

# 去应力退火对 Ti6321 合金组织与性能的影响

张斌斌, 陈斌, 陈利阳, 杨瑞, 李培跃, 蒋鹏, 廖志谦

(洛阳船舶材料研究所, 洛阳 471039)

**摘要:** 采用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜、拉伸试验等手段系统研究去应力退火对 Ti6321 合金显微组织和力学性能的影响。结果表明: 经去应力退火处理后, Ti6321 合金的晶间  $\beta$  相中析出了少量的细针状  $\alpha$  相, 屈服强度、抗拉强度均有明显提高, 伸长率变化不大。去应力退火不会对材料的性能产生不利影响。

**关键词:** 钛合金; Ti6321 合金; 去应力退火; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG146.2      **文献标志码:** A

## Effect of stress relieving treatment on microstructure and mechanical properties of Ti6321 alloy

ZHANG Bin-bin, CHEN Bin, CHEN Li-yang, YANG Rui, LI Pei-yue, JIANG Peng, LIAO Zhi-qian

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

**Abstract:** The effect of stress relieving treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti6321 alloy was systemically investigated by optical micrograph, scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and tensile tests. After stress relieving treatment, nanoscale acicular  $\alpha$  could be seen in the intergranular  $\beta$ . Yield strength and tensile strength was significantly improved, the elongation was not influenced. Stress relieving treatment does not significantly affect the mechanical properties of Ti6321 alloy.

**Key words:** titanium alloy; Ti6321 alloy; microstructure; mechanical property; annealing

钛及钛合金由于其比强度高、耐腐蚀<sup>[1-2]</sup>等特点, 广泛应用于航空航天、船舶与海洋工程<sup>[3-6]</sup>等领域。其中 Ti6321 合金的名义成分为 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 是我国针对深潜器及船舶结构, 在美国深潜器球壳用材 Ti6211 合金基础上, 创新研制的屈服强度 785 MPa 级近  $\alpha$  型钛合金。该合金高强、高韧、耐蚀、可焊, 与强度级别相当的 TC4ELI 合金相比, 冲击韧性、断裂韧性、应力腐蚀断裂韧性更好。Ti6321 合金已经经历了各种环境下系统的应用研究, 是我国应用研究最完善、最充分的舰船钛合金, 广泛应用于压力容器、舰船结构件等。

焊接成型是 Ti6321 合金结构件的重要建造手段, 在焊接过程中, 需采取应力消除措施。对于中小型结构件来说, 去应力退火是较为有效的消应手段<sup>[7]</sup>, 加热温度一般在再结晶温度以下 50~200 °C, 即 450~600

°C。去应力退火可以有效的消除焊接产生的内应力, 但可能对母材的性能产生一定的影响。本文作者研究了去应力退火对 Ti6321 合金组织性能的影响。

## 1 实验

试验采用 10 mm 厚 Ti6321 合金板材, 热处理制度为 970 °C/h, 空冷。Ti6321 合金的化学成分见表 1, 常规力学性能见表 2。经测定其  $\beta$  转变温度为 990~1 000 °C, 在板材上切取试样块, 以 5 h 为一个时间间隔, 分别进行 550 °C、5 h, 550 °C、10 h, 550 °C、15 h, 550 °C、20 h 的去应力退火处理, 并测试不同处理状态下试样的力学性能。采用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜对热处理前后试样的微观组织进行观察分析。

表1 Ti6321合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti6321 alloy (mass fraction, %)

Mass composition					Impurity				
Ti	Al	Nb	Zr	Mo	Fe	C	N	H	O
Bal.	5.82-6.23	3.03-3.32	1.92-2.15	0.98-1.20	0.03	0.01	<0.005	0.001	0.08

表2 Ti6321合金的室温拉伸性能

Table 2 Room temperature mechanical properties of Ti6321 alloy

Material	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%
Ti6321	887-897	810-830	19.5-22.0

## 2 结果及讨论

### 2.1 显微组织演变

在经过 $\alpha+\beta$ 相区(970 °C, 空冷)退火后, Ti6321合金的光学显微组织见图1(a)。经970 °C退火后, Ti6321合金表现出典型的双态组织, 由初生 $\alpha$ 组织和 $\beta$ 转变组织组成, 两种组织之间的界面清晰, 其中初生 $\alpha$ 组织含量约30%, 该类组织兼具等轴组织的高强

