

# SS304 不锈钢在室温单轴循环加载下的 时相关棘轮行为\*

康国政 孙亚芳 张娟 阚前华  
(西南交通大学应用力学与工程系, 成都 610031)

**摘要** 对 SS304 不锈钢在室温单轴循环加载下的时相关棘轮行为和时相关应变循环特性进行了实验研究. 讨论了材料在不同加载速率、不同保持时间和不同加载波形下的循环软 / 硬化行为和棘轮行为特征. 结果表明: 即使在室温下, SS304 不锈钢也表现出明显的时相关效应; 材料的循环变形行为, 特别是棘轮行为明显地依赖于加载速率和保持时间以及加载波形的形状. 研究得到了一些有助于时相关循环变形行为本构描述的结论.

**关键词** SS304 不锈钢, 时相关, 棘轮行为, 循环塑性

**中图法分类号** TG146.1, O344.1 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2005)03-0277-05

## TIME-DEPENDENT RATCHETING BEHAVIOR OF SS304 STAINLESS STEEL UNDER UNIAXIAL CYCLIC LOADING AT ROOM TEMPERATURE

KANG Guozheng, SUN Yafang, ZHANG Juan, KAN Qianhua

Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Correspondent: KANG Guozheng, professor, Tel: (028)66889387, Fax: (028)87600797,

E-mail: guozhengkang@yahoo.com.cn or kangguo7630\_cn@sina.com

Supported by the Applied Basic Research Foundation of Sichuan Province (No.03JY029-062-2)

Manuscript received 2004-05-18, in revised form 2004-11-12

**ABSTRACT** The uniaxial time-dependent strain cyclic characteristics and ratcheting behavior of SS304 stainless steel were studied by cyclic loading experiments at room temperature. The effects of strain and stress rates, hold time and loading chart on cyclic softening/hardening feature and ratcheting were discussed. It is shown that the SS304 stainless steel presents remarkable time-dependent characteristics even at room temperature, the cyclic deformation behaviors, especially for ratcheting, depend significantly on strain and stress rates, holding time and loading charts. Some significant conclusions are obtained, which is useful to establish a constitutive model describing the time-dependent cyclic deformation of the material.

**KEY WORDS** SS304 stainless steel, time dependence, ratcheting, cyclic plasticity

金属材料在非对称应力循环载荷作用下将会产生一种称之为棘轮效应 (ratcheting) 的塑性变形循环累积现象. 棘轮行为对承受非对称应力循环加载的工程结构的安全性和寿命评价是非常重要的, 目前已引起人们的广泛重视, 并已在室温和高温下对不同材料, 如不锈钢和普通碳钢以及轨道钢等进行了单轴和非比例多轴棘轮行为实验研究<sup>[1-10]</sup>, 同时在实验研究的基础上发展和建立了一些能够较为合理地描述棘轮行为的本构模型<sup>[11-20]</sup>. 然

而, 已有的研究都是在单一的加载速率和加载波形下进行的, 没有讨论加载速率和加载波形的变化对棘轮行为的影响, 并且都没有涉及具有一定保持时间下变形特征的研究, 已有的本构模型不能很好地描述时相关的循环变形行为. 考虑加载速率、加载波形和保持时间的变化对其变形行为的影响将更符合工程实际, 因此, 有必要对材料的时相关循环行为进行系统的研究, 建立合理的本构模型.

作为时相关循环变形行为本构描述的前期研究, 本工作对 SS304 不锈钢的室温单轴时相关应变循环特性和棘轮行为进行了系统的实验研究, 重点讨论单轴循环棘轮行为与加载速率、加载波形和保持时间之间的关系, 揭示材料循环棘轮行为的时相关效应, 为建立时相关循环本构模型提供了实验基础.

