

# TA2 丝材循环拉伸力学性能研究

简思聪, 段伟, 关耀威\*

(广东省科学院工业分析检测中心, 广东 广州 510650)

**摘要:** 为了研究循环载荷频次与力学行为之间的关系, 通过试验对比了单轴拉伸与不同循环载荷次数下退火态 TA2 的力学性能。结果表明: 在循环载荷 20 次范围内, TA2/M 断后伸长率会随循环载荷次数的增多而增大; 随着载荷的不断循环, 材料晶粒位错密度逐渐增加、几何必要位错得到不断积累, 使得 TA2/M 塑性变形阶段的拉伸应力出现缓慢上升; 同时, 由于塑性变形阶段加工硬化率的急剧下降, 在颈缩阶段背应力和有效应力均呈现下降趋势。

**关键词:** TA2; 工业纯钛; 循环拉伸; 背应力; 抗拉强度

**中图分类号:** TG146.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9981(2022)05-0861-04

**引文格式:** 简思聪, 段伟, 关耀威. TA2 丝材循环拉伸力学性能研究[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(5): 861-864.

JIAN Sicong, DUAN Wei, GUAN Yaowei. Study on Mechanical Properties of TA2 Wire in Cyclic Tensile[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(5): 861-864.

TA2(金属牌号)是按工业纯钛的所含杂质元素等级划分而得, 其杂质含量及力学性能一般都介于 TA1 和 TA3 之间。与其他金属材料相比, 其具备良好的比强度、抗冲击、焊接性、抗腐蚀、生物兼容等性能, 因此在船舶制造、航天航空、生物医疗等重要工业科技领域中具有巨大使用价值<sup>[1-2]</sup>。在材料的日常工业应用中, 零件材料难免会受到循环载荷, 以致影响整个部件的使用安全。近几十年来, 国内外学者在各种材料循环载荷的力学行为及仿真模拟方面已有一些研究, 但在循环载荷频次与力学行为关联关系方面却少有论述。本文以 TA2 为研究对象,

考虑循环载荷次数对材料力学性能的影响, 通过对比测试, 得到 TA2 材料在不同次数的循环载荷下力学性能数据并对其进行分析。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

选取直径为 3 mm、硬度为 148.3 HV0.1 的工业纯钛(TA2)丝材, 以其为研究对象, 化学成分按照 GB/T 4698 采用化学元素滴定法测得, 结果列于表 1。

表 1 TA2(工业纯钛)的化学成分

Table 1 Chemical composition of TA2 (industrial pure titanium)

| 成分     | Fe    | C     | H      | O     | N     | Ti |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|----|
| 含量 w/% | ≤0.20 | ≤0.05 | ≤0.012 | ≤0.18 | ≤0.03 | 余量 |

### 1.2 实验方法

将 TA2 材料放置于 1000 °C 高温炉中保温 1 h 后

空冷处理, 获得退火态试样 TA2/M。对试样横向和纵向截面分别取样进行抛光, 然后用氢氟酸+硝

收稿日期: 2022-01-23

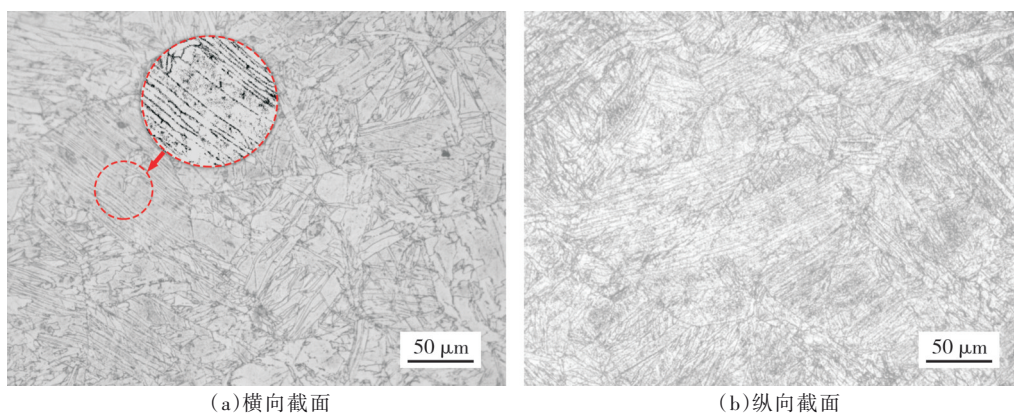
基金项目: 广州市基础与应用基础研究项目(202102020626); 广州市对外科技合作计划项目(201907010004)

作者简介: 简思聪(1996-), 男, 广东河源人, 本科, 学士, 主要从事金属力学、表面处理方面检测及研究工作, Email: 644354418@qq.com。

通信作者: 关耀威(1994-), 男, 广东佛山人, 硕士研究生, 主要从事金属力学及表面处理方面的检测及研究工作, Email: gyw8778@163.com。

