

# U75V 热处理钢轨滚动接触疲劳裂纹和磨耗试验

周 宇, 张 杰, 杨新文, 姜俊楠

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 对 U75V 热处理钢轨进行不同通过总重时的表面观测、取样、磨耗测量、实验室疲劳裂纹长度与深度显微照相以及断面硬度测量, 分析钢轨的轨距角滚动接触疲劳裂纹、磨耗和硬度的关系。研究发现, 轨距角疲劳裂纹的发展包括裂纹快速萌生和扩展、裂纹-磨耗共存和发展、磨耗控制裂纹三个阶段。轨距角的裂纹向钢轨内部扩展, 裂纹与钢轨纵向水平线呈  $10.8^{\circ} \sim 29.4^{\circ}$ 。硬化层硬度在 340~360 HB 及以上时, 磨耗发展率小于  $0.015 \text{ mm} \cdot \text{Mt}^{-1}$ , 而疲劳裂纹萌生扩展较快, 应考虑钢轨上道后至通过总重 5~10 Mt 期间实施新轨预打磨、通过总重 30~60 Mt 时实施预防性打磨, 以平衡磨耗与裂纹的关系。同时, U75V 热处理钢轨具有 340~360 HB 及以上硬度的硬化层厚度应大于 10 mm。

**关键词:** 钢轨; 裂纹; 磨耗; 硬度; 显微照片

**中图分类号:** U213.4

**文献标志码:** A

## Experiment on the Rolling Contact Fatigue Crack and Wear of U75V Heat-treated Rail

ZHOU Yu, ZHANG Jie, YANG Xinwen, JIANG Junnan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The relationship among rolling contact fatigue crack at the gauge corner, wear and hardness of the U75V heat-treated rails in field curve was analyzed by surface observation, sampling, wear measurement, laboratory photomicrograph for length and depth of the crack and hardness of the rail longitudinal cross-section measurement at different traffic. The research show that there were 3 main periods during the fatigue crack growth: crack initiation and rapid propagation, co-existence of crack and wear, and growth and wear control crack. The crack at the gauge corner propagated into the railhead with the angle of  $10.8^{\circ}$  to  $29.4^{\circ}$  with respect to the rail longitudinal surface. When the hardness of the heat-treated layer was 340 to 360 HB and above, the wear growth rate was less than  $0.015 \text{ mm} \cdot \text{Mt}^{-1}$  with rapid fatigue crack growth. The rail pre-grinding from new rail installation

to 5 to 10 Mt and preventive grinding with an interval of 30 to 60 Mt were recommended to balance the crack and wear. The thickness of the heat-treated layer with 340 to 360 HB and above should be over 10 mm.

**Key words:** rail; crack; wear; hardness; photomicrography

钢轨滚动接触疲劳裂纹容易引发剥离掉块, 导致钢轨使用寿命减少, 养护维修成本增加, 甚至有引起断轨的风险<sup>[1-2]</sup>。研究表明, 这种疲劳裂纹在其萌生与扩展的过程中始终会受到钢轨磨耗的影响<sup>[2-5]</sup>。各种方法如仿真计算<sup>[6-7]</sup>、小比例模型试验<sup>[8-9]</sup>、全尺寸试验台试验<sup>[10-11]</sup>等已经应用到钢轨疲劳裂纹与磨耗相互关系的研究中, 但其主要目的是发现疲劳裂纹与磨耗的特征, 模拟两者的影响关系或者为不同的线路选择等级合适的钢轨。Fletcher 等<sup>[12]</sup>利用双盘滚动试验, 观测了裂纹扩展与磨耗率之间的平衡关系。Donzella 等<sup>[13]</sup>提出了一种研究磨耗和表面疲劳裂纹之间竞争作用的模型, 并利用双盘滚动试验探讨了干燥和湿润两种黏着-蠕滑接触条件下的磨耗和裂纹的关系<sup>[14]</sup>以及剪应变累积与磨耗的关系<sup>[15]</sup>。但是, 基于现场实际运输条件对疲劳裂纹、磨耗和钢轨硬度相互关系进行研究的文献尚不多见。

本文对现场实际运输条件中布置在曲线外轨上的 U75V 热处理钢轨进行了全寿命阶段现场和实验室试验。在不同通过总重时对钢轨进行表面观测、取样、实验室裂纹显微照相, 采用图像识别技术计算轨距角疲劳裂纹的长度与深度, 分析钢轨疲劳裂纹的发展阶段和裂纹扩展角度。结合取样时的钢轨型面磨耗测量、实验室试样断面的硬度测量, 研究 U75V 热处理钢轨的轨距角滚动接触疲劳裂纹、磨耗与硬化层硬度的关系, 为合理实施延长 U75V 热处理钢轨使用寿命的措施提供依据。