\* 四川省应用基础基金项目 03JY029-062-2 和西南交通大学校基础研究基金项目 2003XJB15 资助

收到初稿日期: 2004-05-18, 收到修改稿日期: 2004-11-12

作者简介: 康国政, 男, 1969 年生, 教授, 博士

### 1 实验方法

实验材料为 SS304 不锈钢, 其化学成分 (质量分数, %) 为: C 0.03, Ni 9.8, Cr 18.0, Mn 1.7, P<0.05, S<0.05. 将不锈钢棒热锻后经 1150 °C 保温 60 min 后水冷, 即固溶处理后加工成中心标距段的直径为 10 mm 的实心圆棒试样. 实验在 MTS 809-250 kN 电液伺服控制试验机上进行, 通过 Teststar 试验控制系统对整个实验过程进行闭环控制数据采集, 应变由标距为 15 mm 的拉伸引伸仪进行测量. 本文中,  $\epsilon_r$  代表棘轮应变, 并将其定义为:  $\epsilon_r = (\epsilon_{max} + \epsilon_{min})/2$ . 其中,  $\epsilon_{max}$  和  $\epsilon_{min}$  分别为一个循环周次中最大和最小的轴向应变.

为了讨论不同加载波形对材料循环变形行为的影响, 在单轴应变循环特性和棘轮行为的研究中, 本文采用图 1 所示的 3 种具有不同保持时间的加载波形, 图中  $\sigma$

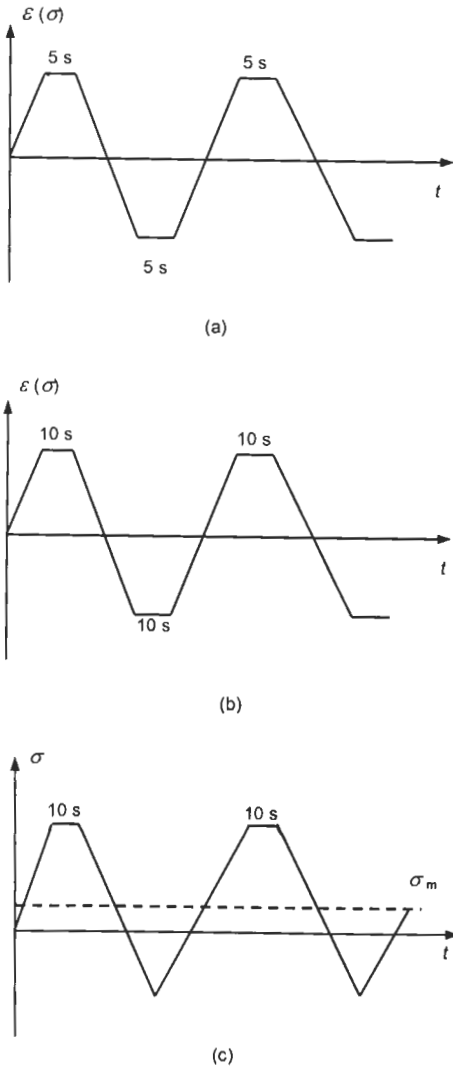


图 1 具有不同保持时间的加载波形示意图

Fig.1 Schematic diagrams of the three kinds of loading charts with different holding times ( $\sigma_m$  in Fig.1c to be mean tensile stress)  
 (a) holding time of 5 s at the peak/valley  
 (b) holding time of 10 s at the peak/valley  
 (c) holding time of 10 s at the peak only

和  $\epsilon$  分别为轴向应力和应变,  $t$  为加载时间. 图中同时给出了应力和应变控制循环时的加载波形, 但值得注意的是: 对于应力控制循环, 其加载波形对于时间轴  $t$  来说是不对称的, 应具有一定的平均拉伸应力  $\sigma_m$ . 这是因为已有的研究 [1-10] 表明, 棘轮行为只能出现在具有非零平均应力的、非对称应力循环中.

### 2 实验结果与讨论

图 2 给出了 SS304 不锈钢在室温下应变速率  $\dot{\epsilon}$  分别为  $2 \times 10^{-4}$  和  $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的单调拉伸应力-应变 ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) 曲线. 由图可见, 即使在室温条件下, 该材料也表现出明显的时相关效应, 屈服极限和流动应力随加载速率的降低显著下降.

