

双重退火工艺对 TC21 钛合金板材组织和性能的影响

Effect of Double Annealing Process on Microstructure and Properties of TC21 Titanium Alloy Sheet

供稿|巨朝飞, 苗阳, 齐航, 雷挺, 吴家兴 / JU Zhaofer, MIAO Yang, QI Hang, LEI Ting, WU Jiaxing

内容导读

通过热轧的方式制备出 TC21 板材, 并对 TC21 板材在经不同热处理制度处理后的抗拉强度、显微组织、延伸率和断面收缩率进行了检测, 得出了双重退火制度对板材性能和组织的影响规律。TC21 板材经 900 °C/1 h 固溶处理, 600 °C/4 h 时效处理后显微组织均匀, 晶粒细小, 均为 $\alpha+\beta$ 转变组织, 此制度下的板材性能最优, 抗拉强度达到 1350 MPa, 屈服强度达到 1275 MPa, 板材的延伸率变化不大, 断面收缩率达到最大值 32.6%。

TC21 是我国自主研发的高强度高韧钛合金, 名义成分为 Ti-6.4Al-3Mo-1.9Nb-2.1Zr-2Sn-1.5Cr, 经固溶处理后, 其抗拉强度可以达到 1100 MPa 以上。因其优异的综合性能, 已在国内宇航领域获得大量使用^[1-3]。由于 TC21 合金强度高, 加工难度大, 前期国内主要以锻造方式生产棒材和锻件。对于 TC21 合金锻造产品已进行大量研究工作^[4-6], 而本文则针对厚度为 6.3 mm 的板材开展热处理工艺对其性能和组织影响的研究, 为后续工业化生产提供技术支持。

实验材料及方法

实验材料

坯料为在相变点以下 30~50 °C 锻造板坯, 其规格为 153 mm×502 mm×802 mm。铸锭采用 3 次真空

自耗电弧熔炼 (VAR) 熔炼, 铸锭扒皮、切冒口处理, 铸锭头部取样采用金相法检测相变点为 970 °C。经过三火次轧制生产工艺制备出厚度 6.3 mm 的 TC21 板材, 热轧后未经热处理 (热轧态) 及固溶时效后的板材各两块, 对其板材采用水切割方式取试样, 化学成分见表 1。

表 1 板材化学成分 (质量分数) %

位置	Al	Sn	Cr	Mo	Zr	Nb	Si	C	N	O
头	6.4	1.9	1.5	3.0	2.1	1.9	0.09	<0.01	<0.01	0.07
中	6.4	1.9	1.5	3.0	2.1	1.9	0.08	<0.01	<0.01	0.07
尾	6.4	1.9	1.5	3.0	2.1	1.9	0.09	<0.01	<0.01	0.07

板材热处理

使用高精度 (± 2 °C) 箱式热处理炉对试样进行热处理, 先选取不同固溶温度对试样进行固溶处

作者单位: 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014

理, 固溶热处理时间均为 1 h, 冷却方式为空气冷却 (AC)。对最优固溶温度 (900 °C) 处理后的试样进行不同温度的时效处理, 时效热处理时间均为 4 h, 冷却方式为空气冷却, 固溶温度与时效温度见表 2。

表 2 板材固溶温度与时效温度 °C

固溶温度	时效温度
840	540
860	560
880	580
900	600
920	620
940	

性能测试

测试了板材的显微组织、拉伸性能, 其中板材力学性能均按标准 GB/T 3621—2007 实验方法执行, 测试方向为横向 (T), 为保证测试点的准确

性, 每个热处理制度测试 3 个样, 结果取平均值。

结果与讨论

固溶温度对板材显微组织的影响

图 1 为板材在热轧态及固溶处理后的横向显微组织照片。从图中可以看出, 热态组织和固溶处理后的组织均为 $\alpha+\beta$ 两相区加工态组织, 随着温度的升高, 组织中初生 α 相含量减少, 次生 α 相含量增加, 组织更加均匀细小。当温度达到 900 °C 时, 晶粒尺寸最小, 组织最均匀。随着热处理温度继续升高, 920 °C 时, 已出现了 β 相, 温度继续升高至 940 °C, 由于退火温度接近相变点, 此时晶粒长大显著, 组织中大部分为 β 相及较少的初生 α 相及次生 α 相。这种粗大的 β 组织对综合性能不友好。根据文献报道, 要想得到组织均匀, 综合性能优异的板材, 一般都需要进行双重热处理^[7], 下文将对经过 900 °C 固溶处理的板材试样进行时效热处理。

