

煤矿液压支架千斤顶加工工艺及故障诊断分析研究

吴波

煤科(北京)检测技术有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17494

[摘要] 煤矿液压支架千斤顶作为关键动力元件,其加工工艺直接影响设备性能。本文聚焦千斤顶加工工艺优化,采用27SiMn高强度合金钢,通过深孔镗削、珩磨、激光熔覆等先进技术提升缸体耐磨性与密封性;针对导向套漏液、活塞杆弯曲等故障,构建振动、油液、温度多源信息融合诊断框架,结合智能算法实现故障精准定位,为煤矿安全高效开采提供技术支撑。

[关键词] 煤矿液压支架; 千斤顶加工工艺; 故障诊断

中图分类号: TD355.4 **文献标识码:** A

Research on Processing Technology and Fault Diagnosis Analysis of Hydraulic Support Jacks in Coal Mines

Bo Wu

Coal Science (Beijing) Testing Technology Co., Ltd.

[Abstract] As a critical power component in coal mine hydraulic supports, the processing technology of jacks directly affects equipment performance. This paper focuses on optimizing jack processing technology. By using 27SiMn high-strength alloy steel and advanced techniques such as deep-hole boring, honing, and laser cladding, the wear resistance and sealing performance of the cylinder are enhanced. For faults such as guide sleeve leakage and piston rod bending, a multi-source information fusion diagnostic framework incorporating vibration, oil analysis, and temperature data is established. Combined with intelligent algorithms, this enables precise fault localization, providing technical support for safe and efficient coal mining.

[Key words] Coal Mine Hydraulic Support; Jack Processing Technology; Fault Diagnosis

引言

煤矿液压支架千斤顶作为工作面支护与移架的关键执行元件,其性能直接关系到采煤作业的安全与效率。然而,井下高温、高湿、强冲击及煤尘腐蚀等恶劣环境,导致千斤顶易出现缸体裂纹、密封泄漏、活塞杆磨损等故障。本文针对现有加工工艺的不足,研究高强度材料应用与精密加工技术,并构建多参数融合的故障诊断方法,以提升设备可靠性,助力煤矿智能化发展。

1 煤矿液压支架千斤顶结构与失效分析

1.1 千斤顶结构与工作原理

(1) 典型结构及功能分解: 活塞式千斤顶通过活塞将缸体分为两腔, 通入高压油后推动活塞带动活塞杆伸缩, 实现支架升架、推溜等动作, 适用于需要双向作用力的场景; 柱塞式千斤顶仅有单作用腔, 依靠高压油推动柱塞伸出, 回程依赖支架自重或外力, 多用于支护强度要求较高的单一方向动作。二者核心功能均为将液压能转化为机械能, 保障支架稳定支撑顶板、控制采场围岩。(2) 关键部件: 缸体是承载高压油的核心构件, 需具备高

强度和密封性, 防止受压变形; 活塞杆传递作用力, 表面需耐磨抗腐蚀, 确保伸缩顺畅; 密封件(如O型圈、防尘圈)阻断油液泄漏, 维持液压系统压力; 导向套对活塞杆起导向和扶正作用, 减少运动偏差, 避免部件磨损。

1.2 煤矿工况下的失效模式

(1) 机械失效: 缸体受顶板冲击或超载时易出现局部变形, 导致活塞卡滞; 活塞杆长期与煤岩摩擦, 表面镀层磨损脱落, 降低承载能力; 连接部位螺纹因振动频繁出现松动, 影响部件衔接稳定性。(2) 液压失效: 密封件老化或损坏引发内泄漏, 造成千斤顶伸缩无力; 外泄漏不仅浪费液压油, 还会污染环境; 液压卡紧多因油液杂质堵塞间隙, 导致活塞杆运动受阻。(3) 环境失效: 煤矿井下煤尘量大, 易侵入部件间隙加剧磨损; 潮湿环境使金属部件发生电化学腐蚀, 缩短使用寿命; 爆破作业产生的冲击载荷易导致部件疲劳损坏^[1]。

1.3 失效机理与影响因素

(1) 材料缺陷: 缸体焊接时若存在气孔, 会降低局部强度, 受力时易产生裂纹; 活塞杆热处理工艺不当, 可能出现淬火裂纹,

影响承载性能,增加失效风险。(2)加工误差:缸体与活塞杆同轴度超标,会导致运动时受力不均,加速密封件磨损;部件表面粗糙度超标,会增大摩擦阻力,同时降低抗腐蚀能力,加剧失效。(3)操作维护不当:超载使用千斤顶会超出材料承载极限,引发缸体变形、活塞杆弯曲;液压油过滤不彻底,杂质混入会加剧部件磨损和堵塞,缩短设备使用寿命。

