

重载机车车轮磨耗演化对轮轨接触关系的影响

郝凯¹, 刘鹏飞², 王晨¹, 刘晓东¹, 王晨龙¹

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:为掌握我国重载车轮型面演变及轮轨匹配特性,以南同蒲线运行某型和谐号六轴重载机车为例,进行车轮型面跟踪测试,在UM软件建立重载机车动力学模型,基于Kik-Piotrowsk算法和Archard磨耗模型,对该线路车轮磨耗演化仿真。验证模型准确性,进一步预测1个镟修周期车轮型面演化,分析轮轨匹配等效锥度规律。结果表明,仿真结果与实测结果贴近,平均磨耗速率相差较小;1~3位轮对在0~2万km等效锥度曲线、接触点分布变化显著,8~10万km后等效锥度曲线、接触点分布较为相似;磨耗后期1位轮对轮缘磨耗严重,但等效锥度向初始值靠近,约为0.121,2位轮对轮缘磨耗较轻,等效锥度较低,约为0.014。

关键词:重载机车;车轨耦合;磨耗预测;轮轨接触;等效锥度

中图分类号: U270.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)04-0059-07

0 引言

六轴重载机车是我国繁忙干线上的主要牵引装备,具有轴数多、轴距长、功率大的特点。随着运行里程的增加,不同车轮型面有着不一样的磨耗演化规律,磨耗型面与钢轨匹配对应车辆振动性能下降。车轮出现严重磨耗情况下,甚至可能发生列车脱轨事故^[1-2]。因此,有必要对重载机车磨耗后轮轨接触匹配关系进行专门研究。

国内外针对轮轨接触关系进行大量研究,发现磨耗车轮型面轮轨接触具有很强的非线性,且研究对象多为高速动车。文献[3]分别将高速车轮原始型面和磨耗型面与钢轨匹配分析,研究轮对内侧距和摇头角对轮轨接触几何关系影响。文献[4]对高速车进行弹性化处理,分析轮对内侧距和轨底坡对轮轨磨耗影响。文献[2]针对高速铁路轮轨型面变化规律进行研究,分析钢轨和车轮磨耗特性及轮轨匹配等效锥度变化。文献[5]针对实测磨耗后车轮型面研究,指出设计新轮廓车轮型面,应考虑等效锥度、接触角和名义位置接触面积、接触应力和横向扩展之间的相互关系。文献[6]对高速车跨线运行时构架横向谐波振动显著增大进行分析,指出轮对横移量0~3 mm内等效锥度较大,提出钢轨打磨应避免钢轨轨顶位置差异过大,保证车轮踏面接触点位置一致。文献[7]指出等效锥度可以判断晃车和抖车现象,为轮对镟修和打磨提供合理的参考。以上文献对轮轨接触几何参数与轮轨型面匹配进行深入研究,将等效锥度限值标准应用到车辆运行管理中。重载机车车辆磨耗要比高速车磨耗量大,对六轴重载机车磨耗后轮轨匹配关系演化规律深入研究,有助于重载机车轮对服役时长的把控。鉴于此,搭建重载机车模型并对实测磨耗量与仿真结果进行验证,分析磨耗后轮轨型面匹配变化规律,为重载机车车轮维修提供参考。

1 机车模型搭建

1.1 车辆-轨道耦合动力学模型

基于车辆-轨道耦合动力学理论,建立HXD型六轴重载机车动力学模型,如图1所示。考虑中间轮

收稿日期:2021-08-27 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210180

基金项目:国家自然科学基金(52072249);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2021232)

作者简介:郝凯(1994—),男,硕士研究生,研究方向为机车车辆动力学。E-mail:740278191@qq.com

郝凯,刘鹏飞,王晨,等.重载机车车轮磨耗演化对轮轨接触关系的影响[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(4):59-65.

