

时速 400 km+ 高速列车车轮踏面磨耗机理与影响研究

娄平¹, 胡明皓¹, 李永和^{1,2}

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 航天时代飞鸿技术有限公司, 北京 100094)

摘要: 为提升高速列车行车安全性并优化车轮镟修策略, 基于 Archard 磨耗理论构建车轮踏面磨耗迭代模型, 分析了运行速度、摩擦系数、运营里程对车轮踏面磨耗的影响规律, 并探究了车轮踏面磨耗对列车运行性能的影响机理。研究发现, 单次镟修周期内车轮踏面磨耗深度呈“M”型曲线, 且磨耗集中于滚动圆周边区域; 运行速度、运营里程增加及摩擦系数增加均使磨耗变化率显著提升, 磨耗区域宽度呈非线性扩大趋势。踏面磨耗对垂向平稳性与安全性影响较小, 但对名义等效锥度、轮轴横向力、脱轨系数及横向 Sperling 指标均随磨耗程度的增加而显著上升。研究成果为高速列车车轮镟修周期制定及安全运营提供了理论支撑。

关键词: 踏面磨耗; 高速列车; 运行速度; 摩擦系数; 运营里程

中图分类号: U238

文献标识码: A

Study on Wear Mechanism and Influencing Factors of Wheel Treads for High-speed Trains Exceeding 400 km/h

Lou Ping¹, Hu Minghao¹, Li Yonghe^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Feihong Technology Co., Ltd. of the Aerospace Era, Haidian, Beijing 100094, China)

Abstract: To improve the operational safety of high-speed trains and optimize the wheel reprofiling strategy, this paper constructs an iterative model for wheel tread wear based on Archard's wear theory, analyzes the influence patterns of operating speed, friction coefficient, and operation mileage on wear, and explores the influence mechanism of wheel tread wear on train operational performance. The study finds that the wear depth of the wheel tread presents an M-shaped curve within a reprofiling cycle, with wear concentrated in the area around the rolling circle. Increases in operating speed, operation mileage, and friction coefficient all significantly enhance the wear rate, and the width of the wear area shows a non-linear expansion trend. While tread wear has little impact on vertical stability and safety, the nominal equivalent conicity, wheel-axle lateral force, derailment coefficient, and lateral Sperling index all increase significantly with the degree of wear. The research results provide theoretical support for formulating wheel reprofiling cycles and ensuring the safe operation of high-speed trains.

Keywords: tread wear; high-speed train; operating speed; friction coefficient; operating mileage

收稿日期: 2025-06-09

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目 (L2021G002)

我国正在积极推进时速 400 km+ 高速铁路技术的发展。在轨道不平顺、车轮踏面与钢轨产生的摩擦等因素作用下, 高速列车车轮踏面磨耗随着列车速度、运营里程、轮轨间摩擦系数的增加而持续发展, 这将导致轮轨匹配关系恶化, 轮轨相互作用加剧, 大大增加高速列车运营维护成本。因此,

研究时速 400 km+高速列车车轮踏面磨耗机理与影响规律具有重要战略意义和工程实际价值。

车轮踏面磨耗的形成与发展以及影响因素一直受到国内外研究人员的关注。Silva 等^[1]基于实测车轮踏面磨耗进行动力学仿真研究了其对滚动接触疲劳的影响,并通过研究磨耗深度对相关动力学指标的影响规律,提出了该线路条件下的踏面临界磨耗深度。Yang 等^[2]基于所建立的精细化踏面磨耗预测模型,探讨了防滑控制器控制参数的变化对车轮踏面磨耗和接触疲劳的影响规律。Kou 等^[3]通过动力学仿真,研究了不同车轮踏面与钢轨磨耗程度条件下,轮轨匹配关系与轮轨磨耗速率的变化规律。Cui 等^[4]基于实测数据建立数值仿真模型,研究了不同车轮磨耗的演化对列车运行稳定性与曲线通过性能的影响规律。Wang^[5]等基于有限元磨耗理论建立数值模型,提出了一种车轮踏面磨耗的预测方法。董孝卿^[6]通过实测数据进行动力学仿真研究了车轮踏面镟修后与安全运营情况下的等效锥度推荐值,并基于等效锥度与车辆稳定性提出了一种基于遗传算法优化的高速列车车轮踏面型面。马晓川等^[7]基于数值仿真,研究了车辆在不同磨耗程度的 LMA 车轮踏面通过直线和曲线的动力学性能。李雪等^[8]基于多体动力学软件,通过动力学仿真研究了不同摩擦系数和车轮踏面磨耗对低地板轻轨动力学响应的影响规律。干锋等^[9]采用数值仿真计算数据,基于多种不同算法分别计算了 4 种典型踏面的等效锥度,并比较了不同算法针对不同踏面计算的优劣性。张波等^[10]研究了重载列车在干燥与低黏着接触条件下,车轮多边形磨耗对于车轮踏面磨耗的影响规律。方鑫等^[11]通过数值模拟,以镟修周期为控制变量对比多种算法,提出了一种精度较高的机车车轮踏面磨耗量预测算法。杨陈等^[12]通过试验数据和数值模拟研究了车轮踏面凹形磨耗的特点,提出了镟修周期内车轮型面磨耗特征和轮轨接触关系的演变规律。牛江等^[13]基于实测数据和数值仿真,对比了赫兹与半赫兹接触算法在轮轨磨耗仿真过程中的差异。可见,针对车轮踏面磨耗,国内外学者基于试验与数值模拟等方法研究车轮踏面磨耗的形成与影响,但研究大多局限于时速 300~350 km 及以下,而针对时速 400 km+高速列车车轮踏面磨耗形成与影响的研究较少。

鉴于此,论文以时速 400 km+高速列车车轮踏面磨耗为研究对象,首先建立并验证高速列车轮轨磨耗计算模型,继而结合 Archard 磨耗理论与 Kik-Piotrowski 轮轨接触算法,以运营里程为车轮踏面迭代控制变量,针对性计算不同运行速度、摩擦系数下的车轮踏面磨耗的形成与发展情况,重点探究时速 400 km+运行条件下磨耗的形成与影响规律,系统分析运行速度、运营里程、摩擦系数对磨耗的作用机制;同时,以等效锥度、横向与垂向 Sperling 指标等多维度控制指标,量化评判磨耗对行车稳定性与安全性的影响,最终为该时速等级高速列车的安全运营提供理论支撑。

1 数值模型建立与验证

1.1 车-轨系统动力学模型建立

论文采用运行时速可达 400 km 的国内某型动车组,基于多体动力学软件建立车辆多刚体模型,包含 1 个车体,2 个转向架,4 个轮对,8 个轴箱。车体、转向架、轮对、轴箱均为刚体,其中车体、转向架以及轮对均为 6 自由度系统,而轴箱仅考虑其点头自由度,故整个车辆系统共具有 50 个自由度。其中构架模型采用根据具体动车组构架结构,在有限元软件 ABAQUS 中建立三维实体模型后导入多体动力学软件的方式建立。一系悬挂与二系悬挂中,弹簧采用黏弹性线性力元模拟,悬挂系统中的横向减震器、垂向减震器与蛇形减震器均采用双极性力元(Bipolar forces)模拟,车轮踏面

