

文章编号: 1005-0523(2025)04-0070-10



磨损诱发的高速列车车轮-道岔接触特性 演变规律研究

赵俊龙¹, 昌超¹, 杨逸航¹, 程玉琦^{1,3}, 占贤², 陈泳文¹

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西南昌 330013; 2. 中国铁路南昌局集团有限公司南昌车辆段, 江西南昌 330002; 3. 江西机电职业技术学院, 江西南昌 330013)

摘要:当高速列车车轮与道岔发生磨损,特别是磨损车轮通过道岔区域时,因几何不连续性引发的轮轨动态响应,对行车安全构成威胁,严重影响乘坐舒适性,亟需深入研究。采用有限元方法,深入探究高速列车车轮与道岔间的应力分布、相互作用及其影响机制,以及随着车轮磨损和道岔几何形状变化的演变规律。结果表明,车轮通过道岔时,接触应力和 Von Mises 等效应力随车轮位置变化而显著波动。当车轮从尖轨顶宽 15 mm 移至 35 mm 时,接触应力和最大 Von Mises 等效应力分别增长约 14.4% 和 4.1%。车轮磨损改变了轮缘和踏面形状,影响轮轨接触关系和应力分布,导致接触点偏离,应力沿深度方向分布更不均匀,磨损车轮与新车轮相比,最大 Von Mises 等效应力通常更高,且随磨损程度增加差异更显著,可能加剧材料疲劳损伤。同时,磨损车轮应力更大,进而影响磨损速率。为优化车轮和道岔设计,降低轮轨接触应力集中,减缓磨损提供了理论依据。

关键词:高速列车;轮-岔关系;车轮磨损;接触特性;应力分布

中图分类号: U213.8

文献标志码: A

本文引用格式:赵俊龙,昌超,杨逸航,等. 磨损诱发的高速列车车轮-道岔接触特性演变规律研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(4): 70-79.

Study on the Evolution Law of Wheel-Turnout Contact Characteristics of High-Speed Train Induced by Wear

Zhao Junlong¹, Chang Chao¹, Yang Yihang¹, Cheng Yuqi^{1,3}, Zhan Xian², Chen Yongwen¹

(1. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Nanchang Rolling Stock Depot, China Railway Nanchang Group Co., Ltd., Nanchang 330002, China;

3. Jiangxi Vocational College of Mechanical & Electrical Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: When high-speed train wheels and turnouts (switches and crossings) experience wear, especially when worn wheels pass through the turnout area, the wheel-rail dynamic responses triggered by geometric discontinuities pose a threat to driving safety and severely affect passenger comfort, making it urgent to conduct research. By employing the finite element method, an in-depth investigation is carried out into the stress distribution, interaction, and their influence mechanisms between high-speed train wheels and turnouts, as well as the evolving laws with the changes in wheel wear and turnout geometric shapes. The study finds that the interaction between

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2406909)

wheels and turnouts is influenced by multiple factors, including the wear states of wheels and turnouts, cumulative tonnage passed, and track geometric shapes. When a wheel passes through the turnout, as its position changes, the wheel-turnout contact stress and Von Mises equivalent stress fluctuate significantly. When the wheel moves from a position where the top width of the switch rail is 15 mm to one where it is 35 mm, the overall contact stress rises notably, with a growth rate of approximately 14.4%; the maximum Von Mises equivalent stress also shows an increasing trend, with a growth rate of about 4.1%. Wheel wear not only alters the shapes of the wheel rim and tread but also significantly affects the wheel-rail contact relationship and stress distribution. The wheel-rail contact point gradually deviates from the track center, and this deviation is positively correlated with the increase in operating mileage. The stress distribution along the depth direction becomes more uneven and is greater compared to that of a newly re-profiled wheel. Meanwhile, the changes in stress affect the wheel wear rate.

Key words: high speed trains; wheel-turnout relationships; wheel wear; contact characteristics; stress distribution

Citation format: ZHAO J L, CHANG C, YANG Y H. Study on the evolution law of wheel-turnout contact characteristics of high-speed train induced by wear[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(4): 70-79.

道岔作为铁路系统中实现列车线路转换的关键设备,其性能与安全性直接关系到铁路运输的整体效率与乘客的乘坐体验。当车轮和道岔出现磨耗,列车高速通过时,由于几何不连续性的存在,会引发显著的轮轨动态响应,这不仅影响轨道结构的寿命,还成为制约高速铁路行车安全与乘坐舒适性的关键因素。因此,深入探究车轮与道岔之间的应力分布及其如何随车轮磨耗状态和道岔几何形状的变化而演变,对于优化道岔设计、提升运输效率及保障行车安全具有至关重要的意义。

材料磨耗与寿命方面,Clayton^[1]研究了不同材料钢轨的磨耗速率,李树林等^[2],Liu等^[3],李俊琛等^[4]研究了利用S-N曲线分析与预测车轮寿命的方法;周宇等^[5]进一步探究了不同轮轨接触位置对疲劳的影响;这些研究为后续考虑车轮磨耗对道岔应力影响提供了关于材料磨耗和寿命预测方面的参考。同时,Fang等^[6]研究了轮轨接触问题的优化建模方法;Wen等^[7]提出了一种新方法量化重载列车的轮轨接触力;这些研究为准确模拟轮轨接触行为提供了更有效的建模手段。Srivastava等^[8]虽然通过Timoshenko方法分析了不同轮轨匹配下的接触区分布,但准确性受到限制;Ma等^[9]则通过分析仿真和现场数据,探索了辙叉区钢轨的黏滑及接触应力分布;王璞等^[10]基于有限元法,构建了弹性基底约