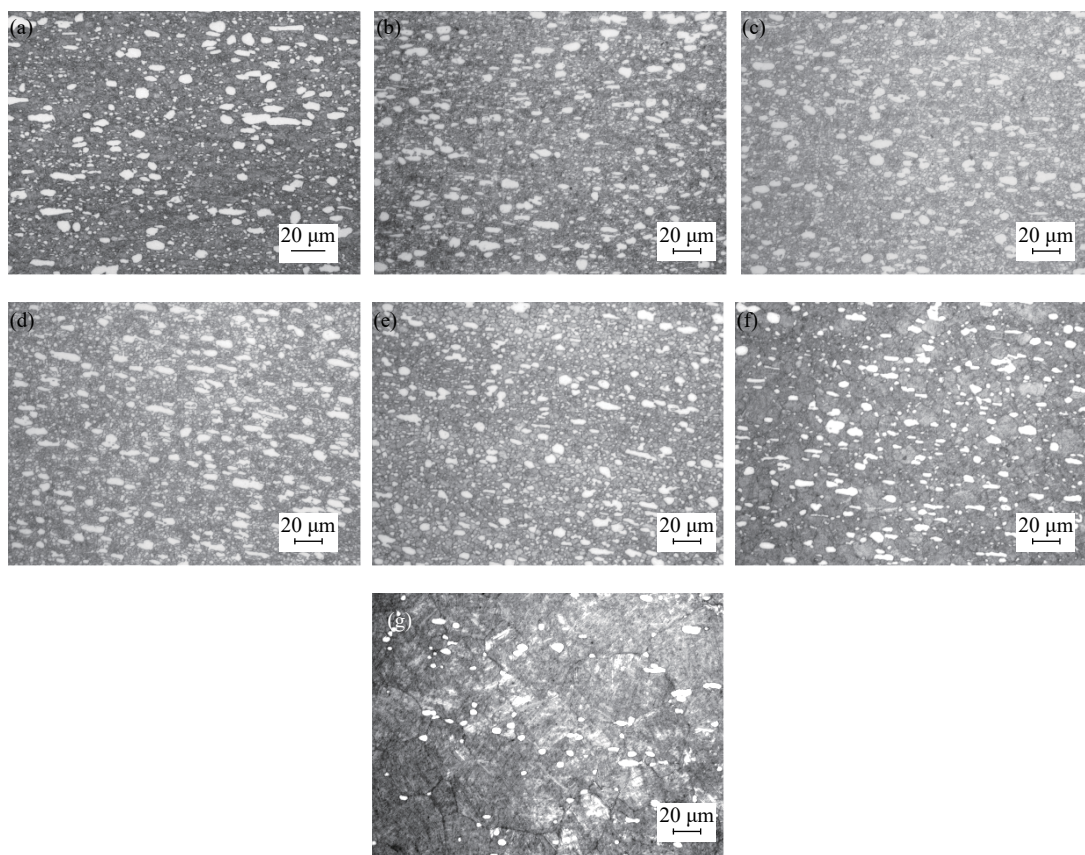


图 1 板材热轧态及不同固溶温度处理后的显微组织: (a) 热轧态; (b) 840 °C; (c) 860 °C; (d) 880 °C; (e) 900 °C; (f) 920 °C; (g) 940 °C

固溶温度对板材力学性能的影响

图2为不同固溶温度下板材横向力学性能,可以看出,热态板材的横向抗拉强度(R_m)达到1307 MPa,经840 °C退火后强度降低,随着固溶温度的升高,板材的抗拉强度和屈服强度($R_{p0.2}$)呈先增大后减小的趋势,当温度达到900 °C时,板材的抗拉强度和屈服强度分别达到最大值1315 MPa和1195 MPa,这是因为随着固溶温度的升高初生

