

文章编号:1000-582X(2010)08-109-05

# 桥梁结构用钢 16Mn 棘轮效应的塑性流动特性分析

向阳开<sup>1</sup>, 马艳兵<sup>1</sup>, 郑怡<sup>2</sup>, 周志祥<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 辽宁省建筑材料监督检验院, 辽宁 沈阳 110032)

**摘要:**结合桥梁结构中用钢 16Mn 钢在应力控制下的棘轮效应实验, 针对塑性模量  $H$ 、背应力率偏量与塑性流动方向之间夹角  $\theta$  等开展了塑性流动特征分析, 指出了单轴和多轴棘轮效应的不同影响机制, 即单轴棘轮效应的产生和演化决定于相对平均应力对称的正、反向加载点处的塑性模量的变化, 塑性模量在正向加载和反向加载时分别遵循着不同演化规律; 而多轴棘轮效应的产生和演化是  $H$  和  $\theta$  共同作用的结果, 棘轮效应的先前较大加载历史效应是先前较大加载历史对背应力率偏量与塑性流动方向之间夹角  $\theta$  的影响结果。

**关键词:**循环加载; 棘轮效应; 塑性流动特性

**中图分类号:** O341

**文献标志码:** A

## Analysis of plastic flow characteristics based on bridge steel 16Mn ratcheting

XIANG Yang-kai<sup>1</sup>, MA Yan-bing<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>2</sup>, ZHOU Zhi-xiang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;  
2. Liaoning Quality Supervision Test Institution for Construction Materials, Shenyang 110032, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** The analysis of the plastic flow characteristics on the basis of the ratcheting experimental results for the bridge steel 16Mn are carried out by calculating the plastic modulus  $H$  and the angle  $\theta$  between the backstress rate deviator and the plastic flow direction. The different mechanisms causing uniaxial and multiaxial non-proportional ratcheting are illustrated, that is, the starting and evolution of uniaxial ratcheting is due to the different values of the plastic modulus  $H$  at the symmetric loading points with respect to the mean stress. On the other hand, the starting and evolution of multiaxial non-proportional ratcheting is driven by  $H$  and  $\theta$  variations. The influence of loading history on ratcheting is the result of the influence of loading history on the angle  $\theta$ .

**Key words:** cyclic loading; ratcheting; plastic flow characteristic

随着对桥梁工程结构抵抗地震等自然灾害能力研究的深入, 人们不再仅仅只是关注材料的弹性力学性能及单调加载下的状况, 结构的抗震能力更多地体现在金属材料的延性和塑性变形能力等方面。事实上, 在地震力等非对称循环荷载的作用下, 工程结构中的金属材料将产生塑性应变循环累积, 即棘轮效应<sup>[1]</sup>。棘轮效应的大小及其演化特征不仅直接

关系到结构的吸能能力, 更关系到结构是否稳定或垮塌, 涉及到人民的生命和财产安全。因此, 建立能正确描述棘轮效应的本构关系, 也就成为了目前国内相关研究领域的热点之一<sup>[2-7]</sup>。

近年来, 本构关系的研究取得了很大进展, 也建立了一些本构模型<sup>[8-12]</sup>, 但由于目前描述棘轮效应的本构关系大都是通过对应变控制下的本构关系进

收稿日期: 2010-03-15

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(地方 02132)

作者简介: 向阳开(1964-), 男, 重庆交通大学副教授, 博士, 主要从事固体力学及桥梁结构力学性能分析方面的研究,  
(Tel)13752967938; (E-mail)xiangyangkai@163.com。

行试算和调整而来,并非建立在棘轮效应的产生和演化机理之上,因而不能很好地描述应力控制下的棘轮效应;同时,众所周知,材料不同、加载路径不同、加载历史不同,其棘轮效应特征都将不同,但现有本构关系所对应的材料大多还局限于一些特殊行业的特殊金属,相关的少量实验也局限在一些典型的加载路径上<sup>[13-17]</sup>。为研究桥梁结构中常用金属材料的棘轮效应本构关系,将开展 16Mn 钢的单轴和多轴棘轮效应实验,并从应力控制下的力学响应出发,开展针对这些实验的塑性流动特性分析。

