

β 固溶处理对 TC21 合金组织性能的影响

侯智敏^{1,2}, 毛小南¹, 赵永庆^{1,2}, 张鹏省¹, 雷文光¹, 于兰兰¹

(1. 西北有色金属研究院 钛合金研究所, 西安 710016;

2. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

摘要: 对等轴组织 TC21 合金进行 β 相区高温固溶+ α/β 相区低温固溶+低温时效热处理; 分析 β 相区高温固溶冷却速率、 α/β 相区低温固溶温度对 TC21 合金组织和性能的影响。结果表明: 随着 β 相区固溶冷却速率的增加, α/β 相区固溶热处理后合金中条状 α 相尺寸明显减小, α 条厚度减小; 随着 α/β 区固溶处理温度的降低, 在相同的 β 相区固溶冷却速率下, 合金中的初生条状初生 α 相尺寸有一定的减小, 相含量增加。经过(960 °C, 1 h, FC)+(890 °C, 1 h, AC)+(620 °C, 6 h, AC)三重热处理后, TC21 合金的强度、塑性和韧性匹配较好。这表明三重热处理可以改善常规锻造 TC21 合金的综合力学性能。

关键词: β 固溶处理; TC21 合金; 冷却速率; 强韧性匹配

中图分类号: TB 804.3

文献标志码: A

Effect of β solution treatment on morphology and mechanical properties of TC21 alloy

HOU Zhi-min^{1,2}, MAO Xiao-nan¹, ZHAO Yong-qing^{1,2}, ZHANG Peng-sheng¹, LEI Wen-guang¹, YU Lan-lan¹

(1. Titanium Alloy Research Center, Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The equiaxed TC21 alloy samples were β solution treated, followed by α/β solution treatment and then aged at low temperature. The effect of β heat treatment cooling rate and temperature of α/β heat treatment on the morphology of TC21 alloy was analyzed. The results show that higher cooling rate of β heat treatment leads to the shrinking of platelet α phase, in the α/β heat treatment process. It is also confirmed that lower α/β heat treatment temperature, after the same beta heat treatment process, results in the decrease of width and increase of the content of platelet α phase. After optimized triplex heat treatment (960 °C, 1 h, FC)+(890 °C, 1 h, AC)+(620 °C, 6 h, AC), the strength, plasticity and fracture toughness match well, indicating that the triplex heat treatment can improve the synthetical mechanical properties of TC21 alloy.

Key words: β solution treatment; TC21 alloy; cooling rate; matching of strength and fracture toughness

TC21 钛合金是我国具有自主知识产权的损伤容限型两相钛合金, 具有高强度(1 100 MPa)、高韧性(70 MPa·m^{1/2})和较低的裂纹扩展速率(da/dN)等特点^[1-3]。它优良的综合性能特别适合用于制造框、梁等主承力结构件^[4]。随着我国航空航天事业的发展, 需要制备出更大规格的高品质承力结构件。由于锻造过程中存在的不均匀变形, 大规格锻件需要多火次的大

变形量才能保证组织的均匀性。如果通过 β 热处理对大规格锻件进行均匀化热处理, 再通过 α/β 区固溶+时效进行性能调控, 可以满足 TC21 合金的使用要求, 降低大规格锻件的组织均匀性要求, 从而降低锻造火次, 节省生产成本。

研究表明, 与 TC21 合金相近的高强高损伤容限型 Ti-62222s 合金^[5]通过在 β 相区高温固溶+ α/β 相区

低温固溶+时效的三重热处理工艺, 可以获得强度、塑性和韧性匹配良好的全网篮组织, 并且已形成相关热处理规范^[4-5]。对于 TC21 合金, 国内一般通过近 β 锻、准 β 锻或 β 锻获得强韧性匹配较好的三态组织或网篮组织^[8-9], 而 β 相区高温固溶方面的研究较少。本文作者对常规锻造的等轴组织 TC21 合金进行 β 相区高温固溶+ α/β 相区低温固溶+时效的三重热处理, 分析 β 相区高温固溶冷却速率、 α/β 相区低温固溶温度对 TC21 合金组织的影响, 并进一步分析优化的热处理工艺对合金综合力学性能的影响。

