

深井掘进巷道围岩变形控制技术实践

梁军伟

平顶山天安煤业股份有限公司一矿 河南 平顶山 467000

摘要：本文围绕深井掘进巷道围岩变形控制展开研究。首先剖析深井围岩变形机理，指出其受地应力、围岩性质等多因素影响，变形量大且形式复杂。接着阐述变形控制核心技术，包括支护结构优化、围岩改性加固及施工工艺管控技术。通过某深井煤矿工程实践案例，制定“复合支护+超前注浆加固+掘进机开挖”方案，实施后围岩变形量显著降低，应力分布均匀，支护结构稳定。最后总结技术实践关键点，强调围岩勘察与参数适配、多技术协同应用以及现场监测与动态调整的重要性，为深井巷道围岩变形控制提供理论与实践参考。

关键词：深井掘进；巷道围岩；变形控制；技术实践

引言：随着我国矿产资源开采向深部发展，深井掘进巷道数量日益增多。深井巷道所处地质环境复杂，地应力高、地质构造发育，导致围岩变形问题突出，严重影响巷道稳定与安全生产。传统的围岩变形控制技术难以满足深井巷道的需求，因此，深入研究深井掘进巷道围岩变形机理，探索有效的变形控制技术具有重要的现实意义。本文旨在分析深井围岩变形机理，介绍变形控制核心技术，结合工程实践案例进行验证，并总结技术实践关键点。

1 深井掘进巷道围岩变形机理分析

深井掘进巷道围岩变形是地应力、围岩物理力学性质、地质构造及施工扰动等复杂因素交互作用的结果。从应力分布层面剖析，巷道开挖瞬间打破原有围岩应力平衡，在巷道周边形成应力集中区域。当集中应力超出围岩自身承载极限，围岩便会进入塑性变形阶段，甚至发生破坏。（1）与浅部巷道相比，深井围岩变形特征显著。变形量大且持续时间长。深部地应力水平高，围岩塑性区范围大幅拓展，变形呈现出明显的时效性，历经较长时间仍持续发展；变形形式复杂多样，除常见的收敛变形、片帮外，底鼓、围岩破裂等现象也较为常见；受扰动敏感性强，施工中的爆破震动、机械开挖等扰动，会进一步恶化围岩应力状态，加剧变形与破坏。（2）对多个深井掘进工程围岩变形监测数据深入分析可知，地质构造发育区域围岩变形更为剧烈。破碎带、断层等地质缺陷，极大削弱了围岩整体性与承载能力，使应力集中现象更为突出。此外，岩石的抗压强度、弹性模量等物理力学指标，对围岩变形程度起着关键作用，软岩巷道变形量通常远超硬岩巷道^[1]。

2 深井掘进巷道围岩变形控制技术

2.1 支护结构优化技术

支护结构是控制深井巷道围岩变形的关键，其核心思路是通过支护体与围岩的协同作用，有效承载围岩应力，限制围岩塑性变形的发展。针对深井高应力环境，传统的单一支护形式已难以满足变形控制需求，需采用复合支护结构进行优化设计。（1）锚网喷支护作为基础支护形式，在深井巷道中仍发挥重要作用，但需对锚杆参数进行优化。通过现场试验与数值模拟计算，确定合理的锚杆直径、长度、间距及锚固方式。例如，在某深井软岩巷道工程中，将锚杆直径由22mm增大至25mm，长度由2.5m延长至3.5m，采用全长粘结式锚固，有效提升了锚杆的锚固力，增强了对围岩浅层变形的控制效果。同时，配合金属网片与喷射混凝土，形成浅层支护体系，可有效防止围岩表层剥落。（2）对于高应力、大变形巷道，在锚网喷基础上增设锚索支护，形成深浅结合的复合支护结构。锚索具有锚固深度大、承载能力强的特点，能够将围岩深部应力传递至稳定岩层，有效控制围岩深层变形。在设计过程中，需根据围岩应力分布情况，合理确定锚索的布置方式、间距及预紧力。例如，在某深井巷道工程中，采用“锚杆+锚索+网片+喷射混凝土”的复合支护形式，锚索采用1×19股高强度钢绞线，直径15.24mm，长度8m，间距2m×2m，预紧力控制在120kN以上，通过现场监测，巷道收敛量较传统支护形式减少了40%以上^[2]。

2.2 围岩改性加固技术

对于破碎、软弱围岩巷道，仅依靠支护结构难以实现理想的变形控制效果，需通过围岩改性加固技术提升围岩自身的承载能力，从根本上抑制围岩变形。常用的围岩改性加固技术主要包括注浆加固技术与化学加固技术。（1）注浆加固技术通过向围岩裂隙中注入浆液，浆液凝固后可填充裂隙，胶结破碎岩块，形成整体受力

