

# 矿山井下硐室施工过程中的围岩变形规律及控制措施

王宁伟

温州东大矿建工程有限公司 浙江 温州 325800

**摘要:** 本文研究矿山井下硐室施工中围岩变形规律及控制措施,先阐述变形基础理论与研究背景,再分析变形时空分布、不同硐室及特殊工况下的规律,明确地质、施工、支护等影响因素。重点提及围岩变形监测体系,需覆盖位移量、变形速率、硐周应力变化,科学布设设备并实时传数据;动态调控机制依监测数据调整策略,确保变形受控。最后给出控制措施与实施保障,为硐室施工安全提供支撑。

**关键词:** 矿山井下硐室;围岩变形规律;变形监测体系;动态调控机制;支护措施

引言: 矿山井下硐室是矿山生产关键设施,其施工后围岩变形易引发坍塌、支护破坏等安全风险,影响生产进度。当前部分硐室施工中,围岩变形管控存在监测不全面、调控不及时等问题。而精准掌握变形规律,建立涵盖关键指标与科学布设设备的监测体系,结合数据动态调整控制策略,对保障施工安全、提升硐室稳定性意义重大。

## 1 矿山井下硐室围岩变形的基础理论

### 1.1 围岩变形的本质与阶段特征

围岩变形的本质是硐室开挖打破原岩应力平衡状态后,周围岩体为适应新应力环境发生的物理变化,具体表现为岩体颗粒间相对位移、原有裂隙扩展或新裂隙产生,最终体现为硐室空间形态的改变。这种变形并非匀速发生,而是呈现明显的阶段性特征<sup>[1]</sup>。开挖初期的瞬时弹性变形发生在硐室开挖完成后的短时间内,此时岩体仅发生弹性形变,变形速率快但位移量较小,若开挖后及时施加支护,部分弹性变形可被约束甚至恢复。中期的塑性流变变形持续时间较长,岩体内部应力超过屈服极限,进入塑性状态,变形速率虽较初期减缓,但位移量持续增加,且变形不可逆,易出现岩体剥落、裂隙贯通等现象,需通过强化支护控制变形发展。后期的稳定变形阶段,岩体内部应力重新达到新的平衡状态,变形速率逐渐趋近于零,位移量基本保持稳定,此时硐室周边岩体形态不再发生显著变化,仅可能因环境因素出现微小波动。

### 1.2 围岩应力分布与变形关联

硐室开挖后,原有的均匀应力场被打破,应力重新分布形成特定的应力区域。在硐室周边一定范围内,应力集中现象明显,尤其是拱顶和帮部位置,因开挖空间形态影响,该区域岩体承受的压应力显著高于原岩应力,形成应力集中区;而在应力集中区外侧,应力则低

于原岩应力,形成应力释放区,应力释放区的岩体易因应力降低出现轻微回弹变形。应力状态直接决定围岩变形的类型与程度。高应力环境下,围岩所受应力远超自身抗压强度,易发生塑性屈服变形,表现为岩体大规模位移、片帮甚至塌方,变形破坏程度严重;低应力环境下,围岩所受应力未超过屈服极限,变形以弹性回弹为主,仅在开挖初期出现短暂位移,后续基本保持稳定,变形破坏风险较低。不同位置的应力差异也导致变形分布不均,应力集中区的拱顶和帮部变形通常更为突出,成为变形控制的重点区域。

## 2 矿山井下硐室施工过程中围岩变形规律研究

### 2.1 变形时空分布规律

围岩变形的时间演化呈现明显的阶段性速率变化,硐室开挖后1天内处于变形快速发展期,此时岩体因应力急剧释放,变形速率最快,位移量占总变形量的比例较高,部分破碎岩体甚至会出现短暂的碎胀扩容现象;1周内变形速率逐渐减缓,岩体从剧烈应力调整转向平缓适应,位移增长幅度较初期明显降低;1个月内变形速率进一步衰减,多数情况下会趋近于稳定阈值,此时若地质条件稳定且支护到位,变形基本不再显著增加,变形趋于稳定的时间节点通常与岩体特性、支护强度相关,坚硬岩体稳定时间较短,软岩或破碎岩体则需更长时间,且可能伴随锚固体整体挤出的流变特征。变形的空间分布存在显著差异,硐室拱顶因受上部岩体自重与应力集中影响,变形量通常最大,易出现下沉位移;边墙受水平应力作用,变形以向硐室内部挤压为主,变形量次之,近表围岩常表现出强烈的扩容性;底板变形相对较小,但在软岩或富水地层中可能出现隆起现象<sup>[2]</sup>。沿硐室轴线方向,变形梯度呈现两端向中间过渡的特征,硐室开挖掌子面附近因新鲜岩体暴露,变形量较大,向硐室内部延伸一段距离后,变形量逐渐减小并趋于稳定,形