收稿日期: 2014-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(50908179, 51378395)

第一作者: 周 宇(1977—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为钢轨损伤及养护管理。E-mail: yzhou2785@tongji.edu.cn

# 1 试验方法

## 1.1 现场取样

根据文献[16],在某重载铁路重车方向上选取一段 500 m 半径的曲线作为现场试验段.列车牵引定数约 5 500 t,平均运行速度约 60~70 km·h<sup>-1</sup>.车辆为 C64(轴重 21 t)和 C70(轴重 23 t)两种敞车.线路为无缝线路、有砟轨道,钢轨为 75 kg·m<sup>-1</sup>、U75V 热处理钢轨,轨距角表面硬度约 340~390 HB<sup>[17]</sup>.

试验开始时,曲线内、外轨都换成新轨,新轨上道后未进行预打磨.每次钢轨取样所对应的通过总重分别为 10, 30, 62, 100, 150, 210, 275, 320 Mt. 取样位置为曲线外轨中心,取样长度为 1 m.每次取样后,用同样长度并且型面一致的钢轨作为替换轨,与前后钢轨用螺栓与夹板连接恢复线路.下次取样时,拆开螺栓和夹板,沿列车运行方向的逆向继续截取 1 m 长的钢轨,以避免替换轨和有缝接头对裂纹的影响.通过总重 320 Mt 后,外轨因为严重侧磨而下道,试验结束.

每次取样时,采用钢轨轮廓测量仪对取样位置前后 50 m 范围内的外轨进行型面测量,测点间距 5 m.测得的型面与新轨上道时同一位置的型面进行对比,计算平均磨耗量.

## 1.2 实验室裂纹测量

现场观测到的疲劳裂纹最先发生在外轨距离轨距角 12 mm 的位置,所以在此位置切割试样用于观测与测量,如图 1 所示.

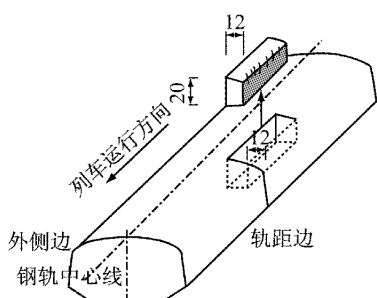
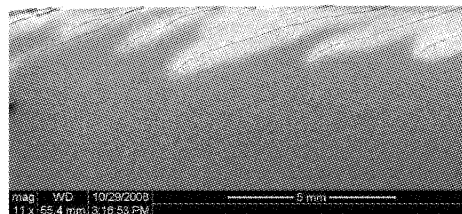


图 1 裂纹观测试样的制作(单位:mm)

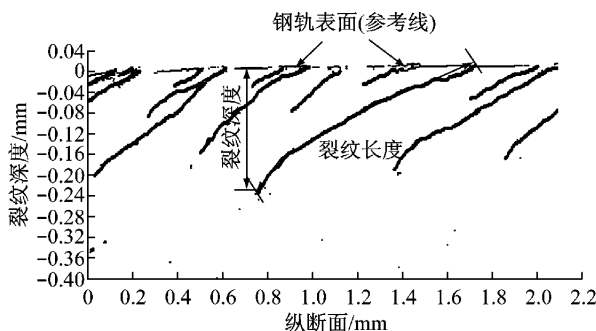
Fig.1 Specimen taken from the samples (unit: mm)

用显微镜对试样的纵断面(图 1 中灰色部分)进行显微照相,并用图像识别的方法<sup>[18]</sup>将裂纹图像转换成像素点图像,如图 2 所示.为计算钢轨试样中的残留裂纹长度与深度,首先识别出试样顶面的钢轨表面参考线和裂纹.残留裂纹长度为同一条裂纹中

相邻像素点之间的直线距离之和.残留裂纹深度为该裂纹尖端像素点与参考线之间的垂直距离.最后,根据显微照相放大倍数计算裂纹的长度与深度.



a 纵断面试样中的裂纹



b 图像识别后裂纹

图 2 通过总重 30 Mt 时的裂纹长度与深度

Fig.2 Length and depth of cracks at 30 Mt

此外,在截取试样后,采用硬度计对试样纵断面沿钢轨深度方向的硬度进行了测量<sup>[17]</sup>.

