

低弹钛合金弹性模量的无损评价

Nondestructive Evaluation of Elastic Property of Titanium Alloy with Low Elastic Modulus

李 萍, 郝静燕, 赵 杰, 段洪涛

(大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

LI Ping, HAO Jing-yan, ZHAO Jie, DUAN Hong-tao

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

摘要: 以掠入射纵波法研究了超声波在 Ti6Al4V 合金和 Ti27Nb8Zr 时效样品中的传播速度, 推算其弹性模量, 并与拉伸法获得的弹性模量进行比较。结果发现: 两种方法测得的数值较为接近, 相差仅为 3.6%, 表明掠入射纵波法实现低弹钛合金弹性模量的无损评价是可行的, 这为小尺寸稀有合金样品弹性指标的评价提供了极有价值的测试方法。应用该方法进一步考察了时效温度对 Ti18Nb7Zr 弹性模量的影响, 结果表明: 随着时效温度的升高, 弹性模量 E , 切变模量 G , 体弹模量 K 分别增加 11%、10% 和 6%, 泊松比 σ 仅下降了 1.2%。分析认为: 弹性模量的变化与合金的组织由层片状的 $\beta + \alpha$ 向弥散分布的 α 相和 β 相的转变密切相关。

关键词: 低弹钛合金; 声速; 掠入射纵波法; 弹性模量

中图分类号: TG14 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)06-0036-04

Abstract: The ultrasonic velocities of Ti6Al4V and Ti27Nb8Zr aging samples were measured by longitudinal grazing incidence method, the elastic modulus were deduced and compared with those obtained by means of tensile method. It was found that these two methods showed comparable results, the changing range was only 3.6%, which indicated that it was feasible to evaluate the elastic property of titanium alloy with low elastic modulus by longitudinal grazing incidence method. It is valuable for the elastic evaluation of rare alloy with small dimension. Effect of aging temperature on the elastic modulus of Ti18Nb7Zr was observed by this method. The results showed that, with much higher aging temperature, elastic modulus E , shear modulus G and bulk modulus K increased 11%, 10% and 6% respectively, whereas, Poisson's ratio σ only decreased 1.2%. It is thought that the varied elastic modulus is closely related to the transformation from lamellar $\beta + \alpha$ phase to dispersed α phase and β phase.

Key words: titanium alloy with low elastic modulus; ultrasonic velocity; longitudinal grazing incidence method; elastic modulus

弹性模量是描述弹性阶段材料力学行为的性能指标, 是表征材料力学特性的重要参数之一, 决定了材料一系列的物理力学性能^[1]。利用材料的弹性模量可以确定构件的刚度, 推测材料的强度、硬度等力学性能。

以钛、铌、锆等稀有元素制备的近 β 型低弹钛合金因具有很好的热处理强化效果、良好的抗蠕变性能及成型性, 成为钛合金研究与开发中最具活力的热点之一, 并且被广泛应用于军事、商业、航天及医药等重要领域^[2]。现有的文献中关于钛合金弹性模量的测量大多是通过计算拉伸应力-应变曲线上弹性变形段的斜率得到的^[3-7], 由于拉伸试验用试样尺寸一般比较大, 实验方法具有破坏性, 这将造成资源的巨大浪费。因

此, 有必要研究钛合金弹性模量的无损评价。

本工作介绍了一种适用于小尺寸钛合金弹性模量测量的方法, 利用该方法测得 Ti6Al4V 和不同时效温度下 Ti27Nb8Zr 的弹性模量, 将其与拉伸法测量结果进行比较。应用该方法进一步测量不同时效温度下 Ti18Nb7Zr 的弹性模量, 结合金相组织分析讨论弹性指标的变化。

