

TC4 钛合金室温滞后回弹研究

孙 帅, 鄂大辛

(北京理工大学, 北京 100081)

摘 要: 为了探明 TC4 钛合金室温下的滞后回弹效应, 采用万能试验机进行了不同预应变和不同加载速率的滞后回弹实验; 为了揭示滞后回弹变化规律的微观机理, 采用 OM 和 TEM 对微观组织进行表征。结果表明: TC4 钛合金经过室温塑性变形卸载后尺寸继续变化, 具有明显的滞后回弹效应。随着预应变以及加载应变率的提高, 滞后回弹应变(TDSS)的绝对值均呈现指数增长。组织分析表明, “流线型”光镜组织、位错塞积以及孪晶组织的演变与滞后回弹变化规律正相关。

关键词: TC4 钛合金; 拉伸变形; 滞后回弹; 变形孪晶

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)11-3267-05

随着汽车、航空航天技术向着高精度和轻量化方向发展, 各种钛合金、镁合金以及铝合金等轻质合金板材的应用越来越广泛。人们在实践中发现有些金属板材或管材在成型卸载后, 首先经历瞬时回弹^[1]。之后, 随着时间的推移, 尺寸继续发生微小的变化, 称为“滞后回弹”^[2]。而人们对滞后回弹影响零部件装配精度这一问题, 还未能引起足够重视, 因而开展金属滞后回弹研究具有重要的工程意义。

对金属时间依赖性行为的研究始于 20 世纪 40 年代。Zener 撰写了《金属的粘滞性》一书, 首次定义并明确了金属粘弹性 (viscoelasticity) 和滞弹性 (anelasticity) 的区别^[3]。1972 年, A. S. Nowick 明确将金属的粘弹性与金属内耗相区分^[4]。目前, 对于 3 种基本晶体结构(体心立方(bcc)、面心立方(fcc)以及密排六方(hcp))金属的室温滞后回弹现象均有报道。H. Lim^[5]、D. X. E^[6]等人分别对 bcc 结构的双相钢和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管进行了滞后回弹研究; J. F. Wang^[2]等人研究了几种铝合金(fcc)的蠕变与滞后回弹; B. Li^[7]等人研究了 AZ31 镁合金(hcp)三点弯卸载后的滞后回弹角。对于 α (hcp)纯钛和 α (hcp)/ β (bcc)钛合金, 在低于屈服强度 $R_{p0.2}$ 以下的应力水平即可呈现明显的时间依赖性室温蠕变^[8]。然而, 目前对钛合金室温滞后回弹的相关研究还鲜有报道。

基于上述讨论, 为探明 TC4 钛合金是否具有滞后回弹效应, 在均匀塑性变形区和准静态加载应变率中分别选取滞后回弹实验的预应变和加载应变率, 以测试

不同加载历史对滞后回弹的影响。同时结合光镜(OM)和透射电镜(TEM)等测试方法, 对不同加载历史试样进行组织分析, 探讨影响滞后回弹变化的微观机理。

1 实 验

实验所用 TC4 钛合金板的化学成分依据 GB/T 3620.1-2007, 其中氧元素质量分数低于 0.20%。实验所用设备为 WDS-10T 万能电子试验机。试样取样方向平行于轧制方向, 平行长度 70 mm, 标距长度 50 mm, 原始宽度 15 mm, 原始厚度 1.6 mm。引伸计分辨率为 0.001 mm。

首先对 TC4 钛合金板进行单向拉伸测试, 以获取基本力学性能参数。滞后回弹实验分为 2 组, 第 1 组是不同预应变滞后回弹实验; 第 2 组为不同加载应变率滞后回弹实验。不同预应变实验的预应变分别为 2%、5%、8% 和 10%。试样编号分别为 PI-2、PI-5、PI-8 和 PI-10, 其中字母 P 代表塑性加载; 第 2 个字母 I 代表滞后回弹实验; 数字代表拉伸预应变。各实验加载应变率均为 $1.709 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 加载过程的数据采集方式采用实验设备既定采集频率 1.85 s^{-1} 。加载至预应变后, 立即卸载。当试样与下夹头完全脱离时, 记录引伸计所示位移作为滞后回弹初始位移。后续的数据采集方法如下: 在每次示数发生变化时, 若示数变化后稳定, 记录稳定值和变化瞬时时刻; 若示数波动, 取波动值的平均值, 并记录其瞬时时刻。不同加载应变率实验的应变率分别为 1.709×10^{-4} 、 9.061×10^{-4} 和

