

# 基于机械液压技术的矿山机电设备故障分析

马 强

宁夏王洼煤业有限公司王洼煤矿机电动力科 宁夏 固原 756505

**摘 要:** 矿山机电设备中机械液压系统易受矿山环境影响出现故障。本文阐述机械液压技术原理与核心组件,分析矿山环境对液压系统的特殊要求。详细探讨动力源、执行元件、控制元件、辅助元件故障类型与成因,介绍传统与现代故障诊断方法及流程优化。提出设计、制造、运维阶段故障预防与维护策略,为保障矿山机电设备液压系统稳定运行提供理论支撑与实践指导。

**关键词:** 矿山机电设备; 机械液压技术; 故障分析; 诊断方法; 维护策略

引言: 在矿山生产作业中, 机电设备的高效稳定运行是保障生产连续性与安全性的关键。机械液压技术凭借其独特优势, 成为矿山机电设备动力传输与控制的核心方式。然而, 矿山恶劣的作业环境, 如潮湿、粉尘、振动、高温等, 以及设备长期承受的高负荷冲击与连续作业需求, 使得液压系统故障频发。深入分析故障类型、成因, 并探索有效的诊断与维护策略, 对提升矿山生产效率、降低设备维修成本具有重要意义。

## 1 机械液压技术基础与矿山应用特点

### 1.1 机械液压技术原理与核心组件

机械液压技术以液体作为工作介质, 借助液体压力能实现动力传输与运动控制。其工作原理基于帕斯卡定律, 在密闭容器内, 施加于静止液体上的压力将以等值同时传递到液体各点。液压系统通过液压泵将机械能转换为液体压力能, 经管路输送至执行元件, 如液压缸或液压马达, 再将压力能转换为机械能驱动负载运动。控制元件通过调节液体流动方向、压力与流量, 实现对执行元件运动状态精准控制。核心组件涵盖动力源、执行元件、控制元件及辅助元件。液压泵作为动力核心, 常见类型包括齿轮泵、柱塞泵与叶片泵, 其性能直接影响系统压力与流量输出稳定性。执行元件中, 液压缸实现直线往复运动, 液压马达完成旋转运动, 二者结构与密封性能决定运动精度与可靠性<sup>[1]</sup>。控制元件包含方向控制阀、压力控制阀与流量控制阀, 通过改变阀芯位置调节液体参数。辅助元件如油箱、滤油器与管路, 为系统提供存储、过滤与传输功能, 其材质选择与布局设计对系统清洁度与散热效率具有关键影响。

### 1.2 矿山环境对液压系统的特殊要求

矿山作业环境对液压系统提出严苛挑战。潮湿条件易引发金属元件锈蚀, 粉尘侵入会加速阀芯磨损与节流口堵塞, 振动工况可能导致管路松动或元件连接失效,

高温环境则加速液压油氧化变质, 降低润滑性能。矿山设备需长期承受高负荷冲击, 采煤机截割部、掘进机推进缸等关键部件需在交变载荷下稳定运行, 这对液压系统强度与抗疲劳性能提出更高要求。连续作业需求迫使系统具备高可靠性, 故障停机将直接导致生产中断, 因此元件冗余设计与快速维修接口成为必要配置。矿山空间受限迫使设备向紧凑化发展, 液压系统需在有限空间内实现高效集成, 既要满足功率密度需求, 又要兼顾散热与维护便利性, 这对系统布局优化与热管理技术提出创新要求。

## 2 矿山机电设备液压系统故障类型与成因

### 2.1 动力源故障

液压泵作为系统动力核心, 失效形式多样。以掘锚机液压泵为例, 磨损是常见问题, 柱塞泵的柱塞与缸体间隙因长期高压冲击逐渐增大, 导致容积效率下降; 齿轮泵的齿轮端面与轴套摩擦加剧, 引发内泄漏量超标。气蚀现象多发生于吸油不足工况, 液压油中混入空气在低压区形成气泡, 随油流进入高压区破裂时产生冲击波, 造成泵体表面点蚀损伤<sup>[2]</sup>。泄漏故障则与密封结构老化相关, 轴封唇口磨损或O型圈硬化会导致油液外渗, 既污染环境又降低系统压力稳定性。电机与泵的匹配问题同样关键, 功率不足可能引发电机过载烧毁, 转速异常则导致泵排量偏离设计值, 造成系统压力波动或流量不足。

### 2.2 执行元件故障

液压缸与马达的动作异常会直接对设备作业精度产生影响。其中, 爬行现象大多是由摩擦力不均引发的, 比如液压缸活塞密封件压紧力过大, 或者导轨润滑不良, 都会导致运动阻力出现周期性变化, 进而产生爬行。冲击问题则与换向阀切换速度过快有关, 当高压油液突然改变流向时, 会产生液压冲击, 对阀芯与缸体端盖造成损伤。速度不稳定常常是由流量波动引起的, 像

