

制动工况高速列车轮轨磨耗仿真研究

左凤娟¹, 王竞杰¹, 王书文¹, 王成国²

¹上海理工大学, 机械工程学院, 上海

²中国铁道科学研究院, 北京

收稿日期: 2022年12月22日; 录用日期: 2023年1月23日; 发布日期: 2023年1月30日

摘要

为了研究CRH3高速列车的制动工况对车轮磨耗的影响, 建立了高速列车的动力学模型, 利用CRH3型动车组制动特性, 确定列车在任何速度下的制动力, 研究列车的制动初速度、轴重和摩擦系数对轮轨接触特性和磨耗的影响。研究表明: 制动初速度对轮轨间的接触特性影响不明显; 轴重对轮轨的接触特性影响很大, 随着轴重的增加, 轮轨间的横向蠕滑力和纵向蠕滑力都有很大的变化, 且接触斑面积和磨耗指数都呈现明显的上升趋势; 摩擦系数主要影响轮轨间的纵向蠕滑力和磨耗指数, 随着轮轨间摩擦系数的增大, 轮轨间的纵向蠕滑力近似呈线性关系增大。

关键词

车轮磨耗, 制动工况, 轮轨接触特性, SIMPACK, 高速列车

Simulation Study on the Wheel Wear of High-Speed Train under Braking Condition

Fengjuan Zuo¹, Jingjie Wang¹, Shuwen Wang¹, Chengguo Wang²

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²China Academy of Railway Sciences, Beijing

Received: Dec. 22nd, 2022; accepted: Jan. 23rd, 2023; published: Jan. 30th, 2023

Abstract

To study the influence of braking conditions on the wheel wear of a CRH3 high-speed train, a dynamics model of the high-speed train was established to determine the braking force of the train

文章引用: 左凤娟, 王竞杰, 王书文, 王成国. 制动工况高速列车轮轨磨耗仿真研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(1): 437-450. DOI: 10.12677/mos.2023.121042

at various speeds using the braking characteristics of the CRH3 high-speed train, and to study the influence of the initial braking speed, axle weight, and friction coefficient of the train wheel-rail interaction on the wheel-rail contact characteristics and wear. The study shows that under the braking conditions, the initial braking speed has no significant effect on the contact characteristics between the wheels and rails, but the axle weight has a significant effect on the contact characteristics of the wheels and rails. The transverse creep force and the longitudinal creep force between the wheels and rails have increased; with the increasing of the axle weight, and the contact patch area and the wear index are increased. The friction coefficient mainly affects the longitudinal creep force between the wheels and rails and the wear index; with the increasing of the friction coefficient, the longitudinal creep slip forces between wheels and rails are approximately linearly increased.

Keywords

Wheel Wear, Braking Condition, Wheel-Rail Contact Characteristics, SIMPACK, High-Speed Train

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

列车在制动时,属于非稳定工况,因此各部件的振动加强,轮轨间的接触状态和磨耗也更加复杂。以往对列车在制动工况下的分析主要集中在列车制动时轮轨力和动力学性能的分析,而对列车在制动工况时轮轨接触和磨耗的研究较少。

孙树磊等[1]研究了车辆通过曲线时紧急制动工况下对轮轨横向力和脱轨系数的影响。杨亮亮等[2]研究了列车在制动工况下通过曲线时的轮轨接触特性,分析制动工况下列车车轮磨耗分布。陈建海等[3]研究列车在制动过程中的纵向动力学特性。TRAN等[4]研究在紧急制动状态下制动力矩、轮轨接触状态及运行速度对轮轨力的影响。马卫华等[5]研究在制动工况下,不同轮径差对轮轨相互作用的影响。

徐春艳等[6]基于简单的编组动力学模型,分析车辆曲线通过时制动对车辆安全性的影响。OPREA等[7]开发了一种新的非平滑摩擦模型,用来研究列车制动过程中的动力学性能。刘鹏飞等[8]分析了制动时机车的受力特点,研究制动力对机车运行性能的影响过程和影响程度。ZHANG等[9]研究了制动力矩对货车动力学性能的影响。刘一鸣[10]分析了列车在曲线轨道上施加制动力,会引起曲线通过能力下降。

ENBLOM等[11]分析了盘式制动下的车轮磨耗特性,结果表明接触点位置和轮轨蠕滑率发生了改变,加剧了车轮磨耗。GORDANA[12]分析了列车处于制动工况时牵引系数对磨耗的影响。衣美玲[13]研究了制动梁横移导致的制动磨耗不对称及其对车轮磨耗的影响。康熙等[14]分析了轴盘制动系统安装位置 and 不同类型的制动片对车轮磨耗的影响。陈帅等[15]研究了踏面制动引起车轮温度急剧上升,对高温下车轮磨耗特性进行了研究。仪帅[16]研究了列车在紧急制动过程中接触斑形状以及轮轨蠕滑相对滑移分布,对紧急制动结束后的磨损深度进行预测。李亨利等[17]分析了列车在坡道制动的车辆动力学行为、运行安全性以及制动压力对轮轨接触关系和车轮磨耗特性的影响。

以上研究都对列车处于制动工况下的轮轨相互作用以及列车运行性能的研究有着重要意义。然而,当列车处于制动工况时,很多因素对车轮的磨耗具有显著的影响。本文通过列车的动力学模型,研究列车在制动时不同的制动初速度、轴重和摩擦系数对轮轨接触特性和磨耗的影响。

2. 建立高速列车动力学模型

本文以 CRH3 为研究对象,利用 SIMPACK 软件建立其动力学模型[18],简化的列车模型由 SIMPACK 软件中的基本元素如体、铰、约束、力元等构成。在 SIMPACK 中建立 CRH3 动力学模型之前,需确定其对应的拓扑结构,确定列车各装置和部件之间的联系。拓扑结构的好坏会直接影响计算结果。本文建立的拓扑结构如图 1 所示。用 7 号铰接来表示车体、车轮和构架相对于大地的运动,用二系力连接车体与构架,一系力连接构架与轮对。

