● 工艺技术 Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.08.014

ZTA15 钛合金在不同状态下的组织和性能

韩云飞[1,2],袁兵兵[1,2],孙 冰[1,2],刘义辉[1,2],乔海滨[1,2],李渤渤[1,2]
(1. 洛阳双瑞精铸钛业有限公司,河南 洛阳 471000;2.中国船舶集团有限公司 第七二五研究所,河南 洛阳 471000)

摘 要:采用熔模精密铸造技术制备了 ZTA15 钛合金棒材,对比研究了 ZTA15 钛合金铸态、退火、热等静压、热等静压+退火态等不同条件下的组织与拉伸性能。结果表明,TA15 钛合金在 4 种状态下的组织均由 α 和 β 两相组成,铸态组织不均匀,存在残余应力,力学性能数据分布离散;退火态、热等静压态和热等静压+退火的组织逐渐趋于均匀,针状 α 相粗化成片状,力学性能数据分布集中;热等静压+退火的组织和性能均匀性最高,力学性能数据分布集中度最高,为最佳使用状态。

关键词:ZTA15 钛合金;显微组织;力学性能;热等静压;退火
中图分类号: TG156.2; TG113.25 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2022)08-0694-04

Microstructure and Properties of ZTA15 Titanium Alloy in Different States

HAN Yunfei[1,2], YUAN Bingbing[1,2], SUN Bing[1,2], LIU Yihui[1,2], QIAO Haibin[1,2], LI Bobo[1,2]
(1. Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd., Luoyang 471000, China; 2. No. 725 Research Institute, China State Shipbuilding Gorporation Limited, Luoyang 471000, China)

Abstract: ZTA15 titanium alloy bar was prepared by investment precision casting technology. The microstructure and tensile properties of ZTA15 titanium alloy under different conditions such as-cast state, annealing state, hot isostatic pressing state, and hot isostatic pressing+annealing state were studied. The results show that the microstructure of TA15 titanium alloy in four states is composed of α and β phases, the as-cast microstructure is not uniform, there is residual stress, and the distribution of mechanical property data is discrete. The microstructure of annealed state, hot isostatic pressing state, and hot isostatic pressing +annealing state gradually tends to be uniform, and the needle-like α phase coarsenes into sheets, and the mechanical property data are distributed in a centralized manner. Hot isostatic pressing + annealing has the highest uniformity of microstructure and properties, and the highest concentration of mechanical property data distribution, which is the best use state.

Key words: ZTA15 titanium alloy; microstructure; mechanical property; hot isostatic pressing; annealing

ZTA15钛合金名义成分为Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V,属于近α型钛合金[1],仿制于俄罗斯牌号BT20和BT20Л钛合金[2-3],具有良好的铸造工艺性、焊接性和综合力学性能。随着热等静压和热处理工艺的广泛应用,ZTA15钛合金铸件的性能已经基本接近其变形件,应用于航天、航空等军工领域的大型结构件,在我国生产的钛合金铸件中,ZTA15和ZTC4钛合金用量占80%。

娄贯涛[6-8]研究了双重热处理和后处理对ZTC4、ZTA5钛合金组织及性能的影响,认为铸态钛合金存在残余应力,对材料强度存在不利影响,应在后处理状态下使用。钦兰云等[9]研究了循环热处理对激光复合制造TA15合金组织及性能影响,认为循环热处理对TAl5合金试样显微组织具有明显影响,造成强度降低、塑性升高。陈奏君等[10]研究了TiH2粉末制备钛合金的组织与力学性能,认为烧结温度对钛合金组织和孔隙率有较大影响,随着烧结温度升高,片状组织增加且粗化,孔隙率下降。王哲等[11]研究了锻造设备对TA15钛合金显微组织及性能的影响,认为不同锻造模块对TA15钛合金的组织及性能存在较大影响。目前,国内外对于钛合金组织及性能的研究多集中在ZTC4、TA15等牌号,且研究方向集中在热处理及加工处理等方面,针对ZTA15钛合金不同状态下组织和性能的系统性研究并不多,公开报道更是少见,这影响了ZTA15钛合金产品在航天、航空等重要军工领域的推广应用。本文系统地研究了ZTA15钛合金在铸造、退火、热等静压(Hot isostatic press-

收稿日期:2022-05-25
基金项目:国家重点研发计划(2020YFB2008300; 2020YFB2008301)
作者简介:韩云飞(1988—),硕士,工程师.研究方向:铸造钛合金.E-mail: 337668161@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ing, HIP)和热等静压后二次退火(HIP+退火)等不同状态下的显微组织和室温拉伸性能，对其工程化应用具有重要意义，为推广应用提供数据支撑。