## 1 实验

实验材料选用实际工程中常用的 16Mn 钢。实验项目分为单轴(比例)循环加载实验和多轴非比例循环加载实验两大类。

### 1.1 单轴循环加载实验( $\dot{\sigma}=200$ MPa/s)

1) 恒定应力幅值,不同平均应力水平

此时,恒定轴向循环应力幅值为 $\pm 400$  MPa,而平均应力根据大小不同分为 5 种工况,即 100 MPa(200c)  $\rightarrow$  150 MPa(100c)  $\rightarrow$  200 MPa(100c)  $\rightarrow$  150 MPa  $\rightarrow$  100 MPa(15c)。括号中数字表循环次数。其 $\sigma$ - $\epsilon$  滞回曲线如图 1 所示。

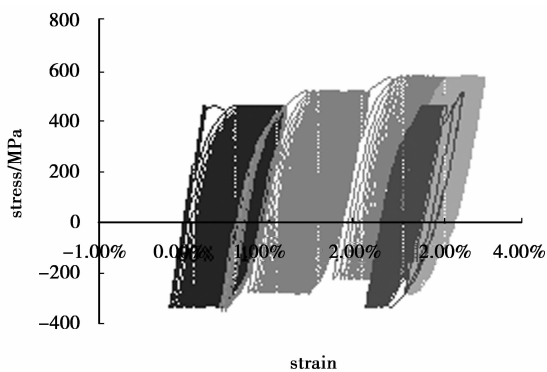


图 1  $\sigma$ - $\epsilon$  滞回曲线

2) 恒定平均应力大小,不同应力幅值

此时,恒定平均应力为 150 MPa,而应力幅值分为 5 种工况,即 $\pm 300$  MPa(100c)  $\rightarrow$   $\pm 350$  MPa(100c)  $\rightarrow$   $\pm 400$  MPa(100c)  $\rightarrow$   $\pm 350$  MPa(50c)  $\rightarrow$   $\pm 300$  MPa(50c)。其 $\sigma$ - $\epsilon$  滞回曲线如图 2 所示。

### 1.2 多轴循环加载实验( $\dot{\sigma}=200$ MPa/s)

加载路径为非比例度最大的椭圆形应力循环路径。此时,扭向为对称应力循环,等效应力幅值为 $\pm 200$  MPa(100c)  $\rightarrow$   $\pm 225$  MPa(50c)  $\rightarrow$   $\pm 200$  MPa(50c);而轴向平均应力为 40 MPa,轴向应力幅值的加载历史为 $\pm 400$  MPa(100c)  $\rightarrow$   $\pm 450$  MPa(50c)  $\rightarrow$   $\pm$

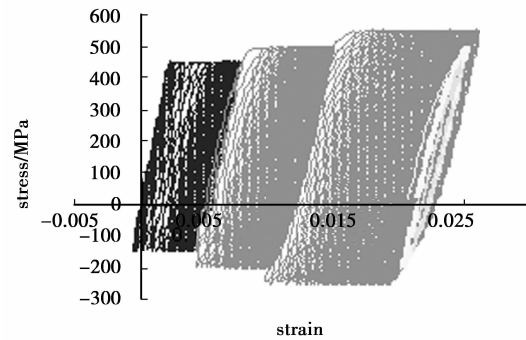


图 2  $\sigma$ - $\epsilon$  滞回曲线

400 MPa(50c)。即一一对应的轴向和扭向应力幅值分别组成了 3 种工况,图 3 为其  $F$ - $T$  的加载路径。

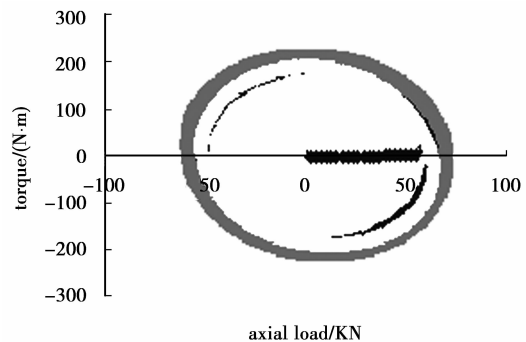


图 3 多轴循环加载实验  $F$ - $T$  的加载路径

## 2 塑性流动特性分析

由正交流动法则可得塑性模量如下

$$H = \frac{2[\dot{\epsilon}^p \cdot \sigma + \dot{\gamma}^p \cdot \tau]}{3[(\dot{\epsilon}^p)^2 + (\dot{\gamma}^p/\sqrt{3})^2]} \quad (1)$$