酸+水溶液(体积比为2:1:17)进行侵蚀,获得TA2/M金相试样,利用Leica DM-4000M正置金相显微镜仪器对其观察。图1为试样TA2/M的显微

金相结构。从图1可见,在三维空间出现魏氏 $\alpha$ 相,其为层片集束形式,这是由于形核长大过程中 $\beta$ 相向低温同素异构 $\alpha$ 转变的一种产物。



(a) 横向截面

(b) 纵向截面

图1 TA2/M显微金相结构

Figure 1 The optical microstructure of TA2/M

将单轴拉伸与不同循环载荷次数下的退火态TA2的力学性能进行对比研究。拉伸及循环载荷实验的位移速率均为 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,循环载荷实验在应变0.5%时开始,每次经过等量应变后采用力控制进行卸载至0 N,再重新加载,依次循环,直至试样断裂。

## 2 结果与讨论

对单轴拉伸及循环载荷下TA2/M在屈服后期—塑性变形—紧缩阶段的材料力学行为进行了研

究,其应力-应变曲线如图2所示。从图2可见:TA2/M单轴拉伸强度为431 MPa,循环载荷10次的TA2/M试样的抗拉强度为425 MPa,而循环载荷20次的TA2/M试样的抗拉强度为421 MPa;随着循环加载次数的增多,塑性变形阶段的拉伸应力出现缓慢上升,这是由于TA2丝材在循环载荷过程中位错发生了相应的滑移,原有晶粒被拉长,位错密度增加且几何必要位错得到不断积累;循环载荷后的TA2/M相比单轴拉伸,材料的断后伸长率也有明显增加,在循环载荷20次范围内,断后伸长率会随循环载荷次数的增多而增大。

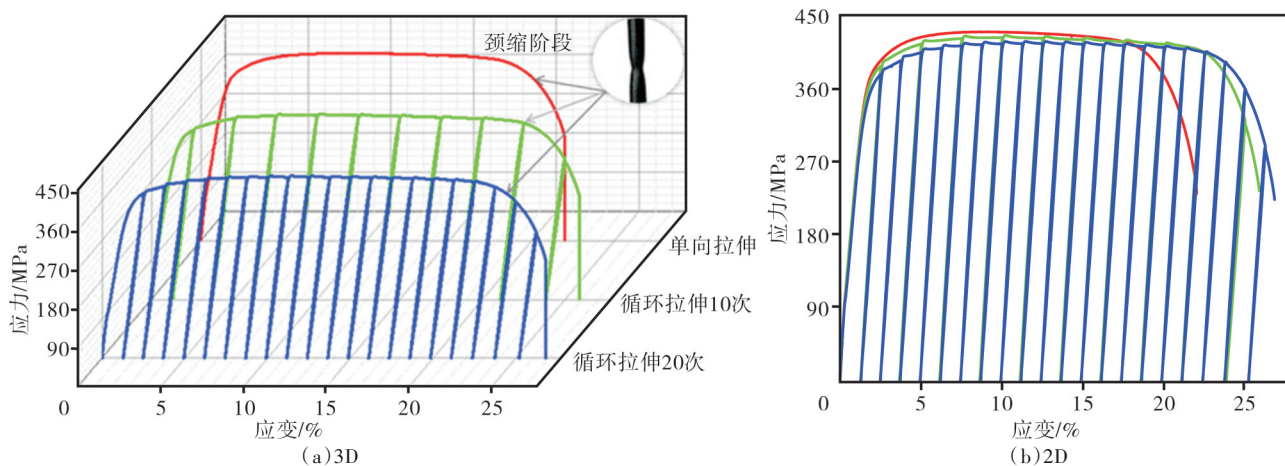


图2 TA2/M试样单轴拉伸及循环加载的应力-应变曲线

Figure 2 Stress-strain curves of TA2/M uniaxial tension and cyclic loading

图3为背应力和有效应力计算关系示意图,表示在循环载荷20次过程中的一个应力幅。其中, $\sigma_r$

为循环载荷过程中的加载屈服应力、 $\sigma_u$ 为卸载应力<sup>[3-5]</sup>、 $\sigma_{\text{flow}}$ 为流变应力,影响应力幅的主要因素是有

效应力  $\sigma_{\text{eff}}$  和背应力  $\sigma_{\text{back}}$ , 他们的计算关系如下面公式所示<sup>[6]</sup>。

$$\sigma_{\text{back}} = \frac{\sigma_r + \sigma_u}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{flow}} - \sigma_{\text{back}} \quad (2)$$

