

# 轴重 40 t 车辆车轮扁疤冲击振动特性研究

司道林<sup>1,2</sup>, 梁晨<sup>1,2</sup>, 张良威<sup>3</sup>, 王树国<sup>1,2</sup>, 王璞<sup>1,2</sup>

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081;

3. 中车长江车辆有限公司轨道交通货运装备湖北省工程实验室, 湖北 武汉 430200)

**摘要:** 建立轴重 40 t 车辆-轨道动力学模型, 采用变化车轮半径的方法模拟扁疤作用下的轮轨相互作用特征, 分析轮轨冲击动力荷载特性。结果表明, 车轮扁疤将激发出高频轮轨冲击荷载, 高频区能量占主导。扁疤临界速度作用下轮轨冲击荷载达到峰值, 扁疤越长, 临界速度越高, 扁疤长度为 10, 20, 30 和 40 mm 时临界速度分别为 30, 50, 70 和 80 km/h, 扁疤长度超过 50 mm 时, 临界速度大于重载车辆最高运行速度 100 km/h。高频区的轮轨荷载主要存在于轮轨界面, 不会引起钢轨变形, 频率在 850 Hz 以下时轮轨动荷载才能有效传至轨下基础, 根据轨枕设计极限荷载, 建议车轮扁疤长度不应超过 40 mm。

**关键词:** 轮轨冲击; 动力学; 重载铁路; 车轮扁疤; 轨道

**中图分类号:** U213.4<sup>+2</sup> **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)03-0729-06

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.03.023

## 引言

铁路货运运能大、成本低, 是国民经济发展的主要支柱。目前, 中国客货共线普速铁路主要开行轴重 21 t 和 23 t 车辆, 以大秦铁路、朔黄铁路为代表的运煤专线主要开行 25 t 轴重车辆, 并开行部分轴重 27 t 车辆。通过增加列车轴重提高运能、降低运输成本, 中国正着力发展轴重 27~30 t 车辆, 已研制了相应轨道结构设备, 并制定了相关技术标准, 在瓦日铁路、蒙华铁路中得到成功应用。美国、巴西和澳大利亚的货运轴重普遍在 35 t 以上, 并将轴重 40 t 铁路运输作为下一步研究目标。与国外相比, 中国货运铁路轴重明显偏低, 发展轴重 40 t 铁路技术、制定重载运输标准已势在必行, 这不仅为中国重载铁路发展奠定基础, 也符合“一带一路”倡议, 为实现中国重载铁路技术标准“走出去”的战略目标提供支撑。

研究轮轨间振动特性、荷载水平是发展大轴重技术的前提和基础, 这不仅为关键承载部件的设计提供荷载边界条件, 也为养护维修提供依据。车轮扁疤和钢轨接头会使轮轨间形成剧烈的冲击振动, 随着无缝线路技术的推广应用, 钢轨接头已不再是主要激振源, 而车轮扁疤更应引起关注, 其一旦形成, 不仅加速沿线工务设备损伤病害的形成, 而且可能导致轮轴、

轴承、承载鞍等关键部件短期内失效, 直接影响行车安全。因此, 本文将车轮扁疤为激振源开展 40 t 轴重重载铁路轮轨冲击荷载特性的研究。

近年来, 学者对扁疤的冲击原理、检测方法开展了研究。文献[1]研究车轮扁疤冲击的形成机理, 将车轮扁疤冲击换算为轮轨冲击速度, 以此模拟扁疤冲击效应。文献[2-3]以高速列车为例, 研究扁疤类型对轮轨冲击的影响规律, 根据轮轨冲击特性提出扁疤限值的计算方法。文献[4-5]研究了车轮扁疤的信号特征, 提出车轮扁疤识别和检测的方法。文献[6]研究北美大轴重重载车辆冲击荷载的形成原因。

既有车轮扁疤研究成果主要以高速铁路为主, 且研究焦点着重体现在轮轨冲击荷载的幅值, 而对冲击荷载在轨道中的传递特性研究较少。因此, 本文将建立 40 t 轴重重载车辆-轨道动力学模型, 计算车辆扁疤作用下轮轨冲击荷载, 分析其振动特性及在轨道中的传递规律, 提出大轴重运营条件下扁疤极限尺寸的建议值。

