

# 大规格 TC11 钛合金棒材热处理后组织与性能分布规律性研究

李敏娜, 吴 晨, 马保飞, 周立鹏, 肖松涛

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘 要:** 对规格为  $\phi 200\text{ mm} \times 1300\text{ mm}$  的 TC11 钛合金棒材进行  $970\text{ }^\circ\text{C}/120\text{ min}/\text{AC} + 530\text{ }^\circ\text{C}/360\text{ min}/\text{AC}$  热处理, 分析了棒材沿长度和直径方向不同位置显微组织、拉伸性能和冲击韧性的变化规律。结果表明: 大规格 TC11 钛合金棒材热处理后, 不同位置的显微组织差异较大, 沿长度和直径方向由边部至心部, 显微组织中  $\alpha$  相含量逐渐增加, 晶粒长大, 同时  $\beta$  相含量降低。大规格 TC11 钛合金棒材组织差异对材料的综合性能影响显著, 沿不同方向由边部至心部, 室温、高温拉伸强度及冲击韧性均降低。

**关键词:** TC11 钛合金; 大规格棒材; 热处理; 组织差异性; 力学性能

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)01-012-04

## Research on Distribution Regularity of Microstructure and Properties of Large-sized TC11 Titanium Alloy Bar after Heat Treatment

Li Minna, Wu Chen, Ma Baofei, Zhou Lipeng, Xiao Songtao

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The microstructure, tensile properties and impact toughness of  $\phi 200\text{ mm} \times 1300\text{ mm}$  TC11 titanium alloy bar along the length and diameter directions were analyzed after heat treatment at  $970\text{ }^\circ\text{C}/120\text{ min}/\text{AC} + 530\text{ }^\circ\text{C}/360\text{ min}/\text{AC}$ . The results show that the microstructure at different positions of large-sized TC11 titanium alloy bar after heat treatment are quite different. From edge to center along the length and diameter directions, the  $\alpha$  phase content and grain size increase gradually, while the  $\beta$  phase content decreases. The microstructure difference of large-sized TC11 titanium alloy bar has a significant effect on the comprehensive properties. The tensile strength at room temperature and high temperature, and impact toughness of the bar all decrease gradually from edge to center in different directions.

**Key words:** TC11 titanium alloy; large-sized bar; heat treatment; microstructure differences; mechanical property

TC11 钛合金是我国于 20 世纪 70 年代末研发的一种  $\alpha + \beta$  型钛合金。该合金具有良好的可加工性和热稳定性, 可在  $500 \sim 550\text{ }^\circ\text{C}$  长时间使用。当 TC11 钛合金用于制作飞机发动机压气盘、叶片、机闸等关键零部件时, 需要具备良好的室温力学性能、高温强度和冲击韧性等<sup>[1]</sup>。通过热处理可以对 TC11 钛合金的组织进行调控, 从而使其获得优异的综合性能<sup>[2-4]</sup>。目前, TC11 钛合金最为常规的热处理制度为  $(950 \sim 970)\text{ }^\circ\text{C}/120\text{ min}/\text{AC} + 530\text{ }^\circ\text{C}/360\text{ min}/\text{AC}$ 。然而, 对于直径在 200 mm 以上的大规格 TC11 钛合

金棒材, 热处理过程中, 往往由于心部温降缓慢而造成不同位置的组织和力学性能出现差异<sup>[5]</sup>。此外, TC11 钛合金的合金化程度高, 含有易偏析元素 Mo, 故加工过程中合金组织对工艺参数十分敏感, 组织均匀性的控制难度较大<sup>[6]</sup>。因此, 研究了大规格 TC11 钛合金棒材热处理后组织和力学性能分布规律, 以期在实际生产过程中组织和力学性能的均匀性控制提供参考依据。

## 1 实 验

### 1.1 实验材料

实验材料为经过 3 次真空自耗电弧炉熔炼的

TC11 钛合金铸锭，其直径为 620 mm，主要化学成分为：Al 6.5%，Mo 3.52%，Zr 1.69%，Si 0.31%，余量为 Ti。金相法测得铸锭相变温度为 1000 ~ 1005 °C。铸锭经  $\beta$  相区开坯， $\alpha + \beta$  相区多火次锻造，得到规格为  $\phi 200 \text{ mm} \times 1300 \text{ mm}$  的棒材。