束下的重载道岔合金钢组合辙叉模型,揭示了翼轨与心轨上的应力区别。尽管这些研究对不同工况下道岔应力变化进行了有益的探索,但大多未充分考虑车轮磨耗这一重要因素。

随着仿真技术、实验测试手段及材料科学的发展,国内外学者对轮轨相互作用的研究也日益深入。在轮轨冲击与接触关系研究方面,Wiedorn等^[11]基于简化的有限元模型研究了轮轨冲击角和滚动接触半径对应力应变的影响;马俊琦等^[12]、丁军君等^[13]则研究了两种不同钢轨廓形的道岔区轮轨接触关系;陶功权等^[14]建立模型计算了接触应力,并与CONTACT算法进行了对比。然而,他们的研究未能全面涉及应力的分布情况。为此,杨新文等^[15]利用切片投影法找出轮轨接触点,利用有限元法更加精确地求解轮轨法向应力。杨逸航等^[16-17]则探索了道岔小应力直尖轨打磨廓形。徐井芒等^[18]、郑兆光等^[19]研究了60 N钢轨的接触几何关系变化和应力变化。但未能全面考虑实际车轮与道岔磨耗、通过总重等多种因素的影响。

车轮磨耗意味着轮缘与踏面形状的改变,这将显著影响轮轨接触关系及应力分布,严重时甚至会引发列车脱轨。因此,针对磨耗车轮通过道岔时的应力分析显得尤为重要,有待深入、全面探索。同时,现有的研究大多聚焦于单一因素的分析,未能

全面考虑车轮磨耗、道岔磨耗、通过总重等多种因素的交互影响。为此,本文采用Hypermesh进行网格划分,并结合Abaqus进行应力分析,基于现场实测数据,对比研究了新轮与磨耗程度不同的车轮(运行里程5万km、10万km、15万km、20万km)在通过总重为10 Mt道岔上的相互作用过程及应力变化情况。研究了随着车轮位置与接触关系的变化,接触应力和Von Mises等效应力的变化规律。

本文深入探讨了车轮磨耗对高速道岔应力分布的影响,综合分析了车轮、道岔磨耗及几何形状改变等多种因素对车轮与道岔相互作用的影响,探索了磨耗速率变化。这一研究不仅有助于优化道岔设计,提升运输效率,更为维护保障高速铁路系统整体的安全性和可靠性提供了可靠的依据。

1 轮轨有限元模型建立

道岔结构复杂,由基本轨、尖轨、辙叉、护轨等部件组成,各部件协同工作,确保列车能够平稳、高效地从一个轨道转移到另一个轨道。其中,基本轨承受车轮的垂直压力,与尖轨共同应对车轮的横向水平力,维持轨道结构的稳定性;尖轨与辙叉则负责引导列车进入预定的线路;护轨等部件则用于防止车轮脱轨,其基本特征与参数如图1所示。

通过建立有限元模型,精确模拟高速铁路道岔

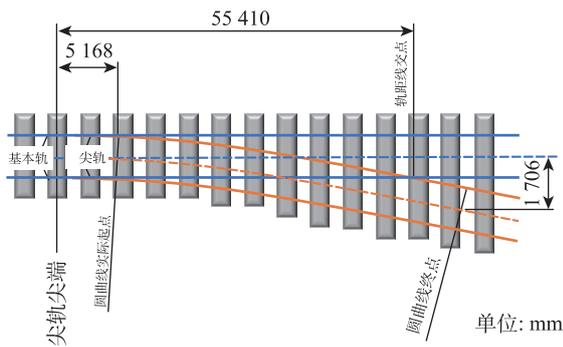


图1 高速道岔基本特征与参数

Fig. 1 Basic characteristics and parameters of high-speed turnouts

与轮轨相互作用过程。车轮模型的踏面形状基于实测数据进行建模,车轮采用LMA踏面车轮,具体参数如表1所示。

道岔模型整体依据18号道岔设计图纸进行建模,道岔各部分钢轨的廓形基于现场实测数据进行精细化建模,以确保几何参数与实际工况高度吻

表1 LMA踏面车轮模型参数

Tab.1 Parameters of LMA tread wheel model

参数	数值/mm
车轮半径	460
轮缘厚度	30
轮辋宽度	135
轨距	1 435
轮对内侧距	1 353

合。道岔模型参数如表2所示,道岔三维模型如图2所示。

使用HyperMesh软件进行网格划分,并在

表2 18号道岔模型参数

Tab.2 Parameters of 18# switch model

参数	数值
辙叉角	3°10'
辙叉区轨距	1 435 mm
轨枕间距	60 cm
钢轨规格	60 kg/m

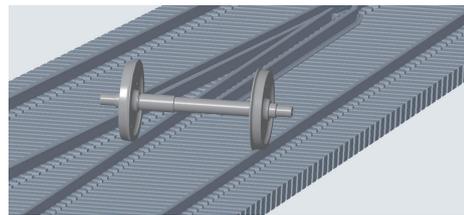


图2 道岔三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of turnout

Abaqus软件中进行轮轨接触分析。

在Abaqus中,主要使用Interaction、Load等几个模块来进行定义。参考现有研究中的轮轨模型^[20-22],通过Interaction功能模块定义轮轨之间的接触面,即主面和从面;通过Intprop模块,设置接触属性,包括法向接触属性和切向属性,其中,法向接触属性设置为hard contact,在这种接触方式下,当接触压力变为零或负值时,接触面会自动分离;切向行为设置为罚。有限元最终得到的方程为

