

双重退火 Ti6246 合金棒材微观组织与拉伸性能研究

李国善

(甘肃钢铁职业技术学院, 甘肃 嘉峪关 735100)

摘要: 对 Ti6246 合金棒材进行 (930~990) °C/2 h/AC+580 °C/4 h/AC 双重退火热处理, 探究不同热处理工艺对 Ti6246 合金棒材拉伸性能的影响。研究表明, 随着第一重退火热处理温度的升高, α 相逐渐减少直至消失, 且 β 晶界逐渐清晰; 抗拉强度和屈服强度逐渐增大, 断面收缩率和断后伸长率逐渐降低; 断裂机制亦发生改变, 从韧性-韧窝断裂转变为脆性-解理断裂。经 950 °C/2 h/AC+580 °C/4 h/AC 双重退火热处理后, Ti6246 合金棒材的抗拉强度为 1083 MPa, 屈服强度为 985 MPa, 断后延伸率为 12%, 断面收缩率为 18%, 强塑性匹配佳, 具有较好的综合性能。

关键词: Ti6246 合金; 微观组织; 拉伸性能; 断口形貌

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)05-023-04

Study on Microstructure and Tensile Properties of Double Annealed Ti6246 Alloy Bar

Li Guoshan

(Gansu Iron and Steel Vocational Technical College, Jiayuguan 735100, China)

Abstract: The Ti6246 alloy bar was subjected to double annealing heat treatment at (930-990) °C/2 h/AC+580 °C/4 h/AC. The influence of different heat treatment processes on the tensile properties of Ti6246 alloy bar was explored. The research shows that with the increase of the first-stage annealing heat treatment temperature, the α phase gradually decreases and even disappears, and the β grain boundary gradually becomes clear. The tensile strength and yield strength gradually increase, while the reduction of area and elongation after fracture gradually decrease. The fracture mechanism also changes from ductile-dimpled fracture to brittle-cleavage fracture. After double annealing heat treatment at 950 °C/2 h/AC+580 °C/4 h/AC, the tensile strength of Ti6246 alloy bar is 1083 MPa, the yield strength is 985 MPa, the elongation after fracture is 12%, and the reduction of area is 18%. The strength and plasticity are well matched, and better comprehensive properties are obtained.

Keywords: Ti6246 alloy; microstructure; tensile properties; fracture morphology

Ti6246 合金是一种高温钛合金, 其名义成分为 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, 国内牌号为 TC19。该合金拥有较好的淬透性, 同时具有较高的高温蠕变强度和瞬时强度, 长时使用温度在 400 °C 左右, 短时使用温度可达 540 °C, 可应用于高功率压气机盘件、叶片、涡轮和风扇等^[1-3]。

钛合金性能优化及工程化应用是当前的研究热点与难点^[4]。朱洪军^[5]研究了 Ti6246 合金的热变形行为, 通过构建该合金的应变补偿型本构模型, 分析了温度、应变速率和应变对合金高温流变应力的影响规律。朱宝辉等^[6]研究了锻造工艺对 TC19 钛合金棒材力学性能的影响,

发现高-低-高锻造工艺优于常规锻造工艺; 顾忠明等^[7]研究了退火温度对 Ti6246 合金组织与拉伸性能的影响。

航空航天领域对材料性能的要求非常严苛, 需要材料强度与塑性之间达到良好匹配。Ti6246 合金作为一种可热处理强化钛合金, 其热处理制度对材料性能具有较大的影响, 结合研究现状, Ti6246 合金热处理温度主要在两相区^[8-10]。然而, 在实际工程化应用中, 由于部分材料 (如薄板、丝材) 只能进行退火处理, 不能进行固溶处理, 而工程化退火炉的炉温远不及实验炉的炉温精准, 尤其是在相变点附近加热时, 温度易从两相区转变至单相区。因此, 以相变点温度为依据, 分别设立两相区及单相区进行退火处理, 通过第二重退火处理将第一重退火处理中留下来的部分亚稳定相充分分解, 起

