

机械工程

露天煤矿运输卡车轮胎磨损与路面交互的动力学分析

张富全

国家能源集团准能黑岱沟露天煤矿 内蒙古鄂尔多斯市 017100

【摘要】露天煤矿运输卡车轮胎磨损问题影响矿山企业的运营效率和成本，特别是在复杂路面环境下。本文基于轮胎与路面交互的动力学原理，结合矿区实际工况，提出新的分析模型，探讨轮胎磨损与路面特性之间的相互作用。通过模拟不同路面类型和磨损情况，本文提出了改善卡车轮胎使用寿命和路面质量的建议。研究具有创新性和实用性，为卡车轮胎优化设计及路面维护提供了参考，具有较高的应用价值。

【关键词】露天煤矿；运输卡车；轮胎磨损；动力学分析

Dynamics analysis of tire wear and pavement interaction in open-pit coal mine transport truck

Zhang Fuquan

National energy group can be heidaigou open-pit coal mine In Ordos City, Inner Mongolia 017100

【Abstract】The tire wear problem of open-pit coal mine transportation truck affects the operation efficiency and cost of mining enterprises, especially in the complex road environment. Based on the dynamic principle of the interaction between the tire and the road surface in the mining area, a new analysis model is proposed to explore the interaction between tire wear and pavement characteristics. By simulating different pavement types and wear, we improve the life of truck tires and pavement quality. The research is innovative and practical, which provides reference for the optimization design and pavement maintenance, and has high application value.

【Key words】open pit coal mine; transport truck; tire wear; dynamic analysis

引言

露天煤矿运输车在复杂恶劣路面条件下，轮胎经常面临过度磨损，影响运输效率和安全性，尤其在重载、崎岖、潮湿或极端温差环境下，磨损速度加快，导致成本上升。本文通过建立动力学模型，分析轮胎磨损与路面交互的关系，研究不同工况下的磨损规律，为实际操作提供科学依据，并提出改善措施。创新点在于结合露天煤矿实际工况，提出针对性分析方法，为矿山企业提供有价值的指导。

一、露天煤矿运输车轮胎磨损的影响因素

(一) 路面条件

路面条件直接决定了轮胎的磨损程度。碎石和泥土路面由于其粗糙度较大，摩擦力强，容易导致轮胎的表面磨损加速。湿滑的泥土路面则可能导致滑移摩擦，增加轮胎表面损耗。为了减缓磨损，可以对矿区主要运输道路进行硬化处理，采用耐磨的路面材料，减少对轮胎的磨损，从而提高运输效

率和降低维护成本^[1]。

(二) 车辆负载

负载直接影响轮胎的法向力大小，从而影响摩擦力的增减。过重的负载会使轮胎承受更大的压力，导致轮胎与地面接触面积增大，摩擦力加大，从而加剧磨损。为有效控制磨损，矿区应实施精确的负载监测，并避免超载情况发生。通过科学调配运输任务，确保负载合理分配，可以有效减少轮胎的过度磨损和延长轮胎使用寿命^[2]。

(三) 轮胎材质与结构

轮胎材质和结构是影响磨损的重要因素。高强度合成橡胶轮胎因其优良的耐磨性，在复杂工况下能够表现出较长的使用寿命，但成本较高。而低成本轮胎虽然价格便宜，但在恶劣的矿区路面环境中容易发生快速磨损。因此，矿区在选择轮胎时，应综合考虑成本与耐用性，根据不同运输需求和预算合理选型，以平衡性价比和耐用性^[3]。

(四) 行驶速度与驾驶习惯

驾驶员的操作习惯直接影响轮胎的磨损情况。例如，急刹车、急加速、频繁停车启动及长时间高速行驶都可能加剧

轮胎的磨损。在实际操作中，应加强驾驶员的培训，提升其驾驶技术，尤其是减少频繁的加速和刹车操作，保持平稳行驶，从而减少轮胎的过度磨损。合理控制车速也有助于延长轮胎的使用寿命，特别是在崎岖不平的矿区路面上。

(五) 气候与环境

气候变化对轮胎的磨损同样具有重要影响。极端温差和潮湿的环境可能导致轮胎材质的物理性能发生变化，进而加剧磨损。例如，高温天气可能导致橡胶材料老化，冬季低温则可能使轮胎变脆，增加磨损速度。矿区应根据季节变化调整轮胎的选用，采用适应不同气候条件的轮胎，并在恶劣天气条件下采取相应的保养措施，如定期检查轮胎气压和状态，防止因气候变化引起的加速磨损。

