

热等静压工艺参数对 TA15 钛合金组织及性能的影响

孙志雨 莫晓飞 李亚峰 丁贤飞 南海
(北京航空材料研究院,北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心)

摘 要 采用热等静压方法成形 TA15 粉末预合金,系统研究了热等静压工艺参数(温度、时间、压力)对合金显微组织及性能的影响。结果表明,TA15 合金的抗拉强度、屈服强度随炉内压力、保温时间与温度的增加均呈现先升高后降低的变化;而伸长率、断面收缩率随压力升高、时间的延长呈先降低后升高的趋势,随温度的升高先升高后降低。当热等静压工艺为 930 ℃×130 MPa×3 h 时,TA15 合金组织为典型的网篮组织,板条间距与等轴 α 晶粒含量较低,其抗拉强度可达 952.3 MPa,伸长率可达 17.1%,屈服强度为 866.3 MPa,断面收缩率为 47.9%,性能接近锻件水平。

关键词 热等静压;TA15 合金;组织;性能

中图分类号 TG146.23;TG156 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.014 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Hot Isostatic Pressing Parameters on Microstructure and Properties of TA15 Titanium Alloy

Sun Zhiyu, Mo Xiaofei, Li Yafeng, Ding Xianfei, Nan Hai
(Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology,
Beijing Institute of Aeronautical Materials)

Abstract: TA15 pre-alloying powder forming was conducted by hot isostatic pressing. The effects of hot isostatic pressing parameters including temperature, time and pressure on microstructure and properties were systematically investigated. The results indicate that tensile strength and yield strength are increased at first and then decreased with the increase of elevated pressure, holding time and temperature, while elongation and reduction of area also presents a contrary tendency with the increase of elevated pressure and holding time, and a similar tendency with the temperature increasing. At the parameter for 930 ℃×130 MPa×3 h, the microstructure of TA15 alloy is characterized by net basket structure with the smaller slat spacing and content of equiaxed α grain, where the average tensile strength, yield strength, elongation and reduction of area are 952.3 MPa, 866.3 MPa, 17.1% and 47.9%, respectively, reaching the level of forgings.

Key Words: Hot Isostatic Pressing, TA15 Titanium Alloy, Microstructure, Property

TA15 钛合金是我国自主研发的一种可在 540 ℃ 下长时间服役的高铝当量的近 α 型钛合金,其名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V。该合金具有优良的抗蠕变性、耐腐蚀性以及焊接性能,被广泛用于制造各类飞机、发动机及导弹的结构件^[1-5]。粉末冶金热等静压技术可实现钛合金一体化成形,其细晶及无偏析特点可使制件获得优良的组织性能,避免熔炼浇注、开坯锻造等高能耗工序,通过近净成形可显著提高钛合金的利用率^[6-8]。

关于 TA15 钛合金热等静压研究主要集中在两方面,一方面作为消除铸造 TA15 合金内部冶金缺陷的手段,研究不同热等静压状态下 ZTA15 合金性能及组织的变化规律^[9];另一方面采用粉末冶金方法制备 TA15 合金,通过热等静压工艺成形 TA15 粉末钛合金,研究其组织演变规律及性能变化。目前,关于热等静压参数

收稿日期:2022-08-16;**修改稿收到日期:**2022-10-25
第一作者简介:孙志雨,女,1990 年出生,工程师,北京(100095),E-mail:sunzy525@126.com
引用格式:孙志雨,莫晓飞,李亚峰,等.热等静压工艺参数对 TA15 钛合金组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(6):804-807.
SUN Z Y, MO X F, LI Y F, et al. Effects of hot isostatic pressing parameters on microstructure and properties of TA15 titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):804-807.

[17] 王志刚.钛合金立式离心精密铸造凝固组织数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[18] 张伯明.离心铸造[M].北京:机械工业出版社,2004.

[19] 侯耀武.42CrMo 立式离心铸造环坯组织预测及控制[D].太原:太原科技大学,2013.