## 2 钢轨疲劳裂纹的发展

### 2.1 钢轨裂纹的表面发展

钢轨疲劳裂纹表面情况如图 3 所示.每张图的下方为轨距边位置,上方为钢轨顶面位置,列车运行方向均为从右往左.

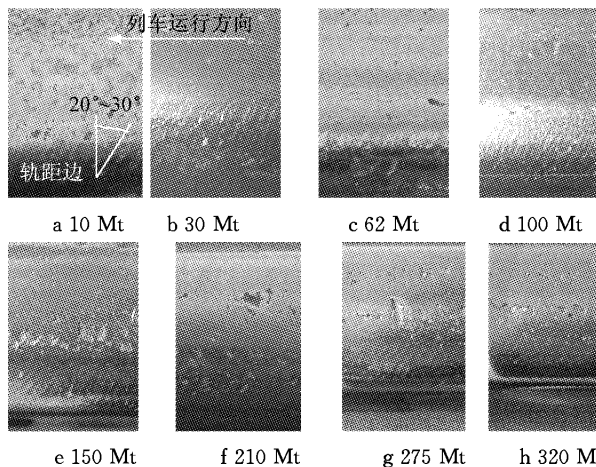


图 3 外轨疲劳裂纹的表面发展

Fig.3 Growth of cracks in high rail surface

从图 3 中可以看出,通过总重约 10 Mt 时,疲劳

裂纹已经发生在钢轨轨距角位置,与钢轨横断面方向所呈的角度为  $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,分布在从轨距边开始向轨顶中心方向  $13\sim 16\text{ mm}$  的范围(图 1 中取样位置在此范围内).通过总重  $10\sim 100\text{ Mt}$  时,裂纹加密,轨顶面也逐渐出现平行于钢轨横向方向的疲劳裂纹,并在轨顶面与轨距边的裂纹相连部分开始发生剥离掉块.通过总重  $100\text{ Mt}$  后,剥离掉块更加严重.通过总重  $210\text{ Mt}$  后,裂纹和剥离掉块看似趋于缓

和,但侧磨明显加剧.

### 2.2 疲劳裂纹的内部发展

对不同通过总重下试样中的残留裂纹长度与深度进行统计,并计算其分布百分比<sup>[19]</sup>.经检验,裂纹深度分布曲线不是正态分布.取每次通过总重下残留裂纹深度的中位数,得到裂纹深度分布及其中心位数随着通过总重累积的发展趋势,如图 4 所示.

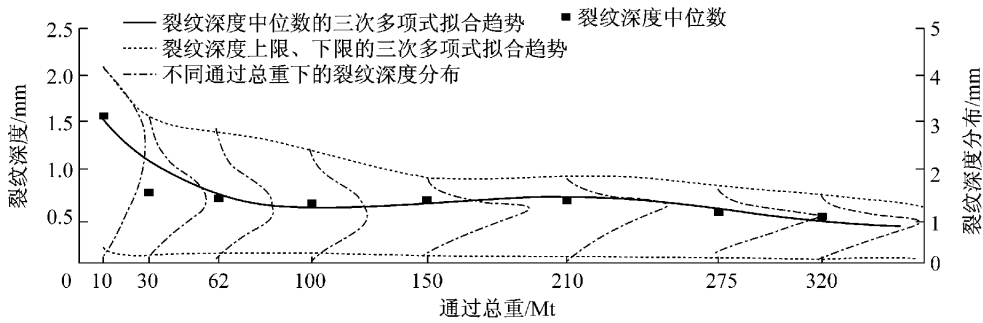


图 4 裂纹深度中位数和裂纹深度分布随通过总重的发展

Fig.4 Growth of medians and distribution of crack depth

从图 4 可以看出,钢轨疲劳裂纹深度发展有三个明显的阶段:

(1) 第一阶段(新轨上道至通过总重约  $10\text{ Mt}$ ): 裂纹的分布曲线形状较宽,即此阶段深、浅裂纹的数量都较多,其数值分布在  $0\sim 4.0\text{ mm}$  范围内.

(2) 第二阶段(通过总重  $10\sim 100\text{ Mt}$ ): 裂纹的分布曲线向下平移且形状略变高变窄,即此阶段深裂纹的数量有所减小,但浅裂纹的数量增加,裂纹深度分布在  $0\sim 3.0\text{ mm}$  范围内.

(3) 第三阶段(通过总重  $100\sim 320\text{ Mt}$ ): 裂纹的分布曲线继续向下平移且形状变高变窄.即深裂纹数量进一步减小,其分布范围在  $2.0\text{ mm}$  以下.