1 实验

1.1 试样的制备

实验用 Ti6Al4V 和 Ti27Nb8Zr 试样均由工厂提

供。Ti6Al4V 加工工艺为凝壳铸态-热轧-拉棒材-700℃退火, Ti27Nb8Zr 加工工艺为熔炼-热轧-固溶-时效处理。

将海绵钛、纯铌板、海绵锆等原材料在有氩气保护的真空非自耗电弧炉中熔炼 3~4 次得到 Ti18Nb7Zr 合金。因铸造应力的存在, 可能导致性能不稳定, 故对试样进行固溶处理, 即将试样在 800℃保温 50~60min, 然后水淬。为进一步提高合金的强度, 继续对固溶合金进行了时效处理。将固溶处理的试样分别在 350、450、550℃温度下时效 12h, 然后在空气中冷却。所有热处理过程均在井式真空加热炉中进行, 充氩气保护。

将经过时效处理的 Ti18Nb7Zr 合金切取并加工成尺寸为 $\phi 3\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的圆柱体, 对上下表面进行磨削和抛光使其平行, 用于超声波速度测量。

1.2 小尺寸样品弹性模量的测量

金属材料一般可以看作各向同性的连续介质, 由于在样品中传播的超声波视为弹性波, 当它的波长远小于材料的尺寸时, 可把材料看作无限大的弹性介质。依据声波在各向同性、连续均匀固体介质中的传播规律, 可推得样品的弹性指标^[8]:

$$E = \frac{\rho v_s^2 (3v_l^2 - 4v_s^2)}{v_l^2 - v_s^2} \quad (1)$$

$$G = \rho v_s^2 \quad (2)$$

$$K = \rho (v_l^2 - \frac{4v_s^2}{3}) \quad (3)$$

$$\sigma = (v_l^2 - 2v_s^2) / (2(v_l^2 - v_s^2)) \quad (4)$$

其中: ρ 为样品的密度; v_l 为纵波声速; v_s 为横波声速; E 为弹性模量; G 为剪切模量; K 为体弹性模量; σ 为泊松比。

由公式(1)~(4)可知, 只要确定了声速, 利用密度和速度即可计算弹性模量(E)、剪切模量(G)、体弹性模量(K)和泊松比(σ)。

1.2.1 掠入射纵波法测量超声波的传播速度

如图 1 所示, 圆柱形试样长为 L , 直径为 D , 实验采用单发单收的超声脉冲反射法。声脉冲在棒中的传播路径如图 1 所示^[9]。

样品端部靠近侧边的纵波直探头激发的沿侧壁传播的纵波 P_i 称为掠入射纵波, 现代声学理论和实验证实, P_i 将产生以第三临界角 θ 传播的横波 SV , 称为临界入射横波^[10]。入射到另一侧壁的 SV 波也反射出沿侧壁爬行的纵波 P_r , 它也以纵波声速 v_l 沿侧壁传播。同掠入射纵波 P_i 相比, 迟到声程为 l (横波的传播声程为 $l \sin \theta$), 延迟时间为 τ , 延迟声程 $l = v_l \tau$ 。结合反射定律 $v_s = v_l \sin \theta$, 可以推出横波声速的表达式

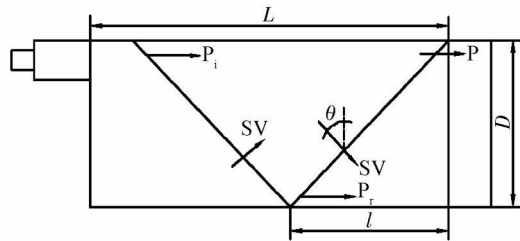


图 1 掠入射纵波在棒中的传播路径示意图

Fig. 1 Grazing incidence longitudinal wave in cylinder

为:

$$v_s = \frac{v_l}{\sqrt{1 + \cot^2 \theta}} = \frac{v_l}{\sqrt{1 + (\frac{v_l \tau}{D})^2}} \quad (5)$$