[20] 贺幼良,杨院生,于力,等.电磁离心铸件宏观组织的数值模拟[J].金属学报,2000,36(8):874-878.

(编辑:刘晨辉)

对组织及性能的系统性研究报道较少。徐正等^[10]研究了工艺制度对粉末 TA15 钛合金组织及性能的影响,但对合金内部相的组成、形貌以及含量对性能的影响未关注。王琪等^[11]通过烧结工艺结合热等静压工艺方法,研究合金力学性能及显微组织的变化。

本研究采用控制变量法对同一粒度范围的 TA15 钛合金粉末系统开展高温高压热等静压成形试验,选择不同热力耦合加载温度、保温时间和压力值,并通过对合金进行微观组织表征、平均晶粒尺寸的测定,得到温度、压力耦合作用对钛合金粉末微观组织演化及性能的影响,获得不同温度、压力以及保压时间条件下粉末钛合金显微组织演化规律及性能曲线,为航空用 TA15 合金热等静压成形件的开发提供参考。

1 试验材料及方案

采用原始球形雾化 TA15 钛合金粉末,具体成分见表 1,球形度 $\geq 99\%$,采用碳钢包套,其尺寸为 $\phi 60\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,将粉末均匀填充于碳钢包套中,对圆柱形包套进行封焊,封焊加热温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,抽真空至 10^{-3} Pa 。封焊后的包套于热等静压炉中进行压制试验,分别从温度、保压时间、压力 3 组参数开展试验研究:①温度设定为 910 、 930 和 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$,时间为 180 min ,压力为 130 MPa ;②压力设定为 110 、 130 和 150 MPa ,温度为 $930\text{ }^{\circ}\text{C}$,时间为 180 min ;③时间设定为 90 、 180

和 240 min ,温度为 $930\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力为 130 MPa 。

采用 JSM-6630LV 型扫描电镜对 TA15 合金微观组织形貌进行观测及表征,通过 IPP 软件对板条间距以及等轴 α 晶粒含量进行统计和分析,采用 5887-E2-GE 型力学试验机测试试样的力学性能,载荷大于 500 N ,拉伸速率为 $0.45\sim 4.5\text{ mm/min}$,试验结果取 5 个试样的平均值。

表 1 粉末 TA15 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TA15 alloy powder %

w_B										
Zr	Mo	Al	C	V	Fe	Si	O	N	H	Ti
2.06	1.52	6.49	<0.01	2.27	0.03	0.01	0.008	0.004	0.000 8	余量

2 试验结果与分析

图 1 为经不同温度热等静压后,粉末压坯的显微组织形貌。图 2 为 TA15 合金板条间距、等轴 α 晶粒含量及力学性能随温度的变化。可以看出, $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $930\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热等静压后合金均获得网篮组织,并含有一定量的等轴 α 晶粒,板条厚度与等轴晶粒含量见图 2a。这是由于粉末颗粒在高温高压过程中产生变形,变形较大的颗粒,产生晶格畸变能,压坯在升温烧结的过程中,颗粒与颗粒的接触面上发生回复和颗粒内再结晶以及颗粒间聚集再结晶,因此使部分 α 相等轴化或趋于等轴化^[12-13];而板条状 α 相的出现,可能是由于在高温、高压过程中,发生较小变形的粉末颗粒,经过高温烧结发生粘结并长

