

重载列车紧急制动过程踏面轮廓变化定量预测

宋剑锋¹ 时迎港^{2,3} 黄伟建³ 赵琰淞³ 董永刚^{1*}

1.常熟理工学院机械工程学院,常熟,215500

2.济南卷烟厂制丝车间,济南,250000

3.燕山大学机械工程学院,秦皇岛,066044

摘要:为了定量预测车轮踏面轮廓形貌变化,利用 ABAQUS 软件完成热-机械耦合有限元仿真,求解制动过程中的踏面瞬态温度分布、硬度分布以及热弹、塑性应变;基于 Archard 磨损模型,利用 Fortran 语言对 ABAQUS 子程序进行二次开发,在此基础上采用 ALE 技术和 Umeshmotion 子程序求解有限元模型中车轮踏面的磨损深度动态变化。最后综合塑性变形和磨损的影响,得到冷却至室温后踏面形貌的变化。结果表明:由于踏面塑性变形和轮轨磨损影响轮瓦接触状态,轮瓦磨损和轮轨磨损综合作用下磨损区域呈台阶状;在轴重 25 t、初速度 100 km/h、制动距离 600 m 的工况下,由于塑性变形和轮轨磨损的综合作用,轮轨接触斑中心最大凹陷深度约 16 μm ,轮轨接触斑边缘凸起约 5 μm 。

关键词:紧急制动;热-机械耦合;塑性变形;磨损深度

中图分类号:U270.35

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quantitative Prediction of Tread Profile Variations during Emergency Braking of Heavy Duty Trains

SONG Jianfeng¹ SHI Yinggang^{2,3} HUANG Weijian³ ZHAO Yansong³ DONG Yonggang^{1*}

1.School of Mechanical Engineering,Changshu Institute of Technology,Changshu,Jiangsu,215500

2.Silk Making Workshop,Jinan Cigarette Factory,Jinan,250000

3.School of Mechanical Engineering,Yanshan University,Qinhuangdao,Hebei,066044

Abstract: In order to quantitatively predict the changes of wheel tread profile, ABAQUS software was used to complete thermal-mechanical coupling finite element simulation to solve the transient temperature distribution, hardness distribution, thermoelastic and plastic strain of tread during braking. Based on Archard wear model, the ABAQUS subprogram was developed using Fortran language. Then, ALE technology and Umeshmotion subprogram were used to solve the dynamic change of wheel tread wear depth in the finite element model. Finally, the influences of plastic deformations and wear were combined to obtain the changes of tread morphology after cooling to room temperature. The results show that the contact states of wheel and rail are affected by the plastic deformations of tread and wheel and rail wear. Under the combined actions of wheel and rail wear, the wear area is like a step. Under the conditions of axle load of 25 t, initial speed of 100 km/h and braking distance of 600 m, the maximum depression depth of wheel-rail contact spot center is about 16 μm and the edge of wheel-rail contact spot is as about 5 μm due to the comprehensive effects of plastic deformation and wheel-rail wear.

Key words: tread braking; thermal-mechanical coupling; plastic deformation; wear depth

0 引言

随着我国经济的快速发展,载货列车的载重量和速度都随之升高,对重载列车车轮的性能提出了更高的要求。在复杂的环境和交变载荷的作用下,车轮踏面发生变形、磨损、疲劳破坏^[1-3]的现象越来越突出。重载货车在紧急制动时,闸瓦与

踏面相互摩擦产生巨大热量,导致踏面温度升高,车轮踏面发生热膨胀;与此同时,轮轨接触区和轮瓦接触区的巨大压应力和切应力都会促使车轮踏面轮廓不断变化。由于车轮踏面温度的快速升高,车轮钢材料的物理机械性能^[4]也会发生改变;重载列车在踏面紧急制动过程中的型面动态变化受到多种因素的综合影响,踏面轮廓的变化机理比较复杂,定量预测其动态变化具有较大的难度,而型面轮廓的改变会对随后列车运行的安全性和

收稿日期:2023-08-30

修回日期:2024-07-10

基金项目:国家自然科学基金(51875501);2019年河北省留学回国人员资助(优秀类)项目(C20190515)

可靠性带来不可预知的潜在威胁,因此,对重载列车紧急制动过程中踏面形貌的动态变化进行定量预测具有重要意义。

沈明学等^[5]开展了轮轨滚滑接触摩擦学实验,分析了不圆顺车轮和正常圆顺车轮对轮轨界面黏着、车轮表面损伤与滚动接触疲劳特性的影响,结果表明,车轮不圆顺会显著减小轮轨之间的黏着系数,甚至影响列车牵引效果及安全运行,同时,钢轨的磨耗也明显加剧。王群娣^[6]利用滚动接触疲劳试验机研究了车轮踏面不同深度对车轮踏面磨损和损伤性能的影响,结果表明,随着车轮踏面深度的增大,车轮钢的硬度呈现减小的趋势,且疲劳损伤变得严重,由轻微疲劳损伤向较严重疲劳损伤转变。陈帅等^[7]通过建立制动温升影响的车轮踏面磨耗预测模型研究了温度对车轮磨耗的影响,结果表明,考虑制动温升时车轮总磨耗体积比不考虑温升时增加了 12.1%,当摩擦温升达到最大值时,最大磨耗深度增大了 22.5%。郭涛等^[8]利用线路跟踪试验得到了车轮常规磨耗数据,利用动力学仿真研究了不同损耗程度下车辆运行速度对动力学性能的影响,分析了车轮动力学性能参数随速度和磨耗量的变化规律,结果表明:踏面磨耗对临界速度、轮轨横向力及横向平稳性的影响较大,而对垂向平稳性指标及轮重减载率的影响较小。董永刚等^[9-10]、宋剑锋等^[11]通过有限元软件热-机械耦合仿真得到了列车紧急制动过程中车轮踏面温度、应力的分布状况,建立了基于损伤参量的疲劳裂纹萌生寿命的预测模型,并基于此模型判断裂纹萌生的位置;他们还利用轮轨动力学软件 UM 得到了紧急制动过程中轮轨接触斑形状以及轮轨蠕滑区相对滑移分布,在此基础上结合 Archard 磨耗模型对单次紧急制动结束后的踏面磨耗深度进行了定量预测。

上述文献从试验或有限元的角度对踏面制动热机械负荷问题进行了研究,得到了温度场的变化与车轮钢踏面热应力的关系,对车轮踏面应力应变场的研究也达到了一定的深度。列车在紧急制动时,车轮踏面的形貌变化受到踏面热应力、轮轨接触力、踏面高温及摩擦磨损的综合影响。目前国内外对车轮踏面磨损磨耗、车轮踏面的疲劳破坏的研究较多,但对列车踏面形貌变化的定量研究较少。本文充分考虑紧急制动过程中的踏面热应力^[12]、轮轨力、闸瓦力对踏面变形及磨损的影响,分制动与冷却两个过程对踏面轮廓动态变化进行定量研究,并对一次紧急制动后车轮冷却至室温时的踏面形貌进行预测。

