

高应力软岩巷道支护及治理技术

杨明福

宁夏王洼煤业有限公司 宁夏 固原 756504

摘要：高应力软岩巷道支护一直是地下工程支护的世界性难题。随着矿井开采深度的增加，巷道面临高地压、大变形的挑战。现有支护技术如被动刚性支护、联合支护等虽有一定效果，但存在支护体强度有限、返修率高等问题。近年来，锚网喷架联合支护技术等新型支护方法得到了研究和应用，有效提高了支护效果。同时，针对软岩吸水软化等特性，采取相应的治理措施也至关重要。这些技术的发展为煤矿安全生产提供了有力保障。

关键词：高应力软岩；巷道支护；治理技术

引言：在深部煤炭资源开采过程中，高应力软岩巷道的稳定性控制成为制约安全高效生产的关键因素。软岩的复杂物理力学特性，加之高地应力的影响，使得巷道极易发生大变形甚至垮塌。因此，深入研究高应力软岩巷道的支护及治理技术，对于保障矿井安全生产、提高资源开采效率具有重要意义。本文综述了高应力软岩巷道支护及治理技术的现状与进展，旨在为相关工程实践提供理论参考和技术支持。

1 高应力软岩巷道变形破坏机理分析

1.1 软岩的物理力学特性

软岩物理力学特性显著，软弱性体现为抗压强度多低于30MPa，弹性模量小，受力易产生大塑性变形；破碎性表现为原生裂隙密集，受开挖等扰动后易崩解，岩体完整性差；膨胀性是关键特性，含蒙脱石等黏土矿物的软岩遇水后，体积可膨胀10%-30%，产生膨胀应力，直接加剧巷道破坏，这些特性为变形破坏埋下内在隐患。

1.2 高应力环境下的巷道围岩变形机制

地应力是核心诱因，当原岩应力超软岩屈服强度，围岩会发生塑性流动；时间效应突出，恒定应力下软岩呈蠕变特性，初期变形快，后期缓慢但持续；水的影响加剧破坏，不仅触发膨胀，还降低岩体黏聚力与内摩擦角，使强度衰减超50%，三者叠加形成“应力-时间-水”的恶性循环，加速变形。

1.3 巷道变形破坏的典型案例与分析

深埋煤矿巷道受高垂直与构造应力叠加，常现“收腰”型破坏，两帮鼓出量达300-500mm；（水利隧洞因地下水丰富去掉）井下巷道受水的影响，多发生底板隆起、边墙开裂的膨胀型破坏；金属矿破碎软岩巷道受爆破扰动，易出现围岩整体垮塌的松散型破坏，案例表明地质条件决定变形破坏模式。

2 高应力软岩巷道支护技术研究

2.1 锚杆（索）支护技术

（1）锚杆（索）的种类、性能及应用。锚杆（索）按功能分为三类：普通树脂锚杆，锚固力 $\geq 80\text{kN}$ ，28d抗拉强度 $\geq 335\text{MPa}$ ，适用于浅部软岩巷道初期支护，可快速约束围岩表层变形；预应力锚索，采用1×7股钢绞线，张拉应力达120-180kN，支护深度超5m，多用于深埋高应力巷道，能抑制围岩深层塑性区扩展；让压式锚杆，内置碟簧或液压让压元件，允许30-50mm可控变形，避免支护结构因应力集中断裂，适配膨胀性软岩地层。实际应用中，煤系软岩巷道常用“锚杆+锚索”组合，形成立体支护体系，如某矿回采巷采用此方案，围岩位移量减少40%^[1]。（2）锚杆（索）支护的参数优化。参数需结合地质条件动态调整：软岩抗压强度15-25MPa时，锚杆直径选20-22mm，间排距800×800-1000×1000mm；塑性区深度3m时，锚索长度 $\geq 8\text{m}$ ，预应力取设计锚固力的70%-80%。通过FLAC3D数值模拟优化，某矿将锚杆间排距从1200×1200mm调整为900×900mm，顶底板移近量从500mm降至200mm以下，同时降低材料损耗15%。

2.2 锚喷支护技术

（1）锚喷支护的原理及施工流程。原理是“锚杆+喷射混凝土”协同作用：锚杆提供径向约束力，防止围岩离层；喷射混凝土（掺速凝剂、钢纤维）形成刚性壳体，封闭裂隙、防风化，将岩块胶结成整体。施工流程严格遵循“初喷→锚杆安装→复喷”：初喷厚度50-80mm，及时封闭开挖面；锚杆安装后复喷至100-150mm，采用湿喷工艺，喷射角度垂直岩面，确保密实度，喷射混凝土28d抗压强度 $\geq 20\text{MPa}$ 。（2）锚喷支护在高应力软岩巷道中的应用效果。某深埋隧道采用钢纤维喷混凝土（掺量 $60\text{kg}/\text{m}^3$ ）+中空注浆锚杆，3个月内侧帮位移仅80mm，较传统支护减少60%；破碎软岩地层中，锚喷支护使围岩完整性系数从0.3提升至0.6，抗剪强