### 1.2 实验方法

对 TC11 钛合金棒材进行 970 °C/120 min/AC + 530 °C/360 min/AC 热处理。按图 1a 所示，沿棒材长度 ( $L$ ) 方向分别在  $L$ 、 $L/4$ 、 $L/2$  处截取  $\phi 200 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  盘片，每个盘片沿直径 ( $D$ ) 方向分别在  $D$ 、 $D/4$ 、 $D/2$  处取金相试样和拉伸试样。采用 OLYMPUS PLAG3 光学显微镜进行显微组织观察。采用 INSTRON 8985 万能试验机进行室温、高温拉伸性能试验。按图 1b 所示，在棒材另一端  $L$  处沿  $D$  至  $D/2$  处平均取 6 个冲击试样，标记为 1# ~ 6#。采用 ZBC2602-CE 冲击试验机进行夏比冲击试验 (U 型缺口)，测量试样的冲击韧性。

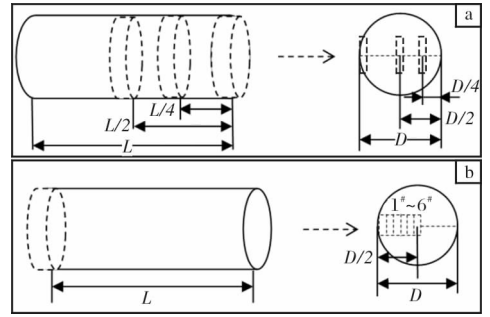


图 1 TC11 钛合金棒材取样位置示意图

Fig. 1 Sampling position of TC11 titanium alloy bar: (a) microstructure and tensile specimens; (b) impact specimens