1 有限元模型及边界条件

本文采用 HESA 型号的列车车轮,名义半径为 0.43 m,踏面宽度为 0.089 m,单个车轮质量为 330 kg,转动惯量为 39.7 mg/m²。由于本文研究重点为车轮踏面及踏面下最大距离 20 mm 处的形貌变化,故对踏面以下 0~20 mm 处网格进行加密,此处网格细化密度与未加密部位网格密度比值为 4:1。周向、轴向各划分 168 个和 30 个,网格类型采用八节点热耦合六面体单元,整个模型共划分为 138 954 个节点、102 456 个网格(图 1a)。为了提取车轮踏面仿真后的数据信息,在车轮踏面轴向取节点集(图 1b),并结合 ALE 网格技术对磨耗深度进行仿真计算。

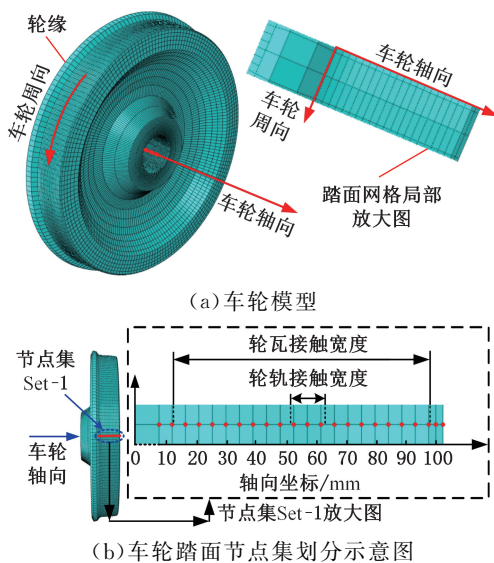


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

车轮材料采用国标成分的 CL60 钢,密度为 7850 kg/m³,泊松比为 0.3,不同温度下 CL60 材料物理参数^[13]见表 1。

表 1 CL60 车轮钢材料参数

Tab.1 CL60 wheel steel material parameters

温度/ ℃	屈服 强度/ MPa	质量热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	热膨胀系数/ (10 ⁻⁵ K ⁻¹)	弹性 模量/ GPa	抗拉 强度/ MPa
25	577	470	51	1.033	205	815
100	498	490	49	1.112	180	733
200	444	530	45	1.207	165	673
300	413	570	42	1.226	137	635
400	393	620	38	1.331	125	604
500	379	680	35	1.392	77	575

2 车轮载荷及传热边界条件

2.1 制动工况的设定

根据《铁路技术管理规程》的要求,中国铁路

的列车制动距离统一规定为 800 m。要求所有使用自动制动机的列车,当实施紧急制动后,都具有在 800 m 制动距离内停车的制动能力。

本文选用内燃机车 DF8 型号列车,每组轮对承受的轴重为 25 t,列车实施紧急制动时的速度为 100 km/h。近似将列车紧急制动过程看作匀减速运动,选择较为苛刻的刹车距离(600 m)对刹车减速度进行换算,得到制动减速度为 0.643 m/s²。

2.2 制动过程中车轮踏面的载荷

紧急制动过程中车轮踏面承受闸瓦、钢轨对踏面的法向及切向载荷,模型加载示意图见图 2。本文用 Fortran 语言编写子程序,对模型进行载荷的施加,子程序中采用旋转法设置载荷作用,车轮固定,闸瓦和钢轨对踏面的法向载荷和切向摩擦载荷绕车轮旋转的反方向旋转,速度为列车的瞬时运行速度。

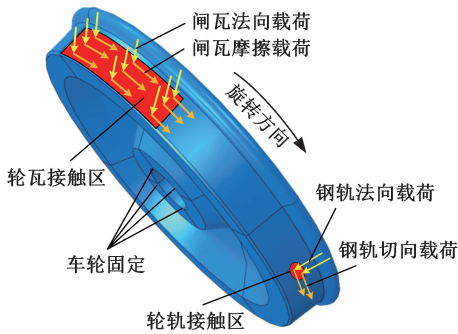


图 2 踏面外部载荷条件

Fig.2 External load conditions of tread

2.2.1 闸瓦力的计算

车体质量均分到单个轮对上的质量即为轴重,以单只轮为一系统进行载荷计算。制动过程中列车行车阻力和闸瓦摩擦力所做的功等于列车动能的减小量,根据功能转化关系,有

$$\mu_1 FS + WS = \frac{1}{2}(M + \frac{J}{R^2})(v_0^2 - v_t^2) \quad (1)$$

式中: F 为闸瓦力, N; μ_1 为车轮-闸瓦间摩擦因数; S 为制动距离, m; W 为分配到每个车轮的行车阻力; M 为均分到单个车轮上车体质量与车轮质量之和, kg; J 为车轮转动惯量, kg·m²; R 为车轮半径, m; S_z 为车轮-闸瓦接触面积; v_0 为初始制动速度, m/s; v_t 为瞬时速度, m/s; t 为时间, s。

分配到每个车轮的行车阻力与列车运行单位基本阻力 W_0 ^[14] 之间的关系为

$$W = W_0 M_g \times 10^{-3} \quad (2)$$

闸瓦正应力 σ_1 和切应力 τ_1 分别为

$$\sigma_1 = \frac{a_c(M + \frac{J}{R^2}) - W}{\mu_1 S_z} \quad \tau_1 = \frac{a_c(M + \frac{J}{R^2}) - W}{S_z} \quad (3)$$

式中: a_c 为制动减速度, m/s²。

2.2.2 钢轨对踏面的载荷

车轮踏面与钢轨进行接触时,接触区域为椭圆形,根据轮轨间 Hertz 接触理论^[15],有

$$\sigma_g = \frac{3P}{2\pi ab} \sqrt{1 - (\frac{x}{a})^2 - (\frac{y}{b})^2} \quad (4)$$

式中: σ_g 为轮轨接触区不同点的正应力, Pa; P 为均分到单个车轮上车体重与车轮自重之和, N; a 、 b 分别为轮轨接触的椭圆长、短半轴的长度^[16], m; x 、 y 为坐标, m。

车轮踏面与钢轨间接触斑轮廓为椭圆形,如图 3 所示。其中, x 方向为列车行驶方向(纵向), y 方向为列车行驶方向的垂向(横向)。

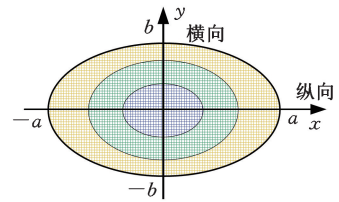


图 3 轮轨接触斑应力分布

Fig.3 Wheel-rail contact spot stress distribution

由于轮轨接触区域不同位置的载荷都不相同,考虑到模型加载的复杂性,故用轮轨接触平均应力代替,轮轨接触区平均正应力 σ_2 和平均切应力 τ_2 分别为

$$\sigma_2 = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (5)$$

$$\tau_2 = \frac{\Delta}{R} \frac{3P}{2\pi ab} + \frac{a_c(M + \frac{J}{R^2}) - W}{\pi ab} \quad (6)$$