对随横动自由移量变化的非线性特性,以及一系和二系减振器随振动频率变化的非线性特性^[8],分别采用 bushing 力元和 Bipolar 力元进行模拟。轨道模型选用移动质量钢轨模型,如图 2 所示,考虑钢轨横向、垂向移动以及纵向转动自由度。

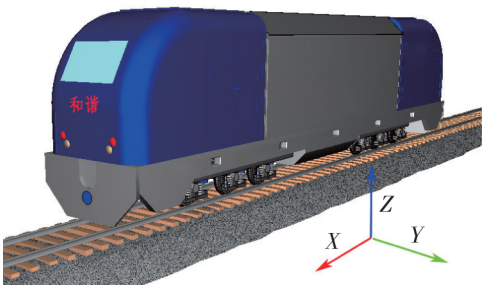


图 1 机车动力学模型

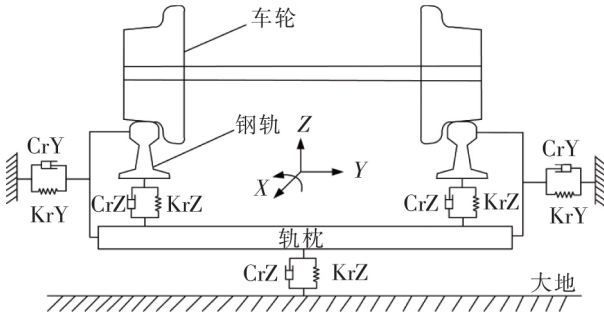


图 2 移动质量钢轨模型

1.2 线路统计及仿真工况设置

对行驶在南同蒲线侯马—榆次线路重载机车,进行跟踪测试,获取到 2.0、4.3、7.7 万 km 车轮型面数据。该线路总长约 300 km,线路多 S 弯,且部分区段钢轨有损伤,其中小半径曲线最多,统计如表 1 所示。为减小计算量,在仿真中进行简化处理,设置仿真曲线影响工况为曲线半径 500 m,影响权重占比为 10.7%。

表 1 实测线路及仿真工况设置

线路类型	实测上行线路统计				仿真工况设置					
	项目	数量/处	长度/m	占比/%	曲线半径/m	曲线长度/m	超高/mm	线路占比/%	速度/(km·h ⁻¹)	速度占比/%
曲线	最小曲线半径 400 m	21	6 843	2.3	500	300	90	10.7	50	1
	曲线半径≤500 m	92	31 978	8.4					60	0.29
直线	∞		268 022	89.3	∞			89.3	80	0.54
									10	0.17

1.3 磨耗仿真

车轮磨耗仿真流程如图 3 所示,基于重载机车动力学模型和移动质量钢轨模型,选用 Kik-Piotrowski 多点接触算法以及 Archard 磨耗模型对车轮磨耗演化仿真研究。初始轮廓配置为 JM3 车轮型面,配置曲线、直线轨道型面为 CHN60,轨底坡选用 1/40。从减小仿真计算量的角度,考虑磨损对称性,即前后转向架对称、左右车轮对称。

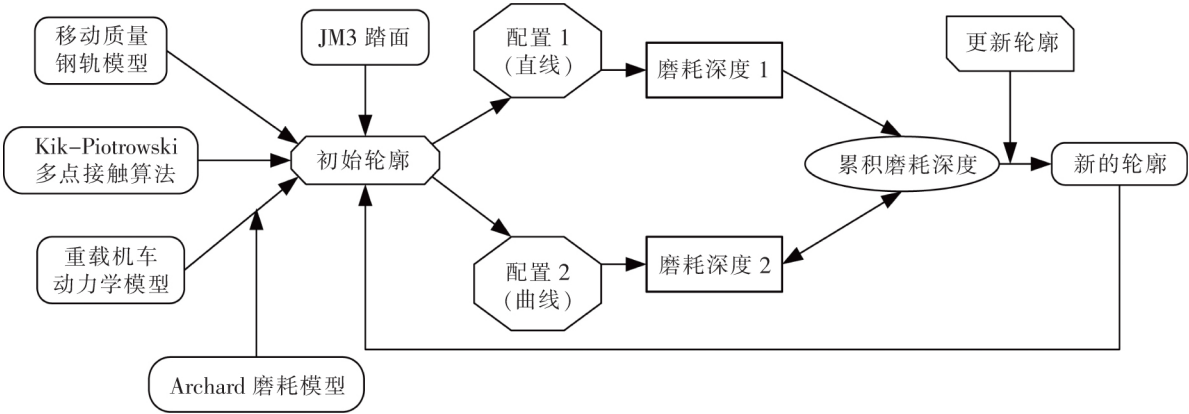


图 3 车轮磨耗仿真流程图

1.4 波长等效法(UIC519)计算等效锥度

计算等效锥度有简化法、谐波法、线性回归法等,由文献[9]可知波长等效法(UIC519)最为准确,故选该方法。在列车过曲线时,由向心力公式、牛顿第二定理及图4轮径与曲线半径关系,可得^[7,9]

