

煤矿斜井采矿中地压显现规律及支护技术应用

贾 飞

山西华泰矿业管理有限公司 山西 朔州 036000

摘 要：本文以煤矿斜井采矿工程为研究对象，系统分析斜井围岩地压显现的基本规律及其主控因素，深入探讨地压的时空演化特征与显现形式，并在此基础上梳理主动支护、被动支护及联合支护技术体系。研究表明，斜井地压显现受原岩应力状态、倾角效应、采动扰动及水文地质条件等多因素耦合控制，呈现非对称性、动态迁移性与时效性特征；单一支护模式难以有效应对复杂地压条件，必须建立以锚网喷主动支护为基础、刚柔结合的多层次联合支护体系。本文进而提出了倾斜层状围岩非对称支护设计、采动影响区动态补强及智能监测预警等关键技术对策，为煤矿斜井安全高效建设与运营提供理论依据与技术参考。

关键词：煤矿斜井；地压显现；围岩稳定；支护技术；采动影响

引言

斜井是煤矿开拓系统中连接地面与井下生产水平的倾斜通道，承担着煤炭运输、物料提升、人员通行以及通风排水等综合功能，其安全稳定运行是矿井生产的基本前提。然而，随着煤矿开采深度逐年增加，地应力水平显著上升，加之斜井穿越地层岩性多变、倾角结构复杂，围岩变形与破坏问题日益突出。地压显现引发的围岩片帮、底鼓、支护结构损毁等现象，不仅增加维护成本，更严重威胁矿井作业人员的生命生产。与立井不同，斜井因其倾斜轴线与岩层层间之间存在复杂的空间角度关系，围岩受力状态呈现显著的非对称性与各向异性，地压显现规律具有特殊性。本文旨在通过系统分析斜井地压的形成机制、时空演化特征及主要影响因素，揭示采矿全过程围岩响应的内在规律，并基于不同破坏模式梳理适用性支护技术，构建涵盖主动控制与被动承载的联合支护体系，为煤矿斜井工程设计与灾害防控提供理论指导。

1 煤矿斜井采矿地压的形成机制与基本特征

1.1 斜井围岩应力场分布特征

斜井开挖扰动原岩应力场，引发围岩二次应力重分布，形成应力集中区与卸压区。由于井筒倾斜，重力分解为垂直井壁的法向分量和沿轴向的切向分量，前者直接作用于支护结构，后者易诱发岩层顺层滑移。当井筒倾向与岩层倾向一致时，顶板稳定性降低；若相反，则底板受压加剧。斜井围岩应力具有显著非对称性：下帮（倾斜下方）切向应力高于上帮，导致其破坏更严重^[1]。此外，穿越不同岩性界面时，因弹性模量差异，界面附近易出现应力突变，成为变形破坏高发区域。

1.2 地压显现的主要形式与演化过程

地压显现形式包括顶板下沉冒落、两帮内移片帮、底板鼓起及支护结构失稳，按机理可分为压剪、张拉和结构面滑移破坏。其演化呈三阶段特征：开挖初期为快速变形期（数日至数周），围岩释放弹性应变能；随后进入缓慢稳定期（数月），应力重分布趋于暂时平衡；受采动或水影响后，进入加速变形期，直至失稳。因此，支护体系须兼具初始强度与长期承载及适应能力。

1.3 地压显现的主控因素分析

地压强度与模式受多因素耦合控制。埋深决定原岩应力水平，深部软岩易发生流变；岩性及结构是内在主要因素，软弱、膨胀性或层理发育岩层更易大变形；井筒倾角在25°~45°时层面滑移风险最高；采动影响使支承压力达原岩2~3倍，常触发突发性变形；地下水则通过软化岩石、降低结构面摩擦、产生膨胀压力等削弱围岩强度。上述因素相互叠加、协同作用，共同主导斜井地压显现特征。

2 采矿全过程斜井地压显现的动态规律

2.1 掘进期间围岩响应与短期稳定特征

斜井掘进阶段，掌子面推进形成的三维应力状态使围岩经历剧烈卸荷过程。研究表明，掌子面后方约1~2倍井径范围内为应力调整最剧烈的区域，围岩变形速率最高，支护体承受荷载增长最快。由于斜井掘进通常采用自上而下或自下而上的单向推进方式，已支护段与未支护段交界处成为应力集中区，该区域围岩往往发生剪切破坏，表现为环向裂缝与纵向裂缝交错发育。在短期稳定方面，影响掘进期围岩稳定性的关键因素包括掘进速度、爆破震动及临时支护及时性。快速掘进虽能缩短围岩暴露时间，但过快的应力释放速率可能诱发岩爆等动力现象；爆破震动则通过动载冲击，进一步劣化围岩完