$$\mathbf{K}\delta = \mathbf{Q} \quad (1)$$

式中: \mathbf{K} 是总体刚度矩阵; δ 是所有节点的位移列阵; \mathbf{Q} 是总的节点载荷列阵; \mathbf{K} 是所有单元刚度矩阵的叠加

$$\mathbf{K} = \sum_E \mathbf{k}^E \quad (2)$$

此外,在Property模块中,定义了车轮和钢轨材料的力学属性。在接触设置中,采用面面接触算

法,并设置车轮踏面与钢轨顶面之间的接触,接触摩擦系数确定为0.3。接触区域使用六面体单元C3D8R进行离散,这种离散方式能够很好地适应复杂的几何形状,更准确地捕捉接触应力和变形,确保其可靠性。同时,细化部分种子尺寸为1.5 mm,非接触区域的种子尺寸偏大,在确保仿真结果可靠性的同时优化了计算资源,并确保了接触区等关键区域的网格密度足够高,以更好地反映应力集中现象。模型中共划分了216 227个单元和238 854个节点。部分网格划分如图3所示。

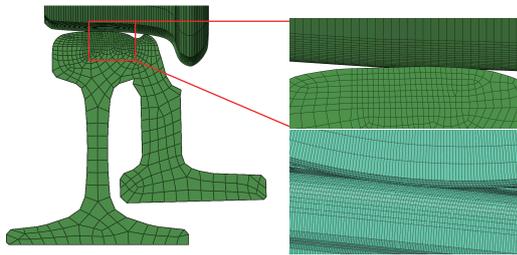


图3 网格划分
Fig. 3 Grid division

材料属性方面,根据文献[12],车轮和钢轨均选用高强度合金钢,杨氏模量设为210 GPa,泊松比为0.3,密度为7 850 kg/m³。材料的应力-应变方程表示为

$$\sigma = \begin{cases} E_c \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_s \\ \sigma_s + E_1 \times (\varepsilon - \varepsilon_s), & \varepsilon > \varepsilon_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; σ_s 为屈服极限; E_c 为弹性模量; ε_s 为屈服点的总应变; $E_1 = \tan \beta$ 为应变强化模量。

材料的本构关系如图4所示。

边界条件和载荷方面,模型中的车轮被约束为只能沿轨道方向滚动和绕轮轴转动。道岔和轨道则被固定在地基上,限制其所有方向的移动。根据国际铁路联盟标准 UIC510-5《Technical Approval of Solid Wheels》的规定,在直线上轮对的荷载为

$$\sigma = \begin{cases} F_z = 1.25P \\ F_y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

本文考虑车轮,则

$$F_z = 0.625P \quad (5)$$

式中: F_z 为轮轨垂向力; F_y 为轮轨横向力。

此外,通过仿真车轮在不同关键截面的应力分布,可以更加准确地评估车轮与道岔间受力,本文

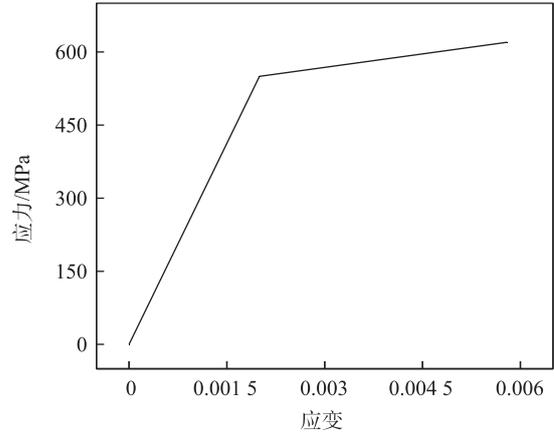


图4 材料的本构关系

Fig. 4 The constitutive relationship of the material

特别关注了车轮通过尖轨顶宽15, 35, 40 mm这三个关键截面的应力变化及规律。如图5(b)所示,这些关键截面代表了车轮与道岔相互作用过程中可能产生高应力的区域。

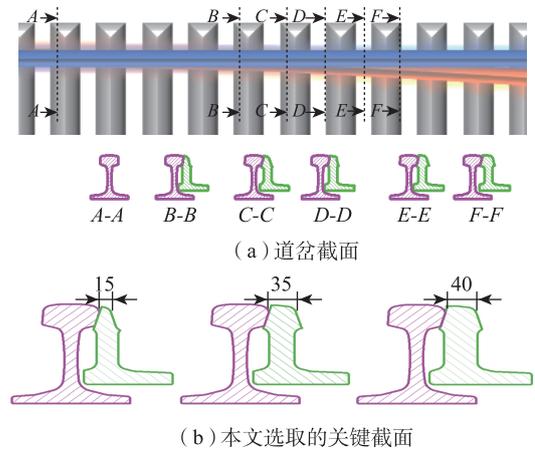


图5 道岔截面图

Fig. 5 Sectional view of switch

为验证所建轮轨计算模型的合理性,本文与模型参数相似的文献[12]的计算结果进行对比。对比显示,在顶宽15, 40 mm处的接触应力均在1 800, 2 100 MPa左右,两种模型的结果高度相似,证明本文所建的辙叉区轮轨接触模型能较为准确地反映辙叉区受力情况。

2 轮轨接触几何关系分析

良好的轮轨接触几何关系是确保列车安全、高效运行的关键要素。它直接影响车轮与钢轨之间的接触点位置、接触面积、应力分布,进而对列车的

多项性能产生显著影响,如脱轨系数、轮重减载率等,还与轨道结构的磨耗、疲劳寿命以及噪声振动等问题密切相关。因此,对轮轨接触几何关系的分析具有重要意义。

首先对车轮磨耗状况进行评估,以新铰车轮、磨耗车轮为研究对象,通过现场实测获取相关数据,并依据这些数据绘制了车轮磨耗的变化曲线以及主要磨耗发生位置的分布图,如图6所示。磨耗点主要集中在踏面横向坐标-40~60 mm的范围内,随着运行里程的增加,磨耗量逐渐增大,当运行10万 km时

