

SS304 不锈钢高温非比例多轴加载下时相关 循环变形行为的实验研究 *

阚前华 康国政 张娟 刘宇杰

(西南交通大学应用力学与工程系, 成都 610031)

摘要 在 973 K 下, 对 SS304 不锈钢多轴循环加载下的时相关应变循环特性和时相关棘轮行为进行了实验研究. 揭示了材料在不同加载路径、不同加载速率以及不同保持时间下的循环软 / 硬化特性和棘轮变形行为. 结果表明: 在高温下, 材料的循环软 / 硬化和棘轮变形均体现出明显的时相关效应, 即其循环变形行为不仅强烈依赖于加载速率, 而且还明显依赖于保持时间; 另外, 材料的变形行为在高温下也具有强烈的加载路径依赖性. 研究得到了一些有助于后续建立时相关本构模型的结论.

关键词 SS304 不锈钢, 非比例, 时相关, 棘轮效应

中图法分类号 O344.1, TG146.1 文献标识码 A 文章编号 0412-1961(2005)09-0963-06

EXPERIMENTAL STUDY ON NON-PROPORTIONALLY MULTIAXIAL TIME-DEPENDENT CYCLIC DEFORMATIONS OF SS304 STAINLESS STEEL AT HIGH TEMPERATURE

KAN Qianhua, KANG Guozheng, ZHANG Juan, LIU Yujie

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

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

E-mail: guozhengkang@yahoo.com.cn or kangguo7630_cn@sina.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.10402037)

Manuscript received 2005-01-10, in revised form 2005-05-08

ABSTRACT The time-dependent strain cyclic characteristics and ratcheting behavior of SS304 stainless steel were studied by experiments under non-proportionally multiaxial cyclic loading and at 973 K. The effects of loading path, straining/stressing rate and holding-time at peak/valley of each cycle on cyclic softening/hardening behavior and ratcheting were discussed. It is shown from experimental results that the cyclic softening/hardening behavior and ratcheting of the material are characterized by apparent time-dependence, i.e., the cyclic deformation behaviors depend not only greatly on loading rate, but also apparently on holding-time, besides, the ratcheting behavior of the material also presents a great dependence on loading path at high temperature. Some results obtained are helpful to construct a time-dependent constitutive model of ratcheting.

KEY WORDS SS304 stainless steel, non-proportionality, time-dependence, ratcheting

金属材料在非对称应力循环下会发生塑性变形的循环累积, 即产生棘轮效应 (ratcheting). 许多工程构件 (如快中子增殖反应堆元件等) 在高温下经常承受循环载荷作用, 容易产生棘轮效应. 棘轮变形是一种二次的、在循环过程中产生的微小变形的循环累积, 只要承受的循环载荷

具有一定的平均应力以及循环峰值应力超过材料的屈服极限, 就会在循环过程中产生. 因此, 在工程结构的设计和安全性以及寿命评价过程中需要考虑棘轮变形的影响, 要做到能够对棘轮行为进行合理的理论描述和预测. 为了建立比较准确的本构模型, 必须对材料的棘轮行为进行系统深入的研究. 近年来, 国内外许多学者都开展了对材料的棘轮效应的实验研究, 并建立了一些能够较准确描述金属材料在室温和高温下的单轴和多轴棘轮行为的本构模型^[1-15]. 然而, 这些研究都是在单一加载速率和加载波形下进行的, 没有讨论不同加载速率对棘轮行为的

* 国家自然科学基金青年基金项目 10402037 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: 2005-01-10, 收到修改稿日期: 2005-05-08

作者简介: 阚前华, 男, 1980 年生, 硕士生

影响,并且均未涉及具有一定保持时间下的变形特征,因此,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.为此,康国政等^[16]在室温下对材料的单轴时相关循环行为进行了研究,揭示了材料循环棘轮行为的时相关效应.然而,该研究中没有考虑高温和非比例加载路径对时相关棘轮行为的影响.因此,本文作者针对材料在核反应堆中的实际工作环境,在973 K下对SS304不锈钢进行了系统的循环变形实验研究,以揭示材料的高温非比例多轴棘轮行为与加载速率、保持时间和加载路径之间的关系,为后续建立合理的时相关循环本构模型提供坚实的基础.