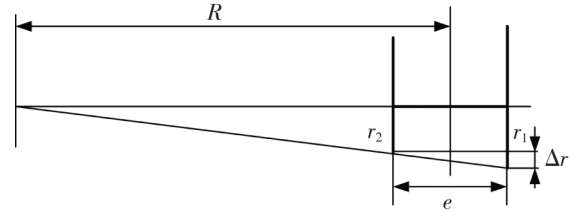


图4 轮径与曲线半径关系

$$\begin{cases} F=ma \\ F=m \frac{v^2}{R} \Rightarrow a+\frac{v^2}{R}=0 \\ \frac{R}{(r_2+r_1)/2}=\frac{e}{r_1-r_2} \Rightarrow R=\frac{er_0}{\Delta r} \end{cases} \Rightarrow \ddot{y}+\frac{v^2}{er_0}\Delta r=0 \quad (1)$$

式中, F 为向心力; m 为车辆质量; a 为加速度; v 为运行速度; R 为圆曲线半径; e 为接触点横向跨距; r_1 、 r_2 分别为内、外侧车轮轮径; r_0 为车轮滚动圆半径; Δr 为轮径差。

设速度 v 为常数,由 $v=dx/dt$,推出

$$\begin{cases} \frac{d^2 y}{dt^2}=v^2 \frac{d^2 y}{dx^2} \\ \frac{dy}{dt}=v \frac{dy}{dx} \end{cases} \Rightarrow \frac{d^2 y}{dx^2}+\frac{\Delta r}{er_0}=0 \quad (2)$$

设车轮踏面外形为角度 γ 的锥形,可知 $\Delta r=2y\tan\gamma$,带入式(2),可得常系数二阶微分方程

$$\frac{d^2 y}{dx^2}+\frac{2\tan\gamma}{er_0}y=0 \quad (3)$$

如图5所示,求得其解为波长 λ 的正弦波,化简可得等效锥度

$$\lambda=2\pi\sqrt{\frac{er_0}{2\tan\gamma}} \quad (4)$$

$$\tan\gamma_e=\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 2er_0 \quad (5)$$

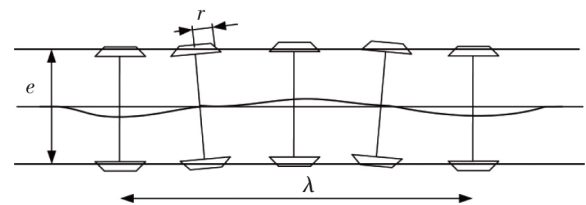
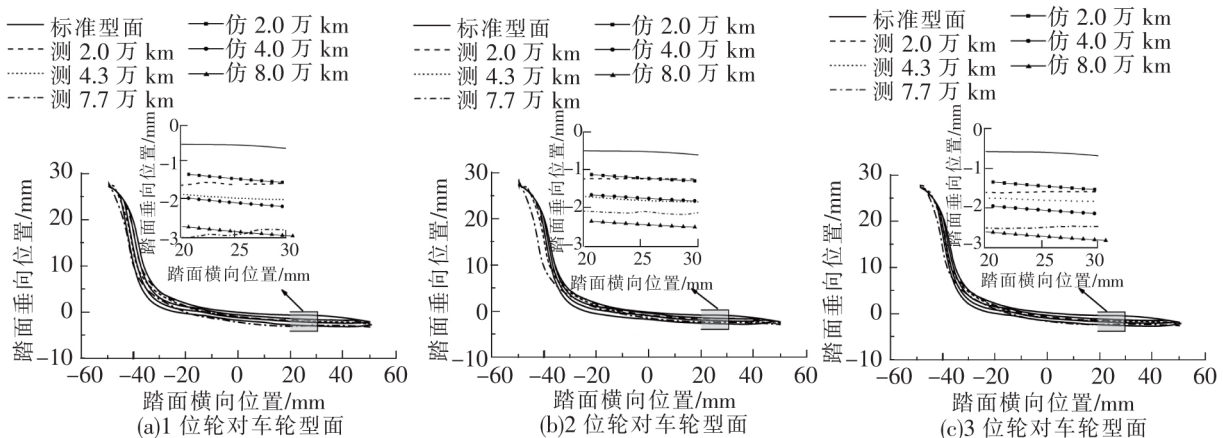