泵排量变化、节流阀开口度失调或者油液黏度异常等情况,都可能成为速度不稳定的诱因。密封件失效是执行元件的典型故障,内泄漏会使系统压力无法建立,外泄漏则会污染作业环境。而密封材料老化、安装偏心或者工作压力超限等因素,都会加速密封失效的进程。

### 2.3 控制元件故障

方向控制阀卡滞大多是因为油液污染。金属颗粒卡入阀芯与阀体间隙,会阻碍阀芯移动,导致换向失灵或者动作迟缓。内泄漏则与阀芯密封面磨损相关,长期受到高压冲击,密封带会出现沟槽,油液就会通过间隙泄漏至回油路。这不仅会造成系统压力下降,影响执行元件的正常动作,还会增加系统的能量损耗,降低整体工作效率。压力控制阀调压失灵常常是由弹簧疲劳或者锥阀密封损坏导致的,调压弹簧预紧力变化会改变设定压力值,锥阀密封不严则会引发压力超调或者无法建压。流量控制阀流量不稳定与阀口开度控制精度有关,节流口堵塞或者比例电磁铁响应滞后,都会导致流量波动,进而影响执行元件运动的平稳性。

### 2.4 辅助元件故障

油箱污染是系统故障的潜在诱因。油液氧化会生成酸性物质,腐蚀金属元件;水分混入会降低润滑性能,还会促进微生物滋生;金属颗粒磨损产生的碎屑会加速阀芯卡滞。滤油器堵塞会引发一系列连锁反应,当过滤精度不足时,未被滤除的污染物进入系统会损伤元件;当滤油器堵塞到一定程度,油液流动阻力增大,系统压力会不稳定,还可能导致旁通阀开启,使滤油器失去过滤功能,污染油液直接进入循环回路,进一步加剧元件的磨损和损坏。管路故障大多与振动有关,高压油流引发的振动会使管路固定支架松动,长期振动会导致管壁疲劳开裂,连接松动则会引发外泄漏,造成油液浪费和压力下降。

### 2.5 共性故障成因分析

故障的产生往往有多种原因,设计缺陷是其中之一。元件选型不当会导致系统匹配性差,例如泵排量过大就会引发能量浪费,阀通过过小则会造成压力损失超标。制造问题同样不可忽视,加工精度不足会使阀芯与阀体配合间隙超差,装配误差会导致密封件预紧力不均,这些都会降低元件的密封性能,增加内泄漏风险,进而影响系统的压力稳定性和工作效率。维护缺失会加速系统劣化,油液更换周期过长会使污染物浓度超标,清洁度控制不足则会引发元件磨损加剧。操作不当是故障的直接诱因,超负荷运行会使系统压力超过设计极限,参数设置错误则会导致阀类元件工作在非设计工

况,这些情况都会缩短元件使用寿命。

## 3 故障诊断方法与技术

### 3.1 传统诊断方法

感官诊断依赖技术人员经验积累,通过多维度感知获取系统状态信息。听诊法通过辨别异常噪声特征定位故障源,掘锚机液压泵气蚀会引发高频啸叫,换向阀卡滞则产生间断性撞击声。目视检查可发现油液泄漏痕迹,管路接头渗油或缸体焊缝裂纹均能通过外观变化识别<sup>[9]</sup>。触觉判断用于评估元件温度与振动强度,采煤机调高油缸活塞杆过热可能暗示内泄漏加剧,管路振动异常则提示固定支架松动。嗅觉检测通过油液异味判断氧化程度,酸腐味表明油液已严重变质,焦糊味可能源于电机过载或元件过热。参数检测通过专用仪器量化系统运行状态。压力传感器可实时监测泵出口压力与执行元件工作压力,压力波动超限可能反映泵容积效率下降或阀类元件调压失灵。流量计用于测量系统实际流量,流量不足可能由泵排量衰减或管路堵塞引发。温度传感器布置于关键部位,油箱油温过高会加速油液氧化,马达壳体温度异常可能暗示轴承磨损或冷却不足。油液污染度检测通过颗粒计数器评估固体污染物含量,NAS1638标准将污染等级划分为12级,污染度超标会加剧元件磨损。

### 3.2 现代诊断技术

油液分析技术通过检测油液理化性能与磨损颗粒特征实现故障预测。光谱分析可定量检测油液中金属元素含量,铁元素浓度升高提示铁基元件磨损,铜元素异常则可能源于电机绕组绝缘损坏。铁谱分析通过显微镜观察磨损颗粒形貌,切削磨损颗粒呈长条状,疲劳剥落颗粒呈片状,不同形貌对应不同失效模式。颗粒计数技术采用激光散射原理测量颗粒尺寸分布,ISO4406标准规定颗粒数量限值,超标颗粒会加速阀芯卡滞。振动监测技术通过分析振动信号特征诊断机械故障。频谱分析将时域信号转换为频域能量分布,泵气蚀故障会在高频段产生特征峰值,齿轮磨损则引发边频带调制现象。时域波形识别通过观察波形形态判断故障类型,冲击故障产生周期性脉冲信号,摩擦故障导致波形幅值波动。智能诊断技术依托机器学习算法实现故障模式自动识别,支持向量机可区分正常状态与故障状态,神经网络能建立故障特征与故障类型间的非线性映射关系,深度学习模型通过海量数据训练可提升诊断准确率。

