DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.04.003
文章编号：1000-128X(2023)04-0018-08

长大坡道下高速车辆车轮滚动接触疲劳与磨耗仿真

周　橙[1]，郑　静[1]，乔青峰[1]，邹晓龙[1]，陈佳明[2]，陶功权[2]
（1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心，山东 青岛　266111；
2.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都　610031）

摘　要：文章建立车轮滚动接触疲劳预测模型和磨耗预测模型，分析长大坡道条件下坡度和车速对动车组车轮滚动接触疲劳和磨耗的影响。车轮滚动接触疲劳预测模型由车辆动力学模型和损伤函数组成，车轮磨耗预测模型包括车辆动力学模型、轮轨局部接触模型、磨耗模型、平滑与更新策略，并基于现场实测车轮磨耗结果对车轮磨耗预测模型进行修正和验证。结果表明：下坡线路是导致车轮滚动接触疲劳的主要工况，并且车速越高或下坡坡度越大，车轮越容易萌生滚动接触疲劳；车辆直线运行时疲劳裂纹萌生位置基本在距离名义滚动圆外侧6～9 mm内，疲劳裂纹萌生角度基本在−10～10 °。无论是上坡还是下坡，坡度越大，车轮磨耗越大，30‰坡度的上坡工况车轮磨耗面积约是−30‰坡度的下坡工况的1.85倍。在相同坡度条件下，对于上坡工况，车轮磨耗随着车速的增大而增大，而对于下坡工况，车速对车轮磨耗影响较小。

关键词：长大坡道；动车组；车轮滚动接触疲劳；车轮磨耗预测；磨耗模型；高速铁路
中图分类号：U292.91+4；U270.331+.1　　**文献标识码：**A

Investigation into rolling contact fatigue and wear of high-speed train wheels on long steep slope track

ZHOU Chen[1], ZHENG Jing[1], QIAO Qingfeng[1], ZOU Xiaolong[1], CHEN Jiaming[2], TAO Gongquan[2]

(1. Technical Center, CRRC Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China;
2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: A rolling contact fatigue prediction model and a wear prediction model were established to analyze the influence of slope and speed on the rolling contact fatigue and wear of electric multiple unit (EMU) wheels on long steep slope track. The wheel rolling contact fatigue prediction model was composed of a vehicle dynamics model and a damage function. The wheel wear prediction model included a vehicle dynamics model, a wheel-rail local contact model, a wear model, and smoothing and updating strategy. The wheel wear prediction model was modified and verified based on the field measured wheel wear results. The results show that downhill is the main case of wheel rolling contact fatigue, and the higher the speed or downhill slope, the more likely the wheel initiate rolling contact fatigue. When the vehicle runs in a straight line, the fatigue crack initiation position is basically within the range of 6 to 9 mm from the outside of the nominal rolling circle of the wheel, and the fatigue crack initiation angle is basically between −10° to10°. Whether uphill or downhill, the greater the slope, the greater the wheel wear. The wear area of the wheels on an uphill condition with a slope of 30‰ is approximately 1.85 times that of a downhill condition with a slope of −30‰. Under the same slope conditions, for uphill cases, wheel wear increases with the increase of vehicle speed; for downhill cases, vehicle speed has less effect on wheel wear.

基金项目：国家自然科学基金项目(U21A20167)；中国博士后科学基金特别资助项目（2021T140571）；中国科协青年人才托举工程项目（2022QNRC001）；中国中车股份有限公司科技研究开发计划项目（2020CDB195）
通信作者：陶功权（1989—），男，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事轮轨关系方面的研究；E-mail: taogongquan@swjtu.edu.cn
引用格式：周橙, 郑静, 乔青峰, 等. 长大坡道下高速车辆车轮滚动接触疲劳与磨耗仿真[J]. 机车电传动, 2023(4): 18-25.
Citation: ZHOU Chen, ZHENG Jing, QIAO Qingfeng, et al. Investigation into rolling contact fatigue and wear of high-speed train wheels on long steep slope track[J]. Electric drive for locomotives,2023(4): 18-25.

Keywords: long steep slope; electric multiple unit; wheel rolling contact fatigue; wheel wear prediction; wear model; high-speed railway

0　引言

近年，我国高速铁路迅猛发展，已基本形成覆盖全国的高铁网络，目前运营版图仍在不断扩大。由于我国幅员辽阔，高速铁路地形条件和气候环境变化多样，部分地区（如西北或西南地区）受限于地形和地势条件，相关线路采用了坡度超过20‰的长大坡道，最大坡度达到30‰。相对于平直线路，动车组在长大坡道运行时所需的牵引/制动功率更大，并且需要长时间牵引/制动，导致轮轨接触界面环境更加恶劣，这无疑会加剧轮轨接触表面的损伤和磨耗，甚至影响行车安全。

