

# 接触应力对车轴钢旋转弯曲 微动疲劳寿命的影响

Effect of Contact Stress on Rotating Bending  
Fretting Fatigue Life of Railway Axle Steel

宋 川, 刘建华, 彭金方, 张 林, 周 琰, 朱旻昊

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所, 成都 610031)

SONG Chuan, LIU Jian-hua, PENG Jin-fang, ZHANG Lin,

ZHOU Yan, ZHU Min-hao

(Tribology Research Institute, Traction Power State Key Laboratory,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**摘要:** 研究 LZ50 车轴钢不同过盈配合接触应力水平对旋转弯曲微动疲劳寿命的影响。分别利用光学显微镜、扫描电子显微镜对过盈配合表面的微动损伤表面和断口进行分析。结果表明, 随着过盈量的增加, LZ50 车轴钢旋转弯曲微动疲劳寿命呈现先降低而后升高的非线性特征, 这是多轴复杂应力、配合面的接触应力、微动摩擦应力以及微动磨损交互作用的结果。

**关键词:** 微动疲劳; 旋转弯曲; 车轴; 接触应力; 过盈配合

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.02.007

**中图分类号:** TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)02-0034-05

**Abstract:** LZ50 railway axle steel were carried out to study the effects of contact stress on rotating bending fretting fatigue life under different press fit contact stresses. Optical microscope (OM) and Scanning electron microscope (SEM) were used to analyze the press-fit fretting damage surfaces and fracture surfaces, respectively. The results show that the rotating bending fretting fatigue life of the LZ50 present a non-liner feature, decrease with the increase of contact stress firstly, and then increase. It is due to the combination of the complex multi-axial stress of sample, contact stress between contact interfaces, fretting friction stress and the interaction between fretting wear and fretting fatigue.

**Key words:** fretting fatigue; rotating bending; railway axle; contact stress; press-fit

车轴是关系列车安全运行的重要部件之一, 其疲劳可靠性直接决定了列车的服役安全性<sup>[1]</sup>。微动损伤在轮-轴过盈配面上不可避免, 而且是关键控制因素, 也正是由于微动损伤的存在使得车轴的可靠性设计很难达到理想状态。尽管有相当的文献对车轴的微动疲劳进行了报道和研究, 但是, 对车轴微动疲劳裂纹萌生和扩展的机理认识还不够清晰<sup>[2-4]</sup>。

普遍认为有 50 个以上的变量对微动疲劳有明显的影响, 但是只有六个变量起决定作用, 即: 接触应力、滑移幅值、摩擦因数、接触面切应力幅值、接触面疲劳应力幅值和疲劳载荷频率。显然, 上述影响因素在微动疲劳进程中并不是单独作用的, 它们的交互作用使得微动疲劳损伤机理变得复杂。Iyer 通过系统的实验和计算研究发现, 在上述的几个主要变量中只存在两

个独立变量, 即接触应力和疲劳应力幅值。对于探索微动疲劳损伤机理来说, 研究独立变量对微动疲劳寿命的影响尤为关键<sup>[5]</sup>。

接触应力微动疲劳寿命的影响已有一些研究, 主要认为: (1) 材料的微动疲劳寿命随接触应力的增加而降低, 普遍认为接触面上随接触应力增加的局部疲劳应力造成微动疲劳裂纹提早萌生和扩展, 导致寿命下降<sup>[6,7]</sup>。(2) 材料的微动疲劳寿命随接触应力的增加而增加; Benhamena 等<sup>[8]</sup>和 Chakherlou 等<sup>[9]</sup>的研究表明, 随着接触应力的增加, 疲劳裂纹的萌生位置和损伤机理均发生变化, 从而使得构件的微动疲劳寿命增加。(3) 材料的微动疲劳寿命随接触应力的增加呈现一个非线性变化, 在某一接触应力区存在一个最小值; Fernando 等认为随着接触应力的增加, 裂

纹张开难度增大,从而使得微动疲劳寿命增加<sup>[10]</sup>。(4)接触应力对微动疲劳寿命的作用受到环境等其他因素的影响<sup>[11]</sup>。上述研究结果存在许多矛盾和不一致,但是,需要注意的是,摩擦学系统本身是极具材料、环境、系统依赖性的。所以,针对不同的结构和运行环境,需要设计不同的实验进行研究。目前接触应力对车轴材料旋转弯曲微动疲劳寿命影响的报道很少。本工作选定 LZ50 车轴钢,对轮轴过盈配合的缩比试样进行了接触应力对微动寿命影响的实验研究。