裂纹长度的发展阶段与深度大致相同.

不同通过总重时的裂纹长度和深度的关系如图 5 所示.可以看出,裂纹长度和深度基本呈线性正比关系,裂纹深度与长度之比在  $0.19\sim 0.49$  之间,即轨距角的疲劳裂纹主要向钢轨内部扩展,扩展角度为  $10.8^{\circ}\sim 29.4^{\circ}$ .

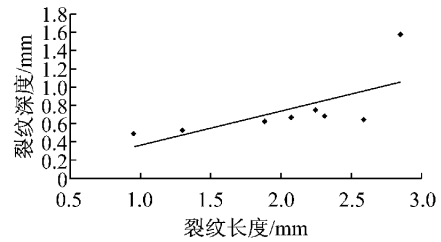
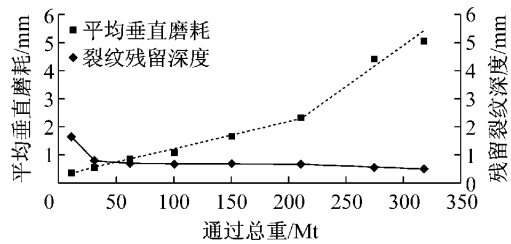
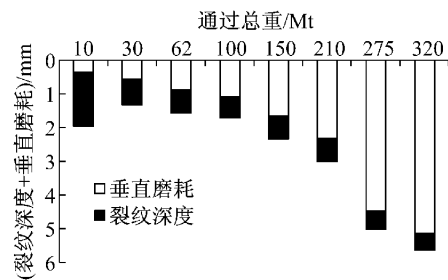


图 5 疲劳裂纹长度和深度的关系

Fig.5 Length versus depth of cracks



a 裂纹深度和垂直磨耗随通过总重的发展



b 裂纹深度和垂直磨耗的累积柱状图

图 6 裂纹深度和垂直磨耗之间的关系

Fig.6 Crack depth versus vertical wear

### 3 裂纹与磨耗的相互关系

图 6 为钢轨上同一位置的裂纹深度中位数和平均垂直磨耗随通过总重的发展趋势.其中图 6a 为用分段线性拟合得到的裂纹深度和垂直磨耗发展趋势,图 6b 为不同通过总重下的裂纹深度中位数和平均垂直磨耗累积柱状图.

图 7 为三次不同通过总重下钢轨试样纵断面深度方向的硬度分布. 其中 210 Mt 和 275 Mt 时的硬度曲线起点与纵坐标的水平距离为相应通过总重下的钢轨垂直磨耗量(从图 6 得到).

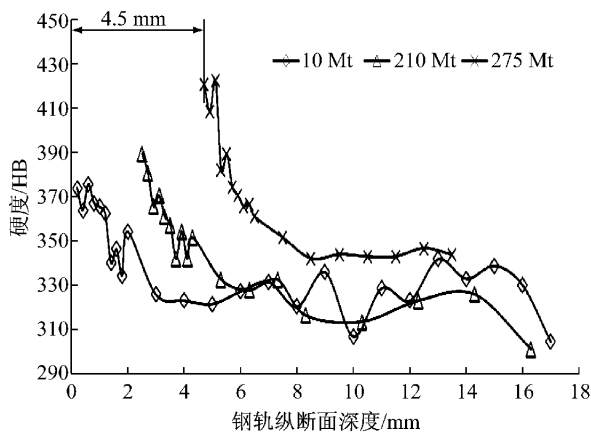


图 7 距离轨距边 12 mm 处测量的硬度随深度的变化  
Fig. 7 Hardness measured along the depth at the location of 12 mm away from the gauge face

从图 6、图 7 中可以看出, 2.2 节中所描述的裂纹发展三个阶段可以进一步描述如下:

(1) 从新轨上道到通过总重 10 Mt 阶段, 疲劳裂纹在 10 Mt 之前就已经萌生. 到 10 Mt 时, 裂纹深度达到最大值, 其中位数为 1.58 mm, 相应的垂直磨耗平均值仅为 0.35 mm, 表面硬度约 370 HB. 说明热处理钢轨的较高硬度使得型面不易磨损, 但也使得轮轨接触集中的轨距角位置较早萌生和扩展疲劳裂纹<sup>[20]</sup>, 所以应在新轨上道后考虑新轨预打磨, 以改善轮轨几何关系. 预打磨时间应在通过总重 5~10 Mt 以内. 这个阶段钢轨的损伤机制主要是疲劳裂纹, 可以称为裂纹快速萌生和扩展阶段.