目前，国内外学者多采用数值模型来研究轮轨滚动接触疲劳与磨耗。大多数学者基于损伤函数[1]和安定理论[2-3]建立轮轨滚动接触疲劳预测模型，而轮轨磨耗预测模型主要采用磨耗函数，其中比较具有代表性的是Archard磨耗模型[4]、USFD磨耗函数[5-7]等。文献[8]通过基于损伤函数建立的钢轨滚动接触疲劳预测模型，发现过曲线时较大的蠕滑力是导致地铁曲线高轨轨距角剥离掉块的主要原因。文献[9]通过损伤函数和安定理论建立车轮滚动接触疲劳预测模型研究分析车轮踏面损伤的原因，指出当车轮通过小半径曲线时，轮轨蠕滑力显著增大是导致车轮踏面剥离的主要原因。文献[10]基于损伤函数预测机车车轮的滚动接触疲劳，指出六轴机车在干噪条件下通过曲线时，车轮疲劳裂纹萌生速率约为八轴机车的1.2~2.5倍。文献[11]基于Archard磨耗模型建立车轮磨耗预测模型，研究发现线路轨底坡偏大和轮轨匹配不合理会导致车轮轮缘异常磨耗。文献[12-14]基于现场实测车轮磨耗结果对磨耗函数进行修正，采用修正后的磨耗函数进行车轮磨耗预测，仿真结果能与实测结果吻合较好。

以往的大多数针对车轮磨耗和滚动接触疲劳的研究主要集中在平直线路上，针对长大坡道条件下的研究较少，而长大坡道条件下列车需要更大的牵引/制动力，且作用时间长，对车轮损伤和磨耗影响很大。本文分别基于损伤函数和USFD磨耗函数建立车轮滚动接触疲劳预测模型和磨耗预测模型，探究长大坡道条件下坡度和车速对动车组车轮疲劳和磨耗的影响。

1　数值模型

1.1　车轮疲劳和磨耗预测流程

本文对车轮滚动接触疲劳和磨耗分别进行预测，车轮疲劳和磨耗预测流程如图1所示。车轮滚动接触疲劳预测模型由2部分组成——车辆系统动力学模型和损伤函数；车轮磨耗预测模型由4部分组成——车辆系统动力学模型、轮轨局部接触模型、磨耗模型、车轮型面平滑与更新策略。

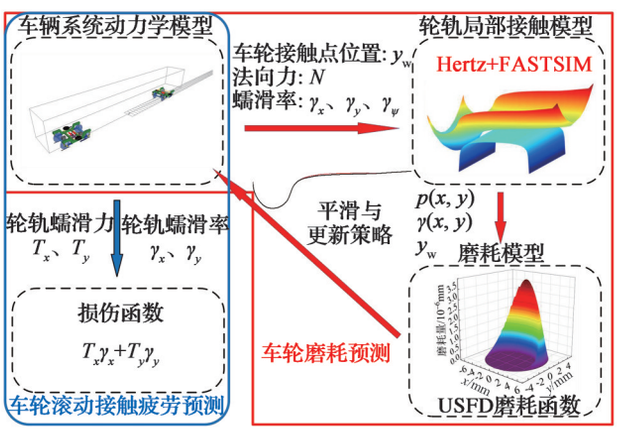


图1　车轮滚动接触疲劳和磨耗预测流程

Fig. 1　Flowchart of wheel rolling contact fatigue and wear prediction

车轮滚动接触疲劳预测具体流程为：采用车辆系统动力学模型进行仿真，得到轮轨纵向和横向蠕滑力T_x、T_y及其纵向和横向蠕滑率γ_x、γ_y，以及轮轨接触点位置和接触斑尺寸，然后基于损伤函数计算车轮的损伤量，从而预测车轮是否会萌生滚动接触疲劳。

车轮磨耗预测具体流程为：建立车辆系统动力学模型，设置仿真工况，计算得到轮轨接触参数，如车轮接触点横向位置y_w、法向力N、纵向蠕滑率γ_x、横向蠕滑率γ_y、自旋蠕滑率γ_ψ等；将得到的轮轨接触参数输入到轮轨局部接触模型中，分别采用Hertz接触理论和FASTSIM算法进行法向和切向接触求解，从而得到接触斑内法向和切向应力、局部蠕滑分布；然后采用USFD磨耗函数计算接触斑上磨耗分布；再根据车轮横向接触点位置y_w，将该次迭代内各个接触斑磨耗量进行叠加，得到车轮横向磨耗分布；最后利用移动平均平滑法对车轮横向磨耗分布进行平滑，按累计最大车辆运行里程达到5 000 km对车轮型面进行更新，基于三次样条插值平滑法将去除磨耗后的车轮廓形进行平滑，并导入到车辆系统动力学模型中进行下一次迭代计算；重复上述流程，进行多次迭代，直至满足仿真要求。

1.2　车辆系统动力学模型

基于多体动力学软件Simpack建立某动车组单节动车和拖车的多刚体动力学模型，如图2所示。模型均由1个车体、2个构架、4个轮对、8个转臂轴箱共15个刚体组成；轴箱仅考虑其点头自由度，其余刚体均具有6

个自由度，因此模型一共具有 50 个自由度；动车在运行过程中考虑牵引力/制动力的影响；一系悬挂组成包括一系钢簧、一系垂向减振器、轴箱转臂；二系悬挂组成包括 2 个空气弹簧、2 个二系横向减振器、2 个抗蛇行减振器、横向止挡、牵引拉杆、抗侧滚扭杆；模型考虑轮轨接触几何非线性特性、横向止挡的刚度非线性和减振器的阻尼非线性特性，并忽略钢轨的弹性变形。