图5 轮对运动轨迹波长

2 磨损仿真验证及轮轨型面匹配分析

2.1 仿真与实测磨损量对比

通过UM软件对数据处理,可得仿真与实测对比如图6所示。1~3位轮对轮缘最大磨损量主要集中在-40~-30 mm位置,踏面最大磨损量集中在20~30 mm位置,仿真与实测结果贴近,其中仿真轮缘磨损量要比实测磨损量靠右,有一定偏移量,可能是没有考虑钢轨与车轮接触弹性变形影响。1~3轮对,垂向磨损量变化呈现正态分布,实测7.7万 km下,2位轮对磨损量要小于1、3位轮对,对比仿真结果,也是相应的变化规律。



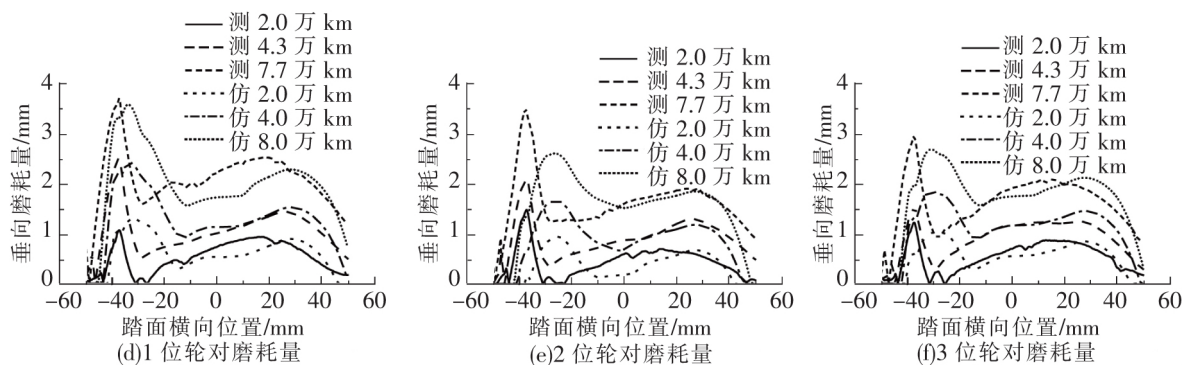


图 6 仿真与实测车轮型面及磨耗量对比

选取名义滚动圆位置处垂向磨耗量和轮缘最大磨耗量,作为车轮踏面和轮缘位置处评价指标。如图 7、图 8 所示,仿真结果与实测结果相差不大。仿真分析运行里程 2~8 万 km,1~3 位轮对仿真踏面平均磨耗速率为 0.197、0.222、0.199 mm/万 km,实测数据为 0.244、0.168、0.202 mm/万 km,相差最大 0.054 mm/万 km;仿真获得最大轮缘平均磨耗速率 0.379、0.278、0.279 mm/万 km,实测数据为 0.438、0.341、0.289 mm/万 km,相差最大 0.063/万 km。对比仿真平均磨耗速率与实测结果相差较小,验证仿真模型的准确性。