式中: Δ 为车轮与轨道间的滚动摩擦阻^[16], mm, 本文 Δ 取 0.05 mm。

2.3 车轮传热边界条件与模型加载

车轮与闸瓦间摩擦,引入热流密度使车轮温度上升,车轮温度上升的同时以对流换热、轮轨接触换热及热辐射的方式释放热量,如图 4 所示。

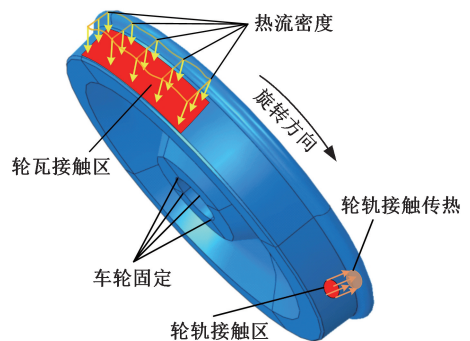


图 4 踏面热载荷条件

Fig.4 Thermal load conditions of tread

根据车轮与闸瓦、钢轨和空气之间的相对运动关系,采用旋转法对热流密度和接触传热作用进行设置。固定车轮,使轮瓦接触产生的热流密

度和轮轨接触传热作用绕车轮踏面进行旋转施加。

根据单轮系统中能量守恒定律,闸瓦踏面摩擦升热量和行车阻力做功之和等于列车动能的减小量。摩擦生热量以一定的比例分配给闸瓦及车轮踏面,本文引入热流分配系数,流入踏面热流分配系数^[17]为 0.91,有

$$q = \frac{\eta(v_0 - a_c t)}{S_z} [a_c(M + \frac{J}{R^2}) - W] \quad (7)$$

式中: q 为热流密度, $J/(m^2 \cdot s)$; η 为热流分配系数。

列车运行过程中,车轮外表面和空气进行对流换热。环境温度设为 25°C 。对流传热系数^[18]和列车行驶速度的关系为

$$h_{(v)} = 0.3828 + 14.39v_t \quad (8)$$

式中: $h_{(v)}$ 为对流传热系数, $J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ\text{C})$ 。

制动过程中车轮踏面温度升高,轮轨发生接触换热,轮轨传热系数 H ^[19]为

$$H = 339.31 + 74.67\sigma_2 \quad (9)$$

式中: σ_2 为轮轨接触区的平均正应力。

高温物体会以电磁波的形式向外界辐射热量,根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,热辐射强度与辐射率有关,本文选用的辐射率^[20]为 0.66。

2.4 车轮踏面磨损理论

基于 Archard 磨损理论,考虑列车制动过程中温升对材料硬度的影响,利用 UM 软件计算蠕滑区内纵、横向蠕滑率及自旋转蠕滑率,在此基础上利用 ABAQUS 中 ALE 网格子程序对车轮踏面摩擦磨损情况进行分析。根据 Archard 模型理论公式,可推导出车轮踏面任意节点磨损深度公式:

$$h(x, y) = \frac{k}{HV_1} G(x, y) dS \quad (10)$$

式中: k 为两相互磨损构件间的磨损系数; HV_1 为两构件间较软材料的硬度, HBS ; $G(x, y)$ 为两构件间的接触正应力, Pa ; S 为两构件间的相对滑动距离, m 。

2.4.1 UM 模型及仿真结果

UM 动力学仿真软件拥有完善的 UM train 模块并且支持列车纵向动力学模型中加入若干考虑轮轨接触作用的三维车辆模型。对列车进行紧急制动仿真时,可直接调用 UM 模型库中的车辆部件模型等进行装配,并且在后处理模块中有相应的窗口对列车所加载荷进行施加。

在 UM 前处理模块分别建立列车侧架、轮对、摇枕及旁承等构件,对各构件进行装配得到转向架模型,如图 5 所示。将车厢模型和转向架模型进行装配得到单节列车模型,如图 6 所示。为了保证轮对和车厢在各个方向上都可以振动,在 UM 中不约束轮对和车厢的自由度,轨道选择 LM 型面的 75 kg/m 的重型直线标准断面钢轨。

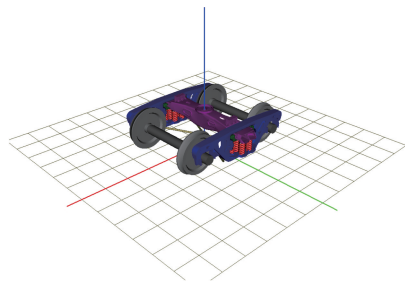


图 5 列车转向架动力学模型

Fig.5 Dynamics model of train bogie



图 6 单节列车动力学模型

Fig.6 Dynamics model of single train

列车建模完成后,在 UM 后处理模块中先设定列车的速度模式,通过设置减速度来实现列车的制动工况。相继设置轮轨接触模型,本文选用 UM 中列车车轮蠕滑率计算最常用的 CONTACT 算法,在 CONTACT 算法设置界面填写轮轨间具体接触载荷和参数。最后根据列车实际运行工况设置列车运行的阻力模型。

根据轴重 25 t 、初速度 100 km/h 、制动减速度 0.643 m/s^2 (制动距离 600 m) 的制动工况,在 UM 中对列车紧急制动过程中轮轨接触区蠕滑进行仿真,蠕滑率分布如图 7 所示。可以看出,纵向蠕滑率、横向蠕滑率和自旋转蠕滑率在某一数值的基础上随制动时间上下波动。在对制动过程踏面磨损进行仿真计算时,根据仿真结果可得到不同制动时刻 t 的轮轨间纵向、横向刚性蠕滑率和自旋蠕滑率(图 7),由于在某些时刻仿真结果短时间内在某一个值上下剧烈波动,在计算蠕滑速度及磨损量时会导致较大的误差,故采用等效蠕滑率来表征蠕滑率随制动时间变化。

蠕滑率仿真结果中存在突变值,在处理数据时先将出现突变值的个别时间点蠕滑率值用其相邻数据点值代替,再采用均值滤波方法对蠕滑率数据进行降噪处理,具体做法是以 0.1 s 为数据提取间隔,每 1 s 提取 10 个数据,对这 10 个数据求取这 1 s 的平均值(约 40 个数据),最后得到等效值曲线。

2.4.2 钢轨对踏面的磨耗

以往的研究表明^[21],以车轮材料抗拉强度为中间变量可得到车轮材料硬度和温度间的关系:

$$HV = -0.3T + 332 \quad (11)$$

轮轨蠕滑区内,每个增量步钢轨相对踏面的

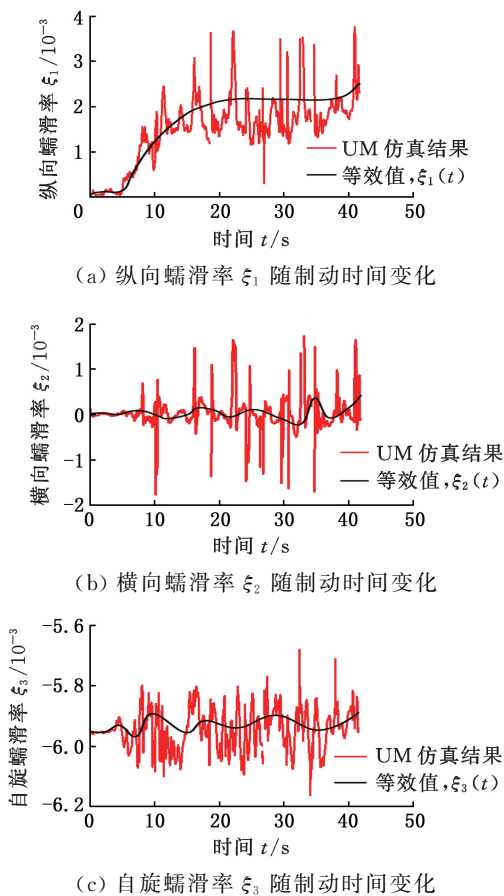


图7 紧急制动过程蠕滑率动态变化
Fig.7 Distribution of creep rate during emergency braking

蠕滑距离 dS_1 为

$$dS_1 = \Delta v \Delta t = \Delta t \sqrt{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2} \quad (12)$$

