

固溶处理对近 β 锻 TC21 合金组织的影响

侯智敏, 毛小南, 雷文光, 卢亚锋, 张鹏省, 韩 栋

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘 要:通过对 TC21 合金进行近 β 锻, 获得典型的双态组织。通过 X 射线衍射(XRD)、光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)分析了固溶处理对双态 TC21 合金组织的影响。XRD 分析表明:随着固溶温度的降低, TC21 合金固溶水冷处理后的亚稳定相组成依次为 α'' (T_{β})、 $\alpha+\alpha''$ ($T_{\beta}-935$)、 $\alpha+\alpha''+\beta$ (915、855)、 $\alpha+\beta$ (835)。分别对 TC21 合金进行 895、2 h, AC、QFC(慢炉冷)、FC+(610、4 h, AC)热处理, 研究固溶冷却速率对合金组织性能的影响。结果表明:随着冷却速率的增加, 等轴 α 相基本保持不变, 次生 α 相含量减少, 合金强度增加, 塑性减小。此外, 分别对 TC21 合金在 915、905、895、870 和 835 进行 2 h, AC 固溶处理, 金相分析表明:随着固溶温度的降低, 等轴 α 相相含量及尺寸基本保持不变, 次生 α 条所占比例增加, α 条变宽。

关键词: TC21 合金; 冷却速率; 近 β 锻; 双态组织

中图分类号: TB 804.3

文献标志码: A

Effect of solution treatment on morphology of near β forged TC21 alloy

HOU Zhi-min, MAO Xiao-nan, LEI Wen-guang, LU Ya-feng, ZHANG Peng-sheng, HAN Dong

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

Abstract: Two-state microstructure of TC21 alloy was obtained by near β forging process. The effect of different solution treatments on the microstructure of TC21 alloy was analyzed by X-ray diffractometry (XRD), optical microscopy (OM) and electron microscopy (SEM). The XRD analysis reveals that with the decrease of solution treatment temperature, the phase compositions of TC21 alloy are α'' (T_{β}), $\alpha+\alpha''$ ($T_{\beta}-935$), $\alpha+\alpha''+\beta$ (915, 855), $\alpha+\beta$ (835). The morphology and mechanical properties of TC21 alloy solution treated at 895 for 2 h with different solution cooling rate (air cooling, quick furnace cooling, furnace cooling) and then aged by 610, 4 h, AC was analyzed. As a result, with the increase of solution cooling rate, there is no obvious change on the primary equiaxed α phase, the content of secondary α phase decreases, the strength of the alloy increases, and the plasticity decreases at the same time. TC21 alloy was solution treated at 915, 905, 895, 870 and 835 for 2 h followed by air cooling, respectively. With the decrease of solution treatment temperature, the width and content of lamellar α phase increase, and there is no difference between the equiaxed α phase of TC21 alloy solution treated at different temperatures.

Key words: TC21 alloy; cooling rate; near β forging; two-state microstructure

TC21 合金是西北有色金属研究院自行研制的一种新型高强高韧高损伤容限型两相钛合金, 该合金具有良好的强度、塑性、韧性及低裂纹扩展速率的匹配^[1-2], 是一种极具应有前景的新型结构钛合金。

虽然 WANG 等^[3]、费玉环等^[4]和张颖楠等^[5]研究了 TC21 合金等轴组织或等轴组织较多的双态组织, 朱知寿等^[6]研究了网篮组织, 但由于钛合金具有组织遗传性, 对不同的终锻组织进行相同的热处理后, 其

微观组织差别很大。作为两相钛合金,TC21 合金的微观组织对其力学性能有很大的影响。因此,本文作者拟通过 X-ray 衍射(XRD)、OM 和 SEM 分析热处理温度、冷却速率等热处理参数对近 β 锻 TC21 合金组织及相组成等的影响,测试不同组织对应的力学性能。

