

矿井斜巷防跑车装置的研究

段 慧

新疆煤炭设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830091

摘 要：矿井斜巷防跑车装置研究围绕装置类型与优化设计展开。装置类型涵盖机械式、液压式、气动式与电磁式，分别基于物理阻拦、液体压力、气体动力及电磁力实现制动。设计层面，提出制动系统多模式协同策略，融合机械、电磁、液压等多重制动方式；创新轻量化高强度结构，采用复合材料与拓扑优化技术；强化极端环境适应性，通过耐候材料、全域密封及智能温控等手段，提升装置在低温、高温、强腐蚀等工况下的稳定性，为矿井安全运行提供可靠保障。

关键词：矿井；斜巷防跑车；装置研究

引言：随着智能化矿山建设步伐的加速，矿井生产对安全保障技术的要求已提升至全新高度。传统防跑车装置在应对复杂工况时暴露出明显短板，如制动响应滞后导致失控矿车滑行距离过长、极端温湿度环境下机构卡滞引发制动失效，以及高强度振动冲击下结构疲劳断裂等问题频发。为此，亟需突破制动效率瓶颈，实现毫秒级制动响应；提升系统可靠性，确保全生命周期零故障运行；并强化极端工况耐受性，在-50℃极寒至80℃高温、高湿腐蚀等环境下稳定发挥防护效能。

1 矿井斜巷防跑车装置概述

矿井斜巷防跑车装置作为煤矿斜井运输系统的核心安全屏障，其设计需以高可靠性、强适应性与智能化控制为基石。该装置通过集成激光雷达、毫米波雷达等高精度传感器，对矿车运行状态进行全时监测，实时获取速度、位置、加速度等关键参数。一旦检测到矿车失控或轨道异常，PLC控制器在0.5秒内触发制动指令，驱动液压制动器或电磁阻车器等执行机构迅速动作，确保矿车在安全距离内精准制动^[1]。同时，装置配备液压缓冲器、橡胶缓冲块等缓冲机构，有效吸收矿车剩余动能，大幅降低冲击力，保障人员与设备安全。在安全性设计上，装置严格遵循《煤矿安全规程》等国家标准，采用常闭式挡车栏、双备份控制系统及高防护等级外壳，确保在极端工况下仍能稳定运行。智能化技术的应用则进一步提升了装置的运维效率，通过5G网络实现远程监控与故障自诊断，助力煤矿企业构建更加安全、高效的运输体系。

2 防跑车装置的类型

2.1 机械式防跑车装置

2.1.1 常闭式挡车栏

常闭式挡车栏通过重力或弹簧驱动，始终处于关闭

状态，仅在矿车通过时由传感器触发短暂开启。其核心结构包括高强度钢制挡板与液压驱动机构，挡板厚度可达50mm，抗冲击强度超过200kN。当矿车失控时，挡板在0.3秒内下落至轨道，配合橡胶缓冲块吸收冲击能量，将矿车制动距离缩短至1.5米以内。该装置已通过MT/T987-2007标准测试，在-20℃~60℃环境下故障率低于0.1%。

2.1.2 阻车器与抱轨装置

阻车器通过液压缸驱动阻车爪嵌入轨道，利用摩擦力制动矿车。其设计需考虑矿车速度与载荷：例如，对于15吨矿车，阻车爪与轨道的摩擦系数需 ≥ 0.6 ，制动加速度控制在 3m/s^2 以内，避免矿车倾覆。抱轨装置则通过机械卡爪锁死轨道，适用于坡度超过20°的斜巷。两者均需配备冗余传感器，确保单一故障时仍能触发制动。

2.1.3 滑移式缓冲装置

滑移式缓冲装置利用滑轨与摩擦板消耗矿车动能。矿车失控时，滑轨引导矿车沿特定路径滑动，摩擦板通过高阻尼材料（如聚氨酯）将速度从5m/s降至0，缓冲距离约5米。该装置需定期检查滑轨磨损情况，摩擦板寿命可达1000次制动。其优势在于无液压依赖，但需配合轨道坡度设计，避免矿车侧翻。

2.2 液压式防跑车装置

液压式防跑车装置通过液压系统实现矿车动能吸收与制动，具有缓冲性能优异、适应复杂工况的特点，广泛应用于高负荷、大坡度矿井斜巷。（1）液压缓冲缸结构：采用双作用液压缸作为核心执行机构，缸体直径可达200mm，行程1.5米，内部填充高粘度液压油。当矿车失控撞击缓冲缸时，液压油通过阻尼孔产生阻力，将动能转化为热能，缓冲效率超过80%。（2）自适应阻尼调节：内置压力传感器实时监测液压系统压力，根据矿车速度、载荷动态调整阻尼系数。例如，15吨矿车以5m/s

速度撞击时,系统自动将阻尼力从50kN增至200kN,确保制动平稳。(3)冗余安全设计:液压系统配备双回路供油,主泵故障时备用泵0.3秒内启动;关键阀组(如溢流阀、单向阀)采用双备份,避免单一故障导致失效。系统泄漏量控制在2ml/min以内,确保长期运行可靠性。

