



城轨车辆制动闸瓦磨耗仿真分析与验证

薛文胜, 朱文良, 余朝刚, 孙宁远

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201600)

摘要: 城轨车辆在运行中频繁地实施制动调速, 容易导致车轮和闸瓦间产生连续高温摩擦, 加剧闸瓦的磨耗。为研究制动温升条件下的闸瓦磨耗规律, 文章建立了车轮-闸瓦摩擦副有限元模型和基于温度变化的闸瓦磨损预测仿真模型; 并采用有限元ABAQUS软件, 引入温度变化的Archard模型用于闸瓦磨损计算; 分析了闸瓦在单次紧急制动工况、最大常用电空混合制动工况和连续制动工况下的闸瓦磨耗规律; 最后通过闸瓦磨耗仿真结果与实车线路试验数据对比, 验证了该仿真方法的合理性与正确性。结果表明: 温度变化会引起闸瓦材料性能的变化。单次紧急制动工况下, 考虑温度变化的闸瓦磨损量比不考虑温度变化的闸瓦磨损量提高了43.8%; 单次最大常用电空混合制动工况时, 拖车空气制动力优先补充方式下闸瓦磨损量最大, 磨损量为 14.6×10^{-3} mm; 连续制动工况下闸瓦预测平均磨损速率为 $0.28 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$, 与列车实测 $0.27 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$ 的磨损速率较为吻合。该闸瓦磨损预测模型可为研究城轨车辆闸瓦制动磨耗规律提供参考。

关键词: 城市轨道交通车辆; 闸瓦; 制动温升; 磨损预测; 仿真模型; 有限元

中图分类号: U270.35

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)01-0068-08

0 引言

城市轨道交通车辆(简称“城轨车辆”)在运行中频繁实施制动调速, 闸瓦温度会快速上升, 而温度变化是影响车轮闸瓦摩擦副磨耗的原因之一, 同时还会改变摩擦副材料性能和接触状态, 影响闸瓦的制动性能和使用寿命。因此, 建立基于温升的车轮闸瓦磨耗仿真模型并对闸瓦进行分析研究, 有利于提高城轨车辆运行的安全性。

文献[1]建立了闸瓦模型, 研究温度对车轮闸瓦摩擦副摩擦因数的影响。文献[2]基于Archard磨损模型, 提出了一种有限元计算方法模拟气缸在平面微动配置中的微动磨损和微动变量随磨损循环次数的演变规律。文献[3]通过试验获得摩擦因数及磨损率和温度的关系, 并对两种不同材料的闸片和制动盘进行仿真分析对比, 得到考虑温度相关和恒定系数的制动盘/闸片温升的磨损规律。文献[4]建立了圆盘形抛光工具的三维模型, 采用ABAQUS子程序UMESHMOTION和ALE更新网

格功能, 仿真得到的接触压力试验结果与实测结果吻合。文献[5]通过有限元仿真与试验测试相结合的方法研究了温升对车轮踏面磨损的影响。文献[6]以树脂基摩擦片材料为对象, 建立了摩擦因数、磨损速率与温度和载荷的关系, 在此基础上, 将Archard磨损模型和有限元相结合, 研究分析了接触表面接触应力和磨损的变化规律。文献[7]采用ABAQUS子程序将Archard磨损模型整合到制动界面摩擦学求解中, 实现了磨损的累积和动态演变的模拟。文献[8]对车轮闸瓦摩擦副进行热机械耦合有限元仿真, 研究分析单次紧急制动工况下车轮踏面温度场和应力场分布, 实现单次紧急制动车轮踏面磨损量的定量预测。

上述研究表明温度对磨损的影响不可忽视, 而针对闸瓦磨耗工况, 目前大多数仿真模型均未考虑温度的影响。针对城轨车辆闸瓦高温磨耗问题, 本文以车轮闸瓦踏面制动为例进行了相应研究, 制动过程中考虑闸瓦与车轮接触面的温度、硬度以及接触应力分布, 两者间接触形状以及相对位移分布, 在此基础上再结合Archard磨耗模型^[9-13]对磨损深度进行了定量预测,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52072266)

通信作者: 朱文良, 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事轨道车辆制动控制、轮轨黏着方面的研究; E-mail: zhuwenliang@sues.edu.cn

引用格式: 薛文胜, 朱文良, 余朝刚, 等. 城轨车辆制动闸瓦磨耗仿真分析与验证[J]. 机电传动, 2025(1): 68-75.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.008.

Citation: XUE Wensheng, ZHU Wenliang, YU Chaogang, et al. Simulation analysis and verification of brake shoe wear for urban rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 68-75.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.008.

