

# C250 钢漏斗试样扭转低周疲劳研究

赵兴华<sup>1</sup>, 蔡力勋<sup>1</sup>, 江志华<sup>2</sup>, 包陈<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 力学与工程学院 应用力学与结构安全四川省重点实验室, 成都 610031; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 通过轴向循环拉压实验获得漏斗试样载荷-位移( $P-V$ )曲线,并基于该曲线和有限元反演分析方法获得了材料的循环本构关系。利用该循环本构关系对漏斗试样进行三维扭转有限元分析,获得漏斗根部剪切应力与扭矩之间的转换公式,及漏斗根部剪切应变与名义扭角之间的转换公式,实现了漏斗试样扭转低周疲劳的研究。应用该方法,完成了 C250 钢漏斗试样常温下一条曲线的扭转低周疲劳实验,揭示了 C250 钢的疲劳行为,并给出了该材料的 Manson-Coffin 寿命预测模型。

**关键词:** 扭转低周疲劳;应力应变转换公式;有限元反演计算;C250 钢漏斗试样;Manson-Coffin 模型

**doi:**10.11868/j.issn.1005-5053.2015.3.014

**中图分类号:** O348

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-5053(2015)03-0083-06

扭转疲劳问题广泛存在于汽车、火车轮轴,发动机曲轴及各种凸轮轴、齿轮轴等关键部件中,具有重要的工程应用背景。目前,对扭转疲劳的研究涉及面比较广泛,但多涉及高周应力疲劳<sup>[1-3]</sup>方向。刘昆鹏等<sup>[4]</sup>对 50CrVA 圆杆试样的高周扭转和断裂行为进行了试验研究,并分析了夹杂对疲劳寿命的影响;雒设计<sup>[5]</sup>和马桶楠<sup>[6]</sup>等分别对钻杆和航空发动机叶片的拉扭复合加载疲劳问题进行了研究;田玉杰等<sup>[7]</sup>则研究变幅加载下 TC21 钛合金的拉扭疲劳行为,并分析了其循环软化硬化特性;更有学者对微动磨损<sup>[8]</sup>的扭转疲劳问题进行分析和研究。然而单纯对低周疲劳<sup>[9,10]</sup>的研究相对较少,传统扭转低周疲劳可以通过对等直试样施加循环扭应变完成,根据平面假设和 Mises 等效原理,扭转的循环应力应变可以直接转换到轴向循环的应力应变,但等直试样的扭转试验仍存在若干问题,比如等直试样细长比较大,要达到足够的应变需要扭过很大的角度,这样不仅大大降低了加载频率,也容易影响应变控制下引伸计的夹持性;另外,等直试样容易出现断点不唯一的问题,而断点的不唯一可能包含多个方面的原因,如

材料分散性、加工精度等。

C250 钢具有很高的强度和较好的延性,被广泛应用于冷冲模、精密模具、水翼船支架等民用领域及飞机起落架、各种轴类零件、铀浓缩用离心分离机的旋转桶、导弹壳体、火箭发动机壳体等领域<sup>[11,12]</sup>。此类构件承受扭转疲劳或弯扭疲劳而破坏,因此材料疲劳性能的研究对安全设计十分必要。本文提出采用漏斗试样进行扭转低周疲劳研究,发展出相应的低周疲劳分析方法,并用以实现 C250 钢的常温扭转低周疲劳试验与分析。

