

基于 ANSYS 的车轮材料特性对轮轨接触应力的影响

魏康¹, 何柏林¹, 杨宜景²

(1. 华东交通大学 机电工程学院, 南昌 330013;

2. 中铁十一局集团第六工程有限公司 汉江重工科技分公司, 湖北 襄阳 441000)

摘要: 目的 随着我国铁路运输朝着高速、重载、低能耗的方向高速发展, 高速列车轮轨承受的载荷显著增加, 研究车轮材料特性(弹性模量、泊松比)对 CRH3 型动车组轮轨接触应力的影响, 对保证列车安全性、可靠性及舒适性有重要的现实意义和应用价值。方法 采用 S1002 型磨耗踏面轮对和 60 kg/m 的标准钢轨, 首先对轮轨接触的模型做基本的假设, 其次对模型参数、单元选择、网格划分等计算过程进行说明, 最后应用弹塑性理论及有限元软件 ANSYS 分析轮轨接触应力。结果 车轮材料弹性模量 E 分别为 124, 165, 206, 247, 288 GPa 的情况下, 轮轨接触对应的最大 Mises 应力依次为 315. 451, 370. 458, 435. 498, 500. 274, 554. 604 MPa, 最大接触压力依次为 669. 264, 802. 328, 920. 832, 1033. 87, 1135. 19 MPa; 在车轮材料泊松比分别为 0. 18, 0. 24, 0. 30, 0. 36, 0. 42 的情况下, 轮轨接触对应的最大 Mises 应力依次为 468. 035, 450. 601, 435. 498, 422. 587, 415. 412 MPa, 最大接触压力依次为 903. 068, 911. 168, 920. 832, 936. 339, 961. 234 MPa。结论 车轮材料的弹性模量对轮轨接触应力有显著的影响, 最大 Mises 应力和最大接触应力的变化与弹性模量的变化呈正比关系; 泊松比对轮轨接触应力也有一定的影响。

关键词: 轮轨关系; 车轮材料特性; 有限元法; 接触应力

中图分类号: TG115; U211.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2015)05-0123-06

DOI: 10. 16490/j. cnki. issn. 1001-3660. 2015. 05. 023

Effect of Wheel Material Properties on Wheel-Rail Contact Stress Based on ANASYS

WEI Kang¹, HE Bo-lin¹, YANG Yi-jing²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Hanjiang Heavy Industry Science and Technology Branch, The 6th Engineering Co. Ltd of
China Railway 11 Bureau Group, Xiangyang 441000, China)

ABSTRACT: **Objective** With the rapid development of Chinese railway transportation towards high-speed, heavy-duty, low energy consumption direction, the load wheel-rail of high-speed train resisted is increasing significantly. The aim of this work was to study the impact of wheel material properties (elastic modulus, Poisson ratio) on wheel-rail contact stress for CRH3 high-speed EMU, which has an important practical significance and application value for ensuring the safety, reliability and comfort of train. **Methods** S1002 tread wheelset and 60 kg/m rail were employed. Firstly, the basic assumption was made for the wheel-rail contact mod-

收稿日期: 2015-01-08; 修订日期: 2015-02-08

Received: 2015-01-08; Revised: 2015-02-08

作者简介: 魏康(1992—), 男, 江西人, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面改性及疲劳失效分析。

Biography: WEI Kang(1992—), Male, from Jiangxi, Master graduated student, Research focus: material surface modification and fatigue failure analysis.

通讯作者: 何柏林(1962—), 男, 河南人, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面改性及疲劳失效分析

Corresponding author: HE Bo-lin(1962—), Male, from Henan, Ph. D., Professor, Research focus: material surface modification and fatigue failure analysis.

el. Secondly, calculation processes of model parameters, cell selection and grid classification were described. Thirdly, the elastic-plastic theory and finite element software ANSYS were adopted to analyze the wheel-rail contact stress. **Results** When the elastic moduli of wheel material were 124, 165, 206, 247, 288 GPa, respectively, the corresponding maximum Mises stress values were as follows: 315.451, 370.458, 435.498, 500.274, 554.604 MPa, and the maximum contact stress values were as follows: 669.264, 802.328, 920.832, 1033.87, 1135.19 MPa; while poisson's ratios of wheel material were 0.18, 0.24, 0.30, 0.36, 0.42, respectively, the corresponding maximum Mises stress values were as follows: 468.035, 450.601, 435.498, 422.587, 415.412 MPa, and the maximum contact stress values were as follows: 903.068, 911.168, 920.832, 936.339, 961.234 MPa.