并应用所测试验数据进行验证。

1 车轮闸瓦摩擦副温升仿真分析

车轮闸瓦摩擦副温升变化规律是预测列车制动闸瓦磨耗规律的关键因素, 为研究车轮闸瓦的磨耗规律, 利用有限元软件 ABAQUS 建立车轮-闸瓦摩擦副数学模型, 并通过试验与仿真结果进行对比分析。

1.1 有限元模型

车轮直径为 840 mm, 闸瓦宽度为 70 mm。采用扫掠式划分网格, 对车轮踏面与闸瓦摩擦区域的网格进行细化, 网格类型为 DC3D8, 整个模型共计 72 630 个单元和 89 200 个节点, 如图 1 所示。ABAQUS 内的子程序采用 FORTRAN 语言编写, 各子程序应用于加载热流密度、对流换热系数、钢轨接触换热、车轮闸瓦接触传热和车轮闸瓦摩擦副温升仿真分析。



图 1 车轮-闸瓦摩擦副有限元模型
Fig. 1 Finite element model of wheel and brake shoe friction pair

1.2 材料属性及载重参数

考虑城轨车辆制动时, 闸瓦与车轮踏面摩擦区域的温度变化会导致两者材料属性发生改变, 因此选择强硬度和弹性较高的 CL60 钢车轮, 不同温度下 CL60 车轮的材料属性如表 1 所示; 闸瓦选择常用的高磨合成闸瓦, 其材料参数见表 2; 城轨车辆列车编组形式为 Tc1+Mp1+M1=M2+Mp2+Tc2, 各节车载重参数如表 3 所示。

表 1 车轮材料参数

Table 1 Parameters of wheel material

温度/ ℃	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·(m·℃) ⁻¹)	比热容/ (J·(kg·℃) ⁻¹)	热膨胀 系数/ (10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)	屈服 强度/ MPa	弹性 模量/ GPa
20	7 847	52	470	10.90	610	205
100	7 827	50	480	11.45	550	170
200	7 797	48	500	12.25	500	165
300	7 770	45	520	12.85	450	145
400	7 730	42	540	13.45	420	70

表 2 闸瓦材料参数

Table 2 Parameters of brake shoe material

材料参数	参数值
密度/(kg·m ⁻³)	2 120
导热系数/(W·(m·℃) ⁻¹)	0.90
比热容/(J·(kg·℃) ⁻¹)	478
热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)	0.93
屈服强度/MPa	580
弹性模量/GPa	1.0

表 3 车辆各工况下载重参数

Table 3 Load parameters of various vehicle conditions kg

车辆	AW1 工况下	AW2 工况下	AW3 工况下
Tc1	40 938	56 898	62 138
Mp1	42 601	58 561	63 801
M1	41 719	57 679	62 919
M2	41 719	57 679	62 919
Mp2	42 548	58 508	63 748
Tc2	40 938	56 898	62 138
全列	250 463	346 223	377 663

1.3 温升仿真结果分析

为了在车轮-闸瓦接触摩擦过程中, 准确采集摩擦面上的瞬时温度值, 在闸瓦上、中、下 3 个位置打孔预埋热电偶, 热电偶探头接近车轮踏面, 此时热电偶采集的温度值可看作是车轮踏面以及闸瓦表面的温度。同时, 在闸瓦出口处安装点温仪和热成像仪, 将其温度值与热电偶采集的温度值进行对比。试验现场测试设备安装如图 2 所示。



图 2 测试设备安装示意图
Fig. 2 Installation diagram of testing equipment

图 3 为连续 3 次紧急制动工况下闸瓦摩擦表面的仿真温度与试验温度曲线结果对比。由图 3 可知, 3 次紧

急制动时间间隔较短，制动时最高温度分别为 217.40℃、245.78℃和 270.70℃。

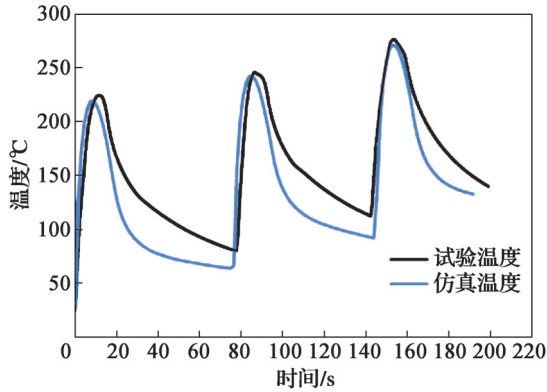


图3 连续3次紧急制动下闸瓦试验温度与仿真温度曲线对比
Fig. 3 Comparison of temperature curves from testing and simulations of brake shoes in three rounds of emergency braking

表4为3次紧急制动闸瓦摩擦表面仿真温度与试验温度数值的对比结果。由表4可知，仿真温度值与试验温度值的相对误差最大为3.1%，仿真温变化度曲线与试验温度变化曲线基本吻合，验证了仿真方法的正确性。

表4 闸瓦摩擦表面温度仿真值与试验值对比

Table 4 Comparison between simulation results and testing data of friction surface temperature of brake shoe

制动工况	编号	仿真温度/℃	试验温度/℃	相对误差/%
3次连续 紧急制动	1	217.40	224.32	3.1
	2	245.78	248.85	1.2
	3	270.70	276.35	2.0