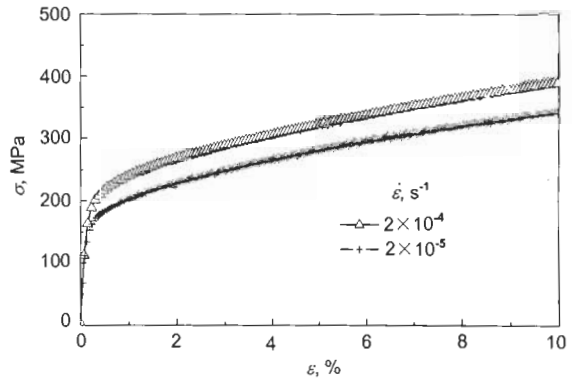


图 2 不同应变速率时的单调拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Monotonic tensile stress-strain ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) curves with different straining rates for the stainless steel SS304

#### 2.1 时相关应变循环特性

在恒定应变幅值 (0.5%) 下, 对 SS304 不锈钢材料进行了不同应变加载速率  $\dot{\epsilon}$  分别为  $2 \times 10^{-3}$ ,  $2 \times 10^{-4}$  和  $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  下的单轴对称应变循环实验, 结果如图 3 所示.

由图可见: (1) 在 3 种应变加载速率下, 材料均体现出明显的循环硬化特性, 并具有相同的演化规律. 其循环硬化速率均随循环周次的增加较快下降, 大约在经过 20 周循环后即达到循环稳定状态. 此后, 响应应力幅值几乎不再随循环周次增加而增大. 当然, 这只是针对本实验讨论的、相对较小的应变幅值 (即 0.5%). 因为已有的研究 [21] 表明, SS304 不锈钢在相对较大的应变幅值 (如 1%, 2% 和 3% 等) 下具有不饱和的循环硬化特性, 即响应应力幅值将随循环周次的增加不断地增大, 直至材料破坏. (2) 由于不同加载速率下, 材料的屈服极限和流动应力有明显变化 (如图 2 所示), 因此随应变速率的降低, 对称应变循环中的响应应力幅值将整体下降.

在恒定应变幅值 (0.5%) 和应变加载速率 ( $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) 下, 对 SS304 不锈钢材料进行了如图 1a, b 所

示的、在峰值处均具有不同保持时间的单轴对称应变循环实验，实验结果见图 4。

由图可见，具有保持时间的应变循环中，响应应力幅值明显低于没有保持时间的响应应力幅值，且随保持时间的增加进一步下降。这是由于在保持过程中产生了应力松弛的缘故。这表明材料在室温下也具有明显的粘性效应，

可以预见应力幅值将随保持时间的增加而进一步下降。

### 2.2 时相关棘轮行为

首先，在恒定平均应力和应力幅值 ( $78 \pm 234$ ) MPa) 下，讨论 SS304 不锈钢在不同应力速率 ( $\dot{\sigma} = 65, 13, 2.6$  MPa/s) 时的单轴循环棘轮行为，实验结果如图 5 所示。

由图可以看出：(1) 在 3 种应力速率下，材料具有

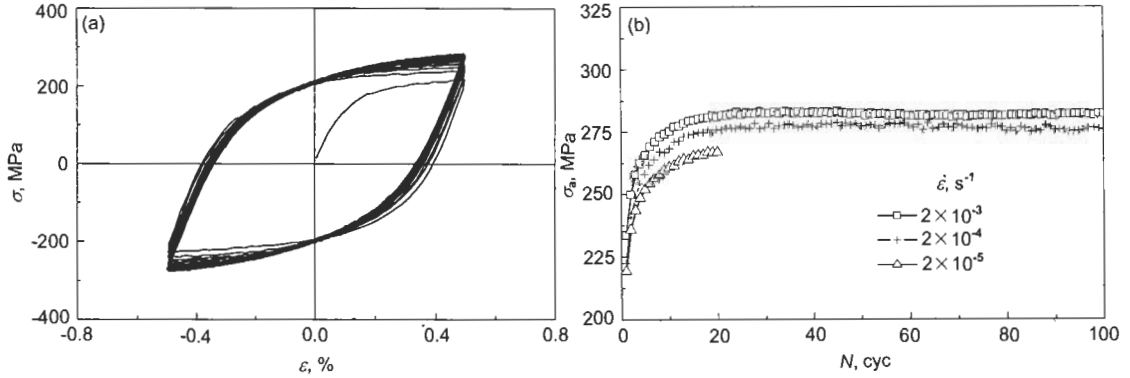


图 3 不同应变速率下的单轴应变循环结果

Fig.3 Results of uniaxial strain cycling at strain amplitude 0.5%

(a) stress-strain ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) curve at  $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

(b) curves of stress amplitude ( $\sigma_a$ ) vs cyclic number ( $N$ ) at different strain rates  $\dot{\epsilon}$