以往研究表明^[22], 轮-轨蠕滑区内刚性蠕滑率远大于弹性蠕滑率, 因此计算轮轨磨损时一般不考虑弹性蠕滑率, 根据蠕滑率的理论公式, 有

$$\left. \begin{aligned} \Delta v_x &= \Delta v_1 (\xi_1(t) - y \xi_3(t)) \\ \Delta v_y &= \Delta v_1 (\xi_2(t) + x \xi_3(t)) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: Δv 为轮轨间相对蠕滑速度, m/s; Δt 为增量步时间, s; Δv_x 、 Δv_y 为轮轨间纵向、横向相对蠕滑速度, m/s; Δv_1 为每个增量步中车轮的名义瞬时速度, m/s; $\xi_1(t)$ 、 $\xi_2(t)$ 、 $\xi_3(t)$ 为不同制动时刻轮轨间纵、横向刚性等效蠕滑率及自旋等效转蠕滑率。

联立式(3)、式(9)、式(11)和式(12), 得到每个增量步钢轨对踏面的磨损深度

$$h_r(x, y) = \frac{k_r \Delta v_1 \sqrt{(\xi_1(t) - y \xi_3(t))^2 + (\xi_2(t) + x \xi_3(t))^2}}{H_r} \cdot \frac{3P}{2\pi ab} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \Delta t \quad (14)$$

式中: k_r 为车轮与钢轨之间的摩擦因数; H_r 为车轮与钢轨中较软材料的硬度(HBS)。

根据本文制动工况条件下轮轨接触应力和滑

动速度, 参考文献[23]的重载铁路货运列车轮轨磨损系数插值图, 轮轨磨损系数取 5×10^{-4} , 轮轨接触区的纵、横向蠕滑率及自旋转蠕滑率由 UM 动力学仿真软件计算, 由于各方向的蠕滑率是随时间变化的, 故选择等效蠕滑率计算轮轨接触区的滑移距离。

2.4.3 闸瓦对踏面的磨损

列车周期制动过程中, 闸瓦在制动缸压力作用下紧压在踏面上并相对踏面纯滑动。根据 Archard 接触理论, 每个增量步闸瓦对踏面节点的磨损深度

$$h_w(x, y) = \frac{k_w}{H_w} \frac{a_c (M + \frac{J}{R^2}) - W}{\mu_1 S_z} \Delta v_1 \Delta t \quad (15)$$

式中: k_w 为车轮与闸瓦之间的摩擦因数; H_w 为车轮与闸瓦中较软材料的硬度(HBS)。

3 制动过程热-机械耦合仿真

3.1 有限元模型及节点集的建立

沿踏面轴向取一排节点, 共 21 个, 如图 8 所示, 区域一是轮轨接触区, 区域二是闸瓦接触区, 未标注部位为无接触区域。其中, C 点是轮轨接触中心, D 点位于轮轨接触边缘部位, E 点位于闸瓦接触区域, F 点位于无接触区域。

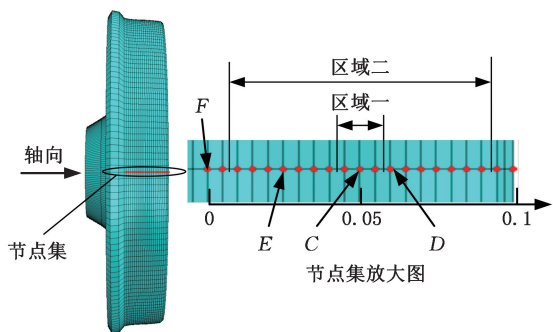


图8 踏面节点集示意图

Fig.8 Schematic diagram of tread node set

3.2 踏面温度场仿真结果

本文设定环境温度为 25 °C, 在轴重 25 t、初速度 100 km/h、制动距离 600 m 的工况下, 在柱坐标下紧急制动结束时刻, 车轮踏面节点温度场如图 9 所示。由图 9 可见: 制动结束时刻车轮踏面最高温度为 210.7 °C, 且闸瓦和踏面接触区中心和踏面下一定深度区域为高温区, 高温区呈半椭圆形。由于轮轨之间接触换热, 可以发现温度最高的区域并非轮轨接触区, 而是位于远离轮缘的轮轨接触区的附近区域。由于制动时间较长, 加上车轮热传导的作用, 表面温度已经渗透到踏面以下一定厚度。

提取踏面节点集制动过程和冷却过程的温度

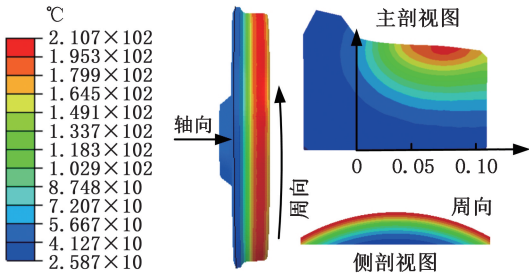


图 9 制动结束时刻踏面温度云图($t=42.7\text{ s}$)

Fig.9 Cloud diagram of tread temperature at the end of braking($t=42.7\text{ s}$)

数据,绘制不同位置节点温度随时间变化三维图。图 10 为制动过程中踏面节点集温度变化图,图 11 为踏面节点集冷却过程温度变化图。由图 10 可见:在制动初期,由于车轮转速高,摩擦生热量大,故踏面温度迅速攀升至最高点,踏面温度达到顶峰后,随着列车车速的减小,车轮摩擦生热量小于热量的散失和传导,踏面温度开始降低。由图 11 可见:列车刹停后,由于导热的作用,车轮踏面各节点温度趋于一致,并随着散热的进行,车轮温度逐渐趋于室温。

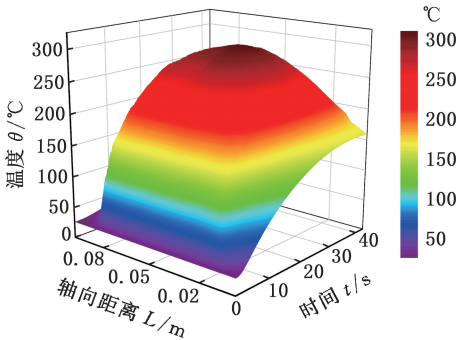


图 10 制动过程中踏面温度变化图($0 < t < 42.7\text{ s}$)

Fig.10 Temperature variation of tread node set during braking($0 < t < 42.7\text{ s}$)

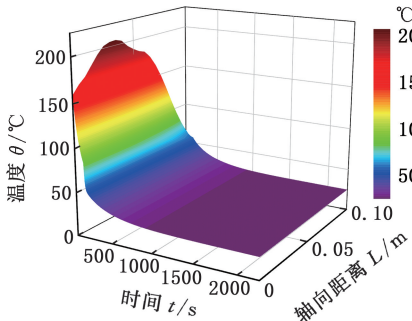


图 11 制动结束踏面温度变化($42.7 < t < 2000\text{ s}$)

