

无轨胶轮车液压传动系统典型故障机理与快速检修工艺创新

许广财 贺生录 张伟

内蒙古上海庙矿业有限责任公司新上海一号煤矿

DOI:10.32629/etd.v7i1.22234

[摘要] 无轨胶轮车液压系统是井下作业设备的核心传动单元。井下粉尘、潮湿、负载波动大等工况条件,容易引发泄漏、压力异常、振动过热、执行机构失效等故障,制约设备运行效率与作业安全。本文分析了各类典型故障的形成机理与恶化规律,针对传统检修流程繁琐、效率低、复发率高的短板,提出了分级定位、模块化检修及免拆解检测工艺。实践表明,新工艺可提升检修效率与质量,降低运维成本,能够适配井下快速检修作业的需求。

[关键词] 无轨胶轮车; 液压传动系统; 典型故障机理; 快速检修; 工艺创新

中图分类号: TD63 文献标识码: A

Typical Fault Mechanisms and Rapid Maintenance Process Innovation for Hydraulic Transmission Systems of Trackless Rubber-Tyred Vehicles

Guangcai Xu Shenglu He Wei Zhang

Xin Shanghai No. 1 Coal Mine, Inner Mongolia Shanghai Miao Mining Co., Ltd.

[Abstract] The hydraulic system of trackless rubber-tyred vehicles is a core transmission unit for underground operating equipment. Working conditions such as underground dust, humidity, and significant load fluctuations can easily lead to faults including leakage, abnormal pressure, vibration and overheating, and actuator failure, thereby restricting equipment operating efficiency and operational safety. This paper analyzes the formation mechanisms and deterioration patterns of various typical faults. In response to the shortcomings of traditional maintenance procedures, such as complex processes, low efficiency, and high recurrence rates, graded fault localization, modular maintenance, and non-disassembly inspection processes are proposed. Practical results show that the new processes can improve maintenance efficiency and quality, reduce operation and maintenance costs, and meet the requirements of rapid maintenance operations in underground mines.

[Key words] trackless rubber-tyred vehicles; hydraulic transmission system; typical fault mechanisms; rapid maintenance; process innovation

引言

无轨胶轮车是煤矿井下辅助运输的关键设备,液压传动系统的稳定运行直接关系到设备工况与作业安全。井下粉尘、潮湿、负载波动大等特殊工况,容易加剧液压元件磨损,引发各类故障。传统被动检修模式存在流程不规范、排查耗时久、人为失误率高等问题,难以满足井下高效安全生产的要求。基于此,本文探究系统故障机理,创新快速检修工艺,为设备高效、安全运维提供技术支撑。

1 无轨胶轮车液压传动系统结构与工作原理

1.1 液压传动系统整体结构组成

(1) 动力元件: 液压泵与先导泵构成系统的动力源。液压泵一般为变量柱塞泵,将发动机的机械能转化为液压能,为行走及工作机构提供大流量高压油液;先导泵为齿轮泵,用于生成稳定

的低压先导油,远程控制主阀芯动作。

(2) 控制元件: 液压阀组是实现逻辑控制的核心,集成了换向阀、平衡阀及安全阀等。溢流阀限定系统最高压力,防止过载损坏;节流阀通过调节通流面积控制流量,调节执行元件速度。各阀协同工作,实现压力与流量的按需分配^[1]。

(3) 执行元件: 液压缸为双作用活塞缸,将液压能转换为直线机械能,用于转向或制动动作;液压马达为低速大扭矩径向柱塞马达,将液压能转换为旋转机械能,直接驱动车轮行走,起步平稳、扭矩较大。

(4) 辅助元件: 油箱用于储油与散热;滤芯过滤油液中的杂质,保证清洁度;密封件防止内外泄漏;液压管路(硬管与软管)按井下防爆要求布置,连接各元件形成闭合回路。

1.2 液压传动系统工作原理

(1) 压力传递与流量控制基于帕斯卡原理与节流调速理论。静压力遵循等压传递规律, 执行元件输出力取决于负载压力; 流量由泵排量与节流口开度共同决定, 通过改变泵的斜盘角度或阀口通流面积, 实现速度的无级调节。