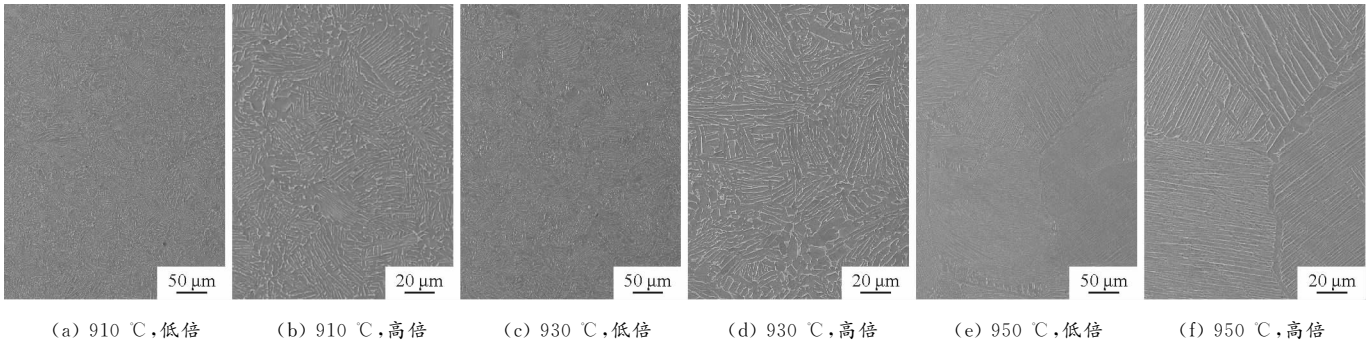


图 1 不同温度下 TA15 合金的显微组织

Fig.1 Microstructure of TA15 alloy at different temperatures

大。

由图 1 可见,温度从 $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升至 $930\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,板条 α 相粗化明显,等轴 α 晶粒含量有所降低。继续提高至 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$,最终获得魏氏体组织,组织中原始 β 晶界清晰完整,内部有细长平直的片状 α 相互相平行排布。郭瑞鹏^[14]发现, β 相转变温度在 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,此时保温温度已进入 β 单相区,失去等轴 α 晶粒的钉扎作用的 β 晶粒快速长大。由图 2b 可看出,随着热等静压温度升高,合金的抗拉强度(σ_b)、屈服强度($\sigma_{0.2}$)、伸长率(δ)以及断面收缩率(Ψ)均先增高后降低,当温度升高到 $930\text{ }^{\circ}\text{C}$

时,合金的综合性能最好,其抗拉强度平均值可达 952.3 MPa ,伸长率均值可达 17.1% 。当升高温度获得魏氏体组织后,力学性能相应显著下降,这是由于根据 Hall-Petch 公式^[15]

$$\sigma_s = \sigma_0 + (K/D)^{1/2} \tag{1}$$

式中, σ_s 为位错在基体金属运动的总阻力,取决于晶体结构和位错密度; σ_0 和 K 在一定温度和应变速率下为常数; D 为晶粒平均尺寸,晶粒尺寸越粗大,合金强度越低。同时粗大的魏氏体组织会降低合金的塑性和综合力学性能。

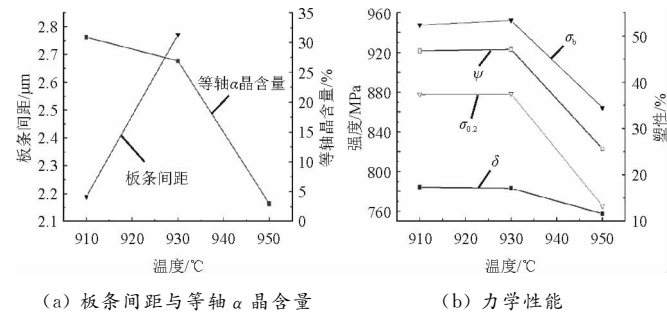


图 2 TA15 合金板条间距、等轴 α 晶含量及力学性能随温度的变化

Fig.2 Variation of slat spacing, equiaxed α grain content and mechanical properties of TA15 alloy with temperature