Conclusion The elastic modulus of wheel material had a pronounced impact on the wheel-rail contact stress, and it had a positive correlation with the maximal Mises stress and contact stress. Poisson ration of material had a certain but not obvious influence on the wheel-rail contact stress.

KEY WORDS: wheel-rail relationship; wheel material properties; finite element method; contact stress

近年来,我国铁路运输不断向重载、高速、低能耗、高密度、大运量方向发展,2007 年以来,“和谐号”(CRH)系列动车组陆续投入使用,标志着我国进入高速列车发展时代。高速铁路在产生巨大社会效益和经济效益的同时,其安全性、可靠性、舒适性也被广泛关注^[1-3]。

轮轨关系是铁路运输系统中最基本也最复杂的问题。车轮在铁路运输中的主要作用是支撑车体,传递驱动力和制动力给钢轨。如果车轮出现损伤,将导致列车运行不平稳,影响列车的动力学性能以及乘坐的舒适性,严重的车轮损伤甚至会导致车辆脱轨^[4-6],常见的车轮损伤主要有踏面磨损、踏面剥离、塑性变形、辐板裂纹等。对于高速动车组,最主要车轮磨损表现为踏面剥离,车轮接触疲劳是主要原因之一^[7-10]。轮轨接触面在轮轨接触应力作用下,轨头和踏面金属会发生塑性变形,在交变应力的反复作用下,导致疲劳裂纹的萌生和扩展,从而引发接触疲劳剥离,轮轨接触疲劳强度和寿命是影响列车运行可靠性的关键因素^[11-12]。

齐效文^[3]采用 ANSYS 作为分析工具,并考虑了轮轨的真实形状和边界条件,分析了钢轨材料特性对轮轨接触应力场的影响,发现弹性模量和泊松比的变化,会对轨头内的接触应力场产生影响。曹世豪等^[13]研究了轴重和摩擦力对轮轨接触疲劳的影响,结果表明,轴重的提高会增加轮轨接触应力,加剧了钢轨疲劳,而摩擦力的影响建立在轴重的基础上,并使轴重的影响加剧。车轮和钢轨作为轮轨接触的重要组成部分,其材料特性的变化势必会影响到轮轨本身的性能以及接触行为。因此,研究不同车轮材料特性下的轮轨接触应力,能为进一步探究列车运行性能、轮轨接触疲劳损伤等问题奠定基础,对提高我国高速列车的安全性和经济性有重要的应用价

值。

本文以 CRH3 动车组轮轨系统为研究对象,考虑车轮和钢轨的真实几何形状,应用弹塑性理论和有限元软件 ANSYS,分析车轮材料特性(弹性模量、泊松比)对轮轨接触应力的影响,并就计算结果对轮轨损伤的影响进行分析。

1 轮轨接触的计算模型

1.1 基本假设

在实际情况下,车轮的受力、钢轨所受约束、轮轨材料以及车轮在钢轨上的运动是极其复杂的。因此本文在计算中,做出如下假设。

1) 车轮和钢轨均采用弹塑性本构关系的材料,取为双线型模型,车轮与车轴的连接为刚性连接。

2) 轴只在垂直于钢轨底面的平面内移动,沿钢轨延伸方向受固定约束;钢轨底面受全约束。

3) 根据圣维南原理,由于接触区域很小,所以将接触区域的网格划得较密,而且钢轨纵向只取有限长度就能达到相当的精度。

4) 由于计算机性能的限制,只考虑静态车轴所受载荷,未考虑滚动速度,所以分别在轴的两端施加大小为轴重一半的集中载荷。

1.2 确定模型参数和网格划分

1.2.1 模型建立

为了真实反映 CRH3 动车组在实际运用中轮轨接触的应力状态,车轮型面采用 S1002 型磨耗型踏面,钢轨采用我国 60 kg/m 的标准钢轨。相关参数为:滚动圆半径 920 mm,轨距 1435 mm,钢轨轨底坡 1:40。轮轨三维实体模型如图 1 所示。

