

预应变对 TA2 钛板室温滞后回弹的影响

孙 帅, 鄂大辛

(北京理工大学, 北京 100081)

摘 要: 为探明室温下不同预应变对 TA2 钛板滞后回弹的影响, 采用万能试验机进行了不同预应变的滞后回弹实验。预应变分别取自均匀塑性变形区、分散性失稳区以及集中性失稳区。拉伸变形组织采用 OM 和 TEM 进行表征。结果表明, TA2 钛板卸载后的滞后回弹效应明显, 均匀变形区和失稳区的滞后回弹应变(TDSS)累积值随预应变的提高分别以不同的指数规律增长。组织分析表明, 孪晶数量与 TDSS 变化规律相关; 失稳区的加载历史对 TDSS 和弛豫饱和时间 t_P 产生了一定影响。

关键词: TA2 钛板; 拉伸预变形; 滞后回弹; 塑性失稳

中图法分类号: TG146.2*3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)12-3739-05

钛与钛合金、镁合金以及铝合金等轻质合金板材在现代工业中的应用越来越广泛。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]。滞后回弹效应在生产实践中会影响零部件的装配精度, 同时相关的机理研究也将深化人们对塑性应变稳定性的认知。因而, 开展金属滞后回弹研究具有重要的工程与理论意义。

目前, 已公开报道了高强钢^[3]、铝合金^[4]以及镁合金^[5]的室温滞后回弹研究。而对于具有低密度、高强度和耐腐蚀等诸多优良特性的钛和钛合金, 相关的滞后回弹研究还极少。同时, 由于受大多数材料的室温流变特性所限制, 已报道的室温滞后回弹实验所采用的预应变主要集中于均匀塑性变形区。而将材料加载至塑性失稳区后, 材料内部将不再为单轴应力状态, 并且试样的承载能力降低。而在失稳区的加载历史对滞后回弹影响的研究还未见报道。

由于 α -钛在较低应力水平下即可呈现明显的时间依赖性室温蠕变^[6]。同时, α -TA2 钛板在经历最大载荷点后的失稳区内, 仍具有良好的流变特性。这一变形特点利于研究失稳区的预应变对 α -TA2 滞后回弹应变(TDSS)的影响规律。基于上述讨论, 为探明 α -TA2 是否具有滞后回弹效应, 分别在均匀塑性变形区、分散性失稳区以及集中性失稳区中选取适当的应变作为滞后回弹实验的预应变, 以测试不同塑性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)测试方法, 对不同预应变加载的试样进行微观组织分析, 以探讨滞后回弹应变的变化机理。

1 实 验

实验所用 TA2 钛板的化学成分依据 GB/T 3620.1-2007, 其中氧元素质量分数低于 0.25%。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 1.5 mm。引伸计分辨率为 0.001 mm。

首先对 TA2 钛板进行单向拉伸测试, 以获取其室温下的基本力学性能和塑性流变特性。滞后回弹实验的预应变分别取 2%、5%、8%、10%、13%、15%、17%、20%、22% 以及 25%, 试样编号分别为 PI-2、PI-5、PI-8、PI-10、PI-13、PI-15、PI-17、PI-20、PI-22 以及 PI-25, 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} 。当加载至预应变后, 为避免卸载时由于横梁惯性对试样的反向加载, 统一将载荷卸载至约 2 kN 时, 立即松开下夹头。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的初始位移。在每次引伸计示数变动时, 记录位移和时刻, 每一组实验的测试时间持续 10 h。

将不同预应变加载试样磨样后采用机械抛光。金相腐蚀液配比为 $\text{H}_2\text{O}: 88 \text{ mL}$ 、 $\text{HNO}_3: 10 \text{ mL}$ 以及 HF:

收稿日期: 2016-12-15

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, 电话: 010-68913877, E-mail: 624608@bit.edu.cn

2 mL。金相测试设备为 Zeiss Z10 光学显微镜。同时对原始样、PI-10 以及 PI-20 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 TA2 钛板单向拉伸试验的应力-应变曲线，加载应变率为 $1.709 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。图 1 中红线代表真实应力-应变曲线，黑线代表工程应力-应变曲线。可知，TA2 纯钛具有良好的强度和塑性。无屈服平台、加工硬化率低。TA2 与其他金属较明显的区别为：均匀变形阶段较短，应变约占总应变的 1/4；而进入分散性失稳区后，TA2 抵抗集中性失稳的能力较强，失稳区内应变约占总应变的 3/4，利于在失稳区进行预加载。TA2 基本力学性能如下：弹性模量 (E) 为 110 GPa，屈服强度 ($R_{p0.2}$) 为 301 MPa，抗拉强度 (R_m) 为 374 MPa，屈强比为 0.805，最大力总延伸率 A_{gt} 为 8.29%，强度系数 K 为 530 以及加工硬化指数 n 为 0.106。各试样的预应变标于真实应力-应变曲线上，如图 1 所示。Keeler 与 Backofen 对于单向拉伸应力-应变曲线，所提出的分散性失稳和集中性失稳的条件分别为^[7,8]：