1.2.2 密度测量

室温下基于阿基米德原理, 采用精度为 0.1mg 的电子天平测量各个试样的密度。每个试样反复测量 3 次, 求得其平均值。

考虑到实验所用试样直径较小, 聚焦探头具有改善声束指向性与提高声能等方面的特性, 故采用超声水浸聚焦法测量声速。此外, 实验采用标称频率为 5MHz 的超声波纵波探头, 焦斑直径不超过 0.6mm, 故每个样品上可以测量 6 点, 所得结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 基于声速法和拉伸法测量弹性模量

应用 1.2 介绍的方法测量超声波在 Ti6Al4V 和 Ti27Nb8Zr 时效样品中传播速度, 利用公式(1)~(4)推算其弹性模量, 另采用常规的拉伸试验法获得上述样品的弹性模量。为便于比较, 测试结果一并显示在图 2、3 上。从图 2、3 可以看出两种方法的测试结果较为接近, 相差不超过 3.6%, 且声速法测得的动态弹性模量略大于拉伸法测得的静态弹性模量, 这与文献[11]中的结论一致, 因此采用纵波掠入射法无损评价 Ti 合金弹性模量是可行的。

2.2 时效温度对 Ti18Nb7Zr 合金微观组织的影响

Ti18Nb7Zr 钛合金的 XRD 图谱与微观组织如图 4、5 所示。固溶处理后的微观组织由 $\beta + \alpha''$ 相组成; 随后的时效过程中, 亚稳定相 $\beta + \alpha''$ 进一步分解。350℃时效, 亚稳 β 相分解为无数极小的溶质原子贫化区及其相邻的溶质原子富化区, $\beta_{\text{富}}$ 转变为稳定的 β 相, $\beta_{\text{贫}}$ 中有针状的 α 相形核长大; 与此同时, α'' 相发生快速分解, 先析出 α 相, 使 α'' 中的稳定元素富化, 变成 $\alpha''_{\text{富}}$, 然后转变成亚稳态的 β 相, 对应该温度下的时效组织为层片状的 $\beta + \alpha$; 进一步提高时效温度至 450℃, 先期

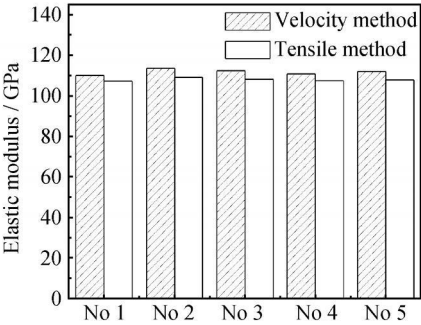


图 2 声速法和拉伸法测得的 Ti6Al4V 的弹性模量
Fig. 2 Elastic modulus of Ti6Al4V obtained by velocity method and tensile method

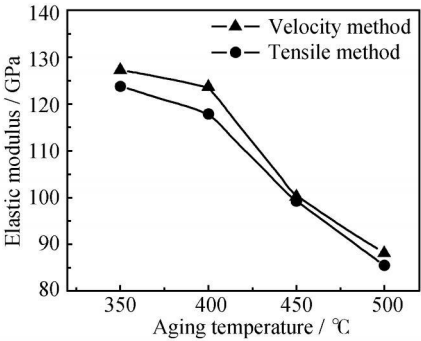


图 3 声速法和拉伸法测得的 Ti27Nb8Zr 的弹性模量
Fig. 3 Elastic modulus of Ti27Nb8Zr obtained by velocity method and tensile method

析出的 α 相聚集, 针状物变得更为粗大, 时效组织呈现出篮网状形态; 550 °C 时效时, 从 α'' 相中析出的 α 相获得了足够的驱动力重新形核形成了长针状的 α 相, 而 $\beta_{\text{贫}}$ 形成了短小针状的 α 相, 时效组织由弥散分布的 $\alpha + \beta$ 相形成。