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织

图 2 为经 970 °C/120 min/AC + 530 °C/360 min/AC 热处理后 TC11 钛合金棒材沿长度方向和直径方

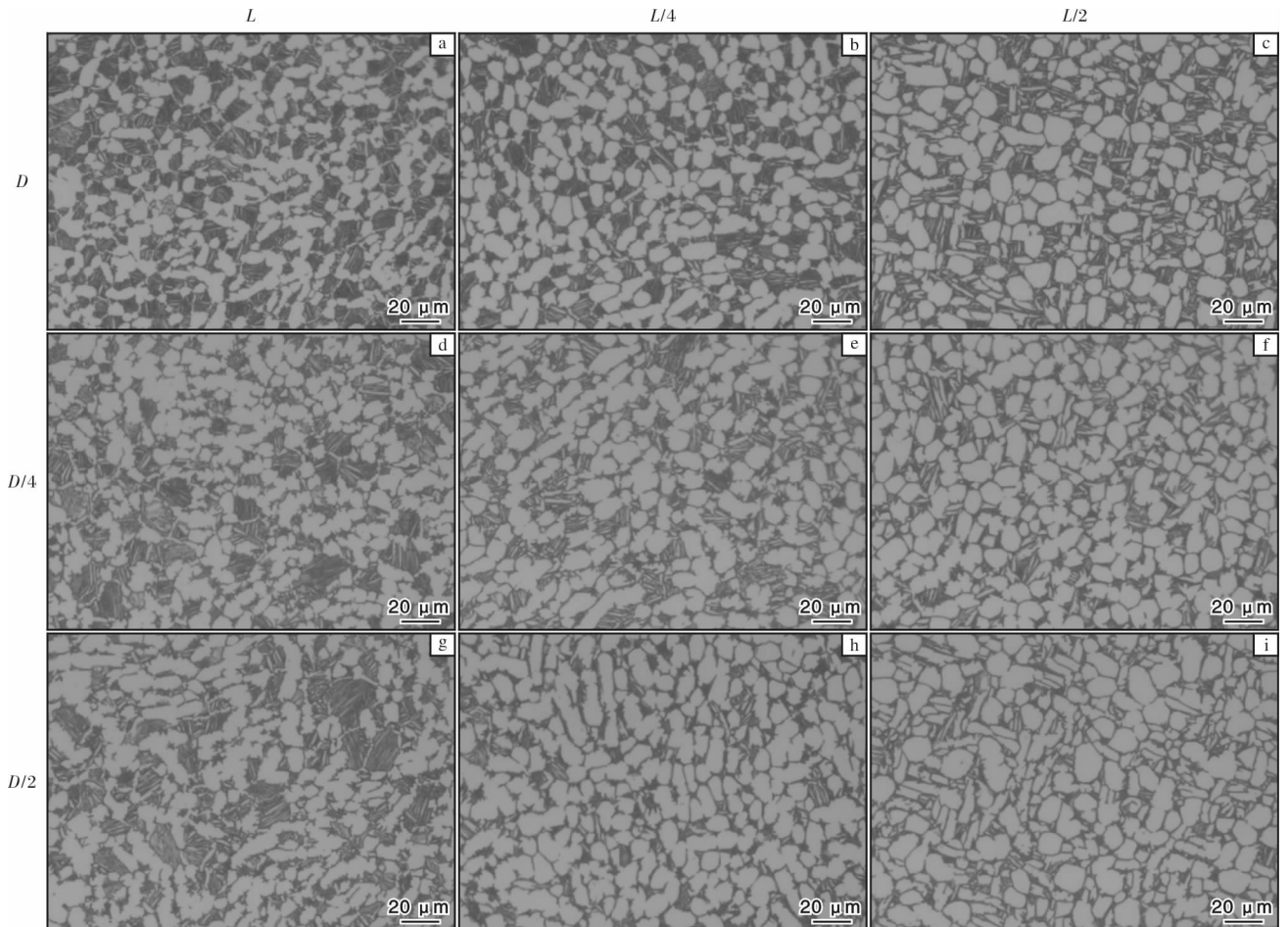


图 2 热处理后 TC11 钛合金棒材不同位置的显微组织

Fig. 2 Microstructures of TC11 titanium alloy bar at different positions after heat treatment: (a)  $L$ ,  $D$ ; (b)  $L/4$ ,  $D$ ; (c)  $L/2$ ,  $D$ ; (d)  $L$ ,  $D/4$ ; (e)  $L/4$ ,  $D/4$ ; (f)  $L/2$ ,  $D/4$ ; (g)  $L$ ,  $D/2$ ; (h)  $L/4$ ,  $D/2$ ; (i)  $L/2$ ,  $D/2$

向不同位置的显微组织。 $D$ 处沿长度方向( $L$ 至 $L/2$ 处)的显微组织(图2a~2c)变化较小,主要表现为等轴初生 $\alpha_p$ 相晶粒长大,部分次生 $\alpha_s$ 相由针状逐渐长大成短条状。 $D/2$ 处沿长度方向( $L$ 至 $L/2$ 处)显微组织(图2g~2i)变化最为明显,越靠近 $L/2$ ,等轴初生 $\alpha_p$ 相含量越多且晶粒尺寸更大,次生 $\alpha_s$ 相由针状长大成短条状甚至棒状, $\beta$ 相含量逐渐减少,在 $D/2$ 、 $L/2$ 处的显微组织几乎全部为初生 $\alpha_p$ 相和次生 $\alpha_s$ 相。 $D/4$ 处TC11钛合金的显微组织(图2d~2f)变化介于 $D$ 和 $D/2$ 之间。

显微组织主要与TC11钛合金棒材热处理过程中的温度变化有关。TC11钛合金的导热性较差,在热处理过程中存在一定的温度梯度,在长度和直径方向上越靠近心部,棒材的冷却速度越慢,使得初生 $\alpha_p$ 相和次生 $\alpha_s$ 相有足够的时间缓慢长大,越靠近棒材表面,热处理后冷却速度越快, $\alpha$ 相来不及长大,同时可以将更多的 $\beta$ 相保留下来。

## 2.2 室温拉伸性能

图3为热处理后TC11钛合金棒材不同位置的室温拉伸性能。沿棒材长度方向从 $L$ 至 $L/2$ 处,在 $D$ 和 $D/4$ 位置的强度变化较小,但 $D/2$ 处的室温拉伸性能存在明显差异,靠近 $L/2$ 处,强度显著降低,塑性增加。室温拉伸性能的变化主要与棒材显微组织的变化有关。沿长度方向,棒材 $D/2$ 处的显微组织变化最为明显,因此,室温拉伸性能的变化也更具有规律性。这主要是因为沿长度方向,棒材 $D/2$ 处的初生 $\alpha_p$ 相含量增加, $\beta$ 相含量降低,致使 $\alpha/\beta$ 相界面减少,对位错的钉扎作用减弱,使材料更容易发生变形,强度降低,且随着初生 $\alpha_p$ 相含量的增加,材料的变形协调性增加,致使塑性略微增加<sup>[7]</sup>。