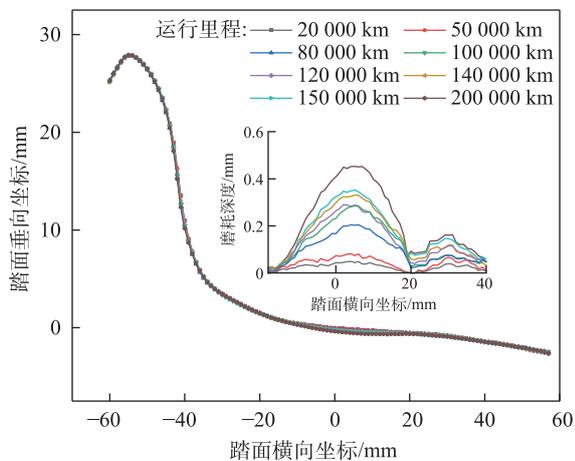


图6 车轮磨耗分布

Fig. 6 Distribution of wheel wear

最大磨耗量已接近0.4 mm,20万 km时最大磨耗量接近0.6 mm。

本文采用迹线法对轮轨接触几何关系进行分析,迹线法是分析轮轨接触关系时常用的一种有效工具,该方法把三维接触问题简化为二维曲线问题,用于分析轮轨接触的非线性特性,能够准确地反映轮轨在不同横移量下的接触状态。

使用LMA踏面新铰车轮与经磨耗后的LMA踏面分别进行轮轨关系分析,轨距为1 435 mm,轨底坡为1/40,车轮名义滚动圆半径为460 mm。每0.5 mm计算1次。新轮和磨耗轮与钢轨的接触点分布情况如图7所示,图7(a)~图7(f)分别为顶宽15、35、40 mm处轮轨接触点位置对比示意图,其中,磨耗轮的运行里程为10万 km。

结果显示,新轮与钢轨的接触点相对分散,沿横坐标方向分布较为均匀,这种分布可减少应力集中,降低轮轨磨耗和损伤的风险,有助于轮轨系统在长期运行中保持稳定。而当车轮发生磨耗时,轮轨接触点逐渐偏离钢轨中心,轮轨接触几何关系呈现出较强的非线性特性。这种非线性特性导致轮轨接触点位置随横移量的分布不均,集中在踏面的几处横向位置,即磨耗车轮与钢轨的接触点更为集中,易导致应力集中,增加轮轨磨损擦伤的风险。

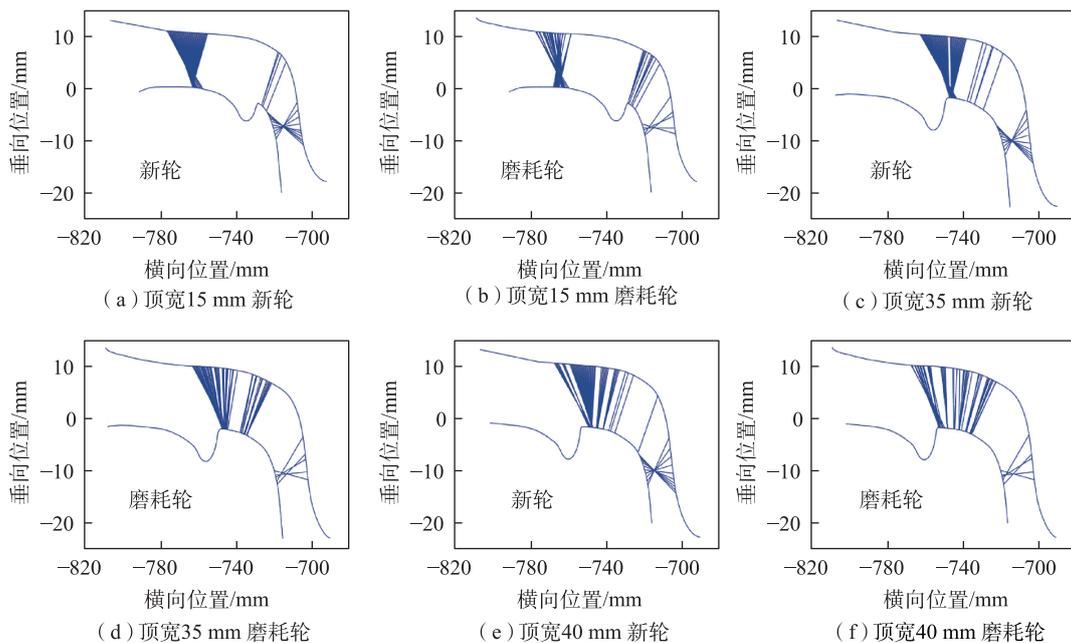


图7 接触点位置图

Fig. 7 Contact point location map

随着磨耗加重,轮轨对接触时,易在多个平衡位置处出现跳跃现象,可引发两点接触和冲击振动,区域轮轨接触频次增多,踏面材料发生疲劳剥离损伤的概率增大。

此外,由图7可知,在尖轨顶宽15 mm的位置处,接触点还集中在基本轨上,在尖轨顶宽35 mm的位置处,新车轮和运行里程10万 km的车轮,其轮轨接触点已经转移到尖轨上,尖轨已经开始承受轮载。且由图可以看出,随着车轮磨耗增加,轮轨接触点会逐渐偏离钢轨中心,偏移量随运行里程的增加而增加,进而影响了列车运行的平稳性和安全性。因此,选取几种不同运行里程的车轮作为研究样本,在后续研究中基于这些模型可进一步探究轮轨相互作用规律。