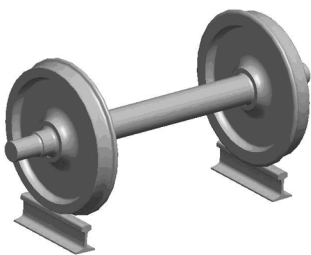


图 1 轮轨实体模型
Fig. 1 Wheel-rail solid model

1.2.2 材料的选取

本文采用线性强化弹塑性模型作为轮轨接触应力计算的本构关系,模型如式(1)和图 2 所示。轮轨钢的弹性模量 E_e 和强化模量 E_p 分别为 206, 20.6 GPa。本文选取 500 MPa 作为轮轨钢的屈服应力。材料密度为 $7.85\times10^3\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3。

$$\sigma = \begin{cases} E_e \varepsilon & \sigma < 883 \text{ MPa} \\ \sigma_s + E_p \varepsilon & \sigma \geq 883 \text{ MPa} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 为应力, σ_s 为初始屈服极限, ε 为弹塑性应变。

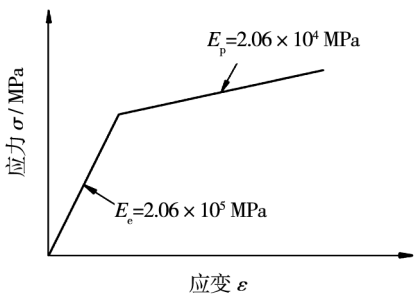


图 2 车轮与钢轨材料模型
Fig. 2 Model of wheel and rail material

车轴的弹性模量设置为 $2.06\times10^7\text{ MPa}$,比车轮材料的弹性模量大两个数量级,这样可以保证车轴材料相对于车轮为刚性,密度和车轮材料相同。

1.2.3 网格划分

将三维模型导入 ANSYS 软件中,采用八节点 SOLIDE185 单元进行自由网格划分,整体划分结果如图 3 所示。为精确计算轮轨接触应力,对轮轨接触部位进行网格细化处理,其余部分网格划分较稀疏,如图 4 所示。这样,在保证计算精度的前提下,可以尽量节省计算时间。

轮轨间选用接触单元 CONTA174 和目标单元 TARGE170 建立 3D 接触对。接触算法采用扩展的拉格朗日算法,对罚函数修正项进行反复迭代。

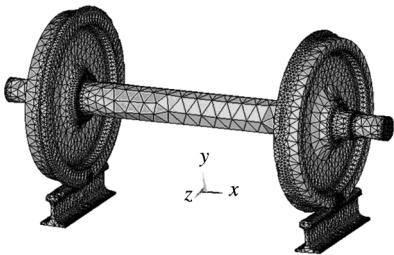


图 3 有限元模型
Fig. 3 Finite element model

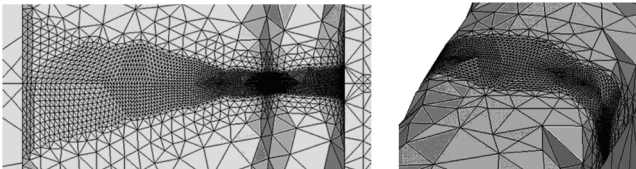


图 4 网格局部细化示意
Fig. 4 Schematic of local mesh refinement: a) meshing of wheel contact area; b) meshing of rail contact area