采用 LMB 踏面。建立的转向架及车辆动力模型示意图如图 1~图 2 所示，车辆动力模型具体参数如表 1 所示。采用 CRTSIII 型板式无砟轨道结构，钢轨采用 CHN60 标准型面与车轮踏面进行匹配，扣件采用考虑两向线性刚度和阻尼的等效力元进行模拟。轨下的支承结构采用精细化建模的模式，在 ABAQUS 中根据实际结构尺寸与材料参数，运用实体单元分层建立了承轨台、轨道板、自密实混凝土层、底座板，各层之间采用绑定约束，路基采用考虑两向线性刚度和阻尼的等效力元模拟，建模完成后导入多体动力学软件。

轨道线形与轨道不平顺也是车轮踏面磨耗产生的重要影响因素。对于轨道线形，考虑到高速铁路主要在直线段运行，也为了定量研究列车运行相关参数对车轮踏面磨耗形成的影响，论文将轨道线路条件均设定为直线段。而对于轨道不平顺，论文采用中国高速铁路轨道谱叠加短波不平顺的方式施加轨向和高低的轨道不平顺^[14]，长度取为 1 000 m。

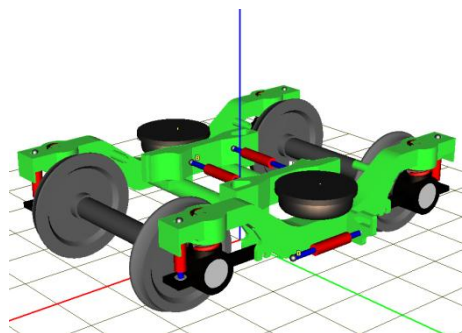


图 1 转向架实体模型示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Bogie Solid Model

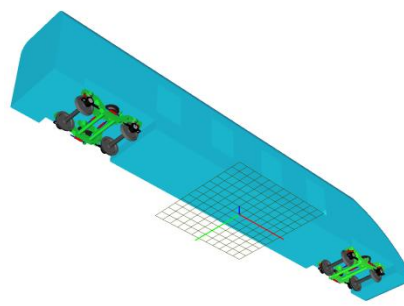


图 2 整车模型示意图

Fig.2 Schematic Diagram of Vehicle model

表 1 国内某型动车组模型参数

Tab.1 Parameters of a Certain Domestic EMU Model

参数名称	数值
车体质量/kg	34 976
转向架质量/kg	2 439
轮对质量/kg	1 560
轴箱质量/kg	50
车辆定距/m	17.8
轴距/m	2.5
踏面类型	LMB 踏面

1.2 Archard 磨耗理论

Archard 基于相关磨耗实验提出了车轮踏面磨耗的理论计算模型^[15]，目前国内外研究中，车轮磨耗相关仿真计算也大量采用 Archard 模型，论文采用其中基于磨耗系数图谱的材料磨损体积计算公式^[16]建立仿真模型进行踏面磨耗计算，相关计算公式为

$$V_{\text{wear}} = k_w \frac{Nd}{H} \quad (1)$$

式中： V_{wear} 为材料磨损体积， m^3 ； k_w 为材料磨损常数； N 为接触面法向力， N ； d 为接触面处相对滑动距离， m ； H 为接触面处硬度最低材料的硬度， MPa 。

由文献[16]可知，材料磨损常数 k_w 的取值一般可参考由图 3 所示的材料磨损常数图谱，由相关轮轨匹配关系中接触应力与相对滑动速度的取值确定。

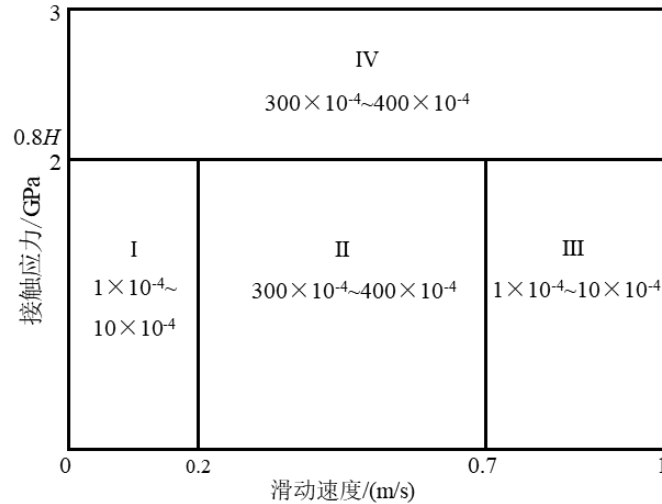


图 3 材料磨损常数图谱

Fig.3 Wear coefficient map for Archard's model

1.3 模型验证

论文基于前文建立的磨损模型与相关磨损理论，对车轮踏面开展磨损仿真研究，现有文献^[17]表明，车轮磨损以踏面磨损为主，一般无明显轮缘接触。一般车轮一次镟修周期为运营里程 200 000 km，故论文采用最大磨损里程策略，车轮踏面磨损流程如图 4 所示，每个分析步里程为 10 000 km，每 4 个分析步即每 40 000 km 输出一组磨损结果进行迭代，同时在一个更新迭代步骤中，假设踏面保持不变，总运营里程取为 200 000 km，且在磨损过程中，假设钢轨型面不产生任何磨损，即在轮轨瞬时接触中假定各项轮轨接触指标为定值。总共输出 5 个车轮踏面信息。

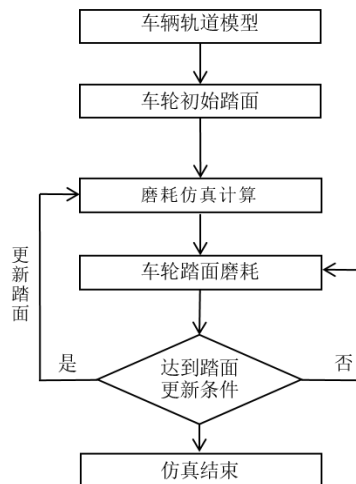


图 4 车轮踏面磨损流程图

Fig.4 Wear simulation process

为了验证所建立的车轮踏面磨耗仿真模型的有效性与正确性，基于所建立的车轮踏面磨耗迭代模型，取摩擦系数为 0.3，取运行速度为 300 km/h，进行踏面磨耗仿真。在计算踏面磨耗深度时，由于输出的踏面坐标数据具有离散性，故先将运行 200 000 km 后的车轮踏面磨耗坐标数据通过 MATLAB 进行平滑处理之后，再经过计算得到对应踏面坐标处的磨耗深度，仿真计算结果如图 5 所示。将计算结果与文献^[18]中的线路实际运行 200 000 km 后的实测磨耗结果进行对比以进行模型验证。