## 1 试验设备与条件

试验材料为 C250 马氏体时效钢,其主要化学成分见表 1。试验采用如图 1 所示的直径为 7mm 的等直圆棒试样,经热处理后加工成型。试验等效应变幅比  $R = -1$ ,试验温度 20℃,在 MTS809(250kN/2000N·m)电液伺服材料试验机上完成,传感器为 0.5 级精度。试验中所采用 MTS632.68F 拉扭引伸计,标距为  $L = 25\text{mm}$ ,该引伸计在出厂时采用了半径  $R = 12.5\text{mm}$  的圆棒标准试样进行了扭应变标定,而被测试样测量位置半径为  $a = 6\text{mm}$ ,需要对剪切应变进行转换,其中转角间的关系式如下,

$$\varphi_2 = \frac{R}{a}\varphi_1 = \frac{12.5}{6}\varphi_1 \quad (1)$$

式中: $\varphi_1$  为名义扭转角(引伸计实测值); $\varphi_2$  为试样标距内的真实转角。

收稿日期:2014-10-24;修订日期:2015-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(11202174);国家自然科学基金项目(11472228)

通讯作者:蔡力勋(1959—),男,教授,主要从事材料破坏与结构安全研究,(E-mail)lix\_cai@263.net。

表1 C250钢的主要化学成分  
Table 1 Chemical composition of C250 steel

C	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Mn	P	Cu	V	S	Fe
0.01	17.69	7.89	4.97	0.47	0.054	0.03	0.027	0.02	0.007	0.006	Bal.

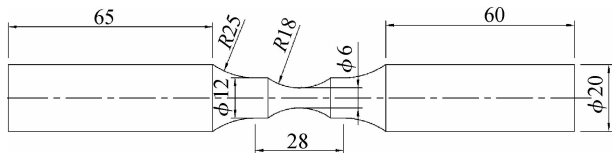


图1 扭转试样尺寸  
Fig. 1 Dimension of torsional specimen

## 2 获取材料循环本构关系

### 2.1 漏斗试样轴向受力状态的有限元分析

建立如图2所示的1/2轴对称平面模型,单元采用plane183。图3是C250钢的三条常温单轴本构曲线,本文选择两条较接近的2#或3#作为初始本构关系输入有限元,然后对模型进行轴向加载,获得漏斗根部等效应变与名义应变(标距内的平均应变)的关系(图4)。根据图4所示的换算关系,每一个漏斗根部的等效应变对应一个名义应变,即控制应变,如此便可以实现试验中对漏斗根部应变幅的精确控制。

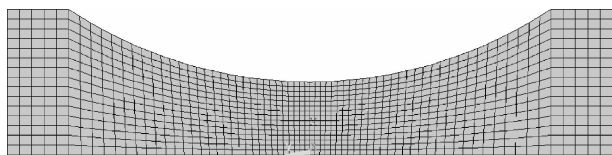


图2 漏斗试样的有限元平面模型  
Fig. 2 Finite element plane model of funnel sample

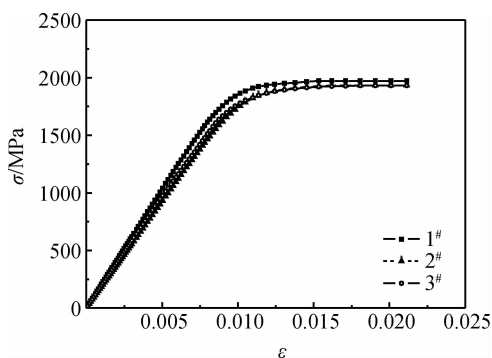


图3 C250钢常温单轴应力-应变( $\sigma$ - $\varepsilon$ )关系  
Fig. 3 Uniaxial stress-strain relationship of C250 steel at room temperature

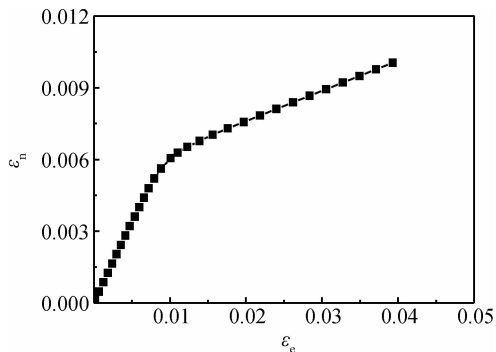


图4 名义应变  $\varepsilon_n$  与漏斗根部等效应变  $\varepsilon_e$  转换关系  
Fig. 4 Transition relation between funnel root equivalent strain and nominal strain