3 应力变化及分布

3.1 接触应力的变化规律

图8展示了不同磨耗状况的车轮通过道岔时接触斑的变化情况。图9为不同运营里程的车轮通过尖轨顶宽15、35、40 mm这3个关键位置处的接触应力。

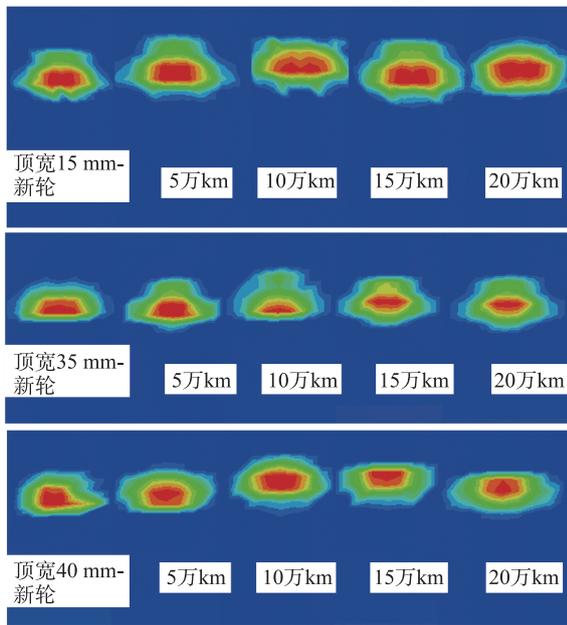


图8 接触斑
Fig. 8 Contact spot

从单一车轮过岔的滚动过程来看,三组车轮的接触应力整体均先增大后减小,主要原因是车轮在滚动过程中,接触面积和接触状态发生了变

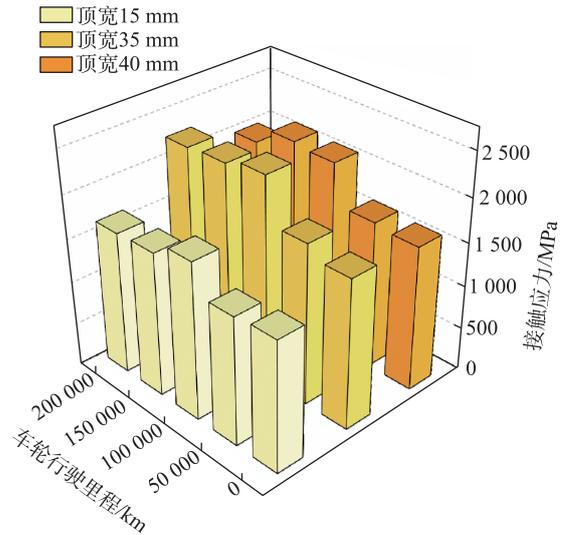


图9 接触应力变化
Fig. 9 Changes in contact stress

化,特别是在基本轨和尖轨的过渡阶段,车轮在顶宽15 mm处,接触面积相对较大,随着车轮从顶宽15 mm向顶宽35 mm过渡,接触面积减小,并且接触点向车轮轮缘偏移,接触应力整体呈现出明显增大的趋势。至顶宽40 mm时,接触面积的位置和大小趋于稳定,随着接触状态的进一步调整,接触应力略有回落。

对比不同磨耗状态车轮的接触应力情况,磨耗车轮与新车轮的变化规律大致相似,但也存在一定差异。新车轮在尖轨顶宽15、35、40 mm三个位置的接触应力分别为1 507、1 724、1 667 MPa,行驶10万 km后,分别增加至1 808、2 357、2 153 MPa,增长率分别为20%、36.72%、29.15%。这是因为车轮踏面产生磨耗,接触区域的位置和形状变化较大,导致接触面积减小和应力集中。同时,随着磨耗程度的增加,接触点的分布变得更加分散,这进一步加剧了接触应力的增大。随着车轮继续磨耗,接触状态趋于平稳,接触面积由于磨耗增大,应力有所回落。

此外,值得注意的是在尖轨顶宽35 mm处,车轮的接触点相对集中,接触应力较大,容易发生滚动接触疲劳。这可能会加速道岔的磨耗,影响其使用寿命。

3.2 最大 Von Mises 等效应力的变化规律

Von Mises 等效应力是反映材料在多向应力状态下综合应力水平的指标,图10所示为车轮过岔的

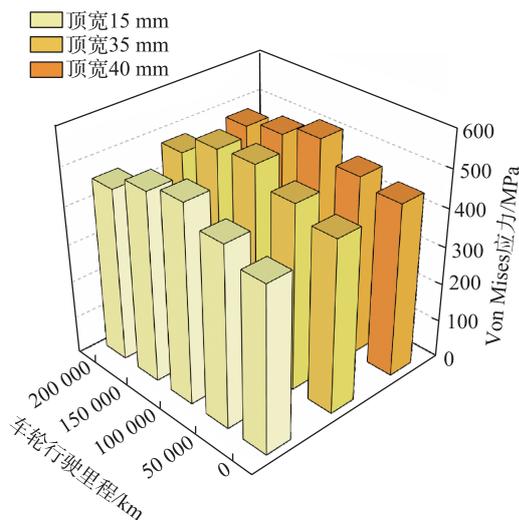


图10 最大 Von Mises 应力变化

Fig. 10 Maximum Von Mises stress variation

最大 Von Mises 等效应力变化情况,由浅色到深色的色柱分别代表不同车轮在尖轨顶宽 15、35、40 mm 位置处的最大 Von Mises 等效应力,结果表明,新铤车轮在顶宽 15、35、40 mm 位置的最大 Von Mises 等效应力分别为 436、454、457 MPa,行驶 10 万 km 后,分别增加至 521、535、527 MPa,增长率分别为 19.49%、17.84%和 15.32%。车轮通过道岔时,随着车轮从尖轨顶宽 15 mm 向顶宽 35 mm 过渡,最大 Von Mises 等效应力整体呈现出增大的趋势。当车轮继续从顶宽 35 mm 向顶宽 40 mm 过渡时,增长趋势变缓甚至下降。