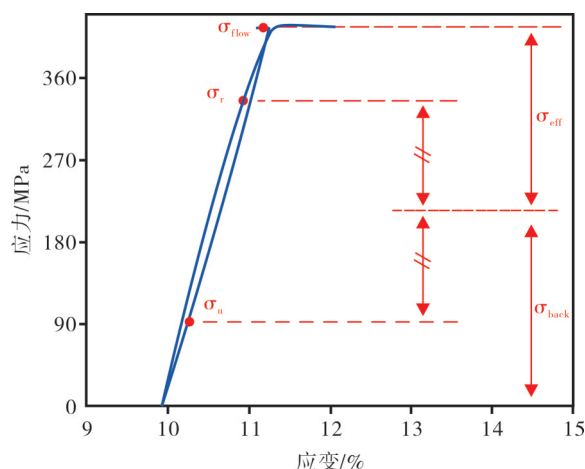


图3 背应力和有效应力计算关系示意图

Figure 3 Schematic for calculating back stress and effective stress

图4为背应力和有效应力随应变变化的曲线。从图4可见,在屈服点附近时有效应力和背应力相当,在塑性变形阶段(应变大于0.5%)背应力对流

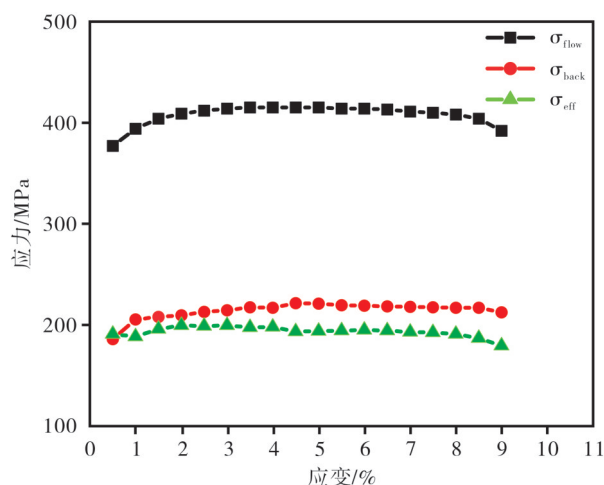


图4 背应力和有效应力随应变变化的趋势

Figure 4 Back stress and effective stress vary with the tensile strain

变应力的影响逐渐大于有效应力,在颈缩阶段背应力和有效应力均呈现下降趋势,这是因为加工硬化率在塑性变形阶段就已经急剧下降。

### 3 结论

(1)对比单轴拉伸与不同循环载荷次数下TA2/M的力学性能发现,循环载荷后的TA2/M相比单轴拉伸的断后伸长率明显增加,且在循环载荷20次范围内断后伸长率会随循环载荷次数的增多而增大。

(2)由于TA2丝材在循环载荷过程中位错发生了相应的滑移,原有晶粒被拉长,位错密度增加且几何必要位错得到不断积累,因此随着循环加载次数的增多,TA2/M的塑性变形阶段的拉伸应力出现缓慢上升。

(3)由于TA2/M在塑性变形阶段加工硬化率的急剧下降,使得材料在颈缩阶段背应力和有效应力均呈现下降趋势。

### 参考文献:

- [1] 刘以波, 徐锋, 姚雷, 等. TA2工业纯钛连续冷却过程中 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变的原位观察[J]. 机械工程材料, 2011, 35(1): 26-28.
- [2] PACHLA W, KULCZYK M, PRZYBYSZ S, et al. Effect of severe plastic deformation realized by hydrostatic extrusion and rotary swaging on the properties of CP Ti grade [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221(2): 255-268.
- [3] JIN X, ZHOU Y, ZHANG L, et al. A novel  $\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{41}\text{Al}_{19}$ , eutectic high entropy alloy with excellent tensile properties[J]. Mater Lett, 2018, 216: 144-146.
- [4] JIN X, BI J, ZHANG L, et al. A new  $\text{CrFeNi}_2\text{Al}$  eutectic high entropy alloy system with excellent mechanical properties [J]. J Alloy Compd, 2019, 770: 655-661.
- [5] YANG M X, PAN Y, YUAN F P, et al. Back stress strengthening and strain hardening in gradient structure [J], Mater Res Lett, 2016 (4): 1-7.
- [6] MOAN G D, EMBURY J D. A study of the baushinger effect in Al-Cu alloys [J]. Acta Metall, 1979, 27: 903-914.

## Study on Mechanical Properties of TA2 Wire in Cyclic Tensile

JIAN Sicong, DUAN Wei, GUAN Yaowei\*

(Center for industrial Analysis and Testing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between cyclic loading frequency and mechanical behavior, the mechanical properties of annealed TA2/M under uniaxial tension and cyclic tensile with different frequencies were compared by experiments. Within the range of 20 cycles loads, the elongation after fracture of TA2/M increased with the increase of cyclic loading times. With the continuous cycle of load, the dislocation density of the material grains increased gradually, and the necessary geometric dislocations accumulated, making the tensile stress in the plastic deformation stage of TA2/M increase slowly. At the same time, due to the sharp decrease of the work hardening rate in the plastic deformation stage, both the back stress and effective stress presented a downward trend in the necking stage.

**Keywords:** TA2; industrial pure titanium; cyclic stretching; back stress; tensile strength

(学术编辑:宋琛)