

文章编号: 1001-8361(2014)11-0035-05

## 曲线区段磨耗后轮轨型面匹配分析

孙传喜<sup>1</sup>, 张 军<sup>1</sup>, 李 霞<sup>1</sup>, 张璐博<sup>2</sup>, 毕泉书<sup>3</sup>

(1. 大连交通大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116028; 2. 大连市标准化信息中心 代码业务部, 辽宁 大连 116001;  
3. 大连华禹建设集团有限公司 技术部, 辽宁 大连 116021;)

**摘 要:** 车轮与钢轨在运用中相互作用引起磨耗, 在曲线区段轮轨磨耗尤为严重。本文以大量现场检修数据为基础, 经过统计整理, 得出机车车轮缘及曲线区段钢轨型面磨耗演变规律。基于现场实测轮轨型面数据, 建立了有限元模型, 对曲线区段磨耗后车轮及钢轨进行弹塑性接触计算, 有限元计算结果与现场检修数据相互验证。经过分析可得: 机车车轮磨耗按轮缘磨耗速率不同可分为 5 个阶段, 其中第 3 个阶段磨耗速率最低; 圆曲线区段钢轨磨耗稳定期型面与磨耗后车轮型面接触性能最好, 根据接触斑的变化可以得出曲线区段钢轨磨耗后型面演变规律。

**关键词:** 轮轨型面; 曲线钢轨; 磨耗; 应力

中图分类号: U260.11 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8361.2014.11.006

## Analysis on Matching of Worn Wheel-Rail Profiles in Curve Section

SUN Chuan-xi<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, LI Xia<sup>1</sup>, ZHANG Lu-bo<sup>2</sup>, BI Quan-shu<sup>3</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;  
2. Code Operation Department, Dalian Standardization Information Center, Dalian 116001, China;  
3. Technique Department, Dalian Huayu Construction Group Ltd., Dalian 116021, China)

**Abstract:** Interaction between wheels and rails causes abrasion in operation, which behaves especially badly in curve sections of railway lines. In this paper, on the basis of a mass of field repair data of W-R profiles in different wear stages, the law of wear evolvement of wheel flanges and rail profiles in curve sections was abstracted. On the basis of the measured data of worn W-R on profiles, the finite element method (FEM) models were built. Elastic-plastic contact calculations were carried out. The FEM calculation results and field repair data were mutually verified. The following conclusions are drawn: Wear of locomotive wheels is divided into five stages according to the wearing speed of wheel flanges; the flange wearing speed remains the lowest in the third stage; contact of rails in circular curve sections in the stabilized wearing state with worn wheel profiles is the best performance; the evolvement rule of profiles of worn rails in curve sections can be learned from development of contact patches.

**Key words:** wheel-rail profile; rail in the curve section; wear; stress

随着铁路运输的发展, 轮轨型面磨耗问题日益突出, 严重影响了车辆运行平稳性和安全性, 并且导致车轮镟修周期缩短, 加大了机车车辆的维修工作量和运营成本<sup>[1]</sup>。

世界各国学者通过数值分析及试验等手段对轮轨

磨耗及匹配问题进行了大量科学研究。金学松等分析了磨耗型和锥形 2 种型面车轮在滚动接触过程中的接触应力、蠕滑率和摩擦功, 结果表明, 2 种型面的车轮在与钢轨接触过程中, 其蠕滑率、摩擦功和接触应力都存在明显的区别<sup>[2]</sup>。文献[3]运用数值方法, 对轮轨磨耗过程进行了仿真计算, 建立了轮轨磨耗预测模型。J. Pombo 等运用数值方法对轮轨系统进行了模拟仿真, 并预测了运用中轮轨型面的演变过程<sup>[4]</sup>。Gordana Vasic 等建立了计算模型模拟钢轨塑性剪切应变, 并预测钢轨磨耗及裂纹的发展<sup>[5]</sup>。文献[6]运用数

收稿日期: 2013-08-29; 修回日期: 2014-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(U1361117); 辽宁省教育厅科研项目(L2011072); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20112124110002); 辽宁省自然科学基金(201202023)

