

Research on the Application of Hydraulic Technology in Mining Machinery and Equipment: Principles, Practices and Safety Management

Renlong Piao

China Nonferrous Metals Group Fushun Hongtoushan Mining Co., Ltd., Fushun, Liaoning, 113300, China

Abstract

This paper systematically analyzes the core role of hydraulic technology in mining machinery and equipment. Starting from Pascal's principle, and combining with typical equipment cases such as hydraulic supports, excavators, and crushers, it explores its technical advantages and engineering practices. The research reveals the mechanism by which the hydraulic system achieves efficient energy conversion through pressure transmission, and systematically analyzes the collaborative action mechanism of the four core components: the power unit, the actuator, the control module, and the auxiliary device. It focuses on discussing the daily maintenance strategies and safety management key points of the hydraulic system, and proposes a maintenance improvement plan based on intelligent monitoring. In view of the special working conditions in mines, a multi-level safety protection system covering pressure fault-tolerant control, 5G+IoT remote monitoring, and AI early warning is established, providing theoretical support for the efficient and safe operation of mining equipment.

Keywords

Hydraulic transmission; Mining machinery; Pascal's law; Intelligent maintenance; Safety prevention and control

液压技术在矿山机械设备中的应用研究：原理、实践与安全管理

朴人龙

中国有色集团抚顺红透山矿业有限公司, 中国·辽宁 抚顺 113300

摘要

本文系统分析了液压技术在矿山机械设备中的核心作用, 从帕斯卡原理出发, 结合液压支架、挖掘机、破碎机等典型设备案例, 探讨其技术优势与工程实践。研究揭示了液压系统通过压力传递实现能量高效转换的机制, 并系统解析了动力单元、执行机构、控制模块及辅助装置四大核心组件的协同作用机理。重点论述液压系统的日常维护策略与安全管理要点, 提出基于智能化监测的维护改进方案。针对矿山特殊工况, 建立了涵盖压力容错控制、5G+IoT远程监控及AI预警的多层级安全防护体系, 为矿山设备的高效安全运行提供理论支撑。

关键词

液压传动; 矿山机械; 帕斯卡定律; 智能维护; 安全防控

1 引言

矿山作业环境具有高粉尘、大负载、强冲击等特点, 传统机械传动系统面临功率密度低、抗过载能力差等技术瓶颈。本文通过解析液压系统在支护、挖掘、破损等环节的创新应用, 揭示其在矿山机械设备中的关键价值。

2 液压技术基础原理

液压技术作为矿山机械设备中的核心技术, 其基础原

理主要包括帕斯卡定律及其工程转化。帕斯卡定律指出, 密闭容器内的液体在受到外力作用时, 将产生等量的压力传递, 这一原理为液压系统提供了理论基础。在工程实践中, 通过将帕斯卡定律应用于矿山机械设备, 实现了能量的高效转换与传递, 从而提升了设备的性能与效率。

2.1 帕斯卡定律的工程转化

具体而言, 液压系统中的高压油液通过精密设计的管路与阀门系统, 能够迅速响应操作指令, 将压力能转化为机械能, 驱动矿山设备执行各种复杂动作。例如, 在液压支架中, 利用帕斯卡定律, 通过控制泵站输出的油液压力, 可以实现对支架支撑力的精确调节, 确保工作面顶板的有效支护, 提高作业安全性。同时, 由于液压系统具有功率密度高、

【作者简介】朴人龙(1991-), 男, 朝鲜族, 中国辽宁抚顺人, 本科, 助理工程师, 从事机械工程研究。

布局灵活等特点,使得矿山设备在狭小空间内也能实现高效作业,进一步提升了采矿效率。

2.2 液压系统关键组件

①动力单元:作为液压系统的“心脏”,动力单元负责提供稳定的压力油源,确保整个系统的正常运行。其核心部件为液压泵,通过机械能转换为油液的压力能。动力单元的选型需综合考虑设备功率、工作压力及工作环境等因素,确保系统的高效与可靠。

②执行机构:作为液压系统的“肌肉”,执行机构承担着将液压能转换为机械能的任务,以实现既定的机械动作。其主要构成元件包括液压缸和液压马达,液压缸利用液体压力推动活塞产生直线或摆动运动,液压马达则将液体压力能转化为旋转运动。执行机构的选择应基于实际应用需求,以保障系统的稳定运行和高效性能。

③控制模块:作为液压系统的“大脑”,控制模块负责接收指令并调整液压系统的流量、压力和方向,确保执行机构能够准确且稳定地执行既定动作。其关键组件涵盖电磁换向阀、比例阀和压力控制阀等,这些阀门通过精细的开闭和调节机制,实现对液压系统参数的精确控制。控制模块的选择应依据系统的控制需求和性能指标,以确保系统的稳定性和高效运作。

④辅助装置:在液压系统中,辅助装置同样发挥着至关重要的作用。尽管它们不直接参与核心控制,但为系统的稳定运行提供了必要的支持和保障。常见的辅助装置包括油箱、散热器、过滤器、蓄能器以及密封件等。