收稿日期: 2024-06-01

通信作者: 李国善 (1977—), 男, 副教授。

到强化效果。为此,研究了不同热处理制度对 Ti6246 合金性能的影响,以期得到适合工程化应用的强塑韧相匹配的热处理工艺。

1 实验

选用 0A 级海绵钛、铝豆、海绵锆以及 Ti-Sn、Ti-Mo 二元合金等原材料,经 3 次真空自耗电弧熔炼 (VAR) 获得成分均匀的 Ti6246 合金铸锭,其化学成分见表 1。在铸锭表面均匀涂覆防高温氧化涂层后开坯锻造,再多向多火次锻造,获得 $\phi 100$ mm 的棒材。利用

金相法测得棒材相变点 T_{β} 为 983°C 。

利用线切割在 Ti6246 合金棒材上切取金相试样和拉伸试样,进行双重退火热处理。其中,第一重退火温度分别为 930°C 、 950°C 、 970°C 、 990°C ,保温 2 h 后空冷;第二重退火制度均为 $580^{\circ}\text{C}/4\text{ h/AC}$,具体工艺如表 2 所示。采用 Axio 光学显微镜和 Scios 扫描电子显微镜 (SEM) 进行组织观察。采用 AG-I 500KN 万能电子拉伸试验机进行力学性能测试,并利用 SEM 进行断口形貌观察。力学性能测试中,为保证实验数据真实有效且具有代表性,每组取 3 个平行试样。

表 1 Ti6246 合金铸锭化学成分 (w/%)

Table 1 Chemical composition of Ti6246 alloy ingot

	Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Fe	C	N	H	O
Ti6246	Bal.	6.21	2.01	4.10	5.92	0.030	0.010	0.0075	0.001	0.120
GB/T 3620.1	Bal.	5.5~6.5	1.8~2.2	3.6~4.4	5.5~6.5	≤ 0.25	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.0125	≤ 0.15

表 2 Ti6246 合金棒材双重退火热处理制度

Table 2 Double annealing heat treatment processes of Ti6246 alloy bar

Process	Double annealing heat treatment
Process I	$930^{\circ}\text{C}/2\text{ h/AC}+580^{\circ}\text{C}/4\text{ h/AC}$
Process II	$950^{\circ}\text{C}/2\text{ h/AC}+580^{\circ}\text{C}/4\text{ h/AC}$
Process III	$970^{\circ}\text{C}/2\text{ h/AC}+580^{\circ}\text{C}/4\text{ h/AC}$
Process IV	$990^{\circ}\text{C}/2\text{ h/AC}+580^{\circ}\text{C}/4\text{ h/AC}$

2 结果与分析

2.1 不同热处理工艺对显微组织的影响

图 1 为 Ti6246 合金棒材经不同工艺热处理后的金相照片。经工艺 I 热处理后,可以清晰地看到不同形貌的初生 α 相、等轴 α 相、拉长 α 相和晶界 α 相均匀分布 (图 1a)。经工艺 II 热处理后,初生 α 相虽与图 1a 中类似,但数量明显减少且尺寸减小;晶界处的初生 α 相数量更少,尺寸更小且椭圆化; β 晶粒长大,晶界更清

