

文章编号:1005-0523(2015)01-0016-06

铁道车辆轮轨滚动接触疲劳裂纹研究综述

肖乾,方骏

(华东交通大学现代轨道车辆研究所,江西 南昌 330013)

摘要:轮轨滚动接触疲劳是铁道车辆轮轨关系主要问题之一,国内外众多学者对此做了大量研究。从试验和数值分析两个方面综述了铁道车辆滚动接触疲劳作用下裂纹萌生机理及其预测方法,总结了在该领域的研究方向与热点;同时对轮轨滚动接触疲劳防损对策研究也进行了总结和分析。从已有的研究成果来看,滚动接触疲劳损伤机理并没有形成统一的结论,特别是对于高速铁路轮轨滚动接触疲劳损伤的机理分析还只是起步阶段,缺乏系统的研究成果,轮轨滚动接触疲劳防损对策也缺乏系统性。

关键词:轮轨关系;疲劳损伤;棘轮效应;损伤机理;塑形变形

中图分类号:U211

文献标志码:A

轨头踏面在轮轨接触应力作用下形成的沿钢轨全长密集分布的表面裂纹称为轮轨接触疲劳裂纹。当轮轨接触应力超过钢轨的接触疲劳强度,疲劳裂纹萌生和扩展速率大于轨头磨损速率,疲劳裂纹就会萌生和扩展。疲劳裂纹在疲劳扩展过程中发生的掉块称为剥离掉块。当剥离裂纹发展到较大尺寸并导致踏面局部凹陷,表面呈暗斑状时,称为局部凹陷。当剥离裂纹发展为轨头横向疲劳裂纹或导致钢轨横向疲劳断裂时,称为核伤。根据剥离裂纹在踏面的分布位置、形状及其扩展特点,可将接触疲劳裂纹分为轨距角处鱼鳞状剥离裂纹、掉块和核伤,轨头踏面斜线状剥离裂纹、局部凹陷和核伤,以及曲线内股踏面剥离裂纹和浅层状剥离掉块等三种。

滚动接触引起的钢轨表面裂纹已成为铁路运行安全的主要问题,在循环载荷的作用下,裂纹萌生并且不断扩展,直至达到疲劳极限,导致钢轨断裂,引发列车脱轨事故。英国一列速度为 $185\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高速列车曾因踏面斜裂纹引起的钢轨横向断裂而出轨^[1]。而中国广深线的准高速区段先后也有2处因踏面斜裂纹导致钢轨横向断裂^[2]。由此可见,研究高速铁路轮轨接触疲劳和损伤问题,提出有效的预防措施具有巨大的经济意义与科学价值。

随着我国客货铁路运输朝着高速化和重载化方向发展,出现裂纹的现象越来越频繁,这种现象已经引起了国内外很多学者的重视。研究重点主要包括疲劳裂纹发生机理和预防或减轻裂纹产生的措施。

1 滚动接触疲劳损伤机理研究现状

为了研究高速铁路由于轮轨滚动接触而导致钢轨裂纹萌生的安全问题,从实验和数值仿真两个方面综述了滚动接触疲劳作用下裂纹萌生机理。

1.1 试验研究

滚动接触疲劳导致接触表面如轨距角、踏面处产生麻点、剥落、裂纹甚至断裂等现象,如图1、图2所

收稿日期:2014-10-28

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ14359)

作者简介:肖乾(1977—),男,副教授,博士,研究方向为轮轨关系。

示,国内外学者围绕其成因开展了大量科学研究,对滚动接触疲劳损伤机理说法不一,但其中多数人认为轮轨滚动接触疲劳损伤时由于轮轨表面材料在循环载荷作用下塑性变形累积所致。

