

TB8 超高强钛合金的热处理工艺

张利军¹, 田军强¹, 白 钰¹, 常 辉^{1,2}, 薛祥义^{1,2}, 张丰收³

(1. 西安西工大超晶科技发展有限公司, 西安 710016;

2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

3. 西部超导材料科技有限公司, 西安 710016)

摘 要: 研究热处理制度对 TB8 超高强钛合金显微组织及力学性能的影响。结果表明: TB8 钛合金在 800~830 固溶后, 室温拉伸时合金具有较高的强度和优异的塑性; 固溶并时效后合金具有很高的强度及较好的塑性; 固溶温度的变化对合金强度及塑性影响很小, 但时效温度的变化对合金强度及塑性影响很大, 随着时效温度的升高, 合金强度显著降低, 塑性明显增强。

关键词: TB8 钛合金; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2*3

文献标志码: A

Heat treatment process of TB8 titanium alloy

ZHANG Li-jun¹, TIAN Jun-qiang¹, BAI Yu¹, CHANG Hui^{1,2}, XUE Xiang-yi^{1,2}, ZHANG Feng-shou³

(1. Xi'an Super Crystal Sci-Tech Development Co., Ltd., Xi'an 710016, China;

2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: Effects of heat treatment process on microstructures and mechanical properties of TB8 alloys were studied. The results show that the alloy has a higher tensile strength and excellent plastic at room temperature when alloy is soluted at 800~830 , the alloy has high strength and good plasticity. The effect of change of solid solution temperature on strength and plasticity of alloy is minimal, but the effect of aging temperature change on strength and plasticity of alloy has great impact; with the increase of aging temperature, alloy strength significantly reduces, and alloy plasticity increases.

Key words: TB8 titanium alloy; heat treatment; microstructure; mechanical property

钛合金是当代飞机和发动机的主要结构材料之一, 对于减轻飞机的质量、提高飞机推重比、增加飞行距离和减少燃料费用等都具有十分重要的意义^[1]。随着我国航空航天事业的迅速发展, 飞行器紧固件、弹性组件及主要承力结构件对材料特性要求更加突出地集中于耐蚀、轻质、高强, 所以, 发展高强钛合金材料及其加工工艺对我国航空航天工业的发展具有积极的推动作用。随着我国新一代航空型号的立项及工

作开展, 其紧固件、弹性组件用钛合金材料要求具有优异的冷加工成型性能及热处理后具有很高的强度指标, 加工工艺要求合金在固溶后冷变形成型, 然后进行时效处理。具体性能指标为: 合金在固溶状态下室温顶锻时, 当锻前高度: 锻后高度 $\geq 3:1$ 时试样圆周表面无裂纹存在; 合金时效后, 室温抗拉强度 $\geq 1\ 300$ MPa, 伸长率 $\geq 5\%$ 。对此种冷加工成型性能优异的超高强度钛合金, 我国目前尚无十分成熟的可用, 国外

资料显示 β 21S (我国仿制牌号 TB8)钛合金具有优异的冷加工成型性能及淬透性，热处理后可获得较高的强度^[2]。 β 21S 钛合金是美国 Timet 公司在 1989 年研制开发的亚稳定 β 型钛合金，该合金具有优异的冷热加工性能、较强的淬透性、抗蠕变性能、抗氧化性能和良好的抗腐蚀性能^[3-4]。我国在最新版 GB/T3620.1—2007 中仅对该钛合金的化学成分进行了说明^[5]，对于该合金的加工工艺、组织、性能等没有提及。鉴于此，我公司开展了 TB8 钛合金应用技术研究，以满足航空重点型号的需求。研究表明：TB8 钛合金通过适当的热处理工艺处理，可获得符合要求的强度及塑性匹配，满足航空型号工程强度设计及冷加工需求。本文作者利用热处理工艺影响组织、组织又决定性能这一规律，通过制订不同的热处理工艺研究 TB8 钛合金的显微组织、力学性能的变化规律，以便为该合金在航空航天飞行器超高强度紧固件、弹性组件及结构件中的应用提供试验数据。