2 煤矿液压支架千斤顶关键加工工艺优化研究

2.1 材料选择与热处理工艺

(1)高强度合金钢的适用性分析:27SiMn钢含硅、锰元素,具有良好的淬透性和强韧性,经调质处理后抗拉强度可达800-1000MPa,能满足千斤顶缸体、活塞杆承受高压和冲击载荷的需求。相较于普通45钢,其低温冲击韧性提升30%以上,在煤矿井下-10℃至40℃的温差环境中,可减少低温脆断风险,且焊接性能稳定,适合缸体焊接成型,是目前千斤顶关键部件的优选材料。(2)热处理工艺优化:通过控制淬火温度、保温时间和回火温度优化调质工艺。实验表明,27SiMn钢在880-900℃淬火(保温1.5-2h)、580-620℃回火(保温2-2.5h)时,硬度可达HB240-280,冲击韧性 $\alpha_k \geq 60J/cm^2$,兼顾强度与韧性;若淬火温度过高(>920℃),易导致晶粒粗大,韧性下降;回火温度过低(<550℃),则硬度偏高(>HB300),部件易脆裂,需严格把控参数区间。

2.2 缸体加工工艺

(1)深孔镗削技术:缸体深孔(长径比>10)加工选用硬质合金涂层刀具(如TiAlN涂层),其耐磨性比高速钢刀具提升2-3倍,可减少刀具磨损导致的尺寸偏差;采用内冷式冷却方式,将乳化液直接输送至切削区域,冷却效率提升40%,避免切削热导致的缸体变形;通过数控镗床闭环控制系统,实时补偿刀具磨损量,将缸体内孔尺寸公差控制在IT7级(公差范围0.03-0.05mm),确保与活塞的配合间隙合理。(2)珩磨工艺:针对缸体内孔开展珩磨工艺实验,当珩磨油石粒度为280#-400#、珩磨压力0.8-1.2MPa、转速80-120r/min时,内孔表面粗糙度可达Ra0.2-0.4 μm 。对比测试显示,表面粗糙度Ra从0.8 μm 降至0.2 μm 时,缸体与密封件的摩擦系数降低25%,往复运动10万次后的磨损量减少30%,显著提升缸体耐磨性和密封性能^[2]。

2.3 活塞杆加工与表面处理

(1)调质处理+镀铬工艺的耐磨性对比:活塞杆先经调质处理(硬度HB260-280),再采用硬铬plating工艺(镀层厚度0.05-0.1mm,硬度HV800-1000)。对比实验表明,相较于仅调质处理的活塞杆,调质+镀铬的活塞杆在煤尘磨损环境下,使用寿命延长2-3倍;在10MPa压力下往复运动,镀铬层磨损量仅为未镀铬件的1/5,能有效抵御煤矿井下的磨损和腐蚀。(2)激光熔覆技术修复磨损表面的可行性:针对磨损量0.1-0.3mm的活塞杆,采用激光熔覆技术(熔覆材料为Ni60合金,激光功率1.5-2kW,扫描速度3-5mm/s)修复。修复后表面硬度可达HRC55-60,结合强度>300MPa,经耐压试验(31.5MPa保压5min)无泄漏,寿命循环测试(10万次往复)后磨损量<0.02mm,证明该技术可有效修复磨损活塞杆,降低更换成本。

2.4 密封结构装配工艺

(1)密封件选型:根据千斤顶工作压力和工况选型,低压段($\leq 16MPa$)选用丁腈橡胶O型圈(邵氏硬度70-80),成本低且密封可靠;中高压段(16-31.5MPa)选用聚氨酯斯特封,其抗挤出性能优于O型圈,在高压下不易变形;往复速度>0.5m/s的场景选用格莱圈,由PTFE密封环和橡胶弹性体组成,摩擦系数低,适合高速运动,可减少发热和磨损。(2)装配压力控制与泄漏检测方法:装配时采用数控压装机,控制密封件装配压力为5-8kN,避免压力过大导致密封件变形,或压力过小导致装配间隙过大。泄漏检测采用气压检测法(压力0.5-0.8MPa,保压10min)和液压检测法(压力31.5MPa,保压5min),气压检测泄漏量需 $\leq 5mL/min$,液压检测无可见泄漏,确保密封结构装配合格^[3]。

2.5 工艺优化验证

(1)有限元仿真:利用ANSYS软件对优化后工艺加工的千斤顶进行有限元仿真,在31.5MPa工作压力下,缸体最大应力为580MPa(小于27SiMn钢屈服强度630MPa),应力分布均匀;疲劳寿命预测显示,在10-31.5MPa交变压力下,千斤顶疲劳寿命可达500万次,满足煤矿井下5年以上的使用需求,验证了工艺优化的合理性。(2)实际加工样件测试:加工10件优化工艺的千斤顶样件,进行耐压试验(31.5MPa保压5min,无泄漏、无变形)和寿命循环试验(31.5MPa压力下往复运动,频率1次/s)。测试结果显示,10件样件均通过100万次循环测试,其中8件循环150万次后仍正常工作,无泄漏和部件损坏,证明优化后的加工工艺能显著提升千斤顶的可靠性和使用寿命。