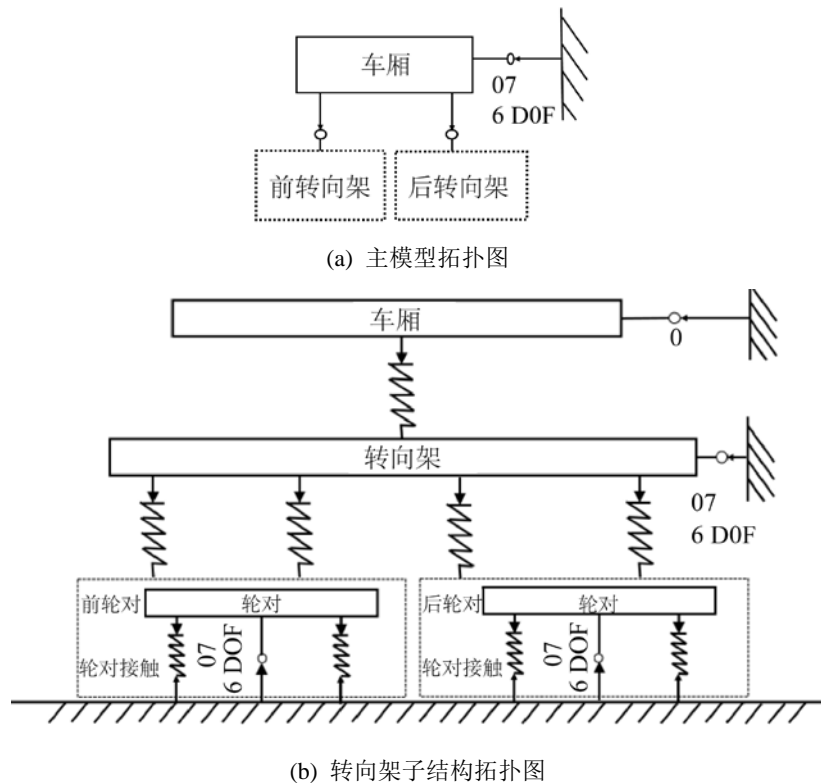


Figure 1. Vehicle system topology
图 1. 车辆系统拓扑图

CRH3 型动车组,每节车厢有前后两个转向架,每个转向架有两组轮对。本文的车辆模型仅建立一节车厢的模型,车辆模型由车体、转向架构架、轮对和一、二系悬挂系统构成。模型中包含 2 个转向架和 4 组轮对。由于前后转向架结构完全相同,将转向架作为子结构,同时,二系悬挂是车体与构架之间的装置,在进行二系悬挂的创建时,引入了虚车体,这样在转向架模型中把一系和二系悬挂都做好,从而避免二系悬挂在主模型中的重复创建;同时,在转向架模型中,前后轮对的参数是完全相同的,因此,把轮对模型作为转向架模型的子结构来处理。

CRH3 型动车组的车辆参数如表 1 所示,CRH3 动车组的车轮踏面为 S1002CN,匹配的轨道型面为 CHN60,轮轨法向力与切向力的计算分别选取 Hertz 方法和 FASTSIM 方法。

如图 2 所示,当横移量为 0 时,轮轨接触分布点大部分落在轨顶和车轮踏面中心,此时轮轨接触应力最小,轮轨横向蠕滑率/力很小。根据车辆系统拓扑图和车辆数据建立的车辆多体动力学模型如图 3 [19] 所示。

Table 1. Train SIMPACK model structure parameter
表 1. 列车 SIMPACK 模型结构参数

主要参数	数值	单位
轮对重量	1516	kg
车轮转动惯量 X 方向	1095	kg m ²
车轮转动惯量 y 方向	120	kg m ²
车轮转动惯量 z 方向	1101	kg m ²
轴重	11	t
车辆定距	17.375	m
转向架固定轴距	2.5	m
轮对内侧距	1.353	m
车体长度	24.175	m
车体宽度	3.257	m
车体高度	3.89	m
一系悬挂纵向刚度	54	MN/m
一系悬挂横向刚度	5	MN/m
一系悬挂垂向刚度	0.95	MN/m
一系垂向减振器阻尼	10.4	kNs/m
二系悬挂纵向刚度	0.131	MN/m
二系悬挂横向刚度	0.131	MN/m
二系悬挂垂向刚度	0.261	MN/m
二系垂向减振器阻尼	10.4	kNs/m
抗侧滚扭杆侧滚角刚度	4.15	MNm/rad