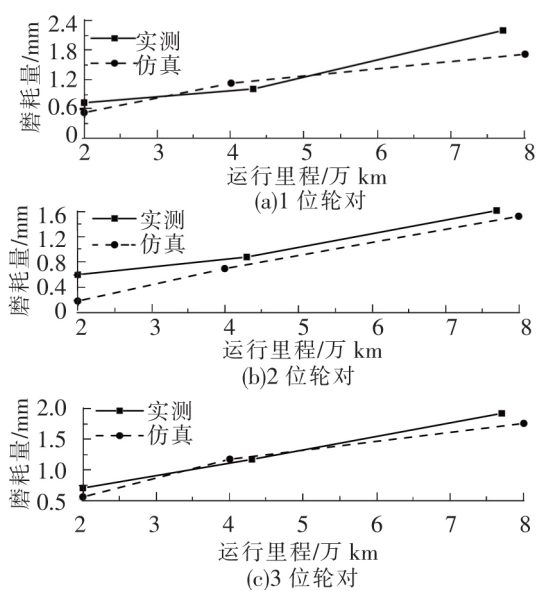


图 7 踏面名义滚动圆处磨耗量仿真与实测

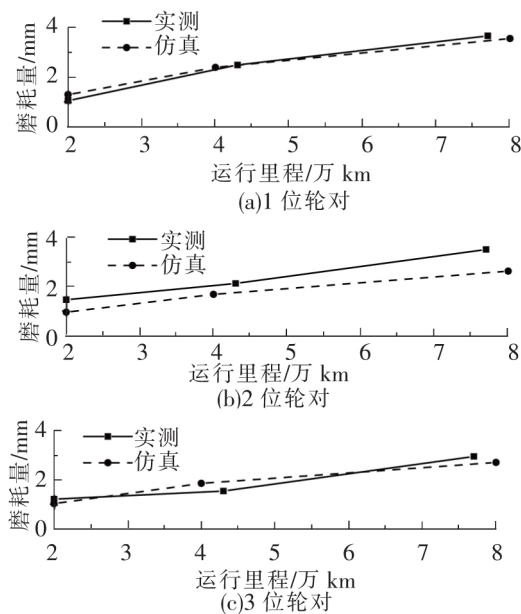


图 8 轮缘最大磨耗量仿真与实测

2.2 等效锥度及磨耗量分析

等效锥度太小可能影响车体晃车及蛇行失稳,等效锥度过大将会引起抖车及横向振动报警^[7],严重影响机车运行安全,造成轮轨间不均匀磨耗,因此研究 10 万 km 车轮型面匹配变化规律具有十分重要意义。

图 9(a)、图 9(c)、图 9(e)为 1~3 位轮对不同磨耗型面下等效锥度随横移量变化。初始型面等效锥度,在 5 mm 横移量以内呈现平缓变化;里程 0~2 万 km,等效锥度曲线变化最明显,1、3 位轮对等效锥度变化呈正态分析,且在横移量 4 mm 左右取得最大值,2 位轮对整体低于初始型面呈现平缓变化;随着运行里程的增加,8~10 万 km 下等效锥度曲线变化大致相同。车轮磨耗在前期会导致轮轨匹配急剧变化,随后随着车轮磨耗,会使型面得到优化,轮轨匹配关系达到稳定。图 9(b)、图 9(d)、图 9(f)为 1~3 轮对名义等效锥度(横移量 3 mm)、踏面及轮缘磨耗量(从轮缘顶点向下 20 mm 横向位移^[10])随运行里程变化规律。名义等效锥度在前期变化明显,后期呈稳定变化,1 位轮对向初始等效锥度靠近,2、3 位轮对远离

