

固溶处理对 Ti2448 合金低周疲劳性能的影响

张 强¹, 李述军¹, 张思倩², 郝玉琳¹, 杨 锐¹

(1.中国科学院 金属研究所, 沈阳材料国家(联合)实验室, 沈阳 110016;

2. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘 要: 研究室温下固溶处理对热轧态 Ti-24Nb-4Zr-8Sn(简称 Ti2448)合金在应变控制($R=0.1$)下的低周疲劳性能的影响。结果表明: 合金经(750℃, 30 min)固溶处理后(简称 SS), 形成再结晶组织, 该组织比热轧态合金的更均匀。与热轧态合金相同, SS 合金同样具有超弹性。SS 处理后, 合金具有较高的低周疲劳寿命, 并且在高应变幅下, 其低周疲劳性能较热轧态合金的好; 而在低应变幅下, 其低周疲劳性能比热轧态合金的稍差。XRD 分析表明, 随着应变幅的增加, α'' 相的析出含量增大。

关键词: 固溶处理; Ti2448; 低周疲劳; 超弹性; 循环软化

中图分类号: TG115.5+7

文献标志码: A

Effects of solid solution treatment on low cycle fatigue performance of Ti2448

ZHANG Qiang¹, LI Shu-jun¹, ZHANG Si-qian², HAO Yu-lin¹, YANG Rui¹

(1. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research,
Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;

2. Institute of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The studies effects of solid solution treatment on low cycle fatigue ($R=0.1$) controlled by the strain properties of Ti-24Nb-4Zr-8Sn (Ti2448) alloy at room temperature was investigated. The result shows that the alloy after (750 °C, 30 min) solid solution treatment (SS), the recrystallization organization forms, which is more uniform than that of the hot rolled state alloy. As the same as the hot rolled state alloy, the SS alloy also has super elasticity. After SS treatment, the alloy has the high life of low cycle fatigue (LCF), and presents higher LCF performance than that of hot rolled alloy at high strain amplitude. However, at low strain amplitude, the LCF performance of SS alloy is a bit poorer than that of hot rolled alloy. XRD analysis shows that with the increase of strain amplitude, the content of α'' precipitation increases.

Key words: solid solution treatment; Ti2448; low cycle fatigue; superelasticity; cyclic softening

近几十年来, 低模量钛合金在医疗器械领域的应用吸引了众多研究者的兴趣^[1-6]。在这些合金中, Ti-24Nb-4Zr-8Sn(质量分数, %)(简称 Ti2448)作为一种新型医用亚稳 β 钛合金, 具有高强度、低模量、良好的生物相容性、抗腐蚀性和超弹性等优良性能, 使其在医疗等领域有着广阔的应用前景^[7-8]。对于医用植入件, 其疲劳性能直接决定了其使用寿命。研究表明,

热轧态 Ti2448 合金比 Ti-40Nb-13Ta-5Zr(质量分数, %) (一种稳定 β 型线弹性钛合金)具有明显优异的低周疲劳性能^[9], 但由于其热轧态合金组织不均匀, 因此研究固溶处理对合金低周疲劳性能的影响很有必要。

本文作者研究固溶处理对热轧态 Ti2448 合金低周疲劳性能的影响, 并与热轧态合金进行了对比, 以期改善 Ti2448 合金低周疲劳性能提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51071152, 51271180, 51271182); 973 项目(2012CB933901, 2012CB619103, 2012CB933902)

