

Research on Tire Wear Law and Anti-skid Strategy of Mine Transport Vehicle under Complex Mine Working Conditions

Jian Qi Yanlin Sun

Sany Heavy Equipment Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110027, China

Abstract

In complex mining environments, mining transport vehicles endure prolonged exposure to high loads and variable road conditions, where tire wear and anti-skid performance directly impact transportation safety and economic efficiency. Factors such as slippery terrain, gravel, and dust in mining areas exacerbate tire wear and increase skidding frequency. This study systematically investigates tire wear mechanisms, periodic patterns, and anti-skid strategies for mining transport vehicles under actual operating conditions. The research demonstrates a significant nonlinear relationship between tire wear and factors including temperature, load, road roughness, and slip rate. Based on these findings, comprehensive anti-skid solutions are proposed, including tire structure optimization, intelligent monitoring systems, differential drive control, and tire pressure management. Simulation and field test results indicate that the multi-factor collaborative control system reduces tire wear rates by over 30%, significantly enhancing vehicle traction performance. These findings provide theoretical and engineering support for optimizing safety and cost efficiency in mining transport equipment.

Keywords

mining transport vehicles; complex operating conditions; tire wear; anti-skid control; dynamic simulation

复杂矿山工况下矿运车辆轮胎磨损规律与防滑策略研究

戚建 孙艳林

三一重型装备有限公司, 中国·辽宁 沈阳 110027

摘要

在复杂矿山环境中, 矿运车辆长期承受高载荷与多变路况, 其轮胎磨损与防滑性能直接影响运输安全与经济效益。矿区湿滑、碎石、粉尘等因素使轮胎磨损加剧、打滑频发。本文结合实际工况, 系统研究了矿运车辆轮胎磨损机理、阶段性规律及防滑策略。研究表明, 轮胎磨损与温度、载荷、路面粗糙度及滑移率存在显著非线性关系。基于此, 提出轮胎结构优化、智能监测系统、差动驱动控制与胎压管理等综合防滑方案。仿真与实测结果显示, 多因素协同控制系统可使轮胎磨损速率降低30%以上, 显著提升车辆牵引性能, 为矿山运输装备的安全与成本优化提供理论与工程支撑。

关键词

矿运车辆; 复杂工况; 轮胎磨损; 防滑控制; 动力学仿真

1 引言

矿运车辆作为矿山运输系统的重要装备, 其运行环境复杂, 作业强度高, 长时间在非铺装路面、急弯陡坡及高温环境中行驶, 导致轮胎成为机械磨损最为严重的部件之一。轮胎磨损不仅影响车辆的牵引力与制动性能, 还增加燃油消耗与维护成本, 甚至可能诱发交通事故。现有研究表明, 矿山轮胎磨损与车辆载荷、转速、胎压、地形粗糙度及温度等多因素耦合相关, 其机理具有显著的非线性与动态特征。与此同时, 复杂路况下车辆防滑问题愈发突出, 特别是在雨季、

冻土期及矿渣粉尘堆积阶段, 轮胎与地面附着力急剧下降, 影响车辆安全稳定性。

针对这一问题, 国内外学者在轮胎力学模型、耐磨配方、胎面结构优化与车辆动态控制方面进行了研究, 但多以公路车辆或特定环境为研究对象, 缺乏对矿山复杂工况下轮胎磨损规律与防滑机制的系统性分析。本文基于多源工况数据与车辆动力学理论, 研究轮胎磨损的形成机理与变化规律, 建立磨损预测模型, 并提出适用于复杂矿山环境的轮胎防滑与耐磨综合控制策略, 旨在为矿山车辆运行维护与安全保障提供理论依据与技术路径。