收稿日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51175044)

作者简介: 孙 帅, 男, 1986 年生, 博士生, 北京理工大学材料学院, 北京 100081, E-mail: 369339690@qq.com

$1.810 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 各实验的预应变均为 5%, 实验数据采集方法与预应变实验相同。

将预应变实验和应变率实验的各试样磨样后采用机械抛光。金相腐蚀液配比为 H_2O : 88 mL, HNO_3 : 10 mL 以及 HF : 2 mL。金相测试设备为 Zeiss Z10 光学显微镜。同时对原始样、PI-5 以及 PI-10 试样进行 TEM 测试。TEM 试样制备采用双喷电解抛光的制样方法。TEM 测试设备为 JEM-2100F 透射电镜, 加速电压为 200 kV。

2 结果与分析

2.1 应力-应变曲线

图 1 为 TC4 钛合金板单向拉伸实验的应力-应变曲线, 加载应变率为 $1.709 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 其中黑色和红色曲线分别为工程应力-应变曲线和真应力-应变曲线。可知, TC4 钛合金板具有较高的屈服强度和抗拉强度, 而加工硬化和塑性较低。基本力学性能如下: 弹性模量 E 为 102 GPa, 屈服强度 $R_{p0.2}$ 为 964 MPa, 抗拉强度 R_m 为 1057 MPa, 屈强比为 0.912, 最大力总延伸率 A_{gt} 为 7.71%, 强度系数 K 为 1388.6 以及加工硬化指数 n 为 0.0763。PI-2、PI-5、PI-8 和 PI-10 试样的预应变标于真应力-应变曲线上, 如图 1 所示。

2.2 不同预应变实验的滞后回弹

室温下 PI-2、PI-5、PI-8 和 PI-10 试样的滞后回弹应变-时间曲线如图 2 所示。各曲线在前 2 h 内均具有较高的回复速率, 之后随着时间的延长, 回复速率逐渐降低。滞后回弹应变接近饱和时的时间为弛豫饱和时间。PI-2、PI-5、PI-8 和 PI-10 试样的弛豫饱和时间依次标记为 t_{PI-2} 、 t_{PI-5} 、 t_{PI-8} 以及 t_{PI-10} , 如图 2 所示。可知, 当预应变较低时, t_{PI-5} 大于 t_{PI-2} ; 而当预应变较高时, t_{PI-10} 低于 t_{PI-8} , 并且均高于 t_{PI-2} 以及 t_{PI-5} , 因而弛豫饱和时间随着预应变的提高呈现先增大后减小的趋势。

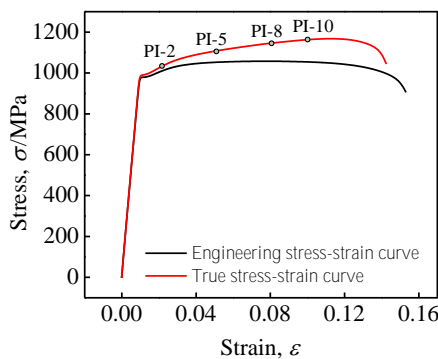


图 1 单向拉伸应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves in uniaxial tension

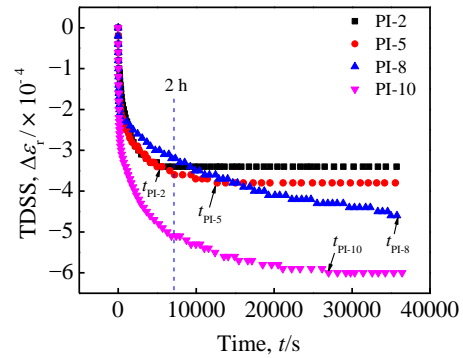


图 2 不同预应变的滞后回弹应变-时间曲线

Fig.2 Time-dependent springback strains varying with time under different pre-strains