### 2.2 试验获取材料循环 $\Delta P/2$ - $\Delta V/2$ 曲线

根据图4中的对应关系,本研究利用漏斗试样通过单试样法获取材料循环稳定状态下的  $P$ - $V$  曲线。首先对试样进行一次大应变幅的拉压循环,使材料达到稳定状态,然后应变幅由最小到大逐级进行循环加载,直到接近首次最大加载应变幅为止。如此便可得到峰谷值  $P$ - $V$  曲线,进一步可以得到  $\Delta P/2$ - $\Delta V/2$  曲线(图5)。

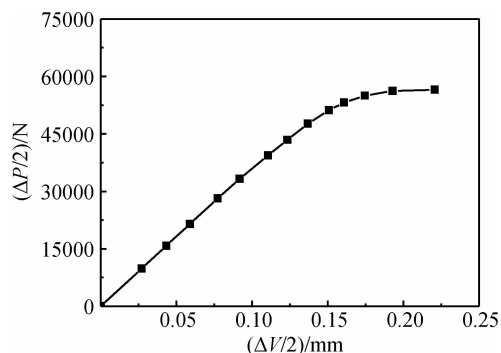


图5 轴向循环下的载荷幅值与位移幅值关系  
Fig. 5 The relationship between load amplitude and displacement amplitude of axial cyclic

### 2.3 通过反演方法获取材料循环本构关系

建立如图2相同的有限元模型,以单拉应力应变关系为初始本构关系,给定合适的加载位移,一次加载计算后可以获得漏斗根部应力-应变关系曲线及标距内位移与轴向载荷曲线即  $P$ - $V$  曲线,将  $P$ - $V$  曲线于原始  $\Delta P/2$ - $\Delta V/2$  曲线对比,

如果不重合再次进行上述操作,如此往复直至得到的  $P-V$  曲线与原始  $\Delta P/2-\Delta V/2$  曲线重合为止,最后输出的应力应变关系就是所求的循环本构关系。

图 6 是迭代所得  $P-V$  曲线与原始  $\Delta P/2-\Delta V/2$  曲线对比图,由图知,到第 3 次迭代时  $P-V$  曲线与原始  $\Delta P/2-\Delta V/2$  曲线已经非常重合,此时输入的本够关系(第二次修正的本构关系)即为所求循环本够关系,图 7 是应力应变关系与单轴应力应变关系对比图。