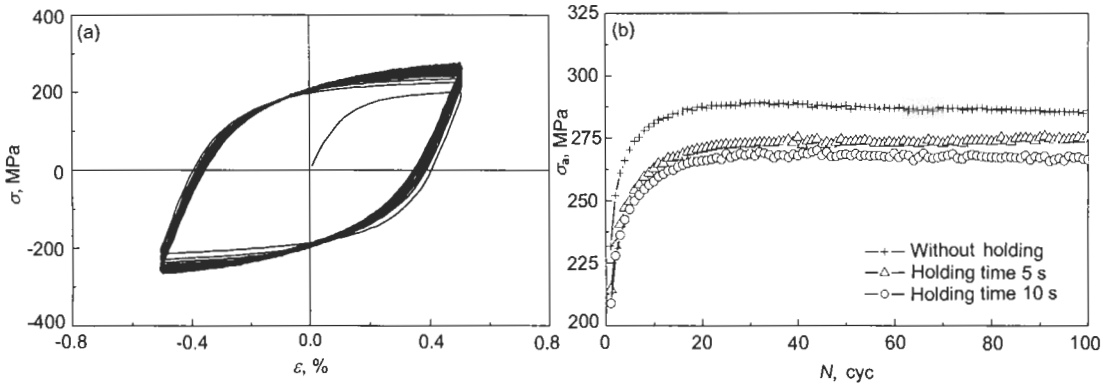


图 4 不同保持时间下的单轴应变循环结果

Fig.4 Results of uniaxial strain cycling at strain amplitude 0.5% and loading rate  $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

(a) stress-strain ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) curve for holding time 10 s

(b) curves of stress amplitude ( $\sigma_a$ ) vs cyclic number ( $N$ ) at different holding times

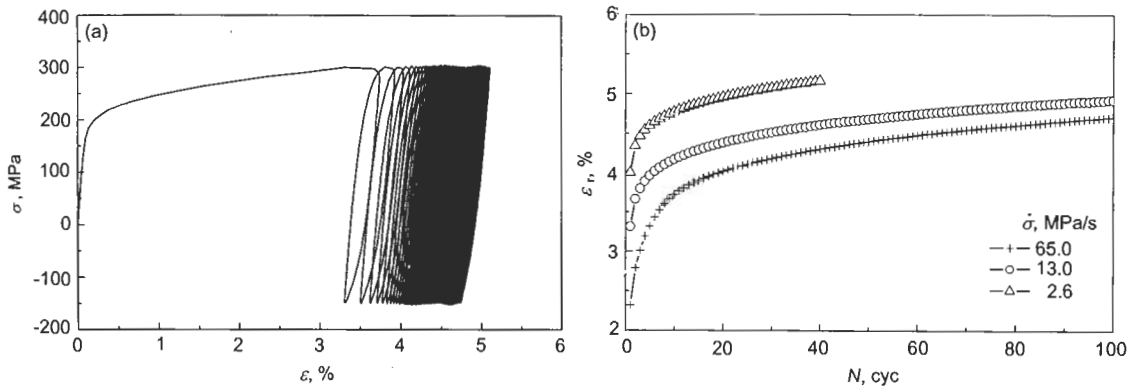


图 5 不同应力速率下的单轴棘轮效应结果

Fig.5 Results of ratcheting at mean stress 78 MPa and stress amplitude 234 MPa

(a) stress-strain ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) curve at  $\dot{\sigma} = 13.0 \text{ MPa/s}$

(b) curves of ratcheting strain ( $\epsilon_r$ ) vs cyclic number ( $N$ ) at different stress rates  $\dot{\sigma}$

相同的棘轮演化规律, 棘轮应变随循环周次的增加而增大, 棘轮应变速率 (每一加载循环周次下棘轮应变的增量) 随循环周次的增加而逐渐下降. 这与已有的、固定加载速率的棘轮行为实验研究结果<sup>[1-10]</sup>完全相同. 但是, 在应力加载速率较低时, 在实验讨论的循环周次 (100 周) 范围内没有出现棘轮行为的安定现象. (2) 更有意义的是, 加载速率的变化将对棘轮行为产生显著的影响, 随应力加载速率的降低, 产生的棘轮应变明显增加. 这表明 SS304 不锈钢的室温棘轮行为也具有明显的时 (率) 相关效应, 蠕变变形和循环塑性应变的累积导致了材料在较低加载速率下具有较大的棘轮应变 (在本文的棘轮应变定义中, 蠕变应变和累积塑性应变均包含在棘轮应变中).