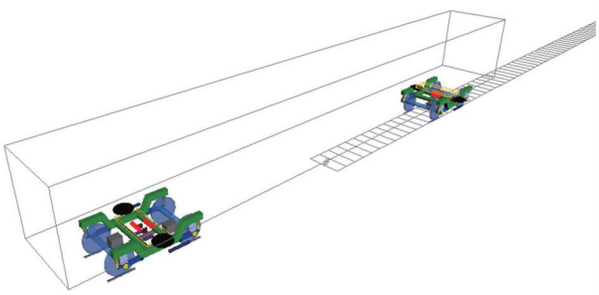


图 2　车辆系统动力学模型

Fig. 2　Vehicle system dynamics model

1.3　损伤函数

考虑轮轨纵向和横向蠕滑力或蠕滑率对车轮滚动接触疲劳的影响，以及车轮疲劳与磨耗的竞争关系，英国铁路安全与标准委员会（RSSB）提出了基于磨耗数的损伤函数[1]，其通过轮轨接触表面的磨耗数 T_γ 进行分析，磨耗数 T_γ 的计算表达式为

$$T_\gamma = T_x\gamma_x + T_y\gamma_y \tag{1}$$

式中：T_x, T_y 分别为纵向和横向蠕滑力；γ_x, γ_y 分别为纵向和横向蠕滑率。

损伤函数曲线如图 3 所示，图中实线为疲劳损伤发展速率曲线，虚线为磨耗发展速率曲线。当两者发展速率的代数和为负值时，此时车轮的损伤以磨耗为主，反之以疲劳为主。

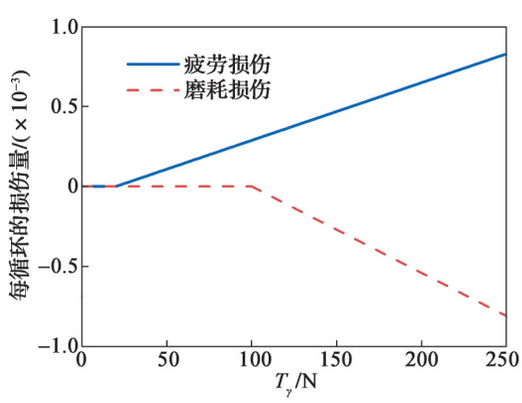


图 3　车轮损伤函数

Fig. 3　Damage function of the wheel

损伤函数关键参数取值是基于英国 R8E 车轮钢，并且经过了现场试验的验证。本文研究的动车组车轮材料为 ER8 钢，其材料特性与 R8E 钢相近，具体参数可参考文献[14]，本文损伤函数所采用的裂纹和磨耗起始值分别为 20.6 N 和 103 N，裂纹和磨耗发展速率与 R8E 车轮钢的数值一致。需要说明的是，只有当作用在车轮上的纵向蠕滑力方向与车辆运行方向相反时，才计入疲劳损伤，这主要是考虑了轮轨接触表面存在液体时加速了裂纹扩展[15]。

通过车辆系统动力学模型仿真得到的轮轨纵向和横向蠕滑力/蠕滑率为接触斑上的全局量，得到的损伤量也为接触斑上的总损伤量。要获取接触斑内损伤量沿横向位置的分布，通常需要对接触斑沿横向进行划分。假设接触斑内同一横向位置上沿纵向的损伤量保持一致，并且沿横向的分布为半椭圆分布。本文接触斑横轴离散宽度为 0.2 mm，则半椭圆的高度（即接触斑内损伤量横向分布峰值）为

$$h = \frac{D}{\pi b} \tag{2}$$

式中：D 为接触斑上的总损伤量；b 为接触斑短半轴长。

求解出半椭圆高度 h 后，根据半椭圆分布即可求出其他横向位置处的损伤量。

1.4　磨耗模型

USFD 磨耗函数已被广泛应用于车轮磨耗预测，该磨耗模型是基于 R8T 车轮钢，与 UIC60 900A 钢轨钢匹配，通过双盘对滚试验获得，并给出了车轮磨损率与接触斑内能量耗散之间的关系。USFD 磨耗函数磨损率曲线如图 4 所示。

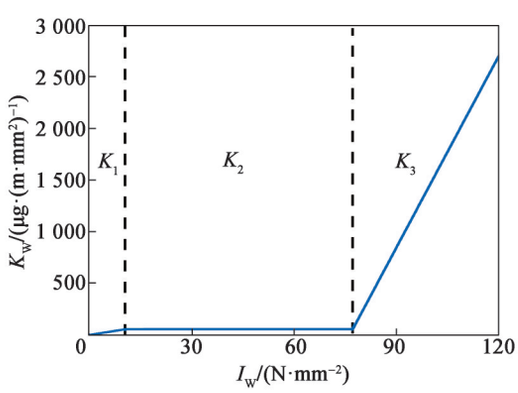


图 4　USFD 磨耗函数

Fig. 4　USFD wear function

根据磨损率变化规律将曲线划分为 3 个区域：轻微磨耗区（K_1）、严重磨耗区（K_2）和灾难性磨耗区（K_3），3 个区域磨损速率为

$$K_w = \begin{cases} 5.3I_w, & I_w < 10.4 \\ 55.0, & 10.4 \leqslant I_w \leqslant 77.2 \\ 61.9I_w - 4723.7, & I_w > 77.2 \end{cases} \tag{3}$$