1 实验

实验所用 TC21 合金为西北有色金属研究院熔炼的 6 t 铸锭经多次开坯锻和近 β 锻终锻后制备的 ϕ 350 mm 棒材,其锻态组织见图 1。合金相变点温度为 $(947\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 。从棒材上切取 ϕ 10 mm \times 15 mm 和 ϕ 10 mm \times 70 mm 的试样,分别用于热处理和力学性能测试。在 835、855、915、935 和 960 $^{\circ}\text{C}$ 分别对 TC21 合金进行 40 min, WQ 固溶热处理,车掉表面氧化皮后,通过 D/max2400 型 X 射线衍射仪(XRD)分析不同温度固溶热处理后 TC21 合金的亚稳相组成,在此基础上,制定不同的固溶/时效工艺对合金进行热处理。金相试样抛光后,采用 HF+HNO₃+H₂O (体积比 1:5:50)腐蚀液浸蚀,浸蚀后通过 OLYMPUS/PMG3 光学显微镜(OEM)和 OXFORD INCI 扫描电镜(SEM)分析不同热处理工艺对合金微观组织的影响。具体热处理工艺见表 1。固溶时效处理后 TC21 合金的力学性能测试在 Instron 1185 力学试验机上进行。

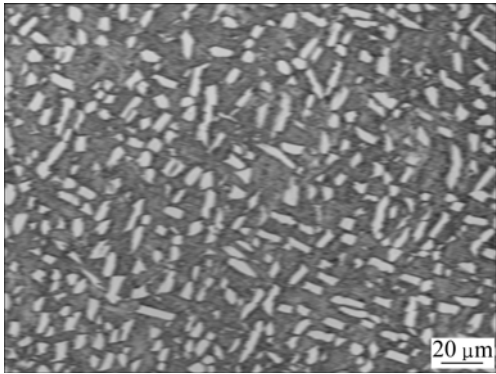


图 1 TC21 合金近 β 锻后的金相组织

Fig.1 Morphology of near β forged TC21 alloy

2 结果与讨论

2.1 TC21 合金在不同温度的亚稳相组成

TC21 合金在相变点以上(960°C)固溶水冷处理后的 XRD 分析结果见图 2。从图 2 可以看出:TC21 合金经 960°C 固溶水冷处理后具有典型的正交结构的 α''

表 1 TC21 合金的热处理工艺

Table 1 Different heat treatment procedures of TC21 alloy

| Heat treatment | Number | Heat treatment parameters |
|----------------|----------------|---|
| Solution+aging | 1 [#] | (895 $^{\circ}\text{C}$, 2 h, AC)+(610 $^{\circ}\text{C}$, 4 h, AC) |
| | 2 [#] | (895 $^{\circ}\text{C}$, 2 h, QFC*)+(610 $^{\circ}\text{C}$, 4 h, AC) |
| | 3 [#] | (895 $^{\circ}\text{C}$, 2 h, FC)+(610 $^{\circ}\text{C}$, 4 h, AC) |
| Solution | 4 [#] | 915 $^{\circ}\text{C}$, 2 h, AC |
| | 5 [#] | 905 $^{\circ}\text{C}$, 2 h, AC |
| | 6 [#] | 895 $^{\circ}\text{C}$, 2 h, AC |
| | 7 [#] | 870 $^{\circ}\text{C}$, 2 h, AC |
| | 8 [#] | 835 $^{\circ}\text{C}$, 2 h, AC |

*QFC means quick furnace cooling.

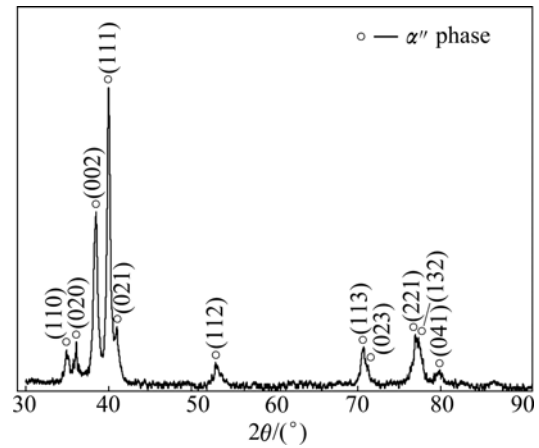


图 2 TC21 合金在相变点以上(960°C , 40 min, WQ)热处理后 XRD 谱

Fig.2 XRD pattern of TC21 alloy solution treated at 960°C for 40 min followed by WQ