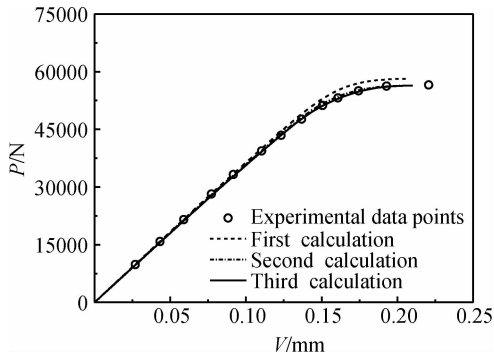


图 6 反演计算的  $P-V$  曲线与原曲线对比

Fig. 6 Calculated  $P-V$  curves compared with the original curve

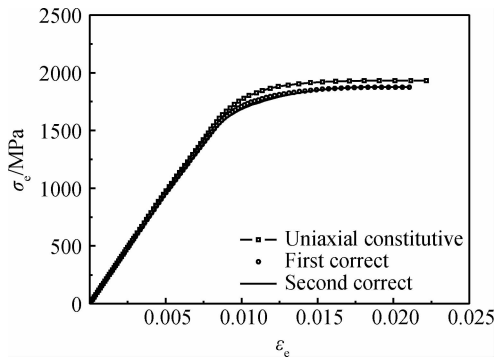


图 7 本构关系迭代过程

Fig. 7 The iterative process of constitutive relation

### 3 漏斗试样弹塑性扭转变形下的转换关系

如图 8 所示,选用 Solid186 单元建立三维实体模型并进行网格划分,为了避免加载时过大的应力集中,采用无质量刚性梁对模型进行加载,其过程是首先在截面外侧轴线上建立一个节点 P,然后通过 MPC184 单元与圆柱一端截面上的所有节点建立刚性梁单元,这样只需在控制节点上施加荷载便可使模型受到较均匀的扭矩。边界条件采用的是一端全约束,一端自由的方式,但对节点施加了柱坐标系下

的轴向与径向约束。

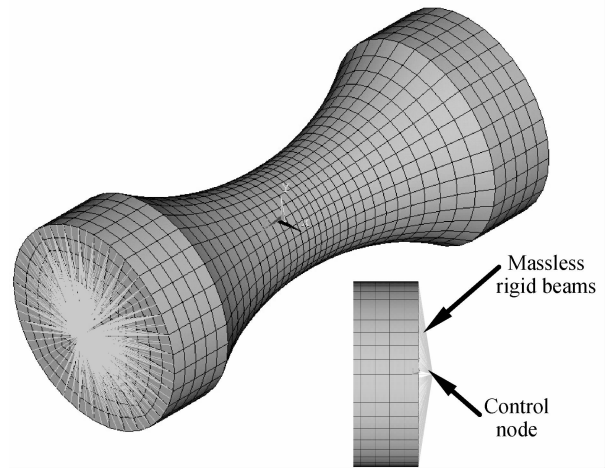


图 8 漏斗试样的三维有限元模型

Fig. 8 3D Finite element model of funnel sample

通过漏斗扭转的弹塑性有限元计算,可以得到图 9 所示的标距 25mm 范围内名义扭转角与漏斗根部剪切应变之间的关系曲线,其表达式可用式(2)表示,

$$\gamma = f(\phi_1) = c_1\phi_1 + c_2\phi_1^2 + c_3\phi_1^3 \quad (2)$$

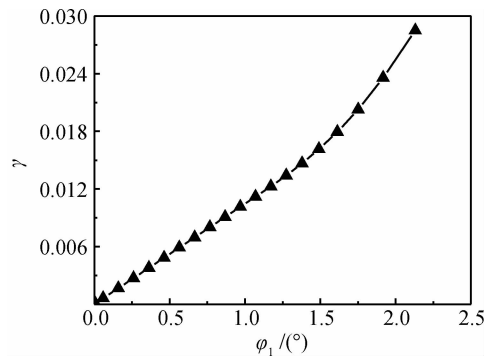


图 9 漏斗根部等剪切应变与名义扭转角关系

Fig. 9 The relationship between shear strain and angle

式中, $\gamma$  为剪切应变, $\phi_1$  为名义扭转角(引伸计测量值),表达式系数  $c_1 = 1.2115 \times 10^{-3}$ ,  $c_2 = -4.0274 \times 10^{-3}$ ,  $c_3 = 2.1418 \times 10^{-2}$ 。图 10 是漏斗根部剪切应变与漏斗根部等效应变之间的关系曲线,其表达式如式(3),

$$\varepsilon_e = f(\gamma) = d_1\gamma + d_2\gamma^2 \quad (3)$$

式中, $\varepsilon_e$  为等效应变,表达式系数  $d_1 = 0.68755$ ,  $d_2 = -2.0137$ 。由(2)式和(3)式可进一步得到等效应变与名义扭转角之间的关系,