收稿日期: 2013-07-28; **修订日期:** 2013-10-10

通信作者: 郝玉琳, 研究员, 博士; 电话: 024-83978841; E-mail: ylhao@imr.ac.cn

1 实验

所用试验材料是经过热处理后的热轧态 Ti2448 合金,其制备过程如下:以纯 Ti、纯 Nb、纯 Zr 和 Ti-Sn 中间合金为原料,用真空自耗熔炼炉经过 3 次熔炼获得直径为 140 mm 的 Ti-24Nb-4Zr-7.9Sn-0.13O 铸锭,然后在 850 °C 锻造为 55 mm 直径的棒材,将表面打磨后在 800 °C 进行热轧变形,轧成直径 12 mm 的棒材。再将热轧后的棒材经(750 °C, 30 min, AC)热处理。采用 AXiovert 200MAT 型金相显微镜观察热轧态以及热处理态的金相组织。用 D/MAX2400 型 X 射线衍射仪对合金进行相组成分析。循环拉伸试验在 Instron8872 拉伸疲劳试验机上进行,应变速率为 10^{-4} s^{-1} ,在每一个加载/卸载次序内其应变增量为 1%,直至最终的拉伸应变为 6%。低周疲劳实验在 Instron8872 拉伸疲劳试验机上进行,试验环境为室温大气,试验波形为三角波,试验频率均为 0.5 Hz,应变比为 0.1。

2 结果与分析

2.1 固溶处理后 Ti2448 合金的组织

由图 1 可以看出,热轧态合金有明显的组织,组织不均匀性明显。合金经过(750 °C, 30 min)固溶处理后,发生了再结晶,合金晶粒尺寸约为 50 μm ,组织变得更加均匀。

2.2 固溶处理后 Ti2448 合金的力学性能

由图 2 看出, Ti2448 合金的初始弹性模量为 45 GPa。固溶后初始弹性模量约为 42 GPa,热轧 Ti2448 合金与固溶后合金均随着外应力的增大表现出明显的非线性弹性变形行为。两者的可回复变形量大致都为 3%,这表明两种状态的合金均具有大的应变回复量的非线性变形特点。从图 2 看出,固溶处理后合金的可回复变形量较热轧态稍小,强度降低。

2.3 应变控制 Ti2448 合金低周疲劳性能

固溶态以及热轧态 Ti2448 合金在 $R=0.1$ 条件下的总应变幅 $\Delta\epsilon_t$ 以及通过半寿命滞后回线求得的塑性应变幅 $\Delta\epsilon_p$ 与低周疲劳载荷反向次数($2N_f$)之间的关系曲线如图 3 所示。由图 3 可见, Ti2448 合金的低周疲劳寿命随着外加总应变幅的增大而减小,疲劳寿命大致呈线性关系。与已报导其它钛合金相比较, Ti2448 合

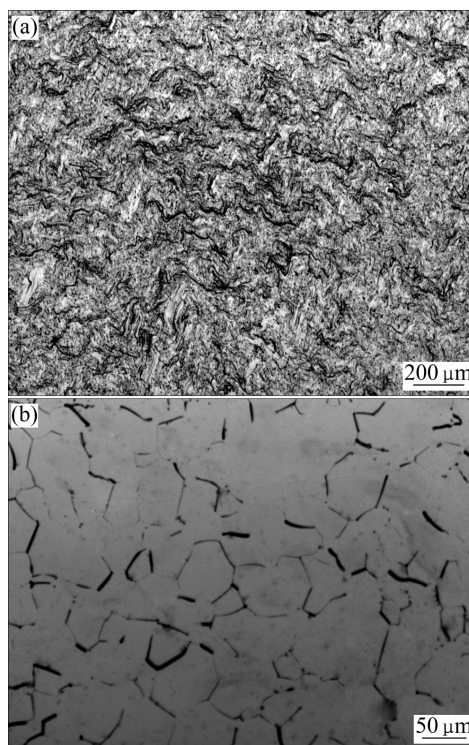


图 1 Ti2448 合金热轧态横截面(a)和 SS 横截面(b)金相照片

Fig. 1 Optical microscopies of cross section of Ti2448 alloys: (a) Hot rolled; (b) SS treated;