式中：K_w 为磨损速率，表示接触斑单位接触面积滚动单位距离时材料的磨损质量，μg/(m·mm²)；I_w 为接触斑内单元格的摩擦功率，N/mm²。

I_w 可通过磨耗指数进行估算，计算公式为

$$I_w(x,y)=p(x,y)\cdot\gamma(x,y) \tag{4}$$

式中：$p(x,y)$, $\gamma(x,y)$分别为各单元格(x,y)内的切向应力和蠕滑率。

本文将接触斑网格密度划分为40×40，利用FASTSIM算法求得接触班内每个单元格的切向应力和蠕滑率，通过式(3)求得磨损速率K_w后，即可求得接触斑内各单元格(x,y)处的磨耗深度，其磨耗深度为

$$\delta_{f(l)}(x,y)=\frac{K_w}{\rho}\Delta x \tag{5}$$

式中：ρ为车轮材料密度，kg/m^3；Δx为接触斑单元格的纵向宽度；$f(l)$为关于采样点纵向位置的函数。

将接触斑内单元格的磨耗深度在纵向上进行叠加，可得到接触斑内横向磨耗分布，横向磨耗分布的计算公式为

$$\delta_{f(l)}(y)=\int_{-a(y)}^{+a(y)}\delta_{f(l)}(x,y)\mathrm{d}x \tag{6}$$

式中：$a(y)$为接触斑内每个条带纵向长度之半，$a(y)=a\sqrt{1-\left(y/b\right)^2}$。

考虑轮轨多点接触情况，计算完成所有采样点的接触斑横向磨耗分布。根据车轮接触点横向位置，将接触斑横向磨耗分布进行叠加得到该工况下的车轮磨耗量，车轮磨耗量为

$$W_{ij}(y)=\frac{d}{2\pi R}\int_{L_s}^{L_e}\delta_{f(l)}(y)\mathrm{d}l \tag{7}$$

式中：$W_{ij}(y)$为第i次迭代中第j个工况产生的车轮磨耗量；R为车轮半径；L_s和L_e分别为采样区间的开始位置和结束位置；d为采样点间距。

本文取d=0.2 m，即沿着车辆运行方向，每隔0.2 m提取轮轨接触斑上的接触参数计算接触斑上的磨耗，最后将车轮滚动1圈所获得的所有接触斑磨耗平均成1个接触斑磨耗。

1.5　车轮磨耗预测模型的修正与验证

由于USFD磨耗函数是针对于特定的轮轨材料建立的，并且是基于干燥的实验室环境条件获得的，与实际的轮轨服役环境有所差异，因此，在将USFD磨耗函数应用到本文所研究的动车组车轮上，需先根据实测车轮磨耗结果对USFD磨耗函数进行修正，使其能更真实地反映本文所研究的动车组车轮的磨耗规律。

本文采用该型动车组在国内某条客运专线的实测车轮磨耗结果对磨耗预测模型进行验证。进行车轮磨耗预测前需先对该客运专线线路进行调查统计，线路统计情况见表1。根据车轮磨耗调查结果，运行于该线路的动车/拖车车轮磨耗基本无差异，为提高计算效率，使用拖车模型对车轮磨耗预测模型进行验证，有关结果见图5、图6。仿真时单条工况线路总长设置为2 500 m，摩擦因数设为0.35，以线路中不同曲线半径占比作为加权因子将各个线路工况下的磨耗进行线性叠加。车速设置为250 km/h，线路不平顺采用美国6级谱，车轮初始型面为LMA标准型面，钢轨型面为CN60标准型面，仿真过程中不考虑钢轨的磨耗。

表1　线路统计结果

Table 1　Statistical results of railway line　　m

区间线路组成	曲线半径/m									直线
	4 000	4 500	5 000	5 500	6 000	7 000	8 000	9 000	10 000	
左曲线长度	7 371	1 539		2 447	2 896	12 256		18 023	1 969	
右曲线长度	2 923		926			10 183	6 384	31 969		
超高区间长度	125	110	90	100	95	80	70	65	55	
缓和曲线长度	420	380	340	310	280	240	210	190	170	
直线长度										121 664
左曲线占比/%	3.34	0.709		1.11	1.31	5.56		8.17	0.89	
右曲线占比/%	1.33		0.42			4.62	2.89	14.50		
直线占比/%										55.16

根据之前的讨论，USFD磨耗函数是在干燥的实验室环境条件下建立的，而实际的轮轨接触环境通常存在水、油污等环境介质，这将使车轮磨损率大大降低。因此，需对原始的USFD磨耗函数进行修正，本文的修正方法为对原始的USFD磨耗函数的3个区域都同乘以1个修正系数。经过多次仿真试验，当修正系数为0.62时，磨耗预测结果与实测结果吻合较好，车轮磨耗预测结果与实测结果对比如图5所示。图6给出了仿真得到的车轮廓形和磨耗随运行里程的变化趋势，由于设置的线路工况最小曲线半径为4 000 m，并且以直线工