1 实验材料和方法

实验材料选取 LZ50 车轴钢,与之过盈配合的模拟车轮材料为 CL60 车轮钢。表 1 分别是 LZ50 和 CL60 的力学性能。为了获得和车轴轮座表面实际服役相当的应力集中系数分布,本研究以 CRH2 车轴轮座的结构为模拟对象,确定了 1 : 20 的模拟比,实验轮-轴过盈配合的尺寸如图 1 所示。

表 1 LZ50 和 CL60 钢的主要力学性能

Table 1 The main mechanical properties of LZ50 and CL60 steel

Material	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	HV <sub>50g</sub>	E/GPa
LZ50	330	650	245	205
CL60	400	820	290	210

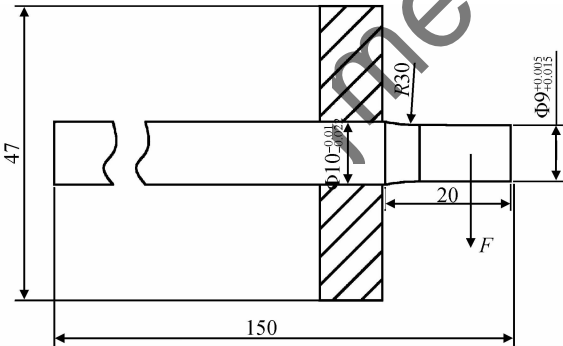


图 1 轮-轴过盈配合试样尺寸(mm)

Fig. 1 The size of hub-shaft interference fitted sample(mm)

实验轴过盈配合部位直径为 10mm,轮外径为 47mm。轮-轴过盈配合面粗糙度小于 1.6 $\mu$ m。本工作对加工完毕的轮-轴采用选配法装配,以减少装配对实验结果的影响,从而尽量获得和实际车轴服役情况相似的疲劳寿命分布。本工作选定三个接触应力来研究其对车轴材料过盈配合旋转弯曲微动疲劳寿命的影响,即:90,150,200MPa。利用重物对试样施加弯曲载

荷,范围为 96~220MPa(以轮座外侧计算)。设定试样的疲劳极限为 1 $\times$ 10<sup>7</sup>;轮-轴试样通过弹性夹持系统由电机在轴的末端带动以实现转动,实验速率为 1800r/min(即,对应车轴运行速率为 300km/h),利用一个从动轮来支撑试样轮。利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM,JOEL JSM 6610-LV 型)对过盈配合表面的微动损伤和疲劳断口进行分析。

2 实验结果和讨论

2.1 P-N 曲线

为了突出过盈量对 LZ50 车轴钢旋转弯曲微动疲劳寿命的影响,本研究在不同疲劳载荷水平下利用接触应力 P 和寿命分布得到了 LZ50 车轴钢的 P-N 曲线,如图 2 所示。由图 2 可见,LZ50 钢的旋转弯曲微动疲劳寿命随接触应力的增加呈现一个先降低而后增加的非线性特征。弯曲应力为 144MPa 时,当接触应力从 90MPa 增加到 150MPa 时,疲劳寿命下降至前者寿命的 50%左右;而当接触应力增加至 200MPa 时,试样的疲劳寿命几乎是 150MPa 时的 2 倍。

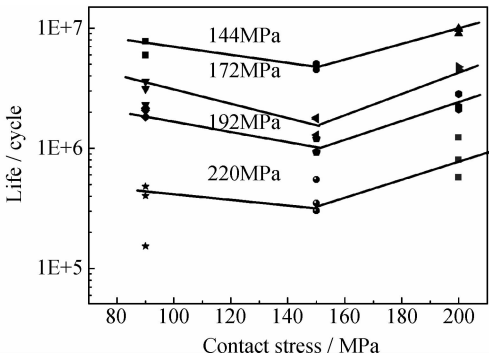


图 2 LZ50 车轴钢旋转弯曲微动疲劳 P-N 曲线

Fig. 2 The rotating bending fretting fatigue P-N curve of LZ50 axle steel

在疲劳载荷一定的情况下,接触应力直接控制了接触区的应力集中系数 K<sub>t</sub> 和滑移幅值  $\delta$ 。当接触应力增加时,由于接触导致的应力集中系数 K<sub>t</sub> 会随之上升,使得裂纹的萌生几率增加,从而有减小材料微动疲劳寿命的作用;但是,随着接触应力的上升,接触区的相对滑移幅值  $\delta$  将会下降,导致由微动磨损造成的损伤程度系数下降,而微动磨损程度的下降意味着微动疲劳裂纹数目的下降,从而导致疲劳寿命的增加。需要注意的是,研究发现对材料的微动疲劳寿命来说,存在一个寿命最小的滑移临界幅值<sup>[12]</sup>。可以肯定的是,上述两方面的因素对微动疲劳损伤的贡献是连

