DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2022.04.2602

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 Zhaofei, 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 α+β 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 α+β 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。

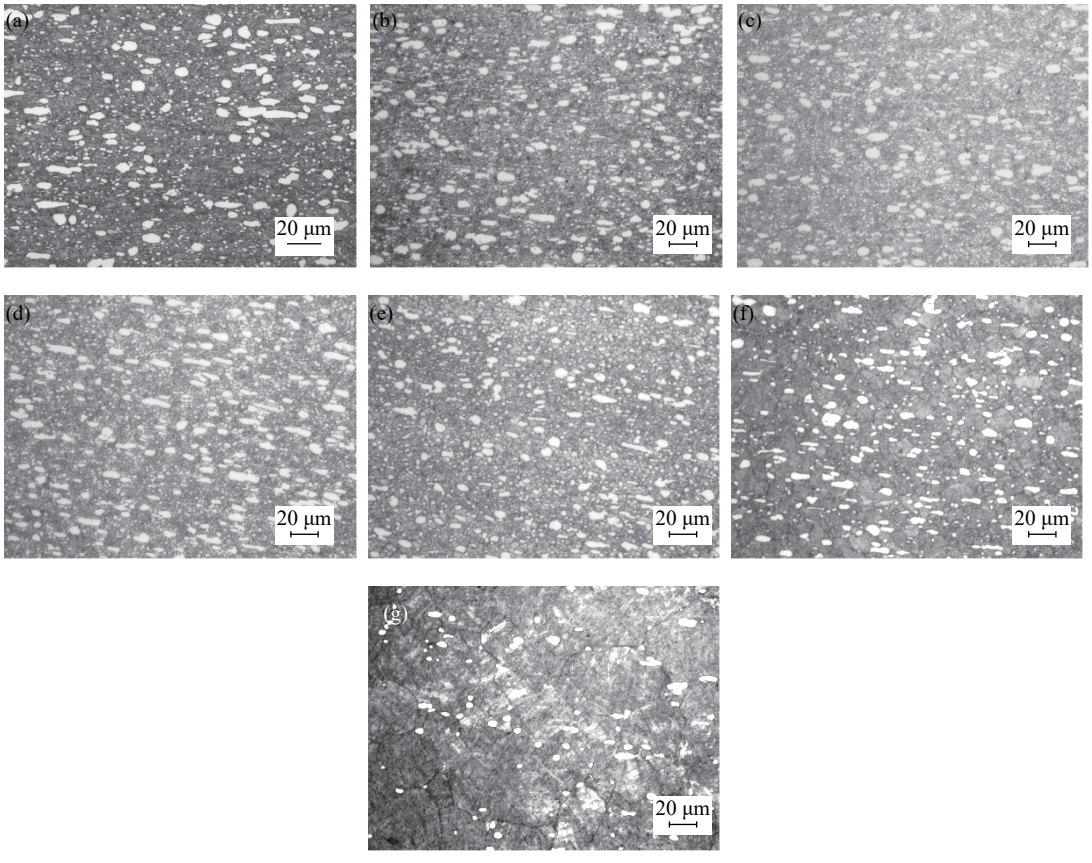

图 1　板材热轧态及不同固溶温度处理后的显微组织：（a）热轧态；（b）840 °C；（c）860 °C；（d）880 °C；（e）900 °C；（f）920 °C；（g）940 °C

