

不同客流荷载对车轮磨耗和滚动接触疲劳的影响分析

王少锋, 刘雅蕾, 龚国涛, 钱海斌

(华东交通大学 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 南昌 330013)

摘要: 车轮损伤严重影响地铁列车轮对的服役寿命, 为分析地铁不同客流量的列车对车轮损伤的影响规律, 以地铁B型车为研究对象, 建立车辆轨道系统动力学模型并计算全局接触参数, 采用 Archard 磨耗模型仿真分析车轮磨耗特征, 采用 Kik-Piotrowski 模型模拟轮轨接触, 在 UM RCF of Rails 模块分析不同客流荷载下滚动接触疲劳的变化规律。结果表明车轮磨耗和滚动接触疲劳受客流荷载的影响, 客流荷载越大, 磨耗和滚动接触疲劳值也随之增大; C型曲线下, 客流荷载对1、4位车轮轮缘和踏面磨耗速率影响都要大于2、3位车轮; 直线上车轮磨耗速率受客流荷载影响呈现由慢到快随后变缓的趋势; 客流荷载的变化不会使车轮疲劳损伤区域发生变化且直线车轮损伤范围比曲线车轮要大。该结论为后期地铁列车车轮维修提供了理论基础。

关键词: 仿真分析; 客流荷载; 车轮磨耗; 滚动接触疲劳; 磨耗速率

中图分类号: U213. 42

文献标志码: A

Analysis of the Influence of Different Passenger Flow Loads on Wheel Wear and Rolling Contact Fatigue

WANG Shaofeng, LIU Yalei, GONG Guotao, QIAN Haibin

(Engineering Research Center of Railway Environmental Vibration and Noise,
Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The wheel damage seriously affects the service life of the wheel set of the subway train. In order to analyze the influence of the train with different passenger flow on the wheel damage of the subway train, taking the subway B-type vehicle as the research object, the vehicle-track system dynamics model is established and the global contact parameters are calculated. The Archard wear model is used to simulate and analyze the wheel wear characteristics, the Kik-Piotrowski model is used to simulate the wheel-rail contact, and the UM RCF of Rails module is used to analyze the change rule of rolling contact fatigue under different passenger flow loads. The results show that the wheel wear and rolling contact fatigue are affected by the passenger flow load. The greater the passenger flow load, the greater the wear and rolling contact fatigue value. Under the C curve, the influence of passenger flow load on the wear rate of the flange and tread of the 1,4-position wheel is greater than that of the 2,3-position wheel; the wheel wear rate on the straight line shows a trend from slow to fast and then to slow due to the influence of passenger flow load. The change of passenger flow load will not change the fatigue damage area of the wheel and the damage range of the straight wheel is larger than that of the curved wheel. This conclusion provides a theoretical basis for the later maintenance of subway train wheels.

Key words: simulation analysis; passenger flow load; wheel wear; rolling contact fatigue; wear rate

随着轨道车辆客流量与运行速度的增加,小半径曲线上轮轨相互作用逐步加强,车轮损伤问题日益显著,尤其是磨耗与疲劳损伤。对该问题最简单直观的研究方法就是现场跟踪观测。马静静^[1]对上海轨道交通 1 号线现有的 01A07 型列车轮对损伤数据进行统计分析,发现磨耗主要发生在轮缘,绝大多数磨耗率小于 0.5;刘洋等^[2]跟踪测量重庆轨道交通 1 号线车辆的车轮数据,得到踏面与轮缘磨耗平均速率分别为 0.07 和 0.18 mm/10⁴ km;李涛等^[3]指出深圳地铁 9 号线一个镟修周期内的踏面和轮缘磨耗量分别约为 2.5~3.5 mm;彭峰等^[4]发现唐包线 R600 m 和 R800 m 曲线上钢轨疲劳区的横向分布范围很广,而 R1 000 m 曲线轨面疲劳区明显收窄,可认为仅存在 1 个疲劳区;Frohling 等^[5]针对欧洲地区多种钢轨材料的滚动接触疲劳特性开展了实地试验。实验数据表明,经过硬化处理的轨道钢材在抗疲劳性能方面表现更为优异。这一发现为轨道材料的选用提供了重要参考依据。