另外, 通过在较低应力加载速率 (2.6 MPa/s) 下棘轮行为的平均应力历史效应和应力幅值历史效应的实验研究表明, 与已有的、常规应力加载速率 ( $\dot{\sigma}=50-100$  MPa/s) 下的结果<sup>[7-10]</sup>一样, 棘轮行为不仅取决于当前的应力幅值和平均应力大小, 而且还明显依赖于不同的加载历史, 先前较高应力水平的应力循环将抑制后续较小应力水平的应力循环下棘轮应变的产生.

其次, 在恒定平均应力和应力幅值 ((78±234) MPa) 以及应力速率 ( $\dot{\sigma}=2.6$  MPa/s) 下, 讨论 SS304 不锈钢

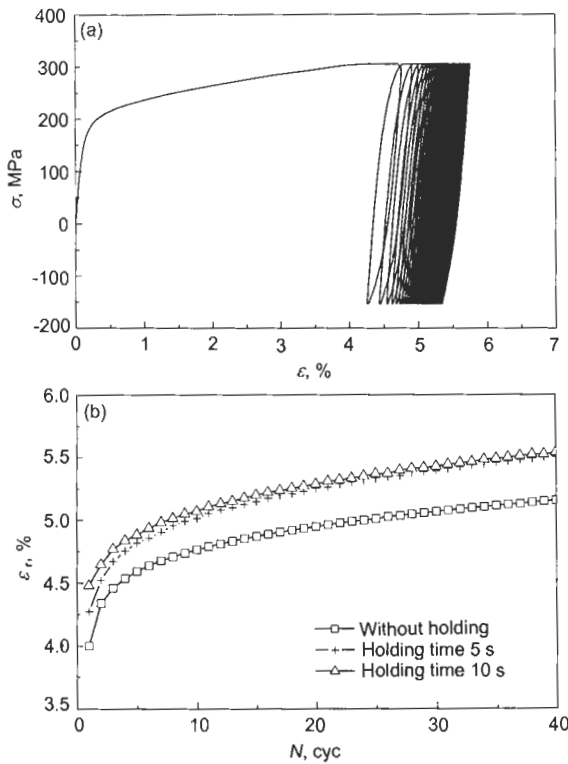


图 6 不同保持时间下的单轴棘轮结果

Fig.6 Results of uniaxial ratcheting at mean stress 78 MPa, stress amplitude 234 MPa and stress rate  $\dot{\sigma}=2.6$  MPa/s  
(a) stress-strain ( $\sigma-\epsilon$ ) curve for holding time 10 s  
(b) curves of ratcheting strain ( $\epsilon_r$ ) vs cyclic number ( $N$ ) at different holding times

在图 1a, b 所示的 2 种在应力峰值处具有不同保持时间的单轴循环棘轮行为, 实验结果如图 6 所示.

由图可见, 保持时间的存在对材料的棘轮行为有明显的影响, 应力保持下产生的蠕变变形使得材料在具有保持时间下的棘轮应变明显增大, 并且随保持时间的增加, 棘轮应变将进一步增加.

最后, 在恒定的平均应力和应力幅值 (78±234) MPa) 以及应力速率 ( $\dot{\sigma}=13$  MPa/s) 下, 讨论了 SS304 不锈钢在图 1c 所示的、仅在应力峰值 (最大拉应力) 处具有一定保持时间 (10 s) 的单轴循环棘轮行为, 实验结果如图 7 所示. 通过与图 1b 所示的最大拉、压应力处均有保持时间的实验结果比较可知 (见图 7), 仅在最大拉应力处保持一定时间所产生的棘轮应变要明显大于在峰值处均保持同样时间的棘轮应变. 这是由于在此时采用的加载波形 (见图 1c) 下, 避免了在最大压应力保持时产生的、反方向的蠕变应变对总棘轮应变影响的缘故. 由此可见不同的加载波形也对材料的时相关棘轮行为产生显著的影响.