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, Cr 17.93, Ni 8.17, Si 0.46, Mn 1.18, P 0.033, S 0.002,余为Fe.将材料进行固溶处理(即在1423 K下保温60 min,然后水冷)后加工成薄壁圆管试样,试样的大小和尺寸如图1所示.实验在MTS 809-250 kN电液伺服控制材料试验机上进行,采用Teststar II实验控制系统对整个实验过程进行闭环控

制及数据采集,应变由标距为25 mm的MTS 632.8 F高温拉扭引伸计(轴向应变最大测量值为10%,扭转角测量范围为-5°—+5°)来测量.在进行循环加载的实验过程中,采用图2所示的6种加载路径.图中, σ 为轴向应力, $\sqrt{3}\tau$ 为等效扭转切应力, ϵ 为轴向应变, $\gamma/\sqrt{3}$ 为等效切应变.

为了讨论具有不同保持时间的加载波形对材料循环变形的影响,本工作采用了如图3所示的峰谷值具有不同保持时间的加载波形进行应变和应力控制,其中 t 为加载时间.

为了便于对不同非比例路径下304不锈钢的循环硬化程度进行比较,定义等效应力 $\bar{\sigma}$ 和最大等效应力 $\bar{\sigma}_{max}$ 分别为

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \tag{1}$$

$$\bar{\sigma}_{max} = \max(\bar{\sigma}) \tag{2}$$

式中, σ 和 τ 分别为轴向应力和扭向切应力.

将轴向棘轮应变 ϵ_r 及扭向棘轮应变 γ_r 分别定义为

$$\epsilon_r = \frac{1}{2}(\epsilon_{max} + \epsilon_{min}) \tag{3}$$

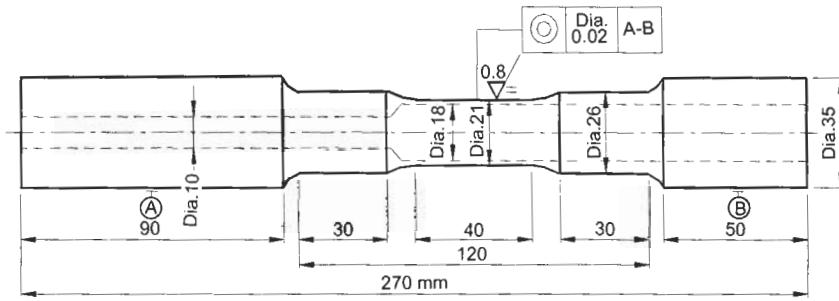


图1 试样尺寸图
Fig.1 Shape and size of specimen

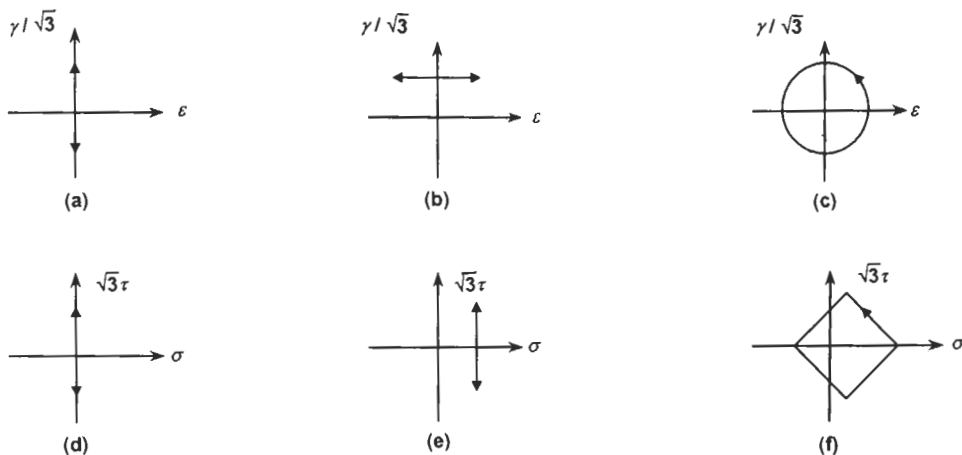


图2 6种加载路径示意图
Fig.2 Diagrams of six kinds of loading paths

- (a) pure torsional cyclic straining
- (b) linear cyclic straining
- (c) circular cyclic straining
- (d) pure torsional cyclic stressing
- (e) linear cyclic stressing
- (f) rhombic cyclic stressing