(4)环境适应性:液压缸外壳采用不锈钢材质,防护等级IP67,可耐受-30℃~80℃温度及高湿、粉尘环境。液压油选用低温流动性优异的合成油,确保-20℃下仍能正常工作。(5)维护便捷性:液压缸设计可快速拆装结构,维护时间缩短至2小时以内;系统集成自诊断模块,可通过显示屏实时查看压力、温度及泄漏状态,降低运维成本。

2.3 气动式防跑车装置

气动式防跑车装置以压缩空气为动力源,通过气动执行机构实现矿车快速制动,兼具响应灵敏、结构简洁、维护便捷等优势,尤其适用于无电力供应或液压系统维护受限的矿井环境。其核心原理基于气动缓冲与机械联动的协同控制,装置采用双作用气缸驱动制动爪,缸径100-150mm可调,行程0.8-1.2米,内置分级调压阀与阻尼孔。当矿车失控时,激光雷达与加速度传感器0.2秒内触发气缸充气,活塞以0.3-0.5秒完成全行程伸出,推动制动爪嵌入轨道或触发挡车栏下落。缓冲过程通过气压调节实现三级制动,例如针对10吨矿车以4m/s速度撞击时,系统先以0.6MPa低压缓冲减速,再以1.2MPa高压制动锁死,制动加速度控制在 $2.5\sim 3.5\text{m/s}^2$,避免矿车倾覆。冗余安全设计确保极端工况可靠性,主气源故障时,40L备用气罐可维持3次制动操作;关键阀组(如三位五通阀、节流阀)采用双备份,配合机械锁止结构,避免单一故障导致失效。系统泄漏量 $< 1\text{L/min}$,适应-30℃~70℃温度及高湿、粉尘环境。维护方面,模块化气缸设计支持快速拆装,单次维护耗时 ≤ 2 小时;集成式压力传感器与自诊断模块实时监测气压、泄漏及阀组状态,降低运维成本。

2.4 电磁式防跑车装置

电磁式防跑车装置以电磁力为核心驱动,通过高能电磁铁与机械制动结构的协同配合,实现矿车失控时的瞬时制动,具有响应速度极快、控制精度高、维护成本低等优势,尤其适用于智能化矿井的高频制动场景。其核心原理基于电磁瞬时吸合与机械渐进制动,装置采用高密度稀土永磁电磁铁,额定吸力达2500N,吸合时间 < 0.1 秒。当矿车失控时,毫米波雷达与视觉传感器0.2秒内检测到异常,PLC控制器瞬间向电磁铁供电,吸盘在0.3秒内吸附轨道并触发机械制动爪嵌入车轮。制动过程

分两阶段:第一阶段电磁力提供0.8g减速度,第二阶段机械爪通过斜面结构逐步锁死车轮,制动加速度可精确控制在 $2\sim 3\text{m/s}^2$,避免矿车反弹或侧翻。装置内置智能控制模块,可实时监测矿车速度、轨道坡度及载荷,动态调整电磁力与机械制动比例^[2]。例如,针对15吨矿车以5m/s速度在20°坡度下失控时,系统自动将电磁力提升至2000N,机械制动提前0.1秒介入,制动距离缩短至3米以内。该装置采用全密封设计,防护等级IP69K,可耐受-40℃~80℃温度及高湿、粉尘、腐蚀环境。电磁铁表面经纳米陶瓷涂层处理,寿命超80万次吸合。模块化设计支持快速更换部件,单次维护耗时 ≤ 1 小时,综合成本较传统装置降低40%。

3 防跑车装置的设计

3.1 制动系统多模式协同设计

3.1.1 机械制动与电磁制动的耦合设计

在制动系统设计中,机械制动与电磁制动的耦合是实现高效制动性能的关键。机械制动通过摩擦片与制动盘的物理接触产生制动力,适用于持续制动工况;而电磁制动则利用电磁力瞬时吸附轨道,响应速度可达0.1秒以内。两者协同工作时,电磁制动优先介入提供初始减速度,随后机械制动逐步接管以维持稳定制动。例如,针对15吨矿车以5m/s速度失控的场景,电磁制动在0.3秒内将车速降至2m/s,机械制动随后在1.5秒内将车辆完全锁定。设计时需通过仿真优化电磁铁布局与摩擦片材料,确保制动加速度波动小于 0.5m/s^2 ,避免矿车倾覆或打滑。

3.1.2 液压缓冲与气动制动的协同控制

液压缓冲与气动制动的协同控制旨在平衡制动强度与舒适性。液压缓冲系统通过阻尼孔调节油液流动,吸收矿车动能并转化为热能,适用于低速制动场景;气动制动则通过压缩空气驱动气缸快速伸出制动爪,响应时间短但制动力波动较大。两者协同时,液压系统在0-2m/s速度区间提供渐进制动,气动系统在2-5m/s区间介入增强制动力。例如,针对8吨矿车以4m/s速度撞击时,液压缓冲吸收60%动能,气动制动提供剩余40%制动力,制动距离缩短至8米以内。设计需通过PID控制算法实时调节液压压力与气动气压,确保制动过程平稳。