式中, $\dot{\sigma}$  和  $\dot{\epsilon}^p$  分别为轴向应力率和轴向塑性应变率, $\dot{\tau}$  和  $\dot{\gamma}^p$  分别为扭转剪切应力率和扭转剪切塑性应变率。

同时,背应力率偏量与塑性流动方向的夹角为

$$\cos\theta = \frac{d\alpha_{ij}n_{ij}}{(d\alpha_{kl}d\alpha_{kl})^{1/2}}, \quad (2)$$

$$n_{ij} = \frac{\dot{\epsilon}_{ij}^p}{(\dot{\epsilon}_{kl}^p\dot{\epsilon}_{kl}^p)^{1/2}} \quad (3)$$

式中, $d\alpha_{ij}$ ,  $n_{ij}$  分别为背应力率偏量和塑性流动方向。当循环达到饱和以后,不计等向强化的影响,则式(3)成为

$$\cos\theta = \frac{\dot{\sigma} \cdot \dot{\epsilon}^p + \dot{\tau} \cdot \dot{\gamma}^p}{\left[\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}^p)^2 + \frac{1}{2}(\dot{\gamma}^p)^2\right]^{1/2} \left[\frac{2}{3}(\dot{\sigma})^2 + 2(\dot{\tau})^2\right]^{1/2}} \quad (4)$$

### 2.1 单轴应力控制下的塑性流动特性分析

#### 1) 应力幅值恒定时不同平均应力大小的情形

为分析塑性模量  $H$  的演化情况,特取实验工况(2)时第 5 循环圈(此时棘轮变形较大且循环尚未饱和)的  $H-p$  关系曲线(见图 4),其中,累积塑性应变  $p$  均以当前加载方向的最大等效应力点作为累积零点。由图可见,随着塑性变形的增加,正向和反向加载的  $H$  均逐渐衰减,但它们的演化并不相同,其中,反向加载的  $H$  总是大于相应正向加载时的  $H$ 。

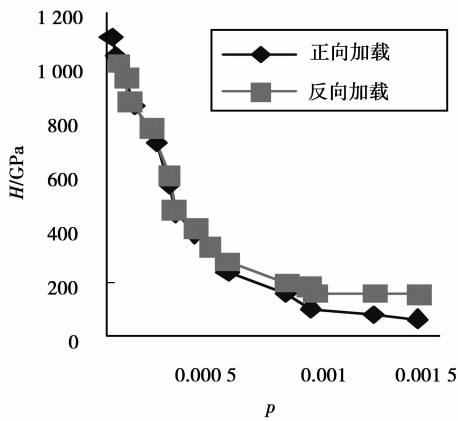


图 4  $H-p$  关系曲线

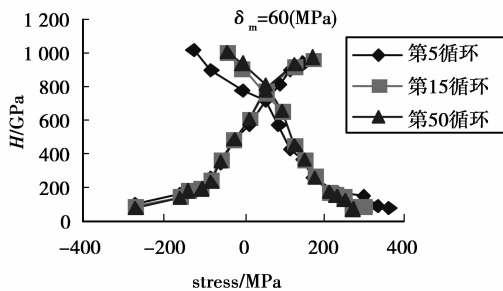


图 5  $H-\sigma$  曲线的演化规律

随着循环次数的增加,  $H-\sigma$  曲线的演化规律见图 5(此时平均应力为 60 MPa)。图中表明,随着循环次数的增加,正向和反向加载的  $H$  的对称性增加。由此说明,因为正、反两个加载点处的塑性模量的大小不同,导致了循环过程中各滞后环的不封闭,便产生了单轴棘轮效应;随着循环的进行,如果关于平均应力点对称的正、反两个加载点处的塑性模量逐渐接近相等(对称性增加),则致使滞后环趋于封闭,从而导致棘轮应变率  $\dot{\epsilon}_y$  的减小。

