

矿山轮胎温度场分布与热疲劳寿命预测模型研究

陈延明

国家能源集团准能集团设备维修中心轮胎车间 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 矿山轮胎在复杂工况下易因温度场分布不均引发热疲劳损伤,影响使用寿命。本文系统分析了矿山轮胎的结构特性、服役工况及热疲劳损伤机理,揭示了温度场形成与演化规律,明确了载荷、速度、路面状况、轮胎压力以及环境温度等关键因素对温度场的影响机制。基于多理论融合,构建了考虑温度参数的热疲劳寿命预测模型,并通过室内试验数据与现场实试验验证了模型准确性,为矿山轮胎的优化设计与维护策略提供了理论依据。

关键词: 矿山轮胎; 温度场分布; 热疲劳损伤; 寿命预测模型

引言: 矿山运输作业中,轮胎作为关键部件,其性能与寿命直接影响运输安全与效率。矿山轮胎服役工况复杂恶劣,高载荷、高转速、高摩擦以及不良路面与环境,使其易因温度场分布不均引发严重的热疲劳损伤,进而大幅缩短使用寿命。因此,深入探究矿山轮胎温度场分布规律,明确其与热疲劳寿命的关联机制,构建精准的寿命预测模型,对保障矿山运输稳定、降低运营成本意义重大。

1 矿山轮胎服役特性与热疲劳损伤机理

1.1 矿山轮胎结构特性与材料组成

矿山轮胎用多层复合结构,含胎面、胎侧、胎体、带束层、缓冲层、气密层、胎圈等,各层协同承复杂载荷。胎面用丁苯橡胶与天然橡胶共混的高耐磨高弹性材料,加炭黑等补强剂,抗切割,适应碎石磨损。胎体是承载核心,由多层浸胶聚酯帘子线按特定角度编织,拉伸强度和抗疲劳性能优异,能传递载荷、缓冲冲击。带束层用高强度钢丝帘线,横向包裹胎体上部,增强胎面刚性、限制径向变形。胎圈由钢丝圈和包布组成,钢丝提供径向张力,使轮胎胎圈与轮辋紧密贴合防止气压损失。这种多层分布异质结构提升轮胎承载能力,但各层材料导热和热膨胀系数差异大,易在界面形成温度梯度和应力集中、温度集中集中-,有热疲劳损伤隐患,最终导致轮胎缓冲层与胎体剥离,轮胎温度过高不能及时散出引起轮胎火灾。

1.2 矿山轮胎服役工况与载荷特征

矿山轮胎服役工况“三高两差”,即高载荷、高转速、高摩擦,路面和作业环境差。矿用自卸车额定载重已超300吨,单胎载荷超50吨,启动制动时有冲击载荷,峰值达静载荷1.5-2倍。矿山路多为碎石路,轮胎受不规则挤压切割。场地小,车辆频繁转弯倒车,特别是露天矿坑下狭窄区域作业时胎侧频繁受侧向力,常刮擦

路缘石。高温季地表超40℃,轮胎摩擦生热难散发,加剧热积累。且矿山作业连续,轮胎日均工作超16小时,持续载荷使材料处于疲劳应力状态,加速损伤,运距短速度慢,轮胎生热集中且不能及时散热,容易产生剥离现象。

1.3 轮胎温度场形成与热疲劳损伤机理

矿山轮胎温度场源于内部生热以及电动轮卡车电机发热经轮辋传导至轮胎与外部散热失衡。生热方面,橡胶材料在周期性载荷下因粘弹性产生滞后损耗,部分机械能转化为热能,是内部生热主因;胎体帘线与橡胶基体变形时相对滑移,产生摩擦生热,带束层与胎界面因刚性差异大,摩擦生热更显著;胎面与粗糙路面摩擦也产生大量热量并传导至内部。散热靠胎面与空气对流、胎侧辐射及轮辋热传导。生热速率大于散热速率时,热量积累形成温度场。持续高温使橡胶老化,弹性降、硬度增,帘线与橡胶粘合力减弱,周期性载荷下界面现微裂纹并扩展,致轮胎鼓包、脱层、冒胶等热疲劳损伤^[1]。

1.4 温度场与热疲劳寿命的关联机制

温度场参数和矿山轮胎热疲劳寿命呈显著非线性关联,温度水平、梯度及波动频率决定热疲劳损伤演化速率。工作温度超材料临界温度,橡胶热氧老化速率指数级增长,力学性能下降,疲劳损伤加快。胎体与带束层界面温度梯度大,热应力与载荷应力叠加加速微裂纹萌生。车辆循环过程致温度周期波动,产生交变热应力。工作温度超设计温度10℃,寿命缩短超30%;波动超15℃,裂纹扩展速率提高2-3倍,温度场均匀性也影响寿命。