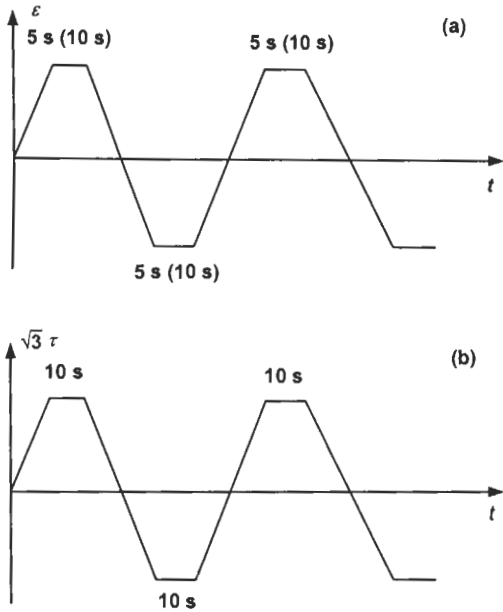


图 3 具有不同保持时间的加载波形示意图

Fig.3 Diagrams of loading charts for strain (a) and stress (b) with various holding-times

$$\gamma_r/\sqrt{3} = \frac{1}{2}(\gamma_{\max}/\sqrt{3} + \gamma_{\min}/\sqrt{3}) \quad (4)$$

式中, ε_{\max} 和 ε_{\min} 分别为一个循环中最大和最小的轴向应变, γ_{\max} 和 γ_{\min} 分别为一个循环中最大和最小的切应变. 为了减少试样之间拉伸性能的差异对棘轮行为变化规律的影响, 上述轴向和扭向棘轮应变均为减去了单调加载部分的值. 轴向和扭向棘轮应变率分别定义为 $d\varepsilon_r/dN$ 和 $d\gamma_r/dN$, 即每一加载循环下的轴向和扭向棘轮应变的增量, 其中 N 为循环周次.

2 实验结果与讨论

2.1 时相关应变循环特征

为了揭示 973 K 下 SS304 不锈钢的时相关应变循环规律, 在图 2a—c 所示 3 种路径下进行了循环实验, 讨论应变循环变形和加载速率、保持时间及加载路径之间的关系.

由图 4 所示的对称纯扭应变循环(加载路径见图 2a, 应变速率 $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 等效切应变幅值历史为: (1) $\pm 0.3\%$ (50 cyc) \rightarrow (2) $\pm 0.5\%$ (50 cyc) \rightarrow (3) $\pm 0.3\%$ (20 cyc)) 结果可以看出:

(1) SS304 不锈钢在 973 K 表现出明显的循环硬化特性, 最大等效切应力随应变幅值的增加而增加, 其循环硬化率随着循环周次的增加逐渐减少. 由于高温下, 材料内部位错的运动非常活跃, 在不同应变幅值加载工况下材料均能在给定的循环周次内最终达到循环饱和状态.

(2) 与室温下的情况有所不同^[16], 在 973 K 时, 材料对先前最大应变幅值(加载工况(2))下的循环特性无记忆效应. 这是由于当应变幅值由大变小时, 先前大应变