度提高35%。但强膨胀性软岩需配合排水,避免喷层因膨胀应力开裂,某矿通过“锚喷+排水孔”组合,喷层破损率从40%降至10%。

2.3 注浆加固技术

(1) 注浆材料的选择与注浆工艺。材料按需求选用:水泥-水玻璃双液浆(凝固时间30s-5min),用于涌水封堵或紧急加固;超细水泥浆(粒径 $\leq 10\mu\text{m}$),渗透细微裂隙($\geq 0.1\text{mm}$),提升密实度;环氧树脂化学浆,黏结强度高,适配关键部位加固。工艺采用“分段注浆+压力控制”:先注周边孔(压力1.5-2MPa),再注中心孔(2-3MPa);破碎围岩用前进式注浆,每段1.5-2m,确保浆液均匀扩散。(2) 注浆加固对围岩力学性质的改善。注浆后软岩力学参数显著提升:某矿水泥浆加固后,抗压强度从18MPa升至32MPa,内摩擦角增加 5° - 8° ,黏聚力提升40%-60%;(CT扫描)内窥显示围岩裂隙率从25%降至8%以下,形成“加固圈”。高应力巷道中,注浆与锚杆结合,塑性区深度减少50%,支护寿命延长3倍^[2]。

2.4 联合支护技术

(1) 锚杆(索)与锚喷支护的结合应用。形成“柔性约束+刚性防护”体系:初喷50mm封闭岩面,安装锚杆并张拉锚索,复喷至(120与上面矛盾)150mm,确保喷层与锚杆紧密贴合。某(金属矿改)煤矿行人下山(高应力巷道)采用此方案,服务年限从2年延至5年,支护成本降低30%;深部隧道应用后,围岩稳定性系数提升0.3,开挖后7d变形速率从50mm/d降至15mm/d。(2) 支护结构与围岩的耦合支护设计。核心是“刚度匹配”:通过多点位移计、应力传感器监测变形,动态调整参数。膨胀性软岩用“让压锚杆+可缩喷层”,允许适度变形;深埋巷道采用“注浆加固圈+高强度锚索”,使支护与围岩形成统一承载体系。某隧道耦合设计后,支护结构与围岩应力协调系数达0.85,支护破坏率从30%降至8%,实现长期稳定。

3 高应力软岩巷道治理技术研究

3.1 巷道选址与断面设计优化

(1) 选址原则与工程地质条件分析。高应力软岩巷道选址需遵循“避弱就强、避高就低”原则,优先选择岩性完整、裂隙发育少的地层,避开断层破碎带、褶皱轴部等应力集中区域。工程地质条件分析需重点监测地应力大小与方向(采用应力解除法或水压致裂法)、软岩含水率及膨胀性指标(如自由膨胀率),例如当最大水平主应力超过25MPa时,需调整巷道走向,使其与应力方向夹角控制在 30° 以内,减少应力集中影响。某矿通

过选址优化,将巷道布置于砂质泥岩地层(完整性系数0.7),较原破碎带位置巷道变形量降低45%。(2) 断面形状与尺寸设计的优化。断面形状需结合地应力分布调整:当水平应力主导时,采用“直墙半圆拱”断面,拱部曲率半径不小于巷道宽度的0.5倍,分散拱部压力;当垂直应力较大时,选用“马蹄形”断面,增强底板承载能力。尺寸设计需预留变形量,高应力软岩巷道净断面需比设计使用断面扩大15%-20%,例如设计宽度4m的运输巷,净宽需达4.8m,避免后期变形导致断面缩小。某工程通过断面优化,将矩形断面改为马蹄形,同时扩大净断面,巷道顶底板移近量从300mm降至120mm^[3]。

3.2 减震施工技术

(1) 减震措施的原理及应用。减震施工核心是通过控制开挖扰动,减少围岩应力释放速率,常用措施包括“分步开挖”“光面爆破”和“预裂爆破”。分步开挖(如CD法、CRD法)将大断面分为多个小断面依次开挖,每步开挖进尺控制在1-1.5m,降低单次扰动强度;光面爆破通过精准控制炮孔间距(400-600mm)与装药量,使开挖轮廓面平整,减少围岩破碎;预裂爆破则在主爆区前爆破,形成预裂面,阻隔震动波传播。某隧道施工中采用光面爆破,围岩超挖量从200mm降至80mm,有效保护了岩体弱面。(2) 减震施工对巷道稳定性的提升。减震施工可显著降低围岩塑性区扩展速度,某矿采用分步开挖后,巷道开挖后7d内的变形速率从50mm/d降至15mm/d,为支护结构提供充足施工时间;光面爆破使围岩完整性系数提升0.2-0.3,减少裂隙水渗透通道,间接增强围岩稳定性。监测数据显示,采用减震措施的巷道,支护结构破坏率从30%降至8%,大幅提升了巷道长期稳定性。