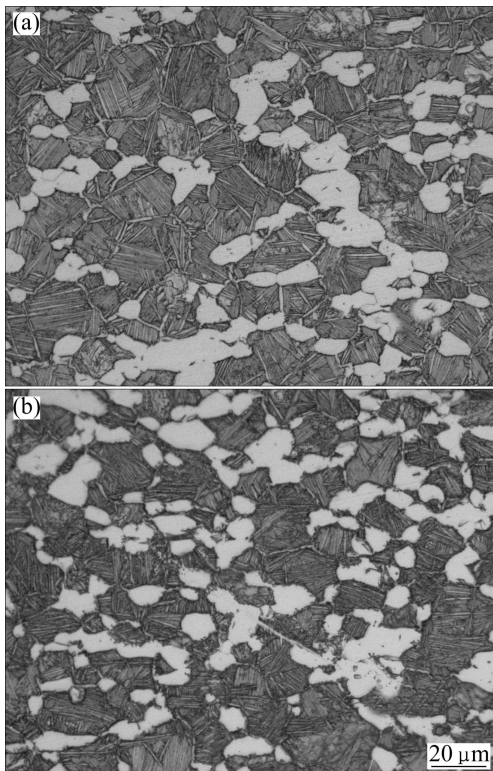


图1 去应力退火前和550 °C、20 h去应力退火后的Ti6321合金的光学显微组织

Fig.1 Optical microstructures of Ti6321 alloy before (a) and after (b) 550 °C, 20 h stress relieving treatment

度和魏氏组织的高韧性, 是船用钛合金较为理想的组织。

经20 h去应力退火后, Ti6321合金的光学显微组织见图1(b)。经长时间去应力退火后, 初生 $\alpha$ 相与 $\beta$ 转变组织的比例未发生明显变化, 这与Ti6321合金中 $\beta$ 稳定元素含量较少有关。

Ti6321合金的铝当量为6.7, 析出有序 $\alpha_2$ 相的临界Al质量分数是8.0%<sup>[8-9]</sup>, 但实际上影响钛合金 $\alpha_2$ 相析出的因素较多, 实际应用中的临界铝质量分数常低于8.0%。例如Ti62222合金在600 °C下长时间热暴露即可观察到 $\alpha_2$ 相的析出<sup>[10]</sup>。 $\alpha_2$ 相可在450-650 °C之间稳定存在,  $\alpha_2$ 相的析出可导致合金塑性、韧性的显著降低, 因此, 本文采用透射电镜对去应力退火后Ti6321合金的显微组织进行了观察, 结果见图2。从图2可以看出: 视野内合金的显微组织为交织的片层组织, 片层厚度约200 nm, 内部无析出相。同时衍射斑点结果表明合金的微观组织仍为密排六方的 $\alpha$ 相与体心立方的 $\beta$ 相构成的混合组织。

采用扫描电镜对去应力退火之后Ti6321合金的显微组织进行了观察, 结果见图3。与透射电镜结果



图2 550 °C、20 h去应力退火后Ti6321合金的TEM像

Fig.2 TEM image of Ti6321 alloy before and after 550 °C, 20 h stress relieving treatment



图 3 550 °C、20 h 去应力退火后 Ti6321 合金的扫描电镜观察结果

Fig.3 SEM results of Ti6321 alloy before and after 550 °C, 20 h stress relieving treatment

类似, 合金内部出现了大量细小、交织的片层状次生  $\alpha$  相, 片层厚度约 100 nm。

## 2.2 力学性能演变

图 4 给出了 Ti6321 合金在去应力退火过程中的力学性能演化情况。从图 4 可以看出: 随着时效时间的延长, 合金的屈服强度、抗拉强度略有上升, 经 20 h 去应力退火处理后, 合金的屈服强度提升约 30 MPa, 抗拉强度提升约 20 MPa。同时伸长率由处理前的 20.5%降低至处理后的 17.5%, 略有下降。

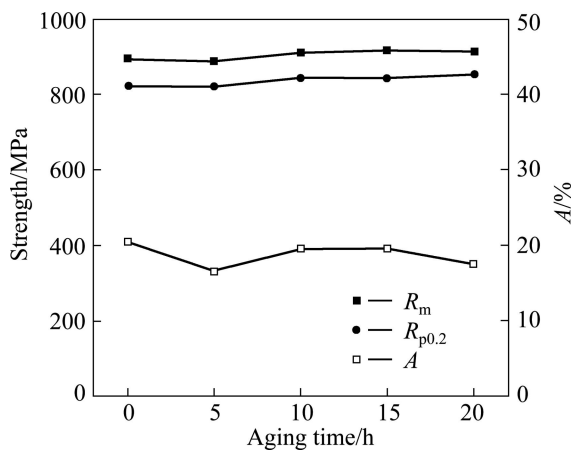


图 4 Ti6321 合金力学性能随时效时间的变化关系

Fig.4 Changes of mechanical properties with aging time for Ti6321 alloy during stress relieving treatment

Ti6321 合金在时效过程中强度的升高、延伸率的降低均与时效过程中细小、弥散的针状  $\alpha$  相析出有关。Ti6321 合金在 970 °C 退火后, 充分消除了热加工过程

中产生的内应力, 而空冷使得合金中保留了少量的亚稳  $\beta$  相, 亚稳  $\beta$  相在 550 °C 的去应力退火过程中分解成细小弥散的针状  $\alpha$  相, 使得合金的强度有所提高, 这 Ti-6Al-4V 合金的时效过程类似<sup>[11]</sup>。