1 试验材料及方法

1.1 材料

TB8 钛合金铸锭由我公司采用 1 t 真空自耗电弧炉 3 次熔炼生产，其化学成分如表 1 所示。铸锭经 β 区和 $(\alpha+\beta)$ 区加热锻造成 $d100\text{ mm}$ 规格棒材，然后，在 $(\alpha+\beta)$ 区加热轧制成 $d16\text{ mm}$ 规格小棒，采用差热分析法测定该合金的相变点 $((\alpha+\beta)/\beta)$ 为 $799\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 TB8 钛合金化学成分

Table 1 Chemical composition of TB8 alloy (mass fraction, %)

Position	Ti	Al	Mo	Nb	Si
Above	Bal.	3.220	15.350	2.820	0.200
Middle	Bal.	3.230	15.320	2.860	0.200
Upper	Bal.	3.150	15.450	2.860	0.210
Position	Fe	C	N	O	H
Above	0.045	0.007	0.013	0.110	0.001
Middle	0.031	0.011	0.012	0.130	0.001
Upper	0.031	0.009	0.015	0.140	0.001

1.2 方法

TB8 钛合金棒材轧制完成后，切取试样并按预先制订的 12 种热处理制度进行处理，制订的 12 种热处理制度如表 2 所示。

表 2 热处理制度

Table 2 Heat treatment processes

No.	Solution treatment	Aging treatment
1(A ₁)	800 , 0.5 h, AC	
2(A ₁ B ₁)	800 , 0.5 h, AC	520 , 8.5 h, AC
3(A ₁ B ₂)	800 , 0.5 h, AC	540 , 8.5 h, AC
4(A ₁ B ₃)	800 , 0.5 h, AC	560 , 8.5 h, AC
5(A ₂)	815 , 0.5 h, AC	
6(A ₂ B ₁)	815 , 0.5 h, AC	520 , 8.5 h, AC
7(A ₂ B ₂)	815 , 0.5 h, AC	540 , 8.5 h, AC
8(A ₂ B ₃)	815 , 0.5 h, AC	560 , 8.5 h, AC
9(A ₃)	830 , 0.5 h, AC	
10(A ₃ B ₁)	830 , 0.5 h, AC	520 , 8.5 h, AC
11(A ₃ B ₂)	830 , 0.5 h, AC	540 , 8.5 h, AC
12(A ₃ B ₃)	830 , 0.5 h, AC	560 , 8.5 h, AC

注：AC 即 Air cooling.

TB8 钛合金试样经热处理后，分别进行显微组织观察、力学性能测试及冷墩试验等。显微组织观察在 OLYMPUS/PMG3 型光学显微镜上进行，室温拉伸性能测试在 INSTRON 型电子万能试验机上进行。

2 结果与分析

2.1 TB8 钛合金的显微组织

TB8 钛合金试样经固溶及固溶+时效处理后显微组织如图 1 所示。

从图 1(a)可以看出：TB8 钛合金在经 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度以上固溶处理后，合金显微组织为单一的 β 晶粒，晶粒度为 6~7 级。

从图 1(b)可以看出：TB8 钛合金在经 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度以上固溶+时效处理后，合金显微组织中 β 晶界及晶粒内部均匀、弥散析出大量的 α 相。

2.2 热处理后 TB8 钛合金的力学性能

TB8 钛合金试样经不同热处理工艺处理后室温拉伸性能测试结果见表 3。

TB8 钛合金试样经 800、815 和 830 这 3 种不同温度固溶处理后，进行室温顶锻试验，顶锻试样加工成 $d14\text{ mm}\times 28\text{ mm}$ 的标准试样，当顶锻锻前与锻后高度比为 3:1 时，3 种温度固溶的试样周边均未见任何裂纹。