对比不同磨损状态车轮的结果,磨损车轮与新车轮类似,最大 Von Mises 等效应力随车轮的滚动也呈增大趋势,但由于车轮踏面磨损的作用,磨损车轮的最大 Von Mises 等效应力通常高于新车轮,且随着磨损程度的增加,这种差异更显著。可能加剧车轮材料的疲劳损伤和裂纹扩展,对车轮寿命和安全性产生不利影响。

3.3 Von Mises 应力沿踏面深度的变化

图 11 所示为 Von Mises 应力沿踏面深度的分布,由图可知,磨损车轮与新轮的 Von Mises 应力分布规律具有相似性。但随着车轮踏面的磨损,接触区域的位置和形状变化导致应力分布变化,与新车轮相比,磨损车轮的 Von Mises 应力分布偏大且分布不均匀。

为探究 Von Mises 等效应力的影响范围,进一步分析该等效应力沿车轮踏面深度方向的变化情

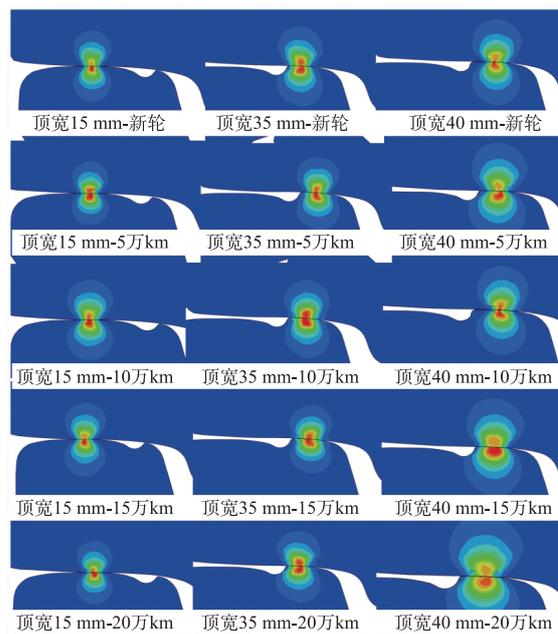


图11 Von Mises 应力沿深度变化

Fig. 11 Von Mises stress variation along depth

况,选择新轮与运行里程 20 万 km 的磨损车轮通过道岔的工况进行分析,结果如图 12 所示,图 12(a)为新铤车轮在尖轨顶宽 15、35、40 mm 处的应力沿深度变化情况,图 12(b)为运行里程 20 万 km 车轮的变化情况。沿踏面深度方向,0~5 mm 范围内,Von Mises 等效应力达到最大值,超过 5 mm 之后 Von Mises 等效应力值缓慢下降。以新铤车轮 40 mm 截面处为例,在此深度范围内的最大应力为 457 MPa,而运行里程 20 万 km 的车轮则达到 527 MPa,增长了 15%。这是由于在接触区,车轮踏面与轨道表面的接触面积较小,应力集中现象明显,应力值较大。然而,在踏面深处,由于材料内部的约束和应力传递效应,应力值总体上小于接触表面。不同磨损状态车轮间对比,接触区域的 Von Mises 等效应力整体呈现出增大的趋势。

3.4 磨损特性变化

Clayton 对车轮及钢轨材质的磨损特性进行了如图 13 所示的描述^[1],文章研究了 CrMoA, MnSi-CrV 等不同材料的钢材,钢轨材料多样,性能各异。碳素钢轨通过调整含碳量改变硬度和韧性,高碳钢轨虽耐磨但易脆裂,适用于轻载线路。对于不同轮轨材料的车轮,磨损速率与接触应力整体呈线性趋势,磨损速率均随着接触应力的增加而增大,但不同轮轨材料的磨损速率不同。碳含量越高,相

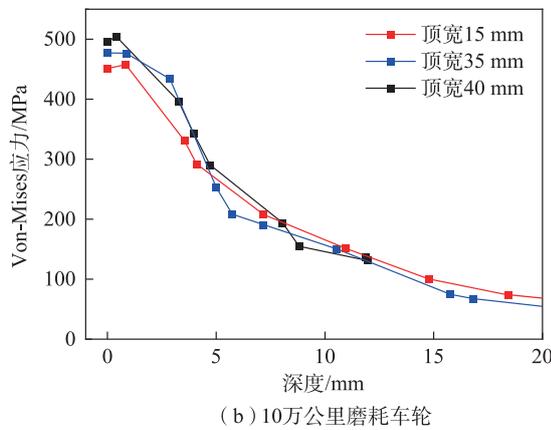
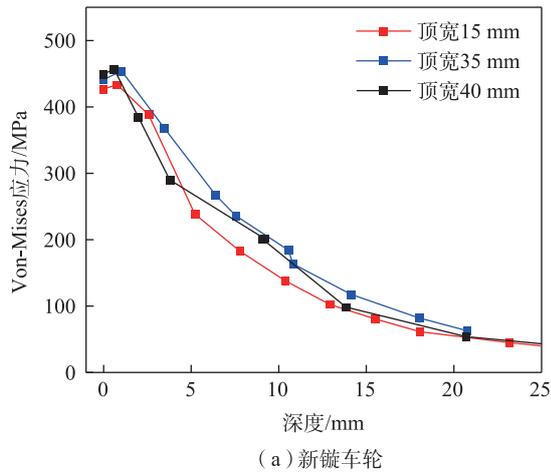