3 典型应用场景分析

3.1 综合机械化采煤系统 – 液压支架

液压支架作为煤矿综采系统的核心支护装备,其依托电液控制技术实现了井下支护的智能化和高效化。其核心原理基于帕斯卡定律,通过乳化液介质传递压力,使立柱产生超高支撑力(单架达12000kN以上)。支架系统集成邻架控制、压力自适应补偿和远程监控功能,缩短移架循环时间,大幅提升采煤机连续作业效率。日常运维中,需重点关注密封件磨损和阀组污染问题,结合在线油液监测系统可提前预警80%的潜在故障。随着数字孪生技术的应用,新一代支架正向预测性维护与自适应支护方向演进,为深部开采提供安全保障。

3.2 露天开采装备 – 液压挖掘机

液压挖掘机作为露天采矿作业中的关键设备,凭借其高效性和灵活性,在矿石开采及土方工程等领域扮演着至关重要的角色。该设备通过液压传动系统提供的强劲动力,执行挖掘、装载、转运等一系列作业流程,从而显著提升了露天采矿作业的效率与作业品质。液压挖掘机的设计充分考量了露天采矿作业的复杂性与多样性,具备卓越的挖掘能力与出色的机动性能。在实际采矿过程中,该设备能够依据作业

需求迅速调整,以适应不同硬度和尺寸的矿石开采任务,保障采矿作业的连续性与稳定性。此外,液压挖掘机还配备了先进的控制体系与监测设备,能够实时监控设备运行状态及性能参数,为操作人员提供精确、可靠的反馈信息,确保采矿作业的安全性和高效^[1]。

3.3 矿石加工设备 – 圆锥破碎机

圆锥破碎机作为矿石中破碎环节的核心装备,其液压技术的集成应用显著提升了设备可靠性与工艺适应性。基于液压系统的高效调控特性,现代设备采用多级液压协同控制:①过载保护模块通过蓄能器与液压马达联动,有效避免主轴断裂事故;②液压调节排料口装置的精确控制,相较传统机械调节方式效率提升数倍;③液压缸驱动的动锥总成支持衬板快速更换系统,大幅缩短单次维护时间。运维中需重点关注液压锁紧装置的密封性能,油液污染度每增加1个NAS等级,轴向轴承寿命将缩短30%。随着数字液压技术的发展,新一代设备已集成压力-功率自适应控制系统,通过实时监测破碎腔载荷动态调整主轴转速,在保证破碎粒度的同时降低无效功,为绿色矿山建设提供关键技术支撑。

4 构建液压系统维护管理体系

4.1 油液全生命周期管理

液压系统中,油液作为关键介质,其品质与性能对系统的运行效率及稳定性具有决定性影响。全生命周期管理(LCM)策略致力于构建一个闭环管理体系,涵盖从油液的选型、储存、应用、监测直至更换的全过程,以保障油液始终维持在最优状态。

①选型阶段:必须依据液压系统的具体要求及工作环境,挑选适宜的液压油种类与规格。在该阶段,必须全面评估油液的粘度、抗氧化性能、抗磨损能力以及防锈特性等关键性能指标,以确保油液与系统各组件的兼容性以及长期的稳定性。

②储存运输阶段:新油入库前需进行NAS 1638污染度检测,确保清洁度等级不低于8级。储罐应配备呼吸干燥器,维持相对湿度<40%的微正压环境,避免水分侵入。输油管路采用316L不锈钢材质,循环冲洗流速需达层流临界值(雷诺数 $Re < 2000$),防止管道残留污染物导致的二次污染。对于长期封存油液,应每季度进行FTIR红外光谱扫描,监测添加剂衰减情况。

③运行维护阶段:该阶段核心在于污染度控制与性能劣化抑制。采用三级过滤体系:油箱呼吸口安装 $3\mu m$ 精密滤芯,循环回路配置 $\beta \geq 200$ 的高压滤油器,关键伺服阀前增设 $1\mu m$ 绝对过滤精度的终端保护装置。在线监测系统集成颗粒计数器(实时监测ISO 4406等级)、水分传感器(精度 $\pm 3\%RH$)及粘度计(测量误差 $< \pm 2\%$),当油液酸值增幅 $> 0.5mgKOH/g$ 或金属磨损元素浓度 $> 50ppm$ 时触发预警。温度管理遵循 $40^{\circ}C \sim 60^{\circ}C$ 黄金区间,通过板式换热

器与电加热器的联动控制,将油温波动控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内^[2]。

实施油液全生命周期管理,可显著提高液压系统的运行效率和稳定性,延长设备使用寿命,降低维修成本及环境风险。

4.2 预防性维护措施

①温度控制:在液压系统运行过程中,会产生大量热量,油箱油温应保持 $40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。如设备在室外,北方冬季温度低,预热时间应 ≥ 30 分钟。②密封检测:液压系统的密封性能直接关系到其工作效率与稳定性。若密封失效,将影响液压系统正常运作,可采用超声波检漏仪定位微泄漏点(精度 $0.1\text{mL}/\text{min}$)并及时处理。通过执行上述预防性维护措施,可以进一步提升液压系统的可靠性和稳定性,降低故障发生率,为矿山机械设备的高效运行提供坚实保障。