$$\epsilon_d = n \tag{1}$$

$$\epsilon_1 = 2n \tag{2}$$

式中， ϵ_d 和 ϵ_1 分别为分散性失稳和集中性失稳所对应的初始应变， n 为加工硬化指数。由式(1)和式(2)可知， ϵ_d 和 ϵ_1 分别为 0.106 和 0.212。如图 1 所示，代表 ϵ_d 和 ϵ_1 的 2 条铅垂线将塑性变形区域分成 3 个部分：均匀塑性变形区(第 I 阶段)、分散性失稳区(第 II 阶段)以及集中性失稳区(第 III 阶段)。

2.2 滞后回弹应变与时间的关系

图 2 为 TA2 钛板在不同预应变下的滞后回弹应变随时间的变化曲线，其中滞后回弹应变(TDSS)为负值

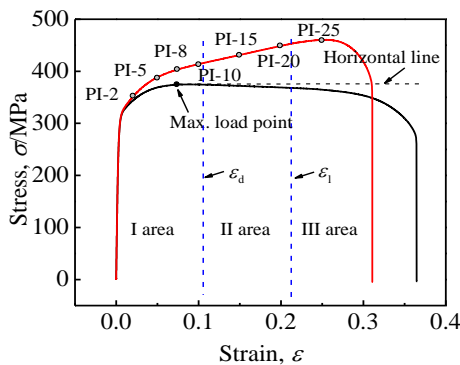


图 1 TA2 钛板单向拉伸应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of TA2 titanium uniaxial tension

表示试样尺寸减小。由图 2 可知，各滞后回弹曲线随时间的变化趋势均呈现指数衰减。在前 2 h 的弛豫时间内具有较高的应变回复速率，为主要的应变回复阶段，随后应变回复速率逐渐降低。从滞后回弹应变-时间曲线中可提取 2 个表征滞后回弹行为的特征参数：一是弛豫 10 h 末的滞后回弹应变的累积值 $\Delta \epsilon_{r10}$ ；二是滞后回弹应变接近饱和时的弛豫饱和时间 t_{IP} 。对上述 2 个特征参数随预应变的变化规律分别讨论如下。

2.3 滞后回弹应变与预应变的关系

为便于比较不同预应变的滞后回弹量，将累积 10 h 的滞后回弹应变绝对值 $\Delta \epsilon_{r10}$ 随预应变变化的数值示于图 3。可知，PI-5 试样的 $\Delta \epsilon_{r10}$ 相较于 PI-2 试样仅有 12.5% 的小幅增长。而预应变 ϵ_0 增加到 8% 接近最大载荷点时， $\Delta \epsilon_{r10}$ 有 55.6% 的明显增幅。 $\Delta \epsilon_{r10}$ 在均匀塑性变形区和失稳区的变化规律以预应变 10% 为界，按不同的指数规律变化。进入分散性失稳区后，随预应变的提高， $\Delta \epsilon_{r10}$ 的增幅较小。PI-17 的 $\Delta \epsilon_{r10}$ 相比于 PI-13，仅有 11% 的增幅。而进入 ϵ_1 所代表的集中性失稳区后， $\Delta \epsilon_{r10}$ 的增幅较为明显。PI-25 的 $\Delta \epsilon_{r10}$ 相比于 PI-22，增幅已达到 16%。综上所述， $\Delta \epsilon_{r10}$ 在均匀变形区和集中性失稳区的增幅较为明显，而在分散性失稳区的增幅较小。同时， $\Delta \epsilon_{r10}$ 在 ϵ_1 附近的变化规律连贯，所以对 2 个不同失稳区采用同一指数函数拟合。对均匀塑性变形区和失稳变形区的拟合结果分别为式(3)和式(4)：

$$\Delta \epsilon_r = (0.659 \exp(\epsilon_0/0.05) + 2.088) \times 10^{-4} \tag{3}$$

$$\Delta \epsilon_r = (0.0533 \exp(\epsilon_0/0.06) + 6.724) \times 10^{-4} \tag{4}$$