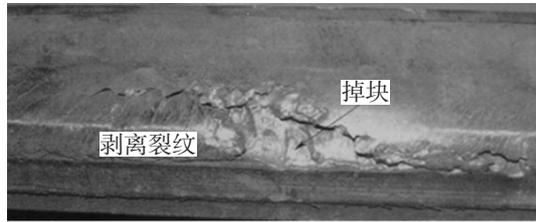


图1 轨距角鱼鳞状剥离裂纹和掉块

Fig.1 Fish scale stripping cracks and falling chip at the angle of gauge

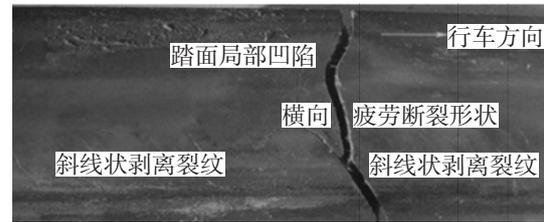


图2 踏面斜线状剥离裂纹

Fig.2 Oblique line stripping crack in the tread

Bernasconi A 等人采用试验方法研究了高速铁路车轮材料R7T钢的多轴疲劳特性,研究结果发现在滚动接触循环载荷作用下,车轮表面材料发生严重的塑性变形累积,从而导致车轮表面裂纹的产生^[3];Eadie D T指出轮轨间的切向摩擦力造成轮轨表面材料塑性流动而产生疲劳损伤^[4];R Stock 等利用原尺寸轮轨实验平台进行实验,钢轨采用珠光体钢和贝氏体钢,结果发现珠光体硬度等级与钢轨耐疲劳性具有密切联系,然而贝氏体钢轨显示出微小的差别,与同等硬度的珠光体钢轨比较,贝氏体钢轨耐磨性降低,耐疲劳性提高^[5]。

国内外也有一些学者从材料的微观角度分析了轮轨滚动接触疲劳损伤的起源,Garnham 等人从微观角度揭示钢轨表面在循环载荷作用下使得晶粒破碎细化,硬度升高,产生塑性变形层^[6];Takikawa 等人使用双盘滚动试验机实现了钢轨曲线段轨头裂纹的模拟试验,发现材料硬度对表面裂纹的形成有较大影响^[7];Alfredsson^[8]认为轮轨表面粗糙引起的高应力区域是裂纹萌生源;Sato 等人的研究又表明裂纹萌生于表面并沿着塑性流线而不是沿着局部最大拉应力的法向发展;G Donzella 等人在双盘试验机上完成了轮轨材料配副的棘轮效应试验,借助扫描电镜观察了不同阶段的轮轨表面损伤的演化^{[9][10]};彭峰针对广深线准高速区段出现的斜线状裂纹情况,取下U75V、U71Mn钢轨轨样进行宏观形貌、微观形貌分析及金相试验得到钢轨的损伤机理,指出钢轨材料自身的条件是影响滚动接触疲劳的主要因素,合金组织稳定性和均匀性越好,材料的疲劳强度越高^[11];钟雯等人针对广深线铁路使用的U75V和U71Mn钢轨进行了一系列试验分析,发现U71Mn的组成成分和金相组织决定的钢轨抗疲劳裂纹扩展性能更适合高速铁路铺设使用^[12]。然而迄今为止,缺乏系统的研究轮轨表面材料在滚动接触循环载荷作用下的演变规律。

1.2 数值仿真

日本赤间诚^[13]、瑞典Ringsberg等人^[14]利用有限元技术、Jiang Sehitoglu棘轮效应本构模型及其疲劳损伤预测模型完成了轮轨滚动接触疲劳损伤分析;Yongming Liu和Sankaran Mahadevan又提出了考虑轮轨塑性变形累积的金属高周疲劳准则和寿命预测方法,结合有限元分析预测了轮轨滚动接触表面裂纹的萌生,得到了与现场数据相对一致的结论^[15-16]。B Alfredsson针对滚动轴承的表面损伤问题进行数值分析,发现残余应力和表面粗糙度直接影响滚动接触疲劳损伤^[17],胡军等^[18]以直径为860 mm的LMA型踏面轮对和60 kg·m⁻¹钢轨为例建立三维实体模型,采用有限元分析软件ANSYS分析不同轴重和摩擦系数对最大接触法向应力、接触剪切应力以及最大Mises应力的影响。分析结果表明:随着轴重的增加轮轨最大接触法向应力和最大Mises应力会逐渐增大,接触疲劳裂纹萌生的速度则随之增大。随着摩擦系数的增加,最大接触法向应力和最大Mises应力的变化不显著,而接触剪切应力则随之增大,加快接触疲劳裂纹的萌生。刘圆^[17]为研究影响钢轨表面斜裂纹扩展的因素,通过建立三维有限元模型,计算不同裂纹间距条件下原有裂尖前缘的应力强度因子。分析结果表明,随着裂纹间距的减小,新裂纹的萌生能降低原有裂纹的扩展速率,但原有裂纹扩展方向向新裂纹弯曲,容易导致两裂纹融合,从而形成新的裂纹,其扩展速率可能会远远