α 相含量减少,900 °C时晶粒最细小,达到最佳的强化效果,并且较高的固溶温度可使TC21钛合金在固溶退火后组织中保留更多的 β 相,进而促使组织在时效处理后能析出更多的次生 α 相,提高强化效果[8]。温度继续升高到940 °C,晶粒长大,板材强度降低。随着固溶温度的升高,材料的延伸率(A)和断面收缩率(Z)先增大后减小,在860 °C时在到最大,是因为此温度下,材料内组织均匀,晶粒细小,材料的韧性相对较高。

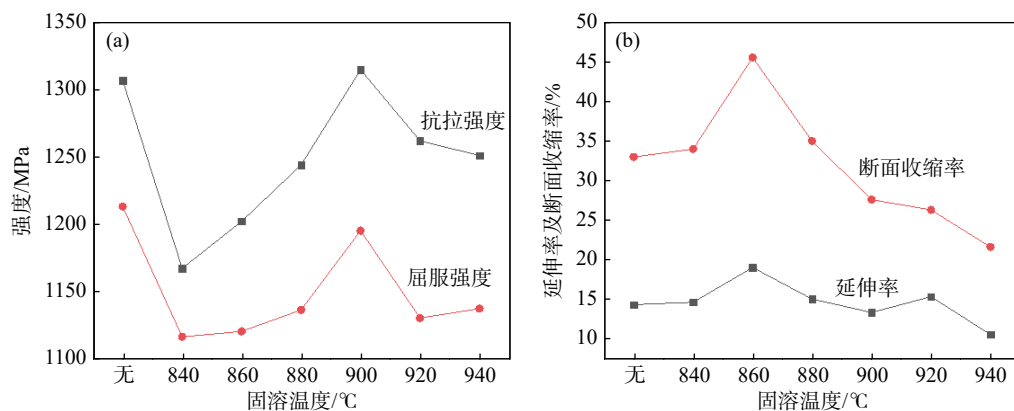


图2 不同固溶温度下板材力学性能: (a) 抗拉强度和屈服强度; (b) 延伸率和断面收缩率

时效温度对板材显微组织的影响

图3是对900 °C固溶处理后的板材,再经过540~620 °C固溶时效处理后的组织照片,可以看出各时效温度下组织均为 α + β 两相区加工组织,浅色为 α 相,深色为 β 相,时效温度对组织变化影响

不大,经测定初生 α 相的质量分数为30%左右,600 °C时组织最均匀,晶粒细小,等轴化最明显,有少量次生 α 相析出,在此过程中通常会得到较高的强度和塑性[8],由此推断此温度下的时效效果最佳。