## 1 车辆-轨道动力学模型

### 1.1 车辆模型

轴重 40 t 车辆与既有轴重 25 t, 30 t 车辆结构特

征一致,仍采用三大件式转向架,车体荷载的传递路径、振动衰减方式相同。车体支承在摇枕的心盘和旁承上,车体和摇枕质量经摇枕两端枕簧(二系悬挂)传递至左、右两侧的侧架,每个侧架通过前后两端的轴箱定位胶垫(一系悬挂)与轮对承载鞍连接,将车辆荷载最终传递至轨道。摇枕可相对车体转动,在心盘和旁承处产生摩擦力,形成保证车辆稳定性的摩擦回转力矩。摇枕相对侧架产生垂向、横向振动时,在楔块表面产生摩擦力,衰减车辆振动。

采用NUCARS软件建立动力学模型。根据车辆主要结构部件的运动特征、荷载传递特点,模型由车体、摇枕、侧架、轮对4个主要运动部件构成,基于多体动力学理论<sup>[7]</sup>,车体、摇枕、侧架和轮对均具有独立的6个自由度,如表1所示。

表1 模型自由度选取

Tab. 1 Body freedoms in model

刚体	纵向	横移	垂向	侧滚	点头	摇头
车体	$X_c$	$Y_c$	$Z_c$	$\Phi_c$	$\theta_c$	$\Psi_c$
摇枕	$X_b$	$Y_b$	$Z_b$	$\Phi_b$	$\theta_b$	$\Psi_b$
侧架	$X_s$	$Y_s$	$Z_s$	$\Phi_s$	$\theta_s$	$\Psi_s$
轮对	$X_w$	$Y_w$	$Z_w$	$\Phi_w$	$\theta_w$	$\Psi_w$

一系、二系悬挂系统视为无质量的非线性刚度-阻尼单元,模拟其承载和振动衰减特性。通过设置分段力-位移曲线实现非线性刚度-阻尼特性,曲线未过坐标原点(如图1所示),体现悬挂系统承担的车辆名义荷载 $P$ 。二系悬挂承担车体和摇枕荷载,一系悬挂承担车体、摇枕及侧架荷载之总和。与之类似,采用此方法表征旁承的常接触特性,通过设置一定预荷载模拟旁承初始压缩量,非线性刚度特性体现旁承止挡作用,充分反映旁承止挡对车体大幅侧滚的抑制作用。

楔块摩擦减振是建立模型的关键环节。为准确体现干摩擦的静、动摩擦特性,模型中计算摩擦力分两种情形:①摩擦副间相对运动速度小于开关速度 $v$ (通常设为0.02 m/s)时为静摩擦状态,摩擦力由黏性弹簧-阻尼单元提供;②摩擦副间相对运动速度达到 $v$ 时为动摩擦状态,摩擦力即法向压力与摩擦系数的乘积,法向压力由楔块支承弹簧提供,如图2所示。