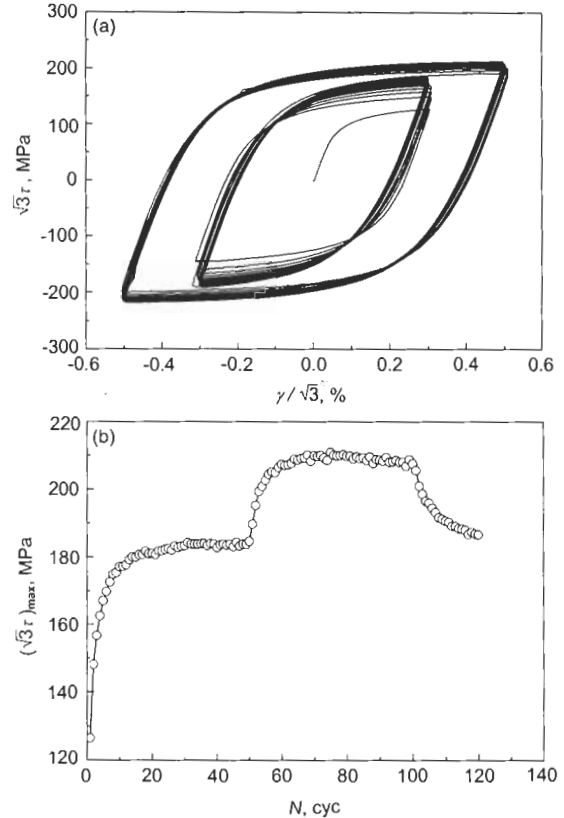


图 4 纯扭应变循环的实验结果

Fig.4 Results of pure torsional cyclic strain
(a) stress-strain curves
(b) maximum shear stress $\sqrt{3}\tau_{\max}$ vs cyclic number N

幅值循环下形成的高密度位错组态因 973 K 时位错运动的活跃性而在后续较小应变幅值的循环过程中逐渐变稀疏, 在一定的循环周次后可以恢复至与前面第一级加载末几乎相同的位错密度水平的缘故.

直线路径下(见图 2b, 扭向恒定等效应变为 0.5%, 轴向对称应变循环 $\pm 0.5\%$), SS304 不锈钢不同加载速率($\dot{\varepsilon} = 2 \times 10^{-4}, 8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) 和不同保持时间(轴向峰谷保持时间分别为 5 和 10 s, $\dot{\varepsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) 时的应变循环实验结果如图 5 所示. 结果表明:

(1) 由于在多轴应力状态下, 会有多个滑移系同时开动(滑移系开动的数目与非比例加载路径的形状密切相关), 而 973 K 时位错的运动非常活跃, 因此, 材料的硬化在经历几个循环后很快饱和. 此后最大等效应力几乎不再随循环周次增加而增加, 即达到循环稳定状态. 此结论仅限于较小的应变幅值, 如此处的 0.5%; 在较高的应变幅值下, 如 1%, 2% 和 3%, 材料将出现非饱和循环硬化行为^[17].

(2) 材料表现出率敏感性: 随着应变率的增大, 最大等效应力将整体增大. 这是由于在超过材料熔点 1/3 的温度(973 K)下, 材料的粘性增强, 在硬化实验中即表现

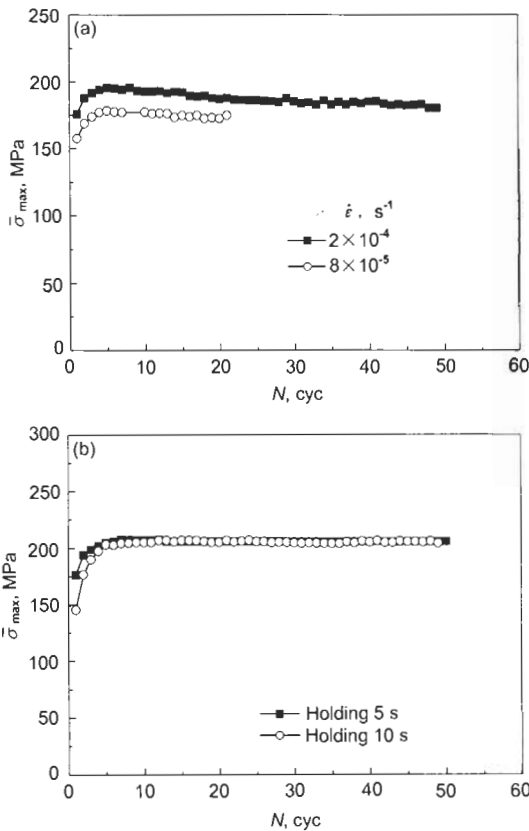


图5 直线应变循环路径下的最大等效应力与循环周次的关系曲线

Fig.5 Curves of maximum equivalent stress $\bar{\sigma}_{max}$ and cyclic number N under linear cyclic straining
(a) at two strain rates $\dot{\epsilon}$
(b) at two holding-times ($\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)

为率敏感性。

(3) 直线路径非比例加载下, 保持时间的差异对材料的最大等效应力变化的影响没有单轴下 [16] 明显. 这是因为在该加载路径下扭向一直没有卸载, 并且保持时间太短的缘故。