作者简介: 孙传喜(1980—), 男, 辽宁庄河人, 讲师, 硕士。

E-mail: xiaibo@163.com

值方法对道岔区钢轨型面的磨耗进行了仿真,模型中考虑了轮轨接触区材料的非线性属性。文献[7]中提出了一种新的轮轨接触计算模型,考虑了轮轨接触面中流体介质的作用。Hiroyuki Matsuda 等对现场失效钢轨进行了测量,用以分析钢轨磨耗和钢轨断裂之间的关系[8]。S. M. Shariff 等通过试验手段研究硬化和熔化 2 种状态下的轮轨接触问题[9]。Ki Myung Lee 等对钢轨材料进行了微观试验,同时对钢轨磨耗进行了有限元模拟,并将二者进行了比较分析[10]。A. Rovira 等应用超声波反射手段对轮轨接触关系进行了测试,并利用能量消散法对轮轨磨耗进行了预测[11]。文献[12]中建立了大比例轮轨滚滑试验台,对轮轨磨耗现象进行试验研究,基于试验结果计算得出了各种条件下轨道的 Archard 磨耗系数。

由上述文献可见,目前国内外学者主要针对标准车轮及钢轨进行数值分析、磨耗预测及试验分析。车轮与钢轨为一对接触体,且在运用过程中轮轨型面是不断变化的,在轮轨服役期间内,轮轨长期以磨耗后形态存在。从服务于生产实际角度考虑,对于磨耗后轮轨关系的研究非常重要。车轮及钢轨型面变化规律复杂,本文综合运用现场实测和数值计算手段,探究轮轨磨耗规律及磨耗后轮轨接触关系。

根据对于运用部门现场调研发现,服役于小半径曲线较多线路的机车,绝大多数车轮轮缘磨耗异常快,且机车在踏面磨耗很轻微的情况下由于轮缘磨耗到限而不得不返回检修部门进行镟修。图 1 为现场轮缘磨耗到限的轮对,可见轮缘磨耗非常严重,且磨耗主要集中在轮缘厚度方向。该种异常磨耗造成机车运行公里数减小,给机车运用部门造成巨大的经济损失,也给铁路运输带来极大的安全隐患。



图 1 轮缘磨耗到限的轮对

针对上述问题,并且考虑到轮轨磨耗的特点,本文对机车轮缘与曲线区段钢轨型面磨耗进行了研究。

## 1 轮轨型面实测磨耗规律分析

### 1.1 车轮型面磨耗规律分析

通过对运用现场大量轮缘检修数据的统计分析,得到机车轮缘磨耗量与运行公里数的关系,见图 2。

其中,轮缘厚度测量位置根据文献[13]确定,于踏面滚动圆基准向下 10 mm 处进行测量,见图 3。

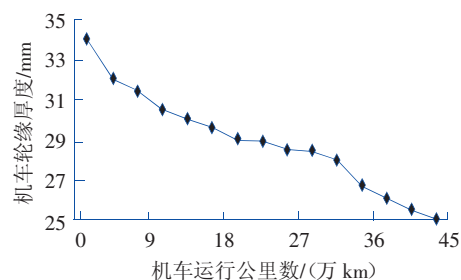


图 2 机车轮缘厚度与运行公里数关系

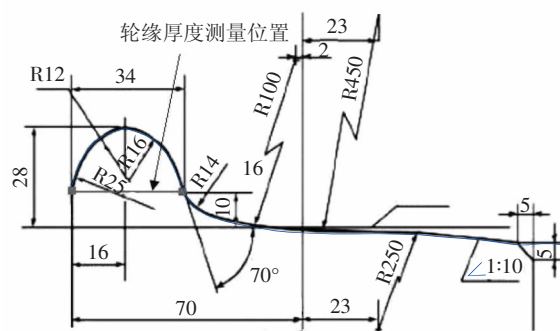


图 3 机车车轮标准型面及轮缘厚度测量位置

经过对于大量现场车轮数据的统计分析,发现机车不同位置车轮磨耗规律相似,其中机车两端轮对磨耗速率较快,分析其原因在于端部车轮在通过曲线时需要承担导向任务而与曲线钢轨频繁贴靠所致。车轮轮缘磨耗过程具有较明显的阶段特性,由图 2 可见,根据磨耗速率不同,可将轮缘磨耗过程分为 5 个阶段。表 1 为机车轮缘磨耗规律,可见在第 3 阶段轮缘磨耗速率最低。

表 1 各阶段车轮轮缘磨耗规律表

磨耗阶段	1	2	3	4	5
机车运行公里数/(万 km)	6	12	12	3	9
轮缘厚度变化量/mm	3.0	2.0	1.0	1.5	1.5
单位轮缘磨耗量下机车运行公里数/(万 km · mm <sup>-1</sup> )	2	6	12	2	6