(2) 车辆行走采用闭式液压回路, 通过变量泵-定量马达的静液传动实现无级变速与换向; 转向系统由优先阀与转向器组成, 优先保证转向流量; 制动系统采用湿式多盘制动器, 通过失压制动与液压释放实现安全驻车, 行车制动由比例减压阀调节制动力。

(3) 多工况下系统动态特性: 起步时压力冲击较大, 需限压阀缓冲; 重载爬坡时系统压力升高, 马达输出扭矩自适应增加; 下坡时马达变为泵工况, 通过平衡阀产生背压实现限速; 频繁换向时, 闭式回路的高压溢流阀与补油单向阀协同, 吸收压力尖峰并补偿泄漏, 维持系统稳定^[2]。

1. 3 井下特殊工况对液压系统的影响

(1) 粉尘与潮湿环境加剧油液污染, 磨损泵阀运动副, 缩短元件寿命; 水分侵入导致油液乳化、黏度下降, 润滑性能劣化; 同时腐蚀密封件, 使其硬化龟裂, 引发外泄漏, 降低系统效率。

(2) 负载剧烈波动使系统频繁承受压力冲击, 加速泵、阀及马达的疲劳损伤; 频繁启停导致摩擦副处于混合润滑状态, 磨损加剧。同时系统油温升高较快, 加速油液氧化, 缩短换油周期。

(3) 低温环境使油液黏度升高, 启动时吸空困难, 润滑不足; 污染介质(如煤泥水混合物)进入系统后会划伤柱塞与缸体配合面, 堵塞阻尼孔, 引发先导阀响应迟滞或卡阀, 可能导致行走失控或制动失效等运行异常。

2 无轨胶轮车液压传动系统典型故障及机理分析

2. 1 液压系统泄漏故障及机理

(1) 外部泄漏主要发生于管路接头、油缸活塞杆密封及泵轴端处。井下频繁震动导致管接头螺纹松动或密封预紧力衰减; 密封件长期接触污染油液后发生溶胀、硬化或扭曲变形, 失去弹性补偿能力, 在压力脉动下形成外渗通道。

(2) 内部泄漏表现为高压油未经负载直接窜入回油或低压腔。液压泵配流盘与缸体端面磨损后间隙增大, 容积效率下降; 油缸活塞密封磨损后, 高压腔油液泄漏至低压腔, 导致爬行; 阀芯与阀体配合间隙因磨粒磨损扩大, 控制油路内泄量超标。

(3) 泄漏故障引发压力不足与动力衰减的演化机制呈正反馈特性: 初始泄漏使系统压力降低, 为维持负载, 泵需增大排量或提高转速, 油温随之上升、黏度下降, 泄漏进一步加剧, 形成“压力下降—油温升高—泄漏加剧—压力再降”的循环, 最终导致车辆牵引力与举升力不足^[3]。

2. 2 压力与流量异常故障及机理

(1) 系统压力过低多由泵吸油滤网堵塞、溢流阀弹簧疲劳或先导阀芯卡滞引起; 压力不稳则源于负载敏感阀响应迟滞或泵流量反馈振荡, 从轻微波动发展为大幅震荡, 直至系统无法建立有效工作压力。

(2) 流量不足导致执行元件动作迟缓, 机理为变量泵斜盘控

制机构卡阻使泵无法按需变量, 或节流阀芯磨损使通流面积小于设定值。流量低于马达启动所需最小流量时, 车辆起步困难、作业卡顿。

(3) 溢流阀失效引发的系统超压较为危险。阀芯被污染物卡死或阻尼孔堵塞时, 系统压力持续升高而无卸荷通道, 瞬时压力可超额定值1.5倍以上, 可能造成管路爆裂、泵体炸裂或马达损坏。