#### 2) 平均应力大且恒定时不同应力幅值的情形

为分析此时塑性模量  $H$  的演化情况,特取实验工况(3)时第 5 循环圈(此时棘轮变形较大且循环尚

未饱和)的  $H-p$  关系曲线(见图 6)。与图 4 类似,可以得出如下结论:16Mn 金属材料在单轴应力不对称循环作用下,正向和反向加载时的塑性模量遵循不同的演化规律。

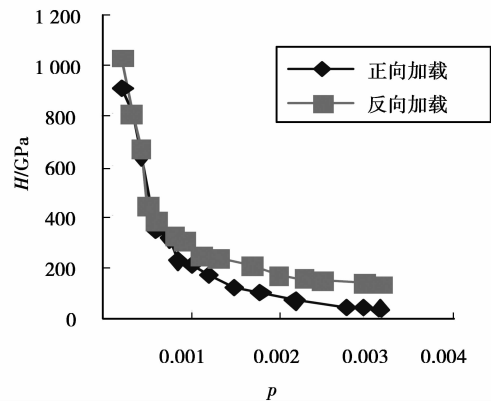


图 6  $H-p$  关系曲线

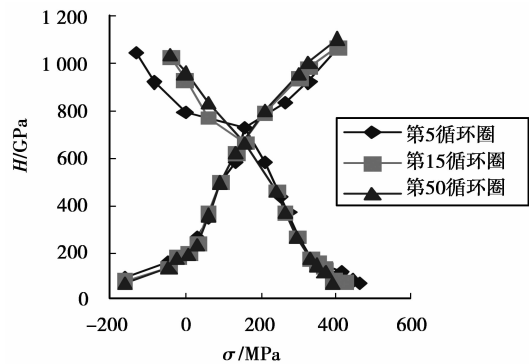


图 7  $H-\sigma$  曲线的演化规律

随着循环次数的增加,  $H-\sigma$  曲线的演化规律见图 7(此时平均应力为 150 MPa)。由此图可以得出与图 5 相类似的结论:即:在某一工况下,随着循环次数的增加,正向和反向加载的塑性模量  $H$  的对称性增加,导致棘轮应变率  $\dot{\epsilon}_y$  的减小,直至逐渐趋于饱和。

### 2.2 多轴应力控制下的塑性流动特性分析

对应于图 3 的应变关系曲线见图 8,在工况(1)时  $H$  与扭转剪应力  $\tau$  的关系曲线见图 9,选择的第 5、第 15 和第 50 三个循环圈可分别代表由非饱和到饱和的循环状态。由图 9 可见,在第 5 循环圈,虽然正向加载时的  $H$  和反向加载时的  $H$  并不对称于  $\tau=0$ ,但两者相差并不大;而对于第 15 循环圈和第 50 循环圈,其正向加载时的  $H$  和反向加载时的  $H$  是几乎对称于  $\tau=0$  的。由此说明,在此种应力路径历史下,随着循环次数的增加,直到最终趋于饱

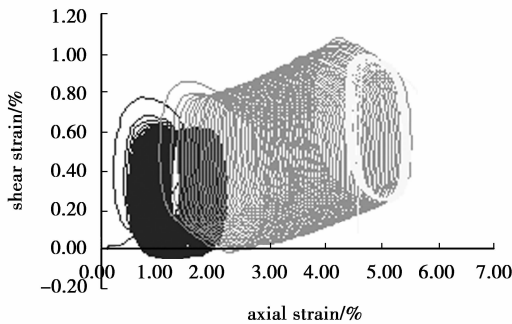
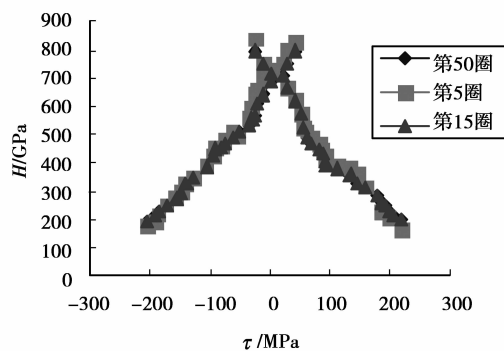