$$\varepsilon_e = f(\phi_1) \quad (4)$$

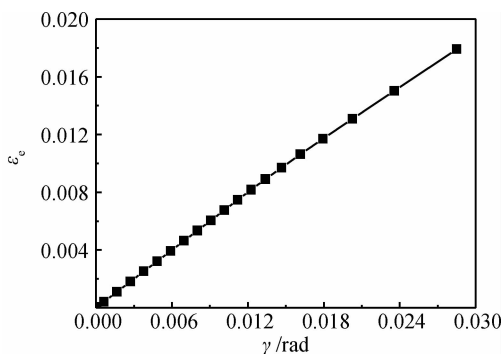


图10 漏斗根部等效应变与剪切应变的关系

Fig. 10 The relationship between equivalent strain and shear strain

利用该关系式便可实现漏斗试样扭转低周疲劳试验的应变控制。同理,由图11可以获得扭矩与漏斗根部剪切应力之间的关系式,

$$\tau = f(T) = k_1 T + k_2 T^2 + k_3 T^3 + k_4 T^4 \quad (5)$$

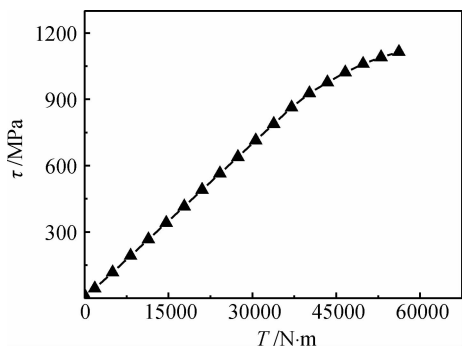


图11 漏斗根部剪切应力与扭矩的关系

Fig. 11 The relationship between shear stress and torque

式中, $T$ 为扭矩,表达式系数 $k_1 = 2.2184 \times 10^{-2}$ , $k_2 = 9.0985 \times 10^{-8}$ , $k_3 = -8.1967 \times 10^{-13}$ , $k_4 = 2.6749 \times 10^{-17}$ 。图12是剪切应力与等效应力之间的关系图,由图易见两者呈式(6)所示的线性关系,

$$\sigma_e = f(\tau) = m\tau \quad (6)$$

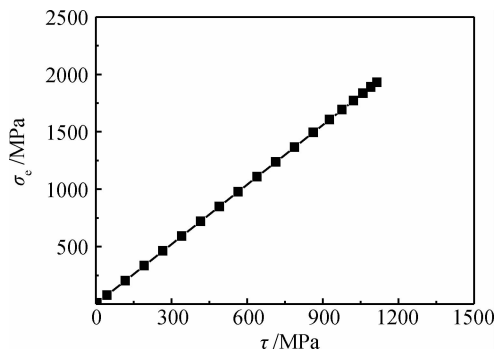


图12 漏斗根部等效应力与剪切应力的关系

Fig. 12 The relationship between equivalent stress and shear stress

式中: $\sigma_e$ 为等效应力,系数 $m = 1.7322$ 。根据以上转换关系式,可以获得漏斗根部任意力学参量,实现对漏斗试样扭转低周疲劳的研究。

## 4 试验结果

图13是漏斗试样与高温150℃等直试样扭转低周疲劳等效应变-疲劳寿命曲线的对比图,由图知两种试样构型的等效应变与倍寿命都有很好的幂律关系,但两者并不重合,这是因为漏斗试样由于存在应力集中,扭转时漏斗根部单元不再是单纯的纯剪切应力状态;其次,两者的试验温度不同,等直试样是150度高温下进行的。

图14是常温漏斗试样低周疲劳剪切应力幅与循环分数的关系,由图知,当应变幅大于 $8000 \mu\epsilon$ 材料呈现明显的循环软化特性,这与图7中的循环应力-应变关系与单轴应力-应变关系的对比结果相一致。图15是剪切应力-剪切应变的滞回线,由于塑性应变所占比重较小,因此滞回环不饱满。

