高应力集中。钻孔卸压是最常用方法,在巷道肩角、底角等应力集中区布置直径50-100mm、深度6-10m的密集卸压孔,通过钻孔扰动岩体结构,释放弹性应变能。泉店煤矿创新性地提出“变径分区卸压”技术,即在不同区域采用不同直径钻孔组合:肩角采用大直径孔快速卸压,底板采用小直径密排孔均匀释能,实现能量向深部转移,精准控制变形。该技术在深部软岩巷道中应用后,底鼓量减少50%以上。

#### 2.2.3 远场卸压

远场卸压则着眼于切断或弱化远场高应力源。深孔爆破切顶技术在巷道上方的顶板实施定向爆破,形成人工断裂线,切断上覆岩层应力传递路径,使高应力向采空区转移。水力压裂技术则利用高压水在目标层位造缝,形成人工弱面,降低采动影响范围。康红普等(2026)提出的“深部巷道围岩协同控制成套技术”集成了上述方法,在新集、淮北等矿区成功应用于千米深井软岩巷道、强冲击巷道等复杂场景,实现了“支得住、控得稳、用得久”的目标。

## 3 工程应用案例分析

### 3.1 丁集煤矿1232(3)沿空巷道控制

该巷道位于深部高应力极松软围岩中,埋深达980米,围岩以泥岩、粉砂岩为主,单轴抗压强度不足20MPa。原有支护采用普通锚网,巷道掘进后两帮迅速内挤,最大移近量达850mm,底板鼓起300mm,严重影响运输与通风。研究团队通过FLAC3D数值模拟,分析了围岩应力分布与塑性区范围,结合现场实测数据,提出阶段性控制方案。初期采用 $\Phi 22 \times 2400$ mm高强锚杆配合W钢带,快速封闭围岩表面;中期在两帮实施深孔注浆,注浆深度6m,浆液水灰比0.8:1,有效抑制不对称变形;后期针对底鼓问题,采用底板锚杆+反拱支护,锚杆倾角 $30^\circ$ 向下,形成抗底鼓力系。应用后,巷道两帮最大移近量由850mm降至220mm,底鼓量控制在80mm以内,满足安全生产要求,且支护成本仅增加18%,经济效益显著。

### 3.2 云南某矿山软弱破碎围岩巷道

该铜矿巷道穿越断层破碎带,围岩松动圈厚度实测达3.5m,传统支护频繁失效。项目组采用锚杆支护动态信息设计法,首先通过声波测试与钻孔电视确定松动圈范围,进而计算所需锚杆长度与密度。根据围岩稳定性差异,分别制定永久支护与临时支护方案:永久支护采用 $\Phi 25 \times 3000$ mm左旋无纵肋螺纹钢锚杆,间排距 $0.8 \times 0.8$ m,配合 $\Phi 17.8 \times 8000$ mm锚索;临时支护则在掘进后立即架设可缩性金属支架,待围岩变形趋于稳定后再替换为永久支护。实践表明,该方法可有效控制围岩松动扩展,巷道断面收敛量稳定在150mm以内,支护成本较全断面U型钢棚方案降低15%,且施工效率提高30%。

## 4 未来发展趋势

### 4.1 理论模型精细化

现有围岩本构模型多基于单一物理场假设,难以准确描述深部多场耦合环境下的力学响应。未来研究需发展考虑应力-渗流-温度-化学(THMC)全耦合的围岩本构模型,引入损伤力学、断裂力学与能量耗散理论,建立基于微-细-宏观多尺度分析的统一理论框架。特别要关注时间效应,构建能够预测围岩长期流变与突发失稳的动态演化模型。

### 4.2 支护材料高性能化

传统钢材支护存在强度上限与腐蚀问题。未来应研发超高强度、高韧性、自感知功能的新型支护材料。例如,碳纤维复合材料锚杆具有比强度高、耐腐蚀、电磁透明等优点;形状记忆合金支护件可在温度变化下自动调整预紧力;智能混凝土则内置光纤传感器,可实时反馈自身应力状态。这些新材料将极大提升支护系统的可

靠性与智能化水平<sup>[4]</sup>。

### 4.3 控制技术智能化

随着工业互联网与人工智能技术的发展,深部巷道围岩控制正迈向智能化。通过融合物联网、大数据与机器学习,可构建“感知-分析-决策-执行”闭环控制系统。系统首先通过分布式传感器网络实时采集围岩状态数据,然后利用数字孪生技术构建虚拟巷道模型,再通过AI算法预测未来变形趋势并优化支护参数,最后自动调度机器人完成支护作业。这种“无人化”控制模式将显著提升安全水平与作业效率。

### 4.4 协同控制体系化

单一技术难以应对深部复杂工况,必须推动“地质-开采-支护-监测”全链条协同设计。在矿井规划阶段,就应综合考虑地质构造、开采顺序与巷道布置,优化应力场分布;在施工阶段,根据实时监测数据动态调整支护方案;在运维阶段,建立健康档案,实现全生命周期管理。最终形成适应不同深部条件(如软岩、硬岩、冲击地压等)的标准化控制技术包,提升技术推广效率。

## 5 结语

深部巷道围岩稳定性控制是保障深部资源安全开发的核心技术难题。本文系统阐述了深部围岩失稳的力学机理,归纳了以“高强度支护+主动卸压”为核心的控制技术体系,并通过典型案例验证了其有效性。研究表明,深部围岩失稳是多因素耦合作用的结果,必须采取系统性、协同性控制策略。未来,应着力推进理论创新、材料升级与智能控制,构建适应深部复杂环境的围岩稳定性保障体系,为我国深地战略实施提供坚实支撑。随着技术不断进步,深部巷道将从“高风险、高成本”向“安全、高效、智能”转变,为国家能源资源安全作出更大贡献。

## 参考文献

- [1]张少泽.深部煤层开采围岩稳定性控制技术及应用分析[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十三届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集.河南锦源建设有限公司,2025:391-392.
- [2]蔚居廉.深部开采软岩巷道围岩控制技术研究[J].能源与节能,2026,(03):233-235.
- [3]官晓旭.深部开采大断面巷道围岩支护优化研究[J].煤,2026,35(04):39-42.
- [4]冯芷胥.深部开采复合顶板巷道围岩支护技术研究[J].能源与节能,2025,(07):220-222.