续的,故在疲劳载荷一定时,随着接触应力的增加,疲劳寿命势必会存在一个最小值,但是,由于过盈配合的分散性较大,本工作只选取了三个接触应力水平进行研究,不能确定 150MPa 是否是寿命最小值所对应的接触应力。

2.2 微动损伤分析

对于所有的实验试样,轴过盈配合表面几乎表现

出相同的损伤特征,如图 3 所示。在轴轮座靠近加载端(外侧)的接触区边缘的微动损伤均以微动磨损的形式出现,磨屑呈褐红色,EDX 能谱分析表明存在明显的氧峰;远离加载端的轮座接触区边缘(轮座内侧)为轴失效的断裂位置,由图 3 可知,轮座内侧的磨损程度和磨损面积远小于外侧,而且在不同疲劳载荷下,所有失效的试样断裂位置几乎一致。

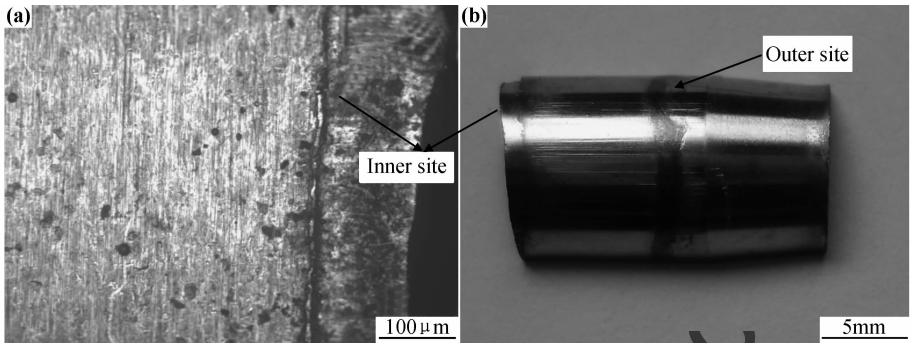


图 3 轴过盈配合面的损伤照片( $4.5\times10^6$  疲劳应力:144MPa;接触应力:150MPa)

(a)轮座内侧损伤 OM 照片;(b)轮座损伤数码照片

Fig. 3 The pictures of damaged interference fitted surface of shaft( $4.5\times10^6$  fatigue stress:144MPa;contact stress:150MPa)

(a)OM picture of the inner site of wheel seat;(b)digital photo of the wheel seat

图 4 为在疲劳应力为 144MPa 时,不同接触载荷试样轮座外侧的磨损形貌的 OM 照片。随着接触应力的增加,轮座外侧的磨损面积减小,磨损程度也有所减轻,结果显示,接触应力增加轮座外侧的滑移量  $\delta$  明显下降。需要注意到,当接触应力为 200MPa 时,轮座外侧的磨损区内发现了微动疲劳裂纹。在微动损伤进程中,疲劳裂纹和磨损始终处于相互竞争的状态,当磨

损量增加时,裂纹即使能够形核也会很快随着磨损被祛除;其次,由于微动磨损祛除材料以后相当于减小了接触区的过盈量,从而降低了由于接触应力导致的应力集中。由图 3 的结果不难理解轴均在轮座内侧断裂这一实验现象。同时,图 4(c)中发现的疲劳裂纹,说明在接触应力为 200MPa 时,轮座外侧的滑移量不足以祛除该区域的微动疲劳裂纹。

