

大倾角巷道掘进支护结构受力特性与支护设计优化

张利杰 潘祺辉 乔江 黄新调
国家能源集团神东保德煤矿 山西 忻州 034000

摘要: 随着我国煤炭资源开采深度的不断增加,地质条件日益复杂,大倾角(通常指倾角大于 30°)煤层巷道的掘进与支护问题已成为制约矿井安全高效生产的关键技术瓶颈。大倾角巷道围岩应力分布、变形破坏模式及支护结构受力机理与平缓或缓倾斜巷道存在显著差异,传统支护理论与方法难以有效应对由此产生的围岩失稳风险。本文系统阐述了大倾角巷道围岩的力学行为特征,深入剖析了其独特的受力机制与变形破坏模式;在此基础上,对锚杆(索)、U型钢支架、联合支护等常用支护结构在大倾角条件下的受力特性进行了详细分析,揭示了支护体易发生剪切滑移、弯曲失稳及局部失效的根本原因;进而,从支护理念革新、关键参数优化、新型材料与结构应用以及动态信息反馈等方面,提出了针对性的大倾角巷道支护设计优化策略。研究成果旨在为大倾角巷道的安全、高效、经济支护提供理论支撑与实践指导。

关键词: 大倾角巷道; 围岩控制; 支护结构; 受力特性; 破坏模式; 支护优化

引言

煤炭作为我国能源结构的基石,其安全高效开采始终是国家能源战略的核心议题。经过长期高强度开采,浅部资源日渐枯竭,矿井开采深度普遍超过800米,部分矿井甚至突破1500米。深部开采不仅伴随着高地应力、高瓦斯、高地温等“三高”问题,还常常遇到复杂的地质构造,其中大倾角煤层赋存条件尤为突出。然而,大倾角巷道的掘进与维护面临严峻挑战。巷道轴线与重力方向形成较大夹角,导致围岩自重应力场发生根本性重构。传统的、基于水平或缓倾斜巷道建立的支护理论与经验,在应用于大倾角巷道时往往出现“水土不服”,表现为支护体频繁失效、巷道收敛变形量大、底鼓严重、片帮冒顶事故频发等问题,严重威胁矿工生命安全,并造成巨大的经济损失。究其原因,在于对大倾角巷道围岩-支护系统的独特力学行为认识不足。大倾角条件下,围岩块体在重力分量驱动下具有强烈的沿层面或结构面滑移、倾倒趋势,使得巷道两帮和顶板的稳定性呈现出高度的非对称性和动态演化特征。同时,支护结构不仅要承受来自围岩的法向压力,更要抵抗由重力引起的巨大切向剪切力,其受力状态更为复杂。因此,深入研究大倾角巷道掘进过程中围岩的应力分布规律、变形破坏机理以及支护结构的受力特性,并在此基础上提出科学、高效的支护设计优化方法,是当前深部煤矿安全开采领域亟待解决的重大课题。

1 大倾角巷道围岩力学行为特征

1.1 应力场重构与非对称分布

在水平巷道中,垂直应力(σ_v)主要由上覆岩层自

重产生,水平应力(σ_h)则多由构造应力或泊松效应引起,二者共同作用形成相对对称的应力场。然而,在大倾角巷道中,这一平衡被彻底打破。巷道开挖后,原始地应力场重新分布,形成新的二次应力场。此时,重力矢量可分解为平行于巷道轴线的分量($G_{//}$)和垂直于巷道轴线的分量(G_{\perp})。 G_{\perp} 分量主导巷道断面内的法向应力分布。由于巷道断面不再水平,其顶、底板及两帮所承受的垂直压力差异显著。例如,在上山掘进时,下帮(低位帮)承受的压力远大于上帮(高位帮)。 $G_{//}$ 分量是大倾角巷道区别于其他巷道的最核心特征。该分量沿巷道走向作用,对围岩产生持续的、单向的推挤效应^[1]。它促使巷道后方(已掘进区域)的围岩有向工作面方向滑移的趋势,而前方(未掘进区域)的围岩则受到挤压。这种纵向推力是导致支护体整体失稳、锚杆(索)被剪断、支架被推倒的主要诱因。因此,大倾角巷道的二次应力场呈现出强烈的三维非对称性和各向异性,其主应力方向与巷道轴线及层面方向密切相关,给围岩稳定性分析带来了巨大困难。

1.2 变形破坏模式

受重构应力场的控制,大倾角巷道围岩的变形破坏模式具有鲜明的特征,主要表现为以下几种:(1)非对称收敛变形:巷道断面收敛不再是均匀的圆形或椭圆形收缩,而是呈现明显的“斜向”或“菱形”变形。下帮内移量远大于上帮,顶板下沉常伴随向低位帮的偏移,底板则可能出现向高位帮的隆起(底鼓),整体形态极不对称。(2)重力驱动型滑移失稳:当巷道穿过层状岩体或存在软弱夹层时, $G_{//}$ 分量会驱动岩层或块体沿层面、