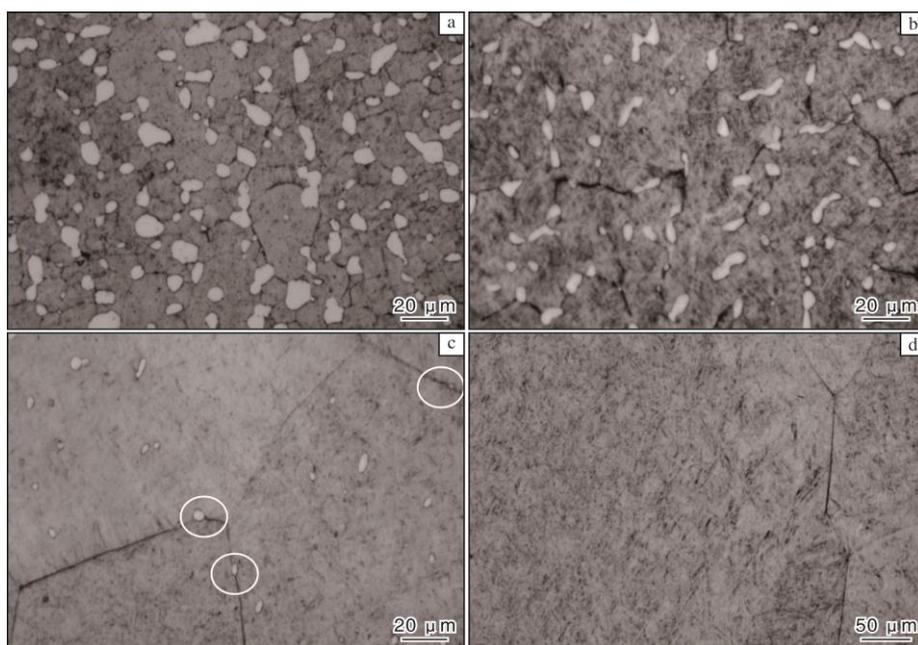


图 1 Ti6246 合金棒材经不同工艺热处理后的金相照片

Fig.1 Metallographs of Ti6246 alloy bar after heat treated with different processes: (a) process I; (b) process II; (c) process III; (d) process IV

晰(图1b)。经工艺 III 热处理后, 初生 α 相尺寸变得更小且形状进一步椭圆形化, 部分晶界处仍然可以观察到细小的 α 相, 同时 β 晶界清晰明了且连续, β 晶粒进一步长大(图1c)。经工艺 IV 热处理后, 初生 α 相完全消失, β 晶粒进一步长大, β 晶粒中出现了大量细小的次生 α 相(图1d)。

图2为 Ti6246 合金棒材经不同工艺热处理后的 SEM 照片。通过 SEM 照片可以更进一步清晰观察到初

生 α 相的演变过程。经工艺 I 热处理后, 除了可以观察到形状、尺寸不同的初生 α 相, 还可以看见尺寸更小的、即将消失的初生 α 相(图2a)。经工艺 II 热处理后, 初生 α 相进一步变小、变少, 且逐渐椭圆形化, 此时依然可以观察到即将消失的更小尺寸的初生 α 相(图2b)。经工艺 III 热处理后, 初生 α 相进一步减少, 仅有极少量的初生 α 相(图2c)。经工艺 IV 热处理后, 初生 α 相已完全消失, 出现了大量细小的次生 α 相(图2d)。

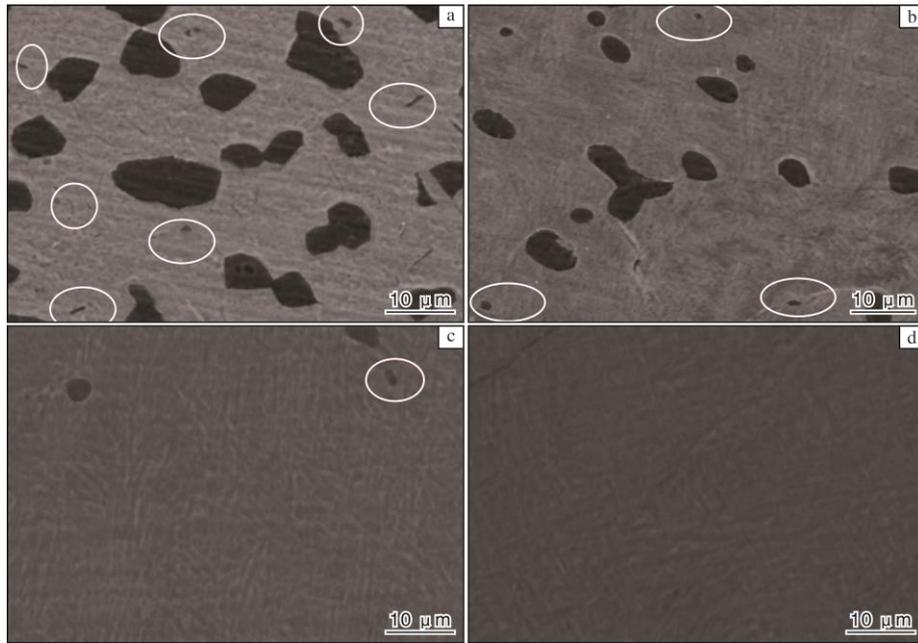


图2 Ti6246 合金棒材经不同工艺热处理后的 SEM 照片

Fig.2 SEM photographs of Ti6246 alloy bar after heat treated with different processes:

(a) process I; (b) process II; (c) process III; (d) process IV

结合图1、图2发现, 随着第一重退火热处理温度的升高, 初生 α 相逐渐减少, 尺寸逐渐减小, 可以观察到正在逐渐消失的初生 α 相, 同时变化过程中初生 α 相逐渐椭圆形化, 当第一重退火温度升高至 $990\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 初生 α 相完全消失。从微观组织变化可以看出, Ti6246 合金对热处理温度较为敏感, 第一重退火温度由 $930\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\beta}-53\text{ }^{\circ}\text{C}$) 升高至 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\beta}-33\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 温度均在两相区, 但显微组织存在较大差异, $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时初生 α 相急剧减少、变小, 大量的初生 α 相向 β 相转变, 同时发生了初生 α 相的椭圆形化, 在初生 α 相向 β 相转变的过程中, 细长的、小的且比表面积大的初生 α 相获得能量后首先发生转变。随着温度进一步升高至 $970\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 与相变点更为接近, 更多的初生 α 相发生了转变。 $990\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 即相变点以上 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 初生 α 相全部转变为 β 相。

冷却过程中, β 相向 α 相转化, 在两相区时, 其显微组织中的 α 相主要由初生 α 相和冷却过程中 β 相中析

出的次生 α 相组成, 随着第一重退火热处理温度的升高, 更多的初生 α 相发生转变, 而在同样的冷却条件下, β 相中可以析出更多的次生 α 相; 在单相区时, 初生 α 相完全转变为 β 相, 冷却过程中, 其冷却时间更长, β 相中析出的次生 α 相更多。在进行第二重热处理时, 次生 α 相再一次获得能量, 进一步长大。

2.2 不同热处理工艺对力学性能的影响

图3为 Ti6246 合金棒材经不同工艺热处理后的力学性能。随着第一重退火热处理温度的升高, 其抗拉强度 (R_m) 和屈服强度 ($R_{p0.2}$) 逐渐增大, 断后延伸率 (A) 和断面收缩率 (Z) 逐渐减小, 强度和塑性具有相反的变化趋势。

在钛合金强度与塑性的变化过程中, 塑性主要与初生 α 相的形貌与尺寸相关, 强度主要与 β 转变相和次生 α 相的形貌、尺寸及含量相关^[1]。随着第一重退火热处理温度的升高, 初生 α 相逐渐减少直至消失, 与之对应

的冷却过程中, 逐渐析出的细小的次生 α 相在第二重热处理过程中进一步长大, 次生 α 相能够阻碍位错运动, 而位错运动过程则需要更多的能量, 起到强化作用。热处理制度对 Ti6246 合金棒材的屈服强度、断后延伸率以及断面收缩率的影响较大, 经 950 °C/2 h/AC+580 °C/4 h/AC (工艺 II) 双重退火热处理后, 抗拉强度为 1083 MPa, 屈服强度为 985 MPa, 断后延伸率为 12%, 断面收缩率为 18%, 强塑性匹配佳, 具有较好的综合性能。

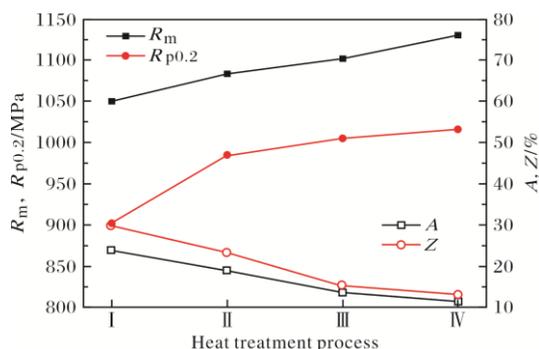


图3 Ti6246 合金棒材经不同工艺热处理后的拉伸性能

Fig.3 Tensile properties of Ti6246 alloy bar after different heat treatments: (a) strength; (b) plasticity

图4为经不同工艺热处理的Ti6246合金棒材的拉伸断口形貌。从图4可以看出, 经不同热处理工艺处理后, 棒材的断口形貌存在较大差异。由图4a、4b可以观察到大量的韧窝, 且图4b中的韧窝较浅, 断裂机制为韧性-韧窝断裂。由图4c可以观察到明显的撕裂棱和较小的韧窝