载荷只考虑轴质量的影响,分别在轴两端加载方向向下大小为 80000 N 的集中载荷,两作用点的距离为 1000 mm,如图 5 所示。

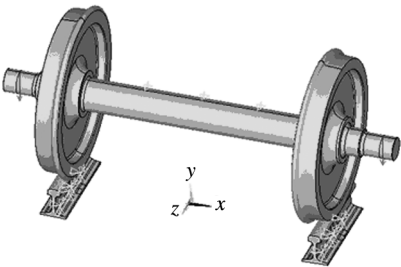


图 5 施加载荷的模型示意
Fig. 5 Schematic of applied load model

2 轮轨接触应力计算结果与分析

2.1 材料弹性模量对车轮接触应力的影响

为了研究车轮材料弹性模量对接触应力的影响,本文计算了车轮材料弹性模量 E 分别为 124, 165, 206, 247, 288 GPa 时轮轨弹塑性接触应力场。工况参数为:横移量 $Y=0\text{ mm}$,摇头角 $\psi=0^\circ$,摩擦系数 $\mu=0.3$,材料的泊松比 $\nu=0.3$ 。此工况下左右两侧轮轨的工作条件完全对称,因此只考虑单侧车轮的计算结果即可,本文以左侧车轮为例进行分析。计算中选用的力学单位为 N,长度单位为 mm,应力单位为 MPa。

图 6 为不同车轮材料弹性模量对应的轮轨接触应力。不同弹性模量下轮轨接触对应的最大 Mises 应力依次为 315.451, 370.458, 435.498, 500.274, 554.604 MPa; 最大接触压力依次为 669.264, 802.328, 920.832, 1033.87, 1135.19 MPa。

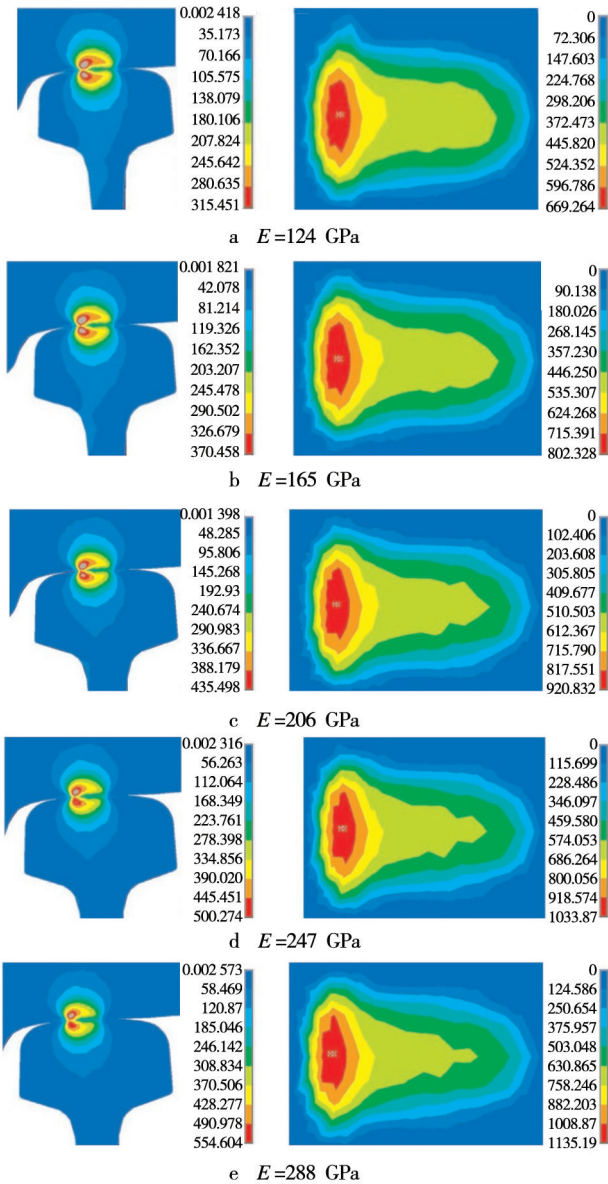


图 6 不同车轮材料弹性模量下的 Mises 应力和接触压力分布
Fig.6 Distribution Maps of Mises stress and contact stress under different elastic modulus of wheel material

2.2 材料泊松比对车轮接触应力的影响

本文计算了不同车轮材料泊松比 ν 分别为 0.18, 0.24, 0.3, 0.36, 0.42 时轮轨弹塑性接触应力场。材料的弹性模量 $E=206$ GPa, 其他工况参数与 2.1 节相同, 最后取左侧车轮的计算结果进行了分析。

图 7 给出了不同车轮材料泊松比对应的轮轨接

触应力状况, 轮轨接触对应的最大 Mises 应力依次为 468.035, 450.601, 435.498, 422.587, 415.412 MPa; 最大接触压力依次为 903.068, 911.168, 920.832, 936.339, 961.234 MPa。