5 安全风险防控体系

5.1 主要风险源识别

在矿山机械设备的液压传动系统中,主要风险源包括油液泄漏、系统过热、压力异常以及组件失效等。油液泄漏不仅可能导致环境污染,还可能引发设备故障,影响生产安全。系统过热则会加速油液老化和组件磨损,降低系统性能。压力异常可能引发设备损坏或操作失控,而组件失效则可能直接导致设备停机或事故。

5.2 风险防控措施

针对上述风险源,需采取一系列风险防控措施。首先,应加强油液管理,定期检查油液质量和系统清洁度,及时更换老化或污染的油液,防止油液泄漏。其次,优化冷却系统设计,提高散热能力,严格控制系统温度,防止过热现象发生。同时,安装压力监测装置,实时监测系统压力变化,确保压力处于正常范围内。此外,定期对液压系统的关键组件进行检查和维护,及时更换磨损或失效的组件,确保系统稳定运行^[3]。

5.3 应急预案制定

为应对可能出现的液压传动系统故障,需制定完善的应急预案。应急预案应包括故障识别、应急处置、人员疏散、设备停机等方面的内容。同时,定期组织应急演练,提高操作人员对突发事件的应对能力,确保在故障发生时能够迅速、有效地采取措施,减少损失和影响。

通过实施上述安全风险防控体系,可以显著降低液压传动矿山设备的安全风险,提高设备的可靠性和稳定性,为矿山机械设备的安全、高效运行提供有力保障。

5.4 智能安全防护技术

①压力容错控制:在液压传动矿山设备领域,压力容错控制技术作为一项核心的安全防护措施,发挥着至关重要的作用。该技术通过实时监控液压系统的运行压力,并将其与预先设定的安全阈值进行比较分析,一旦发现异常压力波动或超出既定安全范围的情形,系统将迅速激活容错机制。

该机制涵盖自动调节工作压力、切换至备用油路或触发紧急停机程序等措施,旨在预防因压力异常引发的设备损坏或安全事故。压力容错控制技术的运用,不仅提升了设备的自我保护性能,而且显著增强了操作人员的安全保障,为矿山机械设备的稳定运行提供了坚实的支撑。②远程监控系统:在智能安全防护技术领域,5G与物联网(IoT)技术的融合为液压传动矿山设备的安全管理带来了革命性的突破。通过5G+IoT技术,液压系统的各项关键参数如压力、流量、温度等能够实时回传至远程监控中心。这种实时的数据监测与分析能力,极大地提升了故障预警的准确性和及时性,使得维护人员能够在问题发生之前采取预防措施,避免设备停机或安全事故的发生。此外,5G+IoT技术还为设备的远程故障诊断和远程维护提供了可能,进一步提高了设备的可用性和维护效率。③智能预警系统:集成AI算法的智能预警系统不仅能够实时监测和分析液压传动矿山设备的运行数据,还能够通过深度学习算法预测潜在的故障趋势。该系统具备识别设备运行过程中细微变化的能力,进而对故障发生的可能时间及类型进行预测。维护人员得以在故障发生前做好充分准备,并及时采取维修或更换部件等措施,有效预防设备停机或安全事故的发生。基于人工智能算法的故障预测与维护策略,显著提升了设备的可靠性和稳定性,同时降低了维护成本和风险。④视频监控系统:通过高清摄像头对液压传动矿山设备的关键运行区域进行全面覆盖,能够实时监控设备的操作过程和状态。这些摄像头不仅提供了清晰的视频画面,还支持远程访问,使得管理人员和维护团队即使不在现场也能实时了解设备的运行情况。一旦设备发生故障或异常情况,高清视频监控系统能够迅速捕捉并记录下故障发生前后的关键画面,为后续的故障分析和处理提供宝贵的视觉资料。⑤人员安全培训:定期举办安全操作与应急处理培训,提升操作人员安全意识。⑥应急处理规程:在突发失压等紧急情况下,智能安全防护系统能够迅速识别并优先保障人员撤离通道的畅通无阻。通过集成的高精度传感器和实时监测算法,系统能够即时检测到液压系统中的压力异常下降,并立即触发应急响应机制。这一机制包括自动调整液压回路,确保关键撤离通道上的液压门或闸门能够迅速开启,为人员撤离提供无障碍通道。

6 结论

液压技术的模块化设计与智能运维融合,正推动矿山装备向高可靠、低能耗方向转型。建议企业建立基于大数据的液压系统健康管理平台,同时加强操作人员的情景模拟培训。

参考文献

- [1] 王建军. 矿山机械液压系统故障诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [2] ISO 4413:2020 Hydraulic fluid power-General rules
- [3] Komatsu Mining Corp. 2022 Sustainability Report