

# 大倾角工作面液压支架防滑防倒装置优化研究

李江峰

阳泉煤业集团华越机械有限公司煤矿智能工程分公司 山西阳泉 045000

**摘要:** 大倾角煤层开采中, 液压支架受复杂力学环境作用, 失稳问题制约煤矿安全生产与经济效益。传统防倒防滑装置存在设计缺陷与工况适配不足。研究基于弹性力学、岩体力学理论, 系统剖析支架受力行为, 构建多因素耦合受力模型。从顶梁防倒装置、底座防滑系统进行优化设计, 结合有限元分析与工程实践验证, 形成自适应调节防倒防滑体系。该体系强化支架与周边设备力学耦合, 平衡切向分力, 提升支架稳定性, 为大倾角煤层开采提供理论与技术支持。

**关键词:** 大倾角工作面; 液压支架; 防滑防倒装置; 优化设计

## 引言

煤炭资源深部开采进程中, 大倾角煤层开采占比持续增加, 开采难度与安全风险随煤层倾角呈非线性增长。液压支架作为大倾角工作面核心支护设备, 其稳定性直接影响开采作业安全与效率。统计显示, 大倾角煤层开采中, 因液压支架失稳引发的事故占工作面事故总数超四成。传统防倒防滑装置多为单一结构设计, 难以适应复杂地质条件与动态开采过程, 无法有效抑制支架倾倒、下滑等失稳现象。基于多学科理论深入研究液压支架防滑防倒装置优化, 对突破大倾角煤层开采技术瓶颈、保障煤矿安全生产具有重要学术与工程意义。

## 一、大倾角工作面液压支架受力分析

### (一) 空间力学特征与力的分解

基于弹性力学空间应力理论, 大倾角煤层中的液压支架处于非对称应力状态。支架所受重力可正交分解为法向分力 $F_n$ 与切向分力 $F_t$ , 其表达式为 $F_n = G \cos \alpha, F_t = G \sin \alpha$  ( $G$ 为支架自重,  $\alpha$ 为煤层倾角)。随着 $\alpha$ 增大,  $F_n$ 呈余弦衰减, 导致支架与底板间摩擦约束力 $F_f = \mu F_n$  ( $\mu$ 为摩擦系数)降低。而 $F_t$ 呈正弦增长, 成为支架沿煤层倾向滑移的主导驱动力。当 $F_t > F_f$ 时, 支架将发生失稳, 且这种失稳趋势随倾角增加呈指数级加剧。

### (二) 围岩应力重分布的影响

依据岩体力学理论, 大倾角煤层开采打破了原岩应

力平衡状态, 引发围岩应力重分布。顶板岩层在自重应力与采动影响下形成“悬臂梁”结构, 其弯曲下沉产生的侧向推力作用于支架顶梁。底板岩层因剪切应力作用发生塑性滑移, 削弱了对支架底座的支撑力<sup>[1]</sup>。监测数据表明, 当煤层倾角超过 $35^\circ$ 时, 顶板侧向推力显著增加, 底板支撑力明显下降, 导致支架所受非对称载荷加剧, 稳定性控制难度显著提升。

### (三) 多因素耦合作用

大倾角工作面液压支架受力状态受煤层倾角、顶板岩性、采动影响、支架工作阻力等多因素耦合作用。顶板岩性决定了顶板下沉量与压力分布特征, 软弱顶板易产生较大下沉与变形, 增加支架承受的垂直与侧向载荷。采动影响导致围岩应力动态变化, 工作面推进速度、采高变化等因素均会改变支架受力状态。支架工作阻力的合理设定是维持支架稳定的关键, 若工作阻力不足, 无法有效支撑顶板。若过大则可能引发顶板过度破碎, 增加支架失稳风险。这些因素相互关联、相互影响, 形成复杂的非线性力学系统。

## 二、大倾角液压支架防倒防滑装置的优化设计

### (一) 优化设计思路

在大倾角煤层开采环境中, 液压支架的受力特性呈现显著的非线性与动态时变特征, 传统设计方法难以满足稳定性控制要求。基于多体动力学理论, 将液压支架、围岩及刮板输送机视为相互耦合的多体系统, 构建包含三维空间自由度的动力学模型。该模型充分考虑煤层倾角、顶板压力梯度、支架工作阻力等关键参数, 能够精确描述支架在复杂工况下的受力演变与运动规律<sup>[2]</sup>。以力学平衡方程为理论基础, 融合控制工程原理, 提出

**个人简介:** 李江峰(1984-), 男, 汉族, 山西省汾阳市, 大学本科, 机电中级工程师, 研究方向: 机械设计制造及其自动化。

“力学平衡、动态自适应”的核心设计准则。采用模块化理念，将防倒防滑功能拆解为顶梁约束、底座锚固及设备协同三大子系统，通过参数化设计与协同优化，使装置能够依据实时监测的煤层倾角、围岩应力变化，动态调整各部件力学参数，实现对切向分力的有效补偿。该设计思路打破传统被动防御模式，构建起具备主动调节能力的智能化防倒防滑体系。