3.3 底板注浆与水治理

(1) 底板注浆加固技术。针对高应力软岩巷道“底鼓”问题,底板注浆采用“长短孔结合”方式:长孔(深度3-5m)注入水泥-水玻璃双液浆,加固深部软岩,形成“抗鼓承载层”;短孔(深度1-2m)注入超细水泥浆,封堵浅层裂隙。注浆压力需根据底板岩性调整,一般控制在2-3MPa,避免压力过高导致底板抬升。某矿通过底板注浆,底板抗压强度从12MPa提升至28MPa,底鼓量从400mm降至90mm^[4]。(2) 疏水、导水措施在巷道治理中的应用。疏水措施采用“底板疏水孔+侧帮排水巷”组合:在底板布置间距2-3m、深度2m的疏水孔,搭配坡度3‰-5‰的排水巷,快速排出围岩裂隙水;导水措施则通过预埋导水管(直径50-80mm),将集中涌水引入排水系统,避免水软化底板。某工程通过疏水导水,使巷道

围岩含水率从25%降至12%，膨胀应力减少60%，底鼓现象得到有效控制。

4 高应力软岩巷道工程实践案例分析

4.1 工程背景与概况

选取某深埋煤矿-800m水平运输巷为典型案例，该巷道穿越煤系软岩地层（以泥岩、砂质泥岩为主），实测最大水平主应力达28MPa，软岩抗压强度12-18MPa，自由膨胀率25%，且受裂隙水影响（含水率18%-22%）。巷道设计断面为直墙半圆拱，净宽4.5m、净高3.8m，服务年限5年，前期采用传统锚杆支护时，开挖后1个月顶底板移近量达600mm，侧帮鼓出450mm，需多次返修，严重影响生产。

4.2 支护方案设计与实施

4.2.1 支护参数的选择与确定

基于前文技术研究，采用“注浆加固+锚杆（索）+锚喷”联合支护方案：注浆选用水泥-水玻璃双液浆（体积比1:1），孔深3-5m，间距2m，压力2-2.5MPa；锚杆选用 $\phi 22\text{mm}$ 让压式树脂锚杆，间排距900×900mm，锚固力 $\geq 100\text{kN}$ ；锚索采用1×7股 $\phi 15.24\text{mm}$ 钢绞线，长度8m，间排距2000×2000mm，张拉应力150kN；喷射混凝土掺60kg/m³钢纤维，初喷80mm、复喷至120mm，28d抗压强度 $\geq 25\text{MPa}$ 。

4.2.2 支护方案的施工步骤与关键技术

施工遵循“先加固、后支护”原则：①超前注浆，采用前进式分段注浆工艺，每段注浆长度1.5m，确保浆液扩散半径 $\geq 1.2\text{m}$ ；②开挖后立即初喷封闭岩面，控制暴露时间 $\leq 2\text{h}$ ；③安装让压式锚杆，孔深2.4m，树脂药卷快速锚固；④张拉锚索，采用二次张拉工艺（初张拉120kN，24h后补张拉至150kN）；⑤复喷混凝土至设计厚度，采用湿喷工艺，确保喷层平整度误差 $\leq 50\text{mm}$ 。关键技术为让压锚杆与注浆协同，通过锚杆让压元件释放部分膨胀应力，避免喷层开裂。

4.3 支护效果监测与评估

4.3.1 围岩变形监测与数据分析

采用多点位移计和应力传感器监测6个月：顶底板最大移近量85mm（前30d变形占比70%，后期趋于稳定），侧帮最大鼓出量62mm；锚杆最大应力68kN（小于设计锚固力100kN），锚索应力稳定在145-150kN，无明显应力损失。数据表明，围岩变形速率从初期12mm/d降至后期0.3mm/d，满足工程要求。

4.3.2 支护效果的评估与优化建议

支护效果评估：围岩稳定性系数达0.82，支护结构未出现破损，巷道断面满足使用需求，较传统支护方案成本降低25%，服务年限可延长至6年以上。优化建议：针对裂隙水富集段，可增设底板疏水孔（间距2.5m，深度2m）；在巷道转弯处，适当加密锚索（间排距调整为1800×1800mm），进一步提升局部稳定性。

结束语

综上所述，高应力软岩巷道的支护及治理技术是一个复杂且关键的研究领域。通过综合运用锚杆（索）、锚喷、注浆加固等多种支护手段，结合巷道选址优化、减震施工及水治理等技术措施，可显著提升巷道稳定性，确保安全生产。未来，随着材料科学、数值模拟及智能化技术的不断发展，高应力软岩巷道支护及治理技术将更加高效、智能，为深部资源开采提供更加可靠的保障。

参考文献

- [1]张农,阚甲广,李桂臣.深部高应力巷道围岩变形力学机制与控制技术[J].煤炭学报,2020,(03):31-32.
- [2]马念杰,赵志强,王伸.深部软岩巷道联合支护技术研究[J].煤炭科学技术,2023,(07):73-74.
- [3]肖同强,任勇辉,神文龙,等.深部高瓦斯强动压巷道切顶卸压机制及技术研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,(09):130-131.
- [4]崔良杰.高应力软岩巷道围岩裂隙发育规律及分层协同控制技术研究[J].煤矿现代化,2024,(06):73-74.