

6061-T6 铝合金单轴时间相关循环变形行为

丁俊, 康国政, 刘宇杰, 王海林

(西南交通大学 应用力学与工程系, 成都 610031)

摘要: 对 6061-T6 铝合金进行系统的单轴应变循环和应力循环实验, 揭示该材料在室温和高温下的循环变形行为, 讨论环境温度、加载速率、峰/谷值保持对其应变循环特性及棘轮行为的影响。结果表明, 6061-T6 铝合金表现出弱的循环软化特性, 其棘轮行为不仅依赖于平均应力和应力幅值的大小, 还依赖于加载历史。尽管该合金的单拉行为对应变率的变化不敏感, 但其循环变形行为却体现出明显的时间相关特性, 即: 应变循环下, 在峰/谷值有保持时的响应应力幅值明显小于没有保持时的值, 且随着保持时间的增加, 响应应力幅值将进一步减小; 应力循环下, 在峰值有保持时产生的棘轮应变比没有保持时的值大, 且随着峰值保持时间的增加及应力率的降低, 棘轮应变明显增大。

关键词: 6061-T6 铝合金; 循环载荷; 棘轮行为; 时间相关

中图分类号: TG 146.2; O 344.1

文献标识码: A

Uniaxial time-dependent cyclic deformation of 6061-T6 aluminium alloy

DING Jun, KANG Guo-zheng, LIU Yu-jie, WANG Hai-lin

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

Abstract: A series of experiments were carried out under uniaxial cyclic straining and cyclic stressing to observe the time-dependent cyclic deformation behaviors of 6061-T6 aluminium alloy at room and elevated temperatures. The main attention was paid to the effects of ambient temperature, loading rate, and peak/valley hold on the strain cyclic characteristics and ratchetting. The results show that 6061-T6 aluminium alloy presents weak cyclic softening feature; the ratchetting behaviour of the material depends not only on the current values of applied mean stress and stress amplitude, but also on their loading histories. Although 6061-T6 aluminium alloy is not sensitive to the variation of strain rate in monotonic tension, its cyclic deformation presents remarkable time-dependence, i.e., the responded stress amplitude in the cyclic straining with peak/valley strain hold is smaller than that obtained without any hold, and decreases further as the hold-time increases; the ratchetting strain produced in the cyclic stressing with peak stress hold is larger than that without any hold and increases as the hold-time increases and the stress rate decreases.

Key words: 6061-T6 aluminium alloy; cyclic loading; ratchetting; time-dependence

棘轮效应是材料在非对称应力循环作用下产生的一种循环塑性应变累积现象。由于棘轮应变累积而引起的结构尺寸超标甚至破坏已引起了国内外研究者的广泛重视。近年来, 国内外不少学者针对不锈钢、9Cr1Mo 钢、紫铜和 T225NG 合金等工程材料的棘轮

行为进行了实验和理论研究, 取得了一定的进展^[1-10]。然而, 对于铝合金等有色金属材料的棘轮行为研究还很少, 目前已知的是关于纯铝的棘轮行为研究^[11-12]。已有的研究表明^[13-14], 不同的材料体现出不同的棘轮行为特征, 并且不同材料的棘轮行为还具有不尽相同

的时间相关特性,因此,有必要进一步研究铝合金材料的循环变形行为及其时间相关特性,为后续时相关本构模型的建立提供坚实的基础。

6061-T6 铝合金由于具有良好的综合力学性能,被广泛应用于船舶、载重汽车等方面。该材料的构件经常服役于复杂的交变载荷作用,可能会发生塑性变形的累积,因此,对 6061-T6 进行棘轮行为研究具有重要的实际意义。为此,本文作者对 6061-T6 铝合金材料进行室温和高温下的单轴循环变形行为及其时间相关特性的实验研究,重点讨论其室温和高温单轴棘轮行为,为后续的本构描述及工程防范提供丰富的实验数据。