图 8 应变关系曲线

图 9  $H-\tau$  关系曲线

和,正、反向加载时的  $H$  关于  $\tau=0$  点的对称性不断增加,即塑性模量  $H$  也是导致多轴非比例棘轮效应的原因之一。但因在第 50 循环圈以后棘轮效应仍在持续稳定发展,说明在此种多轴非比例应力路径下,塑性模量  $H$  并不是唯一影响棘轮效应的因素且这种影响并不大。

根据正交流动法则<sup>[2]</sup>,可知

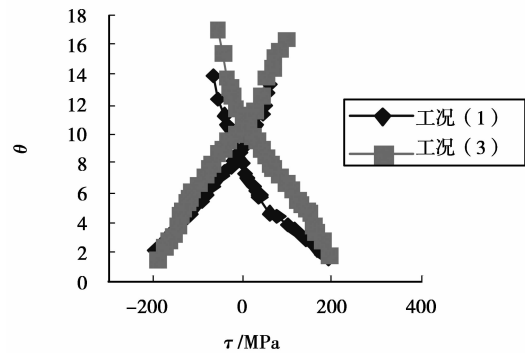
$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{H}(ds_{ij}n_{kl})n_{ij} \quad (5)$$

式中,()为 Macauley 括号。对于薄壁筒拉扭组合加载,当循环达到饱和以后,式(5)成为

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{(\cos\theta)}{H} \left( \frac{2}{3}d\sigma^2 + 2d\tau^2 \right)^{\frac{1}{2}} n_{ij} \quad (6)$$

由式(6)可知,在每一具体轴向平均应力下,且剪切对称循环的应力幅值恒定时,由于此时的  $H$  对棘轮效应的影响不大,故背应力率偏量与塑性流动方向之间夹角  $\theta$  的变化对  $d\epsilon_{ij}^p$  的大小起着决定性的作用。因正向加载的  $\theta$  小于与之对应的关于  $\tau=0$  对称的反向加载的  $\theta$  值,故两个加载方向所产生的塑性应变增量大小不同,其相互抵消的结果是在正向加载方向产生一个塑性应变的净增值。随着循环的进行,各净增值不断累积,便产生了在正向的棘轮效应。由此可知,在此种多轴非比例路径下, $\theta$  角是棘

轮效应产生和演化的主要影响因素。

图 10 工况(1)和工况(3) $\theta-\tau$  关系曲线比较

针对图 8 所示的棘轮效应,图 10 所示为实验的工况(1)和工况(3)在达到循环饱和时(第 30 圈)的  $\theta-\tau$  关系曲线。两种工况的应力路径和应力大小都是相同的,不同的是两者的先前加载历史,其中工况(3)具有先前较大的应力幅值循环历史,而工况(1)则没有。

从图可知,对于  $\theta$  关于  $\tau=0$  的对称性而言,工况(3)要比工况(1)好得多,而在工况(3)时几乎没有棘轮效应发生。由此可知,先前较大的应力幅值历史使得后继循环的  $\theta$  值趋于正、反向加载对称,导致棘轮效应遏止。也就是说,在多轴非比例路径下,先前较大应力幅值历史对棘轮效应的影响是由背应力率偏量与塑性流动方向之间夹角  $\theta$  的历史效应所引起的。

### 3 结 论

由以上塑性流动特性分析结果可以得到如下结论:

1)在单轴应力不对称循环情况下,塑性模量在正向加载和反向加载时分别遵循着不同演化规律,正是由于正、反两个加载点处的塑性模量大小不同,导致了在循环过程中各滞后环的不封闭,从而产生了单轴棘轮效应。

2)在多轴非比例应力循环情况下,棘轮效应及其历史效应主要决定于背应力率偏量与塑性流动方向之间夹角  $\theta$  的变化,塑性模量  $H$  的影响不大。

#### 参考文献:

- [1] CHEN XU, YU DE-HUA. A simple constitutive model for ratcheting evolution of 63Sn-37Pb solder under multiaxial loading [J]. Journal of Electronic Materials, 2006 (1), 35(1): L1-L4.
- [2] BYKOV D L, PELESHKO V A. Constitutive relations