2 基于温度变化的闸瓦磨损模型

为研究制动温升条件下的闸瓦磨耗规律，在上一章所建模型的基础上，引入温度变化的 Archard 磨损模型用于闸瓦磨损计算，并给出基于温度变化的闸瓦磨损仿真方法。

2.1 Archard 磨损模型

Archard 磨损理论在磨损的计算中应用比较广泛，该理论认为两个接触表面的磨损量与表面的接触正应力、相对滑动距离和材料的硬度有关，其表达式为

$$V=k_w \frac{F_N s}{H} \tag{1}$$

式中： V 为材料磨损体积， m^3 ； k_w 为车轮与闸瓦间的磨损系数，取 $8 \times 10^{-5[12]}$ ； F_N 为法向压力； s 为相对滑动距离； H 为材料硬度。

对 Archard 磨损模型等式两边进行微分，选取闸瓦单元摩擦面 dA ，等式两边同时除以 dA ，可得到闸瓦摩擦面任一单元的磨损量，其表达式为

$$dh=\frac{dV}{dA}=k_w \frac{p_s ds}{H} \tag{2}$$

式中： dh 为单位接触面的磨损量； p_s 为单元摩擦面接触压力， $p_s=\frac{p}{dA}$ ； ds 为单位接触面相对滑动距离。

过高的温度会对摩擦材料属性产生一定的影响，通过拟合得到高磨合成闸瓦材料硬度随温度变化的关系式^[14]如下：

$$H(\theta)=\text{const} \cdot \exp(a\theta) \tag{3}$$

式中： $H(\theta)$ 为闸瓦材料硬度； a 为常数； θ 为车轮闸瓦摩擦表面的接触温度。

闸瓦材料硬度随温度变化曲线如图4所示。

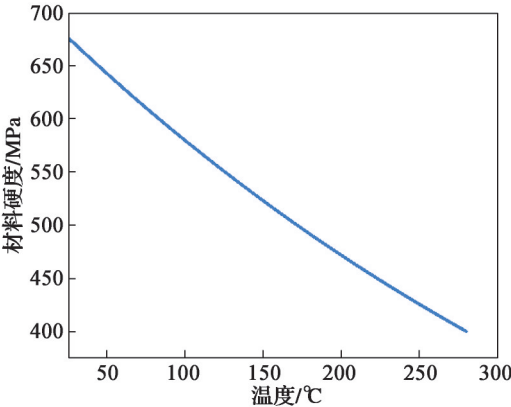


图4 闸瓦材料硬度随温度变化曲线
Fig. 4 Variation curve of brake shoe material hardness with temperature

根据实际需要，对原始 Archard 磨损模型进行修正，从修正后的磨损模型可以看出，闸瓦的磨损量主要与闸瓦摩擦表面接触压力、相对位移距离和摩擦表面温度有关，修正后的 Archard 磨损模型表达式如下：

$$\Delta h=k_w \frac{p_s \Delta s}{H(\theta)} \tag{4}$$

式中： Δh 为闸瓦表面某节点的磨损增量； Δs 为节点分解后的相对滑动距离。

将整个闸瓦制动磨损过程分解成多个磨损增量的累积，则在第 i 个增量步后闸瓦磨损表面某节点的累积磨损量可表示为

$$h_i=h_{i-1}+\Delta h_i \tag{5}$$

式中： h_i 为闸瓦表面某节点在第 i 个增量步时总的磨损量； h_{i-1} 为该节点在第 $i-1$ 个增量步的磨损量； Δh_i 为节点在第 i 个增量步时的磨损增量。

2.2 基于温度变化的闸瓦磨损仿真方法

在进行闸瓦磨损仿真时，由于每个相邻增量步循环周期内闸瓦磨损量非常小，为了减少计算量和计算时间，采用循环跳跃法将一个循环周期扩大了 ΔN 倍，并根据磨损量更新摩擦表面轮廓形貌，提高仿真效率。此时，闸瓦磨损表达式为