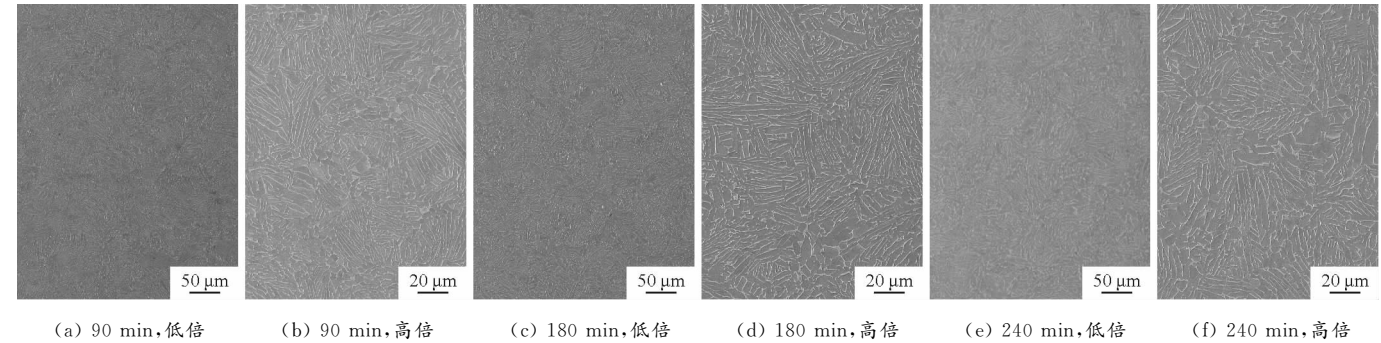


图 3 不同保温时间下 TA15 合金的显微组织形貌

Fig.3 Microstructure of TA15 alloy for different holding time

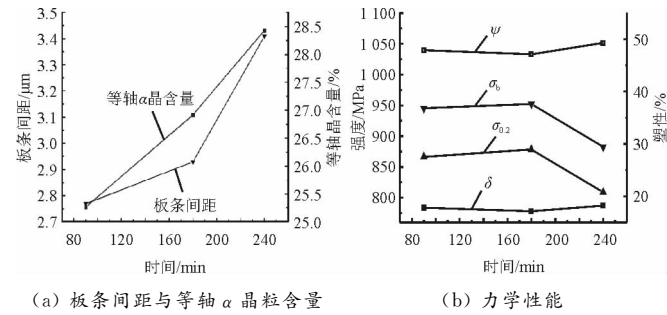


图 4 TA15 合金板条间距、等轴 α 晶粒含量及力学性能随时间的变化

Fig.4 Variation of slat spacing, equiaxed α grain content and mechanical properties of TA15 alloy with time

根据均匀化程度因数 $F^{[16]}$:

$$F = m_t / m_{\infty} \quad (2)$$

式中, m_t 为在时间 t 内, 通过界面的物质迁移量; m_{∞} 为

图 3 为 TA15 雾化粉末经 90、180 和 240 min 保温后压坯的显微组织形貌。可见经由 930 $^{\circ}\text{C}$ 、130 MPa 热等静压后均获得网篮组织, 组织中同时具有一定的等轴 α 晶粒。图 4 为 TA15 合金板条间距、等轴 α 晶粒含量及力学性能随时间的变化。由图 4a 可以看出, 平均板条厚度分别为 2.77、2.93 与 3.41 μm , 等轴晶含量分别为 25.27%、26.92% 与 28.43%。可见, 延长保温时间, 组织中的板条尺寸逐渐增厚, 部分 α 相长宽比降低, 条状 α 相变宽, 并且不规则形状的 α 相逐渐等轴化, 使等轴 α 相有所增加, 这是由于随着保温时间的延长, 合金均匀化程度越高。

当时间无限延长时, 通过界面的物质迁移量。在相同温度下, 烧结时间越长, 扩散越充分, 合金化程度越高, 但时间的影响没有温度明显。因此随着保温时间延长, α 相稳定元素 Al、Zr 随着时间延长在基体元素中扩散越充分, 等轴化越明显。对于等轴组织, 在塑性变形过程中晶粒与晶粒之间能够通过协调变形的方式来释放晶粒内的应变能, 从而对合金塑性起到贡献作用, 但影响材料的强度。当保温时间延长到 240 min 时, 板条组织粗化明显, 合金中沿着板条状组织周围出现大片等轴状的 α 相。由图 4b 可知, 在热等静压过程中, 随着保温时间的延长, 合金的抗拉强度和屈服强度先略升高再降低, 伸长率和断面收缩率则恰好相反。