滞后回弹应变(TDSS)为负值表示试样尺寸减小, 为便于说明回弹程度的大小, 滞后回弹应变均以其绝对值进行讨论。将图 2 中各曲线累积 10 h 的滞后回弹应变随预应变的变化示于图 3。可知, 滞后回弹应变随预应变的提高呈现指数增长: PI-5 和 PI-8 试样的滞后回弹应变分别相对于 PI-2 和 PI-5 试样增长了 11.7% 和 18.4%; 当预应变达到 10% 时, PI-10 试样的滞后回弹应变增长明显, 增幅达到 33.3%。基于上述变化特点, 对图 3 中实验数据采用指数函数进行拟合, 拟合结果为:

$$\Delta \epsilon_r = [3.336 + 0.05302 \times \exp(\epsilon_0 / 0.02556)] \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中, $\Delta \epsilon_r$ 为滞后回弹应变; ϵ_0 为预应变。

2.3 不同应变率实验的滞后回弹

图 4 为不同加载应变率的滞后回弹应变随时间的变化曲线。各曲线的弛豫饱和时间依次标记为 t_A 、 t_B 以及 t_C , 如图 4 所示。可知, 弛豫饱和时间随加载应变率的提高, 也呈现先增大后降低的趋势。

图 5 为滞后回弹应变绝对值随加载应变率的变化

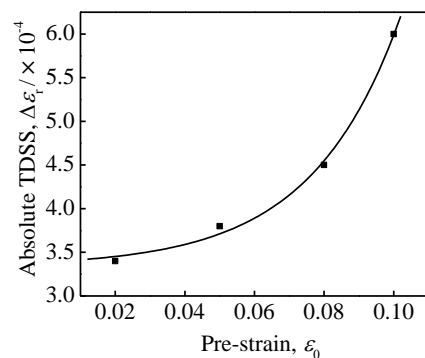


图 3 滞后回弹应变绝对值随预应变的变化曲线

Fig.3 Absolute value of time-dependent springback strain varying with pre-strain

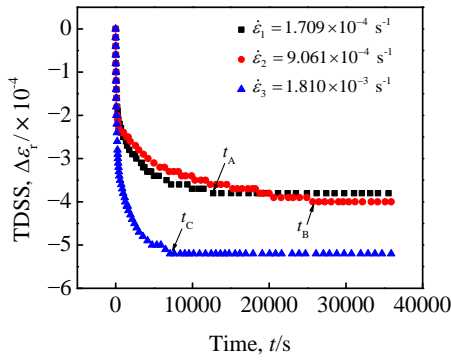


图 4 不同加载应变率的滞后回弹应变-时间曲线

Fig.4 Time-dependent springback strains varying with time under different loading strain rates

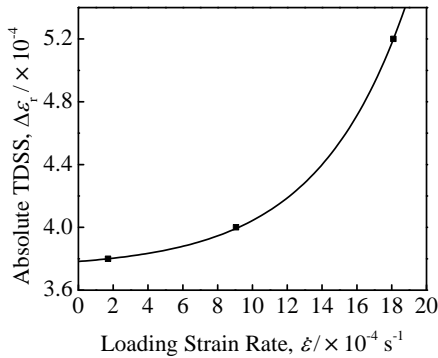


图 5 滞后回弹应变绝对值随加载应变率的变化曲线

Fig.5 Absolute value of time-dependent springback strain varying with loading strain rate

曲线。可知, 当加载应变率为 $9.061 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时, 10 h 累积的滞后回弹应变为 4.0×10^{-4} , 略高于加载应变率为 $1.709 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时的 3.8×10^{-4} 。当加载应变率进一步增加到 $1.810 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, 滞后回弹应变为 5.2×10^{-4} , 相较于前一加载应变率有 30% 的增幅。因而滞后回弹应变随加载应变率的提高也呈现指数增长的趋势。采用指数函数对上述变化规律进行拟合, 拟合结果为:

$$\Delta \epsilon_r = [0.04409 \times \exp(\& \times 0.000517) + 3.7386] \times 10^{-4} \quad (2)$$