结构, 从而提升围岩的整体性与承载能力。根据深井围岩的特点, 需合理选择注浆材料与注浆工艺。对于裂隙发育的围岩, 可采用水泥-水玻璃双液浆, 该浆液具有凝结时间短、早期强度高的特点, 能够快速实现围岩加固; 对于孔隙率较大的软岩围岩, 可采用超细水泥浆, 其渗透性更强, 能够充分填充围岩孔隙。在注浆工艺方面, 采用分段注浆、高压注浆的方式, 确保浆液能够均匀渗透至围岩深部。例如, 在某深井破碎带巷道掘进过程中, 采用超前注浆加固技术, 在掘进工作面前方布置注浆孔, 孔深5m, 间距1.5m, 注入水泥-水玻璃双液浆, 注浆压力控制在3-5MPa, 加固后围岩的抗压强度提升了30%以上, 有效避免了掘进过程中围岩坍塌现象的发生。

(2) 化学加固技术主要适用于围岩极度破碎、含水量较高的情况, 通过注入化学浆液(如聚氨酯、丙烯酸盐等), 实现围岩的快速加固与堵水。化学浆液具有粘度低、渗透性强、凝结速度可调节等优点, 能够在短时间内形成高强度的加固体。但在使用过程中, 需严格控制化学浆液的用量与施工质量, 确保加固效果。

2.3 施工工艺管控技术

施工工艺的合理性直接影响深井巷道围岩的变形程度, 科学的施工工艺能够有效减少对围岩的扰动, 为变形控制创造有利条件。施工工艺管控主要包括开挖方式优化、掘进参数控制及施工时序管控三个方面。(1) 在开挖方式选择上, 应优先采用扰动较小的开挖技术。相较于传统的爆破开挖, 悬臂式掘进机开挖具有扰动小、开挖效率高、断面成型好等优点, 更适用于深井软岩巷道掘进。对于必须采用爆破开挖的硬岩巷道, 需优化爆破参数, 采用光面爆破或预裂爆破技术, 减少爆破对围岩的破坏。例如, 在某深井硬岩巷道工程中, 通过优化炮孔布置、调整炸药用量与起爆顺序, 采用光面爆破技术, 使巷道周边围岩的完整性得到显著提升, 爆破后围岩剥落量减少了50%以上。(2) 掘进参数控制主要包括掘进速度、切削深度等参数的合理确定。掘进速度过快、切削深度过大, 会加剧对围岩的扰动, 引发围岩变形加剧。因此, 在施工过程中, 需根据围岩地质条件, 合理控制掘进速度与切削深度, 避免盲目追求施工进度。同时, 加强对掘进设备的维护与管理, 确保设备运行稳定, 减少施工过程中的意外扰动。(3) 施工时序管控要求严格遵循“先支护、后开挖”“分步开挖、分步支护”的原则。对于大断面巷道, 可采用台阶法或导洞法开挖, 先开挖小断面导洞, 完成初期支护后, 再进行扩大断面开挖与二次支护, 逐步释放围岩应力, 有效控制围岩变形。例如, 在某深井大断面巷道掘进中, 采

用台阶法开挖, 上台阶开挖高度2.5m, 完成锚网喷支护后, 再进行下台阶开挖, 下台阶开挖高度3m, 开挖完成后及时进行二次锚索支护, 通过合理的施工时序管控, 巷道变形量得到了有效控制。

3 工程实践案例分析

3.1 工程概况

某深井煤矿掘进巷道, 开采深度850m, 巷道设计断面为矩形, 断面尺寸为4.5m×3.8m(宽×高)。巷道穿越岩层主要为砂质泥岩与细砂岩, 其中砂质泥岩为软岩, 抗压强度8-12MPa, 弹性模量2.5-3.5GPa; 细砂岩为中硬岩, 抗压强度35-45MPa, 弹性模量18-25GPa。巷道穿越区域存在一条小型破碎带, 破碎带宽度1.2-2.0m, 围岩稳定性较差, 初期采用传统锚网喷支护时, 巷道出现明显收敛变形, 顶底板收敛量最大达到180mm, 两帮收敛量最大达到120mm, 无法满足安全生产需求。

3.2 变形控制方案制定

针对该工程围岩特点与初期支护存在的问题, 结合前文所述的变形控制技术, 制定了“复合支护+超前注浆加固+掘进机开挖”的综合变形控制方案。具体内容如下:(1) 超前注浆加固: 在掘进工作面前方布置超前注浆孔, 孔深6m, 间距1.2m, 呈扇形布置, 注入水泥-水玻璃双液浆, 注浆压力控制在4-6MPa, 对破碎带及周边软弱围岩进行超前加固, 提升围岩整体性与承载能力。(2) 复合支护体系: 采用“锚杆+锚索+金属网片+喷射混凝土”的复合支护形式。锚杆选用 $\phi 25$ mm高强度螺纹钢锚杆, 长度3.8m, 间距1.0m×1.0m, 采用全长粘结式锚固; 锚索选用 $\phi 15.24$ mm高强度钢绞线, 长度8.5m, 间距1.5m×1.5m, 预紧力130kN; 金属网片选用 $\phi 6$ mm钢筋焊接而成, 网格尺寸100mm×100mm; 喷射混凝土强度等级为C25, 喷射厚度150mm。(3) 开挖方式优化: 采用悬臂式掘进机进行开挖, 控制掘进速度为0.8-1.0m/h, 切削深度为0.5m/循环, 减少对围岩的扰动^[1]。