1 实验

实验材料为供货态 6061-T6 铝合金圆棒,其成分为(质量分数, %): Cu 0.15-0.4, Si 0.4-0.8, Fe 0.7, Mn 0.15, Mg 0.8-1.2, Zn 0.25, Cr 0.04-0.35, Ti 0.15, 其余 Al。室温试样是工作段长度为 10 mm、直径 6 mm 的实心圆棒试样,而高温试样是工作段长度为 30 mm、直径 6 mm 的实心圆棒试样。实验设备为 MTS-809(25 kN)电液伺服控制材料实验机,其控制系统为 TestStar 控制器。高温发生与控制设备为 MTS653 系统,常温应变测量采用标距为 5 mm 的 MTS 单轴应变引伸计,高温应变测量采用标距为 25 mm 的高温应变引伸计。通过计算机完成整个实验过程的闭环控制和实时数据采集。在未特别指明时,对应变控制的循环实验,其应变率均为 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; 对应力控制的循环实验,其应力率为 100 MPa/s。本研究定义棘轮应变为

$$\varepsilon_r = (\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}) / 2$$

式中 ε_{\max} 、 ε_{\min} 分别为一个循环中最大和最小应变值; 定义棘轮应变率为 $d\varepsilon_r/dN$, 即每一个加载循环下棘轮应变 ε_r 的增量。

已有的研究^[15]表明,环境温度是影响棘轮应变的一个重要因素之一,因此,为了全面揭示 6061-T6 铝合金的单轴应变循环特性和棘轮行为,本研究进行了室温和 150 °C 高温的循环变形行为实验研究。

2 结果与讨论

首先,对 6061-T6 铝合金进行了不同温度下的变速率单拉实验,以了解材料的基本力学性能,并为后

继的循环变形实验设计提供参考。其应变率历史如下: $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} (0 \rightarrow 0.02) \rightarrow 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} (0.02 \rightarrow 0.04) \rightarrow 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1} (0.04 \rightarrow 0.06) \rightarrow 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} (0.06 \rightarrow 0.08)$ (括号中指该应变率控制的应变范围)。图 1 给出的实验结果显示,在室温和 150 °C 时,单拉曲线仅在应变率改变处有较小的跃动。可见,应变率的变化对材料的单拉行为基本没有影响。此外,从图中还可看出,室温下,应变率较大 ($1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) 时,会有显著的动态应变时效效应产生。另外,150 °C 时,材料在应变为 8% 左右会发生失效。其表明,随着温度的升高,6061-T6 铝合金的强度和延性均明显减弱。

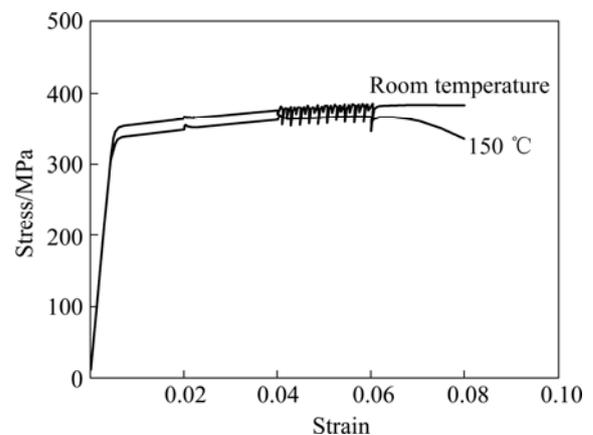


图 1 室温和高温下变速率单拉曲线

Fig.1 Monotonic tensile stress—strain curves at varied strain rates and at room and elevated temperatures

2.1 应变循环及其时间相关特性

为了揭示材料在室温应变控制条件下的循环变形行为,先进行平均应变为零,应变幅值变化的对称应变循环实验。其加载历史(括号中表示循环周次,下文同)为: ① $\pm 0.6\%$ (100 cycles) \rightarrow ② $\pm 0.8\%$ (100 cycles) \rightarrow ③ $\pm 0.6\%$ (50 cycles)。实验结果如图 2 所示。由图可知,在同一加载工况下,材料的响应应力幅值随着循环次数的增加而逐渐减小,材料表现为循环软化现象,但软化的程度很微弱,且软化的速率随着循环的进行逐渐降低至接近于零。在加载情形③,尽管经历了先前较大应变幅值的循环,其响应应力幅值的大小与相同应变幅值下的加载情形①相差不大,可见,先前较大应变幅值的循环对后续较小应变幅值的循环几乎没有影响。