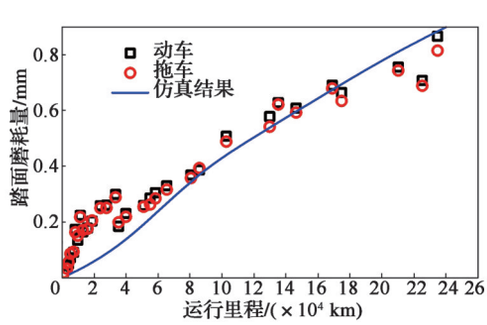


图5　车轮磨耗预测结果与实测结果对比

Fig. 5　Comparison between simulation and measurement results of wheel wear

况为主，故磨耗只出现在车轮踏面部位，磨耗峰值出现在名义滚动圆附近，车轮踏面磨耗速率约为 0.04 mm/10^4 km。

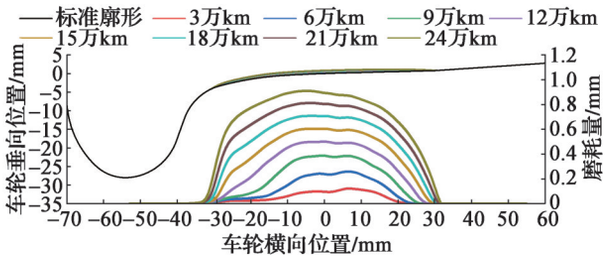


图6　车轮型面演变预测结果

Fig. 6　Prediction results of wheel profiles evolution

2　结果分析

2.1　仿真工况设置

本文所研究的长大坡道线路最大运行速度为 200 km/h，最大坡度为 30‰。以此为依据，模拟的车辆运行速度设置为 40~200 km/h，速度间隔为 20 km/h；坡度设置为–30‰~30‰（正值表示上坡，负值则表示下坡），坡度间隔为 5‰；在每个速度条件下均对不同坡度进行仿真；在仿真过程中车辆保持匀速运行；左右轨摩擦因数均取 0.35；线路不平顺采用美国 6 级谱；轮轨型面分别采用 LMA 标准型面和 CN60 标准型面。

2.2　牵引力/制动力设置

车辆在通过直线坡道时，除了受到基本阻力外，还会受到坡道附加阻力。坡道的坡度越大，则坡道附加阻力越大，因此车辆需提供更大的牵引力/制动力来维持车辆匀速运行。为了考虑牵引力/制动力的影响，本节所有仿真工况均采用单节动车模型。基本阻力 F_0 和坡道附加阻力 F_i 的计算公式如下[16]：

$$F_0=\left(0.58+0.00104v+0.00027v^2\right)\times M\times N\times g \tag{8}$$

$$F_i=i\times M\times N\times \mathrm{g} \tag{9}$$

式中：F_0, F_i 分别为基本阻力和坡道附加阻力，N；v 为车辆运行速度，km/h；M 为单节车辆质量，t；N 为车辆总数；g 为重力加速度，9.8 m/s^2；i 为坡度千分数。

单节动车在直线坡道上运行时，若要保持匀速运行，则每根车轴上所需的牵引/制动转矩大小为

$$T=\frac{F_0+F_i}{C_{\mathrm{M}}}\times\left(C_{\mathrm{M}}+C_{\mathrm{T}}\right)\times\frac{R}{4} \tag{10}$$

式中：T 为转矩，N·m；C_{M} 和 C_{T} 分别为动车和拖车数量。

2.3　坡度和车速对车轮滚动接触疲劳的影响

通过仿真计算发现，直线段下坡工况容易发生车轮滚动接触疲劳。图 7 给出了车速 200 km/h、坡度 –30‰ 的直线下坡工况下单节动车不同轮对的损伤量横向分布结果，图中数字“1”“2”“3”“4”代表轮对序号，“L”“R”分别表示左轮和右轮。从图 7 可知，1~4 位轮对的损伤量均为正值，表示该工况下车轮以疲劳损伤为主，其中 1 位轮对的疲劳损伤量最大，即滚动接触疲劳萌生的概率最大。

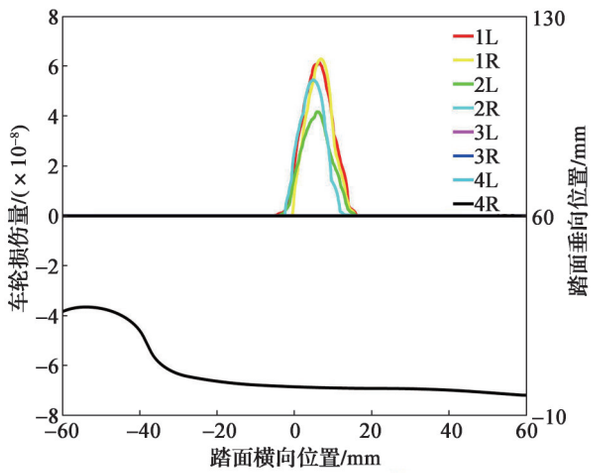


图7　不同轮对的损伤量横向分布结果

Fig. 7　Lateral distribution results of damage amount for different wheelsets

当累计的疲劳损伤量达到 1 时，一般认为此时开始萌生滚动接触疲劳裂纹，疲劳裂纹萌生里程计算表达式为

$$L=2\pi\mathrm{R}/(S\times10^{-7}) \tag{11}$$

式中：L 为疲劳裂纹萌生里程；S 为疲劳损伤峰值。

高速动车组的车轮镟修里程一般为 20 万 km 左右，当车轮镟修里程小于疲劳裂纹萌生里程时，认为车轮不会萌生疲劳裂纹。通常实际的直线坡道线路由多种坡度线路组成，车辆可能以不同速度通过坡道，最极端的情况就是车辆以相同的速度通过单一坡度的坡道，车辆往返运行时，此时相当于单一工况占比为 50%。当单一工况占比分别为 50%、40%、30%、20% 时，由式(11)可反推出其对应的临界疲劳损伤峰值分别为 2.7×10^{-8}、3.4×10^{-8}、4.5×10^{-8}、6.8×10^{-8}。由于 1 位轮对的疲劳损伤量最大，以 1R 车轮疲劳损伤峰值为例，图 8 给出了车辆以不同的速度通过不同坡度的直线