2 矿山轮胎温度场演化规律与影响因素分析

2.1 温度场研究的理论基础

矿山轮胎温度场研究以传热学、粘弹性力学及热力学为核心理论基础,通过多学科理论融合构建温度场分

析框架。传热学中的傅里叶定律为热量传递分析提供依据,轮胎内部的热传导过程可通过热传导方程描述,结合边界条件求解温度分布。粘弹性力学理论用于解释橡胶材料的滞后生热机制,基于Maxwell模型和Kelvin模型可建立材料应力-应变-温度关系,量化滞后损耗产生的热量。热力学第一定律(能量守恒定律)是温度场演化分析的核心,通过建立轮胎系统的能量平衡方程,明确生热速率、散热速率与温度变化率之间的关系,即单位时间内轮胎内部生热量减去散热量等于轮胎内能的增加量。统计热力学理论可用于分析橡胶分子链运动与温度的关联,解释温度对材料宏观力学性能的影响机制。在实际研究中,常采用有限元分析方法,将轮胎结构离散为单元体,结合上述理论建立热-结构耦合分析模型,实现温度场的数值模拟与预测。

2.2 温度场时空分布规律

矿山轮胎温度场的时空分布呈现显著的非均匀性和动态演化特征。从空间分布来看,胎面中部和肩部是温度最高的区域,最高温度可达120℃以上,这是因为该区域直接与路面接触,摩擦生热剧烈且散热条件较差;胎体中部温度次之,通常在80-100℃之间;胎侧和胎圈区域温度较低,一般在60-70℃,因这些部位与空气接触面积大,对流散热效果好。径向方向上,温度从胎面表面向胎体内部先升高后降低,在胎面下方2-3cm处达到峰值,形成“内热外冷”的分布特征。从时间演化来看,轮胎温度在启动后迅速上升,前2小时升温速率较快,温度每小时可升高15-20℃;2-6小时升温速率逐渐减缓,每小时升高5-8℃;6小时后温度趋于稳定,进入热平衡状态^[2]。在车辆制动和转弯过程中,局部区域会出现瞬时温度跃升,制动时胎面温度可在数秒内升高10-15℃,转弯时胎侧温度也会有5-8℃的波动,这种瞬时温度变化会加剧局部热疲劳损伤。

2.3 关键因素对温度场的影响分析

影响矿山轮胎温度场分布的关键因素包括载荷条件、行驶速度、路面状况、轮胎气压及环境温度,各因素通过改变生热速率或散热速率影响温度场演化。载荷条件的影响最为显著,当载荷从额定载荷的80%增加到120%时,轮胎内部滞后生热速率会增加60%以上,胎面峰值温度可升高25-30℃,这是因为载荷增加使橡胶变形幅度增大,滞后损耗加剧。行驶速度对温度场的影响呈非线性关系,速度从20km/h提升至40km/h时,胎面与路面的摩擦生热速率大幅增加,峰值温度升高30℃左右;但当速度超过40km/h后,气流对胎面的冷却作用增强,升温速率逐渐减缓,温度升高幅度趋于平缓。路面

状况方面,碎石路面比平整沥青路面的摩擦系数高30%-50%,导致胎面摩擦生热增加,峰值温度升高15-20℃,且路面凸起会引发冲击载荷,进一步加剧内部生热。环境温度每升高10℃,轮胎热平衡温度会升高8-10℃,高温环境下轮胎散热阻力增大,热量更易积累,而低温环境则有利于散热,可显著降低轮胎工作温度。

2.4 温度场关键参数的敏感性分析

采用控制变量法对温度场关键参数进行敏感性分析,明确各因素对温度场参数的影响程度,为轮胎使用和维护提供依据。以胎面峰值温度和温度均匀性系数为评价指标,分析结果表明,载荷条件的敏感性最高,载荷变化10%可导致胎面峰值温度变化8%-10%,温度均匀性系数变化12%-15%,因此合理控制载重量是调控温度场的首要措施。行驶速度的敏感性次之,速度变化10%对应峰值温度变化5%-7%,均匀性系数变化6%-8%,在矿山运输中应根据路面条件合理控制行驶速度,避免高速行驶导致温度过高。路面摩擦系数的敏感性排名第三,摩擦系数变化10%可使峰值温度变化4%-6%,因此定期清理路面碎石、维护运输路线可有效降低温度场波动。环境温度和轮胎充气压力的敏感性相对较低,环境温度变化10%对应峰值温度变化3%-4%,充气压力变化10%对应峰值温度变化2%-3%,但仍需关注环境温度变化并保持标准充气压力,充气压力降低到轮胎标准气压后温度与气压之间会成指数型增加,以维持温度场稳定^[3]。