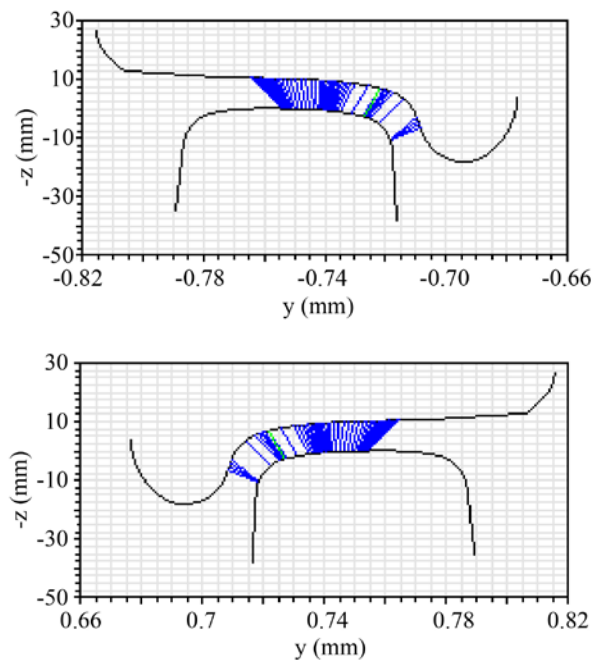


Figure 2. Distribution of wheel-rail contact points
图 2. 轮轨接触点分布

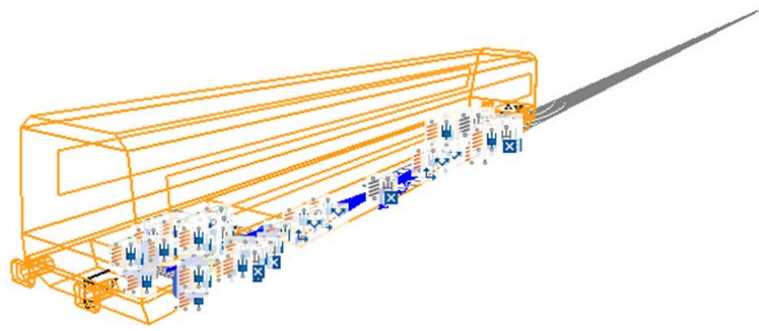


Figure 3. High-speed train dynamics model

图 3. 高速列车动力学模型

3. 轮轨接触分析

列车模型分别以 100 km/h 和 300 km/h 的车速行驶在设计的线路上来研究不同线路和车速组合下高速列车的轮轨工作状态，见表 2 所示轨道线路。

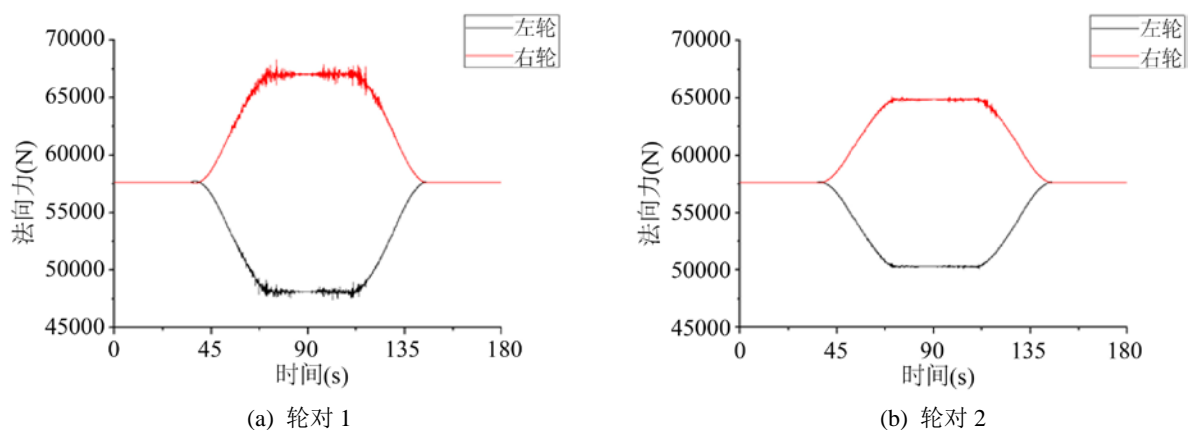
Table 2. Track line parameters

表 2. 轨道线路参数

线型	长度/m	曲线半径/m	超高/mm
直线段	1000	0	0
缓和曲线	1000	0~5000	0~10
圆曲线	1000	5000	10
缓和曲线	1000	5000~0	10~0
直线段	1000	0	0

3.1. 轮轨接触法向力分析

轮轨的磨耗与摩擦功大小有关，轮轨接触区的摩擦功与法向接触力成正比，所以法向力越大，轮轨磨耗越严重。轮轨接触法向力导致车轮与钢轨磨损的主要因素，与高速列车行驶的安全性也息息相关。列车以不同车速通过设计的轨道线路时的法向力如图 4 和图 5 所示。



