

双重退火对 BTi-6431S 合金板材组织与性能的影响

张文婧¹, 宋晓云¹, 惠松骁¹, 王永玲¹, 王小翔², 王伟琪²

(1. 北京有色金属研究总院 有色金属材料制备与加工国家重点实验室, 北京 100088;

2. 宝钛集团有限公司, 宝鸡 721014)

摘 要: 采用光学显微镜、室温和高温拉伸实验研究热处理对 BTi-6431S 合金板材微观组织和力学性能的影响。结果表明: 升高第一阶段的退火温度, 块状初生 α 相粗化, 趋于等轴状, 体积分数逐渐降低。 β 相和次生 α 相的体积分数增加。室温强度和塑性变化不大。高温强度随第一级退火温度的升高而逐渐上升, 塑性下降。在相同第一阶段退火温度下, 第二阶段退火温度的升高使得初生 α 相含量急剧增加, 趋于板条状, β 转变组织含量降低, 室温和高温拉伸性能同时下降。通过合理的控制双重退火的温度, 可使 BTi-6431S 合金具有良好的高温强度和室温塑性的匹配。

关键词: BTi-6431S 合金板材; 双重退火; 退火温度; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effect of double annealing on microstructure and mechanical properties of BTi-6431S plate

ZHANG Wen-jing¹, SONG Xiao-yun¹, HUI Song-xiao¹, YE Wen-jun¹,

WANG Yong-ling¹, WANG Xiao-xiang², WANG Wei-qi²

(1. State Key Laboratory of Nonferrous Metals and Processes,

General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China;

2. Baotai Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: The influence of variant heat treatment processing (double annealing) on the microstructure and mechanical properties of the BTi-6431S plate were investigated by optical microscope and tensile tests at room and elevated temperatures. The results show that, with the first stage annealing temperature increasing, the shape of primary α phase (α_p) becomes coarse, changes into equiaxial, and its volume fraction decreases gradually, while the volume fractions of β -matrix (β_t) and secondary α phase increase. The room temperature strength and ductility have not obvious variation, but the high temperature strength increases and the ductility decreases. However, after the first annealing at the same temperature, increasing secondary aging temperature promotes α_p transforming into lath-shape, meanwhile reducing the volume fraction of β_t , resulting in the mechanical properties decreasing. The best alloy microstructure with good high temperature strength and room temperature plasticity can be obtained by choosing double annealing temperature parameter reasonably.

Key words: BTi-6431S plate; double annealing; annealing temperature; microstructure; mechanical properties

BTi-6431S 合金是我国最新研制出的一种新型短时高温钛合金, 它在 BT25^[1]的基础上同时加入一定量

的 Nb 和 W 高熔点 β 稳定元素, 并将 Mo 元素的质量分数调整到 3% 左右, 最终获得的名义成分为

Ti-6.5Al-3Sn-3Zr-3Mo-3Nb-1W-0.2Si(质量分数, %)。该合金具有良好的室温强度、加工塑性和焊接性能, 并且在高温下显示出更高的瞬时强度以及大载荷持久和蠕变的良好匹配, 可用于 650~700 °C 下短时应用的航空航天结构件^[2-4]。在加工工艺确定的基础上, 热处理可以有效地改善钛合金的力学性能, 因此, 有必要研究 BTi-6431S 合金的优化热处理工艺以获得高强、高塑的组织, 满足苛刻的服役环境要求。张文婧等^[4]研究了单重退火对合金组织与性能的影响, 结果表明合金在相变点以下(10~30)°C 退火后, 获得的双态组织具有良好的室温与高温性能的匹配。本文作者在前期研究工作的基础上, 对 BTi-6431S 合金采用双重退火处理, 研究其对显微组织和力学性能的影响, 并确定最佳的双重退火制度。

1 实验

实验用 BTi-6431S 合金薄板由宝钛集团有限公司提供, 为了得到大尺寸的 3 mm 厚薄板, 保证合金的加工工艺性能, 适当地降低了合金中 β 稳定元素质量分数, 化学成分见表 1。

表 1 BTi-6431S 薄板化学成分

Table 1 Chemical composition of BTi-6431S plate (mass fraction, %)