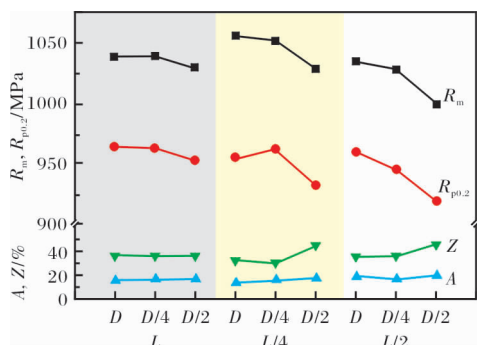


图3 TC11钛合金棒材不同位置的室温拉伸性能  
Fig. 3 Room temperature tensile properties of TC11 titanium alloy bar at different positions

## 2.3 高温拉伸性能

图4为TC11钛合金棒材不同位置的高温拉伸性能。从图4可以看出,TC11钛合金棒材的高温抗拉强度表现出沿不同方向越靠近心部,强度越低。钛合金的高温拉伸行为较室温拉伸行为为更加复杂,受多种因素影响,但也主要与显微组织有关。如前所述,沿长度方向越靠近 $L/2$ 处,初生 $\alpha_p$ 相、次生 $\alpha_s$ 相含量增加, $\beta$ 相含量降低。观察 $L$ 处沿直径方向显微组织变化规律可以发现,越靠近 $D/2$ 处,初生 $\alpha_p$ 相和 $\beta$ 相晶粒长大越明显。 $\alpha_p$ 相含量增加会降低高温抗拉强度,同时,次生 $\alpha_s$ 相片层厚度增加、方向性增强, $\beta$ 晶粒尺寸长大等显微组织的变化,也都会造成高温抗拉强度的降低<sup>[8]</sup>。从图4还可以看出,棒材不同位置的高温塑性变化不大,说明显微组织变化对高温塑性的影响较小。

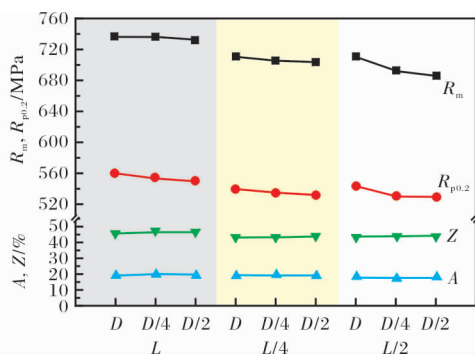


图4 TC11钛合金棒材不同位置的高温拉伸性能  
Fig. 4 High temperature tensile properties of TC11 titanium alloy bar at different positions

## 2.4 冲击韧性

图5为热处理后TC11钛合金棒材 $L$ 处不同位置的冲击韧性。从图5可以看出,沿棒材直径方向,越

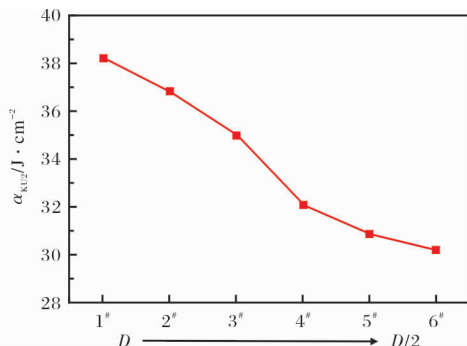


图5 TC11钛合金棒材 $L$ 处不同位置的冲击韧性  
Fig. 5 Impact toughness of TC11 titanium alloy bar at different positions of  $L$  location

靠近心部, 冲击韧性越低。对比  $L$  处不同位置显微组织可以发现, 由  $D$  处到  $D/2$  处, 棒材的初生  $\alpha_p$  相和次生  $\alpha_s$  相晶粒逐渐长大, 含量增加, 对应  $\beta$  相含量逐渐减少。初生  $\alpha_p$  相界有利于微裂纹的形核<sup>[9]</sup>, 因此, 初生  $\alpha_p$  相含量增加, TC11 钛合金棒材的冲击韧性降低。

### 3 结 论

(1) 经 970 °C/120 min/AC + 530 °C/360 min/AC 热处理后, 大规格 TC11 钛合金棒材不同位置的显微组织存在一定差异。其中,  $D/2$  处组织变化最为明显, 主要表现为  $\alpha$  相含量增加, 晶粒长大,  $\beta$  相含量降低。

(2) 大规格 TC11 钛合金棒材不同位置的室温拉伸性能变化与显微组织密切相关。沿长度方向,  $D/2$  处的显微组织差异最为明显, 室温拉伸性能表现为由边部至心部抗拉强度逐渐降低, 塑性升高。