衍射峰(020)、(021),晶格参数为: $a=3.0\text{ nm}$, $b=4.968\text{ nm}$, $c=4.675\text{ nm}$ 。TC21 合金在相变点以下, (935°C , 40 min)、(915°C , 40 min)、(855°C , 40 min)固溶水冷热处理后的 XRD 分析结果见图 3。从图 3 可以看出:随着固溶温度的降低,水冷热处理后合金的亚稳定相组成依次为: α'' (T_{β})、 $\alpha+\alpha''$ ($T_{\beta}-935^{\circ}\text{C}$)、 $\alpha+\alpha''+\beta$ (915°C 、 855°C)、 $\alpha+\beta$ (835°C)。在两相区是否存在 $\alpha+\alpha''+\omega$ 和 $\alpha+\omega+\beta$ 相区需要通过进一步的实验分析确定。由于亚稳定 β 相和 α'' 都具有较好的时效强化效果,在 935°C 以上固溶热处理时, α'' 马氏体相时效分解强化占主导地位,而在 835°C 以下,则以亚稳 β 相分解强化为主,在 $935\sim 835^{\circ}\text{C}$ 为混合机制。

2.2 冷却速率对 β 锻 TC21 合金微观组织性能的影响

TC21 合金 1[#]、2[#]、3[#]工艺热处理后的金相组织见图 4。从图 4 可以看出:空冷时 β 基体上弥散分布着

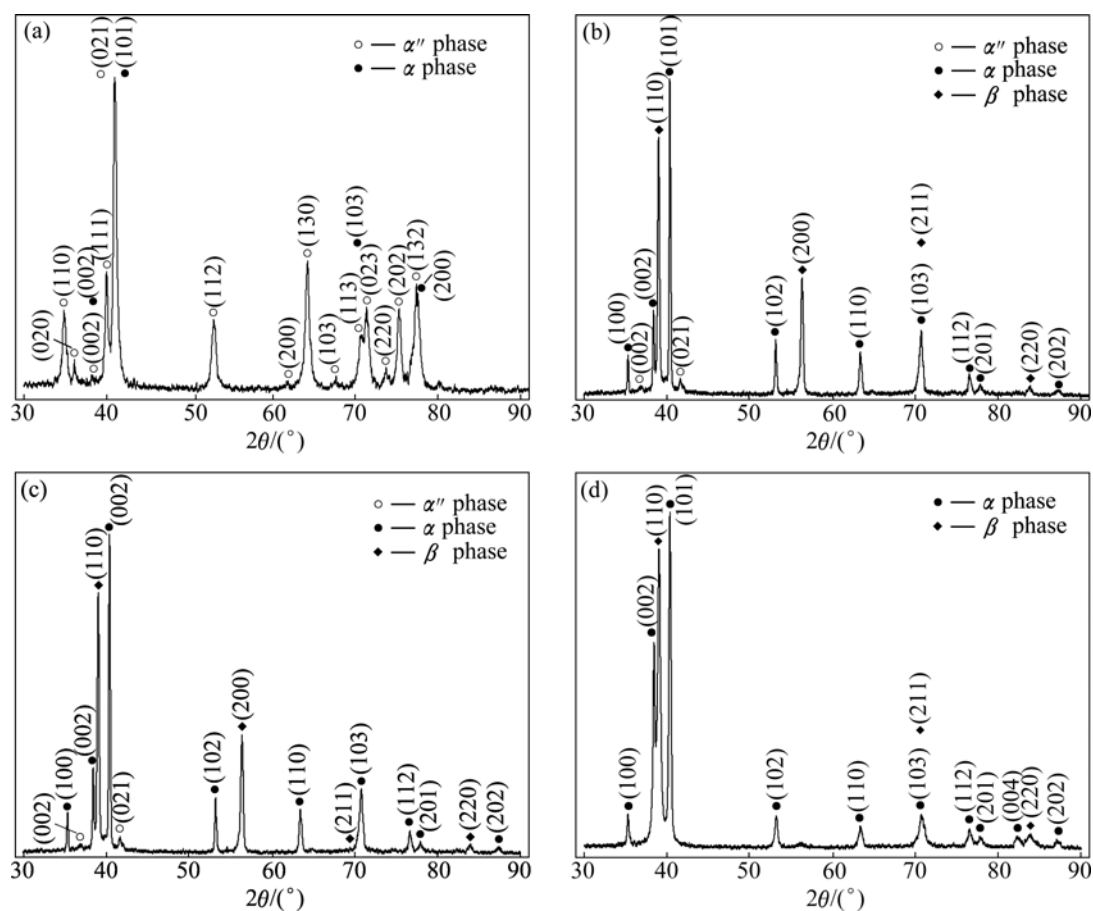


图 3 不同温度固溶 40 min 水冷处理后 TC21 合金 XRD 谱

Fig.3 XRD patterns of TC21 alloy solution treated at different temperatures for 40 min: (a) 935 °C ; (b) 915 °C ; (c) 855 °C ; (d) 835 °C

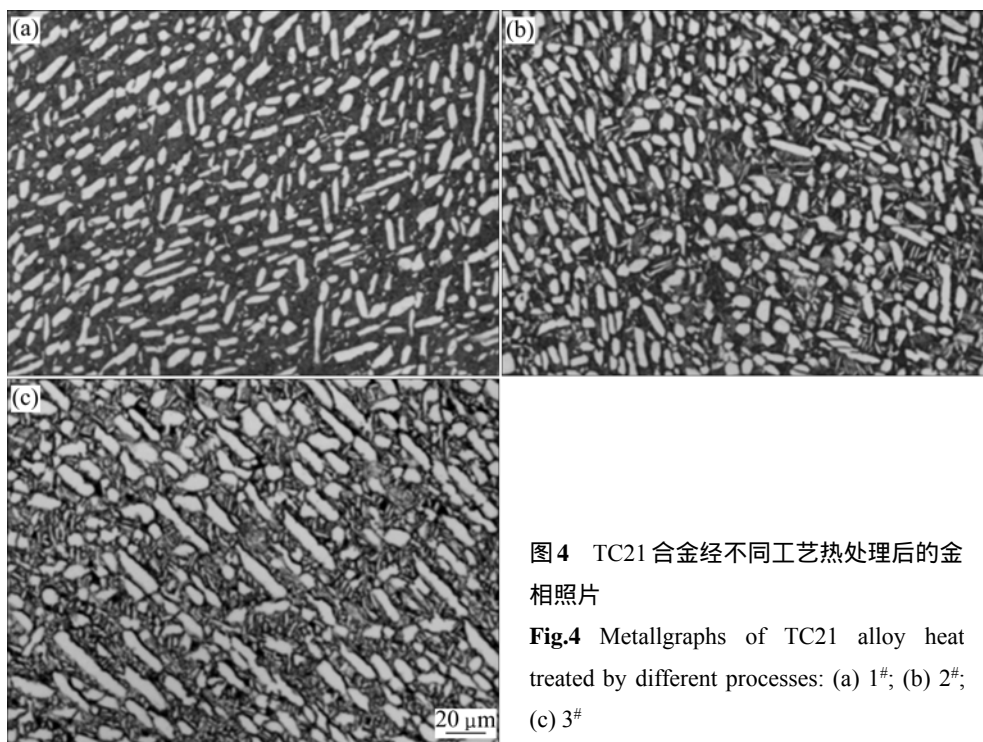


图 4 TC21 合金经不同工艺热处理后的金相照片

Fig.4 Metallgraphs of TC21 alloy heat treated by different processes: (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]

少量的次生 α 颗粒，而快炉冷时有一定的次生 α 条产生，炉冷时大量次生 α 相析出，几乎看不到 β 基体。由于在低的冷却速率下，次生 α 相有更充分的形核长大时间，所以随着固溶冷却速率的降低，次生 α 相含量增加。初生等轴 α 相晶粒尺寸有一定的增加，相含量变化不明显。