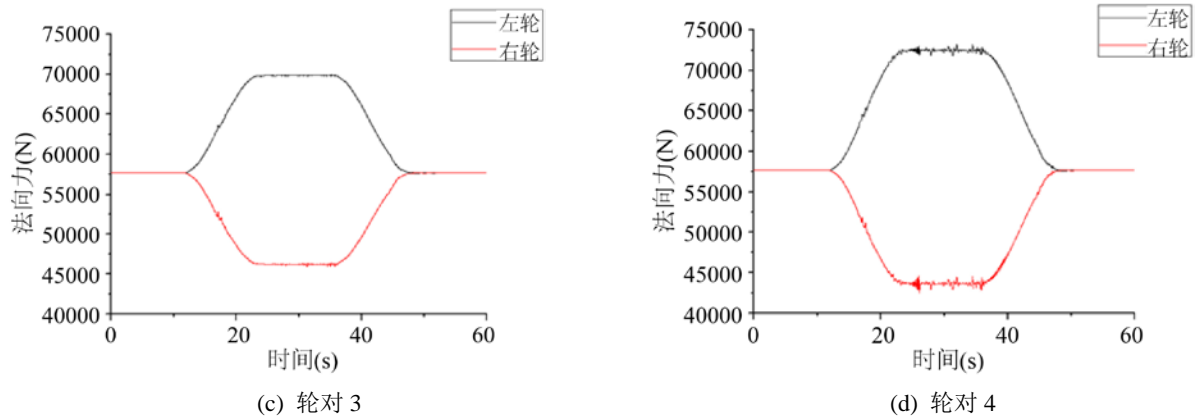


Figure 4. Wheel-rail contact normal force at 100 km/h
图 4. 100 km/h 时轮轨接触法向力

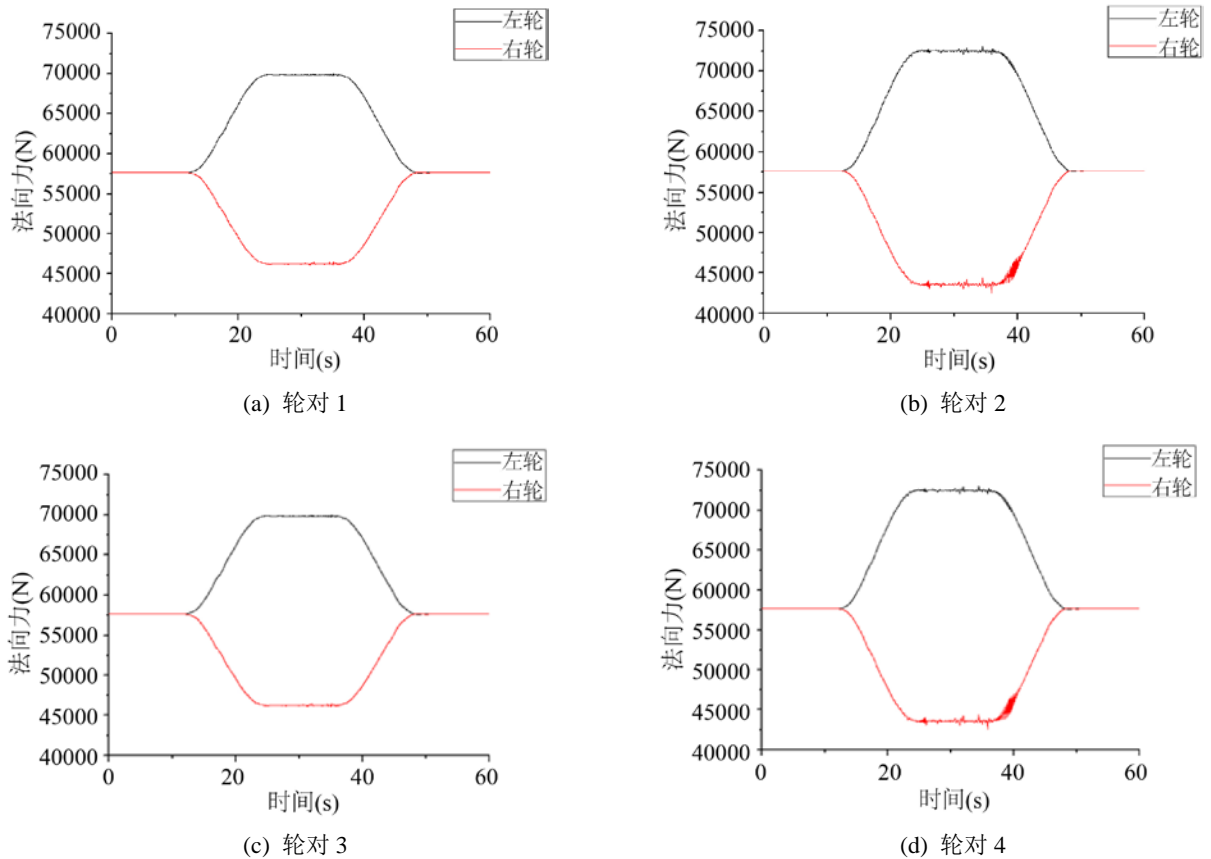


Figure 5. Wheel-rail contact normal force at 300 km/h
图 5. 300 km/h 时轮轨接触法向力

从图 4 和图 5 中的法向力可以看出不同车速下的法向力变化趋势都不一致。当车速为 100 km/h 时，接触法向力总的变化趋势是轮对 1，轮对 2，轮对 3 和轮对 4 在直线段保持不变。进入缓和曲线段后逐渐下降，圆曲线段中保持不变，由圆曲线进入缓和曲线段后，法向力逐渐增大直到进入直线段后保持不变。所有的右轮的法向力在直线段保持不变，进入缓和曲线段后逐渐上升，圆曲线段中保持不变，由圆曲线进入缓和曲线段后，法向力逐渐减小直到进入直线段后保持不变。对比图 4 和图 5，可以看出，当车速

为 300 km/h 时, 接触法向力的变化趋势与 100 km/h 时的法向力趋势正好相反, 所有轮对左轮的接触法向力在直线段保持不变, 进入缓和曲线段后逐渐上升, 圆曲线段中保持不变, 由圆曲线进入缓和曲线段后, 法向力逐渐减小直到进入直线段后保持不变。所有轮对右轮的接触法向力在直线段保持不变, 列车进入缓和曲线段后接触法向力逐渐减小, 圆曲线段中保持不变, 由圆曲线进入缓和曲线段后, 法向力逐渐增大直到进入直线段后保持不变。

3.2. 轮轨横向力分析

横向力对轮轨法向接触应力有很大影响, 较大的横向力是造成列车脱轨的原因之一。如图 6 和图 7 所示, 列车在直线段行驶时, 横向力都为 0。当列车以 100 km/h 的车速行驶在曲线段时, 所有轮对都受到指向曲线内侧的横向力。轮对 1 和轮对 3 横向力变化趋势基本一致, 最大值出现在曲线段为 10250 N。轮对 2 和轮对 4 变化趋势一致, 最大值出现在曲线段为 1744 N。车速为 300 km/h 通过曲线段时, 由于车速较快, 离心力大于指向曲线内侧的重力分量, 所有轮对都受到指向曲线外侧的横向力。轮对 1 和轮对 3 横向力变化趋势一致, 曲线段横向力为 4952 N。轮对 2 和轮对 4 变化趋势一致, 曲线段横向力为 12554 N。

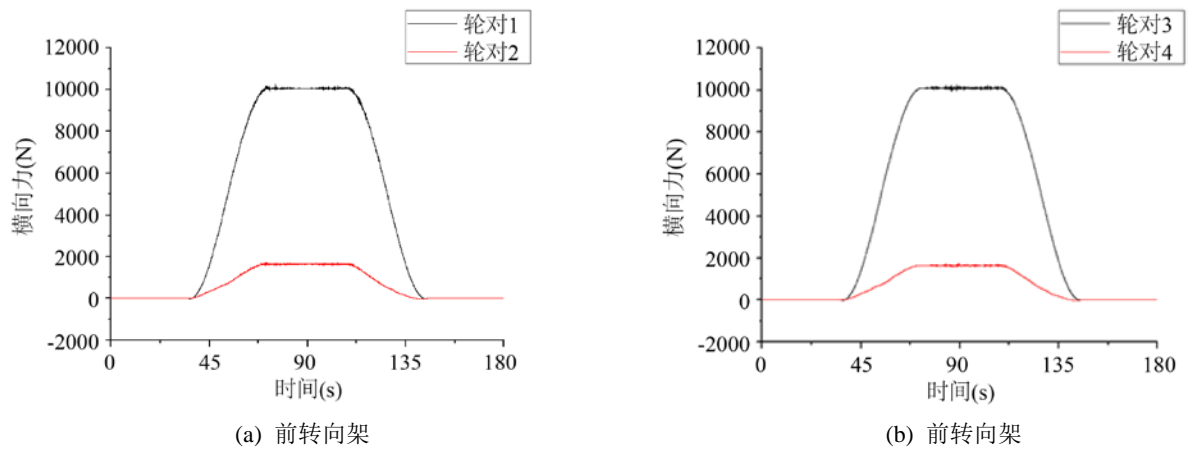


Figure 6. Lateral forces at 100 km/h

图 6. 100 km/h 时横向力

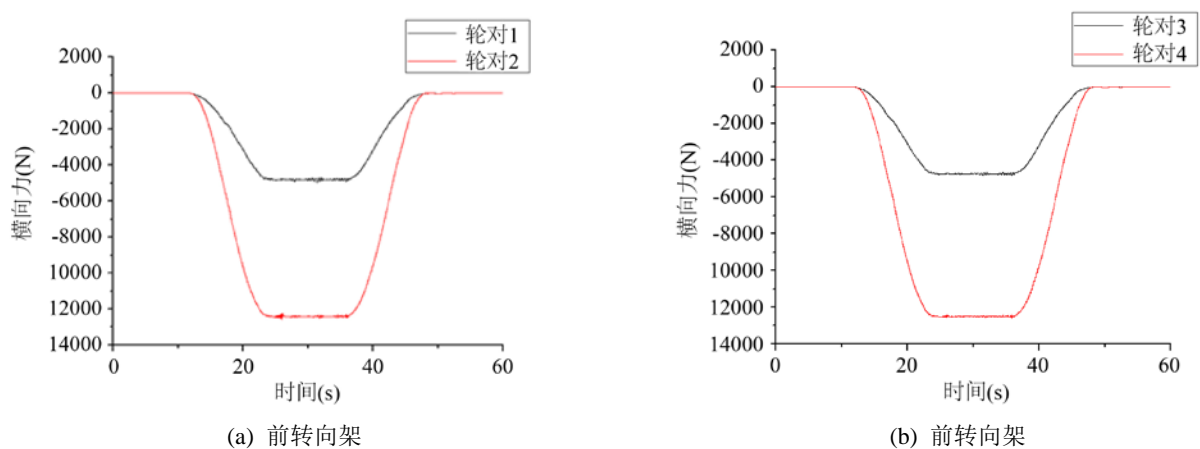


Figure 7. Lateral forces at 300 km/h

图 7. 300 km/h 时横向力

4. 制动工况下轮轨磨耗的影响因素分析

本文采用的动车型号为 CRH3，根据列车的型号可以查看该列车的制动特性曲线，如图 8 所示，从图中可以确定列车在任意速度下对应的制动力。当动车组的速度从 0 上升到 50 km/h 时，制动力会随着速度的提高而急剧增加，很快达到最大值 299 N，接着在电机的限制下，制动力随着速度的升高会逐渐减小，当速度在 5~106.7 km/h 之间时，制动力呈线性衰减，然后随着速度的增加，制动力呈曲线衰减 [20]。