2.4 弛豫时间与预应变的关系

定义 $\Delta \epsilon_{r10}$ 的 98% 为弛豫饱和应变 $\Delta \epsilon_{IP}$ ，因而有

$$\Delta \epsilon_{IP} = 0.98 \Delta \epsilon_{r10} \tag{5}$$

式中， $\Delta \epsilon_{IP}$ 所对应的时刻即为弛豫饱和时间 t_{IP} ，将图 2 中的各曲线采用式(6)进行拟合：

$$\Delta \epsilon_r(t) = A_1 \exp(-t/t_1) + A_2 \exp(-t/t_2) + A_0 \tag{6}$$

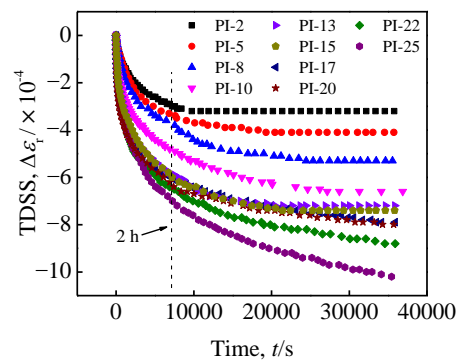


图 2 TA2 钛板不同预应变的滞后回弹应变-时间曲线

Fig.2 Time-dependent-springback strains varying with time of TA2 titanium under different pre-strains

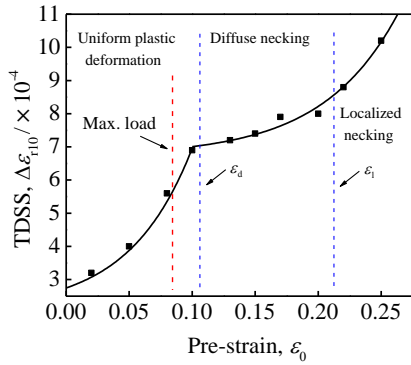


图 3 TA2 钛板滞后回弹应变 $\Delta\epsilon_{r10}$ 随预应变的变化曲线
Fig.3 Time-dependent-springback strain $\Delta\epsilon_{r10}$ variation of TA2 titanium with pre-strain

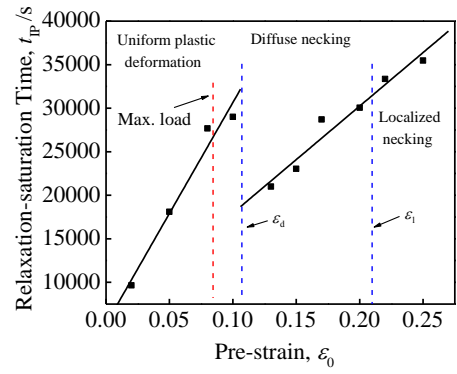


图 4 TA2 钛板弛豫饱和时间 t_{IP} 随预应变的变化曲线
Fig.4 Relaxation-saturation time t_{IP} variation of TA2 titanium with pre-strain

式中, A_0 、 A_1 、 A_2 、 t_1 和 t_2 为待定的最优拟合系数。将式(5)代入经过拟合的式(6), 即可得弛豫饱和时间 t_{IP} 。图 4 为不同预变形的 t_{IP} 随预应变的变化曲线。可知, t_{IP} 随预应变的变化规律与 $\Delta\epsilon_{r10}$ 有所不同。 t_{IP} 在均匀变形区接近线性增长, PI-8 的 t_{IP} 相比于 PI-5 增幅约 53%; 当预应变达到 10% 时, 即超过最大载荷点时, 增幅明显降低, 仅为 5%。当预应变进一步增至 13% 超过 ϵ_d 时, t_{IP} 首次出现下降, PI-13 的 t_{IP} 相比于 PI-10 降幅约 27%。 t_{IP} 在失稳区内随预应变的提高, 也呈线性增长规律。 t_{IP} 在 ϵ_i 附近呈稳定增长趋势, 因而将分散性失稳区和集中性失稳区采用同一线性函数进行拟合。对均匀塑性变形区和失稳变形区的拟合结果分别为式(7)和式(8):

$$t_{IP} = 254566\epsilon_0 + 5193 \tag{7}$$

$$t_{IP} = 122950\epsilon_0 + 5653 \tag{8}$$

2.5 OM 组织

图 5a 为 TA2 钛板原始试样的光镜组织形貌。可知, 组织为等轴晶, 晶粒尺寸约 20 μm , 孪晶组织极少。图 5b~5f 依次为 PI-5、PI-8、PI-10、PI-15 以及 PI-25 试样卸载后的光镜组织形貌。可知, 随预应变的提高, 晶粒内部出现条纹状孪晶并且孪晶数量逐渐增多, 这些条纹状孪晶有些相互平行, 有些互成一定角度, 如图中箭头所示。由图 5f 可知, 当预应变达到 25% 时, 晶粒产生明显的拉长变形, 孪晶大量增殖。与图 3 对比可知, $\Delta\epsilon_{r10}$ 和孪晶数量均随预应变的提高而增长, 因而两者变化规律呈现一定的相关性。