SS304 不锈钢在圆形路径 (图 2c, 轴向应变和扭向应变幅值均为 $\pm 0.5\%$) 以及不同应变率 ($\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4}, 8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) 下的应变循环实验结果与直线路径下的相似. 材料也具有明显的循环硬化特性, 并且在高应变率下的最大等效应力也高于低应变率下的值, 如图 6 所示. 另外, 在上述两种应变率下, 圆形路径的最大等效应力幅 (约为 256 和 230 MPa) 比直线路径下的 (约为 207 和 178 MPa) 要大得多. 如前所述, 在非比例多轴应力状态, 应力主轴与非弹性应变主轴往往不重合或非弹性应变率张量与应力偏量张量不共线, 这使得材料内部多个滑移系内的位错在高温下易于同时不同程度地被激活, 增加了位错被分割的机会, 从而导致与非比例路径相关的附加硬化. 同时, 不同滑移系内的位错运动间的交互作用与非比例加载路径的形状密切相关, 相位差 (也就是非比例度) 越大

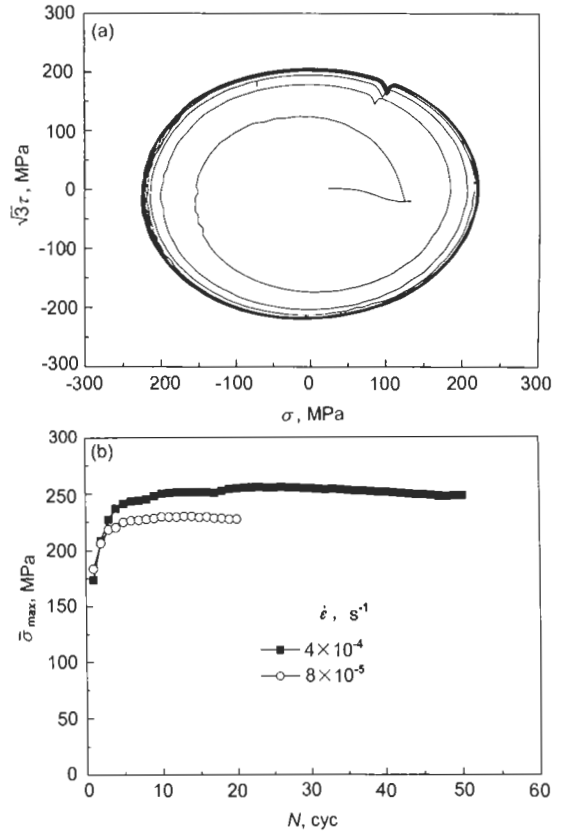


图6 圆形路径下不同应变率的实验结果

Fig.6 Results of circular path at two strain rates $\dot{\epsilon}$
(a) stress response ($\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)
(b) curves of maximum equivalent stress $\bar{\sigma}_{max}$ vs cyclic number N

的非比例路径下位错间的相互制约作用越强, 因此, 在圆形加载路径下 (此时的相位差为 90°) 产生的附加硬化就明显高于直线路径. 这与文献 [18—21] 中所述的非比例度对材料的应变循环特性产生影响的结论相同。

2.2 非比例多轴棘轮行为研究

图 2d 所示的纯扭应力循环 (加载历史为: (1) $(20 \pm 100) \text{ MPa}$ (200 cyc) \rightarrow (2) $(40 \pm 100) \text{ MPa}$ (200 cyc) \rightarrow (3) $(20 \pm 100) \text{ MPa}$ (20 cyc), 应力率为 100 MPa/s) 的实验结果见图 7. 从图可见:

(1) 扭向棘轮应变随着循环周次的增加而增加, 棘轮应变率 $d\gamma_r/dN$ 在经历十几个循环后逐渐下降趋近零; 当等效切应力幅值不变, 平均等效切应力增大时, 棘轮应变率 $d\gamma_r/dN$ 相应增大, 经历十几个循环后逐渐下降但不为零, 棘轮趋于安定状态。