对于 β 热处理后出现的连续 α 晶界问题, SCHMIDT 和 CHRIST^[10] 研究发现, 通过合理的后续热处理, 可以消除连续晶界 α 相, 作者正在做相关的工作。

1 实验

实验所用 TC21 合金为西北有色金属研究院熔炼的 6t 铸锭, 经多次开坯锻和常规改锻后制备的直径为 200 mm 的棒材, 其锻态组织为等轴组织, 如图 1 所示, 相变点为 $(947\pm5)^\circ\text{C}$ 。从棒材上切下 $d\ 10\ \text{mm}\times 15\ \text{mm}$ 、 $d\ 10\ \text{mm}\times 70\ \text{mm}$ 和 $62\ \text{mm}\times 65\ \text{mm}\times 67\ \text{mm}$ 的试样, 分别用于金相分析、拉伸性能测试和断裂韧性 (K_{IC}) 测试。先对 TC21 合金金相样品分别进行 $(960^\circ\text{C}, 1\ \text{h}, \text{WQ/AC/FC})$ β 相区固溶热处理; 再对不同冷却速率的 β 热处理样品分别进行 $(925^\circ\text{C}, 1\ \text{h}, \text{AC})$ 和 $(890^\circ\text{C}, 1\ \text{h}, \text{AC})$ α/β 相区固溶热处理, 然后对所有双重固溶热处理的样品进行 $(620^\circ\text{C}, 6\ \text{h}, \text{AC})$ 的时效热处理, 分析固溶冷却速率及固溶温度对合金显微组织的影响。在此基础上, 选定合理的双重固溶工艺和时效工艺对室温拉伸和断裂韧性样品进行热处理。金相试样抛光后, 采用 $\text{HF}+\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}$ (体积比为 1:3:10)

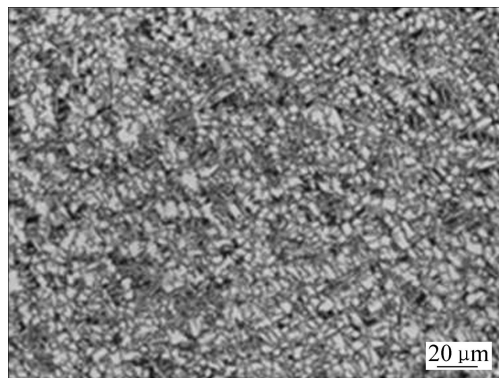


图1 TC21 合金常规锻后金相组织

Fig. 1 Optical microstructure of normal forged TC21 alloy

的腐蚀液浸蚀, 通过 OLYMPUS/PMG3 光学显微镜观察不同热处理工艺对合金显微组织的影响。固溶/时效处理后, 在 Instron 1185 力学试验机上测试 TC21 合金的力学性能。

2 结果与讨论

2.1 β 相区固溶冷却速率对 TC21 合金显微组织的影响

TC21 合金等轴组织试样经 β 固溶热处理后 $(960^\circ\text{C}+1\ \text{h}, \text{WQ/AC/FC})$ 的显微组织如图 2 所示。可以看出, 水冷试样金相组织中只能看到针状马氏体(见图 2(a)), 而空冷(见图 2(b))及炉冷样品(见图 2(c))