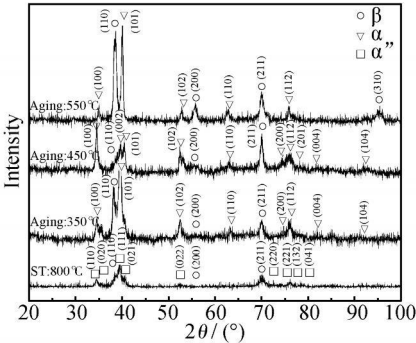


图 4 Ti18Nb7Zr 合金不同热处理后 XRD 谱
Fig. 4 XRD patterns of Ti18Nb7Zr after various heat treatments

2.3 时效温度对 Ti18Nb7Zr 弹性模量的影响

弹性模量反映了材料的一种本质特征, 表征原子间结合力的大小。凡是影响金属原子间结合力的因素都会影响弹性模量, 主要有温度、相变、合金成分以及晶体结构^[12]。

对应不同时效温度下 Ti18Nb7Zr 合金弹性模量的变化如图 6 所示。随时效温度的升高弹性模量呈缓

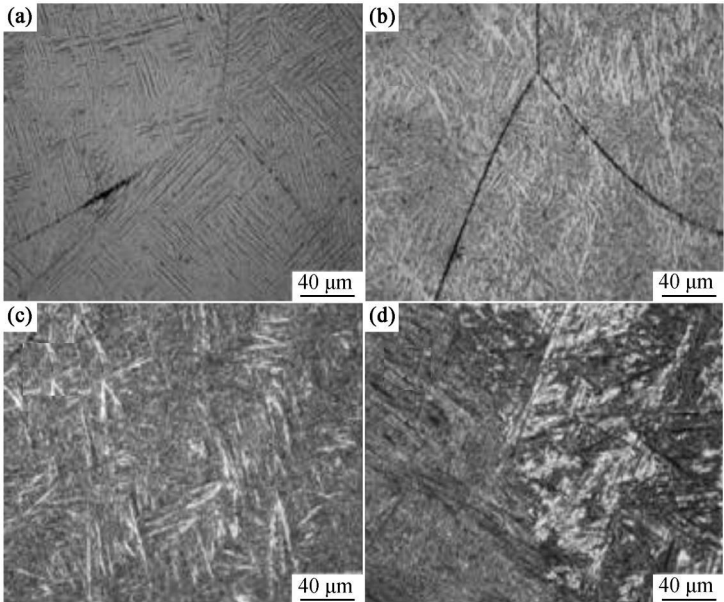


图 5 Ti18Nb7Zr 合金不同热处理后的微观组织
(a) 固溶处理; (b) 350 °C 时效; (c) 450 °C 时效; (d) 550 °C 时效
Fig. 5 Microstructure of Ti18Nb7Zr after various heat treatments
(a) solution treatment; (b) aged at 350 °C; (c) aged at 450 °C; (d) aged at 550 °C

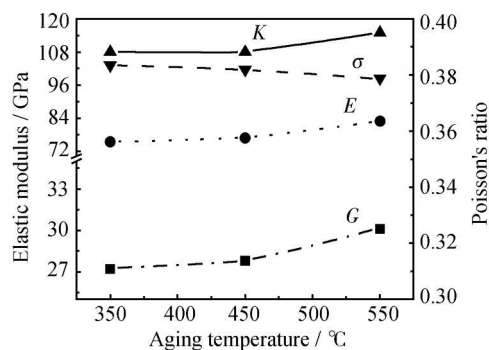


图6 弹性模量随时效温度的变化规律

Fig. 6 Relationship of elastic modulus and aging temperature

慢递增的趋势,泊松比变化相反。整个时效过程中,弹性模量 E 、切变模量 G 、体弹模量 K 分别增加 11%、10% 和 6%,而泊松比 σ 几乎未发生变化,仅降低 1.2%。