为了分析冷却速率对合金力学性能的影响，对 1[#]、2[#]、3[#]工艺热处理后 TC21 合金进行性能测试，结果见表 2。从表 2 可以看出：随着固溶冷却速率的增加，合金强度明显增加，塑性减小。从图 4 可以看出：随着冷却速率的变化，次生 α 相发生明显的改变。为进一步确定冷却速率对 TC21 合金力学性能影响的机制，通过 SEM 分析冷却速率对微观组织的影响。TC21 合金经不同冷却速率下固溶/时效热处理后的 SEM 像见图 5。从图 5 中可以看出：在高的冷却速率下，TC21 合金 β 基体相中析出大量纵横交错的次生 α 相，几乎看不到 β 基体。随着冷却速率的下降， β 基体上析出的次生 α 条逐渐减少。炉冷处理的试样其 β 基体上几乎看不到次生 α 条。这是由于随着固溶冷却速率的降低，固溶冷却过程中形成的 α'' 相含量逐渐减小(见图 3(b)和 3(c))，合金在水冷后的相组成为 $\alpha+\beta+\alpha''$ ，在炉冷时则全部变为 $\alpha+\beta$ 相(见图 6)。在时效过程中， α'' 相和亚稳定的 β 相最终时效分解为次生 α 相。高固溶冷却速率下，形成大量的 α'' 相，所以时效时 β 基体中析出大量的纵横交错的次生 α 相，在低的冷却速率下，只有少量的亚稳定 β 相时效分解为次生 α 条。

表 2 经不同工艺热处理后 TC21 合金的室温拉伸性能
Table 2 Mechanical properties of TC21 alloy after different solution treatments

| Treatment No. | R_m /MPa | $R_{p0.2}$ /MPa | A /% | Z /% |
|----------------|------------|-----------------|--------|--------|
| 1 [#] | 1 310 | 1 220 | 5.0 | 14 |
| 2 [#] | 1 130 | 1 070 | 10.5 | 29 |
| 3 [#] | 1 030 | 975 | 11 | 35.5 |

2.3 固溶温度对近 β 锻 TC21 合金微观组织的影响

4[#]、5[#]、6[#]、7[#]、8[#]工艺热处理后 TC21 合金的金相组织见图 7。从图 7 中可以看出：在 915 °C 固溶处理的 TC21 合金其初生等轴 α 相尺寸及相含量相对较小；在 905 °C 及以下温度固溶处理时，固溶处理后的初生等轴 α 相尺寸及相含量变化不大，但是条状 α 相含量随着固溶温度的升高而增加， α 条变宽。这是由于采用近 β 锻的 TC21 合金只有 40%左右的初生 α 相，其余为细小的条状 α 相和 β 基体。在 915 °C 保温时， α 相含量小于 40%，部分初生 α 相转变为 β 相，与锻

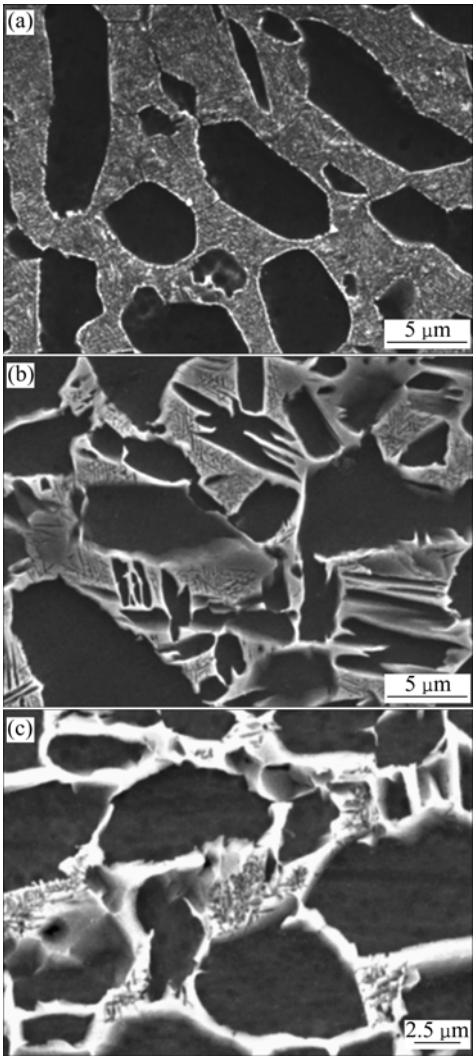


图 5 TC21 合金经不同工艺热处理后的 SEM 像
Fig.5 SEM images of TC21 alloy heat treated by different processes: (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]