(2) 在经历较大平均应力循环后, 由于位错密度升高, 位错组态逐渐变为稳定的胞状结构, 变形阻力增大. 当再进行后继较小应力循环时, 即使有一定平均等效切应力, 棘轮应变率也会明显减小, 甚至减至零. 这表明: 与已有的单轴拉压循环棘轮结果 [13] 相同, 先前较大应力循环将抑制后续较小应力循环棘轮变形的产生, 即 973 K 下

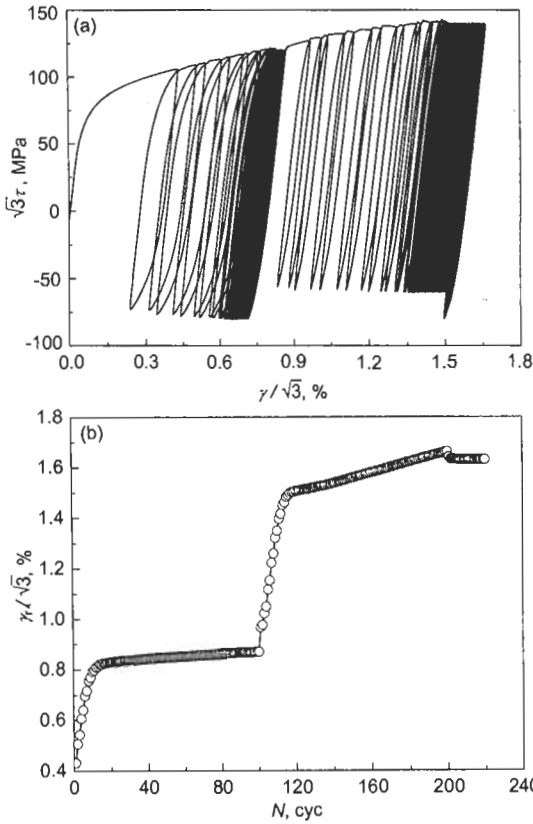


图 7 纯扭循环棘轮实验结果

Fig.7 Results of pure torsional ratcheting (a) stress-strain curve (b) torsional ratcheting strain $\gamma_r/\sqrt{3}$ vs cyclic number N

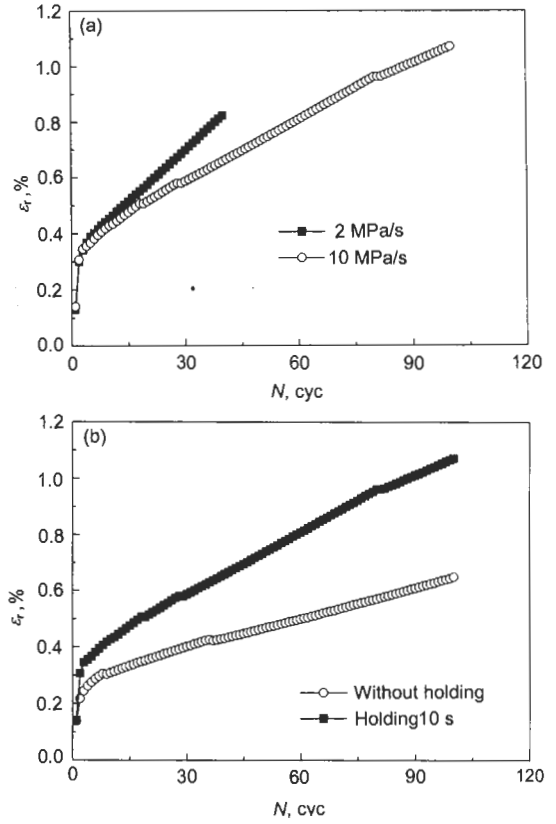


图 8 直线应力循环路径下的轴向棘轮应变与循环周次的关系曲线

Fig.8 Axial ratcheting strain ϵ_r vs cyclic number N under linear cyclic stress (a) at two stress rates (b) at two holding-times

材料的棘轮行为仍依赖于平均应力加载历史. 而应力幅值历史对棘轮行为的影响与之类似. 需指出的是, 由于施加的应力率较大, 而实验机的 PID 设置偏软, 导致在循环初始阶段响应不足, 低于施加的应力值; 随循环周次的增加, 应力响应值逐渐达到施加的常值 (如图 7a 所示).