式中, $\&$ 为加载应变率。

2.4 组织分析

图 6a 为 TC4 原始试样的光镜组织, 其中 α (hcp) 相为浅色相, β (bcc) 相为深色相^[9]。可知, 原始组织中 α 与 β 两相分布均匀, 晶粒尺寸细小, 分别约为 3 和 1 μm 。图 6b~图 6d 分别为 PI-2、PI-5 和 PI-8 试样卸载后的 OM 组织, 加载方向沿水平方向。可知, 随预应变的增大, β 相呈“流线型”分布的组织增多。这说明在较高预应变下, 基体 α 相内位错增殖以及更多的滑移系开动, 沿加载方向产生较大的应变, 因而使 β 相随 α 相变形呈“流线型”分布; 同时, “流线型”组织与“非流线型”组织之间的应变梯度将产生与滞后回弹相关的几何必须位错(GNDs)^[7,10]。

图 7a 和图 7b 分别为不同加载应变率试样的 OM 组织。可知, 随加载应变率的增大, β 相呈流线分布的组织也增多。将试样的组织形貌(图 6 和图 7)与滞后回弹应变(图 3 和图 5)对应可知, “流线型”组织与滞后回弹应变具有一定的相关性, 即“流线型”组织增多, 滞后回弹应变的绝对值增加。

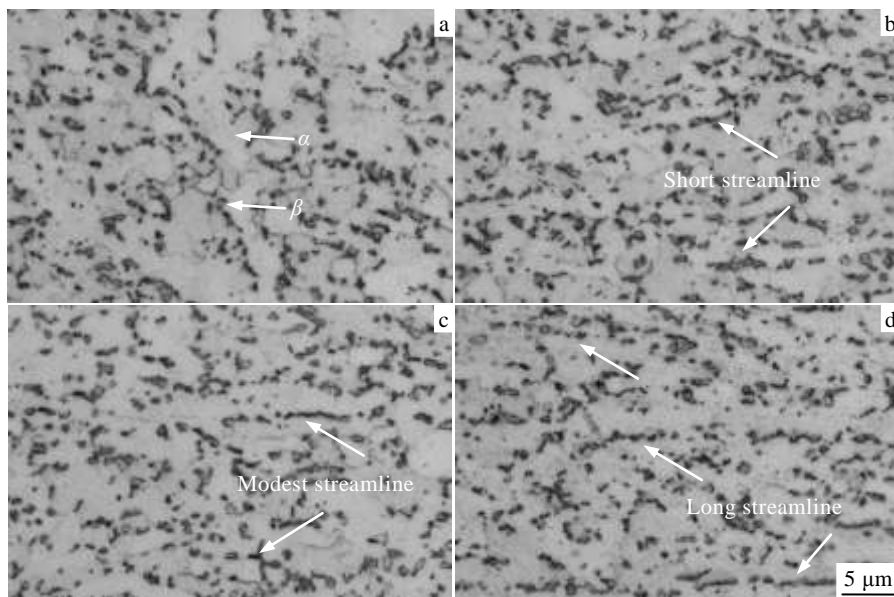


图 6 不同预应变试样的光镜组织

Fig.6 Optical microstructures of original (a), PI-2 (b), PI-5 (c) and PI-8 (d) samples for TC4 titanium alloy

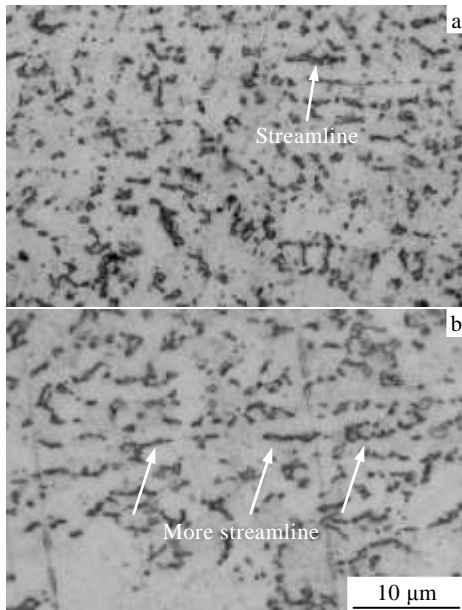


图 7 不同加载应变率试样组织

Fig.7 Optical microstructures of samples under $9.061 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (a) and $1.810 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ loading strain rates (b)