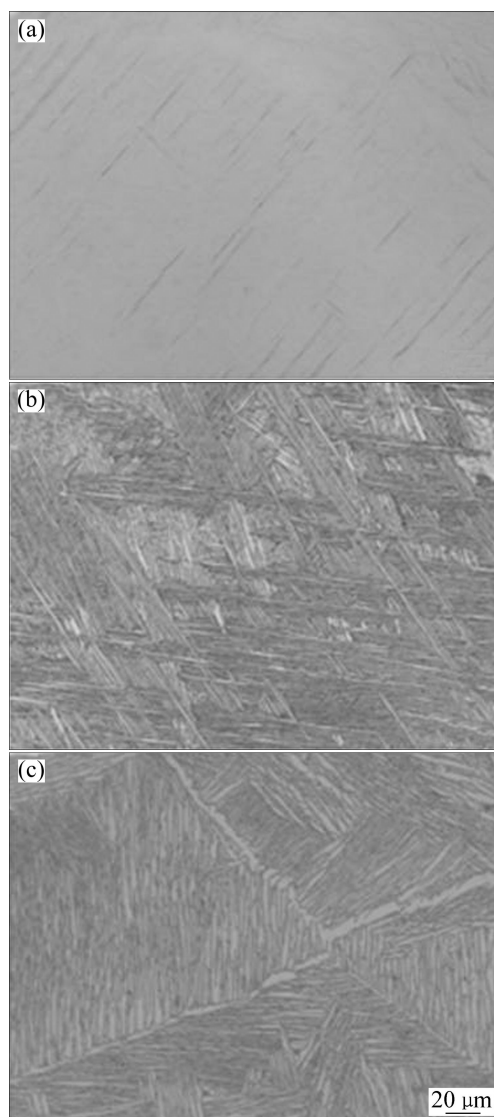


图2 TC21 合金不同工艺热处理后的金相组织

Fig. 2 Optical microstructures of TC21 alloy by different heat treatments: (a) $960^\circ\text{C}, 1\ \text{h}, \text{WQ}$; (b) $960^\circ\text{C}, 1\ \text{h}, \text{AC}$; (c) $960^\circ\text{C}, 1\ \text{h}, \text{FC}$

金相组织都是由 α 束集和 β 基体组成。与空冷样品相比,炉冷样品中 α 条长度减小,厚度增加,这表明降低 β 相区固溶冷却速率,可以降低条状 α 相的长宽比。

2.2 β 相区固溶冷却速率对 α/β 相区固溶+时效热处理后 TC21 合金组织性能的影响

TC21 合金(960 °C, 1 h) β 热处理后,在不同冷却速率下冷却的试样的 α/β 相区在(925 °C, 1 h)+AC 固溶热处理后的金相组织如图 3 所示。可以看出, β 相区固溶水冷样品 α/β 相区(925 °C, 1 h)+AC 热处理后(见图 3(a)),其金相组织为细小的网篮组织,在粗的初生条状 α 相组成的网篮组织中嵌套有细小的次生条状 α 相组成的网篮组织,形成双网篮组织。与水冷样品相比,空冷样品中(见图 3(b))初生条状 α 相长度明显增加,部分初生条状 α 相厚度明显增加,部分初生条状 α 相厚度变化不明显,次生条状 α 相尺寸明显增加。由于初生条状 α 相长度增加明显,与水冷样品相比,其长宽比的平均值有一定的增加。初生条状 α 相形成网篮组织,次生 α 相交织度较低。与空冷试样相比,炉冷样品中(见图 3(c))初生条状 α 相长度、厚度均明显增加, α 条的顶端出现明显的分叉, α 条长宽比增

加,初生条状 α 相组成网篮组织;次生条状 α 相长度明显增加,厚度没有明显的变化,次生 α 条呈团簇状分布。TC21 合金(925 °C, 1 h, AC)固溶热处理后的金相组织如图 3(d)所示。可以看出,其金相组织由初生等轴 α 相及次生条状 α 相组成, α 条呈团簇状分布。上述分析表明,与单重 α/β 相区固溶相比,增加 β 相区固溶预处理可以形成网篮组织,且随着 β 相区固溶冷却速率的减小,条状初生 α 相厚度明显增加。

TC21 合金 x (960 °C, 1 h) β 热处理后,于不同速率冷却,固溶热处理后的金相组织如图 4 所示。与(925 °C, 1 h)+AC 固溶热处理相比,(890 °C, 1 h, AC)固溶热处理后 β 相区固溶冷却速率对合金金相组织的影响规律基本一致。不同点在于,随着固溶冷却速率的降低,条状初生 α 相厚度增加不明显。此外,在更低的温度进行 α/β 相区固溶热处理,其金相组织更加细密;若只进行两相区单重热处理(见图 4(d)),则等轴 α 相含量明显增加,次生条状 α 相更加细小。