现场跟踪观测虽然简单直观,但是难以精准研究车轨大系统中各个参数的影响权重。仿真分析可以有效研究各个参数的影响。郝凯等^[6]基于多体动力学与 Archard 模型研究不同曲线占比权重对车轮磨耗的影响;杜彬等^[7]仿真分析了车轮硬度变化对重载车轮磨耗的影响;Li 等^[8]通过模拟轨道波磨的作用表明 30~90 mm 波长更容易导致疲劳裂纹及扩展;王红兵等^[9]研究表明轮径差会影响踏面磨耗深度和磨耗速率且使滚动接触疲劳区域扩大;Xu 等^[10]采用动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 ANSYS 计算了车轮磨损对车辆与道岔动力学的影响;刘永乾等^[11]建立重载铁路实参数轨道-车辆多体动力学仿真模型分析了小半径曲线钢轨打磨前后轮轨接触关系;Nejad^[12]通过三维弹塑性有限元建模评估了钢轨在周期性过载影响下的疲劳裂纹扩展和疲劳寿命;贾劭飞等^[13]研究了轮轨滑差率、轮轨硬度比对滚动接触疲劳裂纹发展的影响;赵鸿耀^[14]研究了施加振动对钢轨滚动接触疲劳损伤行为的影响,揭示了振动条件对钢轨滚动接触疲劳裂纹的影响机理;朱爱华等^[15]仿真分析了不同制动方式下车轮-闸瓦磨耗、车轮-钢轨磨耗和踏面总磨耗的变化规律;杨鹏军等^[16]建立轮轨柔性某地铁 B 型车辆刚柔耦合动力学模型,计算了车轮多边形阶数和谐波幅值变化对轮轨垂向力、轮轨振动、运行平稳性等车辆动力学性能的影响;杨岗等^[17]分析了车轮多边形阶数和幅值变化对轮轨力、蠕滑率和蠕滑力等特性

的影响;徐辉^[18]分析了车轮圆周磨耗和踏面磨耗特征,对车轮多边形和影响车辆动力学性能的车轮踏面尺寸展开研究,最终建立基于神经网络的车辆动力学性能预测模型;陈玮珂等^[19]分析了偏心车道荷载作用下考虑箱梁扭转和畸变翘曲应力影响的应力放大系数;李小静等^[20]重新定义了城市交通承载力,构建基于系统动力学的计算模型。

采用仿真分析一定程度上能分析出各个参数的影响,但大多数模型都采用的是单一荷载。而在实际运营中,地铁车辆的客流荷载呈现急剧的振荡变化。这种客流变化如何影响车轮磨耗及滚动接触疲劳,还需进一步研究。本文以地铁 B 型车为研究对象,建立车辆-轨道系统动力学模型并计算全局接触参数,通过局部接触模型对接触斑进行离散化处理,结合 Archard 磨耗模型与非 Hertz 接触 Kik-Piotrowski 模型模拟轮轨接触,分析不同客流荷载下车轮的磨耗分布特征及滚动接触疲劳规律。

1 客流荷载对车轮磨耗和滚动接触疲劳的仿真方法

1.1 仿真参数的设定

基于多体动力学软件 UM 建立车辆轨道动力学模型,车辆模型为我国应用最广的单节 B 型车,采用 Kik-Piotrowski 算法求解轮轨接触力学,轮轨型面为标准 LM 和 CHN60,润滑后轮轨摩擦系数为 0.25。仿真设定中,曲线段超高设置为 120 mm,圆曲线长度 1 000 m,轨底坡 1:40。全线路包括几种不同半径的曲线,线路曲线半径及车辆在该路段上的最高运行速度如表 1 所列。

表 1 曲线参数及最大运行速度

Tab. 1 Curve parameters and maximum running speed

轨道线路半径 /m	线路比例 /%	最大运行速度 /(km/h)
1 000	70	60
700	20	50
300	10	30

通过改变车体质量来模拟客流量变化,研究 7 种不同的客流荷载工况对车轮磨耗和滚动接触疲劳的影响,列车单节车厢载客数分别为空载、50、100、150、200、250、满载 300 人。乘客平均体重按 60 kg/人,单节车辆空载按 19 t 计^[21]。通过 Hertz 垂向接触理论、Fastrip 切向理论,Archard 计算模型与 Kik-Piotrowski 轮轨滚动接触算法,便可得出型面磨耗的

计算结果。

1.2 Kik-Piotrowski 轮轨滚动接触算法

选取 Kik-Piotrowski 多点接触算法对轮轨滚动接触力学行为进行求解。在轮轨点接触问题研究中, Hertz 垂向接触理论体系常被应用于法向应力场的数值求解, 而基于 Fastrip 方法的切向理论则主要解决接触斑黏滑区域的分布特性分析。Kik-Piotrowski 所提出的虚拟渗透理论, 其核心在于设想轮轨之间发生相互穿透, 在接触点引发形变, 从而形成虚拟渗透区域与轮轨接触区域。该理论进一步假定, 法向接触压力 P 在车轮行进方向上呈现出半椭圆形的分布特征, 接触压力分布为

$$p(x, y) = \frac{P_0}{x_1(0)} \sqrt{x_1^2(y) - x^2} \quad (1)$$

式中: P_0 为接触斑内最大的接触压力, $x_1(0)$ 为在 $y = 0$ 时接触斑纵向长度之半。

总的法向载荷 N 可通过对法向接触压力在整个接触斑内进行积分得到, 其表达式为

$$N = \frac{P_0}{x_1(0)} \int_{y_r}^{y_1} \int_{x_r}^{x_1} \sqrt{x_1^2(y) - x^2} dx dy \quad (2)$$

利用 Boussinesq's 影响函数来描述接触斑中心点 $(0, 0)$ 处的法向变形为

$$\omega_0 = \frac{1 - \sigma^2}{\pi E} \frac{P_0}{x_1(0)} \int_{y_r}^{y_1} \int_{x_r}^{x_1} \frac{\sqrt{x_1^2(y) - x^2}}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy \quad (3)$$