Fig.11 Variation of tread temperature during cooling ($42.7 < t < 2000\text{ s}$)

3.3 仿真结果

为了探究列车紧急制动过程中车轮踏面在热-机械载荷综合作用下弹塑性变形的大小,本文引入车轮踏面节点的径向位移作为研究对象。提

取柱坐标下制动过程和冷却过程的踏面节点集的径向位移数据,绘制不同位置节点位移值大小随时间变化图(图 12)、制动过程四节点径向位移变化图(图 13),并记录踏面温度峰值时刻以及制动结束时刻踏面节点集的径向位置(图 14)。

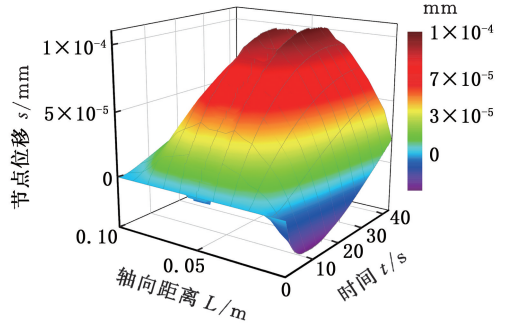


图 12 制动过程中踏面径向位移

Fig.12 Variation of radial displacement of node set during braking process

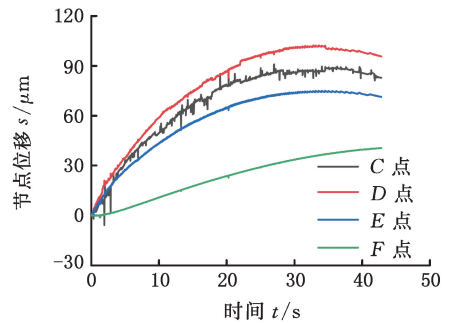


图 13 制动过程四节点径向位移变化

Fig.13 Variation of radial displacement of nodes in braking process

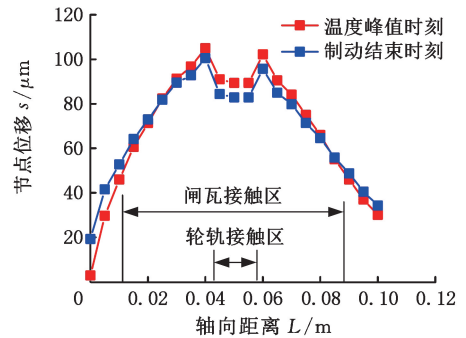


图 14 温度峰值、制动结束时刻踏面径向位移

Fig.14 Radial displacement of tread at temperature peak and braking end

综合图 12~图 14 可知:车轮紧急制动过程中踏面节点的位移主要受车轮温度和轮轨间接触应力的影响,受闸瓦力的影响较小。制动开始时,由于摩擦热的作用,车轮踏面开始受热膨胀,随着踏面温度的升高,节点径向位移也逐渐趋于最大值。在轮轨接触区域,巨大的轮轨接触应力限制了踏面的热膨胀,由图 12 可以看出踏面受热膨胀影响节点向外位移量较大,但在轮轨接触区域较

相邻位置有一条长长的凹陷。由图 13 可以看出 D 点的节点位移全过程大于其他位置,这是由于 D 点位于轮轨接触外边缘部位,不仅受热膨胀的影响,还由于轮轨挤压导致轮轨接触区边缘产生较大的变形凸起。由图 14 可以看出,温度引起的热膨胀对于节点的位移起主导作用。

由图 15 可见:冷却过程中,温度趋于室温的过程中,踏面节点集位移逐渐减小,热膨胀和弹性变形逐渐恢复,但轮轨挤压力、闸瓦力和热载荷导致的塑性变形和热残余变形无法恢复,轮轨接触区域相对凹陷。由图 16 可见:车轮恢复到室温时,轮轨接触区节点位移为负值,且塑性凹陷比较严重,节点位移最大为 $-0.1 \mu\text{m}$;轮轨接触区边缘受挤压,出现凸状形貌,节点位移达到 $5 \mu\text{m}$;闸瓦接触区域节点位移为负值,塑性应变程度较轻;无接触区域踏面形貌基本不变。

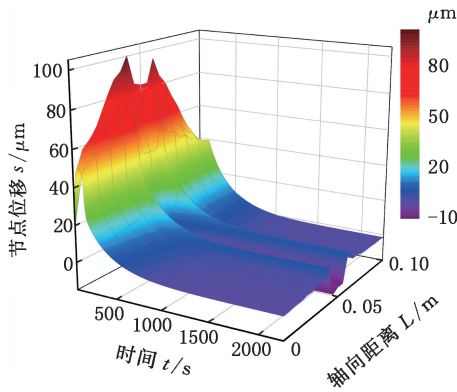


图 15 制动结束后冷却过程踏面径向位移变化
Fig.15 Radial displacement variation of node-set during cooling process

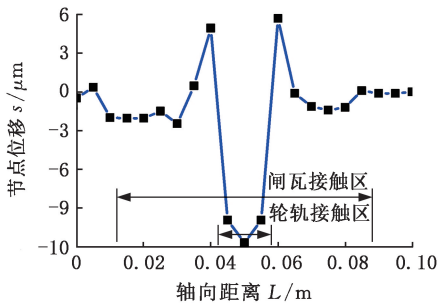


图 16 踏面冷却至室温时节点集径向位移 ($t=2000 \text{ s}$)
Fig.16 Radial displacement diagram of node-set after room temperature restoration ($t=2000 \text{ s}$)

3.4 踏面磨损仿真计算过程及结果

3.4.1 踏面应力分布

在 ABAQUS 中,结合 ALE 技术和 Umesh-motion 子程序对列车车轮旋转一周的磨损情况进行仿真。车轮踏面制动过程中切应力最大值时刻的切应力分布如图 17 所示,车轮和闸瓦接触应力分布如图 18 所示。

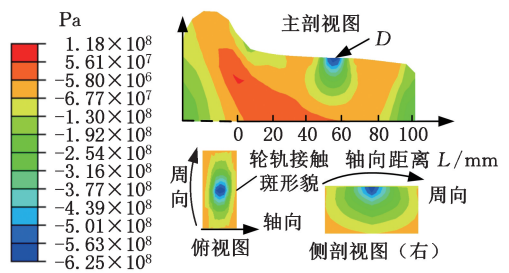


图 17 切向应力达最大值时刻云图
Fig.17 Cloud image when tangential stress reaches the maximum

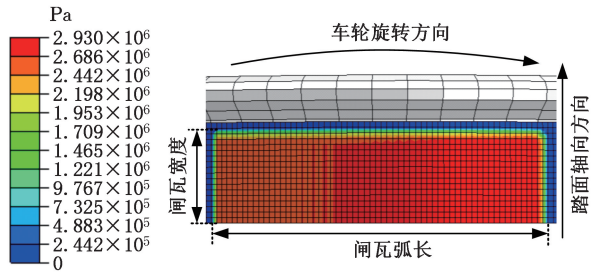


图 18 车轮和闸瓦间接接触应力分布
Fig.18 Contact stress distribution between wheel and brake shoe