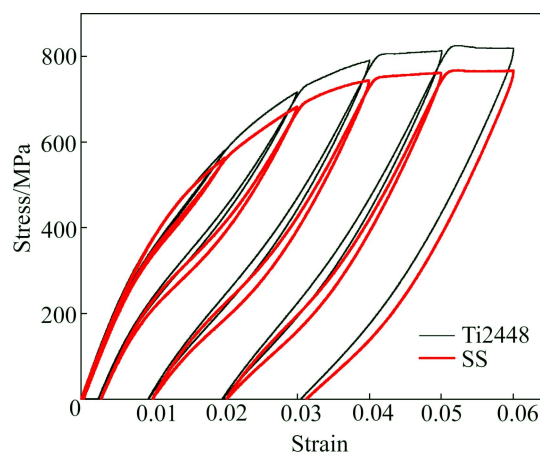


图 2 热轧态与 SS 态 Ti2448 合金的循环拉伸曲线

Fig. 2 Cyclic stress—strain of hot rolled and SS treated Ti2448 alloys at strain rate of 10^{-4} s^{-1}

金具有较高的低周疲劳寿命^[3],从图 3 亦可知,固溶处理后合金在高应变下的低周疲劳性能优于热轧态合金的,但在低应变下,低周疲劳寿命较热轧态的低。固溶态和热轧态 Ti2448 合金在不同峰值应变下的循环应力响应曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着循环周次的增加,固溶态以及热轧态合金均表现出循环软化的趋势。且峰值应变越大,合金循环软化现象

越明显, 合金在最终断裂前由于裂纹的失稳扩展而导致应力水平的急剧下降。

从图 3(b)可以看出, 当峰值应变 $\leq 3\%$ 时, 固溶态的塑性应变幅基本为 0, 表明合金在循环过程中不会

产生明显的宏观塑性变形, 这与合金具有超弹性变形行为有关; 当峰值应变继续增大时, 塑性应变幅有较明显的增大, 且固溶态塑性应变幅增大的幅度较热轧态大, 这从图 5 也可得到印证。从图 5 可看出, 当峰

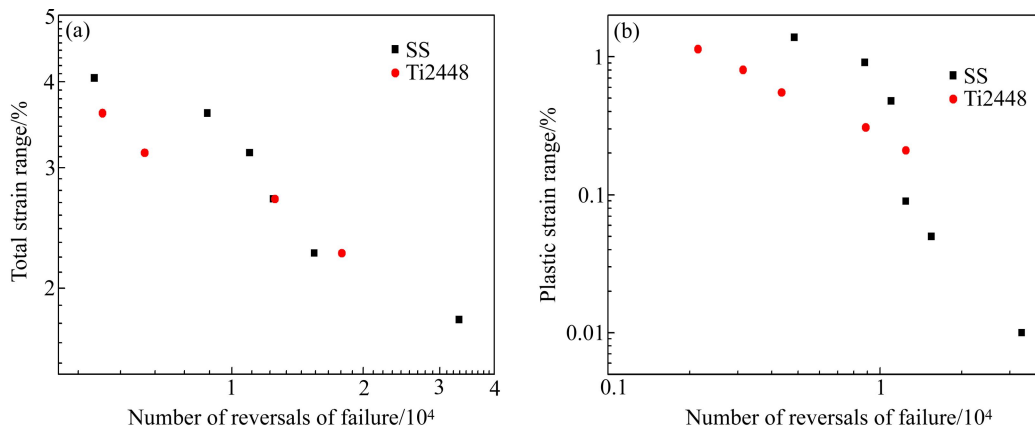


图 3 固溶态与热轧态 Ti2448 室温下的应变幅—寿命曲线

Fig. 3 Strain—life curves of solid solution treated and hot rolled Ti2448 alloys at room temperature: (a) Total cycle strain vs life; (b) Plastic strain vs life