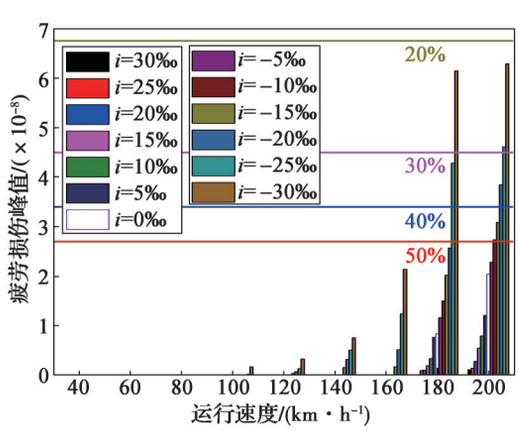
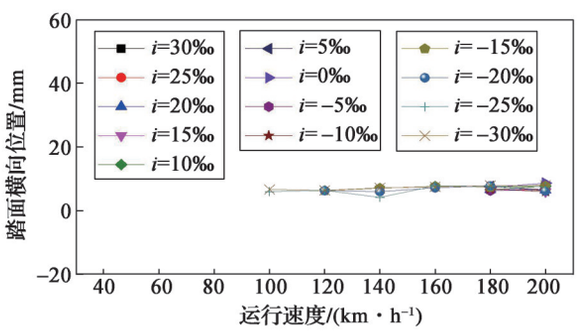


图8　不同条件下 1R 车轮疲劳损伤峰值统计结果

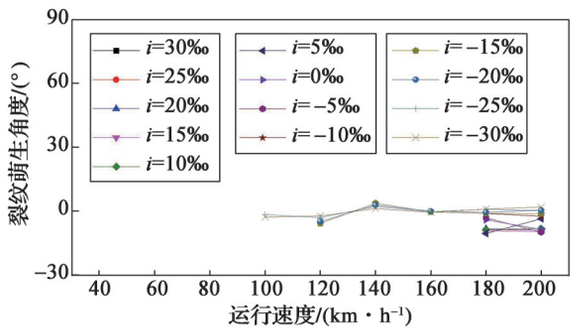
Fig. 8　Statistical results of peak fatigue damage of 1R wheel under different conditions

坡道时车轮疲劳损伤峰值结果。20%、30%、40%、50%的水平直线表示不同的单一工况占比会导致车轮萌生疲劳裂纹的临界疲劳损伤峰值，假设占比以外的工况车轮没有磨耗，则认为水平直线以上的工况在该占比条件下车轮会萌生疲劳裂纹。从图8可知，在其他条件相同情况下，车速越大，疲劳损伤峰值越大；在其他条件相同情况下，下坡坡度越大，疲劳损伤峰值越大，而上坡坡度越大，疲劳损伤峰值越小，这是由于在下坡工况中下坡坡度越大，车辆为了维持匀速所需的制动力越大，从而导致反向纵向蠕滑力越大，而上坡工况正好相反。

图9分别给出了图8中所有疲劳损伤峰值大于0的工况所对应的疲劳裂纹萌生位置和角度预测结果。从图9可知，疲劳裂纹萌生位置基本在距离名义滚动圆外侧6~9 mm内，根据DEUCE[17]的分类，属于III类疲劳，并且车速和坡度的改变几乎对萌生位置没有影响；疲劳裂纹与蠕滑力合力的方向相互垂直，据此可以求出疲劳裂纹萌生角度，从图中可以发现所有工况下疲劳裂纹萌生角度基本在–10° ~ 10°。