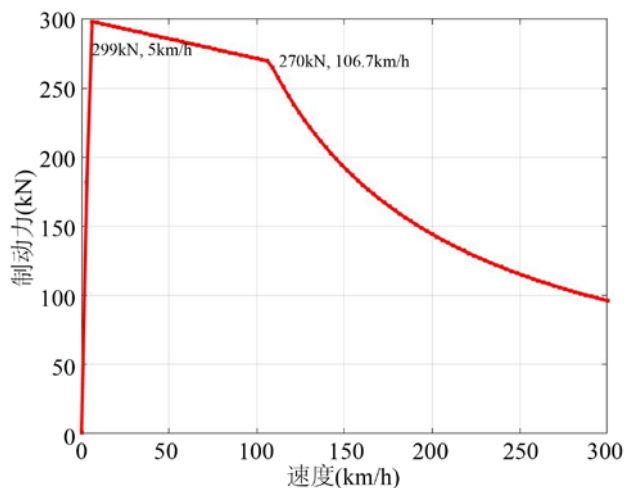


Figure 8. Braking characteristics curve of CRH3

图 8. CRH3 型动车组制动特性曲线

动车组再生制动力的表达式如式(1)所示：

$$\begin{cases} B = 59.8v & (v < 5 \text{ km/h}) \\ B = -0.285v + 300 & (5 \text{ km/h} \leq v \leq 106.7 \text{ km/h}) \\ B = 28880v & (v > 106.7 \text{ km/h}) \end{cases} \quad (1)$$

其中： B 为制动力， v 为速度。

4.1. 制动速度对轮轨磨耗的影响

列车在制动时，对列车的运行速度是有限定的，若制动时速度过高，则制动时会超出制动限制距离，若速度过低，制动作用太过剧烈，极易引发事故。因此制动初速度的选取非常重要，本文主要分析列车在制动过程中，制动初速度对轮轨间接触特性及磨耗的影响。仿真工况设定为在直线轨道上实施再生制动，将列车制动时的部分动能或势能转化为电能。列车的轴重为 12 t，轨道不平顺度为 AAR6，轮轨间的摩擦系数为 0.4，制动初速度分别取：100 km/h、150 km/h、200 km/h 和 250 km/h。

图 9 和图 10 分别为不同制动初速度下轮轨间纵向蠕滑力和横向蠕滑力的时间历程曲线，从图 9 和 10 中可以看出，由于制动工况属于非稳定工况，因此在制动力的作用下轮轨间接触应力的变化十分复杂，在接触初期，轮轨间的作用力变化较大，随着轮轨相互适应，接触状态逐渐趋于稳定，纵向蠕滑力与横向蠕滑力的大小虽然在不断变化，但波动幅度不大，通过对不同制动初速度下的时间历程曲线进行对比分析可知，接触斑内接触点的横向蠕滑力、纵向蠕滑力受制动初速度的影响不显著。

图 11 为不同制动初速度下接触斑面积随时间变化的曲线。从图 11 中可知，由于在仿真分析过程中

只改变了列车的制动初速度，轴重没有改变，因此接触斑面积的变化幅度在 1% 以内。

图 12 为磨耗功率的时间历程曲线。从图 12 中可以看出，轮轨间的磨耗会随着制动初速度的增大而增大。

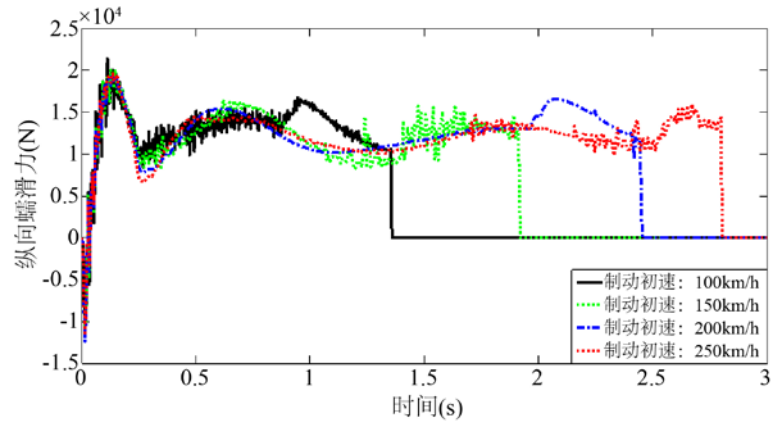


Figure 9. Effect of initial braking speed on the longitudinal creep slip force of wheel-rail

图 9. 制动初速度对轮轨纵向蠕滑力的影响

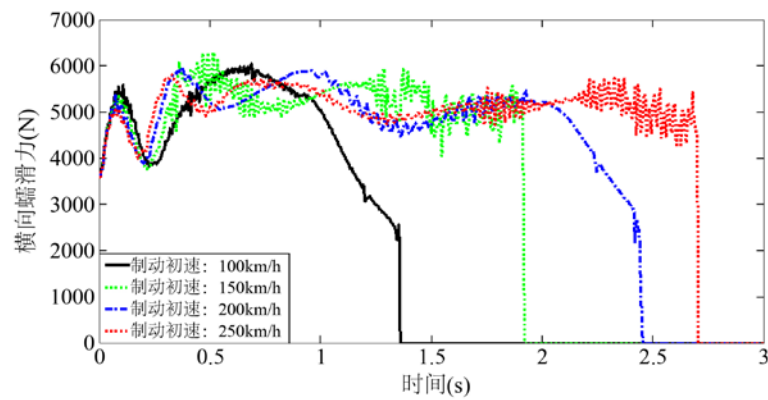


Figure 10. Effect of initial braking speed on the lateral creep force of wheel-rail