【作者简介】戚建(1960-), 男, 中国湖南长沙人, 硕士, 正高级工程师, 从事矿山机械研究。

2 复杂矿山工况下轮胎磨损机理与影响因素分析

2.1 轮胎磨损机理的动态特征

矿运车辆在非铺装路面上长期运行,其轮胎承受复杂的剪切应力、法向载荷与摩擦热作用,磨损过程呈现多机理耦合的动态特征。主要磨损形式包括机械磨损、疲劳磨损与热化学磨损。机械磨损源于轮胎与粗糙地面的反复接触,碎石颗粒切削橡胶表层导致材料剥落;疲劳磨损则由于轮胎在周期性加载下产生微裂纹并不断扩展,最终形成表面脱落;热化学磨损则与胎面温度升高引起的橡胶氧化反应及分子链断裂相关。在矿山复杂工况下,轮胎局部接地压力高、热传导条件差、摩擦频繁,使三种磨损模式交替作用并相互叠加,表现为阶段性加速特征。实测表明,当胎面温度超过 90℃ 时,橡胶分子链断裂速率呈指数级上升,磨损速率激增,且高温区磨损深度较常温工况提升约 40%,体现出热应力对轮胎寿命的主导影响。

2.2 工况因素对轮胎磨损的影响规律

矿山道路多为碎石与泥土混合结构,其表面粗糙度 R_a 常超过 2.5 mm,导致轮胎接地应力分布不均,磨损加剧。轮胎磨损量与载荷 P 、滑移率 S 、胎压 P_t 及附着系数 μ 之间存在显著耦合关系,可用经验式表示为:

$$W = k \cdot \frac{(P \cdot S \cdot \mu)}{(P_t)^{0.5}}$$

其中 W 为单位时间磨损量 (mm/h), k 为经验系数。试验结果表明,磨损量随载荷线性增长,而随胎压提升而减小,说明合理胎压能有效缓解接地剪切。滑移率对磨损的敏感度最高,当 $S > 20\%$ 时,胎面剪切变形过大,局部应力集中,磨损速率急剧上升。湿滑路况下,水膜效应使附着系数降低约 40%,导致接地面积中应力分布更加离散,磨损区域不均现象明显,进一步缩短了轮胎寿命。

2.3 车辆运行参数与磨损耦合特性

矿运车辆在不同坡度、转弯半径及载荷条件下,其轮胎受力模式显著差异,表现出磨损机理的动态耦合特性。转弯时外侧轮胎承受较大侧向力与法向载荷叠加效应,胎面剪切应变集中,易形成“外圈磨损带”;而长下坡运行时,制动力矩长期作用导致胎面温度升高,橡胶热老化与硬化加剧。基于多体动力学仿真分析表明,重载低速运行时轮胎主要发生压痕剥落型磨损,属于机械破坏主导;而轻载高速运行时,滑动摩擦主导磨损过程,属于能量消耗型损伤。不同运行工况间磨损模式的转化呈现非线性规律,且高频启停与急转操作会放大疲劳裂纹扩展速率。由此可见,轮胎磨损是热力、载荷与运动参数耦合作用的综合结果,对其进行动态建模与工况适配优化,是实现矿运车辆轮胎寿命提升与运维成本控制的关键途径^[1]。

3 轮胎磨损规律的实验研究与模型构建

3.1 矿运车辆轮胎磨损试验设计

为系统研究矿山运输车辆轮胎的磨损规律,选取某大型露天矿区典型运输道路开展实地测试。试验对象为额定载重 45 吨的宽体自卸车,车辆装配相同型号的工程轮胎,并分别在碎石路、湿泥路与坡道路况下运行,以确保数据的可比性与代表性。测试系统采用动态应变计、红外温度传感器及激光测厚仪等设备,实现对接地压力、滑移率、胎面温度及磨损深度的实时监测。试验周期设定为 300 小时,每 100 小时采集一次磨损数据,以便分析不同工况下的磨损趋势。结果显示,碎石路面因接触冲击频繁与附着系数波动,轮胎平均磨损深度达 1.26 mm/100h,明显高于湿泥路与坡道路况,表明路面粗糙度与附着条件是影响轮胎寿命的关键外部因素。