## 2.3 断口形貌分析

图 5 所示为去应力退火前后合金的拉伸断口形貌。从图 5 可以看出: 合金的断口形貌均以韧窝为主, 说明合金均具有良好的塑性。同去应力退火前相比, 去应力退火后合金断口的韧窝更加细小, 合金的塑性有一定下降。

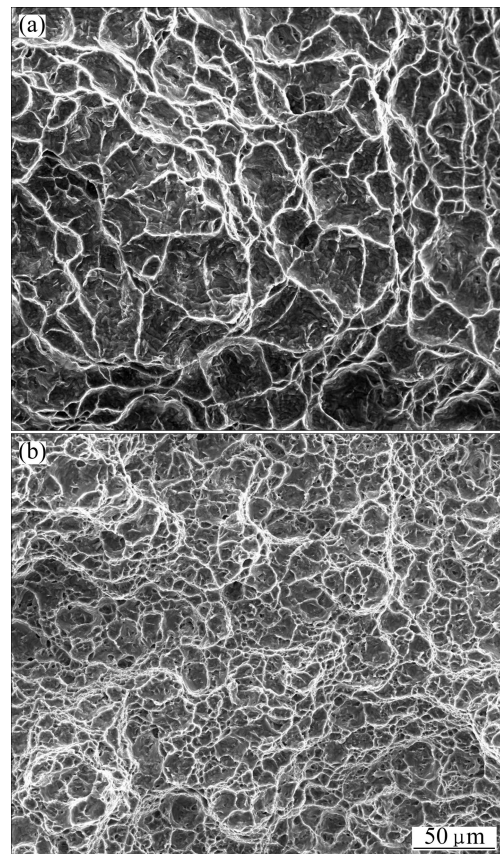


图 5 去应力退火前和 550 °C、20 h 去应力退火后的 Ti6321 合金的拉伸断口形貌

Fig.5 Fracture micrograph of Ti6321 alloy before (a) and after (b) 550 °C, 20 h stress relieving treatment

## 3 结论

- 1) 合金在时效过程中, 合金退火过程中保留的部分亚稳定  $\beta$  相分解成细小、弥散的针状次生  $\alpha$  相。
- 2) 合金在时效过程中屈服强度、抗拉强度均有所上升, 次生  $\alpha$  相的析出是强度上升的主要原因。

3) 随着时效时间的延长, 合金的塑性略有下降, 但仍远高于使用要求。

## REFERENCES

- [1] LENYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003: 22–36.
- [2] LUTJERING G, WILLIAMS J C. Titanium[M]. Germany: Springer, 2003: 5–10.
- [3] 李赛毅, 文浩, 雷力明, 张慧儒. TC11 合金两相区退火对微观组织与微观结构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3022–3028.  
LI Sai-yi, WEN Hao, LEI Li-ming, ZHANG Hui-ru. Effect of annealing in two phase field on microstructure and microtexture of TC11 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3022–3028.
- [4] 李士凯, 惠松骁, 叶文君, 于洋, 熊柏青. 微观组织对TA15 ELI 钛合金损伤容限性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1119–1123.  
LI Shi-kai, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, YU Yang, XIONG Bai-qing. Effects of microstructure on damage tolerance properties of TA15 ELI titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1119–1123.
- [5] 许国栋, 王凤娥. 高温钛合金的发展和应用[J]. 稀有金属, 2008, 32(6): 774–780.  
XU Guo-dong, WANG Feng-e. The development and application of high temperature titanium alloys[J]. Rare Metals, 2008, 32(6): 774–780.
- [6] GORYNIN I V. Titanium alloys for marine application[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 263: 112.
- [7] 张尧武, 曾卫东, 史春玲, 康超, 彭雯雯. 真空去应力退火对 TC18 钛合金残余应力及组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2780–2785.  
ZHANG Yao-wu, ZENG Wei-dong, SHI Chun-ling, KANG Chao, PENG Wen-wen. Influence of vacuum stress relieving annealing on residual stress and microstructure properties of TC18 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(11): 2780–2785.
- [8] 古一, 戚延龄, 夏长清, 李学雄, 王志辉. 热暴露对 TC11 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 997–1004.  
GU Yi, QI Yan-ling, XIA Chang-qing, LI Xue-xiong, WANG Zhi-hui. Effects of thermal exposure on microstructure and mechanical properties of TC11 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(4): 997–1004.
- [9] OHNUMA I, FUJITA Y, MITSUI H, ISHIKAWA K, KAINUMA R, ISHIDA K. Phase equilibria in the Ti-Al binary system[J]. Acta Mater, 2000, 48: 3113–3123.
- [10] ZHANG X D, WIEZOREK J M K, BAESTACK W A. Precipitation of ordered  $\alpha_2$  phase in Ti-62222 alloy [J]. Acta Mater, 1998, 46: 4485–4495.
- [11] ZENG L, BIELER T R. Effects of working heat treatment and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  and  $\beta$  phase in Ti-6Al-4V wire[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 392: 403–414.

(编辑 杨幼平)