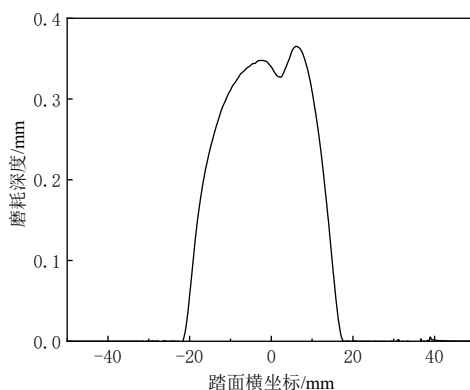


图 5 车轮踏面磨耗结果

Fig.5 Wear simulation results

由图 5 可知，以运行 200 000 km 后车轮踏面磨耗深度曲线为研究对象，车轮踏面特定区域内均存在不同程度的磨耗，车轮踏面磨耗深度曲线总体呈 M 型。最大磨耗深度为 0.365 mm，与文献^[18]实测结果（0.4 mm 左右）接近。最大磨耗深度位置（踏面横坐标 6.2 mm 处）位于轮缘附近，且磨耗宽度主要分布在 -21.6~17.5 mm 之间，与文献^[18]运行 200 000 km 后实测结果（约 -20~20 mm）较为接近，相较于文献^[18]仿真结果（-30~26 mm）略有减小，仿真结果的差异可能是由模型部分参数取值以及施加的初始不平顺存在差异导致。计算所得的最大磨耗深度与文献^[18]实测值误差为 8.8%，磨耗宽度值（39.1 mm）也与文献^[18]仿真值（40 mm）十分接近，磨耗曲线抛物线形态也与文献^[18]实测结果较为接近。因此可以认为论文建立的磨耗模型是正确的，可以用来开展车轮踏面磨耗研究。

2 高速列车车轮踏面磨耗形成与影响规律研究

利用前文所建立的车轮踏面磨耗仿真模型，考虑轮轨间摩擦系数不变、列车速度不同，以及列车速度不变、轮轨间摩擦系数不同等各种工况，探究在各种工况下高速列车随着运营里程增加车轮踏面磨耗的形成与发展规律。

2.1 列车运行速度对车轮踏面磨耗的影响

取摩擦系数为 0.3，速度区间为 300~500 km/h，步长为 50 km/h 的五种列车运行速度，开展车轮踏面磨耗仿真计算。得到不同列车运行速度下随运营里程积累产生的车轮踏面磨耗深度曲线如图 6、图 7 所示。

由图 6(a)~图 6(e)可知，在不同运行速度下，车轮踏面都会发生一定程度的踏面磨耗，且车轮踏面磨耗深度曲线均呈现 M 形。磨耗主要集中于一定范围内，分布在车轮滚动圆周围，同时五种速度工况下，磨耗深度峰值均位于横坐标 5.7~6.2 mm 之间。且随着运营里程与运行速度的增加，车轮踏

面磨耗在深度和宽度上均有所增加。

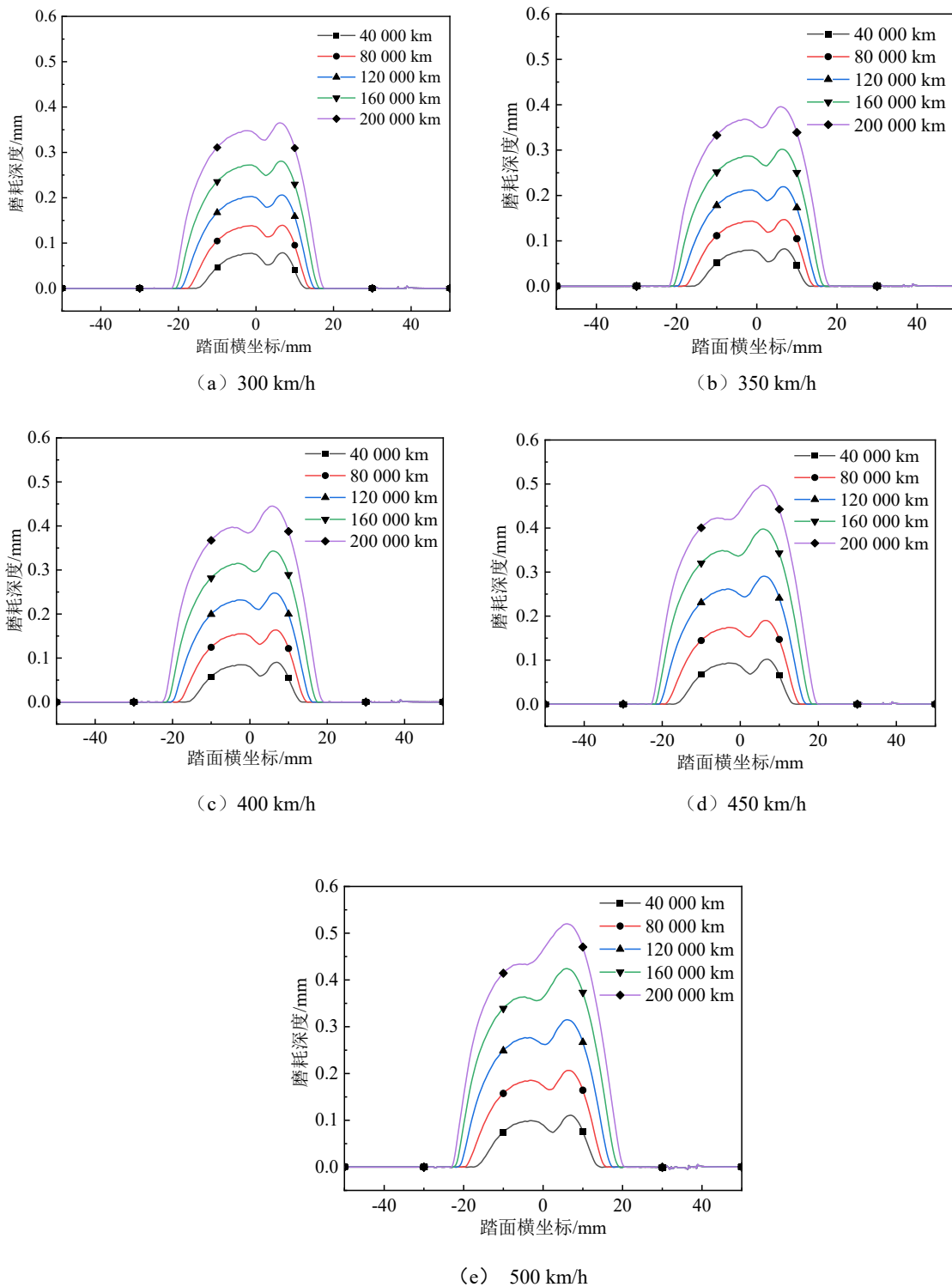
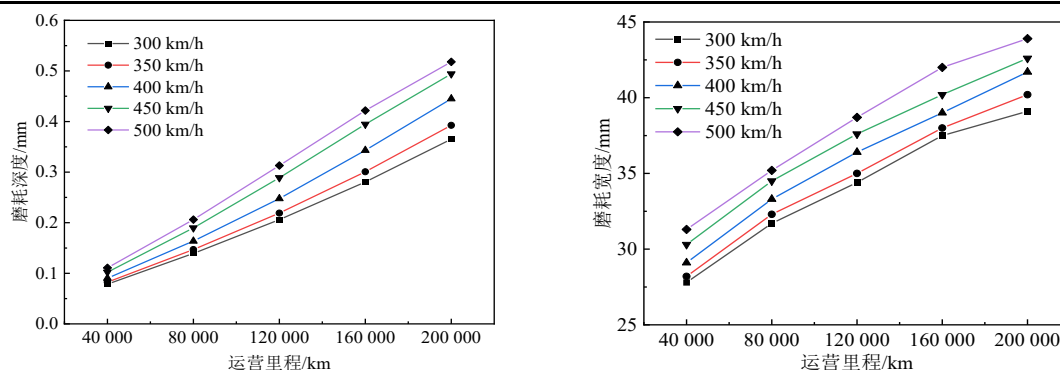