3.2 磨损数据分析与数学建模

在获取完整的实验数据后,利用多元回归分析法建立轮胎磨损预测模型,以揭示不同影响因子的作用规律。得到经验方程:

$$W = \alpha P^{0.8} V^{0.5} \mu^{-0.6} T^{0.4} S^{1.2}$$

其中, W 为单位时间磨损量 (mm/h), P 为载荷 (kN), V 为速度 (km/h), μ 为附着系数, T 为胎面温度 (℃), S 为滑移率 (%)。模型拟合结果显示决定系数 R^2 达到 0.93,验证了模型的高精度与可应用性。参数敏感性分析表明,滑移率 S 对磨损的影响最为显著,其指数 1.2 反映出滑移引起的局部剪切应力与热累积效应是导致橡胶脱落的主要机制。该模型为预测轮胎寿命与优化运行参数提供了理论依据,可实现对不同工况下轮胎磨损的定量评估。

3.3 磨损规律的阶段性特征

基于长期监测数据分析,矿运车辆轮胎磨损呈现明显的阶段性特征,可分为初期适应期、稳定磨损期和加速磨损期。初期阶段主要为胎面花纹与地面适应过程,磨损速率较快;稳定期中,橡胶性能趋于均衡,磨损速率保持相对恒定,是轮胎寿命消耗的主要阶段,占比约 70%;当进入加速期后,由于花纹深度减小与热累积效应增强,轮胎局部温升加剧,磨损速率显著上升,寿命衰减加快。统计发现,当胎面温度超过 90℃ 时,稳定期持续时间缩短约 25%,说明温度控制对延长轮胎寿命至关重要。通过识别磨损阶段特征,可科学制定轮胎更换周期与运行维护策略,实现轮胎全寿命周期的精细化管理与成本最优化^[2]。

4 防滑与耐磨控制策略的技术研究

4.1 基于轮胎结构优化的防滑设计

轮胎的结构优化是矿区车辆防滑性能提升的核心途径。研究表明,胎面花纹的几何设计与材料构成直接决定了轮胎的附着力与耐磨性。通过有限元仿真分析发现,花纹深度

越大,轮胎对泥浆和碎石的排出能力越强;而非对称块状花纹与宽沟槽组合能够有效分散接触压力,提升在湿滑和不平整路面的抓地性能。为应对矿区高冲击载荷,轮胎应采用高强度尼龙帘布层与加厚胎肩结构,以增强抗刺穿与抗变形能力。材料层面,通过在橡胶基体中添加纳米二氧化硅与炭黑复合填料,可显著提升胎面的耐磨系数与抗撕裂强度。综合实验结果表明,结构优化设计能有效降低打滑概率,延长轮胎使用寿命,并在复杂工况下实现附着性能与安全性的平衡。

4.2 智能轮胎监测系统的防滑预警机制

随着智能化监测技术的发展,嵌入式传感系统成为矿山运输车辆防滑控制的重要支撑。基于 TPMS (Tire Pressure Monitoring System) 的无线监测技术,可实时采集胎压、温度与滑移率等关键数据。系统通过内置加速度传感器与应变片对轮胎运行状态进行动态监测,当滑移率超过设定阈值或胎温异常升高时,自动触发预警信号。结合车载终端与云平台,监测数据可实现远程传输与历史趋势分析,从而实现轮胎状态的动态评估与预测。针对胎压过低或温度急剧升高等高风险情况,系统可联动车辆控制单元 (ECU) 自动调整驱动力分配,或提示驾驶员减速运行,防止轮胎打滑及爆胎事故发生。实践应用表明,该防滑预警系统能有效减少轮胎失效效率约 20%,显著提升车辆运行的安全性与智能化水平^[9]。

4.3 防滑驱动与制动控制策略

矿区车辆在湿滑路段或坡道运行时,牵引力控制是防滑系统的关键。基于模糊控制算法的防滑牵引系统 (TCS) 可通过实时检测轮胎转速差与地面附着系数,实现驱动力的自适应调节。系统依据滑移率变化调整发动机扭矩与制动压力,使滑移率保持在 10%~15% 的最佳区间,兼顾牵引效率与方向稳定性。仿真结果表明,该系统在低附着路面下可提升车辆加速性能约 18%,制动距离缩短 12%,防滑性能优于传统机械差速锁控制模式。同时,研究引入制动能量回收与差动制动联合控制策略,通过电机制动与轮间扭矩分配协同调节,减少高温制动引起的轮胎热积聚与磨损失效^[4]。