等效锥度,其中1位轮对磨耗最为严重,轮缘磨耗量达到3.651 mm。轮缘磨耗情况最为严重,后期轮轨匹配关系向初始靠近,轮缘磨耗情况越小,匹配关系较差。

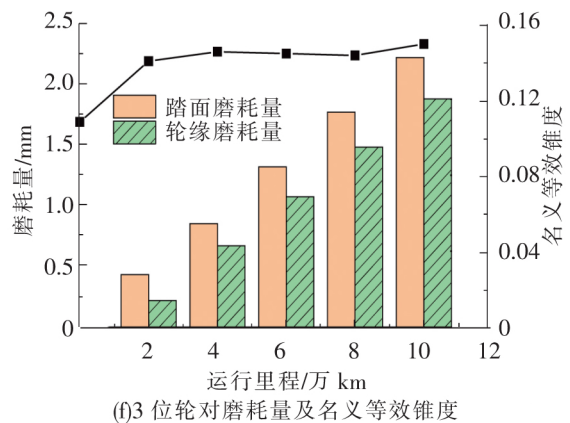
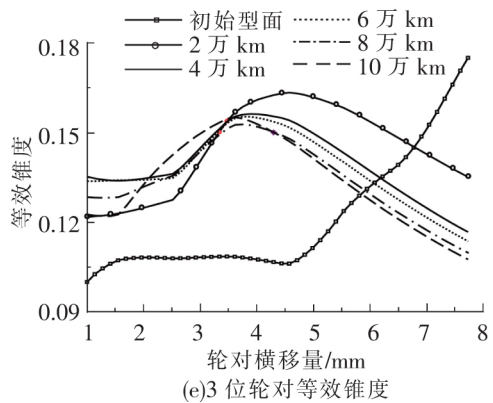
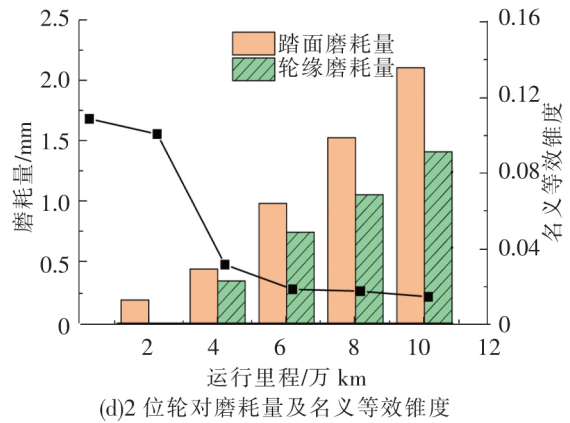
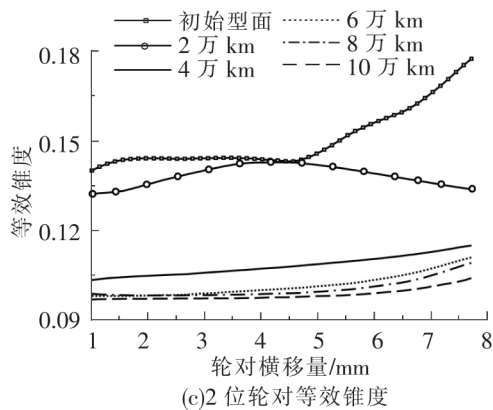
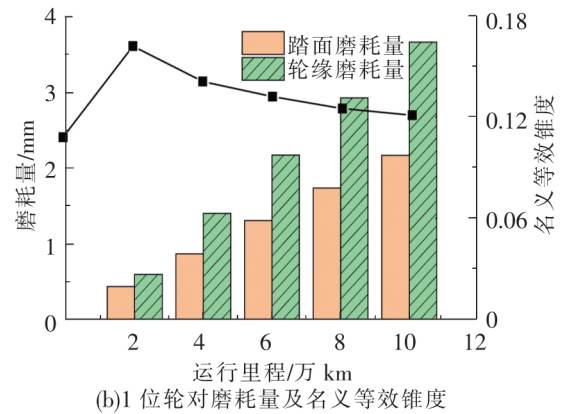
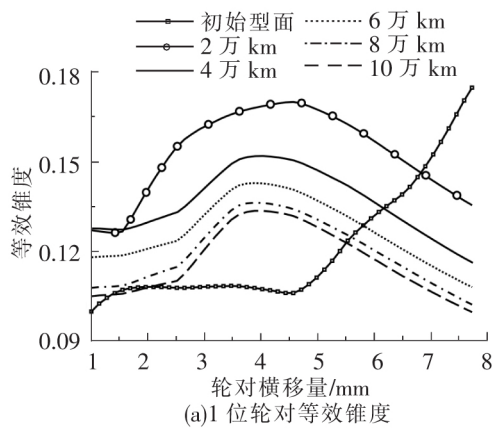
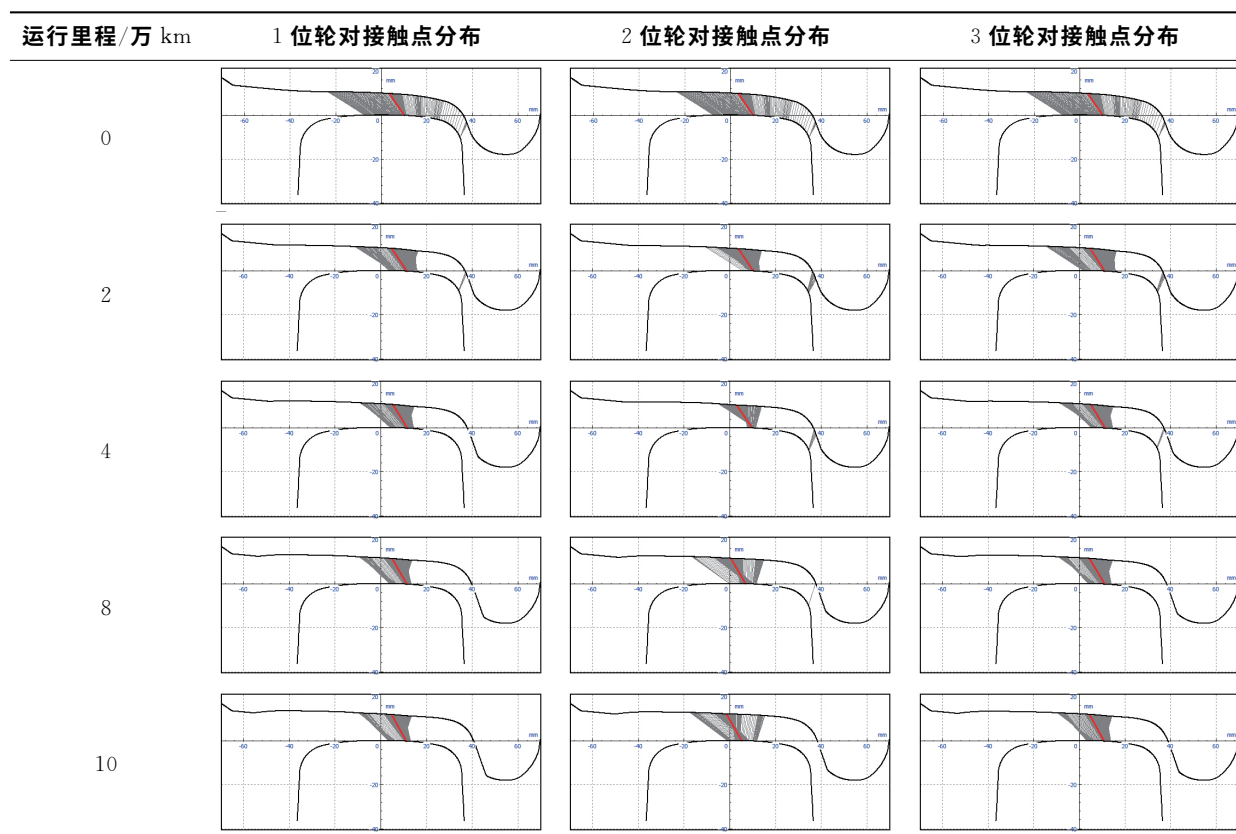