图6 不同速度下车轮踏面磨耗深度图

Fig.6 Tread wear depth at different speeds



(a) 不同速度下车轮踏面最大磨耗深度随里程变化 (b) 不同速度下车轮踏面磨耗宽度随里程变化

图 7 不同速度下车轮踏面最大磨耗深度和磨耗宽度随里程变化

Fig.7 Maximum wear depth and width of wheel tread vary with mileage at different speeds

由图 7 (a) 可知, 随着运营里程的增加, 车轮踏面磨耗深度随之接近线性增大; 而在运营里程均为 200 000 km 时, 取一个分析步的长度 (10^4 km) 为基准, 五种运行速度下对应的最大车轮踏面磨耗变化率由 $0.0018 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$ 增加至 $0.0027 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$, 增幅近 50%, 当列车速度由 350 km/h 提速至 400 km/h 和 450 km/h 时, 磨耗深度的增长率均出现了较大的提高, 这可能是当前工况对应的车轮踏面在提速过程中轮轨接触关系迅速恶化所造成的, 可见车轮踏面磨耗随着高速列车运行速度的提高将持续加剧。

由图 7 (b) 可知, 随着运营里程的增加, 相同运行速度下的车轮踏面磨耗宽度随之呈现相应的非线性增加趋势, 且磨耗宽度随里程增长率逐渐降低; 结合图 6 可知踏面磨耗呈现出集中于车轮滚动圆内的特征; 且随着运营里程增加, 磨耗宽度同时向车轮踏面坐标零点的两侧扩展, 与文献^[13]获得的规律类似; 同时可以发现, 取运营里程 200 000 km 对应的磨耗宽度为研究对象, 在相同运营里程下, 随着列车运行速度的增加, 五种速度对应下的磨耗宽度随着运行速度的增加呈现出较为平缓的线性增长趋势, 其增长率分别为 2.8%、3.7%、2.2%、3.1%。可见随着列车运行速度的增加, 轮轨接触应力也随之增大, 同时蛇行运动的幅值与频率加剧, 轮轨接触面积增大, 使得车轮踏面磨耗向纵向和横向即深度与宽度两个方向扩展。

2.2 轮轨间摩擦系数对于车轮踏面磨耗的影响

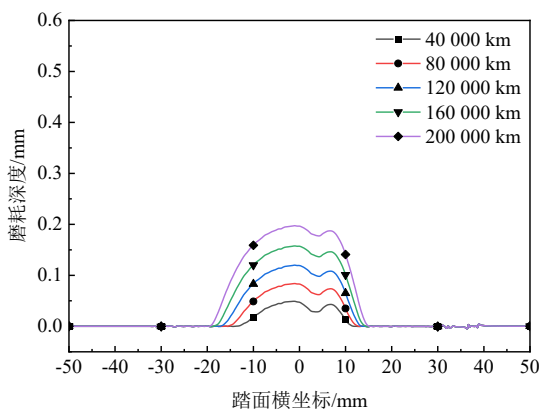
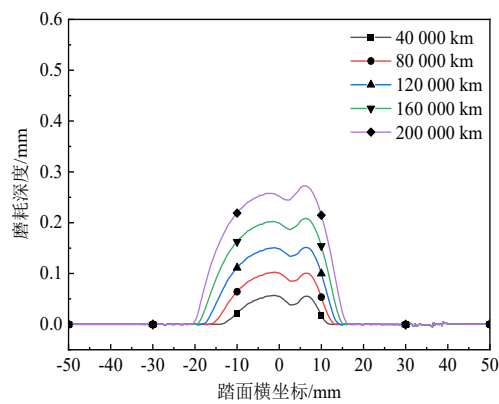
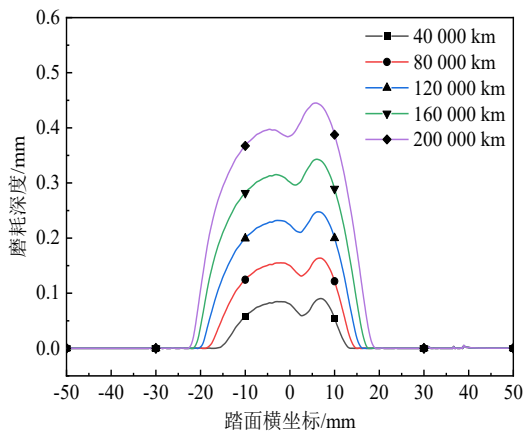
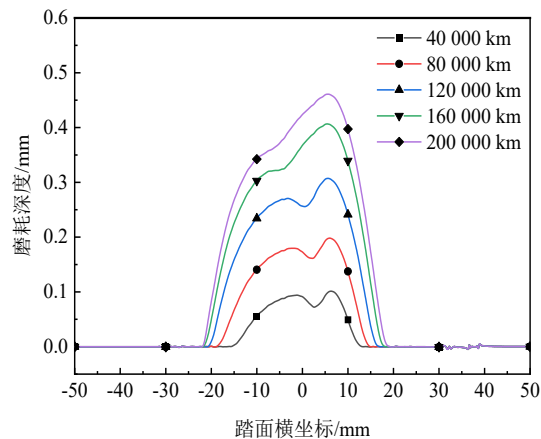
一般情况下, 轮轨间摩擦系数(μ)取值为 0.30~0.50, 但受到雨雪天气或者潮湿环境中钢轨表面氧化作用都会显著降低摩擦系数, 一般可降至 0.10~0.25, 故本节选取列车运行速度为 400 km/h, 在 $\mu=0.1\sim0.5$ 区间以 0.1 为步长的 5 个工况进行车轮踏面磨耗计算。计算得到车轮踏面磨耗深度与宽度随轮轨间摩擦系数、运营里程的变化曲线如图 8、图 9 所示。

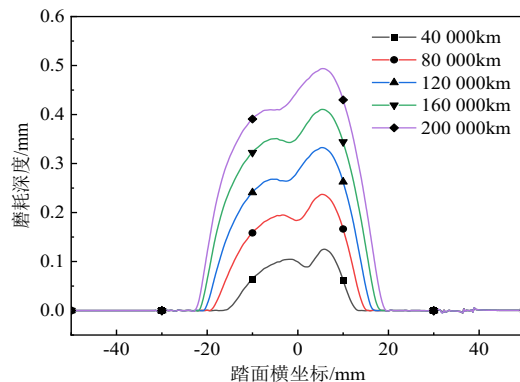
由图 8 (a)~图 8 (e) 可知, 在不同轮轨间摩擦系数的影响下, 车轮踏面都会发生一定的踏面磨耗, 五种摩擦系数工况下的磨耗深度曲线类似, 均呈现 M 型, 且区域集中于车轮滚动圆附近, 随着运营里程的增加, 车轮踏面磨耗在深度和宽度上都有所增加, 但随着摩擦系数的增加, 磨耗深度峰值的横坐标逐渐由 -1 mm 转移至 5.5 mm 附近。