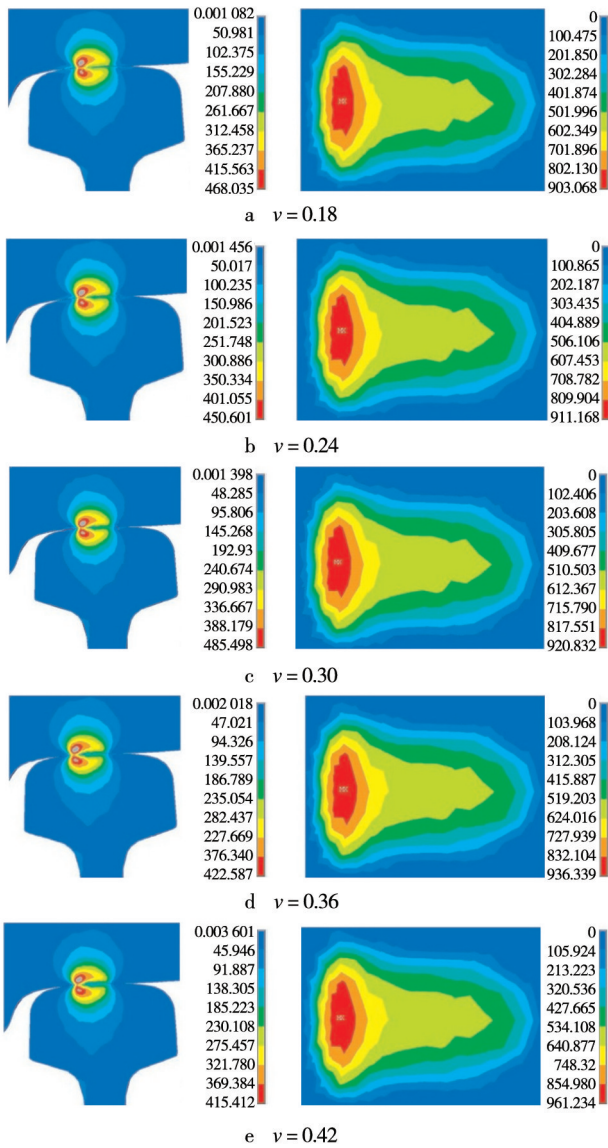


图 7 不同车轮材料泊松比下的 Mises 应力和接触压力分布
Fig.7 Distribution Maps of Mises stress and contact stress under different Poisson's ratio of wheel material

表 1 列出了不同弹性模量下的最大 Mises 应力和最大接触压力, 可以明显看出, 当弹性模量在 124 ~ 288 GPa 变化时, 最大 Mises 应力和最大接触应力随弹性模量的增大而增大, 而且基本上呈正相关。通过表 1 的数据计算可以得出, 弹性模量每增加 20%, 最大 Mises 应力增加 14%, 最大接触应力增加 13%。由于采用了真实的 CRH3 动车组轮轨模型, 车轮材料特性的变化不但会影响车轮本身的性能, 而且还影响轮

轨接触行为。计算结果表明,车轮材料的弹性模量对轮轨接触应力有显著影响。

表 1 不同弹性模量下轮轨接触状况
Tab.1 Wheel-rail contact conditions under different elastic modulus

弹性模量/GPa	最大 Mises 应力/MPa	最大接触压力/MPa
124	315.451	669.264
165	370.458	802.328
206	435.498	920.832
247	500.274	1033.87
288	554.604	1135.19

表 2 列出了不同泊松比下的最大 Mises 应力和最大接触压力,可以看出,最大 Mises 应力随着泊松比的增加而减小,最大接触压力随泊松比的增加而增大,但是变化的数值均很小。这可以说明车轮材料的泊松比对轮轨接触应力的分布影响不大。

表 2 不同泊松比下轮轨接触状况
Tab.2 Wheel-rail contact conditions under different Poisson's ratio

泊松比	最大 Mises 应力/MPa	最大接触压力/MPa
0.18	468.035	903.068
0.24	450.601	911.168
0.3	435.498	920.832
0.36	422.587	936.339
0.42	415.412	961.234