图9 不同运行里程下等效锥度变化

2.3 轮轨接触点分析

表2为10万km下1~3轮对接触点分布情况。初始型面与钢轨接触时,车轮根部靠近轮缘侧分布稀疏,名义等效锥度约为0.108;1~3位轮对运行到2万km,轮对接触线在轨顶上侧分布集中,且车轮根部位置有少量接触线,是明显2点接触,可能造成接触点跳跃现象;随着行驶距离增加,轮缘接触线开始消失,轮轨接触线整体在车轮中部分布,10万km下,2位轮对接触点最宽,名义等效锥度约为0.014。磨耗前期容易造成2点接触,车轮根部有轮缘接触线,其中2位轮对在8万km,轮缘处还有1条接触线,说明存在轮缘与钢轨接触,轮缘磨耗速率较低。对比可知,1位轮对轮缘磨耗速率高,车轮轮缘磨耗严重。

表 2 1~3 左轮轮轨接触点变化情况



3 结论

(1)对比踏面、轮缘最大磨耗量,仿真与实测结果贴近,进一步验证平均磨耗速率,相差最大为 0.063 mm/万 km,误差较小;踏面仿真磨耗规律,1 位轮对磨耗最严重,2 位轮对最小,与实测结果相同。

(2)轮轨接触关系在 0~2 万 km 变化明显,8~10 万 km 变化稳定;预测 10 万 km 1~3 轮对车轮型面踏面磨耗相差不大,轮缘磨耗最大为 1 位轮对 3.651 mm、最小 2 位轮对为 1.416 mm;轮缘与踏面磨耗达到一定速率,会优化磨耗型面匹配关系,但轮缘磨耗量达不到踏面磨耗速度,会导致车轮型面匹配关系变差。