同时结合图 9 (e) 可知, 在摩擦系数较低时, 磨耗深度随里程的变化率呈增加趋势, 在摩擦系

数较高时则呈降低趋势，与文献[13]中车轮踏面磨耗的发展规律类似；而在运营里程为 200 000 km 时，取一个分析步的长度（104 km）为基准，五种摩擦系数下对应的最大车轮踏面磨耗变化率由 $0.01 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$ 增加至 $0.025 \text{ mm}/10^4 \text{ km}$ ，增幅近 150%，且当摩擦系数由 0.2 提升至 0.3 以上时，车轮踏面磨耗变化率出现较大增长，这可能是随着摩擦系数的增加，轮轨接触关系急剧恶化导致的。

由图 9(b)可知，相同摩擦系数下，随着运营里程的增加，五种摩擦系数工况下的车轮磨耗宽度也随之增大，二者基本呈现一定的非线性关系；在相同里程下，随着摩擦系数的增加，磨耗宽度总体也呈增大趋势，以运行 200 000 km 对应的磨耗宽度为例，摩擦系数为 0.5 时的磨耗宽度相较摩擦系数为 0.1 时增大了 23%。值得注意的是，当摩擦系数为 0.4，里程处于 160 000 km 至 200 000 km 间时，磨耗宽度的增长率出现了随里程大幅降低的现象，这可能是该工况下运行过程中的轮对等效锥度增加，恢复对中的能力较强使磨耗向宽度方向扩展减弱造成的。

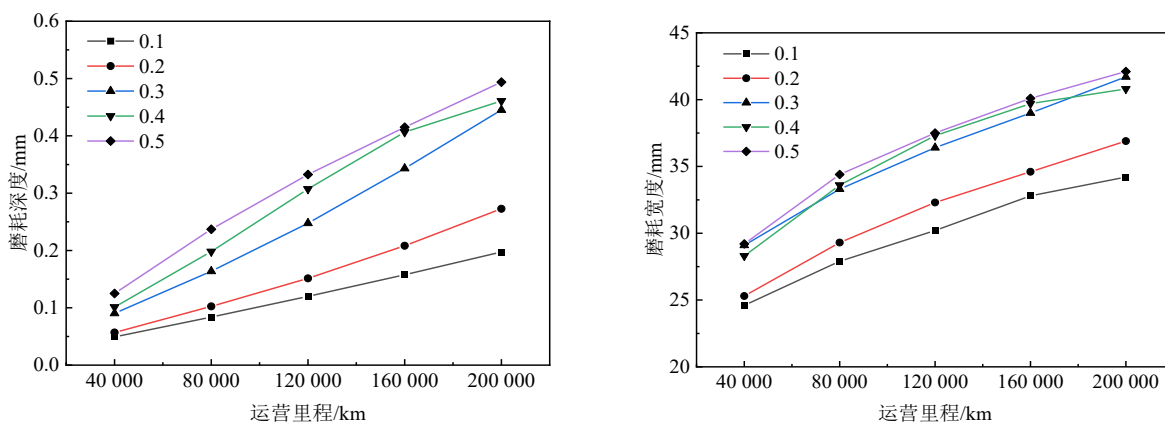
(a) $\mu=0.1$ (b) $\mu=0.2$ (c) $\mu=0.3$ (d) $\mu=0.4$



(e) $\mu=0.5$

图 8 轮轨间不同摩擦系数下车轮踏面磨耗深度

Fig.8 Depth of wheel tread wear under different friction coefficients between wheel and rail



(a) 轮轨间不同摩擦系数下车轮踏面最大磨耗深度随里程变化

(b) 轮轨间不同摩擦系数下车轮踏面磨耗宽度随里程变化

图 9 轮轨间不同摩擦系数下车轮踏面最大磨耗深度和磨耗宽度随里程变化

Fig.9 Maximum wear depth and width of wheel tread under different friction coefficients between wheel and rail vary with mileage

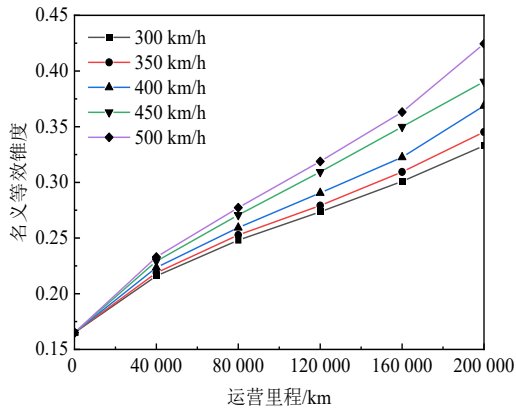
2.3 运营里程、运行速度及摩擦系数对等效锥度的影响规律

轮轨匹配等效锥度对于列车行车的平稳性与安全性有着直接的影响，等效锥度过小将导致动车组运用过程中出现晃车现象，还可能导致车体产生一次蛇形失稳，等效锥度过大则将引起列车构架产生二次蛇形失稳，甚至造成动车组车辆构架横向振动报警^[19-22]，因此可以将等效锥度作为衡量列车行车平稳性与安全性的重要指标。故有必要分析运营里程、运行速度及摩擦系数对等效锥度的影响规律，以研究车轮磨耗后轮轨匹配的等效锥度随列车不同运行工况的变化规律。

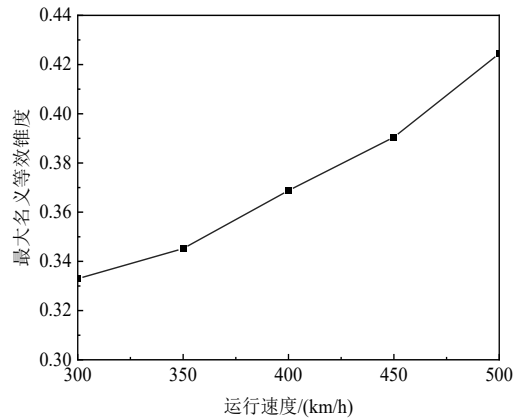
由既有研究^[6]可知，当 LMB 型车轮踏面与 CHN60N 型钢轨相匹配时，在良好的轮轨匹配状态下，等效锥度的限值应不超过 0.4。计算时一般选取《等效锥度计算方法规范》（UIC519）提出的轮对横移量 3 mm 处的等效锥度作为该轮轨匹配关系下的名义等效锥度^[23]，采用准线性化的 Klingel 简化等效锥度算法^[24]计算不同工况下车轮踏面的名义等效锥度，得到各个工况下轮轨匹配等效锥度