(a) 疲劳裂纹萌生位置



(b) 疲劳裂纹萌生角度

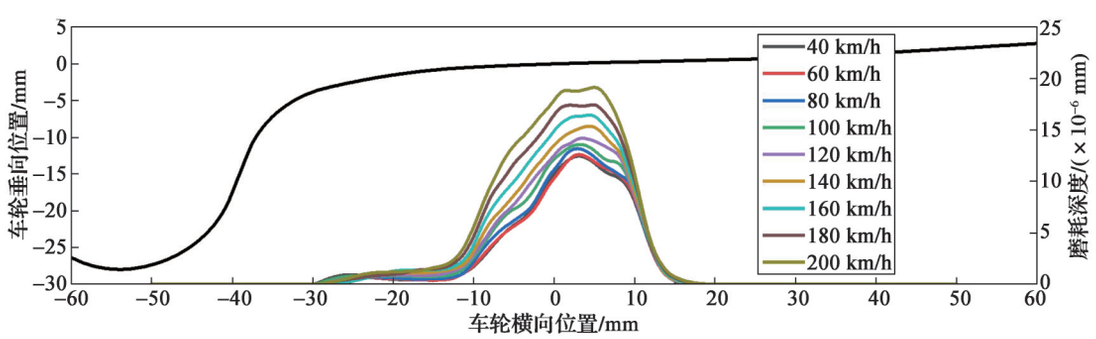
图9　疲劳裂纹萌生位置及角度预测结果

Fig. 9　Prediction results of fatigue crack initiation location and angle

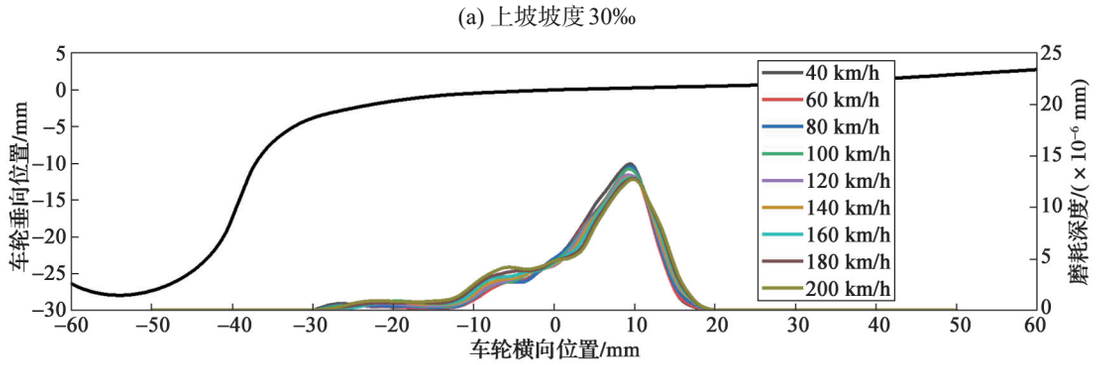
2.4　坡度和车速对车轮磨耗的影响

以该条线路最大坡度为例，图10分别给出了在该条线路最大坡度条件下（即上坡坡度为30‰，下坡坡度为–30‰）不同车速对车轮磨耗分布的影响。从图10可知，在上坡和下坡工况下车轮磨耗范围几乎一致；对于上坡工况，车轮最大磨耗深度均随着车速的增大而增大；对于下坡工况，在相同坡度下，车速对车轮最大磨耗深度以及磨耗分布影响较小；在相同坡度条件下，下坡工况得到的车轮最大磨耗深度比上坡工况小。

为了更直观地比较不同车速、坡度对车轮磨耗分



(a) 上坡坡度30‰



(b) 下坡坡度–30‰

图10　速度对车轮磨耗的影响

Fig. 10　Influence of speed on wheel wear

布的影响，对各个工况下得到车轮磨耗面积进行统计。车轮磨耗面积可通过对车轮磨耗分布沿横向位置积分得到，各个工况的车轮磨耗面积预测结果如图 11 所示。在图 11 中“圆柱体”表示下坡工况，“方体”表示上坡工况，不同颜色表示不同的坡度。以线路的最大坡度为例，上坡工况下车速 200 km/h 得到的车轮磨耗面积约是车速 40 km/h 的 1.77 倍；下坡工况下车速 200 km/h 得到的车轮磨耗面积约是车速 40 km/h 的 1.08 倍；车速 40 km/h 的上坡工况车轮磨耗面积约是下坡工况的 1.16 倍；车速 200 km/h 的上坡工况车轮磨耗面积约是下坡工况的 1.85 倍。以该线路的车辆最高运行速度为例，30‰ 坡度的上坡工况得到的车轮磨耗面积约是 5‰ 坡度的 1.89 倍；30‰ 坡度的下坡工况得到的车轮磨耗面积约是–5‰ 坡度下的 1.18 倍；5‰ 坡度的上坡工况车轮磨耗面积约是 5‰ 坡度的下坡工况的 1.16 倍；30‰ 坡度的上坡工况车轮磨耗面积约是 30‰ 坡度的下坡工况的 1.85 倍。同一速度下磨耗面积随线路坡度呈抛物线变化，200 km/h 时磨耗面积与坡度的变化关系公式为 $y=1.71\times10^{-4}+2.643\times10^{-6}x+1.101\times10^{-7}x^2$（$y$ 为磨耗面积，x 为坡度千分数）。

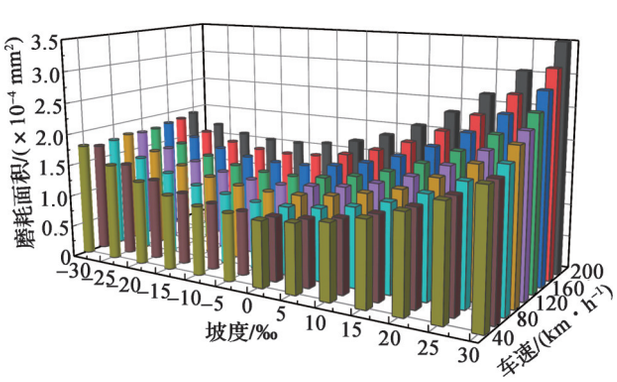


图 11　列车速度和线路坡度对车轮磨耗面积的影响

Fig. 11　Influence of train speed and slope on wheel wear area

3　结论

本文基于损伤函数和 USFD 磨耗函数分别建立车轮滚动接触疲劳和磨耗预测模型，分析长大坡道条件下坡度和车速对车轮滚动接触疲劳和磨耗的影响，得到以下结论：

① USFD 磨耗函数是在干燥的实验室环境下基于特定的轮轨材料建立的，直接采用原始的磨耗函数进行磨耗预测通常会高估轮轨磨耗，需根据实际的实测磨耗结果对其进行修正。