### 3.3 诊断流程优化

故障诊断遵循从症状到根源的逆向推理逻辑,先通过感官检测与参数监测定位故障现象,例如凭借技术人员丰富的经验,利用听诊、目视、触觉、嗅觉等手段,

结合压力、流量、温度等参数检测仪器，快速发现系统存在的异常表现。再结合系统工作原理分析故障传播路径，深入探究故障是如何在系统中传递和发展的。最终确定故障根源。故障树分析法将系统故障作为顶事件，通过逻辑门连接中间事件与底事件，构建故障传播树状图。该方法可系统梳理故障成因链，通过最小割集分析识别关键故障源，为维修决策提供量化依据<sup>[4]</sup>。诊断流程优化需兼顾效率与准确性，快速排除常见故障后，针对复杂故障采用多技术融合诊断，如将传统感官诊断与现代油液分析、振动监测等技术相结合，可显著提升故障定位精度与维修效率。

#### 4 故障预防与维护策略

##### 4.1 设计阶段预防

冗余设计通过增加关键元件备份提升系统可靠性，液压泵组采用双泵并联结构，当主泵出现故障时备用泵可自动投入运行，避免设备停机。故障安全模式设计确保系统在异常工况下进入安全状态，液压缸超压时溢流阀开启泄压，防止管路爆裂；电机过载时热继电器动作切断电源，保护驱动系统。模块化设计将系统划分为独立功能单元，液压阀组采用集成块结构，各阀体通过螺栓连接，单个元件损坏时仅需更换对应模块，无需整体拆解，显著缩短维修时间。模块间接口标准化设计支持快速替换，不同型号设备间可互换通用模块，降低备件库存成本。

##### 4.2 制造阶段控制

清洁度标准严格管控液压元件装配环境，万级洁净车间通过空气净化系统维持尘埃颗粒浓度，装配台面铺设防静电垫，操作人员穿戴无尘服与手套，防止毛发、纤维等污染物进入元件内部。关键工序采用超净清洗技术，液压阀芯经超声波清洗后需通过颗粒计数检测，确保残留污染物尺寸与数量符合NAS1638标准。耐久性测试模拟矿山极端工况，液压泵在额定压力1.5倍条件下连续运行1000小时，测试后分解检查柱塞副磨损量，验证元件寿命是否达到设计要求；液压缸在交变载荷作用下完成50万次往复运动，检测密封件泄漏量与缸筒内壁划伤情况，确保执行元件可靠性。

##### 4.3 运维阶段管理

定期维护计划基于设备运行时间与工况制定，液压油每2000工作小时更换一次，更换前需检测黏度、酸值与水分含量，污染度超标时提前更换；滤芯每500小时清洗或更换，清洗后通过气泡点试验验证过滤精度。密封件检查周期根据压力等级确定，高压系统每1000小时检查一次，重点观察唇口磨损与压紧力变化。状态监测依托在线传感器网络实现，压力传感器实时采集泵出口压力，流量计监测系统实际流量，温度传感器布置于油箱与马达壳体，数据通过无线传输至监控平台<sup>[5]</sup>。数据驱动的预测性维护通过分析历史数据建立故障模型，当压力波动频率超过阈值或油液铁含量持续上升时，系统自动生成维修工单，提前更换潜在故障元件。人员培训涵盖操作规范、应急处理与故障诊断技能，操作人员需掌握液压系统启停流程与参数设置方法，维修人员需具备油液分析报告解读能力与振动信号处理技巧，通过模拟故障演练提升应急响应速度。

##### 结束语

矿山机电设备机械液压系统的稳定运行，关乎矿山生产的整体效益。通过对其故障类型与成因的深入剖析，以及多种诊断方法的综合运用，能够精准定位故障根源。而从设计、制造到运维各阶段实施全面且细致的预防与维护策略，可有效降低故障发生率，延长设备使用寿命。这不仅有助于提升矿山机电设备的可靠性与稳定性，更能为矿山行业的可持续发展提供坚实保障，推动矿山生产迈向更高水平。

##### 参考文献

- [1]薛维兵,张瑞.矿山机电系统中智能控制技术的研究[J].科技资讯,2024,22(10):69-71.
- [2]刘晨辉.故障检测诊断技术在矿山机电设备中的应用[J].商品与质量,2023(1):47-50.
- [3]徐浩.矿山机械液压系统故障诊断技术与优化策略[J].凿岩机械气动工具,2025,51(4):173-175.
- [4]李铮.矿山工程机械设备液压节能技术发展探讨[J].中国金属通报,2022(6):106-108.
- [5]阎磊.传统与智能化的矿山机械故障诊断及维护技术比较研究[J].工程机械与维修,2024(9):29-31.