## （二）顶梁防倒装置设计

顶梁防倒装置以抑制支架倾倒趋势为核心，基于结构力学与智能控制理论，构建“柔性连接-主动控制”复合式防倒结构。运用拓扑优化方法，确定顶梁下方防倒耳座的最优布置位置与结构尺寸，确保其在极限载荷作用下应力均匀分布，规避应力集中风险。防倒耳座采用高强度合金钢锻造，材料屈服强度达830MPa以上，可有效抵御支架倾倒时产生的巨大拉力。防倒千斤顶作为核心执行元件，集成高精度压力与位移传感器，测量精度分别达 $\pm 0.5\text{MPa}$ 和 $\pm 0.1\text{mm}$ 。当支架出现倾倒倾向时，传感器以100Hz采样频率实时采集拉力与位移数据，并传输至控制系统。控制系统依据预设倾倒预警阈值，通过PID控制算法精准调节千斤顶伸缩量，产生反向拉力纠正支架姿态。防倒千斤顶与耳座间的可调节圆环链铰接结构采用变截面设计，链环中部直径较两端增大15%以增强抗拉强度。通过调节圆环链长度，可适应支架间相对位移，避免刚性连接造成的结构损伤，同时有效吸收支架运动冲击能量。双侧可伸缩保护板设计引入机构运动学原理，其液压驱动装置采用双作用液压缸，最大推力达500kN。当倾角传感器检测到支架侧向倾倒角度超过 $5^\circ$ 时，保护板迅速自动伸出，与邻近支架形成刚性支撑，显著提升支架在大倾角工况下的侧向稳定性。

## （三）底座防滑系统设计

底座防滑系统基于摩擦学与机械传动理论，构建“多向锚固-联动调节”立体防滑结构。底座前端的双防滑连接筒采用过盈配合工艺与底座主体相连，内部锥形卡槽锥度设计为1:10，可产生自紧效应，使卡槽与链环间摩擦力随连接链拉力增加而非线性增长。连接链采用高强度合金钢制造，破断拉力达1200kN，表面经渗碳淬火处理，硬度达HRC58-62，有效提升抗磨损性能，实现刮板输送机水平约束力向支架底座的高效传递，抑制支架下滑趋势<sup>[3]</sup>。

底座中部的双侧底调千斤顶采用电液比例控制技术，伺服阀响应时间小于10ms，位移控制精度达 $\pm 0.2\text{mm}$ 。通过安装在千斤顶端部的位移与压力传感器，实时监测

相邻支架底座相对位移与受力情况。控制系统基于模糊控制算法，依据监测数据自动调节千斤顶伸缩量，精准调整支架底座位置与姿态，避免支架间相互挤压错位，确保支架在煤层倾角变化时的稳定性。

底座尾部的可旋转连接耳结构采用球铰设计，球头与球窝配合公差为H7/g6，可承受 $360^\circ$ 方向载荷。有限元分析表明，该结构在最大设计载荷下，球铰接触应力分布均匀，最大接触应力680MPa远低于材料屈服强度。与刮板输送机后溜铰接连接，既增强支架垂直方向稳定性，又允许其在一定范围内摆动以适应工作面起伏。通过前后锚固与中部调节协同作用，形成对支架的三维约束体系，经现场实践验证，该防滑系统有效提升支架防滑能力，保障大倾角煤层开采作业稳定进行。

## 三、防倒防滑装置应用与维护策略

### （一）应用前精准调试策略

在防倒防滑装置投入实际工程应用前，调试过程需遵循多维度验证与参数优化原则，构建“数值模拟-物理试验-现场调试”三位一体的闭环调试体系。基于有限元分析理论，运用专业软件，建立包含大倾角煤层地质特征、开采工艺参数及支架力学特性的精细化三维数值模型<sup>[4]</sup>。模型中对煤层倾角、顶板岩性、底板力学参数等关键变量进行多工况组合模拟，通过改变支架工作阻力、开采速度等边界条件，系统分析不同工况下支架受力与运动响应特征，为装置结构参数与控制参数的优化提供理论依据。

物理试验环节采用1:10缩尺模型，依据相似理论设计试验方案，确保模型与实际工程在力学特性、几何尺寸等方面满足相似比要求。在实验室模拟井下复杂工况，通过加载装置模拟顶板压力、煤层倾角变化，运用应变片、位移传感器等测量设备，实时监测装置在不同工况下的力学性能与可靠性。试验过程中，重点研究装置关键部件的应力分布、变形特征及失效模式，验证数值模拟结果的准确性，进一步优化装置设计。