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。

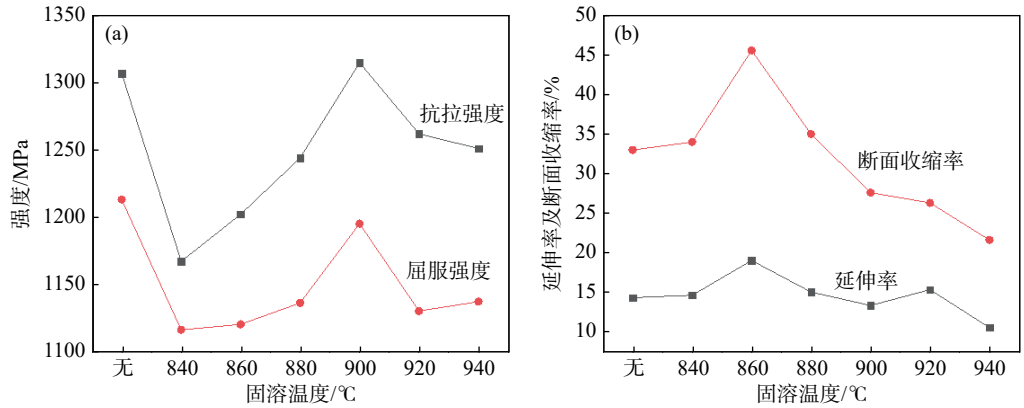

图 2　不同固溶温度下板材力学性能：（a）抗拉强度和屈服强度；（b）延伸率和断面收缩率

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。

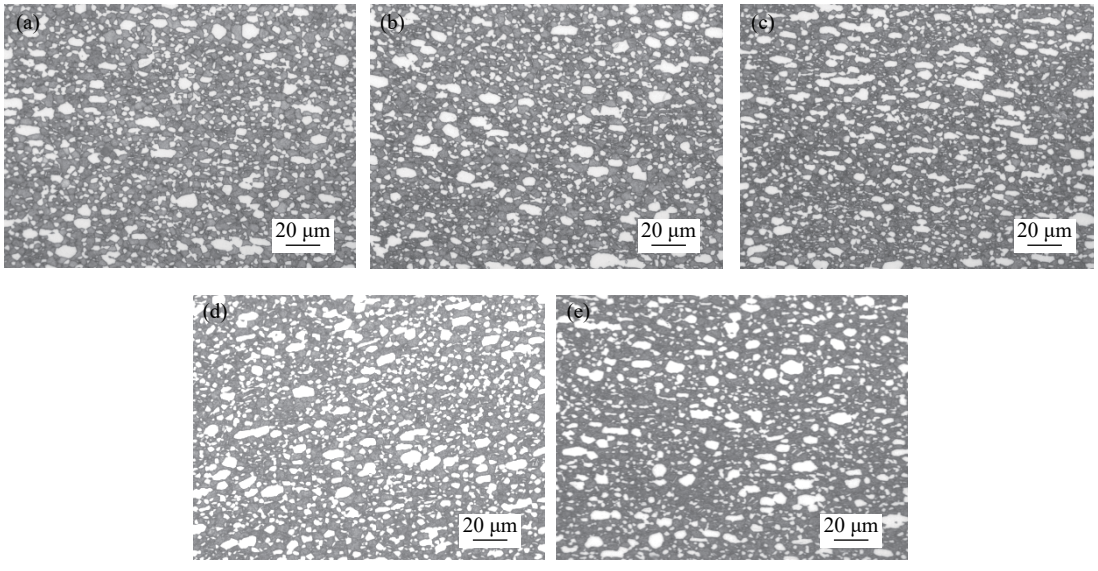

图 3　板材不同固溶温度处理后的显微组织：（a）540 °C；（b）560 °C；（c）580 °C；（d）600 °C；（e）620 °C

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%。

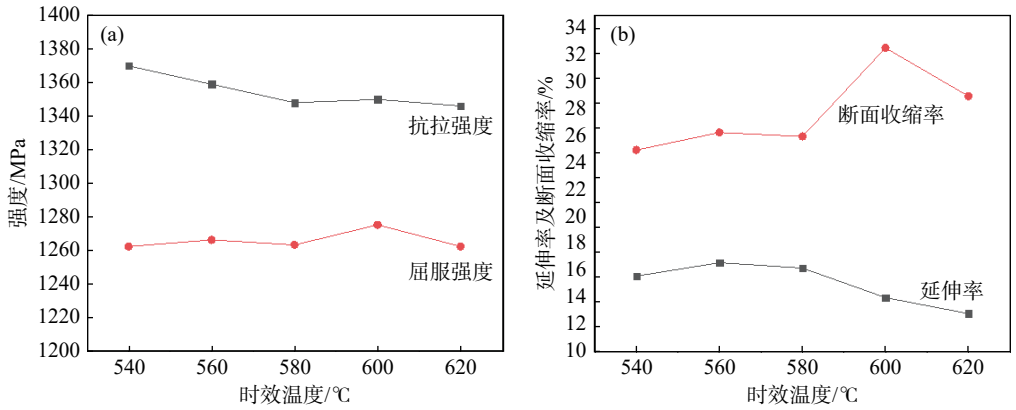

图 4　不同时效温度下 TC21 板材力学性能：（a）抗拉强度和屈服强度；（b）延伸率和断面收缩率

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发展. 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学专业，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。