随速度、摩擦系数与运营里程变化曲线如图 10 所示。

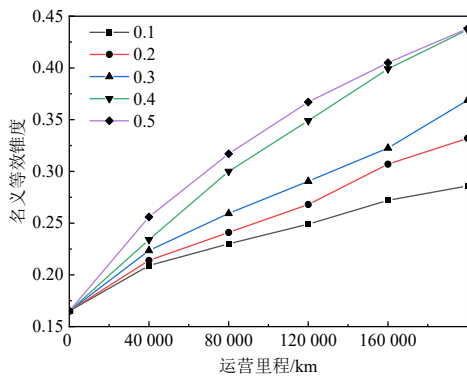
由图 10(a)、图 10(b)可知，列车运行速度和运营里程的增加均会导致车轮踏面名义等效锥度的增加，并且各个速度工况下，名义等效锥度的增长速度随着运行速度和运营里程的增加而加快。取运行速度为 400 km/h 时为例，名义等效锥度随着运营里程由 0 到 200 000 km 增加了 1.39 倍，可见随着运行速度和运营里程的增加，轮轨匹配状态急速恶化。值得注意的是，在运行速度 450 km/h 与 500 km/h 条件下运营 200 000 km 后，名义等效锥度均达到 0.4，已经超出了轮轨匹配良好的限值，可见随着列车运行速度的提高，车轮的镟修周期应该缩短至 200 000 km 以内。



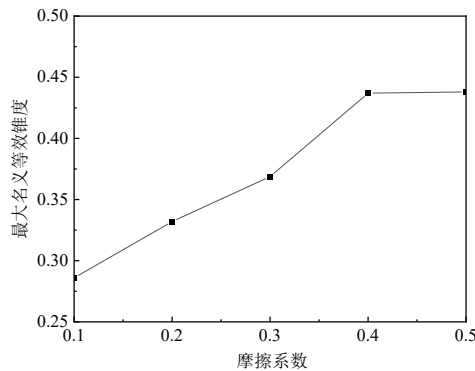
(a) 不同速度与运营里程下踏面名义等效锥度



(b) 200 000 km 最大名义等效锥度随速度变化



(c) 不同摩擦系数与运营里程下名义等效锥度



(d) 200 000 km 最大名义等效锥度随摩擦系数变化

图 10 不同速度及不同摩擦系数下车轮踏面最大名义等效锥度图

Fig.10 Maximum nominal equivalent conicity of wheel tread at different speeds and friction coefficients

由图 10 (c)、图 10 (d) 可知，轮轨间摩擦系数的增加会导致车轮踏面名义等效锥度总体上的增加，二者呈现一定的非线性关系，取摩擦系数为 0.5 时为例，名义等效锥度随着运营里程由 0 到 200 000 km 增加了 1.65 倍，可见随着摩擦系数的提高，轮轨匹配状态急速恶化，加剧轮轨相互作用。值得注意的是，在摩擦系数 0.4 与 0.5 条件下运行 200 000 km 后的工况下的名义等效锥度均超过了推荐限值 0.4，且这两种条件下十分接近，这可能是等效锥度增加后，轮对回中能力有所增强，踏面磨损后期向宽度方向发展能力减弱导致的。可见应该重视对钢轨表面的养护，控制轮轨摩擦系数数值有利于改善车轮踏面磨损。

3 车轮踏面磨耗对高速列车动力性能的影响

根据前述分析, 车轮踏面在高速列车运行过程中, 随着运行速度、摩擦系数的变化以及运营里程的积累, 会产生不同程度的磨耗, 这将导致轮轨匹配关系恶化, 必然对列车的运行平稳性以及安全性产生负面影响。因此迫切需要开展车轮踏面磨耗对于高速列车行车平稳性与安全性的影响的研究。本节选取摩擦系数为 0.3, 车速为 400 km/h 的典型工况, 研究车轮踏面磨耗对高速列车垂向、横向稳定性指标 (Sperling 指标)、轮轴横向力、轮轨垂向力、脱轨系数等行车平稳性与安全性的影响。需要说明的是, 第 2 节已研究了高速列车运营里程与车轮踏面磨耗的关系, 此节图形中横坐标用的是运营里程。

3.1 车轮踏面磨耗对高速列车行车平稳性的影响

Sperling 指标是一项评判列车运行平稳舒适性的重要标准, 其计算公式为

$$W = 7.08 \left[\frac{A^3}{f} F(f) \right]^{0.1} \quad (2)$$

式中: A 为车体振动加速度, g ; f 为振动频率, Hz; $F(f)$ 为频率修正系数^[25], 其取值如下表 2 所示。

表 2 我国高速列车平稳性指标频率修正系数表

Tab.2 Frequency correction coefficient table for the Sperling index in China

垂向振动		横向振动	
0.5~5.9 Hz	$F(f) = 0.325f^2$	0.5~5.4 Hz	$F(f) = 0.8f^2$
5.9~20.0 Hz	$F(f) = 400/f^2$	5.4~26.0 Hz	$F(f) = 650/f^2$
>20.0 Hz	$F(f) = 1$	>26.0 Hz	$F(f) = 1$