由图 17 和图 18 可知,车轮踏面较为平整,车轮和闸瓦间的接触状态较为贴合,此时闸瓦和踏面之间接触应力的分布较为均匀;轮轨接触斑的最大切向应力在接触斑中心,为 118 MPa ;车轮和闸瓦间接接触应力呈圆弧面分布,且在整個接触区内分布较为均匀,最大值可达到 2.93 MPa 。

当钢轨对踏面磨损产生一定磨损深度并形成新的型面后,闸瓦再次与踏面接触,闸瓦与踏面间接接触应力的数值和分布将发生变化,闸瓦与磨损后踏面间接接触应力分布如图 19 所示。由图 19 可知:闸瓦经过磨损后的踏面时,闸瓦和踏面间接接触应力的分布不再均匀,轮瓦接触区中间区域的接触应力明显比两侧区域接触应力小,这是由于钢轨对踏面磨损后,踏面在钢轨经过的路径上形成一道磨痕,闸瓦经过该磨损区域导致它与踏面在该区域的接触强度降低,又由于轮瓦接触区内接触面积减小,故轮瓦接触区内其他区域的接触强度增加。

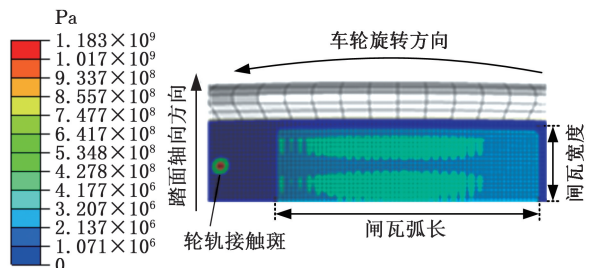


图 19 闸瓦与磨损后踏面间接接触应力分布
Fig.19 Distribution of contact stress between brake shoe and worn tread

3.4.2 踏面磨损仿真结果

根据踏面温度分布,联立式(10)可得到列车大长下坡周期制动过程踏面硬度分布,并对踏面硬度进行单位换算,如图 20 所示。由图 20 可知,踏面硬度最小值为 229 MPa,出现在车轮闸瓦接触区的中心区域;硬度最大值为 324 MPa,出现在制动初始时刻及踏面两侧区域。

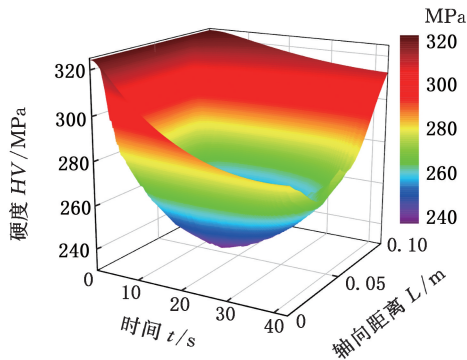


图 20 踏面硬度分布

Fig.20 Hardness distribution of tread surface

由于轮轨接触区面积很小,温度波动有限,为便于子程序控制,假设轮轨接触区内温度分布是均匀的,即轮轨接触区内各处硬度相同。提取轮轨接触区中心点时间-硬度数据,对一次紧急制动过程进行拟合,得到踏面硬度与时间的关系:

$$H_t = -2676.6t^3 + 267\ 764.6t^2 - 7.32t + 3.0 \times 10^8 \quad (16)$$

将硬度拟合结果代入式(13),可以得到一次紧急制动后轮轨接触区的磨损深度

$$h_1 = \frac{3P}{2\pi ab} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \times \sum_{i=0}^{219} \frac{k_r \Delta v_i \Delta t \sqrt{(\xi_1 - y\xi_3)^2 + (\xi_2 + x\xi_3)^2}}{-2676.6t^3 + 267\ 764.6t^2 - 7.3 \times 10^6 t + 3.0 \times 10^8} \quad (17)$$

式中:Δt 为增量步所用时间;i 为圈数,该紧急制动工况下,列车车轮经过 219 圈刹停。

由于闸瓦接触区温度和轮轨接触区温度相差不大,故近似可以看成两区域硬度相同;将硬度拟合结果代入式(14),得到一次紧急制动后闸瓦接触区的磨损深度

$$h_2 = \frac{a_c \left(M + \frac{J}{R^2}\right) - W}{\mu_1 S_z} \cdot \sum_{i=0}^{219} \frac{k_w \Delta v_i \Delta t}{-2676.6t^3 + 267\ 764.6t^2 - 7.32t + 3.0 \times 10^8} \quad (18)$$

在 ABAQUS 后处理模块提取紧急制动后钢轨单独作用下踏面磨损量分布,如图 21 所示。闸瓦单独作用下踏面磨损量分布如图 22 所示。

由图 21 和图 22 得到以下结论:①钢轨对踏

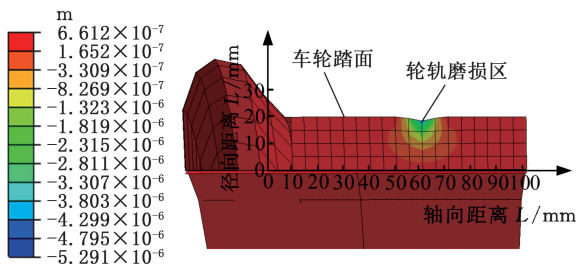


图 21 钢轨作用下踏面磨损深度分布

Fig.21 Distribution of tread wear depth under

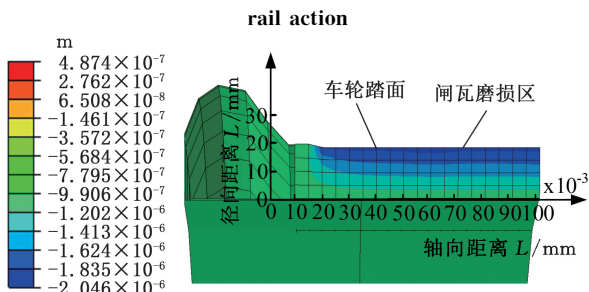


图 22 闸瓦作用下踏面磨损深度分布

Fig.22 Distribution of tread wear depth under

brake shoe action

面磨损量最大值为 $-5.29 \mu\text{m}$,出现在轮轨接触区中心点位置,沿踏面轴向两侧扩散,钢轨对踏面的磨损量逐渐减小;②紧急制动过程结束后,闸瓦对踏面的磨损量分布较为均匀,磨损最大深度达到 $-2.046 \mu\text{m}$ 。

紧急制动过程后,在闸瓦和钢轨共同作用下,踏面磨损量分布如图 23 所示。可以看出:闸瓦和钢轨共同作用下轮瓦接触区内两侧区域的踏面磨损量比闸瓦单独作用下的磨损量大,这是由于轮瓦接触区内两侧区域的接触强度变大;轮轨接触区内踏面磨损量最大值可达 $5.92 \mu\text{m}$,轮瓦接触区磨损量可达 $-2.168 \mu\text{m}$ 。