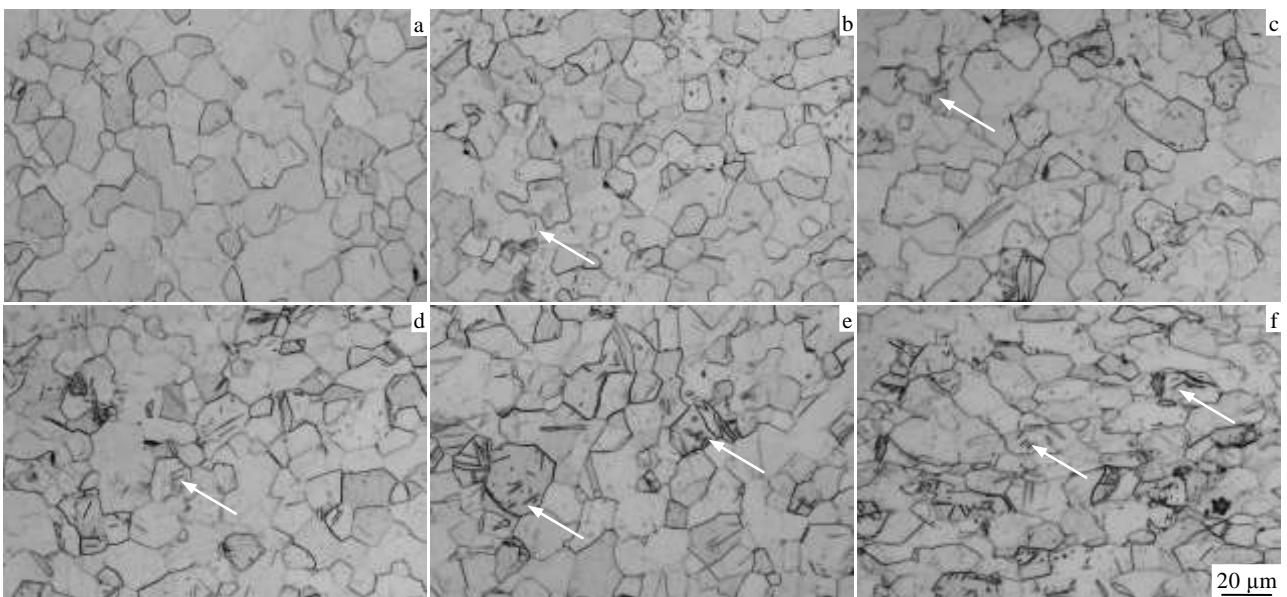


图 5 不同预应变 TA2 钛板试样卸载后的光镜组织

Fig.5 Optical microstructures of original (a), PI-5 (b), PI-8 (c), PI-10 (d), PI-15 (e) and PI-25 (f) samples after unloading

B. Li^[9]等人认为密排六方(hcp)结构的变形金属在滞后回弹过程中,除了位错的反向运动机理,还存在已变形孪晶所进行的反孪晶机理。在残余应力和孪晶界面能的作用下,已跃迁的氧原子重回晶格的八面体间隙,引起孪晶晶格复位转动实现孪晶界的迁移,进而产生滞后回弹应变。上述机理可以较好地解释 $\Delta\epsilon_{r10}$ 在不同变形区随预应变的总体变化规律。然而对进入分散性失稳区的初期, $\Delta\epsilon_{r10}$ 被弱化的增长趋势以及 t_{IP} 出现下降的变化趋势还不能充分解释。因而需对失稳区的试样做进一步的透射电镜分析。

2.6 TEM 组织

图 6a 和图 6b 分别为 PI-10 和 PI-20 试样卸载后的透射电镜组织。可知,PI-10 试样组织内的位错与孪晶相互作用,并且贯穿厚度约 50 nm 的孪晶,如图 6a 箭头所示。在图 6b 所示的 PI-20 试样组织中,位错与孪晶界的交互作用使一部分位错组态穿过孪晶,而使另一部分位错组态在孪晶界面处产生了明显的偏折,如箭头所示。位错与孪晶界的交互和耦合作用也将耗散部分弛豫能量,从而降低滞后回弹应变和弛豫饱和时间。同时,图 1 中进入失稳区后的工程应力和加工硬化率的降低,也反映出位错塞积等硬化机制以及应

