

热等静压工艺参数对 ZTC4 钛合金力学性能的影响

Effects of Hot Isostatic Pressing Treatment Parameters on Mechanical Properties of ZTC4 Casting Titanium Alloy

赵嘉琪¹, 杨伟光², 南海¹, 吴国清²

(1 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

ZHAO Jia-qi¹, YANG Wei-guang², NAN Hai¹, WU Guo-qing²

(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2 School of Materials Science and Engineering, Beihang

University, Beijing 100191, China)

摘要: 为了使 ZTC4 钛合金铸件具有较优的力学性能, 系统地研究了热等静压温度、时间、压力等工艺参数对 ZTC4 钛合金铸板力学性能的影响。结果表明: 热等静压工艺参数变化对 ZTC4 钛合金室温拉伸性能、弯曲性能都有影响, 其中对 ZTC4 钛合金伸长率的影响最为明显, 但对冲击性能影响不显著。综合考虑各因素, 在 920℃/125MPa/2h 热等静压工艺条件下可使 ZTC4 钛合金铸件获得较好的综合力学性能。

关键词: 热等静压; 钛合金; 力学性能

中图分类号: TG166.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)10-0042-05

Abstract: In order to obtain the best mechanical properties of ZTC4 alloy casting, effects of hot isostatic pressing treatment parameters (temperature, time and pressure) on microstructure of ZTC4 casting titanium alloy were investigated systemically. The results show that the room temperature tension and bend properties are obviously affected by the hot isostatic pressing treatment parameters, especially the elongation of ZTC4 alloy, but the impact property is affected slightly. The casting show the best mechanical properties when they are HIP at 920℃ for 2h with the pressure of 125MPa, by consideration of all the conditions.

Key words: hot isostatic pressing; titanium alloy; mechanical property

ZTC4 铸造钛合金具有密度低, 热处理工艺简单, 在保持较高强度水平下具有韧性好、疲劳强度高、耐蚀性以及与复合材料有良好相容性等优良的综合性能, 在航空、航天、航海以及化工等行业中得到广泛的应用, 更是大型飞机中大型薄壁复杂非对称精密铸件的首选材料之一^[1-4]。然而, 钛合金铸件也容易产生缩松、缩孔以及气孔等缺陷, 这些缺陷直接影响铸件性能, 成为铸件失效的隐患。热等静压 (Hot Isostatic Pressing, HIP) 是 20 世纪 70 年代在国外发展起来的一项新技术, 通过热等静压过程中的高温、高压可以使铸件内部的封闭气孔、缩松被压实闭合, 并扩散结合成致密的组织, 使铸件的缺陷得到修复, 从而消除铸件内部孔洞类缺陷, 提高铸件的力学性能^[5], 因此, 被广泛地用于钛合金铸件的处理中。

热等静压过程可以分为两个阶段, 首先是气孔体积的收缩和闭合, 在此阶段金属向气孔内部发生塑性流动, 将气孔压合; 然后合金元素发生扩散与蠕变, 这一阶段中原先气孔压合后形成的表面发生完全的冶金连接, 这样既消除了气孔, 又不会在压合处形成平面裂纹。但是, 由于热等静压处理温度较高, 在热等静压工艺处理过程中钛合金铸件内部缺陷得到修复的同时, 会不同程度地发生晶粒粗大, 这在一定程度上抵消了热等静压带来的对铸件性能的积极影响^[6-10]。然而, 晶粒的粗大与热等静压工艺参数息息相关, 而目前就热等静压温度、时间、压力等对 ZTC4 钛合金组织和性能影响的研究还很少。因此, 本工作开展了热等静压温度、时间、压力对钛合金拉伸性能、弯曲性能以及冲击性能的影响的研究, 这为精确控制热等静压工艺, 进

一步提高铸件的综合性能提供理论依据。

1 实验材料和方法

采用离心铸造 ZTC4 钛合金板为研究材料,铸板规格为 300mm×110mm×6mm,其化学成分达到了 GJB2896A—2007《钛及钛合金熔模精密铸造规范》的要求,具体成分如表 1 所示。

表 1 ZTC4 合金铸板元素含量(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of ZTC4 alloy(mass fraction/%)

Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
6.40	3.98	0.06	0.02	0.014	0.006	0.002	0.17	Bal

采用 QIH-16 型热等静压设备进行热等静压实验,在 900~940℃,110~140MPa,1~3h 范围内研究了热等静压温度、时间、压力 3 个工艺参数对 ZTC4 钛合金组织的影响。设备升温速率为 10℃/min,升压速率为 1MPa/s。热等静压工艺试验参数的选择如表 2 所示,ZTC4 铸板随炉冷却至 300℃ 以下出炉,传压介