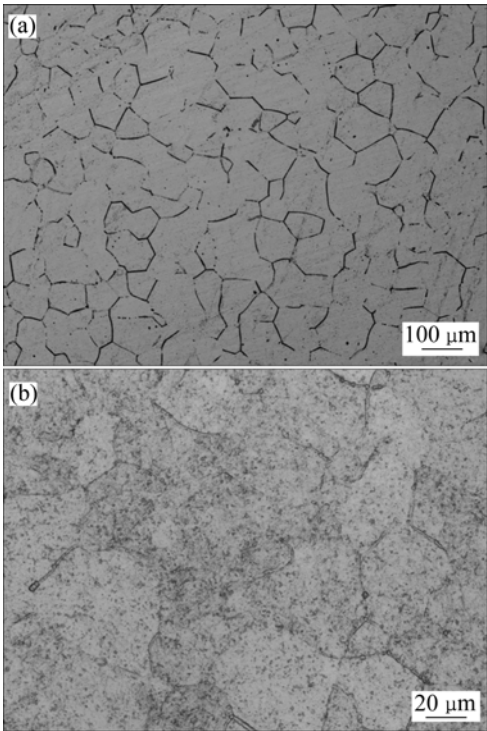


图 1 TB8 合金显微组织

Fig.1 Microstructures of TB8 titanium alloys: (a) ST; (b) ST+A

分析表 3 可以看出：TB8 钛合金经 800，815 和 830 ℃固溶后，3 种热处理工艺处理的试样其抗拉强度、塑性等试验数据基本一致，当抗拉强度为 850~875 MPa，伸长率为 24%~28%，断面收缩率为 68%~74% 时，数据离散度很小，说明 TB8 钛合金在 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度以上小范围温度区间内固溶处理时，固溶处理温度的变化对其室温拉伸性能影响很小。这主要是因为 TB8 钛合金在 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度以上固溶处理后得到的组织均为单一的等轴 β 晶粒，且由于其固溶温度在相变点以上 0~30 ℃的小范围变化，加热温度不是十分高，同时固溶加热时保温时间短，合金 β 晶粒未发生明显长大。所以，3 种制度处理后的室温拉性能基本保持一致。

此外，TB8 钛合金在 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度以上小范围温度区间内固溶处理后，可以获得较高的强度和优异的塑性，这有利于合金的冷加工，如标准件加工的冷镦等。

分析表 3 可以看出：TB8 钛合金经 800，815 和 830 ℃固溶，并采用 520，540 和 560 ℃制度时效后，合金室温拉伸性能与固溶温度关系未有明显规律，但合金室温拉伸性能与时效温度的变化有十分明显的规律，随着时效温度的升高，合金的抗拉强度明显降低，

表 3 不同工艺热处理后 TB8 钛合金的室温拉伸性能

Table 3 Room temperature mechanical properties of TB8 alloy after different heat treatments

No.	R_m / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A / %	Z / %
1(A ₁)	866	863	25.00	71.74
	867	862	28.50	71.65
2(A ₁ B ₁)	1 320	1 249	12.67	39.82
	1 309	1 236	9.67	30.79
3(A ₁ B ₂)	1 252	1 181	13.67	42.11
	1 247	1 169	13.00	37.42
4(A ₁ B ₃)	1 163	1 086	20.50	48.81
	1 183	1 108	18.67	43.75
5(A ₂)	854	852	24.67	68.00
	868	864	25.00	71.65
6(A ₂ B ₁)	1 307	1 230	12.67	33.53
	1 303	1 230	11.67	33.53
7(A ₂ B ₂)	1 250	1 174	15.00	42.68
	1 253	1 181	13.67	46.40
8(A ₂ B ₃)	1 180	1 103	15.33	43.94
	1 166	1 090	13.67	46.58
9(A ₃)	853	850	24.67	73.31
	871	866	25.00	71.65
10(A ₃ B ₁)	1 303	1 226	11.67	36.42
	1 321	1 243	10.33	31.79
11(A ₃ B ₂)	1 247	1 174	12.60	37.81
	1 253	1 180	12.83	33.53
12(A ₃ B ₃)	1 164	1 083	14.00	33.75
	1 164	1 082	15.17	33.53

