

# 轨道车辆车轮曲线磨耗特性的速度影响及预测分析

李宁宁<sup>1</sup>,刘晶<sup>1</sup>,李峰<sup>2</sup>

(1. 西安交通工程学院 机械工程系,陕西 西安 710000;

2. 西安交通大学 机械学院,陕西 西安 710000)

**摘要:**为了提高对轨道车辆车轮磨耗特性预测效果,以某线的 CRH6A 车轮为例,建立磨耗动力学计算模型,分析速度对磨耗性能影响,给出车轮磨耗预测。研究表明:小半径运行曲线下,车辆经过曲线轮缘时与钢轨保持紧贴状态,总体保持较高度度的轮对磨耗,在车轮踏面上形成了最深的均分状态。当速度提高后,指标值发生了降低。大曲线半径时,轮轨冲角受到速度的明显影响,形成了更小轮轨冲角,轮缘和钢轨之间形成了更小的贴靠作用力,降低了轮对与轮缘的磨耗程度。磨耗分布与磨耗深度随速度增大而降低,以 160 km/h 比均衡速度更小的速度运行时,车轮产生了明显磨耗。

**关键词:**轨道车辆车轮;磨耗特性;速度;动力学;磨耗预测

**中图分类号:**U260.331<sup>+.1</sup> **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)06-0025-03

## Speed Influence and Prediction Analysis on Wheel Curve Wear Characteristics of Railway Vehicles

LI Ningning<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, LI Feng<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Xi'an Institute of Transportation Engineering, Xi'an 710000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In order to improve the prediction effect of rail vehicle wheel wear characteristics, a CRH6A wheel of a certain line was taken as an example to establish a wear dynamics calculation model, with which the influence of speed on wear performance was analyzed and the wheel wear was predicted. The research results show that the vehicle keeps close to the rail when passing through the curvilinear rim with a small radius running curve and maintains a high degree of wheelset wear, forming a most homogeneous state on the wheel tread. As the speed increases, the index value decreases. When the curve radius is large, the wheel-rail angle of impact is obviously affected by the speed, forming smaller wheel-rail angle of impact and smaller adhesion force between the rim and rail, which reduces the wear degree of wheelset and rim. The wear distribution and wear depth decrease with the increase of the speed, and the wheel wears obviously when running at the speed of 160 km/h, a speed lower than equilibrium one.

**Keywords:** rail vehicle wheel; wear characteristics; speed; dynamics; wear prediction

## 0 引言

为有效保障列车安全运行,需控制轮缘达到合适的厚度范围,进行车轮维修的时候则需要将其恢复到原形的状态,每当轮缘的厚度提高 1 mm 时,需去除约 2 mm 的踏面金属<sup>[1-2]</sup>。在修复轮缘的过程中,轮径的消耗比例为 1:6,随着轮缘修复量的增加,会引起动车组轮径的迅速减小,并发生轮径的非正常磨耗,极大提高了动车组实际检修难度,同时增加了列车的运行维护成本<sup>[3-4]</sup>。根据前期研究可知,车轮发生轮缘异常磨耗是受到车辆自身结构、运行控制过程、动力性能与行驶路线的综合影响。目前,许多学者开展了地铁等多种高速列车在小半径运行状态下的轮缘磨耗情况的研究<sup>[5-7]</sup>。其中,国内学者 LI X 等<sup>[8]</sup>通过构建重载铁路磨耗状态仿真模型,发现该仿真

模型能够预测曲线段的轨道磨损状态。WANG J X 等<sup>[9]</sup>主要探讨了重载铁路线路在不同曲线参数下的钢轨磨损差异性,对某线城际动车组的运营过程进行调研,发现当城际动车组在上述线路上运行时还会发生车轮的快速磨耗,尤其是轮缘受到明显的磨耗破坏。该研究有助于分析车轮的快速磨耗状态。

为克服线路超高产生的影响以及降低轮轨的磨耗程度,朱锦煜<sup>[10]</sup>从动力学层面进行理论计算发现,随着小半径曲线形成更大的超高时,将会在外轨侧区域形成更严重的磨损。练松良<sup>[11]</sup>对比了不同曲线轨道超高条件下的钢轨侧磨程度。根据实验测试结果发现,当实设超高比平均速度计算超高更小时,列车进入欠超高运行模式,能够减轻钢轨方式侧磨的程度。为了提高对轨道车辆车轮磨耗特性预测效果,本文以某线的 CRH6A 车轮为例,建立磨耗动力学计算模型,分析速度对磨耗性能影响,给出车轮