式中: σ 为泊松比, E 为杨氏模量。

由于接触点处的渗透量 $\delta = 2\omega_0$, 由式(5) ~ (6) 得到法向载荷 N 和法向接触压力 P_0 为

$$N = \frac{\pi E \delta}{2(1 - \sigma^2)} \frac{\int_{y_r}^{y_1} \int_{x_r}^{x_1} \sqrt{x_1^2(y) - x^2} dx dy}{\int_{y_r}^{y_1} \int_{x_r}^{x_1} \frac{\sqrt{x_1^2(y) - x^2}}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy} \quad (4)$$

$$P_0 = \frac{N \sqrt{2R\delta}}{\int_{y_r}^{y_1} \int_{x_r}^{x_1} \sqrt{x_1^2(y) - x^2} dx dy} \quad (5)$$

式中: R 为车轮的半径。

1.3 Archard 车轮磨耗模型

Archard 磨耗模型^[22]于 1953 年提出, 是应用最广泛的材料磨损计算模型, 采用 Archard 模型计算材料磨耗, 假定车轮磨耗体积 W 与磨耗功 A 呈线性关系:

$$W = k_v A \quad (6)$$

$$k_v = \frac{k_m}{\rho} \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$W = k_v \frac{N_s}{H} \quad (8)$$

式中: k_v 为体积磨耗系数, k_m 为质量磨耗系数, ρ 为材料密度, N 为法向接触压力, s 为滑动距离, H 为材料硬度。

1.4 滚动接触疲劳有限元计算方法

基于 UM 软件内置的有限元模块, 采用弹塑性材料模型模拟轮轨接触区的应力应变响应。具体步骤如下:

1) 网格划分: 轮轨接触斑区域采用精细化六面体网格(最小单元尺寸 0.5 mm), 非接触区采用四面体过渡网格。

2) 载荷加载: 将多体动力学仿真输出的全局接触参数(法向力、切向力、蠕滑率)作为边界条件, 施加至接触斑区域。

3) 疲劳累积模型: 采用疲劳准则计算接触应力幅值(smith watson topper, SWT), 结合 Miner 线性累积损伤理论预测裂纹萌生寿命, 公式为

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (9)$$

式中: n_i 为第 i 次载荷循环次数, N_i 为对应应力幅下的疲劳寿命。

4) 损伤输出: 通过 UM 后处理模块提取接触斑的等效损伤云图, 并统计最大损伤值。

2 不同客流荷载对车轮磨耗的影响分析

2.1 C 型曲线车轮轮缘磨耗发展规律

仿真过程中假定列车往返在设定的线路, 因此同一车轴的左右车轮磨耗可视为近似相同, 只需研究一侧即可。将列车一侧车轮依次命名为 1~4 号位车轮, 七种工况下地铁车轮轮缘磨耗的发展规律如图 1 所示。

由图 1(a) 可知, 1、4 位车轮轮缘磨耗随客流荷载发展规律分为三个阶段, 第一阶段是新轮上道后立即产生微量磨耗(约 0.02~0.05 mm/10⁴ km), 但受初始轮轨型面匹配影响, 磨耗速率在 2~3 万 km 后才显著提升。第二阶段以载重从大到小的顺序先后产生轮缘磨耗, 随行驶里程呈线性发展。当行驶里程至 6 万 km 左右, 进入第三阶段, 轮缘磨耗发展速率比第二阶段减慢, 当列车运行约 10 万 km 时, 空载和满载时磨耗值分别约为 1.22、1.68 mm。第二、三阶段发展规律经拟合后近似线性函数发展, 轮缘磨耗先是随行驶里程快速增加, 随后增长速度变缓。

由图 1(b) 可知, 2、3 位车轮轮缘磨耗发展规律分两个阶段。第一阶段磨耗值为 0 时, 行驶里程约

4.5 万 km 时,满载列车先产生磨耗。此后进入第二阶段,呈线性增长,其扩展速率随客流载重的增加而增加,最小(空载)与最大(满载)扩展速率分别约为 0.16、0.21 mm/10⁴ km。