其次,对材料进行了平均应变历史的循环实验。实验结果表明,平均应变的变化对材料的响应应力幅值基本上没有影响。此外,通过 150 °C 下应变循环的实验研究表明,应变幅值和平均应变的历史对高温应

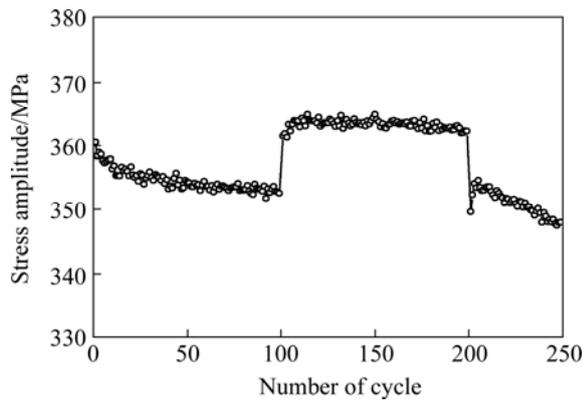


图 2 室温不同应变幅值及其历史下的 σ_a-N 关系曲线

Fig.2 σ_a-N curves with different strain amplitudes and their history at room temperature

变循环特性的影响与室温时相同。

为了研究室温应变循环的时间相关特性, 在恒定应变幅值(0.6%)下, 对材料进行应变峰谷值处不同保持时间的应变循环实验, 结果如图 3 所示。由图可见, 不同保持时间下, 材料均体现出循环软化现象, 只是软化的程度有所不同。在峰谷值处均保持 30 s 的循环下产生的软化程度明显大于无峰谷值保持时的软化程度, 可见, 峰谷值保持时间的增加会促进材料的软化。此外, 其整体的响应应力幅值明显小于无峰谷值保持时产生的值。这是因为材料在最大拉压应变保持过程中由于粘性效应而发生了应力松弛。

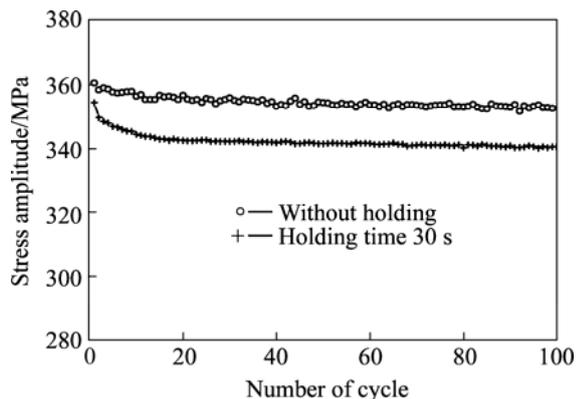


图 3 室温不同保持时间下的 σ_a-N 关系曲线

Fig.3 σ_a-N curves for different hold-times at peak and valley strain at room temperature

为了揭示高温应变循环的时间相关特性, 首先, 在恒定应变幅值(0.6%)下, 讨论不同保持时间(峰谷值处保持相同时间)对应变循环特性的影响。由图 4 给出的实验结果可知, 在峰谷值处均保持 10 s 产生的响应

应力幅值比无峰谷值保持产生的值要小, 且随着保持时间的增加(30 s), 其响应应力幅值进一步降低, 原因与室温情况相同, 但其差值比室温大, 这表明, 6061-T6 材料在高温下的粘性效应更加明显。另外, 图 4 的结果还表明, 保持时间对响应应力幅值的影响并不呈线性关系。