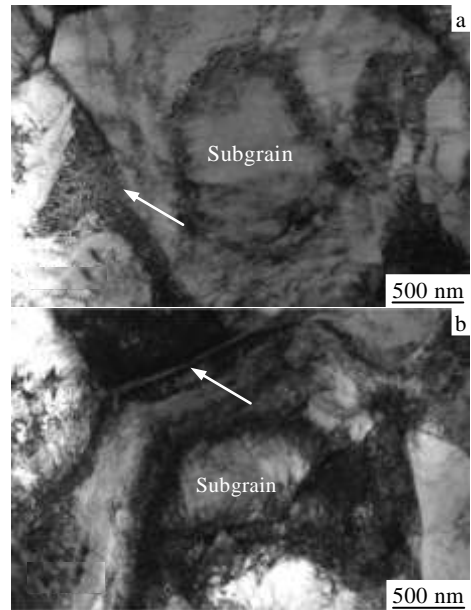


图 8 TC4 试样卸载后的透射电镜组织形貌

Fig.8 Transmission electron micrographs of PI-5 (a) and PI-10 (b) samples after unloading

PI-5 和 PI-10 试样卸载后的透射电镜组织形貌分别如图 8a 和图 8b 所示。可见，两者在晶界处均存在位错塞积，如图中箭头所示；并且在晶内存在由位错塞积所形成的亚胞结构，这种低能态结构由位错的增殖和交互作用形成。预应变的提高加剧了组织内部的应力集中，使 PI-10 试样的位错塞积程度进一步增加，亚胞组织的胞壁增厚，如 8b 所示。而这种由应力集中导致的位错塞积，为 TC4 钛合金的滞后回弹提供了必要条件^[11]。

由于塑性变形和滞后回弹在时间上为前后 2 个相邻过程，通常认为滞后回弹机理为卸载前塑性变形机理的相反过程^[7,8]，即滑移系中可动位错的反向运动为滞后回弹行为的主要机理。预应变的提高使组织内的 GNDs 进一步增殖并形成了更高位错密度的位错塞积结构，因而卸载后有更多的位错参与反向运动，使滞后回弹应变随预应变的提高而增大。

同时，由于 TC4 钛合金具有 hcp 结构的 α 相，在塑性变形过程中，易产生变形孪晶。通过进一步观测 PI-5 和 PI-10 试样的透射电镜组织，发现组织中含有如图 9a 和图 9b 所示的孪晶形貌。可知，预应变的提高在一定程度上增加了试样组织内的孪晶数量，但 PI-10 试样中的孪晶厚度与 PI-5 试样相近，均在 50 nm 左右。这是由于应力的提高促进了孪晶的形核，但在室温拉伸变形过程中，孪晶的生长由孪晶界附近的氧原子从晶格的八面体间隙跃迁所控制，为速率受限的

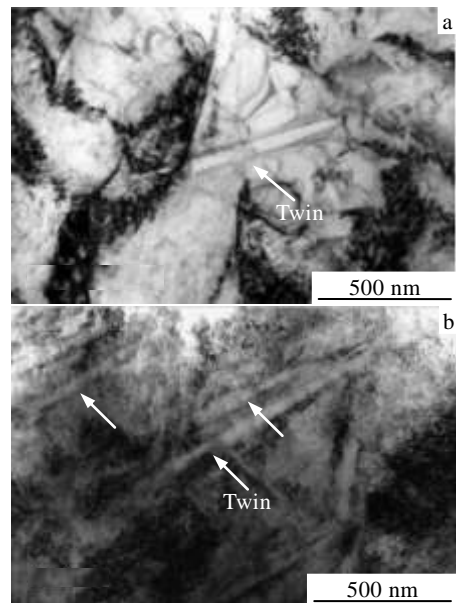


图 9 TC4 试样卸载后的孪晶形貌

Fig.9 Deformation twin in transmission electron micrographs of PI-5 (a) and PI-10 (b) samples after unloading