$$h(x)=\Delta N \sum_1^n k_w \frac{p(x)s(x)}{H(\theta)} \tag{6}$$

式中： $h(x)$ 为闸瓦磨损总量； $p(x)$ 为每个相邻增量步摩擦面接触压力； $s(x)$ 为每个相邻增量步摩擦面接触位移。

考虑温度变化对闸瓦磨损的影响，提取制动过程中闸瓦摩擦表面的温度数据，用于磨损数学模型计算。车轮闸瓦摩擦副磨损仿真分析流程如图5所示。

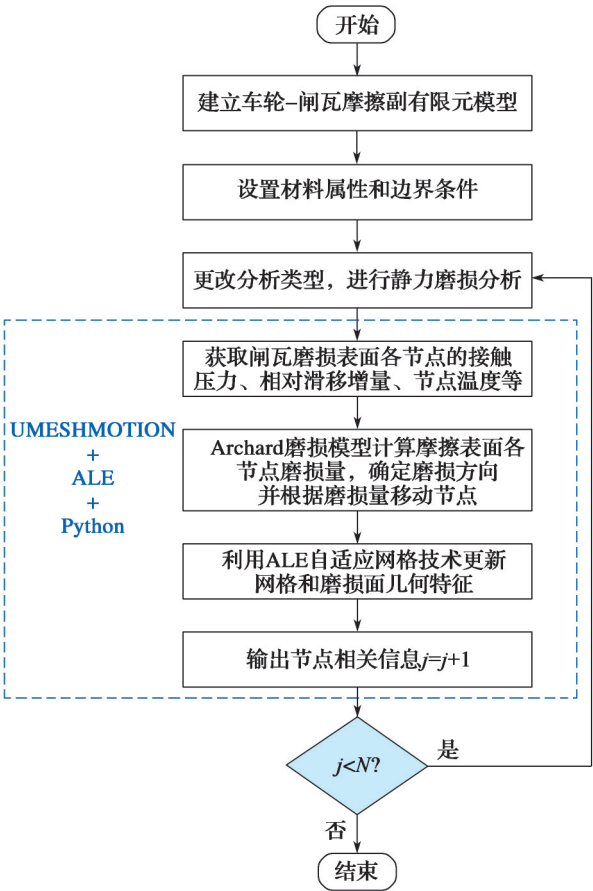


图5 车轮闸瓦摩擦副磨损仿真分析流程图

Fig. 5 Flow chart for wear simulation analysis of wheel and brake shoe friction pair

3 闸瓦磨损仿真结果分析与试验验证

为研究城轨车辆制动时闸瓦的磨损分布，对上文建立的闸瓦磨损模型在单次紧急制动工况、单次最大常用电空配合制动工况和连续制动工况下进行仿真，并分析温度变化和不同制动力分配方式对闸瓦磨损的影响，通过试验验证该模型的有效性。

3.1 单次紧急制动闸瓦磨损仿真结果分析

在AW3载荷，闸瓦制动压力45 000 N，制动初速度80 km/h，制动减速度1.2 m/s²的单次紧急制动工况下，分别对单次紧急制动工况下考虑温度变化和不考虑温度变化时的闸瓦磨损进行仿真，结果如图6、图7所示。此时，磨损主要集中于闸瓦与车轮踏面中部的摩擦区域。制动结束时，不考虑温度变化的闸瓦磨损

量最大值为0.024 82 mm；考虑温度变化的闸瓦磨损量最大值为0.035 70 mm，闸瓦磨损量相对提高了43.8%。

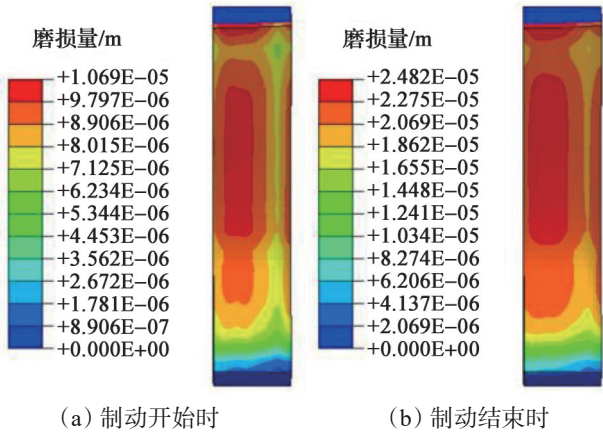


图6 紧急制动不考虑温度变化时不同时刻闸瓦磨损分布云图

Fig. 6 Time-varying contour plots of brake shoe wear distribution under emergency braking condition without considering temperature changes

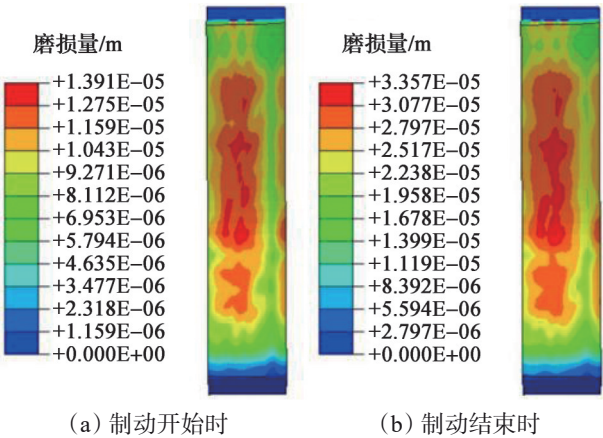


图7 紧急制动考虑温度变化时不同时刻闸瓦磨损分布云图

Fig. 7 Time-varying contour plots of brake shoe wear distribution under emergency braking condition considering temperature changes