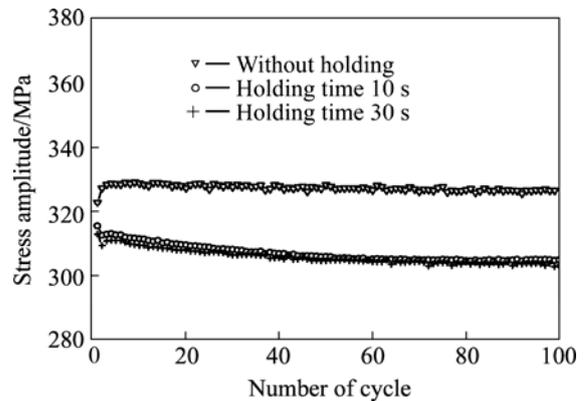


图 4 高温不同保持时间下的 σ_a-N 关系曲线

Fig.4 σ_a-N curves at peak and valley strain and elevated temperature for different hold-times

然后, 进一步研究了峰/谷值保持对应变循环行为的影响。由图 5 显示的实验结果可知, 仅在峰值处有保持时间(30 s)的循环产生的响应应力幅值明显大于在峰谷值处均有相同保持时间(30 s)的循环产生的值。这是因为仅在峰值具有保持时间的加载, 避免了在最大压应变保持时产生的反方向的应力松弛。

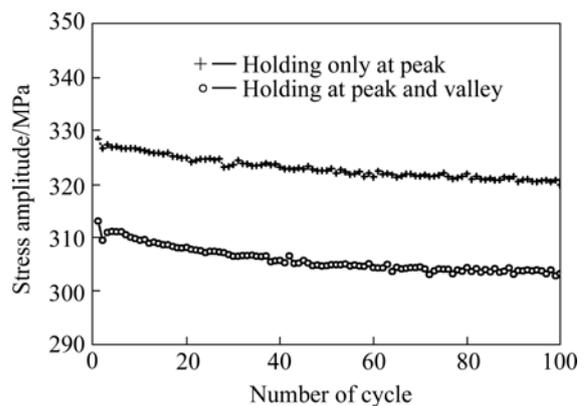


图 5 高温有无峰/谷值保持的 σ_a-N 关系曲线

Fig.5 σ_a-N curves with peak strain hold or peak and valley strain hold at elevated temperature

2.2 棘轮行为及其时间相关特性

下面将研究材料的单轴棘轮行为及其时间相关特性。图 6 给出了室温下应力幅值均为 340 MPa, 平均

应力分别为 20 MPa 和 30 MPa 的单级应力循环实验结果。由图可知,在同一加载工况下,随着循环次数的增多,棘轮变形增加,棘轮应变率却逐渐减小。此外,随着平均应力的增大,棘轮应变值增大,循环初始时的棘轮应变率也增大。由图 7 给出的不同应力幅值下的棘轮行为结果也反映了相同的特点。

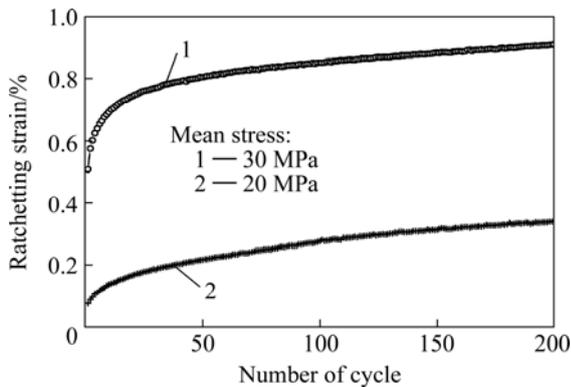


图 6 室温不同平均应力的 ϵ_r-N 关系曲线

Fig.6 ϵ_r-N curves under stress amplitude of 340 MPa and different mean stresses at room temperature

