

# 软岩巷道掘进施工及顶板支护技术研究

马 忠

宁夏宝丰能源集团股份有限公司 宁夏 银川 751400

**摘要:** 软岩巷道因矿物组成致遇水易劣化,掘进面临变形快、片帮冒顶及地下水影响等挑战。关键技术包括掘进方法优化、临时支护体系构建与监控反馈。顶板支护需明确结构类型与力学模型,合理设计参数并选型材料。施工工艺注重锚杆、架棚及联合支护的流程与质量控制。通过多技术协同,可有效控制围岩变形,保障施工安全与进度,提升软岩巷道掘进与支护的可靠性。

**关键词:** 软岩矿山;巷道掘进;顶板支护技术

**引言:** 软岩巷道遇水易劣化,掘进面临变形快、片帮冒顶及地下水影响等难题。关键技术含掘进方法优化、临时支护及监控反馈。顶板支护需明确力学模型、合理设计参数与选型材料。施工注重锚杆、架棚及联合支护流程与质量控制。多技术协同可有效控制围岩变形,保障施工安全进度,提高软岩巷道掘进支护的可靠性。

## 1 软岩巷道工程特性与掘进施工难点分析

### 1.1 软岩的物理力学特性与分类标准

软岩的矿物组成以黏土矿物为主,含高岭石、蒙脱石、伊利石等亲水性成分,其胶结特性表现为胶结程度低、颗粒间联结微弱,结构松散且孔隙率较高。此类矿物成分导致软岩遇水易软化、膨胀乃至崩解,显著影响其工程行为。在分类标准方面,依据单轴抗压强度、岩体完整性系数及围岩稳定性等级,软岩可划分为极软岩、中软岩等类别,其界定指标明确反映了岩体抵抗变形与破坏的能力。软岩的物理力学特性决定了其在工程扰动下易发生显著响应,是后续变形与失稳的根本内因。

### 1.2 软岩巷道掘进施工的主要挑战

围岩变形速率快与持续时间长是软岩巷道掘进中的突出难题。在开挖卸荷后,围岩应力迅速重分布,变形即刻显现且速率极高,初期收敛量占最终变形量的主要部分,且变形持续期远超普通岩层,常延续数月甚至更久,给支护结构带来持续荷载。掘进过程中易发生片帮与冒顶,由于软岩自承载能力弱,开挖后掌子面及两帮岩体极易沿结构面或软弱带剥落,顶部岩层在拉应力作用下易发生失稳坍塌,严重威胁施工安全与进度。地下水对软岩稳定性的影响尤为显著,水体渗入会软化岩体、降低胶结强度并激活膨胀性矿物,导致围岩力学性质急剧劣化,同时增加支护结构的孔隙水压力,进一步加剧变形与破坏<sup>[1]</sup>。

## 2 软岩巷道掘进施工关键技术

### 2.1 掘进方法选择与优化

钻爆法与机械掘进法在软岩巷道施工中的适用性存在显著差异。钻爆法对复杂地质条件的适应能力较强,能够处理软岩中夹杂的硬质透镜体或局部坚硬包裹体,通过调整爆破参数可实现断面成型的基本可控。但爆破产生的冲击波与震动效应会在软岩中诱发微裂隙扩展,加剧围岩松动圈发育,降低围岩自承能力,后续支护需求相应增加。机械掘进法采用铣削或切削方式破岩,对围岩扰动程度低,能够保持巷道轮廓的规整性,减少超挖与欠挖现象,有利于喷层与围岩的紧密贴合。然而机械掘进在高塑性软岩中易出现刀盘糊堵、出渣不畅等问题,在膨胀性岩层中面临卡机风险,设备选型需充分考虑岩体的黏附性与膨胀指标。掘进参数动态调整策略围绕循环进尺与炮眼布置展开。循环进尺应根据掌子面暴露时间与围岩自稳能力综合确定,在变形敏感区段适度缩减进尺,控制单次开挖的空间效应。炮眼布置需依据岩体结构面产状与软硬互层特征优化孔距、排距及起爆顺序,采用分段装药与不耦合装药结构降低爆破峰值压力,减少对围岩的深层扰动。

### 2.2 临时支护技术体系

超前支护的设计原则立足于控制掌子面前方未开挖岩体的稳定性,防止掘进过程中发生超前塌方。管棚支护适用于大断面巷道穿越破碎带或软弱夹层区段,其设计重点在于管棚间距、搭接长度与注浆扩散范围的合理匹配,确保管棚在纵向上形成连续承载结构,将上部荷载有效传递至两侧稳定岩体。管棚注浆应使浆液充分充填裂隙,胶结松散岩体,形成具有一定厚度与强度的加固圈。超前小导管多用于局部破碎带或节理密集区段,设计时需考虑导管布置密度、打入角度与注浆压力的协同作用,注浆后形成拱顶上方局部加固层,控制掌子面挤出变形。临时喷锚支护的时效性与强度匹配是抑制围