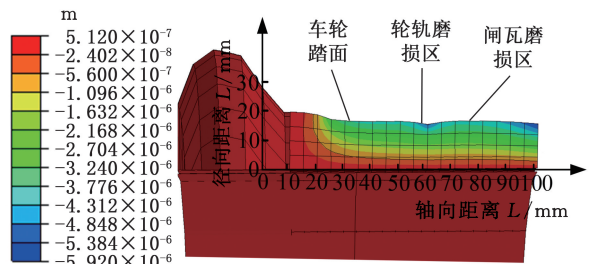


图 23 闸瓦、钢轨共同作用下踏面磨损深度分布

Fig.23 Tread wear depth distribution under joint action of brake shoe and rail

提取制动过程 C、D、E、F 四节点的磨损深度数据,四节点磨损深度随时间的变化规律如图 24 所示。

在制动前期,踏面磨损速率大,随着列车速度的降低,踏面总磨损速率保持下降趋势,列车温度峰值时刻以及列车刹停后,踏面各节点磨损深度如图 25 所示。

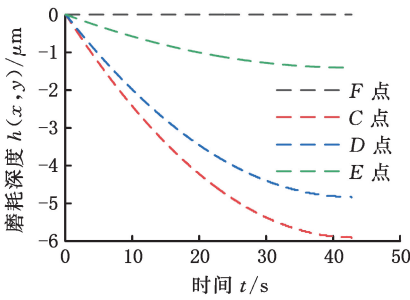


图 24 四节点制动过程磨损深度变化

Fig.24 Variation of wear depth during four-node braking process

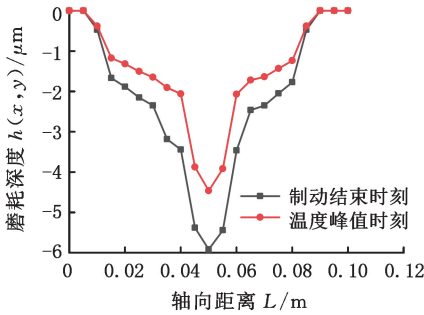


图 25 踏面磨损深度分布

Fig.25 Tread wear depth distribution

由图 25 可以看出,温度峰值时刻到制动结束,轮轨接触区的磨损深度仍会加深,这是因为高温会影响车轮踏面的硬度,从而产生磨损。轮轨接触区的高磨损是由于轮轨间巨大的接触应力,闸瓦接触区的磨损主要影响因素是较大的剪切应力引起的较大滑移;将紧急制动后列车踏面塑性变形凹陷深度和磨损深度进行累加,得到踏面各节点形貌最终曲线,如图 26 所示。由图 26 可以看出:该工况一次紧急制动后,轮轨接触区中心形貌最大下陷 $15.9 \mu\text{m}$,轮瓦接触区域形貌平均下陷 $4 \mu\text{m}$,轮轨接触区域边缘在磨损和挤压的综合作用下,形貌上凸约 $1.45 \mu\text{m}$ 。

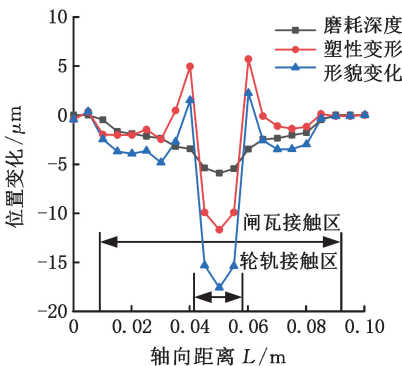


图 26 制动结束后踏面形貌分布

Fig.26 Tread topography distribution after braking

3.5 踏面轮廓变化对比

能模拟真实重载列车制动工况的轮轨制动全尺寸台架实验在国内目前还未见报道,目前国内

闸瓦制动实验大多使用主动环、从动环磨损实验进行踏面磨损的研究,运行速度和轴重偏低,另外没有考虑重载列车制动开始状态下非常大的惯性力矩的影响。

IKEUCHI 等^[24]利用全尺寸制动测功机对列车制动过程进行实验模拟,该实验充分考虑了列车实际运行状态和制动工况,体现在以下几个方面:①使用车轮全尺寸模型;②同时加载了轮轨接触载荷(轴重)和轮瓦接触载荷(闸瓦制动);③轴重加载和运行速度接近真实运行状态;④在车轮轴上加载了惯性矩。

列车制动初始速度 130 km/h ,轴重 20 t (单轮承重 10 t),制动减速度为 0.45 m/s^2 ,循环制动 40 次后,踏面形貌检测结果表明:①制动 40 次结束,车轮踏面滚动摩擦接触区域呈现凹陷状形貌,压痕体积约 $3000 \sim 6000 \text{ mm}^3$;②轮轨中心凹陷深度约 0.1 mm ,在滚动接触区边缘,滚动接触产生的轮胎材料的塑性流动导致胎面凸出,凸出高度峰值约 0.08 mm ,这种凸出可以通过刹车块引起的磨损来修正。

上述列车制动实验工况确实与本文的重载列车制动工况有一定差异。鉴于其全面地考虑了车轮真实运行状态及制动工况,并且目前尚无更合适的实验检测结果,故通过本文仿真结果与该实验结果对制动过程踏面形貌动态变化规律与趋势进行定性分析,发现本文仿真得到的车轮踏面轮廓图 15、图 16 与 IKEUCHI 等^[24]实验得到的踏面轮廓的形貌特点较为相似,在轮轨接触区域都呈现出由磨损与塑性变形共同作用后的踏面凹陷带,在轮轨接触边缘都呈现出由于轮轨挤压作用后的踏面凸出形貌。

4 结论

1)在紧急制动过程中,温度快速升高产生的热应变大于轮轨接触斑处塑性应变,温度对踏面轮廓的影响占据绝对主导地位,即使在轮轨接触斑径向向高接触应力和热摩擦磨损频繁作用下,踏面接触斑中心径向位移依然为正值,即踏面处于热膨胀状态。在轴重 25 t 、初速度为 100 km/h 、制动距离 600 m 的工况下,踏面温度最高达到 $280 \text{ }^\circ\text{C}$,此时踏面热膨胀量达到 0.1 mm 。

2)紧急制动结束车轮踏面冷却至室温后,温度引起的热应变逐渐恢复,轮轨塑性变形、轮轨磨损、轮瓦磨损逐渐占据主导地位,踏面径向位移全部为负值。该工况下轮轨接触区最大塑性凹陷 10^{-2} mm ,闸瓦接触区磨损深度为 $2 \mu\text{m}$;轮轨接

触区边缘因轮轨塑性挤压作用,出现凸状形貌,最大塑性上凸约 $5\ \mu\text{m}$ 。

3)一次紧急制动过后,轮轨接触区中心形貌最大下陷 $15.9\ \mu\text{m}$,其中磨损深度 $5.9\ \mu\text{m}$,塑性变形深度 $10^{-2}\ \text{mm}$ 。闸瓦接触区形貌平均下陷 $4\ \mu\text{m}$,磨损深度和塑性变形深度大约各占据形貌变化的一半。

参考文献:

- [1] 王雪萍,张军,马贺. 高速列车车轮踏面磨损预测方法的研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(4):462-467.
WANG Xueping, ZHANG Jun, MA He. Prediction Method of Wheel Wear of High Speed Train[J]. Tribology, 2018, 38(4):462-467.
- [2] 周亮,郭立昌,丁昊昊,等. 低温环境下列车车轮材料磨损与损伤演变行为研究[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(4):844-853.
ZHOU Liang, GUO Lichang, DING Haohao, et al. Wear and Damage Evolution Behaviours of Railway Wheel Steel in the Low Temperature Environment [J]. Tribology, 2022, 42(4):844-853.
- [3] 王延朋,丁昊昊,邹强,等. 列车车轮踏面滚动接触疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(5):120-128.
WANG Yanpeng, DING Haohao, ZOU Qiang, et al. Research Progress on Rolling Contact Fatigue of Railway Wheel Treads [J]. Surface Technology, 2020, 49(5):120-128.
- [4] 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.
- [5] 沈明学,容彬,李圣鑫,等. 车轮踏面不圆顺对高速列车轮轨界面黏着与车轮表面损伤的影响[J]. 中国机械工程, 2022, 33(22):2664-2672.
SHEN Mingxue, RONG Bin, LI Shengxin, et al. Effects of Wheel Tread Out-of-roundness on Wheel-rail Interface Adhesions and Wheel Surface Damages of High-speed Trains[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(22):2664-2672.
- [6] 王群娣. 重载车轮轮辋不同深度对磨损与损伤行为的影响[J]. 铁道车辆, 2016, 54(9):6-9.
WANG Qundi. Effects of Different Depths of Heavy Haul Wheel Rims on Wear and Damage[J]. Rolling Stock, 2016, 54(9):6-9.
- [7] 陈帅,吴磊,张合吉,等. 踏面制动温升对重载铁路车轮磨损的影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2):92-98.
CHEN Shuai, WU Lei, ZHANG Heji, et al. Influence of Temperature Rising of Tread Braking on Wheel Wear for Heavy Haul Freight Car[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2):92-98.
- [8] 郭涛,王宁,刘永强. 车轮踏面常规磨损对高速列车动力学性能的影响[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(4):44-49.
GUO Tao, WANG Ning, LIU Yongqiang. Influence of Wheel Wear on Dynamic Performance of High-speed Train[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2020, 33(4):44-49.
- [9] 董永刚,仪帅,黄鑫磊,等. 重载列车紧急制动过程车轮踏面疲劳裂纹萌生寿命预测[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5):123-131.
DONG Yonggang, YI Shuai, HUANG Xinlei, et al. Prediction of Fatigue Crack Initiation Life of Wheel Tread during Emergency Braking of Heavy Haul Train[J]. China Railway Science, 2021, 42(5):123-131.
- [10] 董永刚,仪帅,黄鑫磊,等. 列车紧急制动过程中踏面温度分布及磨损预测[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4):431-438.
DONG Yonggang, YI Shuai, HUANG Xinlei, et al. Temperature Distribution of Treads and Wear Prediction during Train Emergency Braking [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(4):431-438.
- [11] 宋剑锋,黄鑫磊,仪帅,等. 列车制动过程踏面温度场及应力-应变分布特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(10):2773-2784.
SONG Jianfeng, HUANG Xinlei, YI Shuai, et al. Temperature Field and Stress-strain Distribution of Tread during Train Braking[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(10):2773-2784.
- [12] KATO T, FUJIMURA T, YAMAMOTO Y, et al. Effect of Wheel Size and Tread Braking on Sub-surface Crack Initiation in Heavy Haul Car Wheels [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 19:238-248.
- [13] 李英奇,张银花,刘佳朋,等. 重载铁路钢轨磨损与损伤行为试验研究[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(6):152-160.
LI Yingqi, ZHANG Yinhu, LIU Jiapeng, et al. Experimental Study on Wear and Damage Behavior of Rail for Heavy Haul Railway[J]. China Railway Science, 2022, 43(6):152-160.
- [14] 黄焱,阳涛,张志勇. 列车运行阻力试验研究[J]. 科技视界, 2019(11):52-53.
HUANG Yan, YANG Tao, ZHANG Zhiyong.

- Research on Test of Resistance to Motion of Trian [J]. Science & Technology Vision, 2019(11):52-53.
- [15] 曹世豪, 李煦, 张四放, 等. Hertz 理论与有限元法分析轮轨接触疲劳的差异性研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(6):126-134.
CAO Shihao, LI Xu, ZHANG Sifang, et al. Research of the Differences between Hertz Theory and Finite Element Method to Analyze the Fatigue of Wheel/Rail Contact[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(6):126-134.
- [16] 黄鑫磊. 货运列车长大下坡周期制动踏面热疲劳及热摩擦损伤研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2022.
HUANG Xinlei. Study on Thermal Fatigue and Thermal Friction Damage of Brake Tread of Freight Train with Long Downhill Cycle[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [17] 雷国军. 重载列车车轮表面对流传热特性的数值研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2020.
LEI Guojun. Numerical Study on Convective Heat Transfer Characteristics on Wheel Surface of Heavy-haul Train [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2020.
- [18] 张金煜, 虞大联, 李海涛, 等. 列车运行过程中车轮车轴对流换热系数的等效值算法[J]. 铁道车辆, 2022, 60(6):57-63.
ZHANG Jinyu, YU Dalian, LI Haitao, et al. An Equivalent Value Algorithm for Convective Heat Transfer Coefficient of Wheel and Axle during Train Operation[J]. Rolling Stock, 2022, 60(6):57-63.
- [19] 雷国军, 林志敏, 张永恒, 等. 重载列车车轮表面对流传热特性数值研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(7):1902-1910.
LEI Guojun, LIN Zhimin, ZHANG Yongheng, et al. Numerical Study on Convective Heat Transfer Characteristics on the Wheel Surface of Heavy-duty Train[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(7):1902-1910.
- [20] 朱衡. 高速重载列车踏面制动过程热-机械-组织耦合仿真[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2019.
ZHU Heng. Thermal-mechanical-tissue Coupling Simulation of High-speed and Heavy-haul Train Tread Braking Process[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [21] 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]. 秦皇岛:燕山大学, 2021.
YI Shuai. Study on Thermal Friction Damage and Thermal Fatigue Life of Wheels during Tread Braking of Heavy-duty Trains[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [22] 丁军君. 基于蠕滑机理的重载货车车轮磨耗研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008:46-47.
DING Junjun. Research on Wheel Wear of Heavy Duty Truck Based on Creep Mechanism [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008:46-47.
- [23] 胡军海. 重载铁路货车轮对磨耗及其对动力学的影响研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021:20-21.
HU Junhai. Study on Wheelset Wear of Heavy-haul Railway Freight Cars and Its Influence on Dynamics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021:20-21.
- [24] IKEUCHI K, HANDA K, LUNDÉN R, et al. Wheel Tread Profile Evolution for Combined Block Braking and Wheel-rail Contact: Results from Dynamometer Experiments [J]. Wear, 2016, 366/367:310-315.

(编辑 陈 勇)

作者简介:宋剑锋,女,1973年生,副教授、博士。研究方向为车轮踏面制动损伤机理。董永刚*(通信作者),男,1974年生,教授。研究方向为轮轨制动热摩擦磨损及疲劳损伤。E-mail:d_peiter@163.com。

本文引用格式:

宋剑锋,时迎港,黄伟建,等.重载列车紧急制动过程踏面轮廓变化定量预测[J]. 中国机械工程,2025,36(2):369-379.
SONG Jianfeng, SHI Yinggang, HUANG Weijian, et al. Quantitative Prediction of Tread Profile Variations during Emergency Braking of Heavy Duty Trains[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2):369-379.