**基金项目:**西安交通工程学院中青年基金项目(21KY-48)

**第一作者简介:**李宁宁(1987—),女,甘肃庆阳人,工程师,本科,从事轨道车辆工程相关工作。

磨耗预测。

## 1 实测车轮磨耗及曲线分析

本文选择某线 CRH6A 城际动车组作为研究对象,测试了该车辆在运行初期的 50 000 km 与接近车轮磨耗到一定程度的 250 000 km 两种状态的外形尺寸变化,计算了车轮踏面与轮缘发生的磨耗情况。图 1 给出了车轮型面和标准结构 LMA 型车轮型面相比较的结果<sup>[12]</sup>。

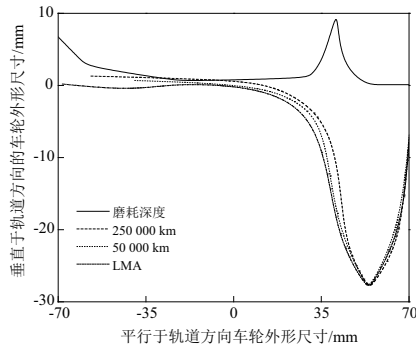


图 1 车轮外形对比图

根据图 1 可知,当磨耗到限时,车轮相对最初 LMA 标准型面的轮缘发生了根部区域模型磨耗的情况,大部分车轮磨耗出现于轮缘侧磨以及轮缘根部。车轮型面产生的磨耗深度最大为 10.28 mm,沿轮缘的厚度方向形成的磨耗最大值为 5 mm,同时踏面产生的磨耗量是 0.62 mm。

为深入探讨车轮磨耗和运行超高之间的相互作用关系,测试了各个非均衡速度下轮轨经过曲线段时发生磨耗的程度,采集了城际动车组实际运行数据。分别记录车辆在各曲线条件下的运行速度,获得实际运行速度相对均衡速度值的差异,最后统计了速度偏差的各项影响因素。

## 2 速度对车轮磨耗影响分析

### 2.1 动力学模型

构建城际 CRH6A 动车组运动模型,表 1 给出了各项模型参数。

表 1 车辆主要建模参数

参数	数值
车辆定距/mm	16 800
轴距/mm	2 500
车轮滚动圆横向跨距/mm	1 513
车轮滚动圆直径/mm	1 040
轮对内测距/mm	1 420
车体质量/t	26.85
构架质量/t	2.85
轮对质量/t	2.06
钢轨外形	R62

车辆实际测试线路主要参数见表 2。由表 2 可以发

现,列车在这一线路上通常都是以低于非均衡速度的状态通过曲线,车轮在曲线段发生了较高概率的异常磨耗。

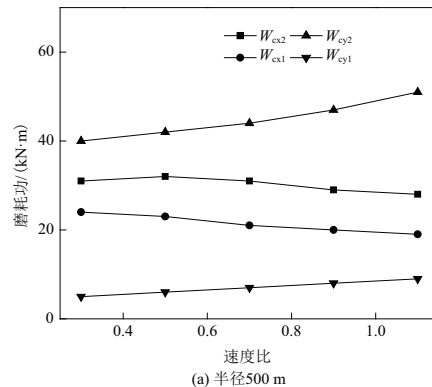
表 2 线路主要参数

半径/mm	速度/(km/h)	曲线长度/m	缓和曲线长度/m	超高值/mm
500	80	680	120	120
1 500	120	710	140	115
3 000	170	780	180	105
6 000	210	780	180	85