抗拉强度(R_m)从最高的 1 321 MPa 降至 1 163 MPa，但合金塑性明显增高，伸长率(A)从最低的 9.67%增到最高的 20.50%。这主要是随着时效温度的升高，从 β 基体中析出的 α 相粗化，未沉淀区面积增大，晶界、晶内网状物析出现象减轻或消除，所以合金塑性增加^[6-7]。但同时晶内弥散质点减少，弥散强化减弱，合金强度降低。

可以看出：TB8 钛合金在 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度以上 0~30 ℃的范围内固溶处理后，可以获得较高的强度和优异的塑性，非常有利于合金的冷加工，合金在固溶并时效后，通过调整时效温度的高低，可以获得符合要求的强度、塑性匹配，以满足不同服役条件的零件需求。

3 结论

1) TB8 钛合金在 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度以上固溶时,获得的组织为单一的等轴 β 晶粒,且小范围的固溶温度变化对合金的 β 晶粒尺寸及室温拉伸等性能影响很小。

2) 时效温度对 TB8 钛合金的室温拉伸性能影响非常明显,随着时效温度的升高,合金强度明显降低,但塑性显著增加。

3) TB8 钛合金在 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度以上 0~30 时固溶后,具有较高的强度和优异的塑性,经 520 时效后,可获得抗拉强度大于 1 300 MPa、伸长率大于 5%的优异综合性能。

REFERENCES

- [1] 张利军,田军强,周中波,寇宏超,朱知寿.热处理制度对 TC21 钛合金锻件组织及力学性能的影响[J].中国材料进展,2009,28(9/10):84-87.
ZHANG Li-jun, TIAN Jun-qiang, ZHOU Zhong-bo, KOU Hong-chao, ZHU Zhi-shou. Effects of heat treatment on microstructures and mechanical performances of TC21 titanium alloy forgings[J]. Materials China, 2009, 28(9/10): 84-87.
- [2] 杨艳艳.超高强度 β 21S 合金铸锭成分均匀性的控制[J].钛工业进展,2001,18(27):36-38.
YANG Yan-yan. Control chemical composition proportion of β 21S super-high strength titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2001, 18(2): 36-38.
- [3] 朱知寿,钟鸣,储俊鹏,王庆如,全桂彝,王伟琪. β 21S 钛合金薄板材的热处理工艺和冷成形性能研究[J].稀有金属材料与工程,2000,29(1):50-52.
ZHU Zhi-shou, ZHONG Ming, CHU Jun-peng, WANG Qing-ru, QUAN Gui-yi, WANG Wei-qi. Heat treatment and cold forming properties of β 21S titanium sheet[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2000, 29(1): 50-52.
- [4] 钟鸣,陈玉文,朱知寿.一种 Ti-Mo-Nb-Al 合金的固溶态显微组织研究[J].稀有金属材料与工程,2000,29(2):118-120.
ZHONG Ming, CHEN Yu-wen, ZHU Zhi-shou. Microstructure of the alloy Ti-Mo-Nb-Al after solution treatment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2000, 29(2): 118-120.
- [5] GB/T 3620.1—2007, 钛及钛合金牌号和化学成分[S].
GB/T 3620.1—2007, Designation and composition of titanium and titanium alloys[S].
- [6] 王晶,韩洪武,阎彩文.热处理对 TB5 板材组织和性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2008,37(增刊3):671-673.
WANG Jing, HAN Hong-wu, YAN Cai-wen. Effects of heat treatment on microstructures and mechanical performances of TB5 titanium alloy sheet[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S3): 671-673.
- [7] 李国庆.TB8 钛合金板材热处理研究[J].航空与航天,2001,13(2):15-17.
LI Guo-qing. Study of heat treatment processings of TB8 titanium alloy sheet[J]. Aviation and Aerospace, 2001, 13(2): 15-17.

(编辑 陈灿华)