综上所述,通过(960 °C, 1 h, FC)+(890 °C, 1 h, AC)+(620 °C, 6 h, AC)热处理可以获得片层厚度最大的条状初生 α 相。由于 α 相片层厚度的增加可以明显

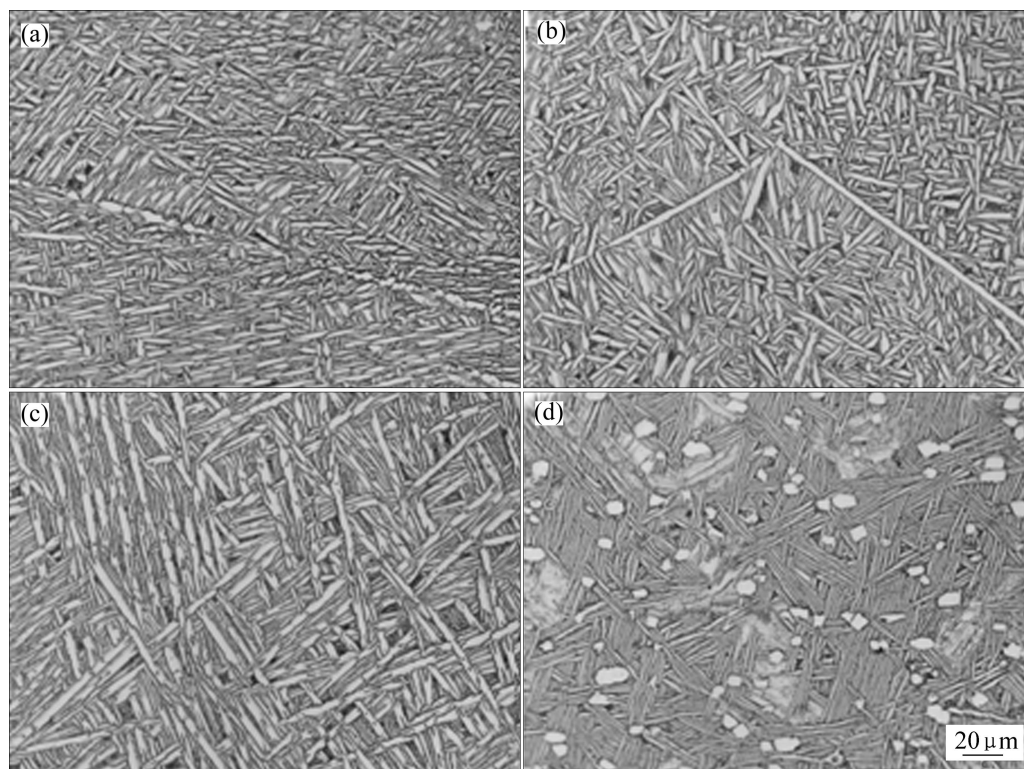


图 3 TC21 合金经不同工艺热处理后的金相组织

Fig. 3 Optical microstructures of TC21 alloy heat treated by different processes: (a) (960 °C, 1 h, WQ)+(925 °C, 1 h, AC)+(620 °C, 6 h, AC); (b) (960 °C, 1 h, AC)+(925 °C, 1 h, AC)+(620 °C, 6 h, AC); (c) (960 °C, 1 h, FC)+(925 °C, 1 h, AC)+(620 °C, 6 h, AC); (d) (925 °C, 1 h, AC)