2. 3 系统振动噪声与过热故障及机理

(1) 液压泵吸空是振动噪声的主要诱因, 多由油位过低、吸油管漏气或油液黏度过大造成。泵吸入空气后油液含气量增加, 高压区气泡溃灭产生气蚀噪声与高频振动; 管路共振则因油液脉动频率与管路固有频率耦合, 引发管路剧烈抖动甚至断裂。

(2) 油液污染与滤芯堵塞导致散热不良。污染颗粒沉积于散热器翅片及油道内壁, 降低换热效率; 内泄漏增大产生额外热量, 回油背压升高使溢流损失增加, 产热速度超过散热能力, 油温持续攀升至80℃以上, 油液性能劣化^[4]。

(3) 阀组卡滞与油液乳化加速故障恶化。污染物嵌于阀芯配合间隙, 增大摩擦阻力, 导致响应迟滞或卡死; 乳化油液中的微小水滴在高压下引发表面疲劳剥落, 产生更多磨粒, 形成“产生一污染—磨损—更多污染”的链条式效应。

2. 4 执行机构动作异常故障及机理

(1) 转向、制动机构动作滞后或失灵, 多因先导油路压力不足或控制阀芯动作不灵敏。转向器计量马达磨损使分配流量减少, 转向手感沉重且响应滞后; 制动阀芯受污染卡滞于关闭位时制动器无法释放, 车辆不能行驶; 卡滞于开启位则制动力不足, 存在溜车风险。

(2) 液压马达启停不稳、转速异常, 源于配流机构磨损造成泄漏量随机波动, 使马达输出扭矩脉动; 补油压力不足或补油单向阀密封失效时, 闭式回路主油路吸空, 马达出现“爬行”或“飞车”现象, 转速忽高忽低。

(3) 先导控制故障引发的操作失灵, 机理为先导泵磨损后输出压力低于阀芯换向所需最低先导压力, 主阀芯无法完全开启, 流量分配紊乱; 先导滤芯堵塞或先导溢流阀卡滞, 先导油路压力异常波动, 操作信号传递失真, 可能引发执行机构误动作或失效。

3 无轨胶轮车液压传动系统快速检修工艺创新与应用

3. 1 传统检修工艺存在的问题

(1) 传统故障排查采用“逐级排除法”, 需从动力源到执行元件依次检测各节点压力与流量, 流程繁琐且依赖检修人员经验, 单次排查平均耗时2~4小时, 影响井下生产效率。

(2) 检修工序缺乏标准化作业指导, 不同维修人员操作差异较大, 误拆、漏检、装配扭矩不当等人为失误时有发生, 二次故障率在15%~20%之间, 增加了重复维修成本。

(3) 现行检修模式为“事后被动维修”, 设备出现明显故障后才安排检修, 缺少基于油液监测、温度趋势分析的预判机制, 无法在故障萌芽期提前干预, 突发停机情况较多。

3.2快速检修工艺创新设计

(1)故障分级快速定位工艺将故障按紧急程度划分为红、橙、黄三级,制定差异化排查路径。红色级(行走全失、制动失效)优先检查先导压力与主安全阀;橙色级(动作迟缓、压力不足)依次检测泵出口压力、阀组压差及油缸内泄;黄色级(噪声升高、油温偏高)按油液清洁度及散热系统顺序排查,按表操作、分级处置,平均定位时间压缩到40分钟以内。

(2)模块化拆解检修工艺将液压系统划分为动力模块(泵组)、控制模块(阀组集成块)、执行模块(马达、油缸)及辅助模块(油箱、滤芯)四部分。检修时只针对故障相关模块进行隔离拆解,不需整体拆卸,减少交叉干扰和重复装配;为各模块配备专用拆装工具和扭矩标准,保证检修精度^[5]。

(3)免拆解快速检测工艺集成便携式压力测试套件与在线式油液污染度检测仪,可在不拆卸管路的情况下对各测压点进行原位压力测量,快速读取油液黏度、水分含量及颗粒污染等级。马达和泵的内泄检测采用“堵转降压法”替代传统流量计拆装测量,检测时间从90分钟压缩到15分钟。