为分析闸瓦表面磨损轴向分布规律，分别选取闸瓦表面轴向A1~A3和B1~B3共6排节点，将其磨损量取平均值表示闸瓦沿轴向的磨损量，如图8所示。

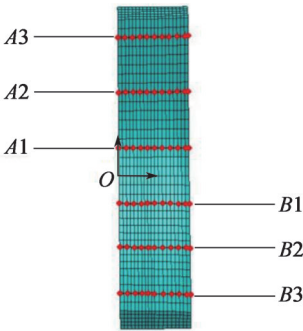


图8 闸瓦表面轴线节点

Fig. 8 Axis node of brake shoe surface

图9为考虑温度变化和不考虑温度变化闸瓦沿轴向

磨损的分布规律。从图9可以看出，磨损主要集中于闸瓦中部偏左，总体呈现中部偏左侧高和中部偏右侧低的磨损分布规律，与文献[15]中实际车轮与闸瓦踏面制动过程中的闸瓦磨损分布相吻合。

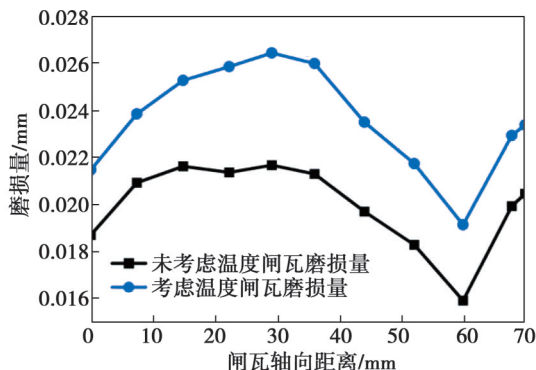


图9 温度对闸瓦轴向磨损量分布的影响
Fig. 9 Influence of temperature on the axial wear distribution of brake shoes

3.2 单次最大常用电空配合制动闸瓦磨损仿真结果分析

城轨车辆电空配合制动过程中主要有拖车空气制动力滞后补充、拖车空气制动力优先补充以及空气制动力平均分配3种方式。模拟AW3载荷下，单次制动初速度为80 km/h时，最大常用电空配合工况下不同的电空配合方式对动车和拖车闸瓦磨损的影响。

图10为拖车空气制动力滞后补充方式下制动结束时的磨损云图。由于施加于拖车闸瓦上的压力要小于施加于动车闸瓦压力，且作用时间更短，从而导致拖车闸瓦的磨损量小于动车闸瓦的磨损量，拖车闸瓦最大磨损量为 1.1×10^{-4} mm，动车闸瓦最大磨损量为 8.58×10^{-3} mm。图11为拖车空气制动力滞后补充方式下闸瓦轴向磨损量分布图。由图11可知，动车、拖车闸瓦表面磨损分布一致，磨损主要集中于闸瓦中部，拖车闸瓦最大磨损量为 8.8×10^{-5} mm，动车闸瓦最大磨损量为 6.7×10^{-3} mm。

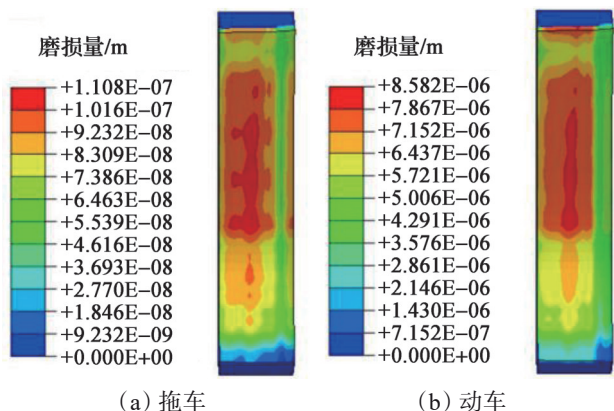


图10 拖车空气制动力滞后补充方式下闸瓦磨损云图
Fig. 10 Contour plot of brake shoe wear on trailer air braking force with hysteresis supplement

图12为拖车空气制动力优先补充方式下制动结束时磨损云图，开始制动时拖车闸瓦压力优先施加，拖

车的空气制动作用时间比动车长，导致拖车闸瓦磨损远高于动车。制动结束时拖车闸瓦最大磨损量为 14.6×10^{-3} mm，动车闸瓦最大磨损量为 1.6×10^{-4} mm。图13为拖车空气制动力优先补充方式下闸瓦轴向磨损量分布曲线，由于拖车补充了一部分空气制动力，不足的部分再由各节动车平均分配，因此拖车闸瓦磨损量明显大于动车闸瓦磨损量，拖车闸瓦最大磨损量为0.001 2 mm，动车闸瓦最大磨损量为 1.3×10^{-4} mm。