## 1.2 轨道模型

轨道结构主要由钢轨、扣件、轨枕和道床构成。作用在钢轨上的轮轨荷载依次经扣件、轨枕传递至道床。为准确体现钢轨、轨枕的变形及振动特性,基

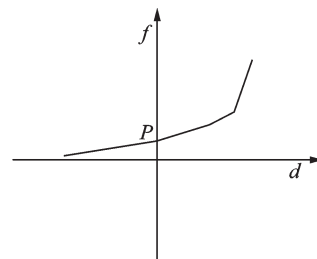


图1 非线性刚度-阻尼模型

Fig. 1 Nonlinear stiffness-damping model

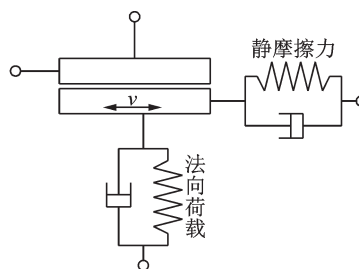


图2 摩擦减振模型

Fig. 2 Friction damping model

于模态叠加原理建立钢轨和轨枕模型。钢轨具有垂向弯曲、横向弯曲和扭转模态,表现为垂向、横向和倾翻变形,轨枕具有垂向弯曲模态,表现为垂向弯曲变形。每个扣件系统由4组非线性刚度-阻尼单元模拟,轨底上、下方分别设置两组单元,如图3所示。轨底下方的2组单元模拟垫板力学特性,每组单元的刚度为垫板总刚度的一半,两者间距根据文献[8]中的计算方法确定,准确反映扣件系统的抗倾覆特性。轨底上方的2组单元模拟弹条扣压特性,其间距即轨底宽度。

为避免轨枕枕中承担较大的负弯矩,枕中区域的道床密实度小于轨下。为模拟道床不均匀的支承状态,轨枕下方由8组非线性刚度-阻尼单元支承,如图4所示。轨下区域的支承刚度 $k_{s1}$ (3组刚度-阻尼单元)为120 kN/mm,枕中区域的支承刚度 $k_{s2}$ (2组刚度-阻尼单元)为轨下刚度 $k_{s1}$ 的3/4<sup>[9]</sup>。

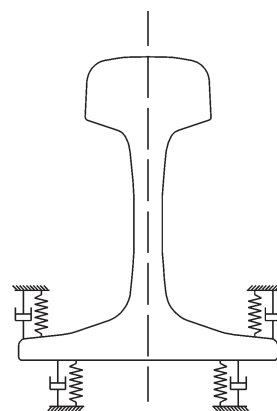


图3 扣件系统模型

Fig. 3 Fastening system model

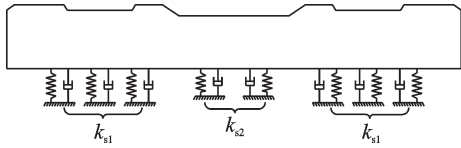


图 4 轨枕模型

Fig. 4 Sleeper model

1.3 扁疤模型

车轮扁疤数学模型能否合理反映扁疤冲击特性是建模的关键。车轮滚动圆半径不均匀是车轮扁疤的直观反映,本文借鉴文献[10]中的方法,采用变化车轮滚动圆半径的方法模拟车轮扁疤。图 5 展示了车轮半径  $R$ 、扁疤长度  $L$ 、扁疤深度  $\delta$  及覆盖角度  $\theta$  的含义,扁疤长度  $L$  与扁疤深度  $\delta$  对应关系满足下式:

$$\delta \times (2R - \delta) = \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (1)$$

式中扁疤深度  $\delta$  远小于车轮半径  $R$ ,因此,可根据下式计算扁疤深度  $\delta$ :

$$\delta = \frac{L^2}{8R} \quad (2)$$

常用货物列车单处扁疤长度不应超过 50 mm,存在两处扁疤时,每处长度不应大于 40 mm<sup>[11]</sup>,重型轨道车、大型养路机械等自轮运转设备的车轮扁疤长度不应超过 70 mm<sup>[12]</sup>,图 6 展示了扁疤长度 10~70 mm 范围内扁疤波形幅值及覆盖角度。重载车辆车轮半径  $R=483$  mm,当扁疤长度由 10 mm 增至 70 mm 时,扁疤深度由 0.0259 mm 快速增至 1.27 mm。