图 2e 所示直线路径 (轴向恒定应力为 40 MPa, 扭向对称循环为 (0 ± 140) MPa) 下不同应力率 (分别为 10 和 2 MPa/s) 和有无扭向对称应力循环峰谷保持时间, 应力率恒定为 10 MPa/s) 下的拉-扭组合循环实验结果见图 8. 图示结果表明:

(1) 与已有的固定加载速率的棘轮行为实验研究结果相同 [18-23], 两种应力率和不同保持时间下, 材料均具有相同的棘轮演化规律, 即棘轮应变随循环周次的增加而增加, 棘轮应变率随循环周次因应变强化和循环硬化的影响而逐渐下降.

(2) 因材料高温下具有明显的粘性特征, 随着应力率的降低, 其轴向棘轮应变增大, 几个循环之后棘轮应变率为一常数, 表现为渐进型棘轮效应, 并且具有保持时间时的轴向棘轮变形比没有保持时间时要大. 是因为在 973 K

下, 热激活源数目的增加导致材料的粘性增强, 蠕变和塑性呈交互作用状态; 尤其在保持时间期间, 蠕变变形因占据主导位置必须合理地给予考虑. 因此, 本文定义的棘轮变形应包括两部分: 时无关的循环累积塑性应变和时相关的蠕变应变. 时无关的塑性变形仅由不封闭的循环滞后环产生. 将时无关塑性变形和蠕变变形从总的非弹性变形中分离出来, 分别以不同的流动速率来描述两者的循环变形特性, 这对于建立后续时相关本构模型具有重要意义.

图 2f 所示的菱形路径 (扭向为对称应力循环 0 ± 100 MPa, 轴向为非对称应力循环 (40 ± 100) MPa) 下, 应力率分别为 2 和 10 MPa/s) 下的拉-扭组合循环实验结果如图 9 所示. 比较图 8 和图 9 可知: 在两种不同应力率下, 菱形路径下的棘轮演化规律与直线路径下的棘轮演化规律大致相同, 棘轮变形也主要出现在非零的平均应力方向; 并且, 由于菱形加载路径的非比例度大于直线路径, 则在菱形加载路径下产生的棘轮应变明显小于直线路径下的棘轮应变.

上述讨论表明, 菱形路径下, SS304 不锈钢的棘轮

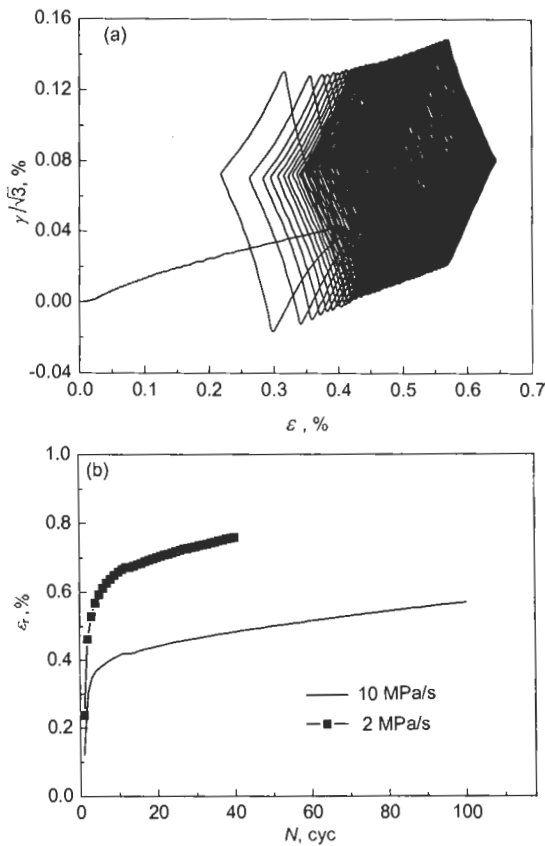


图9 菱形路径下的循环棘轮实验结果

Fig.9 Results of ratcheting under rhombic cyclic path (torsional stress cycling (0 ± 100) MPa, axial stress cycling (40 ± 100) MPa)

(a) strain response (stress rate 10 MPa/s)