5 综合防滑与磨损控制系统的构建与应用

5.1 胎压与载荷智能调控系统

矿山运输车辆在复杂路况与高负载条件下运行,轮胎磨损与胎压变化之间存在显著的非线性耦合关系。基于此,构建自适应胎压管理系统 (ATMS),通过电控气阀与压力传感器实现实时监测与自动调节。当车辆载荷增加或路面附着系数下降时,系统可自动升压以增强轮胎支撑力和稳定性;在高温、长坡或连续制动情况下,系统自动降低胎压以减轻滑动摩擦热积聚,从而防止爆胎及异常磨损。试验数据显示,该系统可将轮胎运行温度峰值降低 8%~12%,磨损速率减少约 25%,显著延长轮胎寿命并提升运行安全性。

5.2 动态路况识别与自适应行驶控制

矿区道路环境多变且复杂,传统人工监测与经验驾驶模式难以精准应对。通过人工智能与图像识别技术的融合,构建基于车载传感系统的动态路况识别与自适应行驶控制模型。系统利用车载摄像头与激光雷达采集实时路面信息,采用卷积神经网络 (CNN) 进行特征提取与分类,可准确识别碎石、泥泞、湿滑、积水等多种路况,并在 0.5 秒内完成识别反馈。控制系统根据识别结果自动调整驱动力分配、制动力输出与轮胎转速,防止打滑与失稳。测试结果表明,该系统在复杂路况下的防滑响应灵敏度提升显著,车辆行驶稳定性增强,能有效降低打滑事故与能耗损失。该技术为矿山智能运输装备的安全高效运行提供了可靠保障^[9]。

5.3 基于大数据的轮胎寿命预测与维护优化

矿山运输车辆在长期高负荷运行中,轮胎损耗规律受多种变量影响,传统定期更换模式存在效率低、成本高的问题。通过引入大数据与机器学习技术,可实现轮胎寿命预测与维护决策的科学化。系统采集车辆运行工况、胎压、温度、载荷与道路信息等多源数据,建立轮胎健康数据库。利用随机森林 (RF) 与长短期记忆网络 (LSTM) 算法对历史磨损数据进行训练,模型可动态预测轮胎剩余寿命与磨损趋势,并智能生成最优维护计划。

6 结语

复杂矿山工况下,矿运车辆轮胎磨损与防滑问题是制约运输效率与安全的重要因素。本文通过理论分析、试验研究与仿真验证,揭示了轮胎磨损的多因素耦合规律与阶段性变化特征,建立了多变量磨损预测模型,并提出以结构优化、智能监测与防滑控制为核心的综合防护体系。研究结果表明,通过智能化控制与结构强化的协同作用,可有效延长轮胎寿命 30% 以上,降低打滑风险 40%,提升矿运系统的运行可靠性。未来研究可在多源信息融合、轮胎材料创新及自主防滑算法优化等方面进一步拓展,推动矿山车辆向数字化、安全化与高效化方向发展,为矿业智能运输体系的建设提供技术支撑与理论依据。

参考文献

- [1] 陈相蒙.煤矿运输车辆轮胎对车轮 13° 冲击的试验影响研究[J].中国新技术新产品,2025,(08):61-63.
- [2] 韩杰.浅谈如何降低煤矿运输车辆的维修保养成本[J].内蒙古煤炭经济,2021,(13):134-135.
- [3] 王冬梅.浅谈如何降低煤矿运输车辆的维修保养成本[J].现代经济信息,2019,(09):189-190.
- [4] 赵凯.矿用车辆轮胎的磨损与维护方法探析[J].中国高新技术企业,2015,(07):166-167.
- [5] 程玉军.矿用车辆轮胎的磨损分析与维护措施[J].机电产品开发与创新,2013,26(04):62-63.