计算获得的车体垂向、横向 Sperling 指标随列车运营里程变化曲线如图 11、图 12 所示。

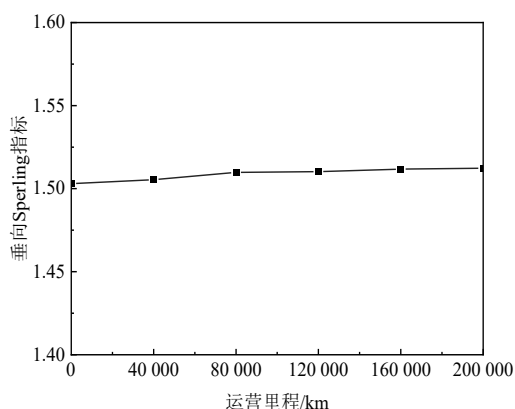


图 11 垂向 Sperling 指标变化

Fig.11 Vertical Sperling index variation

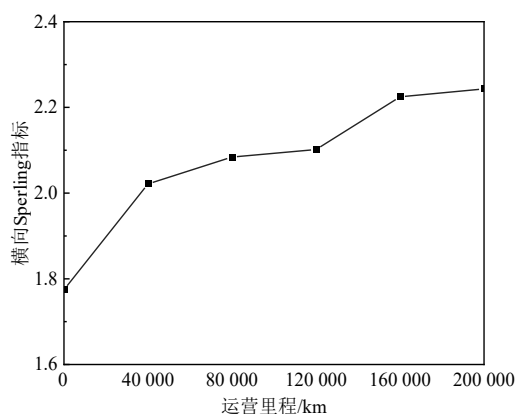


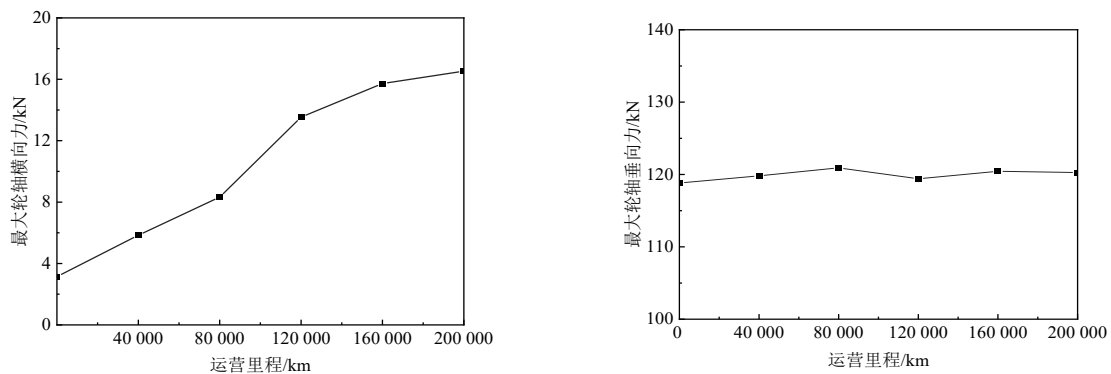
图 12 横向 Sperling 指标变化

Fig.12 Lateral Sperling index variation

由图 11 与图 12 可知, 随着列车运营里程的增加, Sperling 指标一直处于 1.50~1.51 之间, 且远小于规范^[25]中列车平稳性限值 2.5, 可见随着运营里程的增加, 车轮踏面磨耗对于列车垂向运行平稳性的影响相对较小; 而横向 Sperling 指标随着运营里程的增加则逐渐增大, 当运营里程达到 200 000 km 时, 相较于初始状态的车轮踏面, 横向 Sperling 指标增大了 26%, 且逐渐接近规范限值, 故可见随着运营里程的增加, 车轮踏面磨耗对于列车的横向平稳性具有较大的影响。

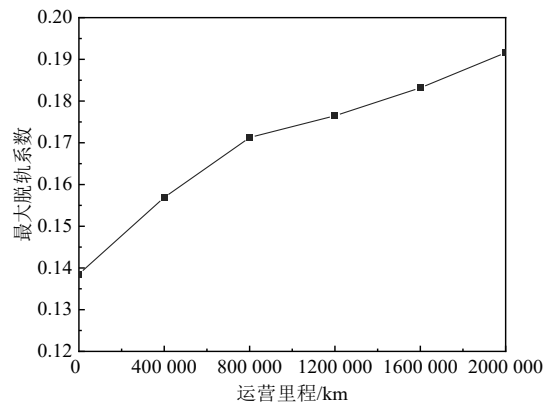
3.2 车轮踏面磨耗对高速列车行车安全性的影响

计算获得的列车最大轮轴横向力、最大轮轨垂向力及最大脱轨系数随列车运营里程变化曲线如图 13 所示。



(a) 轮轴横向力最大值随运营里程变化

(b) 轮轨垂向力最大值随运营里程变化



(c) 脱轨系数最大值随运营里程变化

图 13 不同运营里程下列车运行安全性指标最大值

Fig.13 Maximum value of train operation safety index under different operating mileage

由图 13(a)、图 13(b)可知, 列车最大轮轴横向力随着运营里程的增加和磨耗的开展逐渐增大, 当运营里程达到 200 000 km 时, 相较于初始状态的最大轮轴横向力增大了 4.26 倍, 这可能是随着车轮踏面磨耗的发展, 轮轨匹配关系恶化导致车轮在运行过程中产生横向移动导致的, 由此可见车轮踏面磨耗对于高速列车的横向行车安全性具有显著影响; 而不同运营里程的最大轮轨垂向力基本在 118~120 kN 范围内波动, 且均小于规范限值 170 kN^[26], 由此可见车轮踏面磨耗对于列车的垂向行车安全性几乎没有影响。

由图 13(c)可知, 列车脱轨系数随着运营里程的增加和磨耗的发展逐渐增大, 当运营里程达到

200 000 km 时, 相较于初始状态的列车的最大脱轨系数增加了 0.38 倍, 结合图 13(a)、图 13(b), 可见主要是随着运营里程的增加, 列车产生横向振动使轮轴横向力增大, 从而导致脱轨系数增加。

4 结论

论文以 Archard 磨损理论为基础, 利用有限元软件 ABAQUS 与多体动力学软件共同构建了高速列车车轮踏面磨损迭代模型, 探究了时速 400 km+运行条件下, 运行速度、运营里程以及摩擦系数对车轮踏面磨损产生与发展的影响, 分析了不同条件下磨损踏面等效锥度变化规律, 同时探究了时速 400 km+运行条件下车轮踏面磨损对高速列车运行平稳性和安全性的影响规律。主要结论如下:

1) 论文所建立的车轮踏面磨损模型计算所得的最大磨损深度与文献实测值误差为 8.8%, 磨损宽度分布区域位于 -21.6~17.5 mm 之间, 与文献^[18]运行 200 000 km 后实测结果 (约 -20.0~20.0 mm) 较为接近, 磨损宽度值 (39.1 mm) 也与文献实测值 (40.0 mm) 十分接近, 可见所建模型是正确且合理的。

2) 在高速列车运营里程 200 000 km 内, 不同运行速度工况与摩擦系数工况下, 每个迭代步中车轮踏面磨损深度曲线总体呈 M 型, 磨损主要集中于一定范围内, 分布在车轮滚动圆周围, 同时五种速度工况下, 磨损深度峰值均位于横坐标 5.7~6.2 mm 之间。

3) 随着运行速度的增加, 列车运营里程达到 200 000 km 时, 车轮踏面磨损速率增加近 50%。磨损区域宽度随里程增长速率逐渐降低, 而随速度的增加呈现缓慢的线性增加; 随着摩擦系数的增加, 列车运营里程达到 200 000 km 时, 5 种摩擦系数工况对应的最大车轮踏面磨损速率由增加近 150%, 磨损深度峰值坐标逐渐由 -1.0 mm 转移至 5.5 mm 附近, 磨损宽度总体随摩擦系数的增加而增大。

4) 车轮踏面磨损对列车垂向运行平稳性与安全性的影响相对较小。然而对列车横向运行平稳性与安全性的影响则较为显著, 当列车运行里程达到 200 000 km 时, 相较于初始状态的轮对踏面, 轮轴横向力增幅达到 4.26 倍, 脱轨系数增长了 0.38 倍, 而横向 Sperling 指标则增大至初始踏面的 1.26 倍。

参考文献:

- [1] Silva e Silva J V R, Antonioli F A, Endlich C S, et al. Influence of wheel tread wear on Rolling Contact Fatigue and on the dynamics of railway vehicles [J]. *Wear*, 2023, 523: 204735.
- [2] Yang Yunfan, Ling Liang, Wang Jiacheng, et al. A numerical study on tread wear and fatigue damage of railway wheels subjected to anti-slip control [J]. *Friction*, 2023, 11 (8): 1470-1492.
- [3] Kou Jie, Zhang Jimin, Zhou Hechao, et al. Effect of the worn status of wheel/rail profiles on wheel wear over curved tracks[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(3): 945-954.
- [4] Cui Dabin, Li Li, Wang Hengyu, et al. High-speed EMU wheel re-profiling threshold for complex wear forms from dynamics viewpoint [J]. *Wear*, 2015, 338/339: 307-315.
- [5] Wang Xueping, Zhang Jun, Zuo Jianyong. Wheel tread wear prediction of high-speed railway train [J]. *Tribology Letters*, 2022, 70 (2): 62.
- [6] 董孝卿. 动车组车轮型面及等效锥度研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.