成明显的变形梯度变化。

### 2.2 不同类型洞室的变形规律差异

不同功能洞室的变形特点因结构与受力条件不同而存在差异,大断面储矿洞室因开挖空间大,对周边岩体的扰动范围更广,应力集中程度更高,变形量通常大于小断面洞室,且易出现整体变形;长距离运输洞室因延伸距离长,受地质条件变化影响更显著,变形分布不均,局部地质薄弱段变形量会明显增加,峰后块裂岩体易沿破裂面滑移;高应力深部洞室受地应力作用强烈,岩体易进入塑性状态,变形持续时间长,且可能出现长期流变现象。不同埋深洞室的变形差异突出,深部洞室地应力水平高,岩体承受的压应力大,变形以塑性流变为主,变形速率虽慢但持续时间长,需长期监测;浅部洞室地应力较低,开挖后主要发生瞬时弹性变形,变形量较小且稳定较快,后期变形风险较低。

### 2.3 特殊工况下的围岩变形规律

富水地层中,地下水渗透会软化岩体,降低岩体黏聚力与内摩擦角,使岩体抗变形能力下降,导致围岩变形速率较干燥地层加快,且变形形态更复杂,除拱顶下沉、边墙挤压外,底板易因水的软化作用出现隆起,变形稳定时间需延长数倍。临近洞室群施工时,先施工洞室会改变周边应力场,使应力向未开挖区域转移,后施工洞室开挖时,易与先施工洞室形成应力叠加,导致后施工洞室变形量比单独开挖时增大,两洞室之间的岩柱因受双向应力作用,易出现变形集中,伴随旋转、滑动等小结构运动,成为变形控制的关键区域。高地温环境下,高温会引发岩体热胀冷缩效应,使原有裂隙进一步扩展,岩体完整性降低,变形量随温度升高呈递增趋势,且高温会加速岩体蠕变,导致围岩出现长期缓慢流变变形,即使在支护条件下,变形也可能持续较长时间。

## 3 影响矿山井下洞室围岩变形的关键因素

### 3.1 地质条件因素

岩体力学性质是制约围岩变形的核心地质条件,岩体完整性直接影响变形程度,裂隙发育少的完整岩体内部结构稳定,应力传递均匀,开挖后变形量显著小于裂隙密集的破碎岩体,破碎岩体因裂隙切割形成离散块体,易发生块体滑移或塌落,加剧变形。岩石强度对变形的约束作用同样突出,抗压强度高的岩石能承受更大地应力,在应力重分布过程中不易发生塑性屈服,变形以弹性为主;抗剪强度低的岩石则易在剪切应力作用下出现剪切破坏,导致变形量增大,尤其是层理发育的沉积岩,沿层理面的抗剪强度更低,易出现顺层滑动变形。地质构造会改变围岩受力状态与稳定性,断层、节

理带穿过洞室时,会破坏岩体连续性,形成力学薄弱区域,该区域应力易集中,成为局部变形集中区,若断层活动性强或节理充填软弱夹层,还会进一步降低岩体抗变形能力,加剧围岩失稳风险,使变形形态更复杂,可能出现沿构造面的定向位移,位移方向多与构造面走向一致。

### 3.2 施工技术因素

开挖方式对围岩扰动程度不同,直接影响变形大小,全断面开挖需一次性揭露较大范围岩体,瞬时扰动强烈,易打破原岩应力平衡,引发较大规模应力重分布,导致围岩变形量增加;分步开挖如台阶法、CD法通过分阶段开挖、分区域支护,逐步释放应力,减少单次开挖对围岩的扰动,使应力重分布过程更平缓,从而降低变形量,尤其适用于软岩或高应力地层洞室施工,能有效避免开挖面坍塌<sup>[1]</sup>。开挖速度需与围岩应力释放节奏匹配,过快开挖时,围岩应力来不及通过缓慢变形释放,易在岩体内部累积过高应力,导致变形快速累积,甚至引发突发变形;过慢开挖则会延长围岩暴露时间,使岩体长期处于无支护或弱支护状态,受井下湿度、风化作用影响,岩体强度逐渐衰减,加剧后期变形,增加支护难度,尤其在软岩地层中,暴露时间每延长一天,变形量可能增加明显。

### 3.3 支护措施因素

支护时机直接决定围岩早期变形控制效果,洞室开挖后,围岩变形从初期快速发展,开挖后及时支护能迅速为围岩提供径向约束,限制弹性变形向塑性变形转化,有效控制变形发展;延迟支护会使围岩在无约束状态下持续变形,若错过最佳支护时机,后期即使加强支护,也难以完全挽回已发生的塑性变形,甚至可能因变形过大导致支护结构失效,需额外投入更多加固成本。支护结构类型需与围岩变形特性适配,刚性支护如混凝土衬砌整体强度高、变形适应性差,适用于岩体稳定、变形量小的地层,能抵御较大集中应力;柔性支护如锚杆、锚索、喷锚网具有一定变形能力,可通过自身微小变形适应围岩小范围流变,避免因围岩变形过大导致支护结构开裂破坏,更适用于软岩或高应力地层,能与围岩形成协同承载体系,提升整体稳定性,减少后期维护频次。

