

热处理温度对 TA7 钛合金板材组织与力学性能的影响

马佳琨^{1,2}, 张 苗², 冯军宁^{1,2}, 郭金榜², 马忠贤^{1,2}, 解 晨^{1,2}, 冯永琦^{1,2}

(1. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

(2. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘 要: 研究了 TA7 钛合金板材热加工态和经 750、800、850 °C 3 种不同温度热处理后的显微组织、室温拉伸性能、弯曲性能、高温拉伸性能和高温持久性能。结果表明, 热加工态 TA7 钛合金板材横向存在不均匀组织, 纵向有较多拉长 α 晶粒; 经 750 °C 热处理后板材拉长 α 晶粒转变为等轴状; 经 800 °C 热处理后板材横向与纵向均为均匀、细小的等轴组织; 经 850 °C 热处理后板材晶粒发生长大。热处理后板材强度降低, 塑性增加, 弯曲性能和高温持久性能均满足 GJB 2505A—2018 标准要求; 随着热处理温度的升高, 板材室温拉伸强度和高温拉伸强度均逐渐降低, 经 850 °C 热处理后板材的 500 °C 高温拉伸强度已不能满足要求。为了获得均匀、细小的组织及良好的力学性能, TA7 钛合金板材宜采用 800 °C 热处理。

关键词: TA7 钛合金; 板材; 热处理; 显微组织; 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(2023)06-027-04

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of TA7 Titanium Alloy Sheets

Ma Jiakun^{1,2}, Zhang Miao², Feng Junning^{1,2}, Guo Jinbang², Ma Zhongxian^{1,2}, Xie Chen^{1,2}, Feng Yongqi^{1,2}

(1. Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

(2. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: The microstructure, room temperature tensile properties, bending performance, high temperature tensile properties and high temperature durability of TA7 titanium alloy sheets in hot working state and after heat treatment at three different temperatures of 750, 800 and 850 °C were investigated. The results show that the microstructure of TA7 titanium alloy sheet in hot working state has uneven organization in the transverse direction and significant elongated α grain in the longitudinal direction. The elongated α grain of the sheet becomes equiaxed after heat treated at 750 °C. The microstructures of the sheet in transverse and longitudinal are uniform, fine equiaxial organization after heat treated at 800 °C. The grains of the sheet grow up after heat treated at 850 °C. After heat treatment, the strength of sheet decreases, the plasticity increases, the bending performance and high temperature durability both can meet the requirements of GJB 2505A—2018 standard. With the increase of heat treatment temperature, the room temperature and high temperature tensile strength of the sheet are gradually reduced. The 500 °C high temperature tensile strength of the sheet can't meet the requirements after heat treatment at 850 °C. In order to obtain uniform, fine microstructure and good mechanical properties, TA7 titanium alloy sheet should be heat treated at 800 °C.

Keywords: TA7 titanium alloy; sheet; heat treatment; microstructure; mechanical properties

TA7 钛合金的名义化学成分为 Ti-5Al-2.5Sn, 是一种中等强度的 α 型单相钛合金, 具有比强度高、焊接性能好、耐低温性优良、断裂韧性高和热稳定性好等优点,

点, 可长期在 500 °C 工作, 被广泛用作飞机发动机环锻件、机匣壳体及飞机蒙皮等^[1-4]。

TA7 钛合金板材生产过程中, 由于轧制变形抗力大, 加工塑性差, 板材边部经常会产生大量裂纹, 因而研究人员进行了大量关于改善 TA7 钛合金塑性的研究。庞洪等^[5]

收稿日期: 2023-09-09

通信作者: 马佳琨 (1990—), 男, 工程师。

研究了不同轧制工艺对 TA7 钛合金板材组织及力学性能的影响,发现采用包覆叠轧工艺生产的 TA7 钛合金板材组织细小、均匀,具有比冷轧工艺更好的深冲性及较高的成品率;王伟琪等^[6]研究了 Fe 元素对 TA7 钛合金工艺特性及低倍组织、力学性能的影响,发现加入适量的 Fe 元素可以降低相变点,改善 TA7 钛合金热加工及冷加工工艺塑性,降低热加工及冷加工开裂倾向;邢秋丽等^[1]研究了轧制工艺对 TA7 钛合金板材外观、力学性能和组织的影响,发现在高温下进行一火轧制可以明显减少裂纹;周玉川等^[7]研究了轧制工艺对 TA7 钛合金板材表面开裂的影响,发现采用温轧代替冷轧,可以有效防止板材表面开裂。