图 5 为不同保压压力下粉末压坯的显微组织形貌。可以看出, 经过 930 $^{\circ}\text{C}$ 、180 min 热等静压后粉末压坯

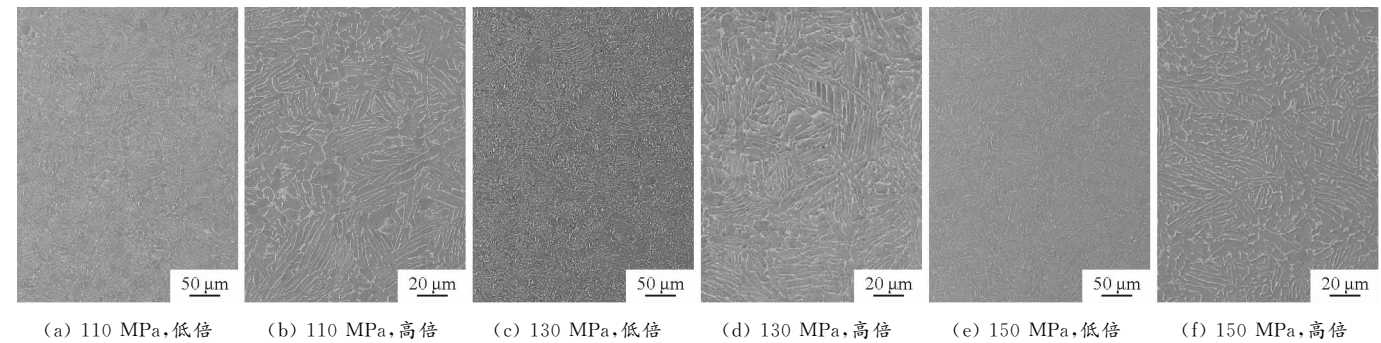


图 5 不同保压压力下 TA15 合金的显微组织

Fig.5 Microstructure of TA15 alloy under different pressures

均为网篮组织,压力变化对整体形貌影响较小。图 6 为 TA15 合金板条间距、等轴 α 晶粒含量及力学性能随压力的变化。由图 6a 可以看出,随着压力增加,板条厚度略有增加,但增幅较小。等轴晶含量在 130 MPa 时最少。由图 6b 可看出,合金在热等静压过程中,随着压力升高,其抗拉强度和屈服强度先升高后降低,而伸长率以及断面收缩率则先降低后升高,但变化幅度不大,说明 130 MPa 热等静压具有更好的力学性能,而力学性能的大小受板条尺寸与等轴 α 晶含量的共同影响,当板条厚度较小同时等轴 α 晶粒含量低时,力学性能更好。

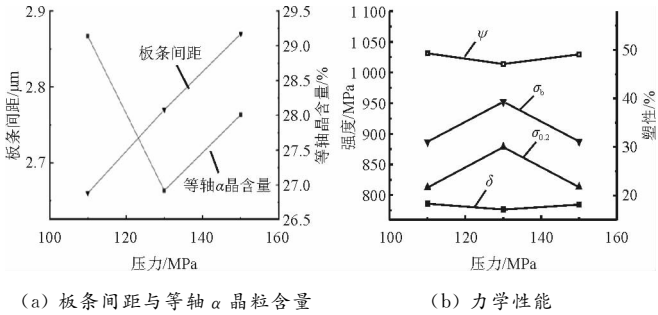


图 6 TA15 合金板条间距、等轴 α 晶粒含量及力学性能随压力的变化

Fig.6 Variation of slat spacing, equiaxed α grain content and mechanical properties of TA15 alloy with pressure

3 结 论

(1)TA15 合金的抗拉强度、屈服强度随炉内压力、保温时间与温度的增加均呈现先升高后降低的变化,而伸长率、断面收缩率随压力、时间的升高呈现先降低后升高的趋势,随温度先升高后降低。