(3)综上所述,建议 0~2 万 km 要对车轮型面进行检查,10 万 km 后对中间车轮进行轮缘旋修。

参 考 文 献

- [1]郭涛,王宁,刘永强. 车轮踏面常规磨耗对高速列车动力学性能的影响[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(4): 44-49.
- [2]侯茂锐,刘丰收,胡晓依,等. 我国典型高速铁路轮轨型面变化规律及匹配特性[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 99-107.
- [3]吴娜,曾京. 高速车辆轮轨接触几何关系及车轮磨耗疲劳研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 80-87.
- [4]杨广雪,赵方伟,李秋泽,等. 高速列车轮轨接触几何参数对轮轨磨耗的影响研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 50-56.
- [5]Polach. Wheel profile design for target conicity and wide tread wear spreading[J]. Wear, 2011, 271(1): 195-202.
- [6]杨震寰,戴焕云,石俊杰,等. 磨耗后轮轨型面接触关系及线路适应性分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(5): 37-46.
- [7]曾京,干锋,罗光兵. 轨道车辆轮轨关系检测及等效锥度管理[J]. 现代城市轨道交通, 2021(6): 29-34.
- [8]刘鹏飞,曹云强,张凯龙,等. 不均闸瓦压力下重载机车曲线通过动态行为[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(2): 57-63.
- [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.
- [10]中国铁路总公司. 铁路技术管理规程[M]. 北京:中国铁道出版社, 2018.

Influence of Wheel Wear Evolution on Wheel-Rail Contact Relationship of Heavy-Haul Locomotive

Hao Kai¹, Liu Pengfei², Wang Chen¹, Liu Xiaodong¹, Wang Chenlong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to understand the evolution of heavy-haul wheel profile and the characteristics of wheel-rail matching in China, a six axles heavy-haul locomotive was run on the south Tong-Pu Line, and the wheel profile tracking test was carried out. The heavy-haul locomotive dynamics model was established in UM, and the wheel wear evolution of the line was simulated based on Kik-Piotrowsk algorithm and Archard wear model. Firstly, the accuracy of the model was verified, and the evolution of wheel profile in one rotation period was predicted, and the equivalent conicity of wheel/rail matching was analyzed. The results show that the simulation results are close to the measured ones, and the difference of average wear rate is small. The equivalent conicity curve and contact point distribution of the 1~3 wheelsets changed significantly from 0 to 20 000 km, and the equivalent conicity curve and contact point distribution were similar after 80 000~100 000 km. At the later stage of wear, the flange of the first wheelset was serious, but the equivalent taper is close to the initial value, about 0.121; the flange wear of the second wheelset was light and the equivalent conicity was low, about 0.014.

Key words: heavy-haul locomotive; vehicle-track coupled; wear prediction; wheel-rail contact relationship; equivalent conicity

(上接第 20 页)

Optimum Design of Hanging Basket for Cantilever Pouring Construction of Xijiao Bridge

Liu Wei¹, Song Xinxin¹, Wu Yuhang², Wang Bin¹, Lv Meng¹

(1. China Construction Railway Investment Road and Bridge Co. Ltd., Wuhan 460014, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and safety of the hanging basket slope adjustment, and reduce the problem of excessive deformation of the rear joist of the wide bridge during the traveling process, with the Xijiao Bridge as the engineering background, the main truss structure and the rear joist of the hanging basket were optimized. A self-locking hydraulic jacking device and measures such as adding a walking guide beam under the bottom form of the box beam and connecting the lower guide beam and the rear joist of the flange formwork were proposed. On this basis, using Midas/Civil to establish the optimized model of the hanging basket, the finite element analysis of the hanging basket from four aspects: the main truss, the front upper beam, the bottom joist, and the walking. The maximum stress and deformation under running conditions, and the self-locking hydraulic jacking device's adjustable height diamond frame structure connection nodes are checked. The results show that the improved hanging basket has fast slope adjustment and higher safety, strength and rigidity. Both the connecting nodes and the connecting nodes can meet the construction requirements, and the improvement plan of the hanging basket proposed can provide a reference for similar projects.

Key words: bridge engineering; cantilever pouring; hanging basket; optimum design