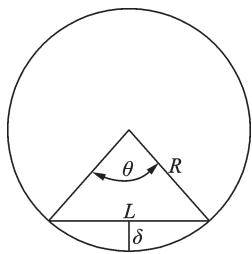


图 5 扁疤示意图

Fig. 5 The wheel flat sketch

2 轮轨冲击荷载时频特性

为得出扁疤长度、运行速度对轮轨冲击荷载幅值的影响规律,分别计算重载车辆在速度 10~100 km/h 范围内运行时,上述 7 种长度扁疤作用下的轮轨冲击特性。

图 7(a)为扁疤长度 30 mm 时、重载车辆以速度 50 km/h 运行时形成的轮轨冲击荷载时程曲线。由图可见,车轮运转至扁疤处时,轮轨荷载首先减小至

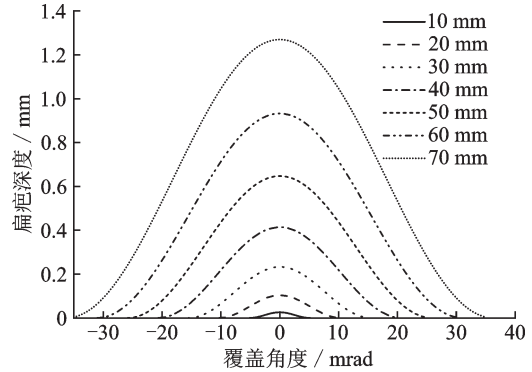
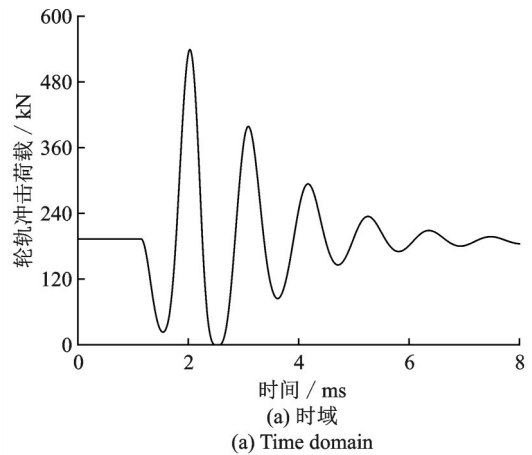


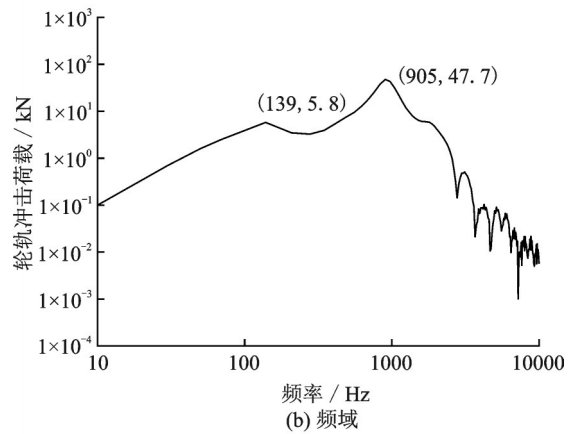
图 6 扁疤长度与深度的对应关系

Fig. 6 The relationship between wheel flat length and depth

23 kN,随即大幅增加至 538 kN,达到静轮荷载的 2.8 倍,继而再次减载至零(车轮脱离钢轨),后经过 5 次反复振荡后逐渐稳定至名义静轮重。图 7(b)展示了轮轨冲击荷载的频域特性。轮轨冲击荷载包含的频率范围较宽,在 10~1000 Hz 范围内出现两个明显峰值,对应频率为 139 和 905 Hz,分别与钢轨第 1 阶弯曲和 pin-pin 共振频率范围一致<sup>[13]</sup>,且高频区的幅值远大于低频区。由此可见,车轮扁疤冲击可激发出轮轨间的高频振动。



(a) 时域  
(a) Time domain



(b) 频域  
(b) Frequency domain

图 7 车轮扁疤作用下的轮轨冲击荷载特性

Fig. 7 The wheel/rail dynamic force performances due to wheel flat

图8描述了7种长度扁疤作用下、重载车辆以不同速度通过时轮轨冲击荷载幅值的变化规律。随着速度的提高,不同长度的扁疤导致的轮轨冲击荷载幅值快速增加,变化规律具有明显非线性特性。当速度增至一定程度时轮轨冲击荷载达到峰值,随后呈减小趋势,冲击荷载峰值对应的速度即扁疤临界速度。扁疤越长,临界速度越高,冲击荷载幅值也相应增加,扁疤长度为10,20,30和40 mm时的临界速度分别为30,50,70和80 km/h,冲击荷载峰值分别为238,383,613和797 kN,当扁疤长度达到50 mm及以上时,扁疤临界速度即超过重载车辆最高运行速度100 km/h。重载车辆不同长度扁疤对应的临界速度明显低于高速车辆<sup>[10]</sup>,但变化规律一致。可见,扁疤临界速度是表征车轮扁疤冲击特性的重要参数,其值的变化不仅取决于扁疤长度,而且与车辆参数密切相关,应根据重载车辆的日常运营速度,避免敏感长度扁疤的出现,尽可能减小轮轨冲击荷载。