对现场车轮型面进行测量,经过对大量实测数据的整理得出上述 5 个阶段有代表性的车轮磨耗后型面,分别将其定义为 I、II、III、IV、V 型车轮。图 4 为上述 5 种车轮型面综合对比示意图。I 型车轮型面为未经磨耗的标准车轮型面,车轮从 I 型磨耗到 II 型期间,车轮磨耗集中于轮缘根部,且磨耗区域呈中间宽两边尖的形态,由于磨耗不均导致磨耗速率很高;车轮从 II 型磨耗到 III 型期间,车轮磨耗区开始向轮缘顶部扩展,磨耗区域宽,磨耗速率降低;车轮从 III 型磨耗到 IV 型期间,车轮磨耗区已到达轮缘顶部,且整个磨耗区较

宽且呈宽度均匀的带状形态,所以此阶段磨耗速率最低;车轮从Ⅳ型磨耗到Ⅴ型期间,磨耗区域比前一阶段窄,导致此阶段磨耗速率升高。

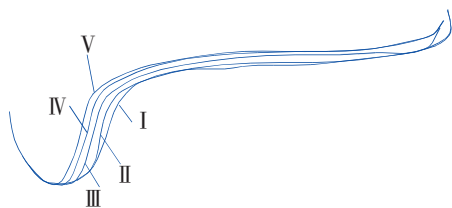
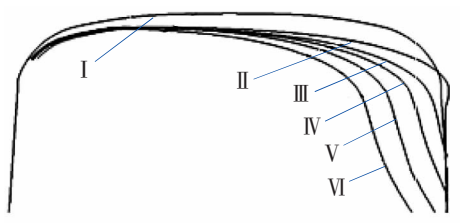


图4 不同磨耗程度车轮轮廓线

## 1.2 钢轨型面磨耗规律分析

对圆曲线区段钢轨进行跟踪测试,经过现场测量及统计分析发现,钢轨的磨耗规律呈明显的阶段性特征。经过统计整理,得到圆曲线区段钢轨型面磨耗过程见图5。与车轮不同的是,钢轨型面磨耗到一定程度后呈基本不变的稳定形态,如图5中Ⅵ型型面即为磨耗稳定阶段的钢轨型面。



I-Ⅵ分别代表钢轨磨耗6个阶段

图5 不同磨耗阶段钢轨型面轮廓线

由图5可见,圆曲线区段钢轨磨耗过程可分为6个阶段,本文分别提取其中典型型面并分别定义为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ型钢轨型面,其中Ⅰ型为圆曲线区段铺设的标准钢轨型面,Ⅱ~Ⅴ型是磨耗中期钢轨型面,Ⅵ型为磨耗稳定期钢轨型面。不同磨耗阶段的钢轨磨耗特点不同,钢轨型面由Ⅰ型演变为Ⅱ型的过程中,钢轨磨耗部位分布于轨顶至内侧的广泛区域,这是由于车轮长期与轨顶及钢轨内侧接触导致的;Ⅱ~Ⅴ型钢轨磨耗部位由轨顶逐渐向钢轨内侧转移且磨耗量逐渐增大,该现象是由于磨耗后轮轨型面的几何匹配关系所致,轮轨接触位置不断内移;Ⅴ型演变为Ⅵ型期间钢轨侧面磨耗量最大,根据磨耗特点可知此现象是由于机车轮缘长期频繁贴靠钢轨内侧导致的。

## 2 磨耗后轮轨接触计算模型

通过对现场实测数据的分析,得到曲线区段不同磨耗阶段轮轨型面的磨耗规律,为了从理论上分析其中的规律,本文利用有限元法,以上述轮轨型面为对象进行了弹塑性接触分析。

### 2.1 本构关系

现场调研发现,轮轨表面材料均发生了较严重的塑性变形,因此本文采用弹塑性接触计算模型,根据弹塑性理论,线性强化塑性材料模型的应力-应变方程为

$$\sigma = \begin{cases} E_c \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_s \\ \sigma_s + E_p (\epsilon - \epsilon_s) & \epsilon > \epsilon_s \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $\sigma$ 为应力; $\epsilon$ 为应变; $\sigma_s$ 为屈服极限; $E_c$ 为杨氏模量; $E_p$ 为应变强化模量; $\epsilon_s$ 为屈服点处总应变。屈服准则采用V on Mises 准则。