Al	Sn	Zr	Mo	Nb	W	Si	Ti
6.13	3.0	3.0	1.28	1.14	0.38	0.12	Bal

经两相区温度轧制后的合金原始组织如图 1 所示, 其由块状和板条状的初生 α 相和片层状的 β 转变组织(β_t)组成。采用淬火金相法测得该合金的相变点为 990~1 000 °C。对板材采用如下 4 种热处理制度进行实验:

- (I) (960 °C, 1 h), AC+(600 °C, 2 h), AC;
- (II) (960 °C, 1 h), AC+(750 °C, 2 h), AC;
- (III) (980 °C, 1 h), AC+(600 °C, 2 h), AC;
- (IV) (980 °C, 1 h), AC+(750 °C, 2 h), AC。

将热处理后的板材线切割成标距为 50 mm 的标准拉伸试样, 在 AG-250 KNIS Ms 型万能拉伸试验机上进行室温拉伸, 拉伸速度为 3 mm/min; 并在 Instron-5582 型高温拉伸试验机上进行高温拉伸, 拉伸速度为 4 mm/min。

将经过不同热处理后的金相样品电解抛光, 采用 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:7$ 的混合液对试样表面进

行腐蚀, 并利用 Axiovert 200 MAT 型 Zeiss 光学显微镜观察分析合金的显微组织。

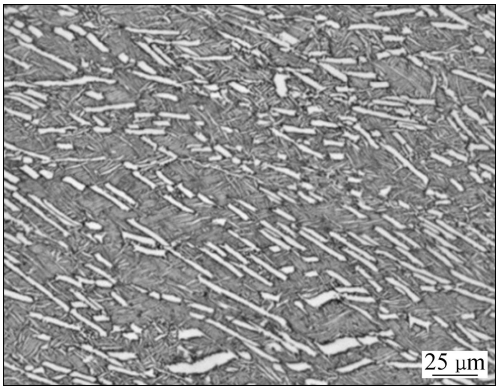


图 1 原始组织
Fig. 1 Optical microstructure of original material

2 结果与讨论

样品分别经 4 种工艺处理后得到的组织如图 2 所示。热处理后的组织与原始态相比发生明显变化, 合金中各相发生了不同程度的球化。其中工艺 III 热处理后的样品球化最显著, 工艺 II 的球化率最低。4 种工艺处理后组织形貌差异主要表现在初生 α 相尺寸与含量上, 对比工艺 I 和 III 发现: 提高第一级退火温度促进板条状初生 α 相向 β 相的转变, 形状逐渐趋于等轴状。对比工艺 III 和 IV 发现, 提高第二级退火温度, 初生 α 相的体积分数增加, 尺寸增大, β 转变组织中的片状次生 α 相的厚度增加, 数量增多。这是因为第二级退火温度升高促进了残余 β 相的分解, β 相在 α/β 界面处生成了次生 α 相, 次生 α 相通过界面迁移并长大^[5], 与初生 α 汇集在一起难以区分, 最终导致等轴初生 α 相的体积分数大幅度上升, 温度的升高同时也增大了 β 转变组织中的片状次生 α 相厚度。

表 2 所列合金经不同工艺处理后的室温拉伸性能。由表 2 可见: 经过 4 种工艺热处理后, 样品的抗

表 2 BTi-6431S 合金经不同工艺热处理后的室温拉伸性能
Table 2 Tensile properties of BTi-6431S plate after different heat-treatment at room temperature

Schedule	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$
I	1 055	935	12.0
II	1 030	941	4.0
III	1 082	900	8.0
IV	1 008	902	2.5