② 不同轮对之间疲劳损伤量有一定的差异，通常 1 位轮对上的疲劳损伤量较大。车速和坡度的改变几乎对滚动接触疲劳裂纹萌生位置没有影响，基本发生在车轮踏面中部，疲劳裂纹萌生角度基本在–10° ~ 10°。

③ 下坡线路工况是导致车轮滚动接触疲劳的主要工况。无论是上坡还是下坡，车速越大，车轮越容易萌生滚动接触疲劳；在其他条件相同情况下，下坡坡度越大，疲劳损伤峰值越大，而上坡坡度越大，疲劳损伤峰值越小。

④ 无论是上坡工况还是下坡工况，坡度越大车轮磨耗越大；在相同条件下，上坡工况车轮磨耗要大于下坡工况；对于上坡工况，车轮磨耗随着车速增大而增大，同一速度下磨耗面积随线路坡度呈抛物线变化；对于下坡工况，车速对车轮磨耗影响较小。

参考文献：

[1] TUNNA J, SINCLAIR J, PEREZ J. The development of a wheel wear and rolling contact fatigue model[R/OL]. (2007-09-25) [2023-03-21]. https://trid. trb. org/view. aspx? id=849760.

[2] JOHNSON K L. The strength of surfaces in rolling contact [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part C: Mechanical engineering science, 1989, 203(3): 151-163.

[3] BOWER A F, JOHNSON K L. Plastic flow and shakedown of the rail surface in repeated wheel-rail contact[J]. Wear, 1991, 144(1/2): 1-18.

[4] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of applied physics, 1953, 24(8): 981-988.

[5] BRAGHIN F, LEWIS R, DWYER-JOYCE R S, et al. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear[J]. Wear, 2006, 261(11/12): 1253-1264.

[6] LEWIS R, DWYER-JOYCE R S. Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part J: Journal of engineering tribology, 2004, 218(6): 467-478.

[7] LEWIS R, OLOFSSON U. Mapping rail wear regimes and transitions[J]. Wear, 2004, 257(7/8): 721-729.

[8] 梁喜仁, 陶功权, 陆文教, 等. 地铁钢轨滚动接触疲劳损伤研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2): 147-155.
LIANG Xiren, TAO Gongquan, LU Wenjiao, et al. Study on the rail rolling contact fatigue of subway[J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(2): 147-155.

[9] 陶功权, 王衡禹, 赵鑫, 等. 基于轮轨关系的车轮踏面损伤机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 23-29.
TAO Gongquan, WANG Hengyu, ZHAO Xin, et al. Research on wheel tread damage mechanism based on interaction of wheel and rail[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(18): 23-29.

[10] 刘永锋, 陶功权, 刘子通, 等. 轴式对大功率电力机车车轮第 3 类滚动接触疲劳的影响[J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 159-167.
LIU Yongfeng, TAO Gongquan, LIU Zitong, et al. Effects of axle configuration on third type of rolling contact fatigue of wheels of high-power AC locomotives[J]. Journal of mechanical engineering, 2022, 58(12): 159-167.

[11] 任德祥, 陶功权, 李伟, 等. 基于轮轨型面匹配数值模拟的地铁车轮异常磨耗原因分析[J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 191-199.
REN Dexiang, TAO Gongquan, LI Wei, et al. Investigation on abnormal wear of metro wheels through simulations of wheel/rail profile matching[J]. Journal of mechanical engineering, 2022, 58(10): 191-199.

[12] TAO Gongquan, DU Xing, ZHANG Heji, et al. Development and validation of a model for predicting wheel wear in high-speed trains[J]. Journal of Zhejiang university-science A, 2017, 18(8): 603-616.

[13] YE Yunguang, SUN Yu, SHI Dachuan, et al. A wheel wear prediction model of non-Hertzian wheel-rail contact considering wheelset yaw: comparison between simulated and field test results[J]. Wear, 2021, 474/475: 203715.

[14] 王玉光, 卢纯, 赵鑫, 等. 高速动车组车轮滚动接触疲劳观测与模拟研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 150-157.
WANG Yuguang, LU Chun, ZHAO Xin, et al. Rolling contact fatigue of Chinese high speed wheels: observations and simulations[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(4): 150-157.

[15] FLETCHER D I, HYDE P, KAPOOR A. Modelling and full-scale trials to investigate fluid pressurisation of rolling contact fatigue cracks[J]. Wear, 2008, 265(9/10): 1317-1324.

[16] 汪茜, 柏赟, 李佳杰, 等. 列车基本阻力参数在线标定方法[J]. 系统工程, 2018, 36(12): 147-151.
WANG Qian, BAI Yun, LI Jiajie, et al. Online calibration on the calculation parameters of trains basic resistance[J]. Systems engineering, 2018, 36(12): 147-151.

[17] DEUCE R. Wheel tread damage-an elementary guide[R]. Montreal: Bombardier Inc., 2007.

收稿日期：2023-05-08
修回日期：2023-07-01