### 2.2 有限元模型

根据现场实测数据,建立了轮轨接触有限元模型三维网格及接触区局部二维网格,见图6。经过对于现场实测数据的统计分析发现,机车端部1位轮对轮缘磨耗最为严重,因此选取机车端部轮对作为研究对象,分析其发生贴靠现象时的轮轨接触关系。建立了轮对与钢轨的接触模型,根据轮对与钢轨的几何约束关系可以得到机车1位轮对发生轮缘贴靠时的极限位置,并根据接触位置进行网格的细化,见图6。磨耗后轮轨型面与标准轮轨型面接触性能区别很大,根据几何约束确定各种型面发生轮缘贴靠的极限位置,进而建立弹塑性接触计算模型,可以获得接触斑状态的详细信息。

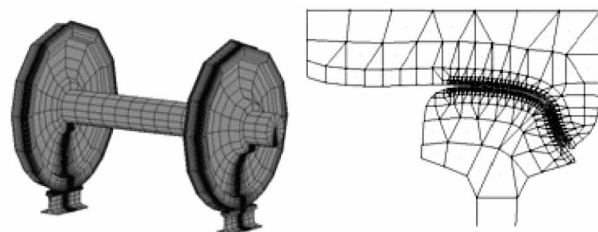


图6 轮轨接触模型有限元网格

为了尽量模拟真实情况,模型中载荷条件设置如下:轮轨计算模型所受载荷包括轴重和横向力,其中轴重为23 t;为反映真实机车通过曲线工况,本文模拟机车以60 km/h的速度通过半径为600 m的小半径曲线,则离心力按下式计算: $F = m \cdot v^2 / r \approx 10 \text{ kN}$ 。为了在同样载荷前提下比较各种磨耗后型面的匹配关系,在有限元计算模型中将离心力作为横向载荷施加于车轴一侧。

## 3 磨耗后轮轨接触计算结果分析

为了探究轮轨磨耗规律及接触关系,本文从下述2个角度分析问题:

(1) 考虑到圆曲线区段钢轨磨耗最为严重,分别对不同磨耗阶段车轮与Ⅵ型钢轨型面进行接触计算,

以分析各型车轮型面的接触斑及应力分布规律。

(2) III型车轮型面的磨损速率最低,从有利于实际运用及型面设计角度考虑,分别对不同磨损阶段的圆曲线钢轨型面与III型车轮型面进行接触计算,以分析各种钢轨型面的接触斑及应力分布规律。

### 3.1 不同磨损阶段车轮与磨损稳定期曲线钢轨型面接触分析

考虑到车轮从I型磨损至III型磨损过程中轮缘磨损速率变化较大,本文从实际运用角度出发分析上述3种型面车轮分别与VI型钢轨接触时的接触斑及应力变化规律。经过有限元计算得出3种型面车轮接触斑分布规律,见图7。

上述3种型面接触斑面积分别为 $183\text{ mm}^2$ 、 $294\text{ mm}^2$ 及 $402\text{ mm}^2$ 。根据接触斑区域可见,I型车轮与VI型钢轨接触时,轮轨接触斑集中于轮缘根部,因而此处磨损较快;当车轮逐渐演变成II型型面后,轮轨接触关系发生了变化,接触斑分布于轮缘根部及踏面部位,磨损范围更大;当车轮发展成III型型面后,踏面部位的接触面积显著增大,且踏面与轮缘部位的接触斑逐渐接近,导致轮轨整体接触斑呈更加宽泛和均匀的趋势,所以III型车轮比I型及II型车轮更耐磨。

根据图7中轮轨接触斑的演变规律可见,轮轨型面在接触过程中不断地相互磨损,在I型车轮演变至III型车轮过程中,型面的磨损使轮轨接触关系逐渐紧密,接触面积不断地增大。有限元计算所得结果与现场检修数据及实测车轮型面变化规律相吻合。