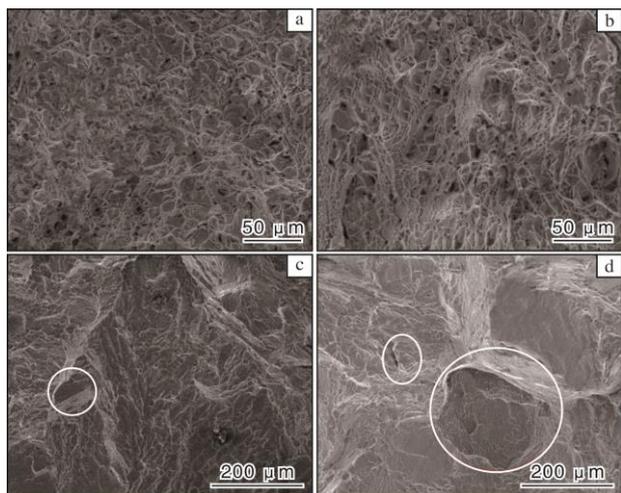


图4 Ti6246 合金棒材经不同工艺热处理后的拉伸断口形貌

Fig.4 Tensile fracture morphologies of Ti6246 alloy bar after heat treated with different processes: (a) process I; (b) process II; (c) process III; (d) process IV

窝, 图4d中有明显的解理面, 以及某一 β 晶粒的断裂面, 呈明显的脆性断裂特征, 同时还可以观察到细小的裂纹, 断裂机制为脆性-解理断裂。由此可见, Ti6246 合金棒材经双重退火热处理后, 随着第一重退火温度的升高, 塑性逐渐降低。

3 结论

(1) Ti6246 合金棒材经 (930-990) °C/2 h/AC+580 °C/4 h/AC 双重退火热处理后, 随着第一重退火温度的逐渐升高, 合金中 α 相含量逐渐减少直至消失, 且 β 晶界逐渐清晰。

(2) 随着第一重退火温度的逐渐升高, Ti6246 合金棒材的抗拉强度和屈服强度逐渐增大, 断面收缩率和断后伸长率逐渐减小, 断裂机制由韧性-韧窝断裂逐渐转变成脆性-解理断裂。

(3) 当热处理制度为 950 °C/2 h/AC+580 °C/4 h/AC 时, Ti6246 合金棒材的抗拉强度为 1083 MPa, 屈服强度为 985 MPa, 断后延伸率 12%, 断面收缩率 18%, 强塑性匹配佳, 具有较好的综合性能。

参考文献 References

- [1] 赵子博, 王国强, 杨晓龙, 等. Ti-6246 中 α 相转变结构的形成机制[J]. 材料研究学报, 2017, 31(10): 796-800.
- [2] 王国强, 赵子博, 于冰冰, 等. 热处理工艺对 Ti6246 钛合金组织与力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(5): 352-358.
- [3] 雷锦文, 田云, 赖运金, 等. 固溶温度对 Ti6246 钛合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(3): 133-136.
- [4] 李玉海, 左柏强, 蔡雨升, 等. 低高温双重热处理对激光选区熔化 TC4 钛合金断裂韧性影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(5): 1864-1872.
- [5] 朱洪军. 高强韧 Ti6246 合金热变形行为及应变补偿型本构模型[J]. 金属热处理, 2016, 41 (8): 184-188.
- [6] 朱宝辉, 赵洪章, 沈立华, 等. TC19 钛合金棒材的研制[J]. 钛工业进展, 2012, 29(3): 26-28.
- [7] 顾忠明, 张起, 乔恩利, 等. 退火温度对 Ti6246 钛合金组织与拉伸性能的影响[J]. 四川冶金, 2022, 44(5): 14-16+21.
- [8] 王富强, 张瑞雪, 杨立新, 等. 热处理工艺对高强钛合金组织及力学性能的影响[J]. 中国材料进展, 2023, 42(5): 415-420.
- [9] 彭文雅, 吴学深, 赵春玲, 等. 中温高强 TC11 和 TC19 钛合金锻件组织与性能研究[J]. 钛工业进展, 2023, 40(6): 10-15.
- [10] 李楠, 朱绍祥, 王磊, 等. 热处理对 TC19 钛合金 β 晶粒尺寸和拉伸性能的影响[J]. 钛工业进展, 2019, 36(6): 31-35.
- [11] 张明玉, 运新兵, 伏洪旺. 热处理冷却方式对 TC10 钛合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(8): 98-105.