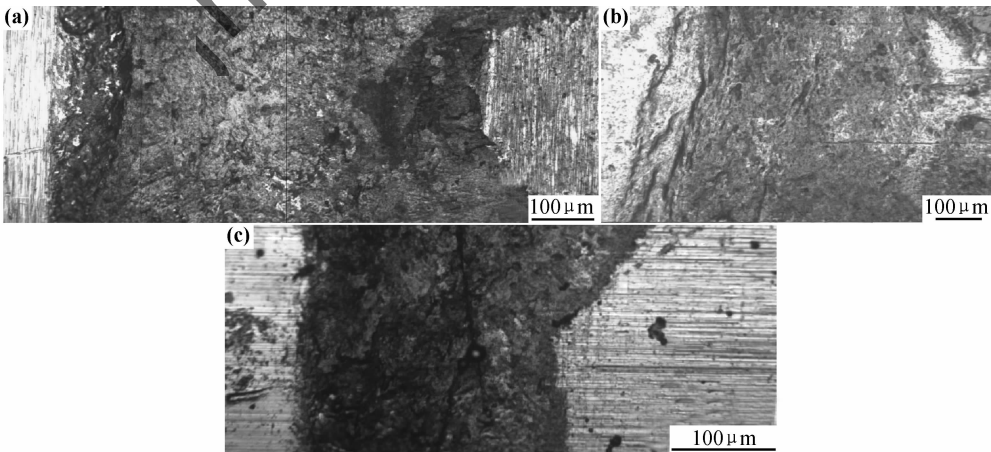


图 4 不同接触应力下轮座外侧微动磨损 OM 照片(疲劳应力:144 MPa)

(a)90MPa, $4.5\times10^6$ ;(b)150MPa, $5.897\times10^6$ ;(c)200MPa, $9.8\times10^6$

Fig. 4 The OM pictures of fretting wear on the outer site of wheel seat on different contact pressure(fatigue load:144MPa)

(a)90MPa, $4.5\times10^6$ ;(b)150MPa, $5.897\times10^6$ ;(c)200MPa, $9.8\times10^6$

### 2.3 断口分析

在同一疲劳载荷下,随着接触应力的增加疲劳断口表现出不同的特征,如图 5 所示。首先, LZ50 钢的旋转弯曲微动疲劳断口均表现出疲劳裂纹多源性的特征。对于普通高周旋转弯曲疲劳来说,裂纹源往往由材料表面的缺陷或夹杂形成,且呈现单源特征;但是在多轴应力、接触应力与微动损伤共同参与下,往往使接触区材料处于塑性状态,裂纹更易在接触区内形成,从而使旋转弯曲微动疲劳裂纹呈现多源特征。其次,断口表面均呈现不同程度的台阶状。断口的台阶是由于接触区内疲劳裂纹在不同位置上扩展所致,显然,微动疲劳裂纹的萌生位置在接触区内并不是固定的,而是随机的。此外,需要注意到各疲劳裂纹的扩展区相对于瞬断区呈非对称分布,这一现象说明各个微动疲劳裂纹并不是在同时产生,而且各自的扩展速度也可能不相同,另外有些裂纹在扩展阶段能够相互沟通,而少部分却不能相互沟通直至试样最后断裂。随着接触应力的增加,断口表面裂纹源数目发生变化,当接触应力为 150MPa 时裂纹源数目最多(如图 5(b)所示)。由于微动损伤和接触应力的作用,使得 LZ50 钢在接触区内处于多轴疲劳状态,而控制多轴疲劳裂纹萌生寿

命的主要变量为: $\Delta\gamma_{\max}$  为最大切应变幅值; $\Delta\epsilon_n$  为最大切应变平面的最大正应变幅值; $\sigma_{n,\max}$  为最大切应变平面的最大正应力,因此微动疲劳裂纹的形核由式(1)的关系确定。

$$N_{\text{initiation}} = f(\Delta\gamma_{\max}, \Delta\epsilon_n, \sigma_{n,\max}) \quad (1)$$

在疲劳载荷不变的情况下,随着接触应力的增加,接触区的应力、应变集中系数增加。但同时使得接触区的滑移难度增加(如图 4 所示),相当于使接触区的摩擦因数下降,从而有降低摩擦切应力的作用,当接触压力增加, $\sigma_{n,\max}$  会明显下降,也就是说,即使在微动损伤区内疲劳裂纹容易形核也很难扩展。在裂纹的初期扩展中较大的接触应力会对裂纹扩展起阻滞作用<sup>[13]</sup>。综上所述,随着接触应力的上升,控制疲劳裂纹萌生和初期扩展的几个关键变量将会呈现不同的变化趋势,它们在微动疲劳进程中复杂的交互作用使得 LZ50 钢的旋转弯曲微动疲劳寿命随接触应力的上升存在非线性的特征(见图 2)。另外,其他两个过盈应力下的试样断口较 150MPa 的断口更加平整(见图 5),说明在疲劳裂纹在接触应力为 150 MPa 状态下不易沟通,也就是说,各个疲劳裂纹在该工况下形核的轴向距离更远,疲劳裂纹在多个位置均可以萌生扩展。