- of strain, anisotropic degradation, and fracture of filled polymer materials in prevailing-tension processes with varying axis direction and relaxations[J]. *Mechanics of Solids*, 2009(10),44(5): 705-711.
- [3] 陈敬虞,龚晓南,邓亚虹. 基于内变量理论的岩土材料本构关系研究[J]. *浙江大学学报*, 2008, 35(3): 355-360.  
CHEN JING-YU, GONG XIAO-NAN, DENG YA-HONG. Research on the constitutive relation of geotechnicals based on the theory of internal variable[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2008, 35(3): 355-360.
- [4] GUZMÁN R, MELÉNDEZ J, ZÁHR J, et al. Determination of the Constitutive Relation Parameters of a Metallic Material by Measurement of Temperature Increment in Compressive Dynamic Tests [J]. *Experimental Mechanics*, 2010(3), 50: 399.
- [5] ABBAS LLGHMAN, NADER SHOKOUHI. Creep damage evaluation of thick-walled spheres using a long-term creep constitutive model[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009(10), 23(10): 2577-2582.
- [6] LEPIKHIN P. The construction of constitutive relations for isotropic strain-hardening elastoplastic materials of the differential type of complexity  $n$  Part 2 Infinitesimal strains [J]. *Strength of Materials*, 2009, 41(4): 363-376.
- [7] 向阳开,高庆,杨显杰,等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢多轴非比例棘轮行为及其影响因素研究[J]. *固体力学学报*, 2000(2):183-187.  
XIANG YANG-KAI, GAO QING, YANG XIAN-JIE, et al. Reseaches on 1Cr18Ni9Ti stainless steel non-proportional multiaxial ratcheting and its influencing factors[J]. *Journal of Solid Mechanics*, 2000(2): 183-187.
- [8] 高庆,林松,杨显杰. 丁基橡胶粘弹性材料的非线性蠕变本构描述[J]. *应用力学学报*, 2007, 24(3), 386-390.  
GAO QING, LIN SONG, YANG XIAN-JIE. Constitutive description in non-linearity creep of butyl rubber viscoelastic material [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2007, 24(3): 386-390.
- [9] KANG GUO-ZHENG, GAO QING, YANG XIAN-JIE. A visco-plastic constitutive model incorporated with cyclic hardening for uniaxial and multiaxial ratcheting of SS304 stainless steel at room temperature [J]. *Mech Mater*, 2002, 34(9): 521-531.
- [10] COLAK O U, KREML E. Modeling of uniaxial and biaxial ratcheting behavior of 1026 Carbon steel using the simplified Viscoplasticity Theory Based on Overstress (VBO) [J]. *Acta Mechanica*, 2003, 160(1-2): 27-44.
- [11] DROZDOV A D, DEC CHRISTIANSEN J. Creep failure of polypropylene: experiments and constitutive modeling[J]. *International Journal of Fracture*, 2009, 159(1): 63-79.
- [12] CHEN X, KIM K S. Modeling of ratcheting behavior under multiaxial cyclic loading [J], *Acta Mechanica*, 2003(6), 163(1-2): 9-23.
- [13] GRESHNOV V M, PUCHKOVA I V. Plasticity model for metals under cyclic large-strain loading [J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2010, 51(2): 280-287.
- [14] 刘宇杰,康国政,高庆,等. 循环软化下料单轴时相关循环变形行为的实验研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(3): 68-79.  
Experimental studies on axial time-dependent cyclic deformations of cyclic softening material at room temperature [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(3): 68-79.
- [15] MIZUNO M, MIMA Y, ABDEL-KARIM M, et al. Uniaxial Ratcheting of 316FR Steel at Room Temperature-Part I: Experiments [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2000, 122(1): 29-34.
- [16] KANG GUO-ZHENG, GAO QING, YANG XIAN-JIE, et al. An experimental study on uniaxial and multiaxial strain cyclic characteristics and ratcheting of 316L stainless steel [J]. *J Mater Sci & Tech*, 2001, 17(2): 219-223.
- [17] KANG GUO-ZHENG, GAO QING, YANG XIAN-JIE. Experimental study on the cyclic deformation and plastic flow of U71Mn rail steel [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, 44(8): 1645-1661.

(编辑 张小强)