整性^[2]。因此,掘进期间应合理控制推进速率,及时施作喷射混凝土及锚杆、锚网等临时支护,抑制塑性区过度扩展。

2.2 采动影响下地压迁移与叠加效应

斜井服务于整个矿井生产周期,随着采掘工程向深部延伸,采动应力场的迁移与叠加对斜井围岩稳定性构成持续影响。当回采工作面位于斜井上方、下方或侧方不同方位时,支承压力的在斜井周边产生的附加应力场各异。若工作面在斜井一侧推进,斜井将承受非对称采动压力,偏向采空区一侧的帮压显著增大;若工作面位于斜井上方,则斜井顶部承受卸载后的覆岩压力转移,可能引发顶板结构失稳。采动影响的程度取决于斜井与工作面的相对距离、采高、顶板管理方式等因素。一般而言,工作面距斜井水平投影距离小于30~50m时,采动影响趋于显著;采高越大、顶板暴露面积越大,影响范围越广。在采动影响下,斜井地压可能经历多次“升高—稳定—再升高”的波动过程,呈现明显的阶段性跃变特征,这对支护结构的疲劳性能与抗冲击能力提出更高要求。

2.3 长期服役阶段时效变形与稳定性劣化

斜井作为永久性工程设施,其服役寿命通常贯穿矿井整个生产周期,长达数十年。在长期服役过程中,软弱岩层的蠕变效应不可忽视。即使地压未发生剧烈变化,软弱围岩在恒定荷载作用下也会产生持续增长的时效变形,表现为支护结构荷载递增、喷射混凝土开裂、锚杆预应力损失等情况。此外,巷道断面因长期收敛而逐渐缩小,可能影响运输与通风功能。长期稳定性劣化的另一个原因是支护材料自身的性能衰减。金属锚杆与网片在潮湿环境中存在锈蚀风险,喷射混凝土经历冻融循环后强度下降,注浆结石体在渗透水流作用下可能发生化学溶蚀。这些因素使得斜井支护体系在服役后期承载能力逐渐下降,若未及时进行检测评估与补强加固,最终可能演变为失稳事故。因此,长期服役阶段需要将地压监测常态化,并建立定期评估与维护机制。

3 煤矿斜井支护技术体系与应用分析

3.1 主动支护技术及其适用条件

主动支护旨在通过加固围岩自身承载能力来维持稳定,区别于被动承载的支架支护,其核心理念是调动围岩的自承能力。锚杆支护是最基础的主动支护形式,通过锚固力将浅部围岩与深部稳定岩体锚固成整体,形成承载拱结构。在斜井中,锚杆长度一般取1.5~3.0m,间排距根据围岩条件确定,通常为0.8~1.2m;锚固方式宜选用全长锚固或端头锚固,倾斜岩层中宜适当加大锚固长度以抵抗层面滑移。锚索支护是锚杆的补充与加强,适

用于大断面或破碎围岩条件,其长度可达5~10m,能够将不稳定层位悬吊至深部稳定岩层。喷射混凝土则通过及时封闭围岩表面防止风化剥落,同时提供一定的表面约束力,与锚杆共同构成锚喷支护体系。在倾斜层状围岩中,锚杆布置方向应根据层面产状进行调整,不应一律垂直井壁,应当适当倾斜以切割层面,提高抗剪能力。

3.2 被动支护技术及其承载特征

被动支护以支架、衬砌等结构直接承受围岩压力为主要特征,在斜井破碎带、断层区及采动影响强烈区段仍不可或缺。型钢支架(如U型钢可缩性支架)是斜井常用的被动支护形式,其优点在于承载能力大、具有一定的可缩性以适应围岩变形。支架间距一般为0.5~1.0m,支架间通过纵向连接件形成整体,防止倾倒。钢筋网与喷射混凝土联合使用时,可形成柔性混凝土衬砌,既能封闭围岩又能适应适量变形。砌碇支护以砖石或混凝土预制块砌筑而成,适用于永久性硐室及服务年限较长的主斜井^[3]。其整体性强、耐久性好,但属于刚性结构,对变形适应性较差,在采动影响区域容易开裂破坏。近年来,钢纤维喷射混凝土、高韧性纤维增强水泥基复合材料等新型材料逐步应用于斜井衬砌,改善了传统混凝土脆性大的不足。

3.3 联合支护体系的协同作用与设计原则

鉴于斜井地压的多因素复合特征,单一支护形式通常难以满足复杂条件下的稳定性要求,联合支护体系成为必然选择。联合支护的基本模式可概括为“锚网喷+型钢支架+注浆”三层复合结构:第一层以锚杆、锚索与金属网构成主动加固层,约束围岩初始变形;第二层以喷射混凝土或型钢支架构成承载层,直接承受剩余地压;第三层以围岩注浆或煤壁后充填构成整体化层,充填裂隙、提高围岩完整性。联合支护设计须遵循“让压与抗压相协调”的原则,即允许围岩产生一定量的可控变形以释放部分能量,但不允许变形过度导致失稳。支护结构各层之间应有合理的刚度匹配——内层柔性较大以适应该阶段变形,外层承载能力较强以提供长期抗力。在倾斜层状围岩中,还需特别注意非对称性,对下帮及层面倾向一侧予以加强,如增加锚杆密度、加长锚固深度或设置加强支架。