现场调试阶段以工作面实际地质条件为基础，建立“数据采集-参数调整-效果反馈”的动态优化机制。利用激光测距仪、压力传感器等高精度测量设备，对防倒千斤顶拉力、防滑连接链预紧力、底调千斤顶行程等关键参数进行精细化调整。采用实时监测与反馈控制技术，将现场采集的支架受力、位移等数据与数值模拟、物理试验结果进行对比分析，通过迭代优化算法动态调整装置参数。同时，建立装置参数与地质条件、开采工艺的对应关系数据库，运用数据挖掘技术构建参数优化模型，

形成标准化调试流程，确保装置在实际工况下达到最佳性能。

## （二）日常使用监测策略

日常使用过程中，构建基于物联网与大数据技术的智能监测系统，实现对防倒防滑装置运行状态的全面感知与精准分析。在装置关键部位，如防倒千斤顶、防滑连接链、底调千斤顶等，安装高精度压力传感器、位移传感器和应变传感器，以高频采样方式实时采集装置运行数据。通过5G无线网络将数据传输至地面监控中心，利用大数据存储与处理技术，建立装置运行数据库。

采用机器学习算法对海量监测数据进行深度分析，构建装置运行状态评估模型。运用主成分分析（PCA）、深度学习等方法，提取数据特征，识别装置运行中的异常模式。建立基于模糊逻辑的故障诊断模型，实现对装置故障的早期预警与精准定位<sup>[5]</sup>。设置三级预警机制，一级预警针对轻微异常，通过短信、APP推送等方式提示现场工作人员进行常规检查。二级预警针对中度异常，自动启动应急控制程序，通过电液控制系统调整装置参数，使装置恢复正常运行状态。三级预警针对严重异常，立即触发安全连锁机制，停止工作面作业，并启动故障诊断与维修流程。

同时，制定严格的现场巡检制度，专业技术人员按照预定巡检路线和巡检内容，对装置连接部位、密封性能、磨损情况进行定期检查。巡检过程中采用便携式检测设备，如超声波测厚仪、红外热像仪等，对装置关键部件进行快速检测，及时发现潜在安全隐患，确保装置安全可靠运行。

## （三）定期维护保养策略

基于设备健康管理理论，制定科学合理的定期维护保养策略，实现对防倒防滑装置的全生命周期管理。采用模糊综合评价法，综合考虑液压支架使用时间、工作循环次数、工况恶劣程度等因素，建立装置健康度评估模型，确定合理的维护周期。维护周期的确定充分考虑各因素的不确定性和模糊性，通过构建模糊关系矩阵和权重向量，对装置健康状态进行量化评估。

维护过程中，运用无损检测技术对装置关键部件进行全面检测。采用超声波探伤技术检测连接链内部缺陷，利用超声波在材料内部传播时遇到缺陷产生反射的原理，通过分析反射信号特征判断缺陷位置和大小。采用磁粉

探伤技术检测耳座焊接质量，利用磁力线在缺陷处产生漏磁的现象，通过观察磁粉聚集情况判断焊接接头是否存在裂纹等缺陷。

对磨损部件严格按照公差配合标准进行更换，确保新更换部件与原有部件的装配精度和力学性能匹配。对液压系统进行深度维护，包括清洗油箱、更换滤芯、检测液压油品质、进行压力测试等，确保液压元件性能可靠。建立装置维护档案，详细记录维护时间、维护内容、更换部件、检测数据等信息，运用数据分析技术对装置性能变化趋势进行预测。采用灰色预测模型、时间序列分析等方法，对装置关键部件的磨损趋势、性能衰退情况进行预测，提前制定维护计划，实现预防性维护。同时，定期组织维护人员进行技术培训，通过理论教学、实操演练等方式，提高维护人员的专业技能和故障处理能力，保障装置长期稳定运行<sup>[6]</sup>。

## 结论

通过对大倾角工作面液压支架防滑防倒装置的优化研究，深入剖析支架受力状况，设计出科学合理的防倒防滑系统，并配套完善的应用与维护策略。这不仅能够有效提升液压支架在大倾角条件下的稳定性，减少倾倒、下滑等安全事故，保障煤矿工人的生命安全，还能降低设备故障率，提高煤矿的生产效率与经济效益，为煤炭行业的安全生产提供有力的技术支撑，推动煤炭产业在复杂地质条件下的可持续发展。

## 参考文献

- [1] 张欣达. 大倾角综采工作面液压支架防倒防滑装置优化改造[J]. 机械管理开发, 2025, 40(2): 136-138.
- [2] 樊武振. 大倾角采煤工作面综采设备防倒防滑技术研究[J]. 陕西煤炭, 2025, 44(3): 159-163.
- [3] 文飞. 大倾角综采面液压支架稳定性及防倒防滑措施分析[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(2): 85-87.
- [4] 李军军. 大倾角工作面液压支架防倒防滑装置的改进研究[J]. 能源与节能, 2024(1): 208-210, 217.
- [5] 李琛. 综放工作面液压支架防倒架装置优化改进[J]. 机械管理开发, 2023, 38(12): 159-160, 163.
- [6] 姜楠. ZY10000-27/56 液压支架防倒装置设计及应用[J]. 铁法科技, 2023(2): 154-156.