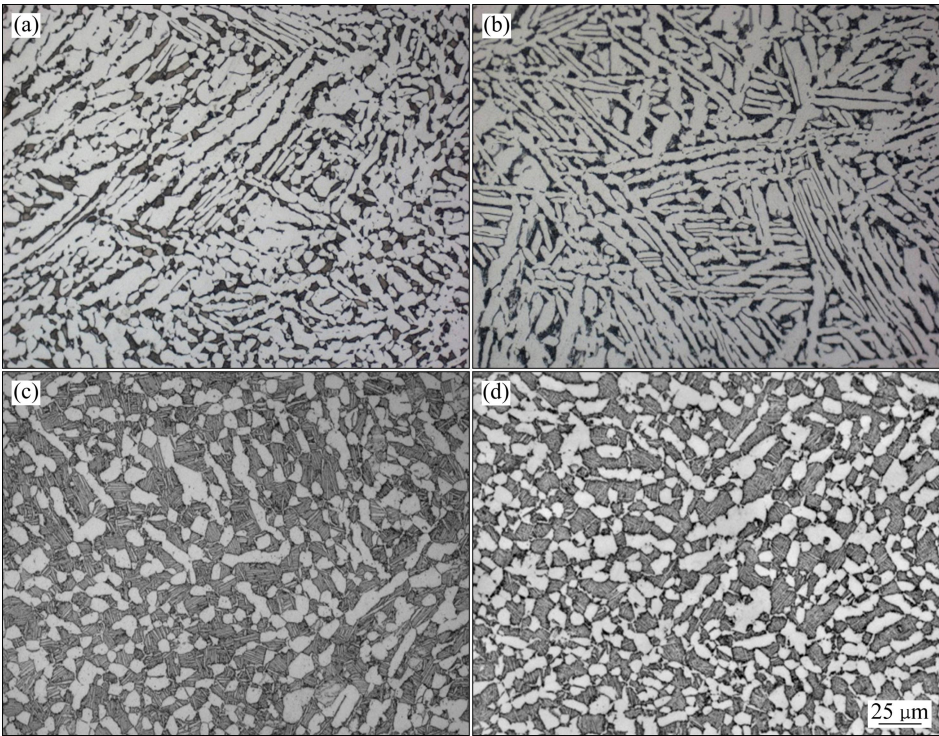


图 2 不同条件下热处理后 BTi-6431S 合金金相组织

Fig. 2 Microstructures of BTi-6431S alloy after different heat-treatments: (a) Schedule I ; (b) Schedule II ; (c) Schedule III; (d) Schedule IV

拉强度 σ_b 均在 1 000 MPa 以上, 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 在 900 MPa 以上, 室温塑性差异较大。

分别对比工艺 I 和 II, III和IV 处理后的性能发现, 提高第二级退火温度, 合金的室温塑性显著降低。这主要由两方面原因引起: 首先, 第二级退火温度升高加剧了 bcc 结构的残余 β 相向 hcp 结构的次生 α 相转变, 而 β 相变形能力高于 α 相, β 相含量的减少降低了合金室温塑性^[6]; 其次, 合金经 750 °C 退火后, 与经 600 °C 退火后的组织相比, 初生 α 相的尺寸增大, 部分等轴状的组织逐渐向板条状的组织发生转变。等轴状的组织具有良好的变形协调性, 而板条状的组织在拉伸变形时要求相邻晶粒之间相互协调, 增加了塑性变形的阻力^[7], 最终导致室温塑性的急剧下降。

表 3 所列为 BTi-6431S 合金板材不同热处理制度下的高温拉伸性能。对比经工艺 I 和 III 以及 II 和 IV 处理后的样品高温拉伸结果发现: 提高第一级退火温度, 有利于提高合金的高温强度。这主要是随第一次退火温度的升高, 初生 α 相向 β 相转变的速度加快, 空冷后残余的 β 相增加, 在第二级退火过程中发生分解, 生成大量的片状次生 α 相, 高温强化效果明显。并且随着第一级退火温度的升高, 初生 α 相体积分数减少, 引起初生 α 相中的 Al 元素含量增加, 提高了固溶强化

表 3 BTi-6431S 合金板材经不同工艺热处理后的高温拉伸性能

Table 3 Tensile properties of BTi-6431S plate after different heat-treatment

Schedule	650 °C		700 °C	
	σ_b /MPa	A/%	σ_b /MPa	A/%
I	560	40	440	80
II	518	40	440	60
III	625	30	485	55
IV	590	23	480	40

作用, 使合金的高温强度上升。

对比制度 I 和 II 以及 III 和 IV 处理后的高温拉伸结果发现: 随第二级退火温度的升高, 等轴状的初生 α 相向板条状长大, β 转变组织的体积分数减少, 降低了合金的高温强度。

由图 2 可知: 随退火温度的升高, 合金中各相的尺寸均发生明显长大, 粗大的组织不利于合金塑性变形, 导致 BTi-6431S 合金的高温塑性随各阶段退火温度的升高而降低, 并且第一级退火温度的升高对塑性降低的影响效果更明显。