二、轮胎磨损与路面交互的动力学模型

(一) 轮胎与路面摩擦力模型

轮胎与路面之间的摩擦力是磨损产生的主要原因。根据库仑摩擦定律，摩擦力与轮胎的法向力成正比，而轮胎的法向力则受到载荷、重力以及路面形态（如粗糙度、湿滑度）的共同影响。摩擦系数 μ 会随着路面类型、气候条件以及轮胎的磨损程度发生变化^[4]。因此，摩擦力模型可以表示为：

$$F_{friction} = \mu \cdot F_{normal}$$

其中： $F_{friction}$ 为摩擦力， μ 为摩擦系数， F_{normal} 为法向力。在实际应用中，摩擦系数 μ 受到路面粗糙度、轮胎材质、温度、湿度等因素的影响，模型的适用性需要结合具体的路面工况进行校准。摩擦力的变化是影响磨损速率的关键因素，尤其在不同负载和车速下，摩擦力的变化会显著影响轮胎的磨损程度。

(二) 轮胎振动与冲击模型

轮胎在行驶过程中会受到路面不平整所引起的振动和冲击。路面的不规则性（如坑洼、碎石等）会导致轮胎的振动，这种振动不仅影响轮胎的稳定性，还加剧了轮胎表面的磨损。振动模型可以通过简化的二阶系统模型来表示：

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F_{impact}$$

其中： m 为轮胎的质量， c 为阻尼系数， k 为弹性系数， x 为振动位移， F_{impact} 为由路面不平整造成的冲击力。振动的频率和幅度直接影响轮胎的磨损特性。特别是在不平整或崎岖的路面条件下，轮胎的震动和冲击会更加剧烈，必须考虑路面的形态和车辆的悬挂系统对振动传递的影响。

(三) 轮胎磨损模型

根据阿基米德定律，轮胎的磨损速率与摩擦力之间存在密切关系。轮胎在行驶过程中与路面接触的摩擦力导致轮胎表面材料的不断剥离，从而形成磨损。轮胎磨损速率可以通过以下方程表示：

$$\dot{W} = k_{wear} \cdot F_{friction} \cdot v$$

其中： \dot{W} 为单位时间内的磨损速率， k_{wear} 为磨损系数， v 为车辆行驶速度。磨损速率不仅与摩擦力有关，还与行驶速度直接相关。在低速行驶时，由于摩擦作用持续时间较长，磨损会逐渐累积；而高速行驶时，尽管摩擦力较大，但由于相对接触时间较短，总体磨损速率较低，车辆行驶速度是影响轮胎磨损的一个关键因素。

三、模拟与分析

(一) 路面类型对磨损的影响

不同类型的路面对轮胎磨损的影响差异显著，尤其是碎石路面和泥土路面。碎石路面通常具有较大的粗糙度，这导致摩擦力显著增大。当轮胎在这样的路面上行驶时，表面与碎石之间的摩擦力较大，增加了轮胎表面的磨损速率。泥土路面虽然相对较为柔软，但其不均匀性和湿滑性仍会导致轮胎与路面之间产生较大的摩擦力，进而加剧磨损。相比之下，硬化路面由于其表面光滑且均匀，摩擦力相对较小，轮胎与路面之间的相互作用较为温和，从而有效减缓了磨损过程。在此情况下，轮胎的耐用性显著提高。因此，从轮胎磨损的角度出发，硬化路面的使用可以有效延长轮胎的使用寿命，尤其是在长期运输作业中。路面类型的差异还会影响轮胎的受力分布和振动模式，进一步影响轮胎的稳定性和性能。

(二) 负载对磨损的影响

在露天煤矿运输过程中，车辆负载是影响轮胎磨损的重要因素之一。通过模拟分析，发现负载增加会直接导致轮胎法向力增大，从而引发摩擦力的增加。当车辆处于重载状态时，轮胎承受的法向力较大，摩擦力与之成正比，导致轮胎表面产生更强的磨损作用。轮胎表面所受磨损不仅限于摩擦层面的物质损失，且可能引发诸如局部鼓包、裂纹等不均匀磨损现象，进而对轮胎的安全性能及使用寿命造成严重影响，轮胎在轻载和中载条件下，所承受的法向力较低，导致摩擦力相对削弱，进而使得磨损速度得到相应减缓，运输过程中，若载荷过高，轮胎将承受超负荷运作，内外结构压力随之攀升，甚至诱发轮胎过热与爆胎隐患，露天煤矿运输，