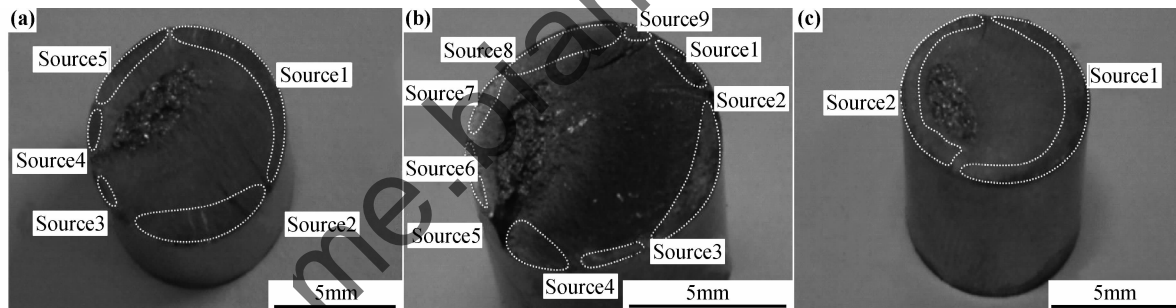


图 5 不同接触应力下断口的宏观形貌(疲劳应力:144MPa)

(a) 90MPa,  $4.5 \times 10^6$ ; (b) 150MPa,  $5.897 \times 10^6$ ; (c) 200MPa,  $9.8 \times 10^6$

Fig. 5 The macroscopic morphology of fracture surfaces on different contact pressure (fatigue load: 144MPa)

(a) 90MPa,  $4.5 \times 10^6$ ; (b) 150MPa,  $5.897 \times 10^6$ ; (c) 200MPa,  $9.8 \times 10^6$

Fernando 等<sup>[10]</sup>认为,在高接触应力作用下疲劳裂纹不易张开,导致疲劳裂纹扩展速率降低,从而增加了材料的微动疲劳寿命。断口上裂纹扩展留下的疲劳辉纹间距是衡量疲劳裂纹扩展速率的可靠依据,但是,在实验室环境下很难获得较理想的疲劳辉纹。大量的实验表明<sup>[14]</sup>,裂纹扩展区的表面粗糙度和裂纹扩展速率存在一定的线性关系,即断口表面粗糙度越高代表裂纹扩展速率越快。图 6 是在同一疲劳载荷下各接触应力工况下疲劳裂纹扩展区的 SEM 照片。显然在图 6(a)的立体感更强,可以说在该工况下的扩展区粗糙度最大。而在没有经过表面粗糙度检查的情

况下,很难定量获得图 6(b)和图 6(c)的粗糙度值。可以确定的是,在接触应力为 90MPa 的情况下,疲劳裂纹扩展速率大于其他两个工况。实验结果也在一定程度上证明了 Fernando 等的推断。显然,随着接触应力的增加,LZ50 钢的旋转弯曲微动疲劳裂纹扩展速率降低。

### 3 结论

(1)随着过盈量的增加,LZ50 车轴钢的旋转弯曲微动疲劳寿命呈现先下降后升高的非线性特征。

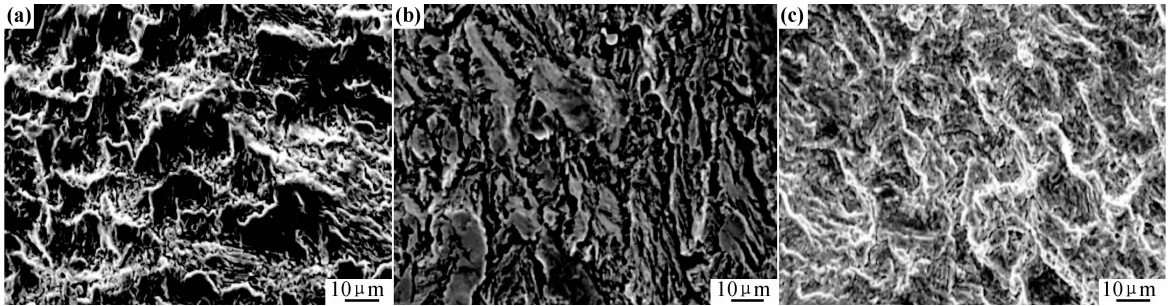


图 6 裂纹扩展区 SEM 形貌(疲劳应力:144MPa)