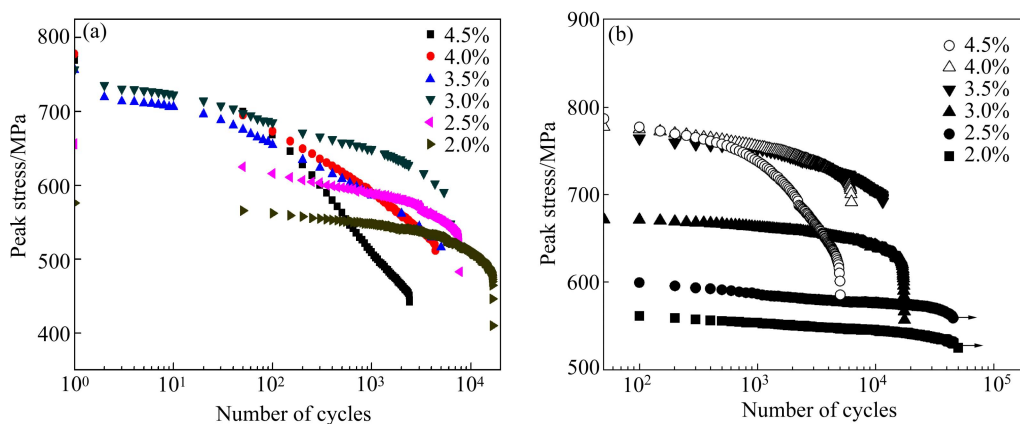


图 4 固溶态与热轧态 Ti2448 合金在 $R=0.1$ 时的循环应力响应曲线

Fig. 4 Curves of cyclic stress responses of solid solution treated (a) and hot rolled (b) Ti2448 alloys at $R=0.1$

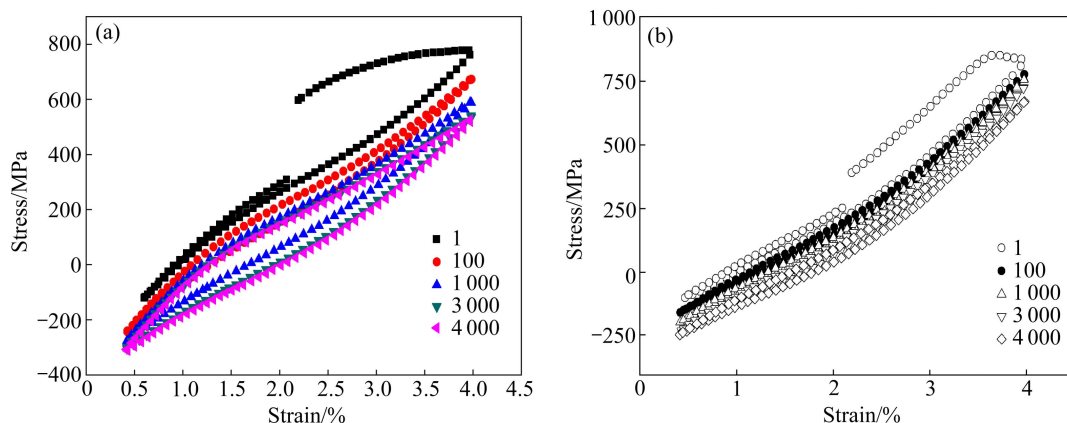


图 5 固溶与热轧态 Ti2448 合金在应力比为 $R=0.1$ 时的滞后回线

Fig. 5 Curves of maximum cycle strain of 4% of solid solution treated (a) and hot rolled (b) Ti2448 alloys at $R=0.1$

值应变变为 4% 时, 滞后环面积随着循环周次的增大而增大, 从以上可以说明塑性变形累积损伤随着峰值应变与循环周次的增加而增加。从图 5 的循环滞后回线可以看出, 应力与应变之间并不呈严格的直线关系, 这与合金的非线性弹性变形行为不无关系。

2.4 低周疲劳过程中的合金相转变分析

对固溶态以及低周疲劳试验后的样品进行 XRD 分析, 发现随着应变的增加, α'' 相的析出增多。高应变下 α'' 的形成是合金发生软化的原因之一, 从 β 相峰的位置看, 随着最大应变的变化, 其掠射角略有变化, 说明在低周疲劳的过程中 β 相发生了晶格畸变, 其点阵常数发生了略微的变化。