1　实验方法

本文实验所用试棒采用熔模精密铸造工艺制备，规格为ϕ16 mm×160 mm圆棒；试棒在VAC-150真空自耗电极凝壳炉中浇铸成型，浇铸电流>19 KA，真空度<0.9 Pa，电压35~45 V；试棒内部存在疏松、缩孔缺陷，需进行热等静压处理，热等静压工艺参数为：保压温度910~930 ℃，氩气压力130~140 MPa，保温时间2.4~2.5 h，冷却至300 ℃以下出炉；然后在钻床上用合金钻头钻掉内部夹渣类缺陷，X射线复探确认缺陷完全去除后用同牌号TA15焊丝补焊修复，在VDF/B-4.5T真空热处理炉中退火消除焊接应力，退火工艺参数为：温度700±14 ℃，保温时间2.0±0.1 h，真空度≤0.133 Pa，炉冷≤200 ℃放气，≤40 ℃出炉。

试样取自铸态、退火态、HIP态和HIP+退火态试棒中部位置，每种状态的标准拉伸试样各5个、金相试样各1个，按照GB/T 228.1-2010《金属材料室温拉伸试验》在250 kN 材料试验机(INSTRON5985)上进行室温拉伸试验，金相试样用氢氟酸+硝酸+水溶液腐蚀液侵蚀后，按照GB/T 5168-2020《钛及钛合金高低倍组织检验方法》和GB/T 6611-2008《钛及钛合金术语和金相图谱》在OLYMPUS GX71 金相显微镜上进行组织观察。

从试棒的头、中、尾部取样进行化学成分检验，实测结果见表1，试棒头、中、尾部化学成分均匀，尤其是主要成分Al、V、Zr和Mo元素，满足GJB2896A-2007标准要求。

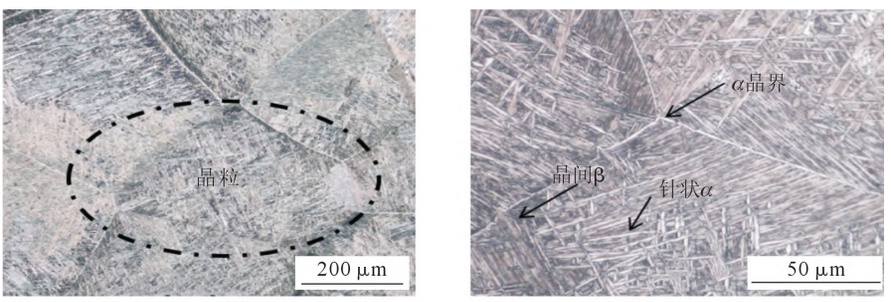
2　实验结果与分析

2.1　ZTA15钛合金在不同状态下的组织

ZTA15钛合金试样在铸态、退火态、HIP态和HIP+退火态下的组织，如图1~4所示。铸态ZTA15钛合金的显微组织为针状α+晶界α+晶间β，属于典型的魏氏组织和网篮组织，在钛液冷却过程中β相转变为针状α相，针状α相沿粗大的原始β晶粒边界分布，原始β晶界仍存留，也可称为α晶界，少量β相未

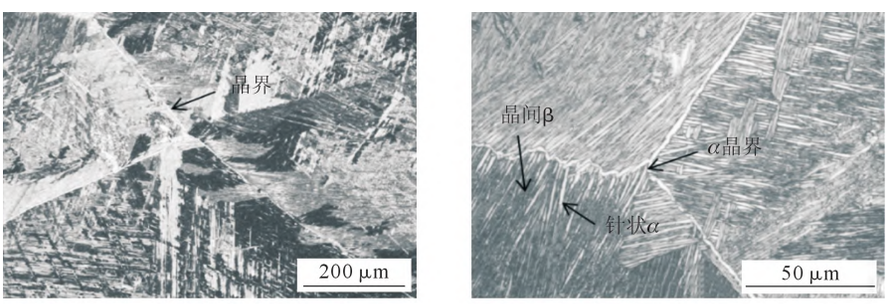
表1 ZTA15钛合金化学成分 *w*/%
Tab.1 The chemical composition of ZTA15 titanium alloy

主要成分					杂质含量					
Ti	Al	V	Zr	Mo	Fe	Si	C	N	H	O
基	6.52	2.06	1.60	1.87	0.046	0.015	<0.010	0.005 3	0.004 5	0.119
基	6.61	1.89	1.65	1.76	0.061	0.023	0.031	0.007 2	0.001 5	0.105
基	6.60	2.22	1.84	1.87	0.058	<0.010	0.018	0.009 1	0.001 5	0.098