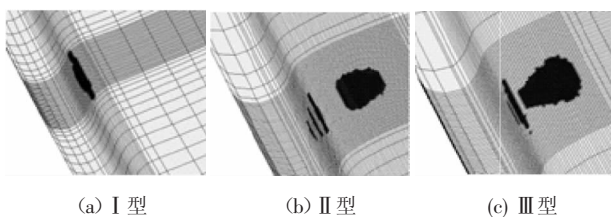


图7 3种型面车轮接触斑云图

经过弹塑性接触计算得出3种车轮接触斑面积及等效应力变化规律见图8。3种型面车轮最大等效应力分别为 $1\,459\text{ MPa}$ 、 $1\,468\text{ MPa}$ 及 $1\,137\text{ MPa}$ 。I型与II型车轮型面轮轨最大等效应力差别较小,但III型车轮型面最大等效应力较I型有较大降低,应力减小了22%。由接触部位变化规律可见:I型车轮接触区集中于轮缘根部;II型车轮接触区仍位于轮缘根部,但此时踏面部位开始发生接触;III型车轮轮缘及踏面接触斑分布较上述2种车轮更为均匀,该型面具有相对较好的接触性能,因而车轮上的应力较小。

由有限元计算结果可见,III型车轮型面接触面积最大,最大等效应力最小,这正是该种型面耐磨性能最

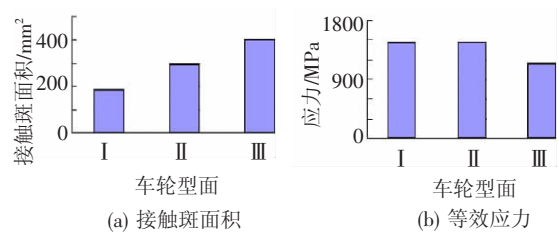


图8 3种型面车轮接触斑面积及等效应力柱状图

好的原因。

### 3.2 III型车轮与各磨损阶段钢轨接触分析

本文建立了I、II、V及VI型钢轨型面分别与III型车轮相接触的计算模型,用以模拟机车分别运行于不同磨损钢轨上的工况。上述4种工况钢轨接触斑分布规律见图9。

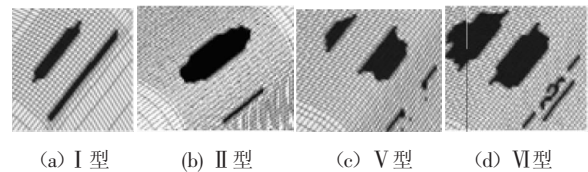


图9 4种钢轨接触斑云图

上述4种工况下钢轨接触斑面积分别为 $55\text{ mm}^2$ 、 $103\text{ mm}^2$ 、 $258\text{ mm}^2$ 及 $402\text{ mm}^2$ 。I型钢轨型面与III型车轮型面接触时,轮轨接触位置集中于轨距角处两个较小的区域,所以接触斑面积较小;相对I型钢轨型面,II及V型钢轨型面轮轨接触向钢轨顶部转移,这是由于轮轨磨损的效果是使二者接触关系更为密实,因此接触面积增大;VI型钢轨型面与车轮接触时轮轨接触范围最宽,轨顶及轨侧均发生了轮轨接触,该型面由于长期的轮轨相互磨损,已获得最佳的轮轨接触状态。

经过有限元计算得出4种钢轨接触斑面积及等效应力变化规律见图10。4种钢轨型面最大等效应力分

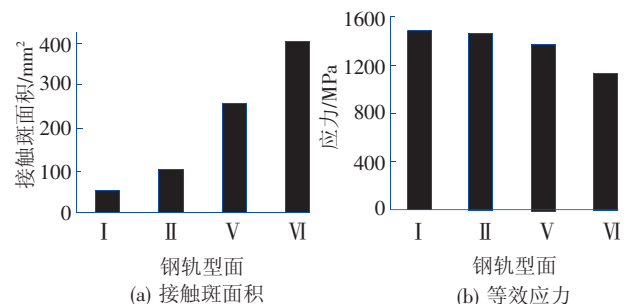


图10 4种钢轨接触斑面积及等效应力柱状图

别为 $1\,490\text{ MPa}$ 、 $1\,463\text{ MPa}$ 、 $1\,361\text{ MPa}$ 及 $1\,137\text{ MPa}$ 。四者中VI型钢轨型面最大等效应力最小,分析图9中接触斑的分布规律可知,VI型钢轨型面与III型车轮接触关系最为贴合,接触面积最大。本文的计算模型是以现场实测数据为基础建立的,综合分析上述