- Dong Xiaoqing. The research on EMU wheel profile and equivalent conicity [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [7] 马晓川, 王平, 徐井芒, 等. 基于 LMA 型面磨耗车轮与 60N 钢轨匹配的高铁车辆动力学性能分析 [J]. 中国铁道科学, 2018, 39 (1): 93-99.
- Ma Xiaochuan, Wang Ping, Xu Jingmang, et al. Dynamic performance analysis of high speed vehicle based on LMA worn wheel matching with 60N rail [J]. China Railway Science, 2018, 39 (1): 93-99.
- [8] 李雪, 王粤欣, 王开云. 轮轨摩擦系数对低地板轻轨动力响应及车轮磨耗的影响 [J]. 交通信息与安全, 2024, 42 (1): 41-48.
- Li Xue, Wang Yuexin, Wang Kaiyun. Influences of wheel rail friction coefficient on the dynamic response and wheel wear of low floor light rail [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42 (1): 41-48.
- [9] 干锋, 戴焕云, 高浩, 等. 铁道车辆不同踏面等效锥度和轮轨接触关系计算 [J]. 铁道学报, 2013, 35 (9): 19-24.
- Gan Feng, Dai Huanyun, Gao Hao, et al. Calculation of equivalent conicity and wheel-rail contact relationship of different railway vehicle treads [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35 (9): 19-24.
- [10] 张波, 杨云帆, 凌亮, 等. 车轮多边形对重载机车轮轨相互作用及接触损伤的影响分析 [J]. 西南交通大学学报, 2023, 58 (6): 1339-1346.
- Zhang Bo, Yang Yunfan, Ling Liang, et al. Wheel-rail interaction and rolling fatigue damage of heavy-haul locomotive subjected to wheel polygonal wear [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58 (6): 1339-1346.
- [11] 方鑫, 刘通, 程亚萍, 等. 基于 GA-岭回归分析的机车车轮踏面磨耗量预测算法研究 [J]. 机车电传动, 2023 (6): 71-78.
- Fang Xin, Liu Tong, Cheng Yaping, et al. Research on the prediction algorithm of tread wear for locomotive wheels based on GA-ridge regression analysis [J]. Electric Drive for Locomotives, 2023 (6): 71-78.
- [12] 杨陈, 贾小平, 李龙涛, 等. 动车组车轮踏面凹形磨耗发展规律及其对车辆稳定性的影响 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (12): 257-262.
- Yang Chen, Jia Xiaoping, Li Longtao, et al. Development law of EMU wheel tread concave wear and its influence on vehicle stability [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25 (12): 257-262.
- [13] 牛江, 池茂儒, 李大柱, 等. 基于半赫兹接触的车轮磨耗预测分析 [J]. 中国机械工程, 2023, 34 (7): 859-865, 874.
- Niu Jiang, Chi Maoru, Li Dazhu, et al. Predictive analysis of wheel wear based on semi-hertzian contact [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34 (7): 859-865, 874.
- [14] 雷晓燕. 高速铁路轨道动力学: 模型、算法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.

- Lei Xiaoyan. High speed railway track dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [15] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24 (8) : 981-988.
- [16] Jendel T. Prediction of wheel profile wear: comparisons with field measurements [J]. Wear, 2002, 253 (1/2) : 89-99.
- [17] 成棣, 郭志强, 胡晓依, 等. 基于多参数随机变化的高速动车组动力学指标分布研究 [J]. 中国铁道科学, 2024, 45 (5) : 158-167.
Cheng Di, Guo Zhiqiang, Hu Xiaoyi, et al. Study on the distribution of high-speed EMU dynamics indexes based on multi-parameter stochastic variation [J]. China Railway Science, 2024, 45 (5) : 158-167.
- [18] 包蕙馨. 动车组车轮磨耗预测及其对动力学性能影响研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
Bao Huixin. Research on wheel wear prediction of EMU and its impact on dynamic performance [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [19] 吴宁, 董孝卿, 林凤涛, 等. 等效锥度的计算及验证 [J]. 铁道机车车辆, 2013, 33 (1) : 49-52.
Wu Ning, Dong Xiaoqing, Lin Fengtao, et al. Computation and evaluation of equivalent conicity [J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33 (1) : 49-52.
- [20] 董孝卿, 王悦明, 倪纯双, 等. 京津城际铁路动车组车轮运用情况深入研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院机车车辆研究所, 2010: 2-30.
Dong X Q, Wang Y M, Ni C S, et al. In-depth study on the operation of EMU wheels on Beijing-Tianjin intercity railway: [R]. Beijing, China: China Academy of Railway Sciences Institute of Locomotive and Rolling Stock.
- [21] 康熊, 董孝卿, 王悦明, 等. 车轮外形磨耗及动车组振动状态跟踪研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院机车车辆研究所, 2011: 5-22.
KANG X, DONG X Q, WANG Y M, et al. Research on Wheel Profile Wear and EMU Vibration State Tracking [R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Institute of Locomotive and Rolling Stock, 2011: 5-22.
- [22] 孙建锋, 郝光, 池茂儒, 等. 针对高速车辆线性稳定性的等效锥度运用限值确定方法 [J]. 中国铁道科学, 2024, 45 (5) : 168-178.
Sun Jianfeng, Hao Guang, Chi Maoru, et al. Determination method of application limits of the equivalent conicity for high-speed railway vehicles aiming at linear stability [J]. China Railway Science, 2024, 45 (5) : 168-178.
- [23] 肖乾, 徐中旭. 基于改进模糊层次分析法的高速列车轮轨等效锥度优化方案评价研究 [J]. 华东交通大学学报, 2024, 41 (6) : 90-98.
Xiao Qian, Xu Zhongxu. Research on optimization scheme evaluation of wheel-rail equivalent conicity for high-speed trains based on improved fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of

East China Jiaotong University, 2024, 41 (6) : 90-98.

- [24] 林凤涛, 王悦明, 文彬, 等. 等效锥度的两种准线性计算方法的对比研究 [J]. 铁道机车车辆, 2013, 33 (1) : 53-58.

Lin Fengtao, Wang Yueming, Wen Bin, et al. Study of two quasi-linear methods for calculating the equivalent conicity [J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33 (1) : 53-58.

- [25] 中华人民共和国铁道部. 95J01-L 高速试验列车动力车强度及动力学性能规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.

Ministry of Railways of the People's Republic of China. High-Speed Test Train Power Car Strength and Dynamic Performance Specifications: 95J01-L[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995.

- [26] 中华人民共和国铁道部. 铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准: TB/T 2360—1993 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.

Ministry of Railways of the People's Republic of China. Railway locomotive dynamic performance test identification methods and assessment standards: TB/T 2360—1993[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.



通信作者: 娄平 (1968—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为铁道工程设计与理论研究。

E-mail: pinglou@csu.edu.cn.

(责任编辑: 李根)