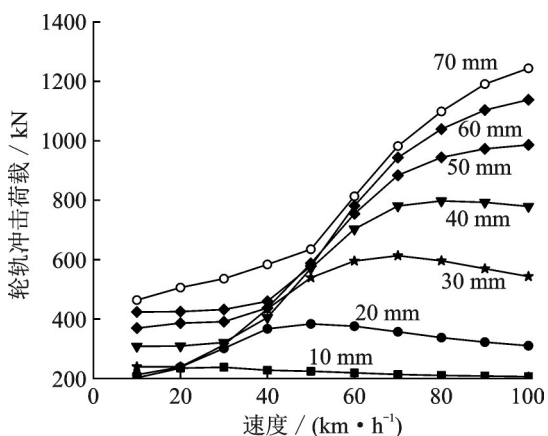


图8 轮轨冲击荷载与扁疤长度、行车速度的对应关系  
Fig. 8 The wheel/rail dynamic force versus wheel flat length and velocity

### 3 轮轨冲击荷载传递特性

轮轨间高频轮轨冲击荷载在轨道中的传递特性直接影响轨道部件服役特性,本文通过分析轨道结构变形、枕上压力,研究轮轨冲击荷载能在轨道中的传递规律。图9展示了扁疤长度为30 mm的车轮以速度50 km/h通过轨枕正上方时枕上压力的时程曲线。枕上压力峰值为132 kN,与轮轨冲击荷载538 kN(如图7所示)相除得到的荷载分配系数仅为0.2454,明显小于由温克尔梁理论<sup>[14]</sup>计算得到的分配系数0.4125,这就意味着轮轨冲击荷载并未充分传递至轨枕。进一步分析钢轨位移也发现,钢轨位

移幅值仅为0.73 mm(如图10所示)。而根据文献[14]中的轨道强度检算方法,轮轨冲击荷载538 kN作用下的钢轨变形量应为1.23 mm。导致此现象的原因应是车轮扁疤冲击荷载含有高频成分,高频区的轮轨冲击荷载作用时间短,并未使钢轨产生应有的变形,未能充分压缩轨下胶垫,传至轨枕的轮轨力比例减小。

为确定轮轨冲击荷载可传递至轨枕的频率范围,对枕上压力进行频域分析。图11展示了经傅里叶变换得到的枕上压力频域特性。由图可见,频率低于850 Hz枕上压力幅值较高,大于此频率后幅值快速降低,枕上压力主要由频率低于850 Hz成分构成。这就意味着频率高于850 Hz的轮轨冲击荷载并未传至轨枕。为进一步证实此判断,将轮轨冲击荷载进行频率850 Hz低通滤波,得到的轮轨力幅值为318 kN(如图12所示),而由枕上压力132 kN与正常分配系数0.4125相除得到的轮轨力幅值为320 kN,两者极为相符,再次说明频率低于850 Hz的轮轨冲击荷载才能有效传至轨枕。因此,研究轨道部件承载特性时应着重考虑频率低于850 Hz的轮轨冲击荷载。