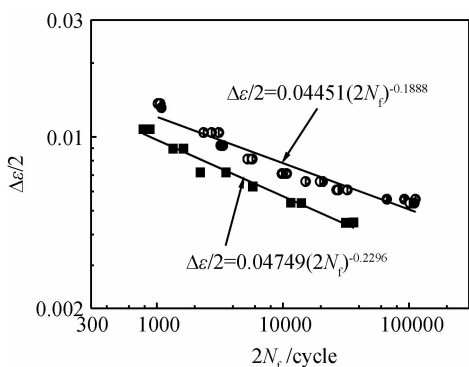


图13 漏斗根部等效应变幅与倍寿命的关系

Fig. 13 The relationship between equivalent strain amplitude and double cycles

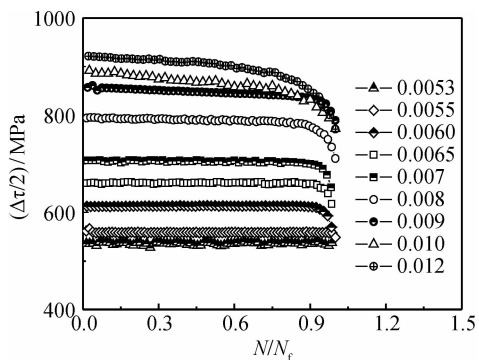


图14 动态循环剪切应力幅

Fig. 14 Dynamic cyclic shear stress amplitude

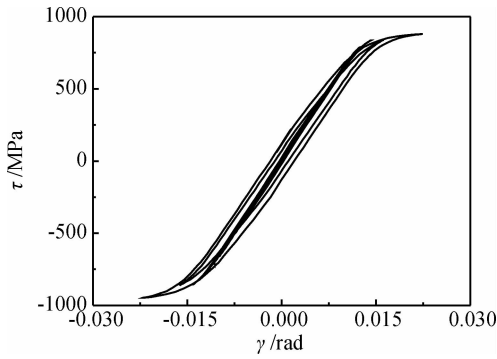


图 15 不同应变幅下的滞回线

Fig. 15 Hysteresis loop under different strain amplitude

在轴向拉压疲劳中,材料的循环行为可以用 Manson-Coffin 模型描述。同样, Manson-Coffin 公式也适用于扭转疲劳,式(7)是扭转应变疲劳下的 Manson-Coffin 模型,

$$\frac{\Delta\gamma}{2} = \frac{\Delta\gamma_e}{2} + \frac{\Delta\gamma_p}{2} = \frac{\tau'_f}{G}(2N_f)^b + \gamma'_f(2N_f)^c \quad (7)$$

式中:  $\tau'_f$  是剪切疲劳强度系数;  $b$  是剪切疲劳强度指数;  $\gamma'_f$  是剪切疲劳延性系数;  $c$  是剪切疲劳延性指数;  $N_f$  是失效循环次数。根据剪切应变的弹、塑性分解方法,式(7)可以分解为,

$$\frac{\Delta\tau}{2} = \tau'_f(2N_f)^b \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\gamma_p}{2} = \gamma'_f(2N_f)^c \quad (9)$$

图 16 是剪切应力幅与倍寿命关系曲线,其很好的满足式(8)中的幂函数形式,其具体表达式如图中所示;图 17 是塑性剪切应变幅与倍寿命之间的关系曲线,因为 C250 钢强度很高,低周疲劳中塑性应变在总应变中的比重比较小,所以当总剪切应变与倍循环次数的幂律关系有一些分散性时,在塑性剪切应变中就会被放大,呈现出两段式,这两段可以分别用式(9)表示。