岩早期变形的核心。喷射混凝土必须在开挖后最短时间内施作,及时封闭围岩表面,隔绝空气与水分的侵蚀作用,其早期强度发展速率应与围岩变形速率相适应,在变形加速阶段提供足够的约束力<sup>[2]</sup>。

### 2.3 掘进过程监控与反馈机制

围岩变形监测技术为软岩巷道信息化施工提供了关键数据支撑。收敛计通过布设巷道断面内的收敛测线,获取净空收敛量与收敛速率,反映围岩整体稳定性状态,其测点布置应覆盖拱顶、拱肩与边墙等关键部位,形成空间监测网络。激光位移计采用非接触测量方式,能够实现关键点位的连续自动监测,实时捕捉变形突变与趋势变化,尤其适用于高应力区段或变形敏感部位的动态跟踪。监测数据采集频率应根据围岩变形阶段动态调整,在初期变形加速阶段加密采集,确保完整记录变形发展全过程。掘进参数与支护效果的实时关联分析将监测数据与施工参数纳入统一分析框架,建立变形响应与掘进速度、支护时机、支护刚度之间的定量对应关系。通过分析围岩收敛速率与喷层受力状态、锚杆轴力变化的同步特征,判断当前支护措施的适应性,识别支护时机是否滞后或支护强度是否不足<sup>[3]</sup>。

## 3 软岩巷道顶板支护技术原理与设计

### 3.1 顶板支护结构类型与力学模型

锚杆支护的悬吊理论认为软弱岩层中的锚杆应将下部不稳定岩层悬吊于上部稳定岩层之上,通过锚杆提供的抗拉承载力控制顶板下沉与离层。该理论适用于顶板上部存在相对稳定承载层的地质条件,锚杆长度需穿透软弱层进入稳定岩层以获得可靠锚固点。组合梁理论则基于层状岩体的结构特征,认为锚杆将多层薄层岩体锚固为整体组合梁,增强层间摩擦力与抗弯刚度,提高顶板的自承能力。锚索作为锚杆的补充形式,适用于大跨度断面或破碎区段,其锚固深度更大,能够将浅部支护结构与深部稳定岩体连接形成承载体系。架棚支护的承载机制以被动支撑为主,通过型钢或钢筋混凝土棚架形成刚性承载结构,直接承受围岩荷载并限制顶板变形。架棚支护适用于围岩变形量大、变形持续时间长的软岩巷道,其结构刚度高、支护抗力可调,但需确保棚腿基础稳固,防止整体下沉与侧向失稳。

### 3.2 支护参数设计方法

锚杆长度、间距、预紧力的计算模型需根据顶板岩层结构、围岩力学参数及巷道断面尺寸综合确定。锚杆长度应满足锚固段位于稳定岩层或超出松动圈范围,在层状顶板中还需考虑穿越关键层位以控制层间离层。锚杆间距基于悬吊理论或组合梁理论计算,间距过小造成

材料浪费,间距过大则无法形成有效承载结构,需在围岩压力与支护密度之间寻求平衡。预紧力是锚杆主动支护的核心参数,其数值应足以抑制顶板早期离层与微裂隙扩展,使围岩由被动承载转为主动承载状态。支护结构与围岩的协同作用分析强调支护系统与围岩在变形过程中的相互适应关系<sup>[4]</sup>。支护结构应具备一定的让压能力,允许围岩适度释放应力而不发生破坏,同时随围岩变形逐步提高支护抗力,实现支护与围岩共同承载的耦合状态。协同作用分析需考虑支护刚度、施作时机与围岩变形阶段的匹配关系,避免支护过早承受过高荷载或过晚丧失控制能力。

### 3.3 支护材料性能要求与选型

高强度锚杆材料的力学特性主要体现在屈服强度、延伸率与抗冲击韧性三方面。软岩巷道中锚杆需承受长期持续的拉剪复合应力,材料应具备高屈服强度以提供足够承载力,同时保持较高延伸率以适应围岩变形,避免发生脆断。抗冲击韧性确保锚杆在动压扰动或爆破震动作用下维持结构完整性,防止突然失效。锚杆杆体、托盘与螺母的强度等级需匹配,形成完整的锚固承载链。喷射混凝土配合比与耐久性设计需兼顾早期强度发展、长期稳定性与抗裂性能。软岩巷道喷射混凝土应优化胶凝材料用量、骨料级配与外加剂掺量,确保喷射后快速凝结与强度增长,及时封闭围岩表面。耐久性设计重点考虑抗渗性能与抗化学侵蚀能力,针对软岩中可能存在的膨胀性矿物与地下水环境,选用适宜的矿物掺合料与防水剂,降低喷层收缩开裂风险,延长支护结构的使用寿命。