节理面或断层面发生顺层滑动。这种滑移一旦启动,能量释放迅速,极易引发大规模的片帮、冒顶甚至冲击地压事件。(3)块体倾倒与坠落:在巷道上帮(高位帮),由于支撑减弱,岩块在重力矩作用下容易发生绕其底部的倾倒破坏。而在顶板,特别是当顶板为薄层状岩石时,重力分量可能导致岩块从母岩上拉裂、坠落。(4)底鼓与底板滑移:底板岩层在上覆岩层压力和 $G//$ 分量的共同作用下,可能发生塑性流动(底鼓)。若底板存在软弱层,则可能发生沿软弱面的整体滑移,进一步加剧巷道断面的失稳。这些破坏模式相互耦合、动态演化,使得大倾角巷道的围岩控制异常复杂。

2 支护结构受力特性分析

2.1 锚杆(索)支护受力特性

锚杆(索)支护因其主动性强、成本低、施工便捷等优点,是巷道支护的首选。但在大倾角条件下,其受力状态极为不利。(1)剪切主导的受力模式:在水平巷道中,锚杆主要承受拉力,用于悬吊松动岩块或形成组合梁/拱。而在大倾角巷道中,由 $G//$ 分量引起的围岩纵向滑移趋势,会在锚杆杆体上产生巨大的横向剪切力。当该剪切力超过锚杆杆体的抗剪强度或锚固剂-杆体/岩体界面的抗剪强度时,锚杆即被剪断或拔出,完全丧失支护作用^[2]。(2)非均匀荷载分布:由于围岩非对称变形,同一断面上不同位置的锚杆受力差异巨大。下帮锚杆承受的轴向拉力和剪切力均远高于上帮锚杆,导致支护系统内部受力不均,局部过载失效。(3)预紧力损失加速:围岩的持续滑移和流变会导致锚杆预紧力快速衰减,使其无法有效约束围岩的早期变形,降低了支护的整体效能。

2.2 U型钢可缩性支架受力特性

U型钢支架通过自身的可缩性来适应围岩变形,常用于围岩压力大、变形剧烈的巷道。(1)整体推倒失稳: $G//$ 分量对支架施加一个沿巷道走向的推力。如果支架之间缺乏有效的纵向连接(如拉杆、撑木),或者底座与底板之间的摩擦力不足,整个支架排架就可能像多米诺骨牌一样被依次推倒,造成灾难性后果。(2)非对称弯矩作用:由于巷道两帮压力不均,支架腿所受的垂直荷载差异显著,导致支架顶部横梁承受极大的非对称弯矩,容易发生扭曲、失稳。(3)底座滑移与钻底:支架底座在巨大的垂直压力和水平推力合力作用下,极易在底板上发生滑移。若底板较软,则会发生“钻底”现象,即底座陷入底板,导致支架失效。

2.3 联合支护受力特性

为了克服单一支护方式的不足,常采用锚网喷+U型钢支架等联合支护形式。在这种体系中,各支护元件协

同工作,但也面临新的挑战。(1)荷载传递与分担机制复杂:锚杆(索)形成的浅部承载结构与U型钢支架形成的深部承载结构之间如何有效传递荷载、协调变形,是联合支护成功与否的关键^[3]。在大倾角条件下,由于变形模式的特殊性,二者之间容易脱开,形成“两张皮”,无法形成有效的整体承载环。(2)关键连接部位薄弱:例如,锚网喷层与U型钢支架背板之间的接触面,往往是应力集中和破坏的起始点。在剪切力作用下,喷层易开裂剥落,导致支架直接暴露于围岩压力之下。

3 大倾角巷道支护设计优化策略

3.1 支护理念革新:从“被动承压”到“主动抗剪”

针对大倾角巷道重力分量($G//$)主导的剪切失稳机制,支护理念必须实现根本性转变。首先,突破传统二维断面设计局限,构建三维协同抗滑体系:通过在U型钢支架间设置不少于2道 $\Phi 22\text{mm}$ 高强度纵向拉杆(间距 $\leq 1.5\text{m}$),并沿顶板走向布置预应力锚索梁($\Phi 17.8\text{mm}$,间排距 $1.2\text{m} \times 1.0\text{m}$),形成抵抗纵向推力的整体结构。其次,推行非对称差异化支护:以下帮(低位帮)为重点强化区,采用 $\Phi 22\text{mm}$ 、2.4m长锚杆(俯角 $10^\circ \sim 15^\circ$,间排距 $0.7\text{m} \times 0.8\text{m}$)配合6.3m锚索;上帮则适当降低密度但增设防倾倒锚杆(仰角 $15^\circ \sim 20^\circ$);顶板实施扇形交叉布置以“钉扎”滑移块体。此外,支护初期应预留让压空间,避免脆性破坏。神东保德煤矿42°上山巷道应用该理念后,两帮最大收敛差由186mm降至68mm,有效遏制了剪切失效,验证了“主动抗剪、三维协同、分区强化”理念的工程有效性。