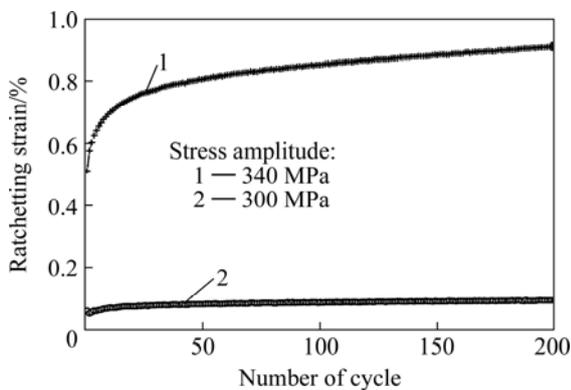


图 7 室温不同应力幅值的 ϵ_r-N 关系曲线

Fig.7 ϵ_r-N curves under mean stress of 30 MPa and different stress amplitudes at room temperature

为了讨论平均应力历史对棘轮行为的影响,对材料进行了如下工况的非对称应力循环实验:① (20±340)MPa(200 cycles)→② (30±340)MPa(200 cycles)→③ (20±340)MPa(100 cycles)。实验结果如图 8 所示。比较加载情形①和③的棘轮演化可见,尽管两者的应力水平相同,但由于情形③经历了先前较大应力循环(情形②),材料的变形阻力增大,使其棘轮应变率为零。这表明,先前较大平均应力的循环会抑制后续较小平均应力循环的棘轮应变的产生。

进一步的实验研究表明,先前较大应力幅值的循

环也会抑制后续较小应力幅值循环棘轮行为的产生。可见,6061-T6 铝合金在室温下的棘轮行为均具有明显的加载历史依赖性,这与 SS304 不锈钢^[15]的结论一致。

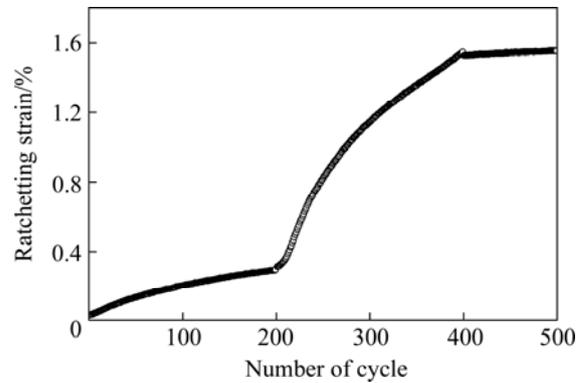


图 8 室温平均应力历史下的 ϵ_r-N 关系曲线

Fig.8 ϵ_r-N curves under mean stress history at room temperature

为了研究室温棘轮行为的时间相关特性,首先,在工况(20±340)MPa下,分别进行应力率为 20 MPa/s 和 100 MPa/s 的循环实验,结果如图 9 所示。由图可见,不同加载速率下的棘轮演化规律相同,即随着循环的进行,棘轮应变率逐渐减小。但不同的加载速率对棘轮应变的大小会产生显著的影响,即低应力率循环产生的棘轮应变要大于高应力率循环产生的值。这与 304 不锈钢^[16]的研究结果一致。

其次,在工况(30±340)MPa 及相同应力率(100 MPa/s)下,对材料进行峰值不同保持时间的棘轮实验,结果如图 10 所示。从图中可以看出,不同保持时间下的棘轮演化规律明显不同。在峰值无保持时间的应力循环下,棘轮效应只发生在循环前 10 周,棘轮应变率