(2) 通过总重在 10~100 Mt 阶段, 钢轨磨耗开始增长, 逐渐影响裂纹. 裂纹深度中位数从 1.58 mm 减小到 0.63 mm, 对应的磨耗量为 1.08 mm, 表面硬度约 350 HB 左右. 要控制裂纹的扩展, 这个阶段应考虑预防性打磨, 作为轮轨自然磨耗的补充, 最好是在未大量出现剥离掉块的 30~60 Mt 时期实施. 这个阶段钢轨的损伤机制主要是疲劳裂纹和磨耗并伴有轻微塑性变形, 可以称为裂纹-磨耗共存和发展阶段.

(3) 通过总重从 100~320 Mt, 钢轨磨耗呈分段线性增长的趋势, 疲劳裂纹的残留深度进一步由 0.63 mm 降低到 0.49 mm, 对应的磨耗量增加到了约 5.00 mm, 表面硬度 420 HB. 说明磨耗已经抑制住裂纹的发展, 但是这时的轨面已经有较多的剥离

掉块, 且钢轨型面因侧磨而内凹. 这个阶段钢轨的损伤机制主要是磨耗, 可以称为磨耗控制裂纹阶段.

从图 7 可以看出, 钢轨纵断面硬度沿钢轨深度方向在 3 mm 内迅速降低. 当通过总重达到 275 Mt 时, 垂直磨耗约 4.50 mm, 钢轨表面硬化层中较硬的 3.00 mm 材料已经被完全磨损, 相对较软的硬化层部分已经暴露在轮轨接触范围内. 这时的钢轨表面硬度为 420 HB, 是由轮轨加工硬化引起的, 其脆性较大. 因此, U75V 热处理钢轨表面的较硬硬化层厚度和硬度(硬度在 340~360 HB 及以上)直接影响钢轨疲劳裂纹与磨耗.

图 8 为通过总重在 10~320 Mt 时, 残留裂纹长度和深度与磨耗发展率之间的关系.

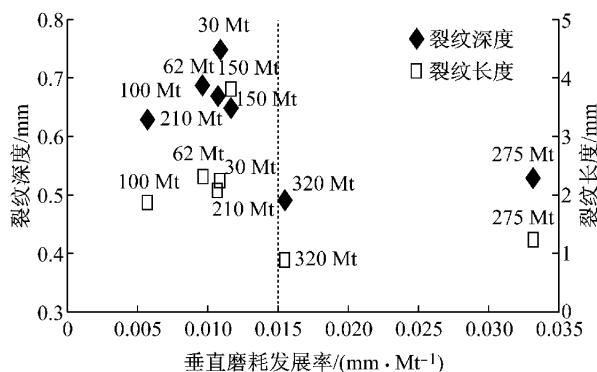


图 8 裂纹深度和垂直磨耗发展率的关系  
Fig. 8 Crack depth versus growth rates of vertical wear

从图 8 可以看出, 当磨耗发展率低于  $0.015 \text{ mm} \cdot \text{Mt}^{-1}$  时, 裂纹的深度与长度分别大于 0.6 mm 和 2.0 mm, 而当磨耗发展率大于  $0.015 \text{ mm} \cdot \text{Mt}^{-1}$  时, 恰好是较硬的硬化层被磨损掉之后(通过总重  $> 210 \text{ Mt}$ ), 裂纹的长度与深度分别降至 0.5 mm 和 1.0 mm. 因此, 按实际测量考虑, U75V 热处理钢轨的硬化层硬度在 340~360 HB 及以上时, 磨耗较小, 但裂纹会萌生较早、较快; 当这个硬度的硬化层磨损掉后, 磨耗发展率高于  $0.015 \text{ mm} \cdot \text{Mt}^{-1}$ , 裂纹的尺寸被控制在较小的范围内, 但钢轨型面快速恶化.

## 4 结论

(1) U75V 热处理钢轨轨距角的滚动接触疲劳裂纹和磨耗的发展主要经历三个阶段: 裂纹快速萌生和扩展阶段、裂纹-磨耗共存和发展阶段、磨耗控制裂纹阶段.

(2) U75V 热处理钢轨轨距角滚动接触疲劳裂纹的长度和深度呈线性正比关系, 即轨距角的裂纹是向钢轨内部扩展的, 扩展的角度的范围为  $10.8^\circ \sim$

29.4°.