### 2.2 速度对磨耗性能影响

导向轮属于磨耗程度最大的一类车轮,对导向轮外侧发生磨耗开展分析。为分析不同速度引起的车轮整体与轮缘磨耗状态差异性,计算了各曲线工况下的车轮磨耗功。

分析图 2 不同曲线半径下的车轮磨耗功和速度变化可知,当曲线半径为 500 m 时,随着速度的增大获得了更高的磨耗功,此时轮轨产生了较明显的整体磨耗,而整体磨耗功则保持相对稳定的特征。半径超过 1 500 m 之后,随着速度的增加,车轮磨耗功发生了降低的趋势,同时还可以发现速度在所有半径下都对轮磨耗功造成了显著影响。产生上述差异的原因是,当曲线半径 < 500 m 时,车轮产生了明显的横向位移,同时形成了较大的轮轨冲角以及轮缘导向力,此时形成了基本稳定的整体磨耗功<sup>[13]</sup>。轮缘处导向力也呈现持续增大,在轮缘处形成了更大的纵向磨耗功  $W_{cx2}$ , 获得了更高的整体磨耗功。对于半径为 3 000 m 的曲线段,速度对轮缘导向力产生的影响较弱,而轮轨冲角则受到速度较明显的影响。对车轮磨耗进行分析可以发现,轮缘部位的纵向磨耗功  $W_{cx2}$  与横向磨耗功  $W_{cy2}$  总和随速度提高而降低,但轮缘区域的整体磨耗发生了降低。当速度提高后,轮轨横向蠕滑力发生了下降,引起踏面横向磨耗功的降低,由于两个主要部分都发生了磨耗功减小,从而引起车轮整体磨耗功也发生降低的变化趋势。当曲线半径达到 6 000 m 时,随着速度提高,车轮踏面的纵向与横向磨耗功减小,由此导致整体磨耗功也发生下降。通过比较各半径条件下的曲线磨耗功分量可知,提高速度后踏面处横向磨耗功  $W_{cy1}$  减小。这是因为当速度增大的过程中,形成了更高的离心力,对车辆重力的横向分量起到平衡的效果,由此降低了轮轨的横向蠕滑程度,同时获得了更小的横向磨耗功<sup>[14]</sup>。



(a) 半径 500 m

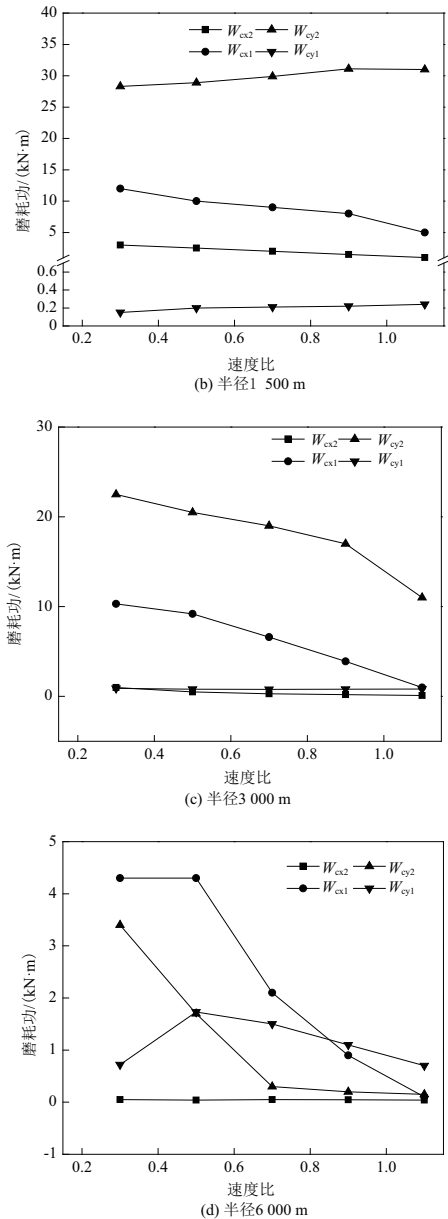


图2 轮对磨耗功与速度关系图

从总体上分析,处于小半径运行曲线条件下,因为此时半径尺寸较小,当车辆经过曲线轮缘时与钢轨保持紧贴状态,总体始终保持较高程度的轮对磨耗,不同速度下的轮对磨耗与轮缘磨耗只发生小幅变化。当曲线半径达到1 500 m 以上时,轮轨冲角受到速度的明显影响,逐渐提高速度后,形成了更小的轮轨冲角,轮缘和钢轨之间形成了更小的贴靠作用力,降低了轮对与轮缘的磨耗程度。