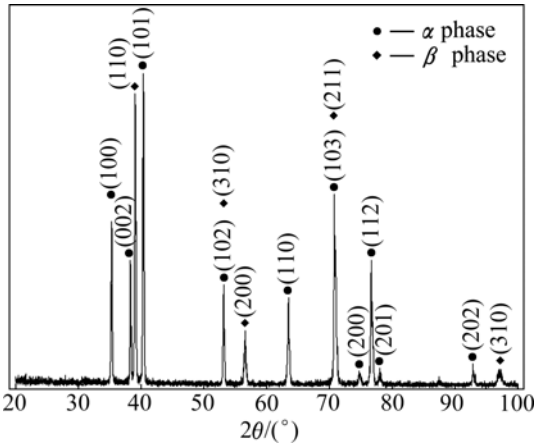


图 6 TC21 合金经 895 °C，2 h，FC 热处理后的 XRD 谱
Fig.6 XRD pattern of TC21 alloy solution treated at 895 °C for 2 h and followed by FC

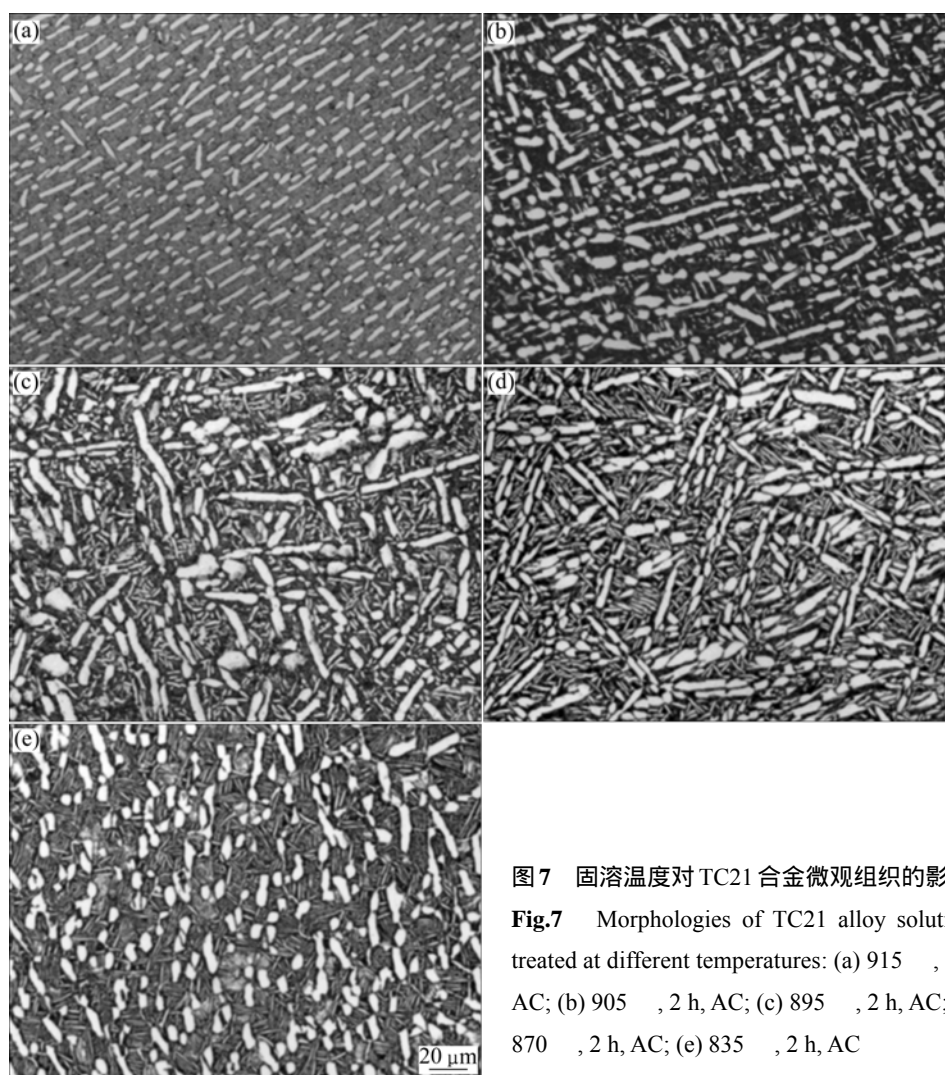


图 7 固溶温度对 TC21 合金微观组织的影响

Fig.7 Morphologies of TC21 alloy solution treated at different temperatures: (a) 915 °C, 2 h, AC; (b) 905 °C, 2 h, AC; (c) 895 °C, 2 h, AC; (d) 870 °C, 2 h, AC; (e) 835 °C, 2 h, AC