4 斜井地压控制的关键技术对策

4.1 基于地压监测的动态反馈设计

地压监测是科学支护的前提,通过监测数据反馈指导设计与施工调整,实现动态设计。监测内容应涵盖围岩表面位移、深部位移、锚杆轴力、支架荷载及喷射混凝土应力等参数。在斜井中,监测断面宜沿井筒纵向按

30~50m间距布置,每个断面在顶板、底板及两帮设置测点,特别注意对下帮加强监测。监测频率在掘进初期宜加密(每日一次),稳定后适当放宽,采动影响期间应恢复高频监测。动态反馈设计的核心在于建立监测数据与支护措施的联动机制:当变形速率超过预警值时,及时启动补强预案,如增加锚索、架设套拱或注浆加固;当监测数据趋于稳定且低于设计预留变形量时,可适当简化后续支护。这种“监测—研判—响应”的闭环控制模式,能够有效应对斜井地压的不确定性。

4.2 倾斜层状围岩的非对称支护设计

非对称支护是斜井支护区别于水平巷道的核心设计理念。针对倾斜岩层中斜井围岩破坏的优势方位,应该在支护参数上予以差异化处理。具体而言,下帮侧围岩承受的切向应力较大且层面滑移趋势明显,锚杆长度宜增加20%~30%,间距宜缩小至0.6~0.8m;顶板层面倾向一侧应增设锚索或加强钢筋网,防止离层扩展;底板如为软弱层位,应考虑底板锚杆或反拱结构,抑制底鼓发生。支护方案的倾斜角度也需精细设计^[4]。锚杆方向与层面法线夹角宜控制在15°~30°范围内,以兼顾抗拉与抗剪双重功能。在井筒穿越岩性界面时,应在上、下界面两侧各5m范围内实施加密锚杆注浆加固,减少界面滑移风险。

4.3 采动影响区的超前防控与补强策略

对于临近回采工作面的斜井区段,应实施超前防控策略。在采动影响到达前,预先对目标区段进行注浆加固或补打锚索,提高围岩整体刚度;同时在斜井与工作面之间设置应力监测孔,实时跟踪支承压力迁移态势。当监测到应力急剧升高时,可采用卸压爆破或钻孔卸压等方式,将集中应力向深部转移,降低斜井周边的应力峰值。采动期间的补强措施包括:架设可缩性套拱,允许一定变形量以吸收能量;在底鼓严重区段采用底板卸压槽或锚网反拱;对已开裂的喷射混凝土进行复喷修复。采动影响结束后,须对斜井全线进行综合评估,对变形超限段实施二次衬砌或全断面注浆,恢复其长期稳定性。

4.4 软岩与破碎带综合治水与注浆改良

软岩及破碎带地压问题常与水密切相关。地下水不仅降低岩体强度,还产生膨胀压力与渗透力,恶化围岩力学环境。因此,治水与支护必须同步实施。斜井穿越含水层或断层破碎带前,应该进行超前探水与预注浆,封堵主要导水通道,减少围岩含水率。注浆材料可选用水泥—水玻璃双液浆或化学浆液,注浆压力控制在1~3MPa,注浆半径根据围岩裂隙发育程度确定。在长期维护中,壁后注浆充填是修复围岩松动圈、提高结构整体性的有效手段。通过预埋注浆管对支护结构背后的空隙进行充填,将松散围岩重新胶结,同时起到防水作用。注浆改良后的围岩,其弹性模量与粘聚力均有显著的提升,能够有效的降低作用于支护结构上的最终荷载。

5 结语

煤矿斜井地压显现源于应力场、岩体结构与工程扰动的耦合作用。因斜井空间方位特殊,围岩受力具非对称性与时效性,受倾角、采动迁移及水文等多因素影响。文章系统分析了地压形成机制与演化规律,梳理掘进、采动及服役阶段的变形破坏特征,提出主动与被动支护协同的联合支护框架。针对实践需求,强调基于监测反馈的动态设计、倾斜层状围岩非对称支护、采动区超前防控及注浆治水等关键技术。核心理念是:斜井支护应该贯穿矿井全生命周期,实现地压认知、支护设计与长期维护的有机统一。未来可以融合智能感知与数字孪生技术等方式,推动煤矿行业斜井工程向精准化、智能化发展。

参考文献

- [1]康红普,王金华,林健.煤矿巷道锚杆支护应用实例与分析方法[J].岩石力学与工程学报,2022,41(2):215-226.
- [2]何满潮,谢和平,彭苏萍.深部开采岩体力学研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):726-746.
- [3]李化敏,周英,张明.倾斜巷道围岩非对称变形机理及控制技术[J].采矿与安全工程学报,2023,40(4):678-685.
- [4]余伟健,高谦,王树仁.深部高应力软岩巷道围岩稳定性及支护技术[J].煤炭科学技术,2023,51(5):38-47.