力集中程度的减弱。虽然位错与孪晶随预应变的提高进一步增殖,但由于上述弱化机制的影响,使失稳区对驱动位错和氧原子扩散的残余应力以及孪晶界面能的提高程度有限^[10-12],从而减缓了滞后回弹应变的增长和弛豫。

3 结 论

1) α -TA2 在室温下经历单向拉伸塑性变形后,呈现出较为明显的滞后回弹现象。滞后回弹应变率在回弹初期较高,随后逐渐降低。

2) 累积 10 h 的滞后回弹应变绝对值 $\Delta\epsilon_{r10}$ 在均匀塑性变形区和失稳区分别以不同的指数规律增长;而弛豫饱和时间 t_{IP} 在预应变接近加工硬化指数时明显降低。

3) 预应变的提高使变形孪晶增殖,因而更多的孪晶参与卸载后的反孪晶过程,使滞后回弹应变增长。而进入失稳区的加载历史以及卸载后位错与孪晶的交互耦合作用,影响了滞后回弹应变和弛豫饱和时间的变化规律。

参考文献 References

- [1] Wagoner R H, Lim H, Lee M G. *Int J Plasticity*[J], 2013, 45: 3
- [2] E D X, Liu Y F. *Mater Des*[J], 2010, 31(3): 1256
- [3] Lim H, Lee M G, Sung J H et al. *Int J Plasticity*[J], 2012, 29(1): 42
- [4] Wang J F, Wagoner R H, Carden W D et al. *Int J Plasticity*[J], 2004, 20(12): 2209
- [5] Munitz A, Kaufman M J. *J Mater Sci*[J], 2013, 48(15): 5361
- [6] Oberson P G, Wyatt Z W, Ankem S. *Scripta Mater*[J], 2011, 65(7): 638
- [7] Keeler S P, Backofen W A. *Trans ASM*[J], 1963, 56: 25
- [8] Hill R(希尔). *The Mathematical Theory of Plasticity*(塑性数学理论)[M]. Beijing: Science Press, 1966: 332
- [9] Li B, McClelland Z, Horstemeyer S J et al. *Mater Des*[J], 2015, 66: 575
- [10] Wu L, Jain A, Brown D W et al. *Acta Mater*[J], 2008, 56(4): 688
- [11] Zhou W, Chew K G. *J Mater Sci*[J], 2002, 37(23): 5159
- [12] Hughes D A, Hansen N, Bammann D J et al. *Scripta Mater*[J], 2003, 48(2): 147

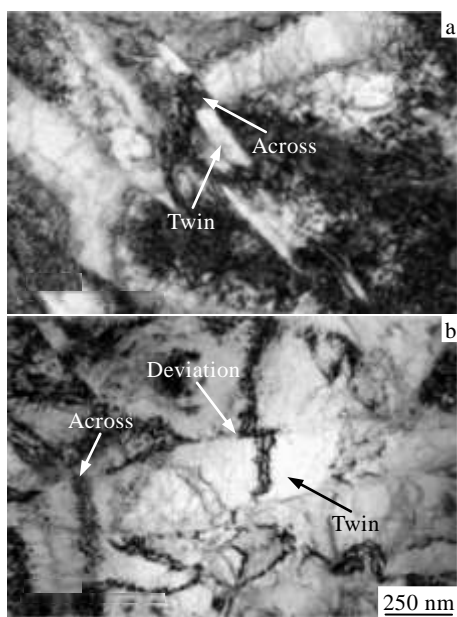


图 6 试样卸载后的透射电镜组织

Fig.6 TEM images of PI-10 (a) and PI-20 (b) samples after unloading

Effect of Pre-Strain on the Time-Dependent Springback of TA2 Titanium at Room Temperature

Sun Shuai, E Daxin

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to reveal the effect of pre-strain on the time-dependent springback, the TA2 titanium sheets were drawn under different pre-strains by the universal testing machine. The microstructures of the tested samples were both characterized by optical microscope and transmission electron microscope to infer the basis of the anelastic behavior. The results show that the time-dependent response of TA2 is obvious. The time-dependent-springback strain (TDSS) presents different exponential change laws in different plastic deformation zones. Both the TDSS and the amount of deformation twin increase as the pre-strain goes up. The loading history and the interaction between dislocation and twin affect the TDSS and the relaxation-saturation time t_{IP} .

Key words: TA2 titanium; tensile deformation; time-dependent springback; plastic necking

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