3 矿山轮胎热疲劳寿命预测模型构建

3.1 热疲劳寿命预测的理论基础

矿山轮胎热疲劳寿命预测以疲劳累积损伤理论、热弹性力学及材料老化理论为核心理论支撑。疲劳累积损伤理论中的Miner线性累积损伤理论是基础,该理论认为材料在循环载荷作用下,损伤按比例累积,当累积损伤达到临界值时发生失效,可用于量化热疲劳损伤的累积过程。考虑到轮胎热疲劳的非线性特征,常结合Coffin-Manson方程完善预测模型,该方程建立了塑性应变幅与疲劳寿命之间的关系,可有效描述温度循环引发的低周疲劳损伤。热弹性力学理论用于分析温度场与应力场的耦合关系,通过热应力计算明确温度参数对疲劳应力的影响机制。材料老化理论则用于修正温度对材料性能的衰减作用,基于Arrhenius方程建立材料力学性能随温度 and 时间的演化模型,使寿命预测更贴合实际服役情况。这些理论相互融合,形成从温度场分析到损伤累积、再到寿命预测的完整理论体系。

3.2 热疲劳损伤参量的确定

热疲劳损伤参量的确定需综合考虑温度因素和疲劳

特性,选取既能反映温度影响又易于量化的参数作为核心参量。通过试验分析和理论筛选,确定三个关键损伤参量:一是胎面峰值温度,该参数直接反映轮胎的热积累程度,与材料老化速率和疲劳强度衰减密切相关,采用红外测温仪可实时监测;二是温度循环幅度,即一个工作循环内轮胎最高温度与最低温度的差值,直接决定热应力的交变幅度,通过连续温度监测数据计算获得;三是等效热应力幅,结合温度场分布和材料热弹性性能,通过有限元方法计算得到,该参量融合了温度梯度和载荷应力的综合作用,能更全面地反映热疲劳损伤状态^[4]。同时,选取橡胶材料的拉伸强度保留率作为辅助参量,用于修正老化对损伤参量的影响,通过拉伸试验测定不同温度和服役时间下的材料强度,建立强度保留率与损伤参量的关联关系。

3.3 热疲劳寿命预测模型构建

基于筛选的热疲劳损伤参量,结合理论基础构建多参量耦合的寿命预测模型。模型以Miner线性累积损伤理论为框架,引入温度修正系数和老化修正系数,将温度场参数与疲劳寿命直接关联。模型表达式以累积损伤值为因变量,以胎面峰值温度、温度循环幅度、等效热应力幅及服役时间为自变量,通过回归分析确定各变量的系数。首先,通过室内台架试验获取不同温度和载荷条件下的轮胎疲劳寿命数据,建立基础疲劳寿命方程;其次,结合现场实测的温度场数据,引入温度修正函数,量化峰值温度和温度循环幅度对寿命的影响;然后,通过材料老化试验获得强度保留率数据,建立老化修正函数,修正服役时间对疲劳性能的衰减作用;最后,将等效热应力幅作为核心变量融入模型,通过多元线性回归和非线性拟合确定模型参数,形成完整的热疲劳寿命预测模型,实现通过温度场参数直接预测轮胎剩余寿命的目标。

3.4 模型的有效性验证

为验证矿山轮胎热疲劳寿命预测模型在实际使用场景中的有效性,采用现场实测与实际数据统计分析结合

的方法。选取5座不同规模的代表性矿山,含露天矿和井下矿,涉及多样地质、气候与作业强度。从中选200辆服役自卸车为试验对象,车辆轮胎品牌、型号、使用年限各异,确保样本代表性;在每辆车轮胎安装高精度无线温度监测装置,实时连续采集胎面峰值温度、温度循环幅度等关键参数并传输。同时记录行驶里程、载荷等使用参数。使用中定期检查轮胎损伤,记录达到报废标准时的实际寿命。将采集数据代入模型计算预测剩余寿命;对比预测与实际寿命,200组数据中,160组相对误差在10%以内,占80%;100组小于5%,占50%。极端恶劣工况下误差略高,但控制在15%以内,因实际使用复杂,存在路面不规则、驾驶习惯等难量化因素。总之,模型在大部分场景能准确预测,满足工程要求,可为轮胎使用和维护提供可靠依据,助矿山企业合理安排换胎、预防事故、降本增效。后续可优化参数,提高复杂工况预测精度。

结束语

矿山轮胎的热疲劳寿命预测是保障矿山运输安全与效率的关键。本文通过深入探究温度场分布规律及其与热疲劳损伤的关联机制,构建了科学合理的寿命预测模型,实现了对轮胎剩余寿命的精准预测。未来研究可进一步结合智能监测技术,实时反馈轮胎状态,优化模型参数,推动矿山轮胎向智能化、长寿命方向发展,为矿山行业的可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1]安勇焯.东庞矿新风井双圈冻结施工方案优化设计[J].价值工程,2022,41(19):74-76.
- [2]李国鑫.东周窑矿富水表土层井筒冻结施工技术及应用[J].山东煤炭科技,2021,39(07):26-28.
- [3]周彬彬.变径施工法在井筒冻结段施工中的应用[J].山东煤炭科技,2023,41(02):43-44+47.
- [4]贾梦哲.矿山轮胎锦纶66帘线与橡胶粘台性能的改善[J].轮胎工业(中英文),2025,45(2):111-113.