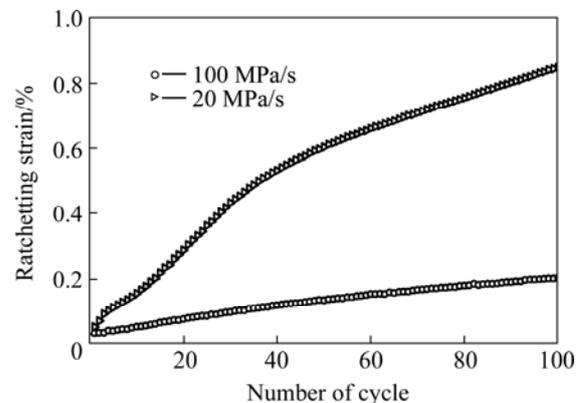


图 9 室温不同应力率下的 ϵ_r-N 曲线

Fig.9 ϵ_r-N curves with different stress rates at room temperature

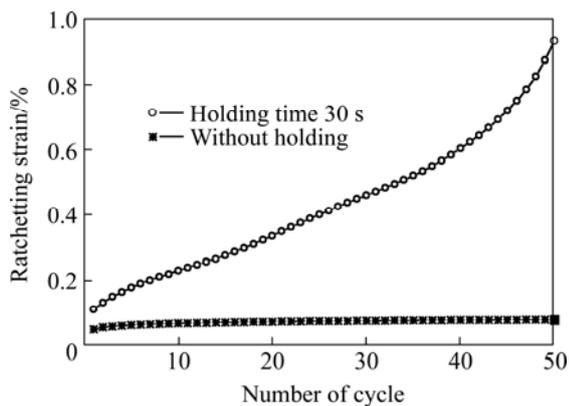


图 10 室温不同保持时间下的 ϵ_r-N 关系曲线
 Fig.10 ϵ_r-N curves with different hold-times at peak stress at room temperature

快速衰减为零, 棘轮行为达到安定状态。而在峰值处保持 30 s 加载下的棘轮演化却经历了 3 个阶段: 初始约 20 次循环内, 随着循环次数的增多, 棘轮变形增加较快, 但棘轮应变率则逐渐降低。紧接的 20 次循环内, 棘轮应变近似呈线性增加。最后的 10 次循环过程中, 棘轮变形加速发展, 棘轮应变率骤然增加, 最终导致试样快速失效。这与 304 不锈钢研究结果不同。文献 [16] 表明, 对于 304 不锈钢, 峰值保持时间的出现对棘轮行为的演化规律没有太大的影响。另外, 在峰值保持 30 s 加载下产生的棘轮应变明显大于峰值无保持时间产生的值, 这是由于在最大拉应力的保持过程产生了正向蠕变, 使得总体棘轮应变增大。

为了研究高温下平均应力对棘轮行为的影响, 对材料进行应力幅值相同, 平均应力不同的应力循环实验。由图 11 所示结果可知, 平均应力的增加使产生的棘轮应变明显增加, 并且其棘轮演化规律也略有不同: 平均应力为 30 MPa 时, 随着循环次数的增多, 棘轮应变基本上呈线性增加; 当平均应力增大到 40 MPa 时, 在循环开始阶段, 棘轮应变率由一个较高值逐渐减小, 经过一定的循环后达到一个稳定的常值。可见, 高温下平均应力的变化对棘轮行为会产生较大的影响。不同应力幅值下的棘轮行为结果也反映了相同的特点。这与室温研究结果有所不同。此外, 实验结果表明, 高温下的棘轮行为也具有明显的平均应力和应力幅值历史依赖性。

为了研究高温棘轮行为的时间相关特性, 首先, 在工况 (30 ± 300) MPa 下, 进行不同应力率 (20 MPa/s 和 100 MPa/s) 的应力循环实验。从图 12 所示的结果可以看出, 由于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产生较大的棘轮应变。与室温

情况不同, 高温下不同应力率的棘轮演化规律有所不同: 在应力率为 20 MPa/s 的循环下, 棘轮应变率由一个较高的值随着循环的进行逐渐减小, 最后达到一个常值; 而在应力率为 100 MPa/s 的循环下, 棘轮应变却以一个近似常值的棘轮应变率随循环周次的增加而增大。这表明, 高温下的蠕变变形更为明显。

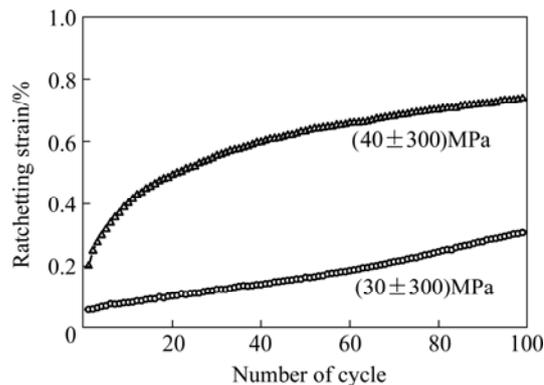


图 11 高温不同平均应力下的 ϵ_r-N 曲线
 Fig.11 ϵ_r-N curves with different mean stresses at elevated temperature