(a) ×100　　(b) ×500

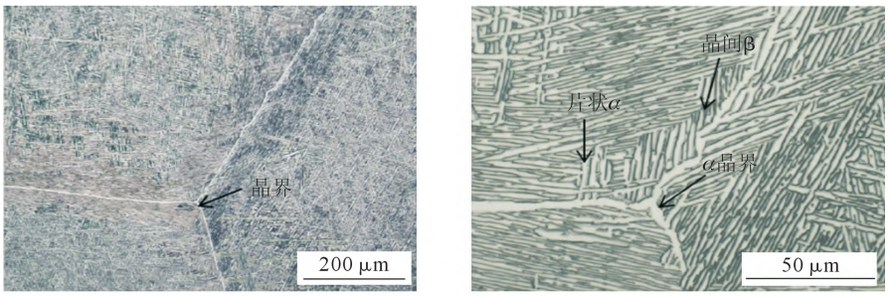
图 1 ZTA15 钛合金铸态组织
Fig.1 As-cast microstructure of ZTA15 Ti alloy



(a) ×100　　(b) ×500

图 2 ZTA15 钛合金退火态组织
Fig.2 Annealed microstructure of ZTA15 titanium alloy

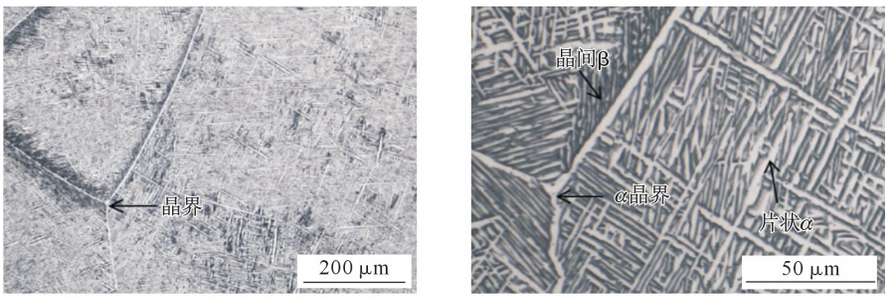
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) ×100 (b) ×500

图 3 ZTA15 钛合金 HIP 态组织

Fig.3 Microstructure of ZTA15 titanium alloy at HIP state



(a) ×100 (b) ×500

图 4 ZTA15 钛合金 HIP+退火态组织

Fig.4 Microstructure of ZTA15 titanium alloy at HIP and annealed state

完成转变，沿α晶粒边界分布，呈编织状，称为晶间β，如图1所示。

退火态ZTA15钛合金的显微组织为针状α+晶界α+晶间β，如图2所示。退火温度700 ℃，低于β相变温度（1 000±20 ℃），退火态组织与铸态相比较均匀，消除了残余应力，使得退火态的强度明显提高，塑性稍有增强。

图3和图4中ZTA15钛合金HIP态和HIP+退火态的显微组织均为片状α+晶界α+晶间β。HIP温度920 ℃，低于β相变温度，与铸态和退火态组织不同的是针状α相有不同程度的明显宽化，呈片状，晶界α逐步宽化且增多，组织进一步均匀，使得材料强度降低、塑性提高。

铸态、退火态、HIP态和HIP+退火态ZTA15钛合金的显微组织均由α、β两相组成，无论退火或热等静压或热等静压后再退火都不会改变其相组成。这是因为魏氏组织中α相和β相存在顽强的“遗传性”，通过常规退火和热等静压很难改善其组织结构，一般认为不能通过热处理对其进行强化，因此其供货状态通常为热等静压状态或退火状态[12-13]。

2.2 ZTA15钛合金在不同状态下的力学性能

ZTA15钛合金在铸造、退火、HIP和HIP+退火4种状态下的5个试样室温拉伸力学性能，见表2，均满足GJB2896A-2007标准要求。

ZTA15钛合金在4种不同状态下5个试样的室温拉伸力学性能变化见图5。在铸态下，强度和塑性偏低，且数据分布离散性强，主要原因是存在残余应力，组织不均匀；经退火后不均匀组织开始向均匀方向发展，强度提高20~40 MPa，塑性提高约1%，数据离散性有所降低；在HIP态下，铸态的针状α相消失，α相组织粗化，呈片状，组织均匀性明显增强，强度降低30~40 MPa，塑性提高约3%，数据分布集中，性能较稳定；在HIP+退火态下，较HIP态组织均匀性进一步增强，强度提高7~8 MPa，塑性降低2%~3%，数据分布进一步集中，性能更加稳定。

3 结论

通过上述研究得到以下结论：

表 2 ZTA15 钛合金在不同状态下的室温拉伸力学性能

Tab.2 Tensile mechanical properties of ZTA15 titanium alloy at room temperature under different conditions

试样状态	抗拉强度 *Rm*/MPa	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$/MPa	断后伸长率 *A*%	断面收缩率 *Z*%
GJB2896A-2007	≥885	≥785	≥5	≥12
铸态	917~992	793~864	5~9.5	12~19
退火态	982~1 004	851~873	6~10	13~17
HIP 态	932~942	813~825	10~12.5	17~19
HIP+退火态	940~948	822~832	7~9	14~16