图 10. 制动初速度对横向蠕滑力的影响

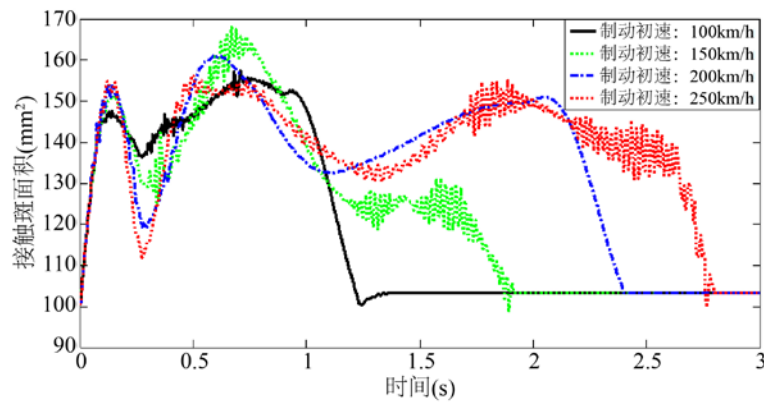


Figure 11. Effect of initial braking speed on the contact patch area of wheel-rail

图 11. 制动初速度对轮轨接触斑面积的影响

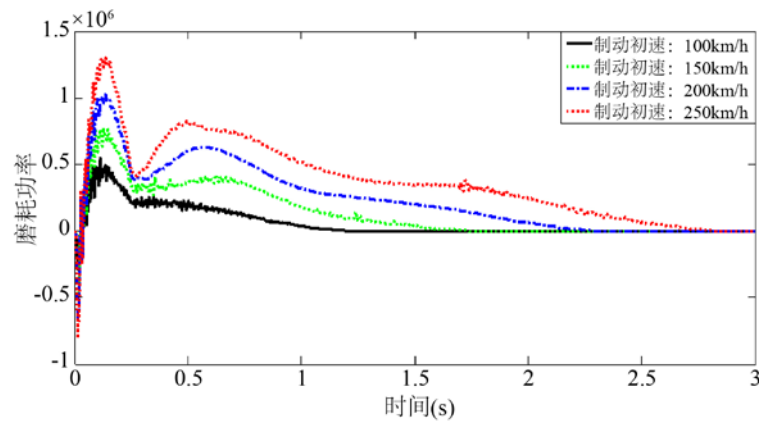


Figure 12. Effect of initial braking speed on the wear index of wheel-rail
图 12. 制动初速度对轮轨磨耗指数的影响

4.2. 轴重对轮轨磨耗的影响

仿真工况设定为在平直线路上实施再生制动，线路长度为 1000 m，摩擦系数为 0.4，轨道不平顺性为 AAR6，列车的制动初速度为 250 km/h，轴重分别设定为 10 t，12 t，14 t，16 t。研究在制动工况下轴重对轮轨间纵向及横向蠕滑力、接触斑面积、磨耗指数的影响。

图 13 和图 14 所示分别为列车在不同轴重下以 250 km/h 的制动初速度通过一段直线线路时，轮轨间纵向蠕滑力、横向蠕滑力随时间变化的曲线。从图 13 和图 14 中可以看出：在制动初期，由于车轮和钢轨间并没有达到稳定的接触状态，轮轨间的作用力十分复杂，轴重的变化并没有引起轮轨间纵向蠕滑力与横向蠕滑力的变化。但随着列车的运行轮轨间的相互作用逐渐趋于稳定，此时轴重的增大使轮轨间的作用力发生明显变化，横向蠕滑力和纵向蠕滑力均产生较大变化，且变化幅度均在 20% 以上。

图 15 为不同轴重下接触斑面积随时间变化的曲线。图 15 显示，随着列车轴重的增大，接触斑面积呈明显上升趋势。当列车轴重为 10 t 时，接触斑面积的最大值为 158.8 mm^2 ；而当轴重增大到 16 t 时，接触斑的最大面积达到 219.7 mm^2 ，是 10 t 时的 1.38 倍。

图 16 为不同轴重下磨耗指数的时间历程曲线。由图 16 可以看出：随着轴重的增加，磨耗指数也随着增大，且变化幅值在 20% 以上。由此可知，随着轴重的增加，轮轨间作用力增大，轮轨磨耗也变得更加严重。

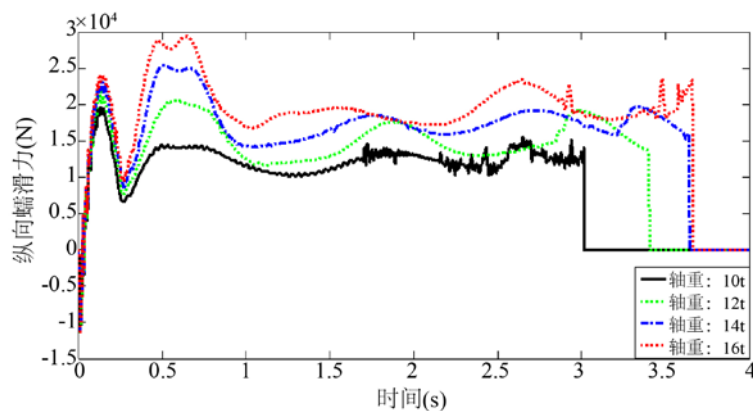


Figure 13. Effect of axle weight on the longitudinal creep slip force of wheel-rail
图 13. 轴重对轮轨纵向蠕滑力的影响