大于原有裂纹。王少锋等^[20]基于临界平面法研究钢轨裂纹萌生寿命预测模型。Taraf等人采用移动赫兹接触压力,在二维的轮轨滚动接触弹塑性有限元模型基础上分析了车轮踏面的表面裂纹萌生规律,发现材料缺陷、轴重和摩擦系数直接影响轮轨滚动接触疲劳损伤^[21];D I Fletcher等人采用数值仿真和试验分析的方法发现液体对裂纹扩展在不同情况下有加速和延缓的作用^[22];L Yongming建立三维弹塑性模型计算应力强度因子,通过混合模式疲劳裂纹扩展模型预测车轮表面损伤,同时分析了车轮参数、裂纹初始位置和尺寸以及裂纹面间摩擦系数对裂纹扩展的影响^[23-24]。

对于铁轨裂纹萌生机理的研究,目前主要集中在铁轨材料的塑性棘轮效应上,研究方法主要有安定图和损伤函数。通过观察钢轨疲劳断口如图3和脆性断口如图4可以看出,接近钢轨表面区域的材料积累大量的塑性剪切应变。由于轨钢材料和载荷条件的差异性,变形区域的厚度从几微米到几毫米不等。塑性材料对载荷的响应取决于载荷大小;如果载荷超过塑性屈服极限,塑性应变将不断积累,该过程即为塑性棘轮效应。因此,材料的塑性屈服极限也称为棘轮效应的门槛值。塑性棘轮效应导致在接触区域的边缘位置,材料被挤出大量细小的条状褶皱,并且接近轨头表面区域的材料产生较大的塑性剪切应变。材料不能无限制地积累应变,在棘轮效应作用下,当应变积累到一定临界值时,材料的塑性被完全耗尽,从而失效。裂纹往往在靠近铁轨表面的失效材料处萌生,并且向铁轨深度方向扩展,而钢轨表面的失效材料作为磨损碎屑被移除。但是,高速滚动接触疲劳损伤机理还没有形成一个统一的结论,特别是对于高速铁路轮轨滚动接触疲劳损伤的机理分析还只是起步阶段,缺乏系统的研究成果。

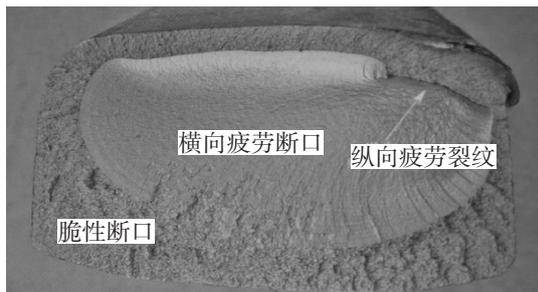


图3 横向和纵向断裂处左侧断口宏观形貌

Fig.3 The macro fracture morphology on the left side of horizontal and vertical split