### 3 车轮磨耗预测

以 LMA 构建得到初始磨耗仿真模型,同时设定垂直磨耗达到 0.1 mm 作为车轮型面更新条件,对车轮型面的磨耗状态进行预测分析。分别计算了 80、120 与 160 km/h 速度下经过 50 000 km 运行后车轮发生磨耗的程度,之后测试了车轮的表面磨耗深度与累积之和。

图 3 显示了 3 种速度下测试得到的车轮磨耗深度。

其中,运行速度为 80 km/h 时,在车轮踏面上形成了最深的均分状态。根据表 3 车轮整体磨耗与轮缘磨耗深度结果可知,当速度提高后,指标值发生了降低。当曲线半径为 3 000 m 时,形成了相同的磨耗分布与磨耗深度,并且发生了随速度增大而降低的现象,以 160 km/h 比均衡速度更小的速度运行时车轮产生了明显磨耗。

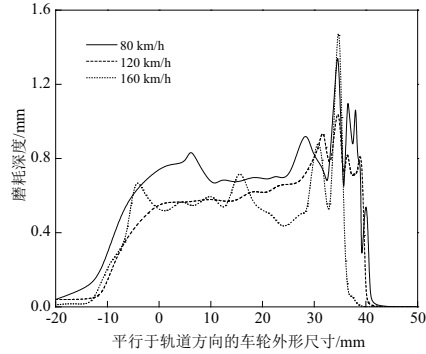


图3 车轮磨耗图

表 3 车轮磨耗深度结果 单位:mm

项目	速度/( km/h)		
	80	120	160
整体磨耗	751	622	536
轮缘磨耗	91	65	16

因此,在大曲率半径下,低于均衡速度较大值通过曲线时,车轮的磨耗将会加剧。这一计算结果与第 2.2 节结果基本吻合,说明使用磨耗功来评价速度对车轮磨耗的影响是可行的。在分析速度对轮轨磨耗的影响时还需要考虑到安全性方面,期待后续进一步加强。

### 4 结语

1) 处于小半径运行曲线条件下车辆经过曲线轮缘时与钢轨保持紧贴状态,总体保持较高程度的轮对磨耗。当曲线半径达到 1 500 m 以上时,轮轨冲角受到速度的明显影响。逐渐提高速度后,形成了更小轮轨冲角,轮缘和钢轨之间形成了更小的贴靠作用力,降低了轮对与轮缘的磨耗程度。

2) 磨耗分布与磨耗深度随速度增大而降低,以 160 km/h 比均衡速度更小的速度运行时车轮产生了明显磨耗。在实际运行过程中应综合考虑运行安全性和磨耗性能,设定好车辆通过曲线速度。

#### 参考文献:

[1] ORLOVA A, BORONENKO Y. The influence of the condition of three-piece freight bogies on wheel flange wear: simulation and operation monitoring [ J ]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48( Suppl1 ):37-53.  
 [2] REZVANI M A, OWHADI A, NIKSAI F. The effect of worn profile on wear progress of rail vehicle steel wheels over curved tracks[ J ]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47( 3 ):325-342.

(下转第 39 页)

从图 7 可以看出在 700 °C ~ 800 °C 范围内大多数数据点都在  $\sigma^E = \sigma^C$  附近,不同温度下的线性相关系数  $R$  在 0.912 34~0.937 23 之间,最大平均绝对误差  $M_{AE}$  和均方差  $R_{MSE}$  为 35.167 9 MPa 和 54.223 2 MPa;在 850 °C 下,其预测相关性只有 0.866 34,平均绝对误差  $M_{AE}$  和均方差  $R_{MSE}$  分别为 18.016 2 MPa 和 27.149 8 MPa,预测结果较差。相关性结果表明所建立模型能够有效预测 700 °C ~ 800 °C 下的流变应力。

## 5 结语

本文采用单轴高温拉伸,获得了 TC4 钛合金在 700 °C ~ 850 °C 和应变速率 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> 条件下的高温拉伸曲线及微观组织,分析了拉伸条件对材料流变行为及微观组织的影响,并建立了一组统一黏塑性模型来预测材料流变行为和流变应力,得到如下结论。

1) 随着温度升高和应变速率的降低,材料流变应力逐渐降低,延伸率逐渐升高,并在 850 °C、0.001 s<sup>-1</sup> 的条件下获得最大延伸率,达 119%。

2) 升高温度、降低应变速率和增加应变量能有效促进 TC4 钛合金发生动态再结晶,软化金属,消耗材料中的位错,使材料流变应力下降。

3) 统一黏塑性本构模型所预测的应力在 700 °C ~ 800 °C 与实验值的线性相关值为 0.912 34~0.937 23,而 850 °C 时仅为 0.866 34,表明该模型在 700 °C ~ 800 °C 下能有效预测 TC4 钛合金流变行为及流变应力。

### 参考文献:

[1] 刘刚强,李寒松,牛虬,等. 球头阴极电解铣磨加工 TC4 钛合金试验研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):14-16.