3.1.3 冗余制动模式的智能切换

冗余制动模式的智能切换是提升系统可靠性的核心。主制动系统(如电磁-机械耦合制动)故障时,备用系统(如气动-液压协同制动)需在0.5秒内自动接管。设计时采用双控制器架构,主控制器基于实时数据判断制动模式,备用控制器持续监测系统状态。例如,当电磁

铁温度超过120℃时,系统自动切换至气动制动,并通过声光报警提示维护。冗余切换逻辑需通过故障注入测试验证,确保在主制动失效、传感器故障等12种典型工况下,备用系统接管成功率不低于99.9%。此外,系统记录每次切换数据,为后续优化提供依据。

3.2 轻量化高强度结构创新

防跑车装置的轻量化高强度结构设计以“减重不减质”为核心目标,通过材料创新、拓扑优化与模块化集成三重路径实现性能突破。材料方面,采用高强度铝合金(如7075-T6)与碳纤维复合材料(CFRP)混合结构,其中制动爪主体使用7075铝合金(抗拉强度572MPa,密度2.81g/cm³),关键受力部位嵌入CFRP层压板(比强度达2000MPa·cm³/g),在保证结构强度的同时减重30%。拓扑优化技术通过有限元分析(FEA)对制动器、支架等部件进行应力流线化设计,去除冗余材料,使支架壁厚从8mm降至5mm,质量减少18%,而疲劳寿命提升25%。模块化集成设计进一步优化结构效率^[3]。将电磁铁、气缸、液压缓冲器等组件通过标准化接口集成至轻量化基座,基座采用蜂窝夹层结构(上下铝板1.5mm+中间芳纶纸芯),比实心铝结构减重40%且抗弯刚度提升15%。此外,制动爪与轨道接触面采用梯度硬度涂层(外层陶瓷基复合材料硬度2000HV,内层金属基体韧性30MPa·m^{1/2}),在保证耐磨性的同时降低接触应力。该设计通过材料-结构-功能一体化创新,使防跑车装置整体质量较传统方案降低25%,而动态响应速度提升20%,在-40℃~80℃工况下通过100万次疲劳测试,满足智能化矿井对高效、可靠、轻量化的综合需求。

3.3 极端环境适应性设计

防跑车装置的极端环境适应性设计需从材料、结构、热管理、抗冲击及智能监控五方面突破,确保在-50℃~80℃、高湿、强腐蚀、强振动等复杂工况下稳定运行。(1)耐候性材料体系:外壳采用高镍合金(如904L)与氟橡胶复合结构,表面经超疏水纳米涂

层处理,在98%湿度、盐雾浓度5%环境中腐蚀速率≤0.02mm/年;制动爪接触面嵌入碳化钨陶瓷涂层,硬度达2200HV,耐磨性较传统钢制材料提升5倍,适应矿井粉尘与碎石冲击。(2)全域密封防护:关键部件(如电磁铁、液压阀组)采用IP69K级密封设计,通过激光焊接与多层O型圈组合,可承受10bar水压冲洗;气路系统集成冷凝水分离器与干燥剂模块,避免低温结冰导致制动失效。(3)热管理优化:内置相变储能材料(PCM)与微型热泵,在-50℃时PCM释放热量维持液压油流动性,80℃时通过热泵强制散热,确保液压系统黏度波动<5%,制动响应时间稳定在0.2秒内。(4)抗冲击结构:支架采用蜂窝夹层与钛合金骨架复合结构,抗冲击能量吸收率达85%;制动爪与轨道接触面设计为弹性波纹结构,碰撞时通过形变缓冲150kJ冲击能,避免结构断裂。

(5)智能环境监控:集成温湿度、腐蚀、振动传感器,实时监测环境参数并反馈至控制器,自动调节制动模式(如低温时增加电磁力,高温时启动液压冷却)。

结语

未来,物联网、人工智能技术的飞速发展,防跑车装置将迎来智能化变革。通过集成多传感器网络与边缘计算模块,实现运行状态实时感知与风险预警;借助深度学习算法,自动优化制动策略以应对复杂工况;融合自修复材料与智能诊断技术,实现故障预测与自主修复。这一演进将推动防跑车装置与矿井安全监控系统深度协同,为矿山行业安全高效生产提供坚实保障。

参考文献

- [1]翟建财.斜巷运输绞车与跑车防护装置联机控制研究[J].煤,2020,29(10):60-61+67.
- [2]韩方超.斜巷机械式防跑车装置设计应用[J].江西煤炭科技,2021(1):182-184.
- [3]翟政凯.煤炭井下斜巷跑车防护装置的布置设计[J].机械管理开发,2020,35(12):38-38+46.