(2)当热等静压工艺为 $930\text{ }^{\circ}\text{C}\times 130\text{ MPa}\times 3\text{ h}$ 时,TA15 合金为典型的网篮组织,板条间距与等轴 α 晶粒含量较低,TA15 合金获得的压坯室温力学性能可达同质锻件水平,其抗拉强度平均值可达 952.3 MPa,伸长率均值可达 17.1%,屈服强度为 866.3 MPa,断面收缩率为 47.9%。

参 考 文 献

[1] 王琪,阳文豪,许艳飞,等.烧结工艺对 TA15 粉末冶金钛合金组织与性能的影响[J].粉末冶金材料科学与工程,2017,22(3): 321-328.

[2] 王琪,文智,王斌,等.粉末冶金 TA15 钛合金的高温塑性变形行为[J].粉末冶金材料科学与工程,2013,18(5): 647-654.

[3] WANG D J, LI H, ZHENG W. Oxidation behaviors of TA15 titanium alloy and TiB_w reinforced TA15 matrix composites prepared by spark plasma sintering[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 37: 46-54.

[4] RAN J T, JIANG F C, CHEN Z. Microstructure and mechanical properties of TA15 alloy produced by electron beam melting[J]. Metals and Materials International, 2022, 28: 770-786.

[5] WANG C, YI J Z, QIN L Y, et al. Effects of double annealing on microstructure and mechanical properties of laser melting deposition TA15 titanium alloy[J]. Materials Research Express, 2019 (6): 116 526.

[6] 黄旭,李臻熙,黄浩.高推重比航空发动机用新型高温钛合金研究进展[J].中国材料进展,2011,30(6): 21-27.

[7] 李成功,傅恒志,于翹.航空航天材料[M].北京:国防工业出版社,2002.

[8] XU G, WANG G. Development of titanium and its industry[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(6): 903-912.

[9] 韩云飞,袁兵兵,孙冰,等. ZTA15 钛合金在不同状态下的组织和性能[J].铸造技术,2022(43): 694-697.

[10] 徐正,张绪虎,徐桂华.工艺制度对粉末 TA15 钛合金组织性能的影响[J].宇航材料工艺,2013(3): 110-113.

[11] 王琪,阳文豪,许艳飞,等.烧结工艺对 TA15 粉末冶金钛合金组织与性能的影响[J].粉末冶金材料,2017,22(3): 321-328.

[12] 孙志雨,李建崇,朱郎平.烧结温度对 TC4 合金显微组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2017,37(4): 362-366.

[13] 潘琨琨.面向航空航天难成形金属材料的热等静压工艺与性能研究[D].武汉:华中科技大学,2018.

[14] 郭瑞鹏.粉末冶金钛合金力学性能与热等静压致密化研究[D].沈阳:东北大学,2014.

[15] CAI C, SONG B, XUE P. et al. Effect of hot isostatic pressing procedure of Ti-6Al-4V: Surface qualities, microstructure and mechanical properties[J]. Journal Alloys and Compounds, 2014, 603: 207-212.

[16] 黄培云.粉末冶金原理[M].第二版.北京:冶金工业出版社,2008.

(编辑:刘晨辉)

2030 年全球电动汽车销量 或将达 7 000 万辆

来自国际能源署(“IEA”)发布的《全球电动汽车展望 2023》报告,到 2030 年,全球电动汽车的销量将超过 7 000 万辆,保有量将达到 3.8 亿辆,全球年度新车渗透率有望触及 60%。

据悉,2022 年,全球电动汽车销量首次突破 1 000 万辆,乘用车 1 031 万辆,电动汽车保有量达到 2 600 万辆。IEA 数据显示,2022 年全球电动汽车新车渗透率达到 14%,远高于 2020 年、2021 年的 5% 和 9%。其中,中国是绝对领导者,占了全球电动汽车销量 60% 以上的份额。IEA 还预计,2023 年全球电动汽车销量将达到 1 400 万辆,同比增长 35%,新车渗透率将突破 18%,而中国将接近 35%。

(摘自压铸周刊)