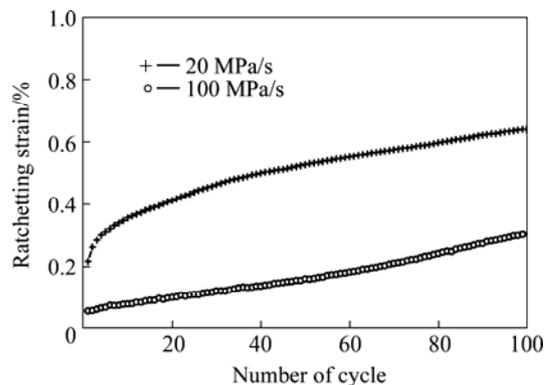


图 12 高温不同应力率的 ϵ_r-N 曲线
 Fig.12 ϵ_r-N curves with different stress rates at elevated temperature

然后, 在工况 (30 ± 300) MPa 及相同的应力率 (100 MPa/s) 下, 讨论了峰值处具有不同保持时间时的高温棘轮行为特性。相应的 ϵ_r-N 关系曲线如图 13 所示。由图可见, 随着保持时间的增加, 棘轮应变增大。不同保持时间下, 棘轮应变的演化规律明显不同。在无峰值保持的应力循环下, 随着循环的进行, 棘轮应变近似呈线性增大; 而在峰值保持 10 s 的应力循环中, 棘轮应变率早在开始阶段随着循环次数的增加有所下降, 经过一定的循环周次后达到一个常值。当峰值保持时间增加到 30 s 时, 其棘轮应变的演化呈现出明显三阶段特性, 即棘轮应变率先减小, 而后保持为一常

值,最后骤然增加,直至材料破坏。这说明,由于高温下的材料的粘性效应更加显著,其棘轮变形行为的时间相关特性就更为明显。

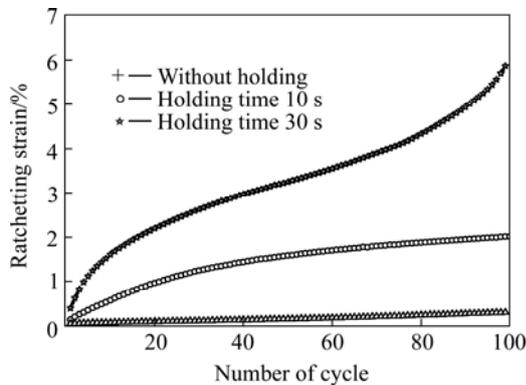


图13 高温不同保持时间下的 ε_r-N 关系曲线

Fig.13 ε_r-N curves with different hold-time at peak stress at elevated temperature

3 结论

1) 尽管材料的单调拉伸行为对应变率的变化不敏感,但其循环变形行为体现出明显的时间相关特性。

2) 该铝合金的棘轮演化规律不仅与当前的平均应力和应力幅值的大小有关,还与其加载历史密切相关,后续较小载荷的循环对先前较大载荷的循环具有记忆效应。

3) 应变峰/谷值保持时间的不同对材料的应变循环特性不会产生影响,但对响应应力幅值的大小有较大的影响。随着峰/谷值保持时间的增加,响应应力幅值进一步下降。

4) 室温时,不同加载速率下的棘轮演化规律相同,但产生的棘轮应变值不同,低应力率下产生的棘轮应变大于高应力率下产生的值;峰值处保持时间的增加使得棘轮应变值增大,同时也改变棘轮行为的演化规律。

5) 150 °C时,不同加载速率和不同保持时间下的棘轮演化规律不同,且产生的棘轮应变值也不同,随着应力率的降低和保持时间的增加,棘轮应变值增大。

REFERENCES

[1] Yaguchi M, Takahashi Y. Ratchetting of viscoplastic material with cyclic softening, part 1: Experiments on modified 9Cr-1Mo steel[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21: 43-65.