## 4 软岩巷道顶板支护施工工艺与质量控制

### 4.1 锚杆(索)支护施工工艺

钻孔精度控制是锚杆支护施工的基础环节,钻孔位置、角度与深度的偏差直接影响锚固效果与支护结构的受力状态。钻孔位置应按设计排间距布设,偏差控制在允许范围内,确保锚杆在顶板中形成均匀的承载网格。钻孔角度需与岩层层理或结构面呈合理夹角,避免钻孔穿越软弱夹层时发生偏斜,影响锚固段的有效锚固深度。钻孔深度应满足锚固段位于稳定岩层的要求,同时考虑锚杆钻进过程中的岩屑排出与孔壁稳定性,防止塌孔导致锚固剂无法均匀充填。锚固剂注入工艺要求锚固剂在钻孔内均匀分布并充分包裹锚杆杆体,注入过程中需控制搅拌时间与旋转速度,确保锚固剂化学反应充分完成,锚固强度达到设计要求。预紧力施加方法与检测标准是锚杆主动支护作用实现的关键。预紧力施加应采用扭矩扳手或张拉设备分级加载,使锚杆托盘与岩面紧密贴合,形成初始约束力。预紧力检测应在安装后规定时间内完

成,检测结果与设计值进行比对,偏差超出允许范围时应及时补张拉或重新安装,确保每根锚杆均达到规定的预紧水平<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 架棚支护施工要点

棚腿与顶梁的连接方式优化对架棚支护的整体稳定性具有决定性影响。连接节点应采用高强度连接件或焊接工艺,确保棚腿与顶梁形成刚性整体,能够有效传递顶板荷载至两帮及底板基础。连接方式设计需考虑施工便捷性与可调性,在软岩巷道中棚架可能因围岩变形而发生位移,连接节点应具备一定的调节余量,允许在支护过程中进行微调以维持棚架姿态。棚腿基础处理是防止架棚下沉的关键,基础应置于相对稳定的岩层上,必要时设置底梁或扩大底座以分散荷载,降低基底压应力。背板材料的密实度控制直接影响棚架与围岩的接触状态与荷载传递效率。背板材料应选用强度足够且具有一定可塑性的材料,能够紧密填充棚架与围岩之间的空隙,避免出现空顶或接触不均匀现象。背板铺设应从拱顶向两侧对称进行,每层背板之间应搭接严密并采用楔子紧固,确保围岩压力均匀作用于棚架结构,防止局部应力集中导致棚架变形或失稳。

#### 4.3 联合支护技术的实施流程

锚网喷与架棚支护的衔接顺序是联合支护成功实施的关键环节。在软弱破碎围岩条件下,应先施作锚杆与金属网形成浅部加固层,随即喷射混凝土封闭围岩表面,将锚杆与喷层结合为整体承载结构,及时控制围岩早期变形。架棚支护应在锚网喷结构发挥初步承载作用后择机安装,避免过早架棚导致棚架承受过高的围岩压力,也避免过晚架棚使围岩变形过大超出棚架调节范围。衔接顺序需根据围岩变形监测数据动态调整,在变形速率较高时适当提前架棚时机,在变形趋于稳定时可延长锚

网喷与架棚的间隔时间。多层支护结构的应力传递路径分析旨在明确各支护层在承载体系中的功能定位与相互作用关系。锚网喷层作为浅层支护结构,主要承担控制围岩表层松动与剥落的功能,将围岩应力初步整合后传递至深层支护结构。架棚作为刚性承载层,承受来自锚网喷层传递的围岩压力及深部围岩的持续荷载,并通过棚腿将荷载传递至底板。多层支护之间应设置合理的让压层或缓冲层,避免刚性结构之间直接接触产生过大应力集中,确保各支护层协同工作,形成层次分明、荷载传递有序的联合承载体系。

结束语:软岩巷道掘进施工与顶板支护技术是保障地下工程安全高效推进的核心环节。面对软岩复杂的工程特性与多变的施工环境,需综合运用掘进方法优化、临时支护体系构建及动态监控反馈等关键技术,结合顶板支护的力学原理与参数设计,严格把控施工工艺与质量控制。未来,随着材料科学与监测技术的持续进步,软岩巷道支护技术将向智能化、精细化方向发展,为地下空间开发提供更坚实的技术支撑。

#### 参考文献:

- [1]徐祥.煤矿巷道掘进施工及顶板支护技术研究[J].当代化工研究,2022(07):96-98.
- [2]马帅.煤矿巷道掘进施工及顶板支护技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(21):180-181.
- [3]魏如钢.探究煤矿巷道掘进施工及顶板支护技术[J].内蒙古煤炭经济,2021(10):39-40.
- [4]李存敬.煤矿巷道掘进施工及顶板支护技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2021(02):58-59.
- [5]白立军.富水弱胶结软岩巷道掘进顶板支护技术[J].价值工程,2022,41(33):67-69.