图 12 不同截面处 Von Mises 应力沿踏面深度变化
Fig. 12 Von Mises stress variation along tread depth at different cross-sections

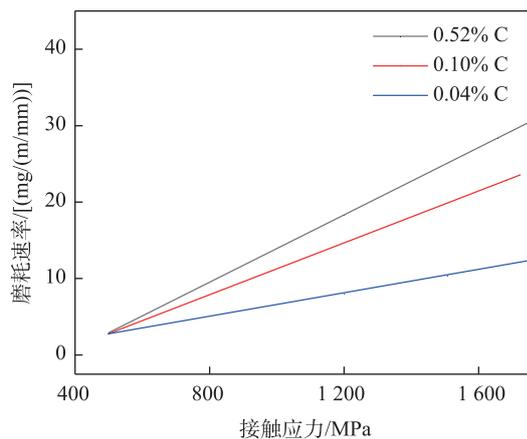


图 13 接触应力对磨耗速率影响^[1]
Fig. 13 Effect of contact stress on wear rate^[1]

同条件下的磨耗速率越快。

将前文通过仿真得到的新镲车轮与磨耗车轮的接触应力数据代入,得到了不同含碳量车轮的磨

耗速率,如图 14 所示,含碳量为 0.52% 的新镲车轮磨耗工况下,瞬时磨耗速率在顶宽 15 mm 处可达 25.04 mg/(m/mm);顶宽 35 mm 处,新镲车轮的瞬时磨耗速率可达 29.82 mg/(m/mm)。运行里程 15 万 km 车轮磨耗工况下,轮轨磨耗速率在顶宽 15 mm 处瞬时可达 28.37 mg/(m/mm),增长率达 13.29%;在顶宽 35 mm 处可达 41.26 mg/(m/mm),增长率达 38.36%。随着时间的推移,车轮磨耗会逐渐加剧,会增大轮轨接触应力,加速磨耗过程。这一现象在顶宽 35 mm 附近区域尤为明显,因为这些区域承受的接触应力更大,磨耗也更为严重,进而影响列车的运行安全和稳定。建议加强定期检查,以评估磨耗状况并及时进行维修,或通过优化车轮和道岔的几何形状,减少轮轨接触应力的集中,从而降低磨耗速率。

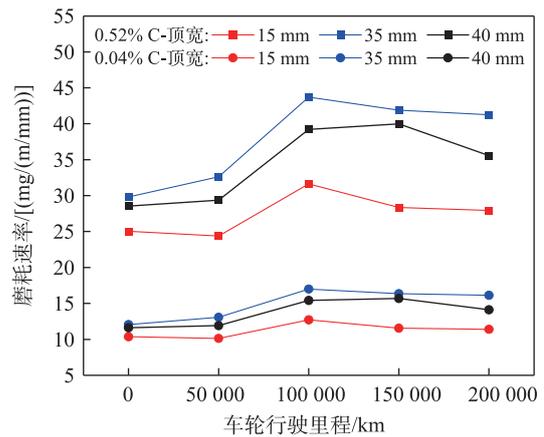


图 14 不同磨耗工况下的磨耗速率
Fig. 14 Wear rate under different wear conditions

4 结论

车轮与道岔的相互作用是一个复杂的动态过程,受到车轮磨耗、通过总重、轨道几何形状等多种因素的影响。

1) 轮轨接触几何关系的分析表明,车轮磨耗会显著改变轮轨接触点的分布。新轮轮轨接触点沿水平轴相对分散且均匀,有助于降低应力集中并减少轮轨磨耗。当车轮发生磨耗时,轮轨接触点逐渐偏离轨道中心,且偏离量随运营里程的增加而增加。

2) 车轮磨耗改变了轮轨接触关系和应力分布,车轮通过道岔时,车轮-道岔接触应力显著波动,特别是在尖轨顶宽为 35 mm 处,接触应力较大,易产

生滚动接触疲劳,可能加速道岔磨耗,建议对尖轨顶宽35 mm附近区域进行重点监测和维护,以减少应力集中和滚动接触疲劳的发生;同时,随着车轮的移动,Von Mises等效应力增大,磨耗车轮表现更为显著,其Von Mises应力比新轮更大且不均匀,这种应力状态可能加剧车轮材料的疲劳损伤并促进裂纹扩展。

3) 磨耗导致的应力变化影响车轮的磨耗速率,建议定期监测车轮磨耗和应力,进一步优化维修周期,控制磨耗发展。

参考文献:

- [1] CLAYTON P. Predicting the wear of rails on curves from laboratory data[J]. *Wear*, 1995, 181: 11-19.
- [2] 李树林, 石启龙, 杨建伟, 等. CRH3型动车组车轮的疲劳寿命分析[J]. *机械设计与制造*, 2011(12): 228-230.
LI S L, SHI Q L, YANG J W, et al. Fatigue life analysis for wheel of CRH3 motor train unit[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(12): 228-230.
- [3] LIU Y M, STRATMAN B, MAHADEVAN S. Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(7): 747-756.
- [4] 李俊琛, 杨大巍, 董雪娇, 等. CRH5型动车组轮轨滚动接触应力及疲劳寿命的有限元仿真分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2017, 43(6): 16-21.
LI J C, YANG D W, DONG X J, et al. Finite element simulation analysis of rolling contact stress and fatigue life of CRH5 EMU[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2017, 43(6): 16-21.
- [5] 周宇, 孙鼎人, 王树国, 等. 钢轨滚动接触疲劳多裂纹相互影响[J]. *华东交通大学学报*, 2020, 37(2): 7-14.
ZHOU Y, SUN D R, WANG S G, et al. Interactive influence on multiple head checks propagation in rail[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2020, 37(2): 7-14.
- [6] FANG C C, JAAFAR S A, ZHOU W, et al. Wheel-rail contact and friction models: a review of recent advances[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023, 237(10): 1245-1259.
- [7] WEN T N, HE J, ZHANG C F, et al. The wheel-rail contact force for a heavy-load train can be measured using a collaborative calibration algorithm[J]. *Information*, 2024, 15(9): 535.
- [8] SRIVASTAVA J P, SARKAR P K, RANJAN V. Contact stress analysis in wheel-rail by hertzian method and finite element method[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2014, 95(4): 319-325.
- [9] MA Y W, MASHAL A A, MARKINE V L. Modelling and experimental validation of dynamic impact in 1: 9 railway crossing panel[J]. *Tribology International*, 2018, 118: 208-226.
- [10] 王璞. 30 t轴重重载道岔合金钢组合辙叉应力分析[J]. *铁道建筑*, 2020, 60(4): 80-83.
WANG P. Stress analysis for alloy steel combined frog of 30 t axle load heavy haul turnout[J]. *Railway Engineering*, 2020, 60(4): 80-83.
- [11] WIEDORN J, DAVES W, OSSBERGER U, et al. Simplified explicit finite element model for the impact of a wheel on a crossing-Validation and parameter study[J]. *Tribology International*, 2017, 111: 254-264.
- [12] 马俊琦, 王树国, 王璞, 等. 基于60N钢轨廓形的客货共线铁路道岔区轮轨接触关系[J]. *铁道建筑*, 2024, 64(6): 24-29.
MA J Q, WANG S G, WANG P, et al. Wheel-rail contact relationship in turnout area of mixed passenger and freight railway based on 60N rail profile[J]. *Railway Engineering*, 2024, 64(6): 24-29.
- [13] 丁军君, 吴朋朋, 王军平, 等. 基于轮轨关系的钢轨打磨代表廓形计算方法研究[J]. *铁道学报*, 2019, 41(7): 135-140.
DING J J, WU P P, WANG J P, et al. Study on algorithm of representative profile for rail grinding based on wheel-rail relationship[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(7): 135-140.
- [14] 陶功权, 李霞, 温泽峰, 等. 两种轮轨接触应力算法对比分析[J]. *工程力学*, 2013, 30(8): 229-235.
TAO G Q, LI X, WEN Z F, et al. Comparative analysis of two algorithms for wheel-rail contact stress[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 229-235.
- [15] 杨新文, 姚一鸣, 周顺华. 基于轮轨非Hertz接触的影响系数的有限元计算方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(10): 1476-1482.
YANG X W, YAO Y M, ZHOU S H. Calculation of influencing number of wheel-rail non-hertz contact using finite element method[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(10): 1476-1482.
- [16] 杨逸航, 胡伟豪, 肖乾. 铁路道岔直尖轨主要组合断面打磨廓形优选研究[J]. *北京交通大学学报*, 2022, 46(4):

- 131-138.
- YANG Y H, HU W H, XIAO Q. Research on optimizing grinding profile of main cross sections on rail switch[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(4): 131-138.
- [17] 杨逸航, 肖乾, 蔡林珊, 等. 个性化道岔廓形打磨对动车组动力学性能影响[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(2): 82-87, 142.
- YANG Y H, XIAO Q, CAI L S, et al. Research on the influence of personalized turnout rail grinding on the dynamic characteristic of high-speed trains[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2): 82-87, 142.
- [18] 徐井芒, 王凯, 高原, 等. 高速铁路无缝钢轨断缝瞬态冲击行为分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1348-1354.
- XU J M, WANG K, GAO Y, et al. Transient impact behavior analysis of rail broken gap on high-speed continuous welded rail[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1348-1354.
- [19] 郑兆光, 徐井芒, 闫正, 等. 60N钢轨高速道岔与磨耗车轮接触特性分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(12): 73-81.
- ZHENG Z G, XU J M, YAN Z, et al. Analysis of contact characteristics between high-speed 60N rail turnout and worn-wheel[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(12): 73-81.
- [20] 李锡夔, 郭旭, 段庆林. 连续介质力学引论[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- LI X K, GUO X, DUAN Q L. Introduction to continuum mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [21] 王志强, 雷震宇. 基于黏滑扭振的地铁小半径曲线钢轨波磨形成机理[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(5): 998-1011.
- WANG Z Q, LEI Z Y. Formation mechanism of rail corrugation on the small radius curve of metro based on stick-slip torsional vibration[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(5): 998-1011.
- [22] 闫正, 陈嘉胤, 徐井芒, 等. 不同车轮踏面与高速60N钢轨道岔静态接触特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(4): 1358-1370.
- YAN Z, CHEN J Y, XU J M, et al. Study of static contact properties of diverse wheel treads and high-speed 60N rail turnout[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(4): 1358-1370.



第一作者: 赵俊龙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道车辆轮轨关系。E-mail: bjzhaojunlong@163.com。



通信作者: 昌超(1992—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为大系统动力学。E-mail: 3614@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 李根)