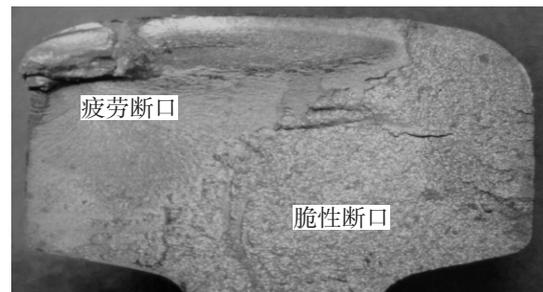


图4 脆性断口形貌

Fig.4 Brittle fracture morphology

2 轮轨滚动接触疲劳防损对策研究

对于轮轨滚动接触疲劳防损对策研究,我国起步较早,在上世纪80年代,我国学者淡育煦等人从组织结构的角度出发,讨论了钢的接触疲劳性能,发现使碳化物小、匀、圆是提高Cr12MoV钢耐磨性和接触疲劳强度的主要手段,同时指出提高表面层的硬度和强度是提高接触疲劳强度的主要措施^[25];清华大学陈颜堂等人综述了钢轨的滚动接触疲劳特征及其成因,探讨了提高钢轨接触疲劳寿命的途径,指出减小最大接触应力、改善微观组织结构、降低残余应力和提高冶金质量对延缓滚动接触疲劳损伤影响最大^[26]。西南交通大学对于轮轨滚动接触疲劳防损研究有较大的贡献,张伟在分析了轮轨滚动接触疲劳损伤成因的基础上,指出提高轮轨强度是主要的减缓滚动接触疲劳的措施之一,主要包括有表面机械处理以及化学改性等方法,具体有利用涂层技术、减少轮轨材料组织中的马氏体组织、轮轨材料中加入铬或钒铬合金等方法,也指出了稀土可延缓钢轨表面疲劳裂纹的萌生与扩展,而改善工作状况和优化轮轨型面也是减缓轮轨滚动接触疲劳损伤的有效方法^[27];彭峰等人在分析高速钢轨滚动接触疲劳损伤原因的基础上,提出了从钢轨材料成分和微观结构、制造工艺以及钢轨打磨几方面来预防滚动接触疲劳损伤^[11];王文健等人针对重载铁路和高速铁路的损伤差异,提出分别采用润滑技术、优化轮轨型面和钢轨打磨技术等预防轮轨损伤^[28];刘启跃等人结合多年的研究与调查,分析了高速与重载铁路钢轨损伤与预防技术差异,指出高速铁路钢轨

主要表现为疲劳损伤特征,同时指出钢轨润滑会导致加速钢轨疲劳裂纹的扩展,高速钢轨不宜采用轮轨润滑技术预防损伤,可采取打磨的方式消除和抑制轨面损伤^[29-30]。

在国外,更多的学者选择对轮轨表面进行处理,改善轮轨材料表面组织来抑制滚动接触疲劳的产生,R J DiMelfi 等人研究发现激光表面改性后的表面摩擦系数下降较为明显,而表面硬度则明显上升,从而导致抗接触疲劳性能增强和磨损率降低^[31];英国学者 F J Franklin 和荷兰学者 G J Weeda 针对曲线段钢轨和道岔处钢轨轮缘接触导致的轨距角斜裂纹现象,提出在钢轨表面附加涂层形成双材料钢轨从而抵制滚动接触疲劳现象,并通过双圆盘试验机对涂层材料和工艺进行了试验分析^[32];Jonas W Ringsberg 在 UIC 标准的 900 A 材料表层熔覆 Co-Cr 合金并称之为双材料钢轨,通过数值分析、双圆盘试样试验和现场试验发现钢轨表面熔覆处理之后能有效阻止棘轮效应的产生,从而抑制滚动接触疲劳损伤^[32];F J Franklin 重点研究开发了延缓滚动接触疲劳的双材料钢轨,通过试验讨论了润滑、载荷以及熔覆层厚度等参数对抗疲劳性能的影响^[34];M Vrbka 等人研究了滚动体表面织构对于滚动接触疲劳的影响,研究发现表面织构能增加滚动接触疲劳寿命^[35]。国内学者在降低轮轨磨耗方面也开始采用激光表面处理或表面熔覆等技术,何柏林等人利用 HJ-II 对 U70 钢轨表面进行超声冲击处理,钢轨表面硬度明显增加,耐磨性得到提高^[36];杨胶溪等人利用激光熔覆技术对 U71Mn 钢轨进行表面强化从而提高钢轨的耐用性,研究过程中发现保证涂层与裂纹等缺陷以及涂层与基体的优良结合较为困难^[33];而周清跃等人指出不同运输条件下的轮轨硬度的合理匹配对提高轮轨的综合使用寿命具有十分重要的作用,在硬度等级超过 450 HB 时,轮或轨硬度的增加会使轮轨试样的总磨耗降低的程度更大,而轮轨硬度匹配不能单从轮轨磨耗来考虑,还应当考虑轮轨磨合以及对滚动疲劳寿命的影响,高硬度的合金轨虽然耐磨性好,但由于韧、塑性及焊接性能不好而被限制使用^[37]。相对于激光热处理和激光熔覆技术来说,激光熔凝技术应用工艺灵活、对基体组织影响小,且表面能获得超细、均匀的组织结构^[38]。西南交通大学曾东方等人采用激光离散熔凝技术对于车轮材料试样进行了表面处理,通过干态下和润滑状态下的滚动接触试验发现处理后的试样磨耗率大大降低,抗滚动接触疲劳性能也有所升高,但没有考虑到轮轨关系中如硬度匹配、轮轨黏着等其它问题^[39]。