态组织相比, 等轴 α 相尺寸变小, 相含量减小。在 905 °C 及以下温度固溶处理保温时, α 相含量超过 40%, 等轴 α 相尺寸及含量随着保温的进行会有一定的增加, 但是变化不明显; 随着固溶温度的降低, 固溶保温时有更多的条状 α 相析出并长大。由于上述原因, 在低温固溶时, 次生 α 条变宽, 相含量增加。

常规锻造的两相钛合金, 随着固溶温度的升高, 合金中的等轴 α 相含量减少, 条状 α 相含量增加。由于近 β 锻造获得的等轴 α 相含量较低, 所以在不同温度固溶处理时, 组织变化出现与常规锻造 TC21 合金完全相反的趋势。

3 结论

- 1) TC21 合金的亚稳相组成为 α'' (T_β)、 $\alpha+\alpha''$ (T_β 935 °C)、 $\alpha+\alpha''+\beta$ (915、855 °C)、 $\alpha+\beta$ (835 °C)。

2) 在高的固溶冷却速率下, 条状 α 相含量降低, β 基体相中存在大量细密分布的次生 α 条, 随着冷却固溶速率的降低, 条状 α 相含量增加, β 基体相中细小的次生 α 条含量减小。

3) 随着固溶冷却速率的增加, 在相同的固溶处理温度和时效条件下, TC21 合金强度增加, 塑性降低。

4) 与锻态组织相比, 在 915 °C 固溶处理时, TC21 合金初生等轴 α 相尺寸减小, 相含量降低; 在 905 °C 及以下温度固溶处理时, TC21 合金中等轴组织形貌基本保持不变, 随着固溶温度降低, 次生 α 相变宽, 相含量增加。

REFERENCES

- [1] 费玉环, 周 廉, 曲恒磊, 赵永庆, 冯 亮. 两相区热处理对 TC21 钛合金显微结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(11): 1928-1932.

- FEI Yu-huan, ZHOU Lian, QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, FENG Liang. Effects of heat-treatments on microstructures of TC21 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(11): 1928–1932.
- [2] 马少俊, 吴学仁, 刘建中, 王利发. TC21 钛合金的微观组织对力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2006, 26(5): 22–25.
MA Shao-jun, WU Xue-ren, LIU Jian-zhong, WANG Li-fa. Influence of microstructures on mechanical properties for TC21 titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(5): 22–25.
- [3] WANG Yi-hong, KOU Hong-chao, CHNAG Hui, ZHU Zhi-shou, ZHANG Feng-shou, LI Jin-shan, ZHOU Lian. Influence of solution temperature on phase transformation of TC21 alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 508: 76–82.
- [4] FEI Yu-huan, ZHOU Lian, QU Heng-lei, ZHAO Yong-qing, HUANG Chuan-zhen. The phase and microstructure of TC21 alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 494: 166–172.
- [5] 张颖楠, 赵永庆, 曲恒磊, 李 辉, 冯 亮, 郭红超, 龚定坤. 热处理对 TC21 合金显微组织和室温拉伸性能的影响[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 34–38.
ZHANG Ying-nan, ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei, LI Hui, FENG Liang, GUO Hong-chao, HUANG Ding-kun. Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of TC21 alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 34–38.
- [6] 朱知寿, 王新南, 董 路, 刘东升. 新型 TC21 钛合金热处理工艺参数与显微组织演变的关系研究[J]. 稀有金属快报, 2006, 23(6): 24–27.
ZHU Zhi-shou, WANG Xin-nan, TONG Lu, LIU Dong-sheng. Phase transformation and composition for novel TC21 [J]. Rare Metals Letters, 2006, 23(6): 24–27.

(编辑 杨 兵)