通过对比发现, 合金经工艺 III 处理后, 其在 650 °C

下的 σ_b 可达到600 MPa以上,与常见的高温钛合金Ti-1100^[8]和BT36^[9]在600℃下的 σ_b 相当(Ti-1100的 σ_b 约为630 MPa, BT36的 σ_b 约为640 MPa)^[10]。

3 结论

1) BTi-6431S合金双重退火时,升高第一阶段的退火温度,增加了合金中 β 转变组织和次生 α 相的体积分数,同时也提高了初生 α 相中Al元素的含量,两者的共同作用使得合金的高温强度有所上升。

2) BTi-6431S合金双重退火时,第二阶段退火温度的升高减少了 β 转变组织的体积分数,引起高温强度下降。

3) BTi-6431S合金通过合理提高第一级退火温度,降低第二级退火温度,可以获得良好的室温塑性和高温强度的匹配。该合金最佳的双重退火制度为(980℃, 1 h), AC+(600℃, 2 h), AC。

REFERENCE

- [1] 袁少冲, 毛小南, 张鹏省, 于兰兰, 洪 权. 热强钛合金BT25组织与性能[J]. 钛工业进展, 2006, 23(3): 19–22.
YUAN Shao-chong, MAO Xiao-nan, ZHANG Peng-xing, YU Lan-lan, HONG Quan. Microstructure and property of heat strong titanium alloy BT25[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(3): 19–22.
- [2] 杨 伟, 王 俭, 王红武, 董振建, 王小翔, 王伟琪. 热加工工艺对 BTi-6431S 钛合金厚板与组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s104–s106.
YANG Wei, WANG Jian, WANG Hong-wu, DONG Zhen-jian, WANG Xiao-xiang, WANG Wei-qi. Effect of hot working process on microstructure and properties of BTi-6431S titanium alloy plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s104–s106.
- [3] 王小翔, 王伟琪, 马红海. 700℃时高温高强BTi-6431S合金的组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s792–s795.
WANG Xiao-xiang, WANG Wei-qi, MA Hong-hai. Microstructure and mechanical properties of high temperature and high strength BTi-6431S alloy at 700℃[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s792–s795.
- [4] 张文婧, 宋晓云, 惠松骁, 叶文君, 王永玲, 王小翔, 王伟琪. 单重退火对 BTi-6431S 合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1530–1535.
ZHANG Wen-jing, SONG Xiao-yun, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, WANG Yong-ling, WANG Xiao-xiang, WANG Wei-qi. Effect of single annealing on microstructure and mechanical properties of BTi-6431S titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(6): 1530–1535.
- [5] 王志辉, 夏长清, 彭小敏, 陈志宏, 李学雄. 热处理工艺对 Ti62421s 高温钛合金组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(10): 2298–2306.
WANG Zhi-hui, XIA Chang-qing, PENG Xiao-min, CHEN Zhi-hong, LI Xue-xiong. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti62421s high temperature titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(10): 2298–2306.
- [6] 莱茵斯 C, 皮特尔斯 M. 钛与钛合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 3–7.
LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 3–7.
- [7] 杨 义, 黄爱军, 徐 峰, 李阁平. BT18y 钛合金等轴组织与全片层组织的室温拉伸塑性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 768–774.
YANG Yi, HUANG Ai-jun, XU Feng, LI Ge-ping. Room-temperature tensile plasticity of BT18y titanium alloy with equiaxed structure and fully lamellar structure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(5): 768–774.
- [8] MADSEN A, GHONEM H. Effects of aging on the tensile and fatigue behavior of the near- α Ti-1100 at room temperature and 593℃[J]. Materials Science and Engineering A, 1994, 177: 63–73.
- [9] 郝孟一, 蔡建明, 杜 娟. 热处理对 BT36 高温钛合金组织及性能的影响[J]. 航空材料学报, 2003, 23(2): 14–17.
HAO Meng-yi, CAI Jian-ming, DU Juan. The effect of heat treatment on microstructure and properties of BT36 high temperature alloy[J]. Journal of Aeronautical Material, 2003, 23(2): 14–17.
- [10] 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. Development and application on high-temperature Ti-based alloys[J]. Rare Metal, 2008, 32(6): 774–780.

(编辑 陈灿华)