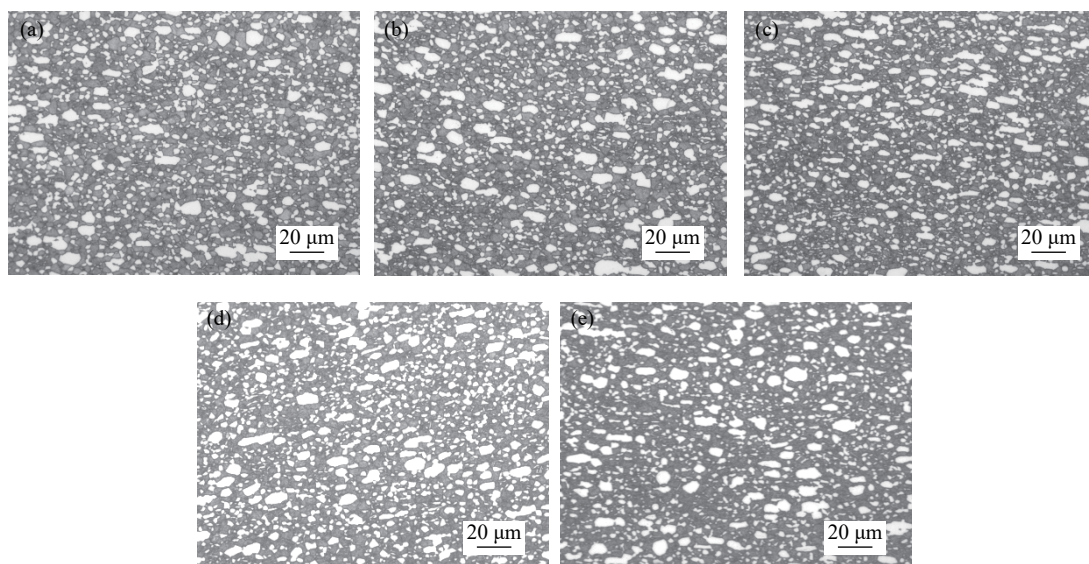


图3 板材不同固溶温度处理后的显微组织: (a) 540 °C; (b) 560 °C; (c) 580 °C; (d) 600 °C; (e) 620 °C

时效温度对板材力学性能的影响

对 900 °C 固溶后的板材进行 540~620 °C 时效处理, 板材的力学性能如图 4 所示。可以看出随着时效温度的增大, 板材强度变化不大, 600 °C 时屈服强度达

到最大值 1275 MPa, 同时抗拉强度为 1350 MPa。板材的延伸率 (A) 变化不大, 但是断面收缩率 (Z) 达到最大值 32.6%。

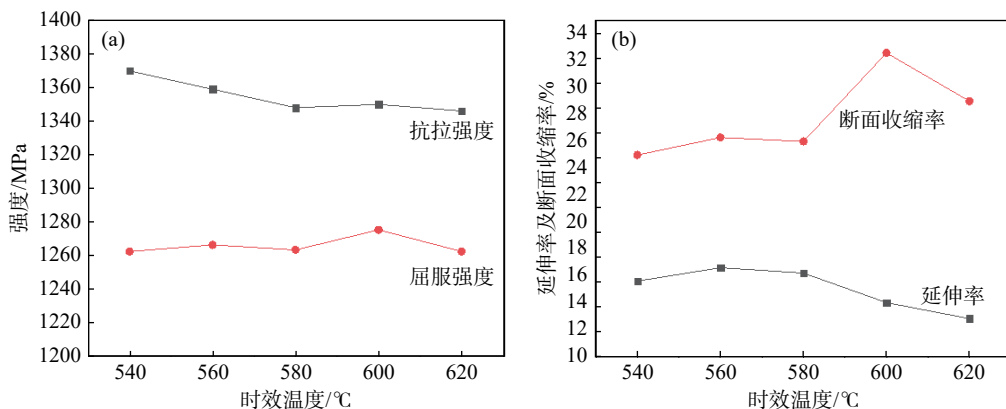


图 4 不同时效温度下 TC21 板材力学性能: (a) 抗拉强度和屈服强度; (b) 延伸率和断面收缩率

结论

(1) 不同固溶温度对 TC21 钛合金板材 (6.3 mm) 组织有较大的影响, 随着固溶温度的升高, 组织中 β 相增多, 900 °C 时组织更加均匀细小, 板材的强度达到最高。

(2) 固溶后的板材再经过时效处理, 组织和性能更加优异, 600 °C 时效后屈服强度达到最大 1275 MPa, 断面收缩率最高。

(3) TC21 板材 (6.3 mm) 选用 900 °C/1 h, AC+600 °C/4 h, AC 双重退火制度, 可以得到板材的强度和塑性的良好匹配。

参考文献

- [1] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展. *中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 280

- [2] 冯颖芳. 世界钛及钛合金的应用研究进展. *世界有色金属*, 2012(4): 54
- [3] 何蕾. 钛合金在航空领域的市场展望. *金属世界*, 2015(5): 4
- [4] 朱知寿. 航空结构用新型高性能钛合金材料技术研究与进展. *航空科学技术*, 2012(1): 5
- [5] 邵晖, 赵永庆, 葛鹏, 等. 不同组织类型对 TC21 合金强-塑性的影响. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(4): 845
- [6] 石志峰. TC21 钛合金工艺优化及组织性能关系研究[学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2016
- [7] 史春玲, 王浩军, 石晓辉, 等. 双重退火制度对 TC21 钛合金断裂韧性的影响. *钛工业进展*, 2013, 30(1): 12
- [8] 朱知寿, 王新南, 童路, 等. 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. *钛工业进展*, 2006(6): 24

作者简介: 巨朝飞 (1991—), 男, 陕西省宝鸡市人, 工程师。2018 年毕业于西安理工大学材料专业, 主要研究方向: 有色金属加工, 钛及钛合金加工技术研究。通信地址: 陕西省西安市未央区徐家湾街道; E-mail: juzhaofei001@163.com。