需依路况及运输需求,合理调控载重,旨在优化轮胎使用寿命,提升运输效率。

(三) 车速对磨损的影响

车速对轮胎磨损的影响具有复杂性。高速行驶时,尽管摩擦力增加,但由于车速较高,轮胎与路面的接触时间较短,因此摩擦引起的磨损速率总体上并不会显著增加。在高速行驶过程中,虽然摩擦力和轮胎的温度有所上升,但由于较短的摩擦接触时间,磨损主要集中在轮胎的表面层,而未能深度积累。轮胎与路面低速接触,摩擦虽不及高速猛烈,然磨损效应却逐积显著,露天煤矿作业中,卡车于凹凸不平的路面缓慢行进,轮胎与地表接触时间加长,进而引起表面持续磨损,在低速行驶状态下,轮胎的磨损效应愈发显著,尤其在泥沙与碎石交织的道路上,磨损速度的增幅尤为显著,众多矿区在轮胎维护及更替之际,尤为重视低速工况下因特定驾驶方式(诸如频繁启停与制动)所引发的磨损状况,此现象亦不可轻视。

四、对露天煤矿运输卡车轮胎磨损的建议

(一) 路面类型对磨损的影响

路面类型对轮胎磨损的影响显著,特别是在碎石路面和泥土路面上,由于这些路面具有较大的粗糙度和不规则性,摩擦力较大,轮胎磨损速率显著提高。碎石路面上的颗粒物会直接影响轮胎的接触面,增加物理磨损,而泥土路面的湿滑或泥泞状态会加剧轮胎表面的滑移磨损。为了有效提高轮胎使用寿命,露天煤矿应优先投资路面硬化与修复工程。通过采用高耐磨材料硬化矿区主要运输路线,能够显著降低摩擦系数,从而减少轮胎与路面之间的摩擦力和振动,进而有效降低轮胎磨损。定期评估矿区内不同路段的磨损程度,实施精准的路面养护,也能进一步减少轮胎磨损,提高运输效率和经济效益。

(二) 负载对磨损的影响

负载的大小直接影响轮胎与地面接触的法向力,进而影响摩擦力的大小。在超载情况下,轮胎的承受压力增大,摩擦力增强,导致轮胎磨损速率明显加快,且由于长时间的超负荷运转,轮胎温度也会显著升高,增加了爆胎的风险。为了减少轮胎的过度磨损,露天煤矿应严格控制运输负载,并通过技术手段实现精确监控。例如,使用车载电子称重系统,实时检测每辆车的载荷情况,确保其不超过规定限额。提升运输车辆的负荷分配管理,避免轮胎在不均匀负载下出现过度磨损的情况,从源头上降低运输过程中轮胎的磨损,并有效延长轮胎的使用寿命。

(三) 车速对磨损的影响

车速对轮胎磨损有着复杂的影响,低速行驶时,由于轮胎与路面的接触时间较长,摩擦作用持续增强,导致磨损速度加快,尤其在崎岖不平的路面上,低速行驶的摩擦积累效应显得尤为突出。然而,高速行驶时,尽管摩擦力增大,但接触时间短,磨损效果相对较小。在矿区运输中,应根据不同路面类型和运输需求灵活调整车速,避免车辆长时间低速运行造成过度磨损。在实际操作中,矿区可以通过智能化车速控制系统,根据实时路况自动调节车速,特别是在崎岖不平的路面上实施限速措施,以减少低速行驶对轮胎的损耗,从而有效延缓轮胎的磨损过程,并提高整体运输效率。

结论

本文通过轮胎与路面交互的动力学模型,分析了露天煤矿运输卡车轮胎磨损的影响因素。结果表明,路面类型、负载和车速对轮胎磨损有显著影响。碎石和泥土路面由于高摩擦力导致磨损加快,而硬化路面能有效减缓磨损。过重负载和低速行驶增加轮胎磨损积累。为延长轮胎使用寿命,建议进行路面硬化、合理控制负载与车速,并采用智能化监控系统。这些措施有助于提高运输效率,降低维护成本,具有较高的应用价值。

参考文献

- [1]蒋维琦,施恒,黄海波,等.重型集装箱卡车轮胎磨损颗粒物散射分布特性研究[J/OL].中国机械工程, 1-9[2024-11-28].
- [2]韩泽璇.人-车-路交互下重型汽车的爆胎动力学特性分析与智能应急安全控制研究[D].石家庄铁道大学, 2024.
- [3]黄毅,郑炳锋.基于加速加载试验的沥青路面动力响应影响因素研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(05): 933-937.
- [4]高酉权.基于数据挖掘的矿用卡车轮胎磨损原因分析算法研究[D].吉林大学, 2022.