(b) axial ratcheting strain ε_r vs cyclic number N

行为也具有明显的时相关效应。在建立时相关本构模型时, 必须考虑时相关因素以及非比例加载路径的影响, 才能更好地模拟多轴非比例加载下的棘轮行为。

3 结论

(1) SS304 不锈钢在各种非比例路径下, 材料都表现出循环硬化特性; 高温 (973 K) 下对先前大应变幅值循环无记忆效应, 较大平均应力的循环将抑制后续较小循环的棘轮行为, 且对路径表现出强烈的依赖性。

(2) 在不同加载速率和不同保持时间下, 材料的循环硬化程度不同: 随着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, 等效应力响应随着降低, 且高温下的时相关效应与室温相比更加明显。

(3) SS304 不锈钢的棘轮变形表现出明显的时相关效应: 各种多轴非比例路径下, 随着加载速率的降低, 材料的轴向棘轮应变均显著的增加; 直线路径下, 随着保持时间的增加, 轴向棘轮应变也会有明显的增加。

上述效应均是由于较低加载速率和较长保持时间下产生了较大蠕变变形的缘故。这一现象在高温下表现得尤为明显, 因此, 在进行高温多轴加载下时相关棘轮行为的本构描述时, 必须考虑蠕变和循环塑性累积间的交互作用, 有必要将蠕变应变和循环累积塑性应变分离开来, 即认为材料的循环变形是时相关的蠕变变形和时无关的棘轮变形交互作用的结果, 应分别以不同的流动律来描述才能建立更加合理的时相关本构模型。

参考文献

- [1] McDowell D L. *ASME J Appl Mech*, 1987; 54: 323
- [2] Abdel-Karim M, Ohno N. *Int J Plast*, 2000; 16: 225
- [3] Benallal A, Marquis D. *ASME J Eng Mater Technol*, 1987; 109: 326
- [4] Kobayashi M, Ohno N, Igari T. *Int J Plast*, 1998; 11: 397
- [5] Chaboche J L, Nouailhas D. *ASME J Eng Mater Technol*, 1989; 111: 384
- [6] McDowell D L. *ASME J Appl Mech*, 1985; 52: 298
- [7] Ohno N, Wang J D. *Int J Plast*, 1993; 9: 375
- [8] Yaguchi M, Takahashi Y. *JMSE Int J*, 1999; 42A(1): 1
- [9] Jiang Y, Sehitoglu H. *Int J Plast*, 1994; 10: 579
- [10] Kang G Z, Gao Q, Yang X J. *Int J Non-Linear Mech*, 2004; 39: 843
- [11] Kang G Z, Gao Q, Yang X J. *Mech Mater*, 2002; 34: 521
- [12] Kang G Z, Gao Q, Cai L X. *Acta Metall Sin*, 2000; 36: 497
- [13] Kang G Z, Gao Q, Yang X J, Sun Y F. *Acta Mech Sin*, 2001; 33: 692
- [14] 康国政, 高庆, 杨显杰, 孙亚芳. *力学学报*, 2001; 33: 692
- [15] Chen X, Jiao R. *Int J Plast*, 2004; 20: 871
- [16] Chen X, Jiao R, Kim K S. *Int J Plast*, 2005; 21: 161
- [17] Kang G Z, Sun Y F, Zhang J, Kan Q H. *Acta Metall Sin*, 2005; 41: 277
- [18] 康国政, 孙亚芳, 张娟, 阚前华. *金属学报*, 2005; 41: 277
- [19] Kang G Z, Ohno N, Nebu, A. *Int J Plast*, 2003; 19: 1801
- [20] Kang G Z, Gao Q. *Mech Mater*, 2004; 36: 299
- [21] Kang G Z, Gao Q. *Mech Mater*, 2002; 34: 809
- [22] Kang G Z, Gao Q, Cai L X. *J Mater Sci Technol*, 2002; 18: 13
- [23] Kang G Z, Gao Q. *Mech Mater*, 2002; 34: 145
- [24] Chen X, Tian T, An K. *Acta Mech Sin*, 2001; 33: 698
- [25] 陈旭, 田涛, 安柯. *力学学报*, 2001; 33: 398
- [26] Tian T, Chen X, An K. *Mater Mech Eng*, 2002; 26(1): 19
- [27] 田涛, 陈旭, 安柯. *机械工程材料*, 2002; 26(1): 19