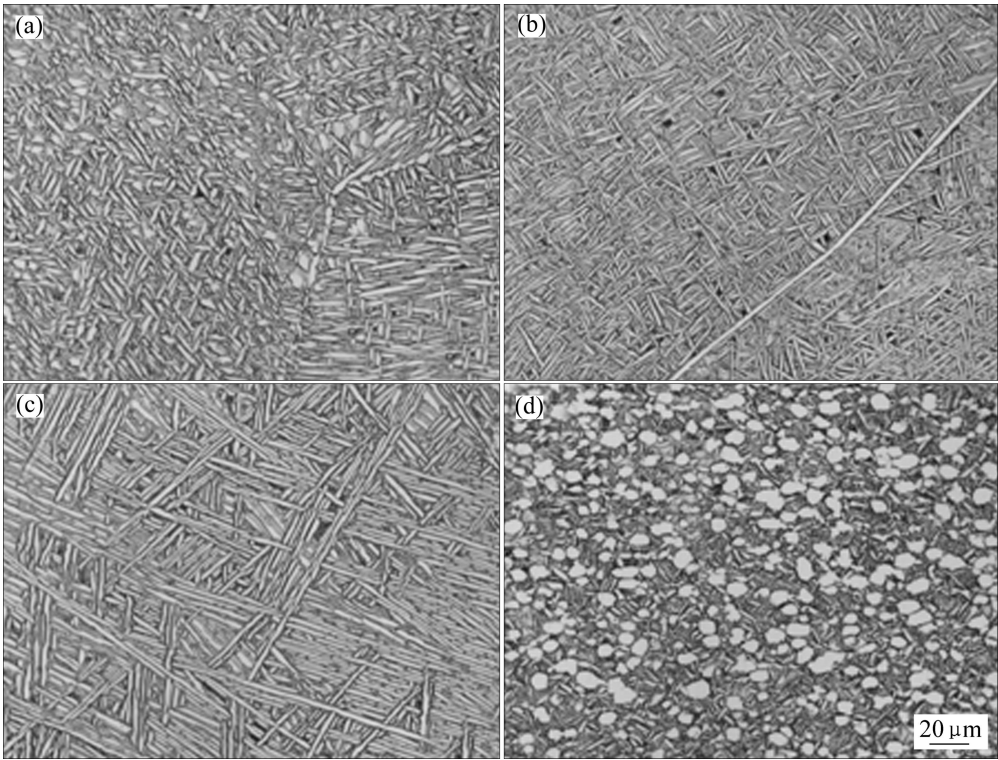


图 4 TC21 合金经不同工艺热处理后的金相组织

Fig. 4 Optical microstructures of TC21 alloy heat treated by different processes: (a) (960 °C, 1 h)+WQ+(890 °C, 1 h)+AC+(620 °C, 6 h)+AC; (b) (960 °C, 1 h)+AC+(890 °C, 1 h)+AC+(620 °C, 6 h)+AC; (c) (960 °C, 1 h)+FC+(890 °C, 1 h)+AC+(620 °C, 6 h)+AC; (d) (890 °C, 1 h)+AC

表 1 TC21 合金不同热处理制度下的力学性能

Heat treatment	R_m /	$R_{p0.2}$ /	A /	Z /	K_{IC} /
(960 °C, 1 h, FC)+(890 °C, 1 h, AC)+(620 °C, 6 h, AC)	1 150	1 050	7	12	81.27
(890 °C, 1 h, AC)+	1 136	1 042	12	26	52

改善合金的断裂韧性，且 TC21 合金强度主要受最终的固溶冷却速率控制^[8]，因此，选择该热处理制度为优化的热处理制度，并与(890 °C, 1 h, AC)+(620 °C, 6 h, AC)常规热处理制度进行比较，具体的力学性能测试结果如表 1 所列。

与常规热处理相比，虽然 TC21 合金塑性有一定程度的降低，但是其断裂韧性有明显的改善。这表明通过优化的三重热处理可以改善合金的强度、塑性和韧性的匹配度，满足合金的使用要求。

3 结论

1) 随着 β 区固溶冷却速率的减小，TC21 合金在

两相区相同的固溶热处理制度下，条状初生 α 相尺寸明显增加。

2) 在相同的 β 固溶热处理制度下，随着两相区固溶热处理温度的降低，条状初生 α 相尺寸减小，相含量增加。

3) (960 °C, 1 h, FC)+(890 °C, 1 h, AC)+(620 °C, 6 h, AC)三重热处理可以改善合金的强度、塑性和韧性的匹配。

REFERENCES

[1] 赵永庆, 曲恒磊, 冯 亮, 杨海瑛, 李 辉, 张颖楠, 郭宏超, 黄定坤. 高强高韧损伤容限性钛合金 TC21 研制[J]. 钛工业进展, 2004, 22(1): 22-24

- ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei, FENG Liang, YANG Hai-ying, LI Hui, ZHANG Ying-nan, GUO Hong-chao, HUANG Ding-kun. Research on high strength, high toughness and high damage-tolerant titanium alloy-TC21[J]. Titanium Industry Progress, 2004, 22(1): 22–24.
- [2] 党薇, 薛祥义, 李金山, 胡锐, 朱知寿, 张丰收, 周廉. TC21 合金片层组织特征对其断裂韧性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(增1): 16–20.
- DANG Wei, XUE Xiang-yi, LI Jin-shan, HU Rui, ZHU Zhi-shou, ZHANG Feng-shou, ZHOU Lian. Influence of lamellar microstructure feature on fracture toughness of TC21 alloy, The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(s 1): 16–20.
- [3] ZHU Yan-chun, ZENG Wei-dong, FENG Fei, SUN Yu, HAN Yuan-fei, ZHOU Yi-gang. Characterization of hot deformation behavior of as-cast TC21 titanium alloy using processing map[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 1757–1763.
- [4] 周水亮, 陶军, 郭德伦. TC21 细晶钛合金 TIG 焊接接头组织及力学性能研究[J]. 航空材料学报, 2009, 29(6): 53–58.
- ZHOU Shui-liang, TAO Jun, GUO De-lun. Study on microstructure and mechanical properties of fine grain TC21 alloy in TIG[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(6): 53–58.
- [5] 张颖楠, 赵永庆, 曲恒磊, 杨海璞, 李辉, 冯亮. Zr 对 Ti-6-22-22S 合金显微组织和室温拉伸性能的影响, 金属热处理, 2003, 28(11): 31–34.
- ZHANG Ying-nan, ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei, YANG Hai-ying, LI Hui, FENG Liang. Effect of Zr on microstructure and tensile properties of Ti-6-22-22S Alloy[J]. Metal Heat Treatment, 2003, 28(11): 31–34.
- [6] ZHANG X D, EVANS D J, BAESLACK W A, FRASER H L. Effect of long term aging on the microstructural stability and mechanical properties of Ti-6Al-2Cr-2Mo-2Sn-2Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 343: 210–226.
- [7] ZHANG X D, BONNIWELL P, FRASER H L, BEASLACK W A, EVANS D J, GENTER T, BAYHA T, CORNELL B. Effect of heat treatment and silicon addition on the microstructure development of Ti-6Al-2Cr-2Mo-2Sn-2Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 343: 210–226.
- [8] 侯智敏, 毛小南, 雷文光, 卢亚锋, 张鹏省, 韩栋. 固溶处理对近 β 锻 TC21 合金组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(增1): 581–586.
- HOU Zhi-min, MAO Xiao-nan, LEI Wen-guang, LU Ya-feng, ZHANG Peng-sheng, HAN Dong. Effect of solution treatment on morphology of near β forged TC21 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(s 1): 581–586.
- [9] 王新南, 朱知寿, 童路, 周宇, 周晓虎, 俞汉清. 锻造工艺对 TC4 DT 和 TC21 损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 稀有金属快报, 2008, 28(7): 12–16.
- WANG Xin-nan, ZHU Zhi-shou, TONG Lu, ZHOU Yu, ZHOU Xiao-hu, YU Han-qing. The influence of forging processing on fatigue crack propagation rate of damage-tolerant titanium alloy[J]. Rare Metals Letters, 2008, 28(7): 12–16.
- [10] SCHMIDT P, CHRIST H J. Microstructure optimization by hydrogen treatment of β -titanium alloys[C]// Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. Beijin, China: Science Press Beijing, 2012: 502–507.

(编辑 方京华)