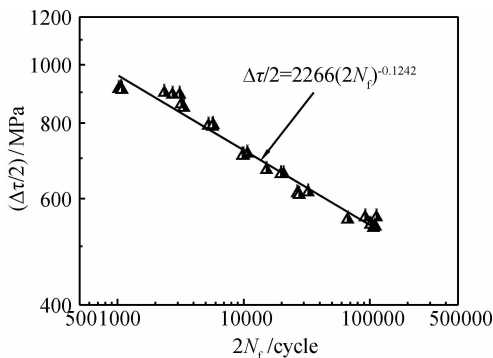


图 16 剪切应力幅与倍循环次数关系

Fig. 16 The relationship between equivalent stress and double cycles

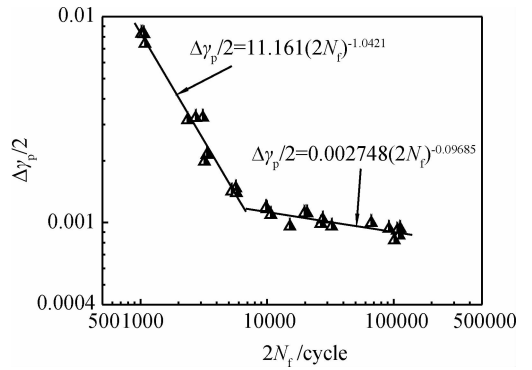


图 17 塑性剪切应变幅与倍循环次数关系

Fig. 17 The relationship between equivalent stress and double cycles

## 5 结论

(1) 基于漏斗试样轴向载荷-位移曲线,通过有限元反演获得了材料的循环本构关系,并利用该循环本构获得了漏斗试样根部剪切应力和剪切应变的转换关系,实现了漏斗试样扭转低周疲劳问题的研究,很好解决了等直试样存在的问题。

(2) 漏斗试样扭转低周疲劳的等效应变幅-倍寿命曲线与传统等直试样不一致,这是由试样构型差异导致的;由于 C250 钢强度很高,无明显强化阶段,试样扭转低周疲劳试验过程中弹性变形占较大比重,所以该材料的低周扭转疲劳滞回线不饱满。

(3) 通过试验发现 C250 钢的低周疲劳呈循环软化现象,材料的剪切应变幅与倍寿命满足 Manson-Coffin 寿命预测模型,而塑性剪切应变幅与倍寿命则分两段才能由 Manson-Coffin 公式描述。

## 参考文献:

[1] DAVOLI P, BERNASCONI A, FILIPPINI M, *et al.* Independence of the torsional fatigue limit upon a mean shear stress[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(6): 471 - 480.

[2] 包陈, 蔡力勋, 钟斌. 两种合金钢的高温扭转疲劳性能[J]. *材料研究学报*, 2007, 21(增刊): 1 - 5. (BAO C, CAI L X, ZHONG B. Torsional fatigue properties of two alloy steels at elevated temperature[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2007, 21(Suppl.): 2 - 5.)

[3] 金磊, 夏慧琴. 扭转疲劳试验的探索性研究[J]. *材料工程*, 1997(6): 34 - 35. (JIN L, XIA H Q. Exploring research on torsional fatigue properties in stainless steel, aluminum alloy and structural steel[J]. *Journal of Materials Engineering*, 1997(6): 34