将车轮 1、4 位车轮第二、三阶段和 2、3 位车轮第二阶段发展规律分别进行线性拟合,发展速率如图 2 所示。

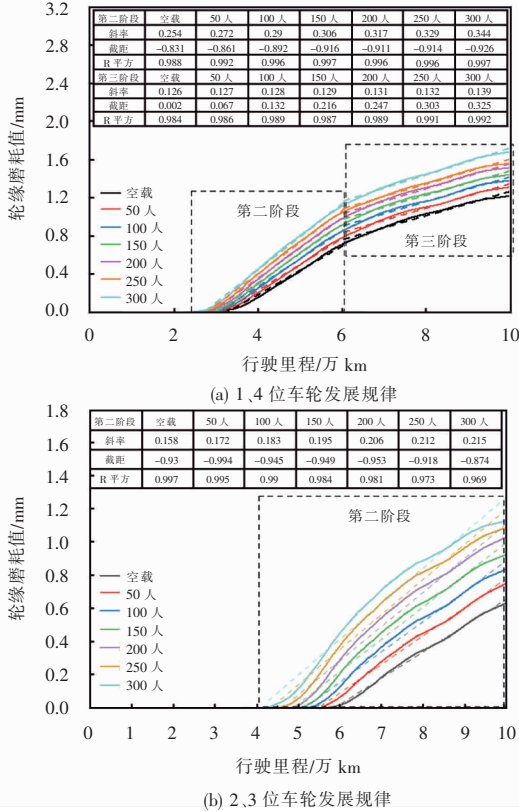


图 1 不同客流荷载下轮缘磨耗发展规律

Fig. 1 Development law of flange wear under different passenger flow loads

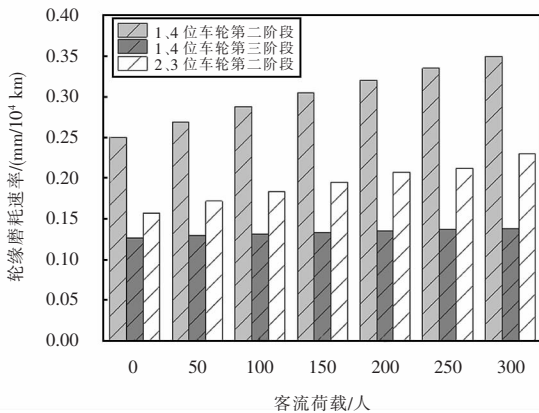


图 2 不同客流荷载下车轮轮缘磨耗发展速率

Fig. 2 Development rate of wheel flange wear under different passenger flow loads

由图 2 可知,车轮轮缘磨耗速率随着客流载重的增加而增加,其中空载时发展速率最小,满载时最大。客流载重对 1、4 位车轮磨耗速率影响要大于对 2、3 位车轮。1、4 位车轮轮缘磨耗第二阶段速率发展最快,空载与满载分别约为 0.254、0.344 mm/10⁴ km; 2、3 位车轮磨耗速率空载与满载分别约为 0.158、0.215 mm/10⁴ km; 1、4 位车轮轮缘磨耗第三阶段速率发展最慢,最小(空载)与最大(满载)发展速率分别约为 0.126、0.139 mm/10⁴ km。

2.2 C型曲线车轮踏面磨耗发展规律

列车在曲线运行时,车轮不仅会产生轮缘磨耗,还会产生踏面磨耗。随着车轮踏面轮廓因磨损而发生改变,轮轨接触的几何特性也会相应调整,从而对列车的动态行为等方面带来一定程度的改变。不同客流荷载作用下车轮踏面磨耗发展规律如图 3 所示。

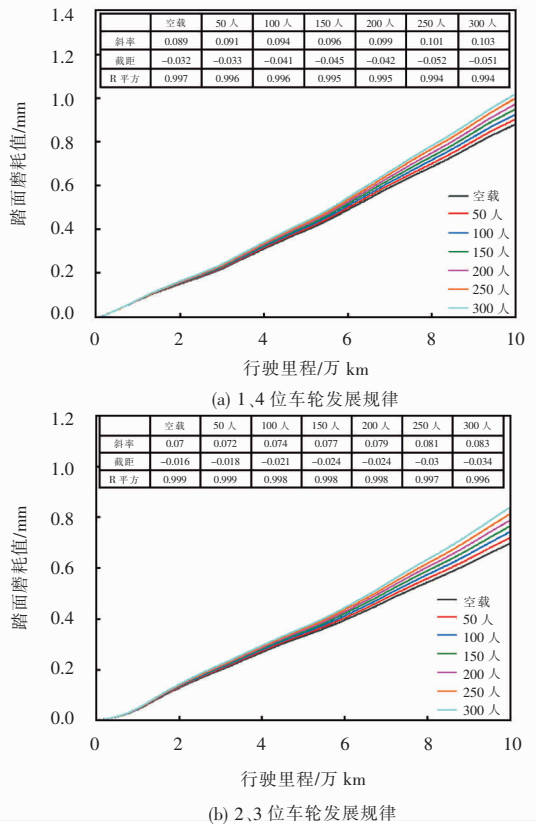


图 3 不同客流荷载下踏面磨耗发展规律

Fig. 3 Development law of tread wear under different passenger flow loads

由图 3 可知,1、4 位和 2、3 位车轮踏面磨耗的发展规律相似,列车运行初期便产生了踏面磨耗,磨耗值随行驶里程的增加而增加,列车行驶里程约 6 万 km 后,客流荷载对踏面磨耗的影响逐渐增大,此

时1、4和2、3位车轮空载、满载时磨耗值分别约为0.49、0.40 mm和0.55、0.44 mm。列车空载时磨耗速率最小,满载时最大。列车行驶相同里程时,客流荷载越大,产生踏面磨耗越大;不同客流荷载的列车产生相同的磨耗值时,客流荷载越小,行驶里程越大。与轮缘磨耗相比,客流载重对踏面磨耗的影响较小。根据拟合方程得出车轮的发展速率如图4所示。