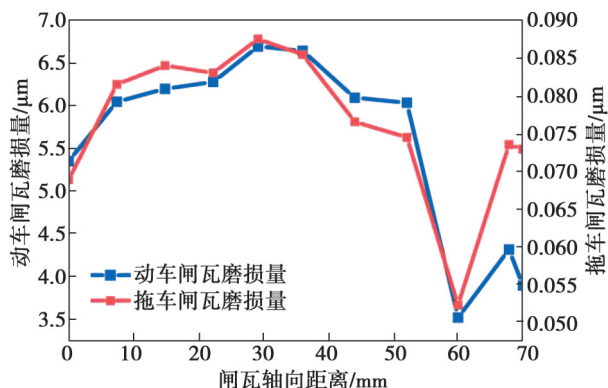


图11 拖车空气制动力滞后补充方式下闸瓦轴向磨损量分布
Fig. 11 Axial wear distribution of brake shoes on trailer air braking force hysteresis supplement

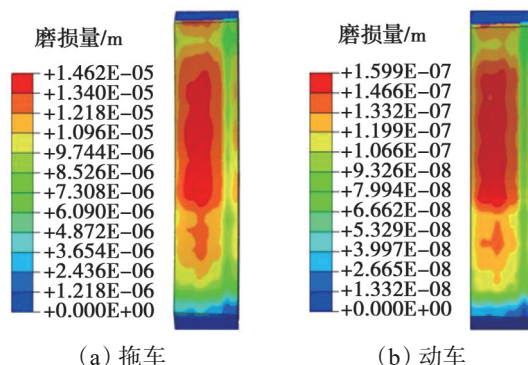


图12 拖车空气制动力优先补充方式下闸瓦磨损云图
Fig. 12 Contour plot of brake shoe wear on trailer air braking force with priority supplement

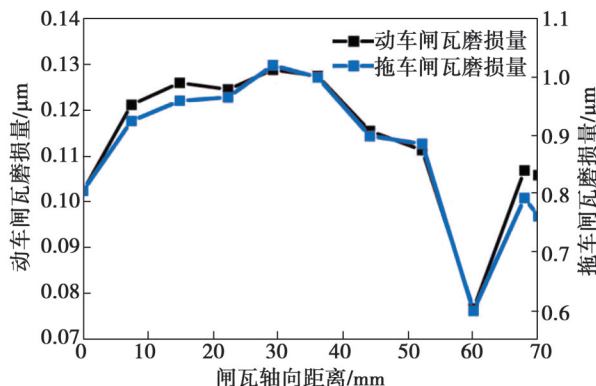
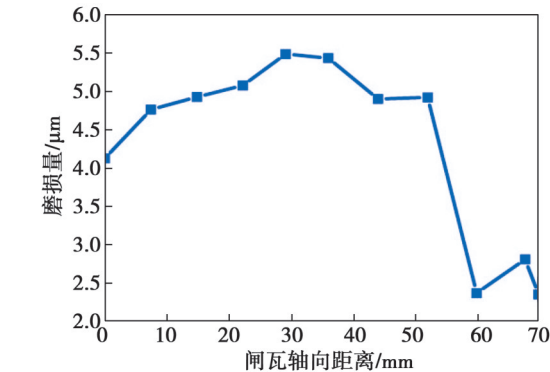
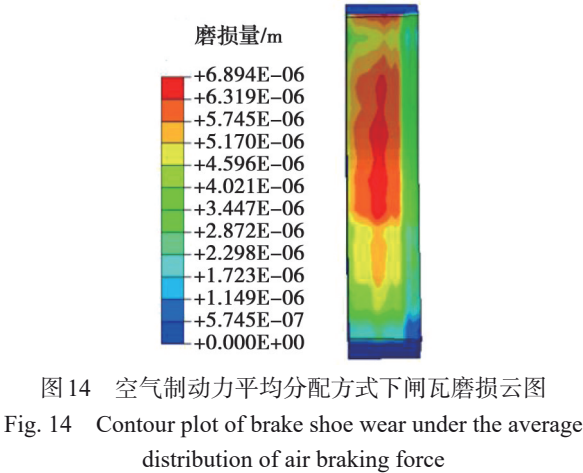


图13 拖车空气制动力优先补充方式下闸瓦轴向磨损量分布
Fig. 13 Axial wear distribution of brake shoes on trailer air braking force with priority supplement

图14为空气制动力平均分配方式下单节车闸瓦磨损分布云图。由于所需要补充的空气制动力由各节车

平均分配, 施加于各节车的闸瓦压力相同, 在此配合方式下, 闸瓦最大磨损量为 6.89×10^{-3} mm。空气制动力平均分配方式下单节车闸瓦轴向磨损分布曲线如图 15 所示, 在此配合方式下, 闸瓦最大磨损量为 5.5×10^{-3} mm。



3.3 连续制动工况闸瓦磨损结果预测及试验验证

对国内某地铁列车进行磨耗试验时, 由于单程磨耗较少而难以测量, 因此分别对闸瓦安装前的厚度和运行 15 648 km 后的厚度进行测量并以 $\text{mm}/10^4 \text{ km}$ 为单位计算其连续制动工况下的磨损速率。测量情况如图 16 所示, 测量位置分别选取闸瓦中心、四分点和边缘处 3 个位置, 以 3 个位置磨损的平均值作为磨损量。