对应不同时效温度的微观组织虽然均由 $\beta + \alpha$ 相组成,但其形态差别较大。文献[13]指出:钛合金的弹性模量与合金所含相的种类、含量以及形态密切相关。基于此,分析认为:时效过程中, Ti18Nb7Zr 合金弹性模量的变化主要是由于不同时效温度下分解得到的相的形态存在差异。根据 Orowan 的弥散强化理论^[14],弥散分布的 $\alpha + \beta$ 相具有比层片状 $\beta + \alpha$ 组织更高的硬度,鉴于时效合金的强度和硬度及弹性模量之间有相同的变化趋势^[15],可以推断:实验条件下,微观组织由弥散分布的 $\alpha + \beta$ 相组成的 Ti18Nb7Zr 合金弹性模量较高。即时效温度升高时,弹性模量值增加。

3 结论

(1) 通过用声速法和拉伸法分别对 Ti6Al4V 和不同时效温度下 Ti27Nb8Zr 的弹性模量进行测量,比较发现:两种方法的测试结果较为接近,相差不超过 3.6%,且声速法测得的动态弹性模量略大于拉伸法测得的静态弹性模量,因此纵波掠入射法无损评价钛合金弹性模量是可行的,这为小尺寸稀有合金样品弹性指标的评价提供了极有价值的测试方法。

(2) 用纵波掠入射法对不同时效温度下 Ti18Nb7Zr 合金进行测量,结果表明:随着时效温度的升高,弹性

模量 E 、切变模量 G 、体弹模量 K 分别增加 11%、10% 和 6%,泊松比 σ 仅下降了 1.2%。分析认为:弹性指标的变化与合金的组织由层片状的 $\beta + \alpha$ 变为弥散分布 α 相和 β 相密切相关。

参考文献

- [1] 宋文远,王文明. 金属基复合材料弹性模量的研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20: 416–419.
- [2] 于洋,刘伟. 几种含铌低弹性模量钛合金组织与性能研究[J]. 稀有金属, 2004, 28(2): 419–420.
- [3] 张新平,于思荣,何镇明. 新型 Ti-Fe-Mo-Mn-Nb-Zr 系钛合金的力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12: 78–82.
- [4] ELIAS L M, SCHNEIDER S G, SCHNEIDER S. Microstructural and mechanical characterization of biomedical Ti-Nb-Zr(-Ta) alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 432: 108–112.
- [5] HAO Y L, LI S J, SUN S Y. Effect of Zr and Sn on Young's modulus and superelasticity of Ti-Nb-based alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 441: 112–118.
- [6] 贾庆卫,宁聪琴,丁冬雁. 低弹性模量骨科植入物材料 β 钛合金的研制与实验研究[J]. 中国矫形外科杂志, 2008, 16: 214–218.
- [7] 张志辉,王希哲,商顺利. 加工工艺对高弹高强钛合金弹性模量的影响[J]. 稀有金属, 2001, 25: 19–22.
- [8] B A 奥特尔. 固体中的声学和波[M]. 孙承平译. 北京: 科学出版社, 1982. 376–378.
- [9] 李丽. Cu-Zr-Al 系 Cu 基块状非晶合金弹性性能超声无损评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. 20–21.
- [10] 陈以方,张家骏. 超声检测工件弹性模量的研究[J]. 无损检测, 1997, 19(9): 241–244.
- [11] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.
- [12] 陈驊駉. 材料物理性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 244–248.
- [13] 薛松海. 生物工程用低弹性模量钛合金组织与性能的研究[D]. 沈阳: 机械科学研究院, 2006.
- [14] 徐祖耀,李鹏兴. 材料科学导论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986. 598–608.
- [15] 耿浩然. 铸造钛、轴承合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

收稿日期: 2009-06-15; 修订日期: 2010-02-20

作者简介: 李萍(1969—), 女, 副教授, 在职博士, 主要从事材料无损检测与评价, 联系地址: 大连理工大学材料科学与工程学院(116024), E-mail: liping69@dlut.edu.cn