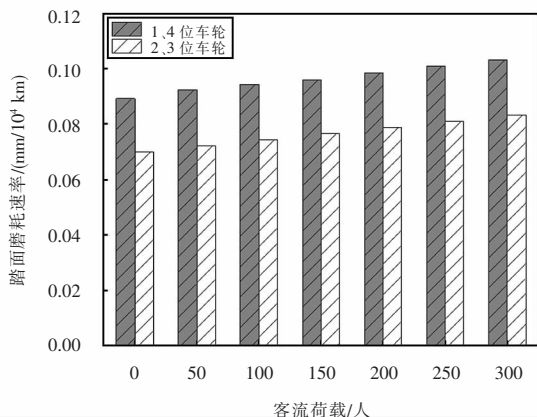


图4 不同客流荷载下车轮踏面磨耗发展速率

Fig. 4 Development rate of wheel tread wear under different passenger flow loads

由图4可知,车轮踏面磨耗速率都随着客流载重的增加而增加,其中空载时磨耗速率最小,满载时最大。客流荷载对1、4位车轮踏面磨耗速率影响比2、3位车轮大。1、4位车轮发展速率最快,空载时和满载时分别约为0.089、0.103 mm/10⁴ km;2、3位车轮踏面磨耗发展速率最慢,空载时和满载时分别约为0.07、0.083 mm/10⁴ km。

2.3 直线车轮磨耗发展规律

列车在直线上行驶时,只产生踏面磨耗且同一侧1~4位车轮产生的磨耗值相同。不同客流荷载下列车直线行驶产生的踏面磨耗发展规律如图5所示。

从图5可看出,列车直线行驶产生的踏面磨耗随行驶里程的增加呈现三个阶段。第一阶段是新轮上道至行驶里程约10万km时,此阶段踏面磨耗随着行驶里程的增加而缓慢增加,且客流荷载对踏面磨耗的影响较小。第二阶段是行驶里程约10万km~15万km之间,这一阶段踏面磨耗随行驶里程的增长速度加快,客流荷载对踏面磨耗的影响也逐渐增大。列车运行15万km时,空载和满载磨耗值分别约为0.86、1.524 mm。第三阶段是列车运行约15万km之后,此阶段踏面磨耗发展速率逐渐变缓,当

行驶里程达20万km时,列车空载和满载时磨耗值分别约为1.206、2.134 mm。通过对车轮踏面磨耗规律的线性拟合,得出不同客流荷载下车轮踏面磨耗发展速率,如图6所示。

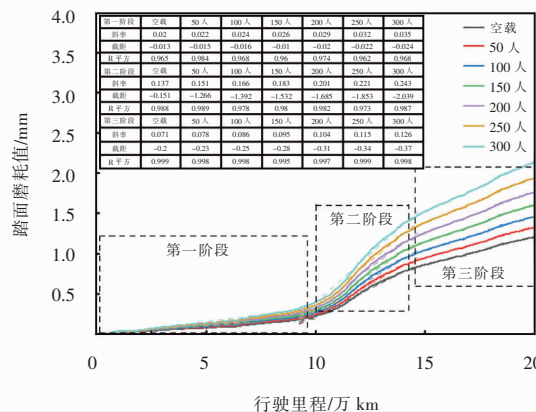


图5 不同客流荷载下踏面磨耗发展规律

Fig. 5 Development law of tread wear under different passenger flow loads

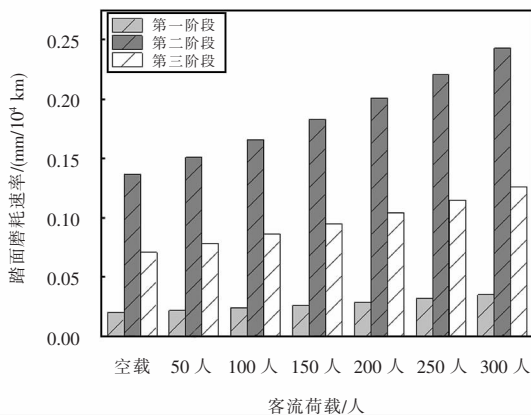


图6 不同客流荷载下车轮踏面磨耗发展速率

Fig. 6 Development rate of wheel tread wear under different passenger flow loads

由图可知,车轮踏面磨耗速率随着客流载重的增加而增加,客流荷载对第一阶段的影响最小,对第二阶段的影响最大。其中,第一阶段、第二阶段、第三阶段空载和满载时磨耗速率分别为0.02和0.035 mm/10⁴ km、0.137和0.243 mm/10⁴ km、0.071和0.126 mm/10⁴ km。