有限元计算结果可知,同样载荷作用下,Ⅵ型钢轨型面对于车轮适应性最好,这也正是该种型面能够长期稳定地存在于铁路圆曲线区段的原因。

Ⅰ型钢轨型面可以表征在圆曲线区段铺设标准钢轨的工况,由图 9 可见接触斑位于轨距角处,导致该部位磨耗较快,由趋势可见随着钢轨磨耗,逐渐形成Ⅱ及Ⅴ型钢轨型面。Ⅱ及Ⅴ型钢轨型面可以代表圆曲线区段钢轨磨耗中期形态,接触斑位于钢轨内侧,导致该部位磨耗较快,其趋势表明圆曲线区段钢轨型面最终将演变成Ⅵ型钢轨的稳定型面。

#### 4 结论

本文统计分析了大量现场轮轨检修数据,得出了机车车轮与曲线钢轨的磨耗规律,并基于现场实测的轮轨型面数据,建立磨耗后轮轨接触有限元模型,进行弹塑性接触计算分析。综合分析上述检修数据、实测数据及有限元计算结果可以得到如下结论:

(1) 有限元计算结果与现场检修数据及实测型面数据所反映的规律非常吻合。

(2) 相比于其他磨耗阶段的车轮,由于型面匹配关系良好,Ⅲ型车轮型面接触斑面积最大,且等效应力最小,因此该型车轮在服役过程中,车轮轮缘磨耗速率最低。

(3) Ⅵ型钢轨型面在圆曲线区段具有较好的轮轨匹配性能,因此该钢轨型面可以长期稳定地存在于圆曲线区段。

参考文献:

- [1] 金学松,沈志云. 轮轨滚动接触疲劳问题研究的最新进展[J]. 铁道学报,2001,23(2):92-108.  
JIN Xue-song, SHEN Zhi-yun. Rolling Contact Fatigue of Wheel-Rail and its Advanced Research Progress[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(2): 92-108.
- [2] 温泽峰,金学松,刘兴奇. 两种型面轮轨滚动蠕滑率和摩擦功[J]. 摩擦学学报,2001,21(4):288-292.  
WEN Ze-feng, JIN Xue-song, LIU Xing-qi. Creepages and Friction Work of Wheelset and Track with Two Type Profiles in Rolling Contact[J]. Tribology, 2001, 21(4): 288-292.
- [3] 李霞. 车轮磨耗预测初步研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [4] POMBO J, AMBROSIO J, PEREIRA M, et al. Influence of Track Conditions and Wheel Wear State on the Loads Imposed on the Infrastructure by Railway Vehicles[J]. Computers and Structures, 2011, 89(21-22): 1882-1894.
- [5] VASIC G, FRANKLIN F J, FLETCHER D I. Influence of Partial Slip and Direction of Traction on Wear Rate in Wheel-rail Contact[J]. Wear, 2011, 270(3-4): 163-171.
- [6] JOHANSSON A, PALSSON B, EKH M, et al. Simulation of Wheel-rail Contact and Damage in Switches & Crossings[J]. Wear, 2011, 271(1-2): 472-481.
- [7] TOMBERGER C, DIETMAIER P, SEXTRO W, et al. Friction in Wheel-rail Contact: A Model Comprising Interfacial Fluids, Surface Roughness and Temperature[J]. Wear, 2011, 271(1-2): 2-12.
- [8] MASTUDA Hiroyuki, SATOH Yukio, KANEMATSU Yoshikazu, et al. On-site Investigation and Analysis of Flaking Damage Leading to Rail Break[J]. Wear, 2011, 271(1-2): 168-173.
- [9] SHARIFF S M, PAL T K, PADMANABHAM G, et al. Sliding Wear Behaviour of Laser Surface Modified Pearlitic Rail Steel[J]. Surface Engineering, 2010, 26(3): 199-208.
- [10] LEE Ki Myung, POLYCARPOU Andreas A. Microscale Experimental and Modeling Wear Studies of Rail Steels[J]. Wear, 2011, 271(7-8): 1174-1180.
- [11] ROVIRA A, RODAA A, MARSHALL M B, et al. Experimental and Numerical Modelling of Wheel-rail Contact and Wear[J]. Wear, 2011, 271(5-6): 911-924.
- [12] JIN Ying, ISHIDA Makoto, NAMURA Akira. Experimental Simulation and Prediction of Wear of Wheel Flange and Rail Gauge Corner[J]. Wear, 2011, 271(5-6): 259-267.
- [13] 中华人民共和国铁道部. TB/T 449—2003 机车车辆车轮轮缘踏面外型[S]. 北京:铁道部标准计量研究所,2003.

(责任编辑 何 芳)