- [2] MA L X, WAN M, LI W D, et al. Constitutive modeling and processing map for hot deformation of Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 808: 151759.
- [3] MOMENI A, ABBASI S M, SADEGHPOUR S. A comparative study on the hot deformation behavior of Ti5Al5Mo5V3Cr and newly developed Ti4Al7Mo3V3Cr alloys [J]. Vacuum, 2019, 161: 410-418.
- [4] LI W S, YAMASAKI S, MITSUHARA M, et al. In situ EBSD study of deformation behavior of primary  $\alpha$  phase in a bimodal Ti-6Al-4V alloy during uniaxial tensile tests [J]. Materials Characterization, 2020, 163: 110282.
- [5] BODUNRIN M O, CHOWN L H, MERWE J W, et al. Hot working of Ti-6Al-4V with a complex initial microstructure [J]. International Journal of Material Forming, 2019, 12(5): 857-874.
- [6] 吴迪鹏,武永,陈明和,等. TC31 钛合金板材高温流变行为及组织演变研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(12): 3901-3910.
- [7] LIU Z G, LI P J, XIONG L T, et al. High-temperature tensile deformation behavior and microstructure evolution of Ti55 titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 680: 259-269.
- [8] 崔军辉,杨合,孙志超,等. TC11 钛合金流变行为及其应变分段本构模型 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(3): 397-401.
- [9] LIN J G. Fundamentals of materials modelling for metals processing technologies [M]. Imperial College London, UK: Imperial College Press, 2015.
- [10] 武永. Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 板材气胀成形微观组织与形变耦合建模仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

收稿日期: 2021-08-27

(上接第 27 页)

- [3] VO K D, ZHU H T, TIEU A K, et al. FE method to predict damage formation on curved track for various worn status of wheel/rail profiles [J]. Wear, 2015, 322/323: 61-75.
- [4] WANG P, GAO L. Numerical simulation of wheel wear evolution for heavy haul railway [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(1): 196-207.
- [5] JIN X S, WEN Z F, WANG K Y, et al. Effect of passenger car curving on rail corrugation at a curved track [J]. Wear, 2006, 260(6): 619-633.
- [6] 任朝阳. 小曲线半径对动车组轮对轮缘磨耗的影响及对策 [J]. 中国铁路, 2011(4): 11-14.
- [7] 侯茂锐,王卫东,常崇义,等. 动车所小半径曲线钢轨磨耗及减磨措施研究 [J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 45-50.
- [8] LI X, YANG T, ZHANG J, et al. Rail wear on the curve of a heavy haul line—numerical simulations and comparison with field measurements [J]. Wear, 2016, 366/367: 131-138.

- [9] WANG J X, CHEN X, LI X G, et al. Influence of heavy haul railway curve parameters on rail wear [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 57: 511-520.
- [10] 朱锦焜. 曲线超高与外轨侧面磨耗关系的探讨 [J]. 铁道建筑, 1984, 24(12): 13-16.
- [11] 练松良. 改变超高对曲线钢轨侧磨的影响 [J]. 铁道建筑, 1990, 30(7): 5-9.
- [12] ZHOU S X, XUE R. Analysis of the influence of superelevation of subway line act on wheel-rail wear [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 577: 135-139.
- [13] 杨新文,姚一鸣,周顺华,等. 基于修正的轮轨非 Hertz 接触的重载铁路曲线超高对钢轨磨耗的影响分析 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 22-29.
- [14] 李伟,马战国,司道林. 重载铁路曲线几何参数对钢轨磨耗影响的研究 [J]. 铁道建筑, 2013, 53(6): 130-134.

收稿日期: 2021-07-27