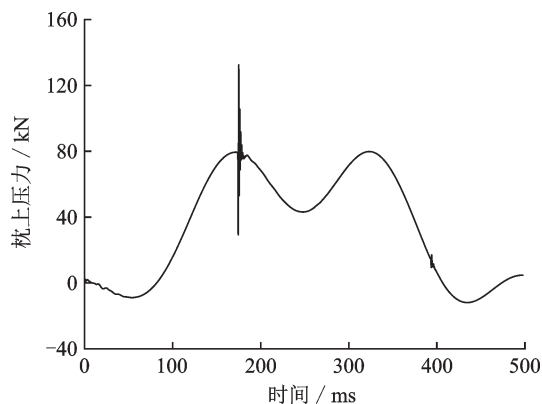


图9 枕上压力时程曲线

Fig. 9 The time history of load applied on sleeper

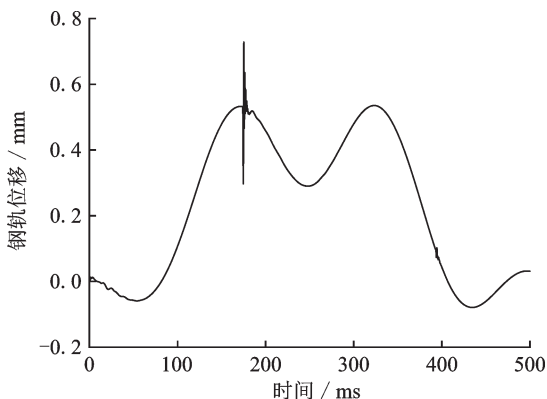


图10 钢轨位移时程曲线

Fig. 10 The time history of rail displacement



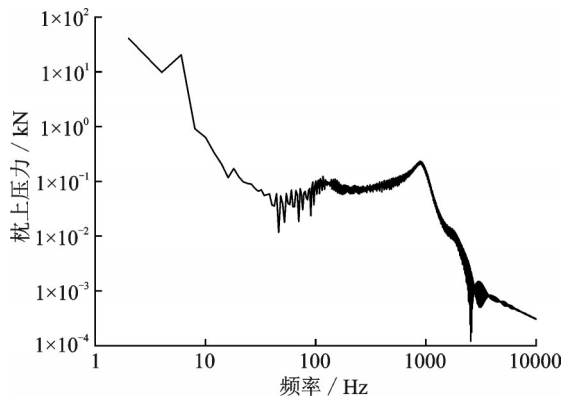


图11 枕上压力频域特性

Fig. 11 The frequency domain characteristics of load applied on sleeper

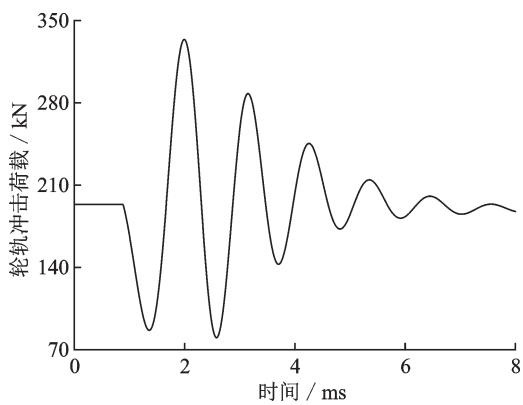


图12 滤波后轮轨冲击荷载

Fig. 12 The wheel/rail force filtered by 850 Hz

#### 4 扁疤限值

车轮扁疤冲击作用下形成异常轮轨动力响应,瞬时峰值达数倍静轮重,谷值减至零(减载率超限),并导致轨下基础承担较大荷载,需制定扁疤尺寸的合理限值。安全性指标减载率常作为评价指标,但扁疤冲击导致的减载率超限持续时间不足2 ms,远小于文献[7]中的建议值,不宜根据瞬时减载率确定扁疤限值。扁疤冲击导致的动力冲击必然使轨道部件承担较大荷载,加速轨道部件伤损。因此,本文建议采用轨道部件所能承受的极限强度设计荷载确定扁疤尺寸限值。为满足轴重40 t运营需求,进行轨枕设计时枕上压力极限值为240 kN<sup>[15]</sup>,扁疤冲击导致的枕上压力不应超过此限值。

对各种长度车轮扁疤在速度为10~100 km/h范围内的冲击荷载峰值进行分析,获得枕上压力扁疤长度、行车速度的对应关系,如图13所示。轴重40 t重载列车日常行车速度为70~80 km/h,为使枕上压力不超过极限240 kN,行车速度70,80 km/h对应的扁疤极限长度分别为42,40 mm,因此,建议扁疤长度限值不应超过40 mm。