对于高速列车来说,经常会出现紧急制动或牵引时的“空转”现象,轮轨间发生剧烈的滑动摩擦,车轮材料的表面金属被大量的磨掉,同时,接触表面的高温会改变钢的内部组织,最终影响材料的力学性能^[14—15]。上述研究可以看出,车轮材料特性(弹性模量、泊松比)的改变均会影响轮轨接触的最大 Mises 应力和最大接触压力,从而影响轮轨间的接触状况。随着材料弹性模量和泊松比的增加,轮轨最大接触压力相应增加。列车运行过程中,轮轨接触面相互摩擦,承受循环载荷,材料表层内不断积累的塑性变形会使表面下一定深度出现位错塞积,进而导致裂纹的萌生。裂纹在平行于表面的正应力作用下进行扩展,当达到临界值时,裂纹与表面间的材料会以片状磨屑的形式剥离下来。轮轨最大接触压力的增加会进一步加剧踏面剥离过程的进行,从而导致车轮发生损伤。

3 结论

- 1) 车轮材料的弹性模量对轮轨接触应力有明显的影响。当弹性模量在 124 ~ 288 GPa 内变化时,最大 Mises 应力和最大接触应力随弹性模量的增大而增大,而且基本上呈正比例的趋势。
- 2) 车轮材料的弹性模量每增加 20%,最大 Mises 应力增加 14%,最大接触应力增加 13%。
- 3) 车轮材料的泊松比对轮轨接触应力的分布影响不大。当泊松比在 0.18 ~ 0.42 的范围内变化时,最大接触压力随泊松比的增加而增大,最大 Mises 应力随着泊松比的增加而减小,但是变化的数值均很小。

参考文献

[1] 王伯铭. 高速动车组总体及转向架[M]. 成都:西南交通大学出版社,2009.
WANG Bo-ming. High Speed EMU and Bogie [M]. Chengdu:Southwest Jiaotong University Publishing House,2009.

[2] 水恒勇,王豫. 高速列车辗钢车轮材料的发展[J]. 热处理,2002,17(2):16—20.
SHUI Heng-yong, WANG Yu. Research and Development of the Material for High-speed Rail Wheel[J]. Heat Treatment,2002,17(2):16—20.

[3] 齐效文. 铁路轮轨接触应力数值分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2001.
QI Xiao-wen. Numerical Analysis of Wheel/Rail Contact Stress [D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2001.

[4] 金学松,刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
JING Xue-song, LIU Qi-yue. The Wheel/Rail Tribology [M]. Beijing: China Railway Publishing House,2004.

[5] 俞展猷. 轮轨接触应力的研究[J]. 铁道机车车辆,2000,20(6):1—9.
YU Zhan-you. Research about the Contact Stress of Wheel and Rail[J]. Railway Locomotive & Car,2000,20(6):1—9.

[6] 王娟,何成刚,文广,等. 基于 ANSYS 的轮轨摩擦滑动接触应力分析[J]. 机械,2013,12(40):10—13.
WANG Juan, HE Cheng-gang, WEN Guang, et al. Analysis of Wheel-rail Friction Sliding Contact Stress Based on ANSYS[J]. Machinery,2013,12(40):10—13.