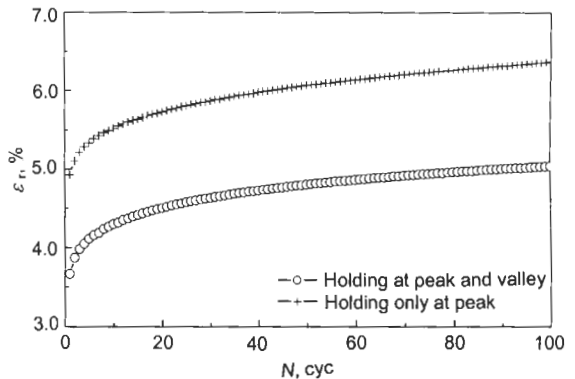


图 7 不同加载波形下的单轴棘轮应变与循环周次的关系曲线  
Fig.7 Curves of ratcheting strain ( $\epsilon_r$ ) vs cyclic number ( $N$ ) at mean stress 78 MPa, stress amplitude 234 MPa, stress rate  $\dot{\sigma}=13.0$  MPa/s and under various loading charts

通过上述实验研究可见, SS304 不锈钢在室温下也具有明显的时相关效应. 在探讨建立时相关循环棘轮本构关系时, 必须考虑蠕变变形与循环塑性应变累积间的交互作用, 必须将蠕变应变从统一的棘轮应变中分离出来.

### 3 结论

(1) 在不同加载速率和不同保持时间下, 材料均体现明显的循环硬化特性, 但其循环硬化的程度有明显的差别. 随加载速率的降低和保持时间的增加, 材料的循环硬化程度下降, 整体的响应应力幅值减小.

(2) 同样, 不同加载速率和不同保持时间对 SS304 不锈钢棘轮行为的演化规律也没有太大影响, 但产生的棘轮应变值不一样. 随加载速率的降低和保持时间的增加以及去除最大压应力处的保持后, 产生的棘轮应变显著增大.

上述效应都是较低加载速率和较长保持时间下产生的较大蠕变变形的缘故,在对时相关棘轮行为进行本构描述时,必须考虑蠕变和循环塑性累积间的交互作用。

### 参考文献

- [1] Chaboche J L, Nouailhas D. *ASME J Eng Mater Technol*, 1989; 111: 384
- [2] Ruggles M D, Krempl E. *J Mech Phys Solids*, 1990; 38: 575
- [3] Delobelle P, Robinet P, Bocher L. *Int J Plast*, 1995; 11: 295
- [4] McDowell D L. *Int J Plast*, 1995; 11: 397
- [5] Kobayashi M, Ohno N, Igari T. *Int J Plast*, 1998; 14: 355
- [6] Mizuno M, Mima Y, Abdel-Karim M, Ohno N. *ASME J Eng Mater Technol*, 2000; 122: 29
- [7] Kang G Z, Gao Q, Cai L X, Yang X J, Sun Y F. *Acta Metall Sin*, 2000; 36: 497  
(康国政, 高庆, 蔡力勋, 杨显杰, 孙亚芳. 金属学报, 2000; 35: 497)
- [8] Kang G Z, Gao Q, Yang X J, Sun Y F. *J Mater Sci Technol*, 2001; 17: 219
- [9] Kang G Z, Gao Q, Cai L X, Sun Y F. *Nucl Eng Des*, 2002; 216: 13
- [10] Kang G Z, Gao Q, Yang X J. *Int J Mech Sci*, 2002; 44: 1645
- [11] Chaboche J L. *Int J Plast*, 1991; 7: 661
- [12] Delobelle P. *Int J Plast*, 1993; 9: 65
- [13] Ohno N, Wang J D. *Int J Plast*, 1993; 9: 375
- [14] Yoshida F. *Eur J Mech A-Solids*, 1995; 14: 97
- [15] Jiang Y, Sehitoglu H. *ASME J Appl Mech*, 1996; 63: 720
- [16] Ohno N, Abdel-Karim M. *ASME J Eng Mater Technol*, 2000; 122: 35
- [17] Bari S, Hassan T. *Int J Plast*, 2002; 18: 873
- [18] Kang G Z, Gao Q, Yang X J. *Mech Mater*, 2002; 34: 521
- [19] Gao Q, Kang G Z, Yang X J. *Theor Appl Fract Mech*, 2003; 40: 105
- [20] Kang G Z. *Mech Mater*, 2004; 36: 299
- [21] Kang G Z, Ohno N, Nebu A. *Int J Plast*, 2003; 19: 1801