包覆叠轧工艺是一种加工钛合金薄板的有效手段^[8]。近年来,研究人员发现利用该工艺生产 TA7 钛合金板材,通过热轧直接轧制成成品,可以有效简化工艺,提高生产效率,降低生产成本^[9]。但是,目前鲜有关于包覆叠轧 TA7 钛合金成品板材热处理研究的报道。为此,本研究以包覆叠轧工艺生产的 TA7 钛合金热加工态板材为原材料,对其进行不同温度的热处理,分析热加工态和热处理后板材组织和性能的差异,建立热处理-组织-性能的关系,以为 TA7 钛合金板材工业化生产中热处理工艺的制定提供参考。

1 实验

实验材料为采用包覆叠轧工艺生产的 1.0 mm 厚 TA7 钛合金热加工态板材,金相法测定相变点为 1010 °C,其化学成分见表 1。采用辊底式电加热炉对 TA7 钛合金板材进行热处理,热处理温度分别为 750、800、850 °C,保温时间均为 30 min,冷却方式均为空冷。

表 1 TA7 钛合金板材化学成分(w%)

Table 1 Chemical composition of TA7 titanium alloy sheet							
Ti	Al	Sn	Fe	C	N	H	O
Bal.	5.0	2.5	0.4	0.01	0.01	0.001	0.12

从热加工态和经不同温度热处理后的 TA7 钛合金板材上分别切取横向(T)、纵向(L)试样,进行显微组织观察以及室温力学性能、弯曲性能及高温力学性能检测。金相试样在腐蚀液(10 mL HF+25 mL HNO₃+60 mL C₃H₈O₃+20 mL H₂O)中浸蚀 7 s 后,按照 GB/T 5168—2020 标准在 AXIOVERT 200MAT 金相显微镜下进行组织观察;按照 GB/T 228.1—2010 标准在 INSTRON 5885 电子万能材料拉伸试验机上测试室温拉伸性能;按照 GB/T 232—2010 标准在 TC-12-029 弯曲机上测试弯曲性能,弯曲压头直径为 3 mm;按照 GB/T 228.2—2015

标准在 TSE105D-Z 高温拉伸试验机上测试高温拉伸性能;分别在 350 °C/440 MPa 和 500 °C/195 MPa 条件下,按照 GB/T 2039—2012 标准在 RD-50 微控电子式蠕变持久试验机上测试高温持久性能,测试时间 121 h (GJB 2505A—2018 标准要求不少于 100 h)。

2 结果与分析

2.1 热处理温度对显微组织的影响

图 1 为热加工态 TA7 钛合金板材横向与纵向的显微组织。从图 1 可以看出,热加工态板材横向存在不均匀组织(图 1a),纵向有较多拉长 α 晶粒和少量等轴 α 晶粒(图 1b),这是由于板材在热轧过程中,硬化和软化同时出现,热轧后纵向组织呈拉长状,静态再结晶不完全所导致的。

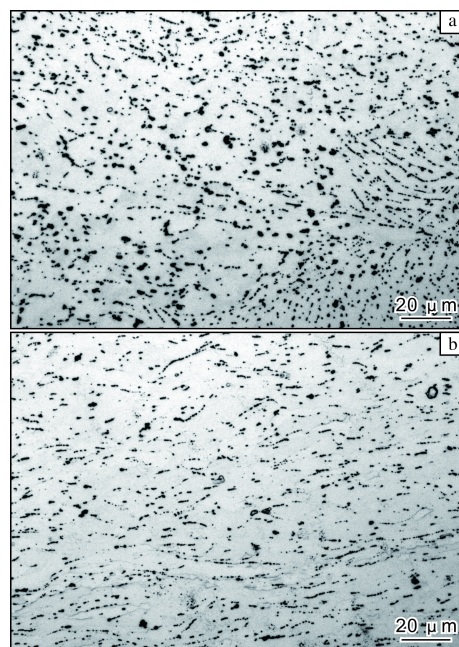


图 1 热加工态 TA7 钛合金板材横向与纵向显微组织

Fig.1 Microstructures of TA7 titanium alloy sheet in hot working state: (a) transverse; (b) longitudinal

图 2 为经不同温度热处理后 TA7 钛合金板材横向与纵向的显微组织,其中图 2a~2c 为板材横向显微组织,图 2d~2f 为板材纵向显微组织。由图 2 可以看出,经 750 °C 热处理的 TA7 钛合金板材横向为等轴组织和少量的不均匀组织,纵向为等轴组织和少量拉长 α 晶粒(见图 2a、2d),均为不完全再结晶组织。经 800 °C 热处理后 TA7 钛合金板材横向与纵向均为均匀、细小的等轴组织,平均晶粒尺寸为 9.4 μ m,此时板材已完全再结晶(见图 2b、2e)。经 850 °C 热处理后 TA7 钛合金板材横向与纵向均为均匀的等轴组织,板材晶粒发生长大,平均