3 结论

综上所述,轮轨滚动接触疲劳损伤问题一直以来都是国内外学者的研究热点,但多数停留在疲劳损伤影响因素分析和数值预测方面,轮轨防损对策主要考虑降低轮轨磨耗,减小最大接触应力、改善微观组织结构、降低残余应力和提高冶金质量,改善钢轨材料成分和微观结构、制造工艺以及打磨钢轨。特别是高速铁路迅猛发展,高速列车的安全性和舒适性需求也日益提高,系统地开展高速轮轨滚动接触疲劳损伤及其防损对策研究显得尤为迫切。因此,后续工作可着手研究高速轮轨滚动接触疲劳损伤机理和特点,在此基础上提出充分考虑轮轨磨耗、轮轨黏着等其它轮轨接触问题的高速轮轨防损对策。

参考文献:

- [1] 史密斯. 钢轨滚动接触疲劳的进一步研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(3): 6-10.
- [2] 邓建辉, 刘启跃, 王飞龙, 等. 车速对钢轨接触疲劳损伤的影响及高速线路钢轨选用[J]. 钢铁钒钛, 2006, 27(3): 48-54.
- [3] BERNASCONI A, FILIPPINI M, FOLETTI S, et al. Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(5-6): 663-672.
- [4] EADIE D T, ELVIDGE D, OLDKNOW K, et al. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full-scale rail-wheel test rig evaluation, analysis and modelling [J]. Wear, 2008, 265(9-10): 1222-1230.
- [5] R Stock, R Pippin. RCF and wear in theory and practice—The influence of rail grade on wear and RCF [J]. Wear, 2011(271): 125-133.

- [6] GARNHAM J E, DAVIS C L. The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation [J]. *Wear*, 2008,265(9-10):1363-1372.
- [7] TAKIKAWA M, IRIYA Y. Laboratory simulations with twin-disc machine on head check [J]. *Wear*, 2008,265(9):1300-1308.
- [8] ALFREDSSON B. A study on contact fatigue mechanisms [D]. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [9] DONZELLA G, FACCOLI M, MAZZ A, et al. Progressive damage assessment in the near-surface layer of railway wheel-rail couple under cyclic contact [J]. *Wear*, 2011,271(1):408-416.
- [10] R Stock, R Pippanb RCF and wear in theory and practice—The influence of rail grade on wear and RCF. [J]. *Wear*, 2011(271): 125-133.
- [11] 彭峰, 李平. 高速铁路用钢轨接触疲劳损伤的成因及预防 [J]. *包钢科技*, 2010,36(21):28-31.
- [12] 钟雯. 钢轨的损伤机理研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [13] AKAMA M Development of finite model for analysis of rolling contact fatigue cracks in wheel/rail systems [J]. *QR of RTRI*, 2007, 48(1):8-14.
- [14] RINGSBERG J, LOO M M, JOSEFSON B, et al. Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue [J]. *International journal of fatigue*, 2000,22(3):205-215.
- [15] LIU Y, MAHADEVAN S. Multiaxial high-cycle fatigue criterion and life prediction for metals [J]. *International journal of fatigue*, 2005,27(7):790-800.
- [16] ALFREDSSON B, DAHLBERG J, OLSSON M. The role of a single surface asperity in rolling contact fatigue [J]. *Wear*, 2008,264(9):757-62.
- [17] WENFENG TAN, TAO CHEN. Calculation of fatigue crack initiation life by coupled finite element method[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013,275(277):189-192.
- [18] 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(3):153-155.
- [19] 刘园. 裂纹间距对轮轨滚动接触疲劳作用下的钢轨表面多裂纹扩展趋势的影响[J]. *上海海事大学学报*, 2013,34(04):82-85.
- [20] 王少锋,许玉德,周宇,等. 基于临界平面法的钢轨裂纹萌生寿命预测模型研究[J]. *华东交通大学学报*, 2011,28(5):77-82.
- [21] TARAF M, OUSSOUADDI O, ZEGHLOUL A et al. Numerical analysis for predicting the rolling contact fatigue crack initiation in a railway wheel steel [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010,43(3):585-593.
- [22] FLETCHER D, HYDE P, KAPOOR A. Modelling and full-scale trials to investigate fluid pressurisation of rolling contact fatigue cracks [J]. *Wear*, 2008,265(9-10):1317-1324.
- [23] YONGMING LIU. Analysis of subsurface crack propagation under rolling contact loading in railroad wheels using FEM [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007,74(17):2659-2674.
- [24] Dong H L, Jung W S, Seok J K. Numerical analysis of the effect of slip ratio on the fatigue crack initiation life in rolling contact [J]. *Advanced Materials Researchs*, 2014,891(277):1791-1796.
- [25] 谈育煦, 何家文, 米正仓. Cr12MoV 钢的组织结构和接触疲劳强度的研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 1988(7):1-7.
- [26] 陈颜堂, 刘东雨. 钢轨钢的滚动接触疲劳 [J]. *钢铁研究学报*, 2000,12(5):50-53.
- [27] 张伟, 郭俊, 刘启跃. 钢轨滚动接触疲劳研究 [J]. *润滑与密封*, 2005(6):195-199.
- [28] 王文健, 郭俊, 刘启跃. 轮轨磨损与滚动疲劳裂纹损伤关系及预防研究 [J]. *中国表面工程*, 2010,23(3):106-109.
- [29] 刘启跃, 王文健, 周仲荣. 高速与重载铁路钢轨损伤及预防技术差异研究 [J]. *润滑与密封*, 2007,32(11):11-14.
- [30] DIMELFI R, SANDERS P, HUNTER B, et al. Mitigation of subsurface crack propagation in railroad rails by laser surface modification [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1998,106(1):30-43.
- [31] 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.
- [32] RINGSBERG J W, FRANKLIN F J, JOSEFSON B L, et al. Fatigue evaluation of surface coated railway rails using shakedown theory, finite element calculations, and lab and field trials [J]. *International Journal of Fatigue*, 2005,27(6):680-694.
- [33] WANG JIANXI, XU YUDE, LIAN SONGLIANG, et al. Probabilistic prediction model for initiation of RCF cracks in heavy-haul railway. [J]. *International Journal of Fatigue*, 2011(3):212-216.
- [34] FRANKLIN F, WEEDA G J, KAPOOR A, et al. Rolling contact fatigue and wear behaviour of the infrastar two-material rail [J].