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

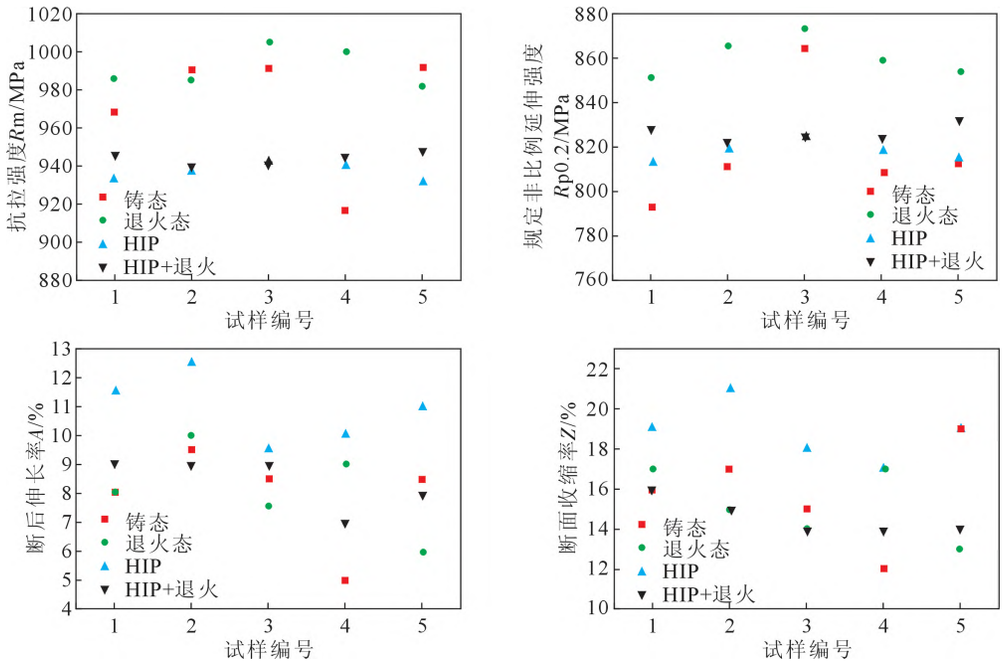


图 5 ZTA15 钛合金在 4 种不同状态下 5 个试样的拉伸性能

Fig.5 Tensile properties of 5 samples of ZTA15 titanium alloy at 4 different states

(1)ZTA15钛合金在铸态下组织不均匀,存在残余应力,力学性能数据分布离散,对材料的工程化应用不利。

(2)ZTA15钛合金经退火或HIP或HIP+退火,组织逐渐趋于均匀,力学性能数据分布集中,强度先明显降低后稍有增加, 韧性先明显增加后稍有降低,均满足性能指标要求。

(3)ZTA15钛合金在HIP+退火态下组织和性能均匀性最强,力学性能数据分布集中度最高,为最佳使用状态。

参考文献:

[1] БОРИСОВА Е А 著. 陈石卿,译. 钛合金金相学[M]. 北京:国防工业出版社.

[2] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京:航空工业出版社,2000.

[3] 中国航空材料手册编写委员会. 中国航空材料手册:第4卷 钛合金、铜合金[M]. 北京:中国标准出版社,2000.

[4] 黄旭. 先进航空钛合金材料与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

[5] 张美娟. 航空铸造钛合金及其成型技术发展[J]. 航空材料学报,2016, 36(3): 13-19.

[6] 娄贯涛. 双重热处理对ZTC4铸造钛合金材料组织及性能的影响[J]. 材料开发及应用,2010, 25(4): 40-43.

[7] 娄贯涛. 后处理对ZTC4铸造钛合金材料组织及性能的影响[J]. 材料开发及应用,2010, 25(3): 8-10.

[8] 娄贯涛. 后处理对ZTA5铸造钛合金材料组织及性能的影响[J]. 材料开发及应用,2011, 26(3): 1-3.

[9] 钦兰云,何晓娣,赵朔,等. 循环热处理对激光复合制造TA15合金组织及性能影响[J]. 稀有金属,2020, 44(2): 139-146.

[10] 陈奏君,林泽华,段中元,等. TiH_2粉末制备钛合金的组织与力学性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2021, 26(3): 243-249.

[11] 王哲,何健,张帅,等. 锻造设备对TA15钛合金显微组织及性能的影响研究[J]. 钢铁钒钛,2022, 43(1): 80-84.

[12] 张帆,张宝昌,何明,等. 循环热处理对Ti-6A1-4V合金铸件粗大魏氏体细化作用的研究[J]. 金属学报,1987, 23(5): 362-368.

[13] 陈红,刘宏宇,苏贵桥,等. ZTA 1 5铸造钛合金材料的性能与应用[J]. 铸造,2007, 56(6): 645-647.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net