晶粒尺寸为 11.2 μm (见图 2c、2f)。包覆叠轧后的 TA7 钛合金板材畸变能较大, 有很强的再结晶趋势, 因而随着热处理温度升高, 再结晶形核与长大都将以更快的速度进行, 促使晶粒长大。

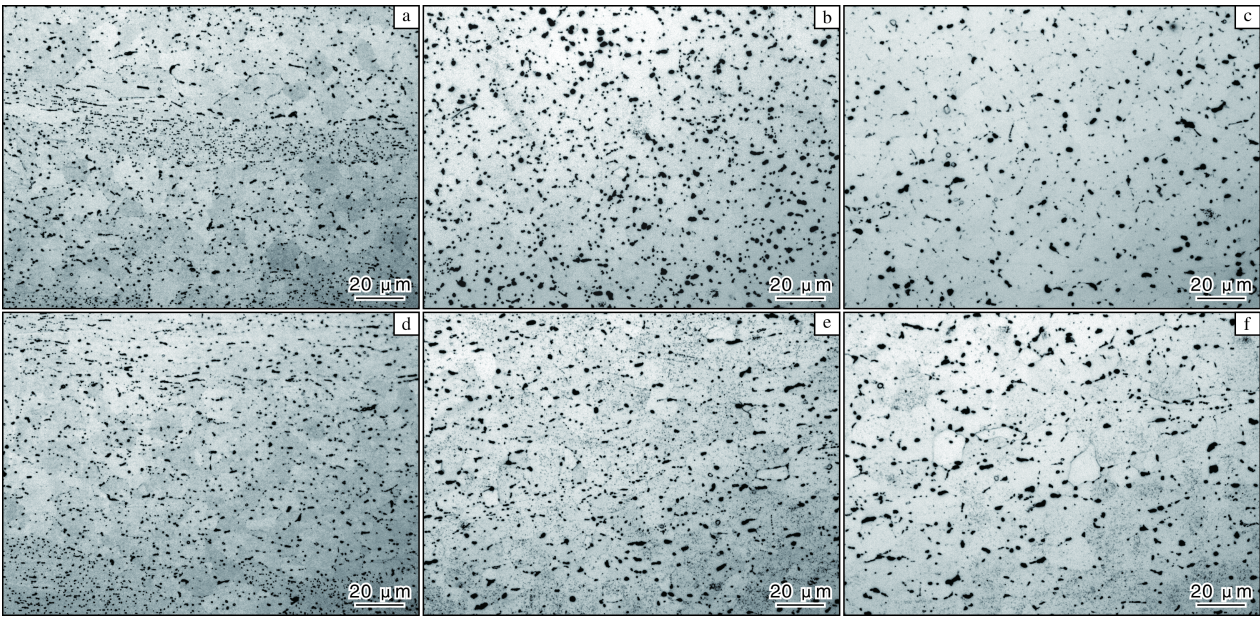


图 2 经不同温度热处理后 TA7 钛合金板材横向与纵向的显微组织

Fig.2 Microstructures of TA7 titanium alloy sheets after heat treated at different temperatures: (a) 750 °C, transverse; (b) 800 °C, transverse; (c) 850 °C, transverse; (d) 750 °C, longitudinal; (e) 800 °C, longitudinal; (f) 850 °C, longitudinal

2.2 热处理温度对室温力学性能的影响

热加工态及经不同温度热处理后的 TA7 钛合金板材室温拉伸性能和弯曲性能如表 2 所示。从表 2 可以看出, 热加工态板材强度最高, 延伸率最低, 弯曲性能不合格, 说明热加工态板材产生了较大的加工硬化, 这与终轧温度较低有关。经不同温度热处理后, TA7 钛合金

板材横向与纵向的抗拉强度接近, 室温拉伸性能、弯曲性能均符合 GJB 2505A—2018 标准要求, 且室温拉伸性能富余量较大。与热加工态板材相比, 强度降低, 延伸率增大, 说明热处理可以有效降低板材强度, 提高塑性。此外, 随着热处理温度的升高, 板材强度降低, 延伸率变化不大。