Wear,2005,258(7):1048-1054.

- [35] VRBKA M, HARTLM, et al. Effect of surface texturing on rolling contact fatigue within mixed lubricated non-conformal rolling/sliding contacts [J]. Tribology International,2010,43(8):1457-1465.
- [36] 何柏林, 史建平, 颜亮,等. 超声冲击对钢轨钢组织与性能的影响 [J]. 中国铁道科学, 2009,30(4):58-62.
- [37] 杨胶溪, 刘华东. U71Mn 钢轨表面激光熔覆 Fe 基合金组织与性能研究 [J]. 铁道工程学报, 2010(7):34-37.
- [38] 周清跃, 刘丰收, 朱梅,等. 轮轨关系中的硬度匹配研究 [J]. 中国铁道科学, 2006,27(5):35-41.
- [39] ZENG D, LU L, LI Z, et al. Influence of laser dispersed treatment on rolling contact wear and fatigue behavior of railway wheel steel [J]. Materials & Design, 2014(54):137-143.

Research Review on Wheel-rail Rolling Contact Fatigue Crack of Railway Vehicles

Xiao Qian, Fang Jun

(Research Institute of Modern Rail Vehicles, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Rolling contact fatigue of wheel rails is one of the most important problems for railway vehicle wheel/rail relations, and a lot of relevant researches have been done by many scholars at home and abroad. This paper reviews the wheel-rail rolling contact fatigue crack mechanism and predicting methods, then summarizes the research direction and hotspot in the field. Research of prevention and control countermeasures on rolling contact fatigue of wheel and rail are also reviewed and analyzed. It maintains that the high speed rolling contact fatigue damage mechanism has not yet formed a unified conclusion, especially the wheel-rail rolling contact fatigue damage mechanism analysis of high speed railway has just begun without systematic research, while prevention and control countermeasures on rolling contact fatigue of wheel and rail are not systemic.

Key words: wheel-rail relationship; fatigue damage; ratchet effect; damage mechanism; plastic deformation

(责任编辑 王建华)