测量结果如表 5 所示。由表 5 可知, 闸瓦磨耗主要集中在中心点的位置, 与上文的仿真结果相同, 同时通过计算可得闸瓦平均磨损量为 0.42 mm, 磨损速率为 $0.27 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$ 。

模拟该城轨列车在 AW3/AW2/AW1 不同载荷下的单程运行工况, 其中 AW3/AW2/AW1 工况整天运行时长分别为 2 h、11 h 和 5 h, 权重分别为 1/9、11/18 和 5/18。以空气制动力平均分配的方式正线运行 20 站, 运行里程为 38.2 km, 仿真得到的闸瓦沿轴向分布的磨损量如图 17 所示。在 AW3 超载工况下, 城轨列车运行



图 16 闸瓦磨耗运行前后测量情况

Fig. 16 Measurements of brake shoe wear before and after operation

表 5 闸瓦磨耗测量结果

Table 5 Measurements of brake shoe wear mm

参数项目	边缘处	四分点处	闸瓦中心处
安装前厚度	51.83	50.00	49.41
运行后厚度	51.79	49.75	48.45
磨损量	0.04	0.25	0.96

38.2 km, 制动 20 次之后, 闸瓦平均磨损量为 2.56×10^{-3} mm, 闸瓦平均磨损速率为 $0.67 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$; 在 AW2 满载工况下, 闸瓦平均磨损量为 1.07×10^{-3} mm, 闸瓦平均磨损速率为 $0.28 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$; 在 AW1 满载工况下, 闸瓦平均磨损量为 4.77×10^{-4} mm, 闸瓦磨损速率为 $0.12 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$ 。将不同载重工况下的磨损速率加权计算以后得到城轨列车的闸瓦平均磨损速率为 $0.28 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$, 与列车实际测得的 $0.27 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$ 磨

损速率较为吻合,验证了仿真方法的有效性。

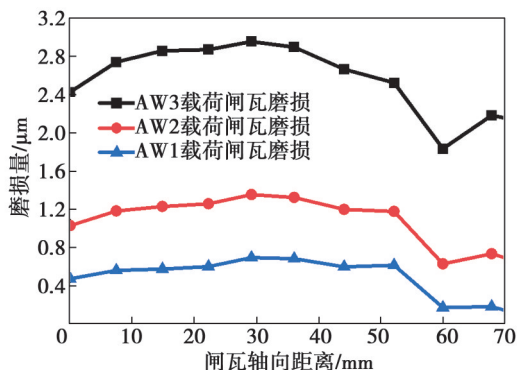


图17 不同载荷闸瓦轴向磨损量分布

Fig. 17 Axial wear distribution of brake shoes under different loads

4 结论

本文基于 Archard 磨损理论建立了基于温度变化的闸瓦磨损预测模型,对不同制动工况下的闸瓦磨损进行了仿真分析,得到结论如下:

①在单次紧急制动工况下,考虑温度变化的闸瓦磨损量高于不考虑温度变化的闸瓦磨损量,两者沿闸瓦轴向磨损的分布规律大致相同,在闸瓦中部且靠近轮辋侧的闸瓦处磨损比较严重。考虑温度变化的闸瓦磨损模型有效提高了闸瓦磨损量的计算精度。

②单次最大常用电空配合制动工况的3种方式中,拖车空气制动力滞后补充方式下闸瓦最大磨损量为 8.58×10^{-3} mm,拖车空气制动力优先补充方式下闸瓦最大磨损量为 14.6×10^{-3} mm,空气制动力平均分配方式下闸瓦最大磨损量为 6.89×10^{-3} mm,采用空气制动力平均分配方式时闸瓦磨损量最小。