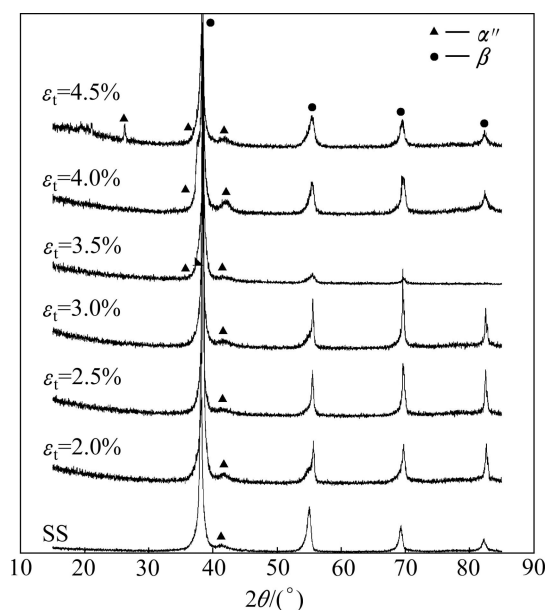


图 6 固溶态和低周疲劳态样品的 XRD 谱

Fig. 6 XRD patterns of solid solution treated and low cycle fatigue state samples

3 结论

1) Ti2448 合金经过(750 °C, 30 min)固溶处理后, 合金发生了再结晶, 晶粒尺寸变大, 显微组织变均匀, 强度有所降低, 但仍然保留了超弹性变形能力。

2) 固溶处理后的合金在高应变下的低周疲劳性能优于热轧态合金的, 但在低应变下的寿命较热轧态合金的低。

3) 热轧态与固溶态 Ti2448 合金均在高应变控制

的低周疲劳试验中产生了 α'' 相, 该相的析出是导致其循环软化的原因之一。

REFERENCES

- [1] NIINOMI M, MECH J, BIOMED B. Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2008, 3: 1-42.
- [2] 宁聪琴, 周玉. 医用钛合金的发展及研究现状[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(1): 100-106.
NING Cong-qiu, ZHOU Yu. Development and research status of biomedical titanium alloys[J]. Materials Science and Technology, 2002, 10(1): 100-106.
- [3] 李佐臣, 李长亮, 袁松波, 汪大林, 郭天文. 外科植入 TAMZ 合金生物学性能评价[J]. 稀有金属材料与工程, 1998, 27(1): 59-62.
LI Zuo-chen, LI Chang-liang, QIU Song-bo, WANG Da-lin, GUO Tian-wen. Biological evaluation of a new titanium alloy, TAMZ, as surgical implant material[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1998, 27(1): 59-62.
- [4] NIINOMI M, AKAHORI T, KATSURA S, YAMAUCHI K, OGAWA M. Mechanical characteristics and microstructure of drawn wire of Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr for biomedical applications [J]. Materials Science and Engineering C, 2007, 27: 154-161.
- [5] NIINOMI M. Fatigue performance and cyto-toxicity of low rigidity titanium alloy, Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr [J]. Biomaterials, 2003, 24: 2673-2683.
- [6] LI S J, YANG R, LI S. Wear characteristics of Ti-Nb-Ta-Zr and Ti-6Al-4V alloys for biomedical applications [J]. Wear, 2004, 257: 869-876.
- [7] HAO Yu-lin, LI Shu-jun, SUN Shu-ying, ZHENG Cai-yun, HU Qing-miao, YANG Rui. Super-elastic titanium alloy with unstable plastic deformation [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(9): 091906-3.
- [8] HAO Y L, LI S J, SUI M L, YANG R. Ductile titanium alloy with low Poisson's ratio [J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(21): 216405.
- [9] ZHANG S Q, LI S J, JIA M T, PRIMA F B, CHEN L J, HAO Y L, YANG R. Low-cycle fatigue properties of a titanium alloy exhibiting nonlinear elastic deformation behavior [J]. Acta Materialia, 2011, 59: 4690-4699.

(编辑 何学锋)