- 35.)
- [4] 刘昆鹏, 有移亮, 张珊, 等. 50CrVA 扭杆断裂原因分析[J]. 材料工程, 2010(8): 5-7.  
(LIU K P, YOU Y L, ZHANG S, *et al.* Fracture Analysis of 50CrVA Torsion Bar[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(8): 5-7.)
- [5] 锥设计, 赵康, 王荣. S135 钻杆钢的拉扭复合加载疲劳行为[J]. 材料工程, 2013(1): 40-44.  
(LUO S J, ZHAO K, WANG R, *et al.* Biaxial fatigue behavior under combined axial and torsional loading for S135 drill pipe steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(1): 40-44.)
- [6] 马楠楠, 陶春虎, 何玉怀, 等. 航空发动机叶片多轴疲劳试验研究进展[J]. 航空材料学报, 2012(6): 44-49.  
(MA N N, TAO C H, HE Y H, *et al.* Research progress of multi-axial fatigue test methods on blades of aviation engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, 32(6): 44-49.)
- [7] 田玉杰, 尚德广, 陈宏, 等. 单多轴变幅加载下 TC21 钛合金疲劳特性[J]. 航空材料学报, 2013, 33(2): 74-80.  
(TIAN Y J, SHANG D G, CHEN H, *et al.* Fatigue properties of TC21 Ti-alloy under uniaxial and multi-axial cyclic variable amplitude loading[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(2): 74-80.)
- [8] 沈明学, 彭金方, 郑健峰, 等. 微动疲劳研究进展[J]. 材料工程, 2010, 12: 86-91.  
(SHEN M X, PENG J F, ZHENG J F, *et al.* Study and development of fretting fatigue[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 12: 86-91.)
- [9] 赵廷仕, 刘敦康, 纪惠君. 35 钢低周扭转应变疲劳的研究[J]. 金属学报, 1987, 32(2): 156-157.  
(ZHAO T S, LIU D K, JI H J. Low cycle fatigue of steel 35 under torsional strain[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1987, 23(2): 156-157.)
- [10] DAUNYS M, ČESNAVIČIUS R. Investigation of low cycle asymmetric torsion[J]. Mechanika, 2010, 6(86): 5-10.
- [11] DECKER R F, FLOREEN S. Maraging steels-the first 30 years[J]. Maraging Steels: Recent Developments and Applications, 1988: 1-38.
- [12] 姜越, 尹钟大, 朱景川, 等. 超高强度马氏体时效钢的发展[J]. 特殊钢, 2004, 25(2): 1-5.  
(JIANG Y, YIN Z D, ZHU J C, *et al.* Development of ultra-high strength maraging steel[J]. Special Steel, 2004, 25(2): 1-5.)
- [13] 孙永健, 程琴, 唐雪艳. 变工况下汽轮机转子热应力分析及低周疲劳寿命计算[J]. 机械工程学报, 2013, 3(2): 28-36.  
(SUN Y J, CHENG Q, TANG X Y. Analysis of thermal stress and calculation of low-cycle fatigue life for a steam turbine under variable operating conditions[J]. Journal of Mechanic Engineering, 2013, 3(2): 28-36.)
- [14] BROWN M W, MILLER K J. High temperature low cycle biaxial fatigue of two steels[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1979, 1(2): 217-229.
- [15] 钟斌, 何玉怀, 苏彬. 1Cr11Ni2W2MoV 和 16Ni3CrMoE 两种钢的高温扭转疲劳性能研究[J]. 机械强度, 2004(增刊): 169-171.  
(ZHONG B, HE Y H, SU B. High temperature torque fatigue properties of 1Cr11Ni2W2MoV and 16Ni3CrMoE[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(Suppl): 169-171.)

## Torsional Low-cycle Fatigue of C250 Steel by Using Funnel Specimen

ZHAO Xing-hua<sup>1</sup>, CAI Li-xun<sup>1</sup>, JIANG Zhi-hua<sup>2</sup>, BAO Chen<sup>1</sup>

(1. Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Load-displacement ( $P$ - $V$ ) curve has been obtained of funnel specimen based on cyclic uniaxial tension and compression experiment. Based on the test results and finite element analysis iterative method, the effective cyclic constitutive relationships of C250 steel have been obtained. By using these effective cyclic constitutive relationships, 3D finite element analyses of funnel specimen under torsion are used to reveal the transforming relationship between the torque and the shear stress at the root of funnel specimen, the relationship between the nominal torsional angle and the shear strain at the root of funnel specimen. On the basis of those analyzing method, the low cycle fatigue study under torsion has been achieved. A series of torsional fatigue tests on C250 steel at room temperature by using funnel specimens have been carried out, the low cycle fatigue behavior of C250 steel has been revealed, and the typical Manson-Coffin model is employed to predict the torsional fatigue life of C250 steel.

**Key words:** torsional low-cycle fatigue; transforming relationship between stress and strain; inverse finite element analysis; funnel specimen of C250 steel; Manson-Coffin model