3 客流载重对车轮滚动接触疲劳的影响分析

3.1 曲线滚动接触疲劳发展规律

轮轨系统中的磨耗与滚动接触疲劳同时存在、共同发展、但是也相互影响,两者都影响着车轮型面服役寿命,客流载重是否对接触疲劳的萌生产生起到加速作用有待进一步的研究。

基于仿真模型,采用车轮初始型面,利用 UM RCF of Rails 模块分析不同客流荷载下滚动接触疲劳的变化规律。对不同客流荷载作用下列车在 C 型曲线行驶 15 万 km 车轮滚动接触疲劳进行分析,如图 7 所示。由图 7 可知,车轮疲劳裂纹的产生区域相对固定,主要集中在轮缘横向 -7~27 mm 区间内。表明客流载重波动并不会导致轮轨接触带(即潜在疲劳区域)发生位移。车轮的疲劳累积效应与载客量呈显著正相关,随着乘客数量的增加,车轮的疲劳损伤程度呈现上升趋势。

从图中可以看出车轮滚动接触疲劳损伤指数最大值受客流载重的影响较大,客流荷载越大,接触疲劳损伤指数最大值也逐渐增大。其中,空载时接触疲劳指数最小,约为 6.318,满载时接触疲劳指数最大,约为 7.676。

踏面中心区域,由于踏面磨耗导致轮廓凹陷,接触斑向两侧扩散,加剧局部应力波动。客流荷载增大会扩大应力分布范围,进一步加剧受力不均,因此与列车在曲线行驶的滚动接触疲劳损伤值相比,直线产生的 RCF 损伤值要比曲线大。

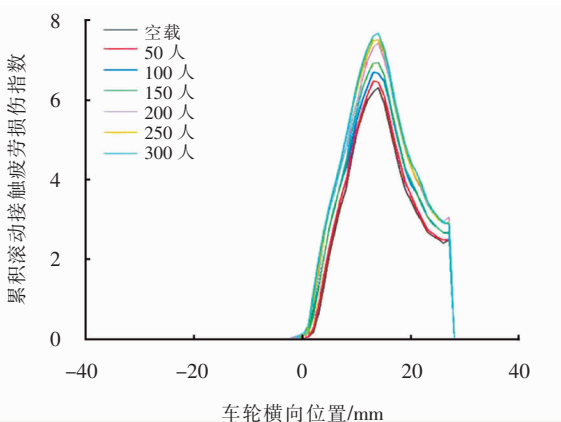


图 7 客流荷载对车轮滚动接触疲劳的影响

Fig. 7 Effect of passenger flow load on wheel rolling contact fatigue

列车行驶 15 万 km 空载和满载时对车轮滚动接触疲劳损伤的影响,如图 8 所示。

由图 8 可知,空载时疲劳损伤指数最大值约为 6.318,满载时疲劳损伤指数最大值约为 7.676。由空载变满载时,最大损伤范围变大。

3.2 直线滚动接触疲劳发展规律

列车直线行驶时,客流载重对车轮滚动接触疲劳的影响如图 9 所示。由图可知,车轮疲劳裂纹的产生区域相对固定,主要集中在轮缘横向 -7~27 mm 区间内。车轮疲劳累积效应与载客量的关系与曲线规律相同。

由图可知,列车在直线行驶时,客流载重对车轮接触疲劳损伤最大值的影响稍小,但也随着客流载重的增加而增加。其中,空载时约为 13.565,满载时约为 24.031。直线行驶时,轮轨接触斑主要位于