3.3 实施效果监测与分析

在变形控制方案实施过程中, 在巷道内布置了多个监测点, 对顶底板收敛量、两帮收敛量及围岩应力进行实时监测, 监测周期为30天。监测结果显示:(1) 围岩变形量显著降低: 顶底板最大收敛量为45mm, 两帮最大收敛量为32mm, 相较于初期传统支护, 变形量分别减少了75%和73%, 巷道断面尺寸能够满足开采作业需求。(2) 围岩应力分布均匀: 通过应力监测发现, 围岩应力集中现象得到有效缓解, 应力峰值降低了35%以上, 且应力分布更加均匀, 支护体系与围岩协同承载效果良好。(3) 支护结构稳定性良好: 监测期间, 支护结构未出现

锚杆松动、锚索失效、喷射混凝土剥落等现象，支护体系稳定可靠，保障了掘进作业的顺利开展。

4 技术实践关键要点总结

4.1 围岩勘察与参数适配

在深井巷道围岩变形控制的技术实践中，精准且全面的围岩勘察与参数适配是至关重要的前提条件。由于深井巷道所处地质环境复杂，围岩变形受多种因素影响，因此必须在工程前期开展细致入微的围岩勘察工作。（1）具体而言，要综合运用钻孔取样、现场试验等多种科学手段，全面获取围岩的物理力学性质，如抗压强度、弹性模量等；准确掌握地质构造分布情况，包括破碎带、断层的位置与规模；精确测定地应力的大小及方向等关键参数。（2）在获取这些基础数据后，需结合数值模拟分析技术，对不同工况下围岩的变形规律进行模拟预测。基于模拟结果，有针对性地合理选择变形控制技术与支护参数，确保所制定的技术方案能够紧密贴合工程实际状况，有效避免因盲目套用现有技术方案而导致的控制效果不佳、资源浪费等问题，为深井巷道围岩变形控制提供坚实可靠的技术支撑。

4.2 多技术协同应用

深井围岩变形受地应力、地质构造、施工扰动等多种因素交织影响，其变形机制复杂且多变。（1）在此情况下，单一变形控制技术的作用范围和效果存在明显局限性，难以全面、有效地应对复杂的围岩变形问题，实现理想的变形控制目标。（2）必须将多种技术进行有机协同应用。具体而言，可先运用超前注浆加固技术，向围岩中注入合适的浆液，改善围岩的物理力学性质，提升其自身承载能力；再采用复合支护结构，如锚网喷与钢架联合支护等，共同承载围岩应力，增强支护体系的整体稳定性；同时，在施工过程中采用低扰动开挖技术，如光面爆破、机械切割等，最大程度减少对围岩的破坏。通过这些技术的协同配合，构建起全方位、多层次的变形控制体系，切实保障深井巷道围岩的稳定^[4]。

4.3 现场监测与动态调整

深井巷道围岩变形过程呈现出显著的时效性与不确定性特征。地应力持续作用、地质条件复杂多变以及施工扰动等因素，都可能使围岩变形在不同阶段表现出不同的规律，且难以提前精准预判。（1）鉴于此，在变形控制技术实施期间，构建一套完善的现场监测体系至关重要。要运用高精度仪器，对围岩变形量、支护结构受力情况等关键指标进行实时、连续监测，获取准确可靠的数据。（2）依据监测所得数据，专业人员需及时开展深入分析，精准把握围岩变形发展趋势。一旦发现变形量超出预先设定的预警值，必须迅速做出反应，及时调整支护参数，如增加锚杆数量、加大支护强度等，或优化施工方案，如调整开挖顺序、改进爆破参数等，通过动态化管控，保障变形控制措施始终有效，确保深井巷道施工安全与稳定。

结束语

深井掘进巷道围岩变形控制是一项复杂且系统的工程。通过对其变形机理的深入分析，明确了影响围岩变形的主要因素；多种变形控制核心技术的综合应用，为解决围岩变形问题提供了有效手段；工程实践案例验证了综合变形控制方案的可行性与有效性；技术实践关键要点的总结为后续工程提供了宝贵的经验。在实际工程中，应充分重视围岩勘察与参数适配，合理运用多技术协同应用策略，并加强现场监测与动态调整，以实现深井巷道围岩变形的有效控制，保障深井开采的安全与高效进行。

参考文献

- [1]刘冲宇.高应力煤层巷道掘进工艺优化研究及应用测试[J].山西化工,2025,45(03):206-208.
- [2]王跃楠.高应力区软岩煤层巷道掘进支护优化[J].江西煤炭科技,2024,(04):86-88+96.
- [3]李勇.高应力软岩巷道差异化协同支护技术研究[J].煤炭与化工,2024,47(07):18-22.
- [4]韩敏.厚煤层综放工作面沿空掘巷围岩控制技术[J].江西煤炭科技,2025,(03):90-93.