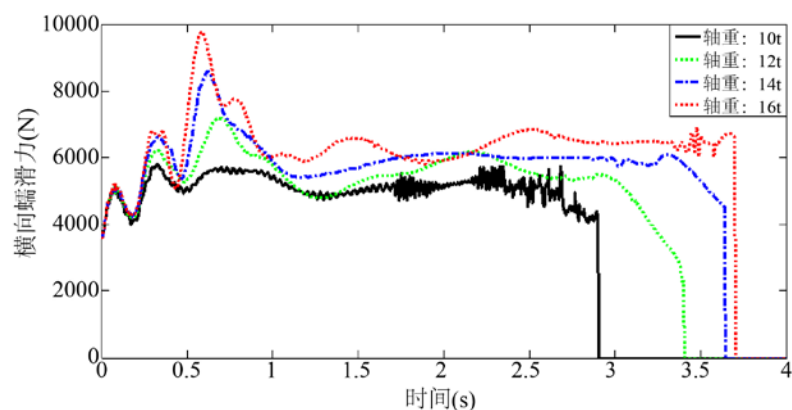


Figure 14. Effect of axle weight on the lateral creep force of wheel-rail

图 14. 轴重对轮轨横向蠕滑力的影响

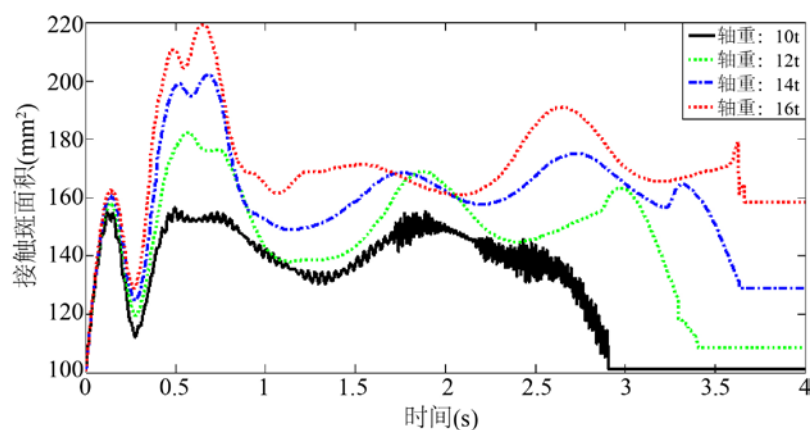


Figure 15. Effect of axle weight on the contact patch area of wheel-rail

图 15. 轴重对轮轨接触斑面积的影响

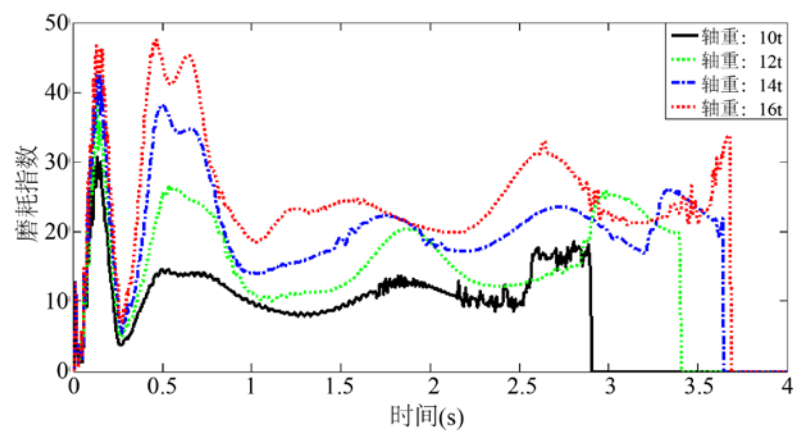


Figure 16. Effect of axle weight on the wear index of wheel-rail

图 16. 轴重对轮轨磨损指数的影响

4.3. 摩擦系数对轮轨磨耗的影响

仿真工况设定为列车在平直线路实施再生制动，线路长度为 1000 m，轨道不平顺性为 AAR6，列

车的制动初速度为 250 km/h，轴重为 12 t，摩擦系数分别为：0.2、0.4、0.6 和 0.8。研究制动工况下摩擦系数对轮轨间横向及纵向蠕滑力、接触斑面积以及磨耗指数的影响。

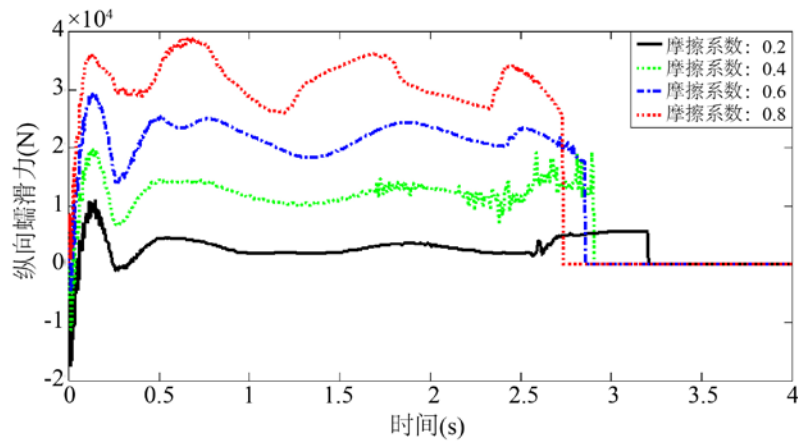


Figure 17. Effect of axle weight on the longitudinal creep slip force of wheel-rail
图 17. 摩擦系数对轮轨纵向蠕滑力的影响

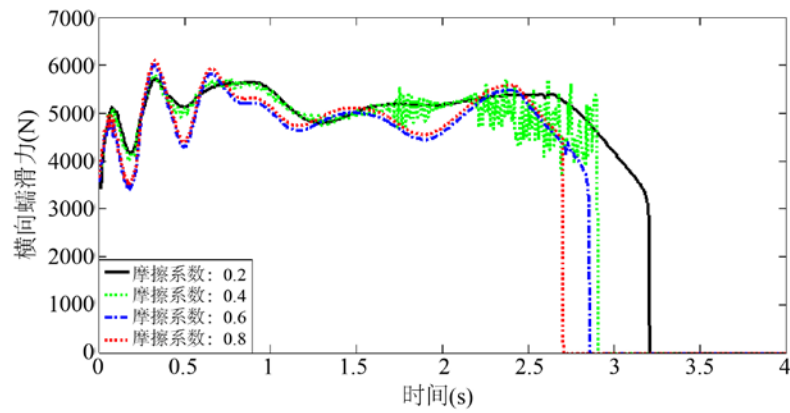


Figure 18. Effect of friction coefficient on the lateral creep force of wheel-rail
图 18. 摩擦系数对轮轨横向蠕滑力的影响

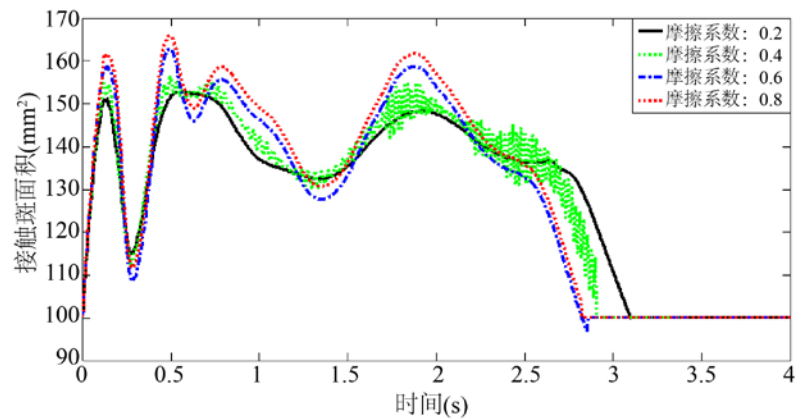


Figure 19. Effect of friction coefficient on the contact patch area of wheel-rail
图 19. 摩擦系数对轮轨接触斑面积的影响