表 2 热加工态及经不同温度热处理后的 TA7 钛合金板材室温力学性能

Table 2 Room temperature mechanical properties of TA7 titanium alloy sheets in hot working state and after heat treated at different temperatures						
Heat treatment	State	Direction	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Bend angle/(°)
—	R	T	973	940	14.3	<50
750 °C/30 min	M	T	870	838	21.5	>50
800 °C/30 min	M	T	853	820	23.5	>50
850 °C/30 min	M	T	848	815	22.5	>50
—	R	L	978	885	14.5	<50
750 °C/30 min	M	L	885	820	20.3	>50
800 °C/30 min	M	L	855	795	24.0	>50
850 °C/30 min	M	L	849	790	22.3	>50
GJB 2505A—2018	M	T	765~930	≥685	≥12	≥50

2.3 热处理温度对高温力学性能的影响

热加工态及经不同温度热处理后的 TA7 钛合金板

材高温拉伸性能和高温持久性能如表 3 所示。从表 3 可以看出, 热加工态 TA7 钛合金板材在 350 °C 和 500 °C

表3 热加工态及经不同温度热处理后的 TA7 钛合金板材高温力学性能

Table 3 High temperature mechanical properties of TA7 titanium alloy sheets in hot working state and after heat treated at different temperatures

Heat treatment	State	Direction	R_m /MPa		Durable fracture time/h	
			350 °C	500 °C	350 °C/440 MPa	500 °C/195 MPa
—	R	T	619	545	≥121	≥121
750 °C/30 min	M	T	523	466	≥121	≥121
800 °C/30 min	M	T	510	445	≥121	≥121
850 °C/30 min	M	T	507	438	≥121	≥121
—	R	L	656	561	≥121	≥121
750 °C/30 min	M	L	556	478	≥121	≥121
800 °C/30 min	M	L	537	460	≥121	≥121
850 °C/30 min	M	L	530	453	≥121	≥121
GJB 2505A—2018	M	T	≥490	≥440	≥100	≥100

的高温抗拉强度均较高，热处理后的高温抗拉强度较低。随着热处理温度的升高，板材高温抗拉强度逐渐降低，其中经 750 °C 和 800 °C 热处理后板材的高温拉伸性能均符合 GJB 2505A—2018 标准要求，而 850 °C 热处理后不符合 500 °C 高温抗拉强度的要求。从表 3 还可以看出，热加工态及经不同温度热处理后的 TA7 钛合金板材在 350 °C/440 MPa、500 °C/195 MPa 条件下的高温持久性能均满足 GJB 2505A—2018 标准要求。

综合以上分析，为了获得均匀、细小的组织及良好的力学性能，TA7 钛合金板材宜采用 800 °C 热处理。

3 结 论

(1) 热加工态 TA7 钛合金板材横向存在不均匀组织，纵向有较多拉长 α 晶粒。经 750 °C 热处理后板材拉长 α 晶粒基本转变为等轴状；经 800 °C 热处理后板材横向与纵向均为均匀、细小的等轴组织；经 850 °C 热处理后板材横向与纵向均为均匀的等轴组织，平均晶粒尺寸较 800 °C 热处理的板材有所长大。

(2) 经 750、800、850 °C 3 种不同温度热处理后的 TA7 钛合金板材，其横向与纵向的抗拉强度接近，与热加工态板材相比，强度降低，延伸率增大；随着热处理温度的升高，板材室温拉伸强度和高温拉伸强度均逐渐降低。

(3) 为了获得均匀、细小的组织及良好的力学性能，TA7 钛合金板材宜采用 800 °C 热处理。

参考文献 References

- [1] 邢秋丽, 王蕊宁, 朱晓翠, 等. 制备工艺对 TA7 钛合金板材外观、力学性能和组织的影响[J]. 钛工业进展, 2015, 32(3): 26-29.
- [2] 刘伟, 杜宇. 低温钛合金的研究现状[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(9): 6-10.
- [3] 姚泽坤, 孙红兰, 张东亚, 等. 工艺参数组合对 TA7 钛合金拉伸性能的影响[J]. 重型机械, 2012(3): 74-77.
- [4] 赵永庆. 钛合金的研究与开发[J]. 钛工业进展, 2005, 22(4): 1-7.
- [5] 庞洪, 张海龙, 王希哲, 等. 包覆叠轧 TA7 钛合金板材的组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 66-69.
- [6] 王伟琪, 羊玉兰, 马宝军, 等. Fe 对 TA7 合金工艺特性及低倍组织性能的影响[C]//中国有色金属学会第十四届材料科学与合金加工学术年会论文集, 2011.
- [7] 周玉川, 李鹏, 夏亚峰, 等. 轧制工艺对 TA7 钛合金板材表面开裂的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(15): 160-162.
- [8] 洪权. Ti-6Al-4V 合金薄板包覆叠轧加工工艺与组织性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [9] 洪权, 郭萍, 周伟. 钛合金成形技术与应用[J]. 钛工业进展, 2022, 39(5): 27-32.