## 4 矿山井下洞室围岩变形的控制措施

### 4.1 前期预防型控制措施

优化洞室设计需结合地质勘察结果,选址阶段通过钻孔取样、地质雷达探测明确岩体完整性,优先避开断层、破碎带及地下水富集区,选择岩体完整、力学性

能稳定的区域,从源头降低变形风险;断面设计需兼顾应力分布特性,圆形、马蹄形断面能使硐周应力均匀传递,减少应力集中现象,相比矩形断面更能抵御围岩挤压,变形风险显著降低,针对大断面硐室,还可通过设置中隔墙或弧形支护结构,进一步优化应力分布,避免局部应力过高引发变形。改进施工工艺需聚焦减少围岩扰动,微震爆破通过精准控制炸药用量与起爆顺序,将爆破振动速度控制在岩体允许范围内,降低爆破冲击波对岩体的破坏,机械开挖则直接避免爆破冲击,两种方式均能减少围岩裂隙扩展,保护岩体完整性;分步开挖与支护协同需严格控制开挖分层厚度与支护间隔时间,遵循“开挖一层、支护一层”的原则,每层开挖后12小时内施加初期支护,缩小围岩暴露面积与无支护时间,避免因暴露过长导致岩体强度衰减,有效控制变形累积。

#### 4.2 中期主动型控制措施

支护结构优化需根据围岩特性选择适配方案,柔性支护体系中,锚杆可深入围岩内部2-3米固定浅层松散岩体,防止块体脱落;锚索能对深层围岩施加50-100kN预紧力,约束大范围岩体位移;喷锚网可封闭岩体表面裂隙,减少风化与水的侵蚀,三者协同形成立体支护体系,既能适应围岩小范围流变,又能提供持续支撑力;刚性支护改进需增强结构抗变形能力,在混凝土衬砌中添加 $\Phi 8$ mm钢筋网,网格间距控制在 $200 \times 200$ mm,可提升衬砌的抗拉与抗剪强度,使其在围岩轻微位移时不易开裂,更好地适应围岩变形<sup>[4]</sup>。应力调控技术需主动干预硐周应力状态,卸压孔直径设为100-150mm、深度3-5米,卸压槽宽度500mm、深度2米,施工在硐室周边岩体中形成应力释放空间,使集中应力向卸压区域转移,降低硐壁承受的压力,减少围岩变形驱动力;注浆加固技术通过向岩体裂隙注入水泥浆或化学浆液,注浆压力控制在1.5-2.0MPa,浆液凝固后可胶结破碎岩块,填充裂隙空间,提升岩体完整性与力学强度,使原本松散的岩体形成整体承载结构,显著降低变形量,尤其适用于破碎岩或富水地层硐室。

#### 4.3 后期监测与动态控制措施

围岩变形监测体系的建立需覆盖关键指标与设备,

监测指标除位移量、变形速率外,还需包含硐周应力变化,全面反映围岩受力与变形状态;监测设备需科学布设,每50米硐长布设1个全站仪监测点,测斜仪埋深不小于硐室半径的2倍,应力传感器紧贴硐壁安装,在断层、节理发育等地质薄弱段需加密布设设备,确保关键区域监测无遗漏,各类设备数据实时传输至监控中心,数据更新频率不低于1次/小时,实现对变形的全程跟踪。动态调控机制需依托监测数据灵活调整策略,当监测发现变形速率超过0.5mm/天的预设阈值时,需结合应力数据综合分析原因,若因支护强度不足,可增加锚索数量或提高锚杆预紧力,若因岩体表面风化,可补强50mm厚喷浆封闭;对于变形持续发展的情况,需实施二次加固,如补打高强度锚杆或浇筑300mm厚二次混凝土衬砌,加固后需加密监测频率至每2小时1次,持续跟踪3-5天验证加固效果,待变形速率稳定低于阈值后,再逐步恢复常规监测频率,通过动态调整确保支护效果与变形控制需求匹配,防止变形失控。

#### 结束语

矿山井下硐室施工围岩变形监测与动态调控,是保障施工安全的关键环节。通过建立覆盖关键指标的监测体系、科学布设监测设备,可实时掌握围岩变形状态。依托监测数据实施动态调控,灵活调整支护策略,能有效控制变形发展。未来需进一步优化监测技术与调控方法,提高应对复杂地质条件的能力,为矿山安全生产提供有力保障。

#### 参考文献

- [1]韩建东,李宁,尹建东.副井换装硐室大跨度施工技术研究与应[J].价值工程,2024,43(29):62-64.
- [2]汪青仓,刘全辉,宋朝阳,等.超长斜井TBM掘进始发硐室围岩稳定性分析及加固技术研究[J].煤炭工程,2024,56(12):32-37.
- [3]郭彩守,吴德芳,赵瑞昌,等.金川二矿深井大断面硐室稳定性控制研究[J].矿业研究与开发,2025,45(5):8-16.
- [4]赵运涛.某露天灰岩矿大断面硐室开挖技术[J].现代矿业,2022,38(8):85-87,91.