③对国内某地铁列车进行闸瓦磨耗试验得到闸瓦平均磨损速率为 $0.27 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$,将不同载重工况下的磨损速率加权后仿真得到城轨列车的闸瓦平均磨损速率为 $0.28 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$,与试验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] IVANOV P, KHUDONOGOV A, DULSKIY E, et al. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness[J]. Journal of physics: conference series, 2020, 1614(1): 012086.
- [2] MCCOLL I R, DING J, LEEN S B. Finite element simulation and experimental validation of fretting wear[J]. Wear, 2004, 256(11/12): 1114-1127.
- [3] YEVTUSHENKO A A, GRZES P. Axisymmetric FEA of temperature in a pad/disc brake system at temperature-dependent coefficients of friction and wear[J]. International communications in heat and mass transfer, 2012, 39(8): 1045-1053.
- [4] ARUNACHALAM A P S, IDAPALAPATI S. Material removal analysis for compliant polishing tool using adaptive meshing technique and Archard wear model[J]. Wear, 2019, 418/419: 140-150.
- [5] HANDA K, IKEUCHI K, MORIMOTO F. Temperature-dependent wear of tread-braked railway wheels[J]. Wear, 2020, 452/453: 203265.
- [6] 蔡荣誉. 盘式制动器摩擦衬片的摩擦磨损性能研究与结构优化设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
CAI Rongyu. Friction and wear behaviors research and structural optimization design of disc brake pad[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [7] 尹家宝, 卢纯, 全鑫, 等. 列车制动块磨损行为动态演变数值分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 204-213.
YIN Jiabao, LU Chun, QUAN Xin, et al. Analysis of wear behavior dynamic evolution on railway brake pad[J]. Journal of mechanical engineering, 2021, 57(18): 204-213.
- [8] 董永刚, 仪帅, 黄鑫磊, 等. 列车紧急制动过程中踏面温度分布及磨耗预测[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4): 431-438.
DONG Yonggang, YI Shuai, HUANG Xinlei, et al. Temperature distribution of treads and wear prediction during train emergency braking[J]. China mechanical engineering, 2021, 32(4): 431-438.
- [9] 刘雨薇, 王叶, 付崇智, 等. AMT换挡滑块轴颈磨损的仿真分析与预测[J]. 机械传动, 2021, 45(10): 114-119.
LIU Yuwei, WANG Ye, FU Chongzhi, et al. Simulation analysis and prediction of wear for neck journal of shifting slider on AMT[J]. Journal of mechanical transmission, 2021, 45(10): 114-119.
- [10] 周素霞, 雷振宇, 秦震, 等. 基于 Archard 磨损理论的盘形制动修正指数优化[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(4): 129-138.
ZHOU Suxia, LEI Zhenyu, QIN Zhen, et al. Optimization of disc braking correction indexes based on Archard wear theory[J]. China railway science, 2022, 43(4): 129-138.
- [11] 赵长雨, 赵鑫, 王鹏, 等. 考虑研磨子—车轮和轮轨作用的城际动车组车轮磨耗预测[J]. 工程力学, 2023, 40(1): 229-237.
ZHAO Changyu, ZHAO Xin, WANG Peng, et al. Wear prediction of inter-city EMU wheels in consideration of tread trimmer-wheel and wheel-rail interactions[J]. Engineering mechanics, 2023, 40(1): 229-237.
- [12] 李亨利. 基于系统动力学的大轴重货车轮轨磨耗研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
LI Hengli. Research on wheel/rail wear of heavy haul freight car on vehicle system multibody dynamics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [13] 张丹, 张标, 徐鹏, 等. 基于 Archard 磨损模型的采煤机行走轮磨损特性研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(9): 211-215.
ZHANG Dan, ZHANG Biao, XU Peng, et al. Research on wear characteristics of shearer walking wheels based on

Archard wear model[J]. Coal technology, 2022, 41(9): 211-215.

[14] 赵锋. 提速重载列车合成闸瓦评价技术改进研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.

ZHAO Feng. Study on the improvement of evaluation technology of composite brake shoes in speed-raising and heavy-haul train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

[15] 潘炯, 杨欣. PEC7 型踏面制动单元闸瓦非正常磨耗及损伤的研究与分析[J]. 科技与创新, 2021(5): 151-152.

PAN Jiong, YANG Xin. Research and analysis on abnormal wear and damage of PEC7 tread brake unit shoe[J]. Science and technology & innovation, 2021(5): 151-152.

Simulation analysis and verification of brake shoe wear for urban rail vehicles

XUE Wensheng, ZHU Wenliang, YU Chaogang, SUN Ningyuan

(School of Urban Railway Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

Abstract: Frequent braking applications for speed regulation of urban rail vehicles cause repeated friction at elevated temperatures between the wheels and brake shoes, which accelerates brake shoe wear. This paper presents a study of wear patterns for brake shoes subjected to braking-induced temperature rise. For this purpose, a finite element model of the wheel and brake shoe friction pair and a simulation model to predicate brake shoe wear based on temperature changes were established. Additionally, the finite element software ABAQUS was used to implement the Archard model for calculating brake shoe wear in relation to temperature changes. Subsequent analysis investigated the wear patterns of brake shoes under three specific conditions: single emergency braking, single maximum electro-pneumatic service braking, and continuous braking. Finally, the rationality and correctness of the proposed simulation method were verified by comparing the results of brake shoe wear simulations with data from vehicle testing conducted on the real-world track. The results indicate that temperature changes cause variations in the properties of brake shoe materials. Under the single emergency braking condition, the prediction model considering temperature changes resulted in an increase in brake shoe wear of 43.8% compared to the prediction model without taking these changes into account. Under the single maximum electro-pneumatic service braking condition, the highest brake shoe wear was identified on trailers air braking force with priority supplement, which was recorded at 14.6×10^{-3} mm. Under the continuous braking condition, the predicted average wear rate of brake shoes was $0.28\text{ mm}/10^4\text{ km}$, which closely aligned with the wear rate of $0.27\text{ mm}/10^4\text{ km}$ measured on the test vehicle. The established prediction model for brake shoes offers a reference for further studying the wear patterns of brake shoes for urban rail vehicles.

Keywords: urban rail vehicles; brake shoe; braking-induced temperature rise; wear prediction; simulation mode; finite element