3.3典型故障专项快速检修新工艺

(1)泄漏故障方面,管接头泄漏采用“带压紧固+密封带缠绕”组合修复工艺,不需停机排油即可处理;油缸活塞杆密封老化采用快拆式导向套结构配合专用拔出工具,密封更换时间从2小时缩到30分钟。

(2)压力流量异常方面,阀组卡滞采用“脉冲冲洗法”,通过反复切换电磁铁并配合调压冲击,清除阀芯配合间隙内的污染物,避免解体清洗;液压泵压力不足时采用“变量机构微调法”,不需拆卸泵体即可完成斜盘角度重新标定,使系统压力恢复到额定值的95%以上^[6]。

(3)噪声过热故障方面,采用便携式滤油机进行旁路循环净化,在设备运行状态下连续过滤油液,2小时内可将污染度降低2个NAS等级;管路共振问题使用管夹增补与阻尼橡胶垫隔离的组合处置工艺,吸收振动能量、消除异响。

3.4新工艺效果验证与优势分析

(1)检修效率对比:新工艺通过分级定位、模块化拆解与原位检测的协同优化,将单次综合检修耗时由传统工艺的4~6小时压缩至1.5~2.5小时,效率提升60%以上,有效减少了设备停机对生产进度的制约。

(2)检修质量验证:经井下实际应用跟踪统计,采用新工艺维修后的设备,3个月内相同故障复发率由22%降至7%,系统压力波动范围由±1.2MPa收窄至±0.5MPa,设备运行平稳性显著提高。如表1。

表1 传统检修工艺与新工艺主要指标对比表

对比维度	传统工艺	新工艺	提升幅度
故障平均定位时间	120~240min	30~40min	缩短约 75%
单次检修平均耗时	4~6h	1.5~2.5h	缩短约 60%
检修工序标准化覆盖率	不足 30%	100%(模块化 SOP)	提升 70%
误拆率/人为失误率	15%~20%	3%~5%	降低约 80%
故障复发率(3 个月)	22%	7%	降低约 68%

(3)经济与安全效益:检修效率提升直接降低人工成本与备件消耗,年均可节约维修费用约18~25万元/台;同时,主动预防性检测减少了突发故障引发的井下设备抛锚风险,避免了因制动失灵、转向失效等隐患导致的安全事故,设备综合运维安全性得到本质化提升。

4 结束语

本文阐述了无轨胶轮车液压传动系统的结构组成与工作特性,结合井下工况分析了典型故障的产生原因与演化规律,提出了分级快速定位、模块化拆解及专项快速检修工艺。现场应用表明,新工艺可简化检修流程、缩短停机时间、降低故障复发率,检修质量与作业安全性均得到改善。后续可融合油液在线监测与数据趋势分析技术,构建预判式运维体系,逐步实现设备故障的提前预警与精准检修。

[参考文献]

[1]王鹏,李刚,张磊.矿用无轨胶轮车液压传动系统典型故障机理及诊断方法[J].煤矿机械,2024,45(08):162-165.
[2]刘彦超,赵建军.井下无轨胶轮车液压系统故障溯源与快速检修技术研究[J].工矿自动化,2023,49(11):118-123.
[3]陈峰,王彦伟.防爆无轨胶轮车液压动力系统失效模式与维修工艺优化[J].煤炭工程,2025,57(03):189-194.
[4]张鑫,孙浩.矿用无轨胶轮车液压油温异常故障机理与防控技术[J].矿山机械,2022,50(09):56-60.
[5]武文杰.无轨胶轮车液压传动系统常见故障快速检修工艺创新[J].煤矿现代化,2026,11(02):102-105.
[6]李江涛.井下无轨胶轮车液压系统泄漏故障机理及高效维修技术[J].煤炭技术,2025,44(07):211-214.

作者简介:

许广财(1988--),男,汉族,山东济宁人,本科,初级工程师,研究方向:电气工程及其自动化。