3.2 关键支护参数精细化优化

支护效能提升依赖于关键参数的精准匹配。锚杆(索)方面,基于松动圈深度(约1.8m)和潜在滑移面位置(3~5m),下帮采用2.4m全长粘结树脂锚杆($\Phi 22\text{mm}$,俯角 12° ,间排距 $0.7\text{m} \times 0.8\text{m}$)及6.3m锚索(预紧力 $\geq 150\text{kN}$),上帮则优化为2.0m锚杆;顶板边缘锚杆外偏 $10^\circ \sim 15^\circ$ 以增强块体约束。U型钢支架需强化整体性:每架设3道纵向拉杆(顶、腰、底),M24高强螺栓连接,预紧力 $\geq 50\text{kN}$ 。针对软弱底板,采取分级对策——极软底板注浆固化(水灰比0.8:1,压力2~3MPa),中硬底板打设2.0m底角锚杆(仰角 20°),软底板铺设C25混凝土基础或H型钢底梁。对于严重底鼓区,实施“封闭支架+底角锚索($L=4.3\text{m}$,仰角 25°)+150mm厚钢筋混凝土反拱”组合控制。上述参数均源于现场监测与数值反演,确保技术可行、经济合理。

3.3 新型材料与智能结构应用

为应对高应力、强剪切与腐蚀环境,应积极引入高

性能材料与智能结构。在关键剪切区段试点碳纤维增强聚合物(CFRP)锚杆,其抗拉强度 $\geq 1200\text{MPa}$ 、耐腐蚀且抗剪性能可设计,适用于长期服役环境。同步推广集成光纤光栅(FBG)传感器的智能锚索,可实时监测轴力与剪力,当剪力超 80kN 时自动预警,实现风险前置管控。在断层破碎带等大变形区域,采用柔性-刚性耦合支护:高延伸率锚索(延伸率 $\geq 5\%$)与柔性菱形网吸收初期变形能量,可缩U型钢提供后期刚性支撑,兼顾适应性与稳定性。此外,异形杆体(如竹节式、麻花式)可提升锚固界面抗拔与抗剪能力。这些新材料与结构不仅提升支护可靠性,也为智能化矿山建设提供硬件基础,已在保德煤矿局部试验段取得良好效果,后续将扩大应用范围^[4]。

3.4 动态信息反馈与闭环修正机制

鉴于围岩行为的高度不确定性,必须建立“监测—分析—决策—调整”动态闭环机制。掘进过程中,每 30m 布设收敛断面,安装多点位移计($2/4/6\text{m}$ 深)、锚索测力计及支架压力盒,实时采集变形与受力数据。通过数据分析判定风险等级:若锚索剪力日增长率 $> 5\%$ 或下帮位移速率 $> 3\text{mm/d}$,即启动干预程序。利用粒子群优化(PSO)等算法反演围岩参数,修正数值模型。据此动态调整支护:低风险维持原设计;中风险加密下帮锚索至 $1.0\text{m} \times 1.2\text{m}$;高风险则停掘补打 30° 斜向抗滑锚索并注浆加固。2025年保德煤矿实践表明,该机制成功预警3次潜在失稳,支护成本降低 12% ,返修率下降 65% 。这种“一段一策、随变而调”的精准支护模式,是实现大倾角巷

道安全高效掘进的核心保障。

4 结语

大倾角巷道的掘进与支护是一个复杂的系统工程问题,其核心在于深刻理解并有效应对由重力分量主导的非对称应力场和独特的变形破坏模式。本文通过对大倾角巷道围岩力学行为、支护结构受力特性的系统分析,得出以下主要结论:重力分量($G//$)是大倾角巷道失稳的主控因素,它导致围岩应力场重构、变形非对称,并对支护结构施加巨大的剪切荷载,这是传统支护失效的根本原因。因此,支护设计必须实现理念革新,从被动承压转向主动抗剪,构建能够抵抗纵向推力的三维立体支护体系,并坚持差异化、非对称的设计原则。在此基础上,优化关键支护参数是提升效能的直接途径,包括锚杆(索)的角度、长度、密度的非对称优化,支架的纵向强力连接,以及对底板的有效控制。展望未来,引入新型材料与智能结构,并建立动态信息反馈机制,是实现大倾角巷道支护智能化、精准化和最优化的必由之路。

参考文献

- [1]刘雁明.大倾角综掘巷道快速掘进及支护优化研究[J].机械管理开发,2022,37(10):214-216.
- [2]汪胜,王晨,丁正付,等.大倾角煤层采动巷道围岩破坏特征与支护参数设计[J].煤矿安全,2025,56(12):97-106.
- [3]张帅,石蒙,张贵虎,等.大倾角厚煤层巷道断面优化及变形控制技术研究[J].中国矿业,2025,34(11):194-201.
- [4]刘栋栋.大倾角松软厚煤层回采巷道支护方案优化研究[J].自动化应用,2025,66(01):86-88.