生长机制^[12]。同时，由于晶粒细小，单位体积内的晶界数量多，增加了孪晶形核后的生长阻力，因而预应变的提高没有明显增加 PI-10 试样中的孪晶厚度。

在试样卸载后的滞后回弹过程中，变形孪晶进行去孪晶过程(或称孪晶回复)^[13,14]，已跃迁的氧原子回

跃至晶格的八面体间隙。这一过程同样受氧原子的跃迁速率控制, 继而产生相应的滞后回弹应变。综上所述, 预应变提高了孪晶数量使更多的孪晶参与去孪晶过程, 进一步增大了不同加载条件下滞后回弹应变的差异。

3 结 论

1) 具有 $\alpha(\text{hcp})/\beta(\text{bcc})$ 两相的 TC4 钛合金在经历塑性变形和卸载后具有明显的滞后回弹效应。

2) 在实验条件下, 滞后回弹应变具有预应变和加载应变率敏感性, 随预应变和加载应变率的升高均呈现指数性增长; 而相应的弛豫饱和时间呈现先增大后减小的变化趋势。

3) 预应变的提高使试样组织内的位错增殖、亚胞壁增厚、孪晶以及“流线型”组织增多。因此, TC4 钛合金的滞后回弹机理应以位错的反向移动和反孪晶机制为主。

参考文献 References

- [1] Wagoner R H, Lim H, Lee M G. *Int J Plasticity*[J], 2013, 45(45): 3
- [2] Wang J F, Wagoner R H, Carden W D *et al.* *Int J Plasticity*[J], 2004, 20(12): 2209
- [3] Zener C. *Elasticity and Anelasticity of Metals*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1948: 3
- [4] Nowick A S, Berry B S. *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*[M]. New York: Academic Press, 1972: 21
- [5] Lim H, Lee M G, Sung J H *et al.* *Int J Plasticity*[J], 2012, 29(1): 42
- [6] E D X, Liu Y F. *Mater Des*[J], 2010, 31(3): 1256
- [7] Li B, McClelland Z, Horstemeyer S J *et al.* *Mater Des*[J], 2015, 66: 575
- [8] Michael E K, Kamia S. *J Mater Res Technol*[J], 2014, 3(3): 280
- [9] Wyatt Z W, Joost W J, Zhu D *et al.* *Int J Plasticity*[J], 2012, 39: 119
- [10] Haghshenas M, Klassen R J. *Mater Sci Eng A*[J], 2013, 586: 249
- [11] Savage M F, Neeraj T, Mills M J. *Metall Mater Trans A*[J], 2002, 33(3): 891
- [12] Oberson P G, Ankem S. *Int J Plasticity*[J], 2009, 25(5): 881
- [13] Wu L, Jain A, Brown D W *et al.* *Acta Mater*[J], 2008, 56(4): 688
- [14] Oberson P G, Wyatt Z W, Ankem S. *Scripta Mater*[J], 2011, 65(7): 638

Time-Dependent Springback for TC4 Titanium Alloy at Room Temperature

Sun Shuai, E Daxin

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The time-dependent springback and anelastic behavior of TC4 titanium alloy were investigated as functions of time, prescribed strain and loading strain rate by universal testing machine. In order to infer its basis, the microstructures of samples under different loading conditions were examined by optical microscope (OM) and transmission electron microscope (TEM). The results reveal that the absolute values of time-dependent springback strain (TDSS) accumulating in 10 h both present exponential growth, as the prescribed strain and loading strain rate rise. The OM and TEM results show that the evolutions of “streamline” microstructure, dislocation pile-up, and deformation twin have positive correlation with the change law of TDSS.

Key words: TC4 titanium alloy; tensile deformation; time-dependent springback; deformation twin

Corresponding author: E Daxin, Ph. D., Professor, School of Materials, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68913877, E-mail: daxine@bit.edu.cn