[7] 吴娜,曾京. 高速车辆轮轨接触几何关系及车轮磨耗疲

- 劳研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 80—87.
- WU Na, ZHENG Jing. Investigation into Wheel-rail Contact Geometry Relationship and Wheel Wear Fatigue of High-speed Vehicle[J]. China Railway Science, 2014, 35(4): 80—87.
- [8] 肖乾, 王成国, 周新建, 等. 不同摩擦系数条件下的轮轨滚动接触特性分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4): 66—71.
- XIAO Qian, WANG Cheng-guo, ZHOU Xin-jian, et al. Analysis on the Characteristics of Wheel/Rail Rolling Contact under Different Friction Coefficient[J]. China Railway Science, 2011, 32(4): 66—71.
- [9] AKAMA M. Development of Finite Element Model for Analysis of Rolling Contact Fatigue Cracks in Wheel/Rail Systems[J]. Quarterly Report of RTRL, 2007, 48(7): 8—14.
- [10] 胡军, 赵运磊, 陈珏. 基于 ANSYS 的轮轨滚动接触疲劳裂纹萌生研究[J]. 机械设计与制造, 2013, (4): 153—155.
- HU Jun, ZHAO Yun-lei, CHEN Jue. Study on Fatigue Initiation for Wheel-rail Rolling Contact Based on ANSYS[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013, (4): 153—155.
- [11] 王文健, 刘启跃. 轮轨滚动接触疲劳与磨损耦合关系及预防措施研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 137—139.
- WANG Wen-jian, LIU Qi-yue. Study on the Coupling Relationship between the Rolling Contact Fatigue and the Wear of Wheel-rail and Prevention Measures[J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 137—139.
- [12] 孙效杰, 周文祥. 踏面磨耗及其对轮轨接触几何关系的影响[J]. 铁道车辆, 2010, 48(7): 1—4.
- SUN Xiao-jie, ZHOU Wen-xiang. Tread Wear and Its Effect on Wheel-Rail Contact Geometry[J]. Rolling Stock, 2010, 48(7): 1—4.
- [13] 曹世豪, 江晓禹, 文良华. 轴重和摩擦力对轮轨接触疲劳的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(6): 10—14.
- CAO Shi-hao, JIANG Xiao-yu, WEN Liang-hua. Influence of Axle load and Friction on the Fatigue of Wheel/Rail Contact[J]. Surface Technology, 2013, 42(6): 10—14.
- [14] LANGUEH A M G, BRUNEL J F, CHARKALUK E, et al. Effects of Sliding on Rolling Contact Fatigue of Railway Wheels[J]. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 2012, 36(6): 515—525.
- [15] 马昌红, 史生良, 吴亚平. 轮轨接触应力的有限元分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(3): 32—35.
- MA Chang-hong, SHI Sheng-liang, WU Ya-ping. The FEM Analysis of the Wheel-rail Contact Stress[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(3): 32—35.
- (上接第 117 页)
- [47] MATEOS J, CUETOS J M, VIGANDE R, et al. Tribological Properties of Plasma Sprayed and Laser Remelted 75/25 Cr₃C₂/NiCr Coatings [J]. Tribology International, 2001 (34): 345—351.
- [48] JUNJI M, SASAKI Y, EUKUHARA S I, et al. Surface Modification of Cr₃C₂-NiCr Cermet Coatings by Directdiode Laser [J]. Technical Note, 2006(80): 1400—1405.
- [49] ZHANG X C, XU B S, XUAN F Z, et al. Rolling Contact Fatigue Mechanism of a Plasma-sprayed and Laser-remelted Ni Alloy Coating [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure, 2009, 32(2): 84—96.
- [50] STEWART S, AHMED R, ITUSKAICHI T. Contact Fatigue Failure Evaluation of Post-treated WC-NiCrBSi Functionally Graded Thermal Spray Coatings [J]. Wear, 2004 (257): 962—983.
- [51] STEWART S, AHMED R, ITUSKAICHI T. Rolling Contact Fatigue of Post-treated WC-NiCrBSi Thermal Spray Coatings [J]. Surface Coating Technology, 2005(190): 171—189.
- [52] 王韶云, 李国禄, 王海斗, 等. 重熔处理对 NiCrBSi 涂层接触疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(11): 135—139.
- WANG Shao-yun, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Influence of Remelting Treatment on Rolling Contact Fatigue Performance of NiCrBSi Coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(11): 135—139.
- [53] 张晓东, 董世运, 徐滨士. 激光熔覆和活化屏等离子体氮化复合涂层组织与接触疲劳性能[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 1—5.
- ZHANG Xiao-dong, DONG Shi-yun, XU Bin-shi. Microstructure and Contact Fatigue Property of Laser Cladding and Active Screen Plasma Duplex Treated Coating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 1—5.
- [54] 安树春. 热喷涂涂层的重熔后处理工艺研究进展[J]. 表面技术, 2009, 38(2): 73—77.
- AN Shu-chun. Progress of Post-remelting Technology for Hot Sprayed Coating [J]. Surface Technology, 2009, 38(2): 73—77.
- [55] GARRIDO M A. Influence of the Deposition Techniques on the Mechanical Properties and Microstructure of NiCrBSi Coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008(204): 304—312.