图 17、图 18 和图 19 分别为列车在不同摩擦系数下轮轨间纵向蠕滑力、横向蠕滑力以及接触斑面积随时间变化的历程曲线。如图 17 和图 18 所示,随着摩擦系数的增加,轮轨间的纵向蠕滑力明显增大,其中摩擦系数为 0.8 时的纵向蠕滑力是摩擦系数为 0.2 时的 4 倍,而横向蠕滑力随着摩擦系数的增长虽然也有所变化,但变化幅度小,几乎保持不变。图 19 显示,摩擦系数的变化对轮轨间接触斑面积影响非常小,随着轮轨间摩擦系数的改变,接触斑面积虽然有所变化但其变化幅度均在 5% 以下。再由图 20 可知,随着摩擦系数的增加,磨耗指数呈明显上升的趋势,并且幅度变化非常大。因此,摩擦系数对轮轨间的磨耗会产生重要的影响,在列车实际运行中可以通过在轮轨间涂抹蠕滑油或采用轨面摩擦控制技术,对轮轨间的摩擦系数进行人为的控制来达到减缓轮轨磨耗的目的。

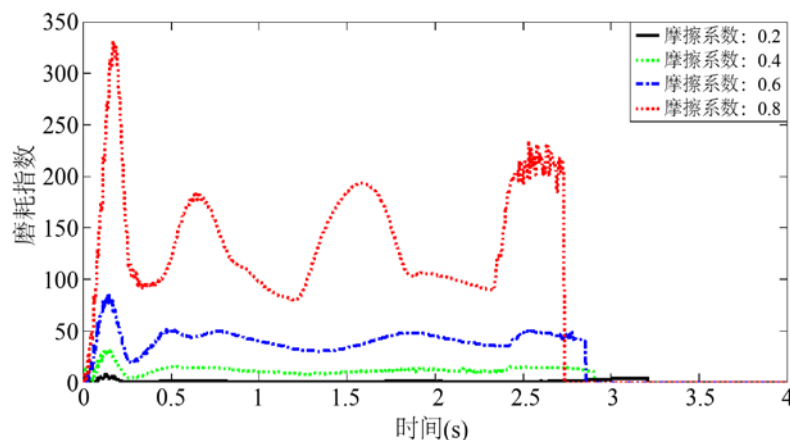


Figure 20. Effect of friction coefficient on the wear index of wheel-rail

图 20. 摩擦系数对轮轨磨耗指数的影响

5. 结论

1) 制动初速对轮轨间的接触特性没有显著影响。轮轨间的纵向蠕滑力、横向蠕滑力、接触斑面积都不会随着制动初速的改变而改变,但由于磨耗功率与速度成正比,轮轨间的磨耗会随着制动初速的增加而增大。

2) 当列车以 250 km/h 的制动初速在一直线轨道(摩擦系数为 0.4)上行驶时,随着轴重的增加,轮轨间的作用力发生明显的变化,横向蠕滑力、纵向蠕滑力均产生较大变化,且变化幅度均在 20% 以上。接触斑面积和磨耗指数也呈现明显上升的趋势。

3) 当列车以 250 km/h 的制动初速通过一直线轨道时,随着轮轨间摩擦系数的增大,轮轨间的纵向蠕滑力明显增大,其中摩擦系数为 0.8 时的纵向蠕滑力是摩擦系数为 0.2 的 4 倍左右。磨耗指数也呈显著上升的趋势。

致 谢

从论文选题到完成,感谢指导老师的耐心教导和修改,也感谢各位同门和师兄的帮忙,才能使得论文顺利完成,科研道路艰辛,我就保持初心,继续不断学习,争取取得更好的成绩。

基金项目

国家自然科学基金项目(51275126);上海市自然科学基金项目(21ZR445000)。

参考文献

- [1] 孙树磊, 李芾, 黄运华, 等. 重载列车动力学数值模拟[J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 69-73.
- [2] 杨亮亮, 罗世辉, 傅茂海, 等. 惰行和制动工况下重载列车曲线通过数值模拟[J]. 铁道学报, 2015, 37(11): 52-57.
- [3] 陈建海, 赵未, 朱慧颖. 基于 UM 的列车纵向动力学仿真分析[J]. 机械工程师, 2021(12): 11-14.
- [4] Tran, M.T., Ang, K.K., Luong, V.H. and Dai, J. (2016) High-Speed Trains Subject to Abrupt Braking. *Vehicle System Dynamics*, **54**, 1715-1735.
- [5] 马卫华, 曲天威, 罗世辉, 等. 轴箱定位偏差对机车轮缘偏磨的影响[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(1): 36-41.
- [6] 徐春艳, 乃国彦, 盛辉. 列车曲线内紧急制动时运行安全性分析[J]. 铁道机车与动车, 2016(1): 26-28.
- [7] Oprea, R.A., Cruceanu, C. and Spiroiu, M.A. (2013) Alternative Friction Models for Braking Train Dynamics. *Vehicle System Dynamics*, **51**, 460-480. <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.744459>
- [8] 刘鹏飞, 王开云, 张大伟. 牵引及制动操纵对重载机车轮轨动力作用的影响[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(2): 96-104.
- [9] Zhang, Z. and Dhanasekar, M. (2012) Dynamics of Railway Wagons Subjected to Braking Torques on Defective Tracks. *Vehicle System Dynamics*, **50**, 109-131. <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.571265>
- [10] 刘一鸣. 高速列车牵引与制动工况下的动力学性能仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [11] Enblom, R. and Berg, M. (2005) Simulation of Railway Wheel Profile Development Due to Wear—Influence of Disc Braking and Contact Environment. *Wear*, **258**, 1055-1063. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.055>
- [12] Gordana, V., Franklin, F.J. and Fletcher, D.I. (2011) Influence of Partial Slip and Direction of Traction on Wear Rate in Wheel Rail Contact. *Wear*, **270**, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.012>
- [13] 衣美玲. 制动梁横移对铁路货车车轮磨耗的影响[J]. 机械设计与制造, 2022(9): 207-211.
- [14] 康熙, 陈光雄, 朱琪, 等. 轴盘制动对高速列车车轮多边形磨耗的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 43-50.
- [15] 陈帅, 吴磊, 陶功权, 等. 基于摩擦温升效应的地铁车轮磨耗特性研究[J]. 机械工程学报, 2022, 1-8.
- [16] 仪帅. 重载列车踏面制动过程车轮热摩擦损伤及热疲劳寿命研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [17] 李亨利, 李芾, 付茂海, 等. 重载货车坡道制动动力学及轮轨磨耗研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(3): 60-64.
- [18] 周素霞. Simpack9 入门教程与铁路应用仿真[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [19] 繆炳荣, 罗仁, 王哲, 等. SIMPACK 动力学分析高级教程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- [20] 张子林. 考虑再生制动工况的高速动车组仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.