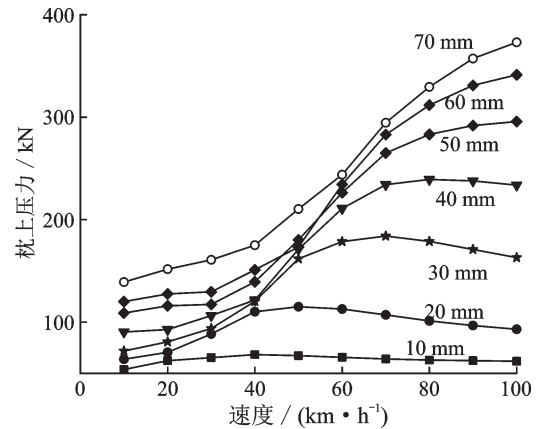


图13 枕上压力与扁疤长度、行车速度的对应关系

Fig. 13 The load applied on sleeper versus wheel flat length and velocity

#### 5 结论

为研究轴重40 t重载车辆车轮扁疤作用下的轮轨冲击特性,本文建立可考虑扁疤冲击特性的重载车辆-轨道动力学模型。分析不同行车速度和扁疤长度下轮轨冲击荷载的时域和频域特性,研究轮轨冲击荷载在轨道结构中的传递特性,得出以下结论:

(1)在车轮扁疤作用下,将激发出频率范围较宽的轮轨冲击荷载,高频区的幅值明显大于低频区。在139和905 Hz存在两个明显峰值,分别与钢轨第1阶弯曲和pin-pin共振频率相关。

(2)各种扁疤长度导致的冲击荷载幅值与行车速度密切相关,冲击荷载峰值对应的行车速度即扁疤临界速度。行车速度低于扁疤临界速度时,轮轨冲击荷载随速度提高不断增加,超过临界速度后轮轨冲击荷载呈减小趋势。扁疤越长,临界速度越高,扁疤长度为10,20,30和40 mm时的临界速度分别为30,50,70和80 km/h。当扁疤长度超过50 mm时,临界速度大于重载车辆的最高运行速度。

(3)轮轨冲击荷载的高频成分主要存在于轮轨界面,未使钢轨产生应有的变形,轨下胶垫来不及充分压缩,轮轨冲击荷载无法按正常比例传递至轨枕。频率低于850 Hz的轮轨力才能有效传至轨下基础,根据轨枕设计极限荷载,建议轴重40 t重载列车的车轮扁疤长度限值不应超过40 mm,今后将进一步结合车辆结构设计强度进行修正。

#### 参考文献:

- [1] 翟婉明. 铁路车轮扁疤的动力学效应[J]. 铁道车辆, 1994(7):1-5.  
ZHAO Wanming. The effect of wheel flat on vehicle dynamic performance[J]. Rolling Stock, 1994(7):1-5.
- [2] 王忆佳,曾京,高浩,等. 车轮扁疤引起的轮轨冲击分