(a)90MPa,  $4.5 \times 10^6$ ; (b)150MPa,  $5.897 \times 10^6$ ; (c)200MPa,  $9.8 \times 10^6$

Fig. 6 SEM pictures of crack propagation area (fatigue load:144MPa)

(a)90MPa,  $4.5 \times 10^6$ ; (b)150MPa,  $5.897 \times 10^6$ ; (c)200MPa,  $9.8 \times 10^6$

(2)试样承受的多轴应力、接触应力、接触面的微动摩擦应力以及过盈面微动磨损间的复杂交互作用共同导致了这一实验现象。

#### 参考文献

- [1] 郑健峰, 罗军, 彭金方, 等. LZ50 车轴钢微动磨损特性研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 31—37.  
ZHENG Jian-feng, LUO Jun, PENG Jin-fang, et al. Characteristics of fretting wear of LZ50 steel[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4): 31—37.
- [2] 周仲荣, 朱旻昊. 复合微动磨损[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- [3] 沈明学, 彭金方, 郑建峰, 等. 微动疲劳研究进展[J]. 材料工程, 2010, (12): 86—90.  
SHEN Ming-xue, PENG Jin-fang, ZHENG Jian-feng, et al. Study and development of fretting fatigue[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, (12): 86—91.
- [4] UWE Z, STEFANO B. Failure and damage tolerance aspects of railway components[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(2): 534—542.
- [5] IYER K. Peak contact pressure, cyclic stress amplitudes, contact semi-width and slip amplitude: relative effects on fretting fatigue life[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(3): 193—206.
- [6] ENDO K, GOTO H. Initiation and propagation of fretting fatigue cracks[J]. Wear, 1976, 38(2): 311—318.
- [7] ADIBNAZARI S, HOEPPNER D W. A fretting fatigue normal pressure threshold concept [J]. Wear, 1993, 160(1—2): 33—35.
- [8] ALI B, ABDELWAHEB A, ABDERAHIM T, et al. Effect of contact forces on fretting fatigue behavior of bolted plates: Numerical and experimental analysis [J]. Tribology International, 2012, 48: 237—245.
- [9] CHAKHERLOU T N, ALYANDI-TABRIZI Y, KIANI A. On the fatigue behavior of cold expanded fastener holes subjected to bolt tightening [J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(6): 800—810.
- [10] FERNANDO U S, FARRAHI G H, BROWN M W. Fretting fatigue crack growth behavior of BS L45 4 percent copper aluminum alloy under constant normal load [A]. WATERHOUSE R B, LINDLEY T C. Fretting Fatigue, ESIS 18[C]. London: Mechanical Engineering Publications, 1994. 183—195.
- [11] IYER K, MALL S. Effect of cyclic frequency and contact pressure on fretting fatigue under two-level block loading[J]. Fatigue Fracture Eng Mater, 2000, 23(4): 335—346.
- [12] VINGSBO O, SÖDERBERG D. On fretting maps [J]. Wear, 1988, 126(2): 131—147.
- [13] NAKAZAWA K, MARUYAMA N, HANWAW T. Effect of contact pressure on fretting fatigue of austenitic stainless steel [J]. Tribology International, 2003, 36(2): 79—85.
- [14] MCEYILLY J A. Metal Failures Mechanisms, Analysis, Prevention[M]. UK: Wiley-inter Science, University of East Anglia, 2001. 204—206.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51025519); 教育部创新研究团队资助项目(IRT1178)

收稿日期: 2012-10-15; 修订日期: 2013-04-27

作者简介: 宋川(1987—), 男, 在读博士, 主要从事微动疲劳研究, 联系地址: 四川省成都市二环路北一段 111 号, 西南交通大学牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所(610031), E-mail: dc\_songchuan@163.com

通讯作者: 朱旻昊(1968—), 教授、博导, 主要从事微动磨损与疲劳、轮轨系统摩擦学研究, 联系地址: 四川省成都市二环路北一段 111 号, 西南交通大学牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所(610031), E-mail: zhuminhao@swjtu.cn