(3) U75V 热处理钢轨的疲劳裂纹、磨耗与其硬化层的硬度有密切的关系. 硬化层硬度在 340~360 HB 及以上时,磨耗发展率小于  $0.015 \text{ mm} \cdot \text{Mt}^{-1}$ , 这时磨耗量小而疲劳裂纹萌生扩展较快;反之则磨耗量大,疲劳裂纹被抑制. 因此,为了延长小半径曲线外轨使用寿命,建议钢轨上道后至通过总重 5~10 Mt 期间实施预打磨、通过总重在 30~60 Mt 时实施预防性打磨,作为轮轨自然磨耗的补充.

(4) 热处理钢轨硬化层的硬度沿钢轨深度方向应均匀分布,并保持一定的厚度. 从钢轨实际情况和实施钢轨打磨来看,硬化层硬度应保持在 340~360 HB 及以上,具有这样硬度的硬化层厚度应大于 10 mm.

#### 参考文献:

- [1] Li Z, Dollevoet R, Molodova M, *et al.* Squat growth—some observations and the validation of numerical predictions[J]. *Wear*, 2011, 271(1-2): 148.
- [2] Frederick C O. Future rail requirements[C]//Proceedings of Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993: 3-14.
- [3] Olofsson U, Nilsson R. Surface cracks and wear of rail; a full scale test and laboratory study [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2002, 216(7): 249.
- [4] Zerbst U, Lundén R, Edel K O, *et al.* Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails—a review [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(17): 2563.
- [5] Matsuda H, Satoh Y, Kanematsu Y, *et al.* On-site investigation and analysis of flaking damage leading to rail break[J]. *Wear*, 2011, 271(1-2): 168.
- [6] Franklin F J, Widiyarta I, Kapoor A. Computer simulation of wear and rolling contact fatigue[J]. *Wear*, 2001, 251(10): 949.
- [7] Li Z, Zhao X, Esveld C, *et al.* An investigation into the causes of squats—correlation analysis and numerical modeling [J]. *Wear*, 2008, 265(9-10): 1349.
- [8] Arias-Cuevas O, Li Z, Lewis R, *et al.* Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts[J]. *Wear*, 2010, 268(3-4): 543.
- [9] Zhong W, Hu J J, Shen P, *et al.* Experimental investigation between rolling contact fatigue and wear of high-speed and heavy-haul railway and selection of rail material[J]. *Wear*, 2011, 271(9-10): 2485.
- [10] Stock R, Pippan R. RCF and wear in theory and practice—the influence of rail grade on wear and RCF[J]. *Wear*, 2011, 271(1-2): 125.
- [11] Arias-Cuevas O, Li Z. Field investigations into the performance of magnetic track brakes of an electrical multiple unit against slippery tracks[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2012, 226(1): 72.
- [12] Fletcher D I, Beynon J H. Equilibrium of crack growth and wear rates during unlubricated rolling-sliding contact of pearlitic rail steel [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2000, 214(2): 93.
- [13] Donzella G, Faccoli M, Ghidini A, *et al.* The competitive role of wear and RCF in a rail steel [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, 72(2): 287.
- [14] Donzella G, Mazzù A, Petrogalli C. Competition between wear and rolling contact fatigue at the wheel-rail interface; some experimental evidence on rail steel[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2009, 223(1): 31.
- [15] Donzella G, Faccoli M, Mazzù A, *et al.* Progressive damage assessment in the near-surface layer of railway wheel-rail couple under cyclic contact[J]. *Wear*, 2011, 271(1-2): 408.
- [16] Tunna J, Urban C. A parametric study of the effects of freight vehicles on rolling contact fatigue of rail[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2009, 223(2): 141.
- [17] 中华人民共和国铁道部. TB/T 2635—2004 热处理钢轨技术条件[S]. 北京:中国铁道出版社. 2004.  
Ministry of Railway of People's Republic of China. TB/T 2635—2004 Technical specifications for the heat treated rails [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [18] Kapur J, Sahoo P, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1985, 29(3): 273.
- [19] Zhou Y, Wang S F, Wang T Y, *et al.* Field and laboratory investigation of the relationship between rail head check and wear in a heavy-haul railway[J]. *Wear*, 2014, 315(1-2): 68.
- [20] Li Z, Arias-Cuevas O, Dollevoet R P B J. Relation between head checks initiation, growth and operational loading conditions [C]//9th International Heavy Haul Association (IHHA). Beijing: China Railway Publishing House, 2009: 219-223.