3 煤矿液压支架千斤顶故障诊断方法研究

3.1 基于多源信息融合的故障诊断框架

(1)振动信号+油液分析+温度监测的联合诊断:振动信号可反映千斤顶机械部件(如活塞杆、导向套)的松动或磨损,当出现缸体变形时,振动频率会从正常的5-10Hz升至15-20Hz;油液分析通过检测液压油中金属磨粒含量,若铁元素浓度超过50ppm,可判断活塞杆或缸体存在磨损;温度监测聚焦密封件和液压腔,正常工作温度为30-50℃,当密封件老化泄漏时,局部温度会升高10-15℃。三者融合可实现互补,避免单一信号误判,诊断准确率提升至90%以上。(2)传感器布局与数据采集系统设计:在千斤顶缸体中部安装压电式振动传感器(量程0-50g,频率响应0-1kHz),实时采集振动数据;在液压回路油箱处设置油液传感器(检测精度0.1ppm),分析金属磨粒和油液黏度;在密封件外侧粘贴热电偶温度传感器(测量范围-20-100℃,精度 $\pm 0.5^\circ C$)。数据采集系统采用工业级PLC,采样频率设为1kHz,通过以太网将数据传输至地面监控中心,确保数据实时性和完整性。

3.2 信号处理与特征提取

(1)振动信号时频分析:针对非平稳振动信号,采用小波变换(选用db4小波基,分解层数5层),提取不同频段的能量特征,如缸体变形会导致10-50Hz频段能量占比升高30%以上;通过希尔伯特-黄变换(HHT)将振动信号分解为固有模态函数(IMF),计算IMF的瞬时频率和幅值,当活塞杆磨损时,IMF瞬时频率会出现

20-40Hz的波动,可精准定位故障类型。(2)油液光谱分析与铁谱分析技术:油液光谱分析利用原子发射光谱仪,检测油液中Fe、Cu、Si等元素含量,当Fe元素含量从正常的5mg/L骤升至25mg/L时,提示活塞杆或缸体金属磨损;铁谱分析通过铁谱仪分离油液中的磨粒,观察磨粒形态,如出现尺寸 $>50\mu\text{m}$ 的切削状磨粒,表明存在严重金属磨损,结合光谱数据可进一步确定磨损部件^[4]。

3.3 智能诊断模型构建

(1)机器学习算法应用:以振动、油液、温度特征参数为输入,构建故障诊断数据集,包含正常、缸体变形、密封泄漏等8类故障样本,共5000组数据。支持向量机(SVM)采用RBF核函数,对小样本数据分类精度达92%,适合早期故障诊断;随机森林算法通过100棵决策树集成,对多类故障分类准确率达95%,且抗干扰能力强,可有效区分相似故障(如内泄漏与外泄漏)。(2)深度学习模型(CNN)在图像识别中的应用:通过工业内窥镜采集密封件图像,分辨率 1280×720 ,包含裂纹、老化、变形等损伤类型,共2000张图像,构建CNN模型,含5个卷积层、2个池化层。模型通过数据增强(旋转、翻转、加噪)提升泛化能力,对密封件损伤识别准确率达96%,可自动标注损伤位置和程度(如裂纹长度 $>2\text{mm}$ 判定为严重损伤),替代人工目视检测,提高诊断效率。

3.4 井下环境适应性改进

(1)防爆型传感器设计:针对煤矿井下瓦斯爆炸风险,传感器采用隔爆外壳(材质为铸铝合金,防爆等级ExdIMb),外壳防护等级达IP68,可抵御煤尘侵袭和水淋;传感器内部电路采用本安设计(工作电压 $\leq 12\text{V}$,电流 $\leq 200\text{mA}$),避免产生电火花,满足井

下防爆要求,同时在传感器表面涂覆耐磨涂层(厚度 0.05mm),延长使用寿命。(2)无线传输与边缘计算结合的实时诊断方案:采用LoRa无线传输技术(传输距离1-3km,抗干扰能力强),替代有线传输,减少井下布线难度;在井下设置边缘计算节点(采用工业级嵌入式芯片,算力2TOPS),对采集的数据进行实时预处理,如异常值剔除、特征提取,仅将故障预警信息(如温度超标、振动异常)传输至地面,数据传输量减少60%,降低网络带宽压力,实现故障实时诊断(响应时间 $<1\text{s}$),为设备维护争取时间。

4 结束语

煤矿液压支架作为保障井下作业安全与效率的核心装备,其千斤顶的加工质量与运行可靠性至关重要。本研究通过优化高强度材料选型、精密加工工艺及表面强化技术,显著提升了千斤顶的耐磨性与抗疲劳性能;同时构建的多参数故障诊断体系,实现了对密封失效、机械损伤等问题的精准预警。未来将持续融合智能监测技术,推动煤矿装备向高可靠性、长寿命方向升级。

[参考文献]

- [1]刘晓阳.千斤顶液压系统故障诊断与维修优化研究[J].矿山机械,2023,51(1):134-139.
- [2]陈志勇.基于性能评估的千斤顶液压系统长期维护策略探讨[J].液压与气动,2022,(4):102-107.
- [3]张伟.液压支架千斤顶液压系统维修优化与性能分析[J].煤矿机械,2021,(5):91-95.
- [4]黄斌.液压支架千斤顶液压系统性能评估与维护策略[J].液压气动与密封,2023,43(3):72-77.