(3) 大规格 TC11 钛合金棒材显微组织对其高温抗拉强度和冲击韧性具有显著影响。越靠近心部 ( $D/2$  和  $L/2$ ), 高温抗拉强度和冲击韧性越低, 但高温塑性变化不明显。

### 参考文献 References

- [1] 许国栋, 王凤娥. 高温钛合金的发展和应[ J ]. 稀有金属, 2008, 32(6): 774 - 780.
- [2] 邹清燕, 蔡俊哲, 贾东明, 等. TC11 棒材初生  $\alpha$  含量与热处理温度的关系[ J ]. 钛工业进展, 2001, 18(1): 43 - 45.
- [3] 姜丽华, 田军强, 张利军, 等. 热处理对 TC11 钛合金室温力学性能的影响[ J ]. 材料开发与应用, 2017, 32(4): 38 - 43.
- [4] 韩栋, 毛小南, 张鹏省, 等. 双重退火温度对高应力水平 TC11 合金组织性能的影响[ J ]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 577 - 580.
- [5] 吴华, 杨建朝, 李常亮, 等. 大规格 TC11 钛合金棒材的热处理[ J ]. 金属热处理, 2010, 35(9): 73 - 75.
- [6] 王媛, 赵民权, 谢力, 等. TC11 合金大规格棒材异常组织分析[ J ]. 金属热处理, 2015, 40(12): 53 - 55.
- [7] Lütjering G, Williams J C. 钛[ M ]. 雷霆, 等译. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [8] 贺飞, 陈海峰, 王玉会. 显微组织对 TA15 合金高温拉伸性能的影响[ J ]. 材料工程, 2012(2): 13 - 19.
- [9] Zhou W, Chew K G. Effect of welding on impact toughness of butt-joints in a titanium alloy[ J ]. Materials Science and Engineering A, 2003, 347(1/2): 180 - 185.

### 行业动态

## ATI 及其子公司 2021 年第 4 季度及全年经营状况

美国 ATI 公司 2021 年第 4 季度(2021 年 10 月 1 日至 12 月 31 日)销售额为 7.65 亿美元, 较 2021 年第 3 季度(7.26 亿美元)增长 5%, 较 2020 年同期(6.58 亿美元)增长 16%。高性能金属部(HPMC)销售额为 3.14 亿美元, 较 2021 年第 3 季度(3.00 亿美元)增长 5%, 这主要是由于航空发动机市场需求增长, 导致商业航空市场销售额增长 16%; 同时, 由于对亚洲的出口量下降, 能源市场销售额下降 27%。与 2020 年同期(2.22 亿美元)相比, 2021 年第 4 季度销售额增长 41%, 这反映出以商业航空发动机为首的终端市场出现整体回暖。先进合金 & 解决方案部(AA&S)销售额为 4.52 亿美元, 较 2021 年第 3 季度(4.26 亿美元)增长 6%, 其中, 航空航天和国防市场销售额增长 12%, 能源市场销售额增长 7%, 汽车市场销售额下降 16%。此外, 产品价格上调也在一定程度上推动了销售收入的增长。

ATI 公司 2021 年全年销售额为 28.00 亿美元, 较

2020 年(29.82 亿美元)下降 6%; 营业利润为 1.18 亿美元。ATI 公司总裁兼首席执行官 Robert S. Wetherbee 表示, 2021 年公司整体经营状况有所改善, 随着商业航空市场的复苏以及公司业务转型的不断推进, 预计 2022 年第 1 季度 ATI 公司营业收入将出现大幅增长。

2021 年 ATI 公司在航空和国防市场的销售额为 11.33 亿美元, 占销售总额的 41%, 其中商业飞机发动机、机身和国防市场分别占 19%、9% 以及 13%; 能源市场的销售额为 5.92 亿美元, 占销售总额的 21%, 其中石油和天然气、特种能源市场分别占 12%、9%; 汽车市场的销售额为 3.05 亿美元, 占销售总额的 11%; 电子市场销售额为 2.15 亿美元, 占销售总额的 8%; 餐具及厨具等的销售额为 1.53 亿美元, 占销售总额的 5%; 医药市场的销售额为 1.32 亿美元, 占销售总额 5%; 建筑及开采市场的销售额为 1.22 亿美元, 占销售总额的 4%。

何蕾编译自美国 ATI 公司官网