[2] KANG Guo-zheng, GAO Qing. Non-proportionally multiaxial ratchetting of cyclic hardening materials at elevated temperatures: Experiments and simulations[J]. *Mechanics of Materials*, 2005, 37: 1101-1118.

[3] Feaugas X, Gaudin C. Ratchetting process in the stainless steel AISI 316L at 300 K: An experimental investigation[J].

International Journal of Plasticity, 2004, 20: 643-662.

[4] Yoshida F. A constitutive model of cyclic plasticity[J]. *International Journal of Plasticity*, 2000, 16: 359-382.

[5] KAN Qian-q-hua, KANG Guo-zheng, ZHANG Juan. Uniaxial time-dependent ratchetting: Visco-plastic model and finite element application[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2007, 47: 133-144.

[6] Abdel-Karim M, Ohno N. Kinematic hardening model suitable for ratchetting with steady-state [J]. *International Journal of Plasticity*, 2000, 16: 225-240.

[7] YANG Xian-jie. A unified time dependent model for low cycle fatigue and ratchetting failure based on microcrack growth[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237(12/13): 1381-1387.

[8] Delobelle P, Robinet P, Bocher L. Experimental study and phenomenological modelization of ratchet under uniaxial and biaxial loading on an austenitic stainless steel[J]. *International Journal of Plasticity*, 1995, 11: 295-330.

[9] 杨显杰, 高庆, 蔡力勋. 紫铜的循环棘轮行为研究[J]. *西南交通大学学报*, 1997, 32(6): 604-609.

YANG Xian-jie, GAO Qing, CAI Li-xun. Experimental study on the ratchetting behavior of red cooper at room temperature[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1997, 32(6): 604-609.

[10] CAI Li-xun, NIU Qing-yong, QIU Shao-yu, LIU Yu-jie. Ratchetting behavior of T225NG titanium alloy under uniaxial cyclic stressing: experiments and modeling[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2005, 18(1): 31-39.

[11] 杨显杰, 高庆, 蔡力勋, 向阳开. 纯铝在单轴应力循环作用下棘轮行为的实验研究[J]. *固体力学学报*, 1998, 19(2): 134-137.

YANG Xian-jie, GAO Qing, CAI Li-xun, XIANG Yang-kai. An experimental study on the ratchetting behavior of pure aluminum under uniaxial cyclic stressing[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1998, 19(2): 134-137.

[12] 杨显杰, 高庆, 蔡力勋. 纯铝的多轴非比例循环塑性行为实验研究[J]. *西南交通大学学报*, 1999, 34(5): 485-490.

YANG Xian-jie, GAO Qing, CAI Li-xun. An experimental study on the nonproportional cyclic plasticity behavior of pure aluminum[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1999, 34(5): 485-490.

[13] SHI Zhi, GAO Qing, KANG Guo-zheng. Experimental study on uniaxial time-dependent ratchetting behavior of 1Cr18Ni9 stainless steel at room temperature[C]//*Proceedings of ICMEM 2005*. Nanjing, 2005: 964-968.

[14] YANG Xian-jie, Chow C L, Lau K J. Time-dependent cyclic deformation and failure of 63Sn/37Pb solder alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25: 533-546.

[15] KANG Guo-zheng, GAO Qing, CAI Li-xun, SUN Ya-fang. Experimental study on the uniaxial and nonproportionally multiaxial ratchetting of SS304 stainless steel at room and high temperatures[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2002, 216(1/3): 13-26.

[16] KANG Guo-zheng, KAN Qian-hua, ZHANG Juan, SUN Ya-fang. Time-dependent ratchetting experiments of SS304 stainless steel[J]. *International Journal of Plasticity*, 2006, 22: 858-894.

(编辑 陈爱华)