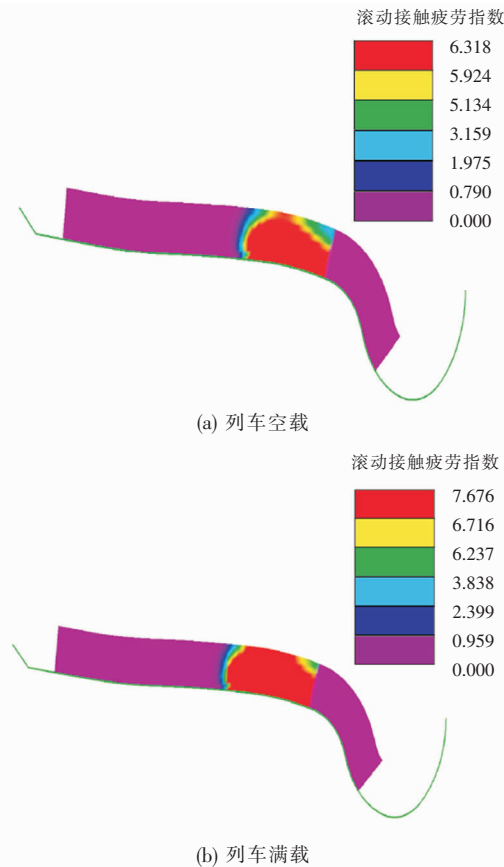


图 8 客流荷载对车轮滚动接触疲劳的影响

Fig. 8 Effect of passenger flow load on wheel rolling contact fatigue

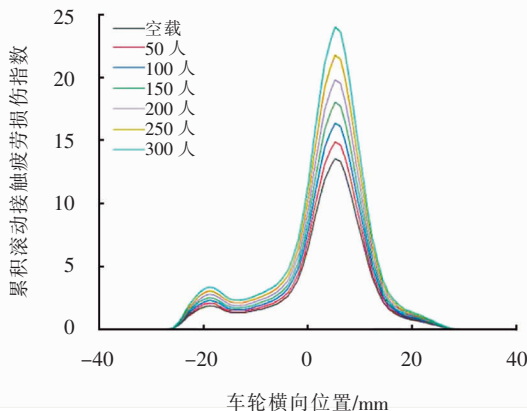


图 9 客流荷载对车轮滚动接触疲劳的影响

Fig. 9 Effect of passenger flow load on wheel rolling contact fatigue

列车行驶 15 万 km 空载和满载时对车轮滚动

接触疲劳损伤的影响,如图10所示。

由图10可知,空载时疲劳损伤指数最大值约为13.565,满载时疲劳损伤指数最大值约为24.031。直线上行驶时,空载到满载,最大损伤范围逐渐变大。与曲线损伤变化相比,直线变化的范围更大。

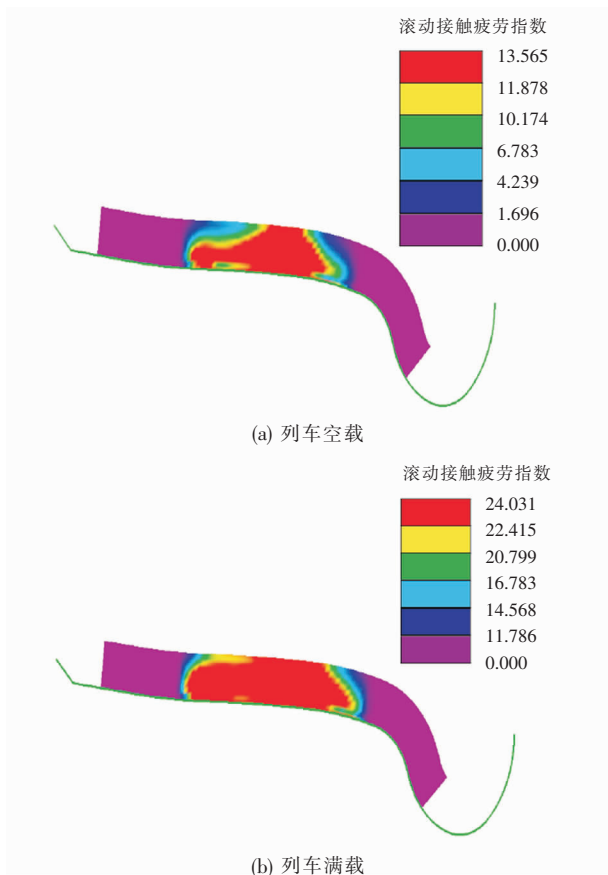


图10 客流荷载对车轮滚动接触疲劳的影响

Fig. 10 Effect of passenger flow load on wheel rolling contact fatigue

4 结论

1) 在C型曲线和直线线路条件下,车轮磨耗与客流荷载相关。在相同的行驶里程下,客流荷载越大,C型曲线车轮产生的轮缘磨耗和踏面磨耗越大,直线车轮不产生轮缘磨耗,产生的踏面磨耗与C型曲线车轮发展规律相似。此外,车轮磨耗也与列车行驶里程相关,行驶里程越大,车轮磨耗越大。

2) C型曲线下,客流载重对1、4位车轮轮缘和踏面磨耗速率影响都要大于2、3位车轮。客流载重对直线车轮磨耗速率的影响呈现由慢到快随后变缓的趋势。

3) 无论在曲线还是直线轨道上,车轮疲劳损伤

的分布区域相对固定。具体而言,曲线段车轮损伤集中在横向 $-7\sim 27$ mm区间,而直线段则分布在 $-26\sim 27$ mm范围内。这说明客流量的变化并不会显著改变车轮的疲劳损伤区域,而且直线轨道上的车轮损伤范围较曲线轨道更为广泛。车轮的累积疲劳损伤值受客流荷载的影响较大,随着客流荷载的增大,车轮疲劳损伤值逐渐增大。若不及时进行对列车车轮维护检测与镟轮处理,将导致轮对耐久性显著下降,同时也会对列车的高速行驶稳定性构成潜在威胁。

参考文献:

- [1] 马静静. 上海轨道交通1号线01A07型列车车轮轮缘异常磨耗分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023(增刊1): 69-73.
- [2] 刘洋, 周珏凯. 重庆市轨道交通1号线车轮使用寿命的探索分析[J]. 现代城市轨道交通, 2021(9): 22-26.
- [3] 李涛, 刘志远, 赵卓, 等. 城市轨道交通车辆车轮轮缘严重磨耗分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(11): 74-77.
- [4] 彭峰, 韩玉龙, 杜岳明, 等. 重载钢轨滚动接触疲劳现场观测与数值模拟[J]. 包钢科技, 2023, 49(6): 51-59.
- [5] FRÖHLING R, SPANGENBERG U, HETTASCH G. Wheel/rail contact geometry assessment to limit rolling contact fatigue initiation at high axle loads[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(6): 319-334.
- [6] 郝凯, 刘鹏飞, 王晨, 等. 曲线占比权重对重载机车车轮磨耗影响[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(4): 171-178.
- [7] 杜彬, 张浩, 汪群生, 等. 车轮硬度对重载铁路货车车轮磨耗的影响[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 104-108.
- [8] LI X, WANG Y X, GAO P, et al. Research on the wheel wear and rolling contact fatigue of metro vehicle induced by the rail corrugation[J]. Tribology Transactions, 2024, 67(6): 1168-1179.
- [9] 王红兵, 丁旺才, 宋杨法, 等. 轮径差对车轮踏面磨耗和滚动接触疲劳的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1277-1288.
- [10] XU J, WANG P, WANG L, et al. Effects of profile wear on wheel-rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(1): 1687814015623696.
- [11] 刘永乾, 任尊松, 吴潇, 等. 钢轨打磨对小半径曲线钢轨滚动接触疲劳的影响研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(8): 110-117.

- [10] 朱晶,郑文忠,谢礼立,等.不同纤维增强碱矿渣胶凝材料高温后力学性能试验研究[J].工业建筑,2019,49(5):109-114.
- [11] 缪贵福.玄武岩纤维长度对碱激发—矿渣砂浆性能的影响[J].山西建筑,2020,46(12):1-3.
- [12] 苏英,王志虎,王迎斌,等.纤维增韧碱矿渣混凝土收缩性能研究[J].武汉理工大学学报,2015,37(11):32-36.
- [13] RANJBAR N,ZHANG M. Fiber-reinforced geopolymer composites: a review[J]. Cement and Concrete Composites,2020,107:103498.
- [14] SICILIAN U C C S,ZHAO J T,TRINDADE A C C, et al. Influence of curing temperature and pressure on the mechanical and microstructural development of metakaolin-based geopolymers[J]. Construction and Building Materials,2024,424:135852.
- [15] GUO G, LV C L, LIU J, et al. Properties of fiber-reinforced one-part geopolymers: a review[J]. Polymers, 2022,14(16):3333.
- [16] SHOA EI P,GHASSEMI P,AMERI F, et al. Comparative study on the effect of fiber type and content on the fire resistance of alkali-activated slag composites [J]. Construction and Building Materials,2021,288:123136.
- [17] HE J,ZHANG G D,HOU S, et al. Geopolymer-based smart adhesives for infrastructure health monitoring: concept and feasibility[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2011,23(2):100-109.
- [18] BALL K,LEE Y,FURTADO C, et al. Gaining mechanistic insight into key factors contributing to crack path transition in particle toughened carbon fibre reinforced polymer composites using 3D X-ray computed tomography[J]. Energy Reports,2022,8:61-66.
- [19] BHUTTA A,FAROOQ M,BANTHIA N. Matrix hybridization using waste fuel ash and slag in alkali-activated composites and its influence on maturity of fiber-matrix bond[J]. Journal of Cleaner Production,2018,177:857-867.
- [20] AMRAN M,FEDIUK R,ABDELGADER H S, et al. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: a review [J]. Journal of Building Engineering,2022,45:103638.
- [21] WANG T,FAN X Q,GAO C S, et al. The influence of fiber on the mechanical properties of geopolymer concrete: a review[J]. Polymers,2023,15(4):827.

(责任编辑:赵冬艳)

(上接第102页)

- [12] NEJAD R M. Numerical study on rolling contact fatigue in rail steel under the influence of periodic overload[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115: 104624.
- [13] 贾劭飞,李英奇,周韶博,等.硬度匹配对轮轨滚动接触疲劳损伤行为的影响规律研究[J].材料导报,2024,38(增刊1):423-429.
- [14] 赵鸿耀.振动幅值和轴重对钢轨滚动接触疲劳损伤行为影响研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [15] 朱爱华,张财胜,杨建伟,等.不同制动工况下地铁车轮踏面磨耗研究[J].中国科技论文,2024,19(6):695-702,714.
- [16] 杨鹏军,李雪,蒲高,等.车轮多边形磨耗参数对地铁车辆动力学性能影响分析[J].机械制造与自动化,2024,53(1):33-39.
- [17] 杨岗,吴欣洲.车轮多边形磨耗对地铁列车蠕滑特性的影响分析[J].中国测试,2024,50(1):106-112.
- [18] 徐辉.车轮磨耗参数对车辆动力学性能影响分析及预测研究[D].成都:西南交通大学,2023.
- [19] 陈玮珂,张元海.车道荷载作用下箱梁应力放大系数的解析法研究[J].兰州交通大学学报,2024,43(2):1-6.
- [20] 李小静,张金伟,李子文.城市交通承载力系统动力学评估及多情景预测[J].兰州交通大学学报,2024,43(4):17-27.
- [21] 朱爱华.地铁车轮磨耗及其对动力学性能影响的研究[D].北京:北京交通大学,2020.
- [22] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.

(责任编辑:马廷麟)