- 析[J].西南交通大学学报,2014,49(4):700-705.  
WANG Yijia, ZENG Jing, GAO Hao, et al. Analysis of wheel/rail impact induced by wheel flats[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49 (4) : 700-705.
- [3] 凌亮,曹亚博,肖新标,等.车轮擦伤对高速轮轨接触行为的影响[J].铁道学报,2015,30(7):32-39.  
LING Liang, CAO Yabo, XIAO Xinbiao, et al. Influence of wheel flat on wheel/flat contact behavior [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 30 (7) : 32-39.
- [4] 王炎孝,杨占平.铁路车轮扁疤动态检查系统[J].铁道车辆,2001,39(4):30-32.  
WANG Yanxiao, YANG Zhanping. Dynamic inspection system for wheel flat on railway wheel[J]. Rolling Stock,2001,39(4):30-32.
- [5] 冯其波,赵雁,崔建英.车轮踏面扁疤擦伤动态定量测量新方法[J].机械工程学报,2002,38(2):120-122.  
FENG Qibo, ZHAO Yan, CUI Jianying. New dynamic method to quantitatively measure wheel flats of trains [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(2):120-122.
- [6] Tournay Harry M, Anankitpaiboon Satima. Wheel/rail forces associated with the formation of high impact wheels[J]. Technology Digest, 2009,9(40):1-4.
- [7] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].4版.北京:科学出版社,2015.  
ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamics [M].4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [8] 赵汝康.铁路钢轨扣件[M].北京:中国铁道出版社,2018.  
ZHAO Rukang. Rail Fastening Systems [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [9] 铁路轨道极限状态法设计暂行规范:Q/CR 9130—2015[S].北京:中国铁路总公司,2015.  
Provisional code for limit stated design method of railway track: Q/CR 9130—2015[S]. Beijing: China Railway, 2015.
- [10] 秦玉冬,胡明,杨柳青,等.基于SIMPACK的扁疤车轮轮轨冲击力学特性分析[J].中国机械工程,2017,28(17):2029-2042.  
QIN Yudong, HU Ming, YANG Liuqing, et al. Mechanics characteristics analysis of wheel/rail impact induced by wheel flats based on SIMPACK [J]. China Mechanical Engineering, 2017,28(17):2029-2042.
- [11] 中国铁路总公司.铁路货车运用维修规程[M].北京:中国铁道出版社,2018.
- [12] 中国铁路总公司.铁路货车运用维修规程(附则)[M].北京:中国铁道出版社,2018.
- [13] 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所.高铁轮轨关系理论深化研究报告[R].北京:中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所,2020.  
China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Railway Engineering Research Institute. Further study on wheel-rail interaction of high-speed railway [R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Railway Engineering Research Institute, 2020.
- [14] 铁路轨道强度检算法:TB 2034—88[S].北京:中华人民共和国铁道部,1988.
- [15] 尤瑞林,范佳,鄢录朝,等.40 t轴重重载铁路预应力混凝土轨枕设计研究[J].铁道建筑,2019,12:119-123.  
YOU Ruilin, FAN Jia, QIE Luchao, et al. Design research on the prestressed concrete sleeper for heavy-haul bearing 40 tons axle load of vehicle [J]. Railway Engineering, 2019,12:119-123.

## Wheel/rail impact induced by wheel flat of heavy-haul railway with 40 t axle load

SI Dao-lin<sup>1,2</sup>, LIANG Chen<sup>1,2</sup>, ZHANG Liang-wei<sup>3</sup>, WANG Shu-guo<sup>1,2</sup>, WANG Pu<sup>1,2</sup>

(1.Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2.State Key Lab of Track Technology of High-speed Railway, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 3.Hubei Engineering Laboratory of Rail Transit Freight Equipment of CRRC Yangtze Co. Ltd., Wuhan 430200, China)

**Abstract:** The heavy-haul railway for 40 t axle load freight is one of key development aspects. It is the premise of heavy axle load technology to obtain wheel/rail interaction features based on the analysis of impact vibration. The train and track coupling dynamic model of freight with 40 t axle load is put forward. The wheel flat is simulated by varied wheel rolling radius. The results show that the wheel flat leads to severe wheel/rail force, and impact energy with high frequency region. The critical speed of wheel flat increases with the growth of wheel flat length. The critical speeds of wheel flat with length of 10, 20, 30 and 40 mm are respectively 30, 50, 70 and 80 km/h. The critical speed of wheel flat exceeds 100 km/h when wheel flat length is more than 50 mm. The wheel/rail force with higher frequency occurs on wheel/rail interface, and cannot cause the rail deformation adequately. The wheel/rail force in region of less than 850 Hz can be applied on the track, which should be paid attention during track component design. The suggestive critical length of the wheel flat should be less than 40 mm according to the sleeper design strength requirement.

**Key words:** wheel/rail impact; dynamics; heavy-haul railway; wheel flat; track

作者简介: 司道林(1983—),男,副研究员。E-mail:sidaolin@163.com。