表 2 热等静压试验方案设计

Table 2 Experiment scheme of HIP treatment

Temperature/℃	Time/h	Pressure/MPa	Remark
900	2	125	Effects of temperature
920	2	125	
940	2	125	
920	1	125	Effects of time
920	2	125	
920	3	125	
920	2	110	Effects of pressure
920	2	125	
920	2	140	

质为氩气,每炉试样数 5 个。

拉伸和弯曲试验在 SANS CMT5504 试验机上进行,加载速率为 0.5mm/min。冲击试验在 SANS ZBC2000 试验机上进行,冲击速率为 12.5m/s。拉伸试样和冲击试样分别按北京航空材料研究院 2591-S017 和 2591-S041 标准加工,弯曲试样按照 GB-T14452-93《金属弯曲力学性能试验方法》进行加工。

2 实验结果与讨论

2.1 热等静压工艺对 ZTC4 钛合金室温拉伸性能的影响

本工作在 900~940℃,110~140MPa,1~3h 范围内研究了热等静压工艺参数变化对 ZTC4 钛合金室温力学性能的影响规律。图 1~3 分别给出了热等静压温度、时间和压力对 ZTC4 钛合金室温拉伸性能的影响曲线。可以看出,温度和时间对钛合金力学性能的影响基本一致,表现出随着温度的升高或者时间的延长,屈服强度、抗拉强度有一定程度的下降,强度变化范围在 30~40MPa 之间。而热等静压压力对室温拉伸强度的影响规律表现为随着压力的增加屈服强度一直下降,而且屈服强度在 125~140MPa 范围内的波动明显高于 110~125MPa 范围内,而抗拉强度却呈现出随压力升高先增加后降低的趋势。热等静压工艺参数的变化对 ZTC4 钛合金伸长率的影响较为明显,随着温度的升高、压力的增大或者时间的延长,伸长率均呈现出先增加后降低的规律,并在温度为 920℃,时间为 2h 和压力为 125MPa 处存在极值。

2.2 热等静压工艺对 ZTC4 钛合金室温弯曲性能的影响

图 4,5 分别给出了热等静压温度、时间和压力对 ZTC4 钛合金室温弯曲性能的影响曲线。从图中可以

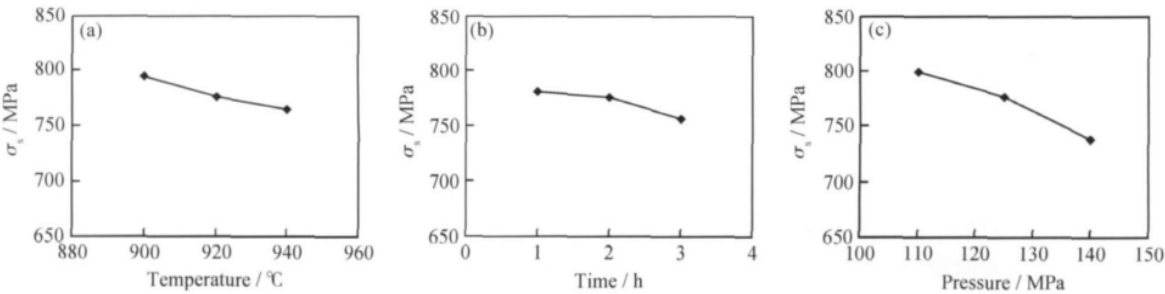


图 1 热等静压工艺参数对屈服强度的影响
(a)温度;(b)时间;(c)压力

Fig.1 Effects of HIP parameters on the yield strength of ZTC4 alloy
(a) temperature; (b) holding time; (c) pressure

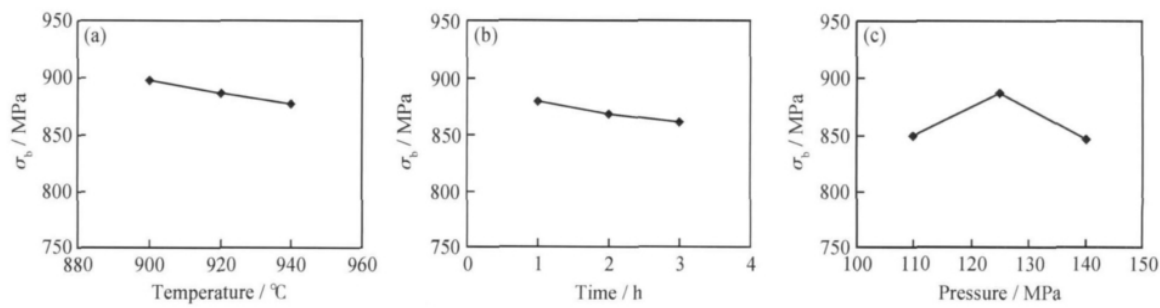


图 2 热等静压工艺参数对抗拉强度的影响
(a)温度;(b)时间;(c)压力

Fig. 2 Effects of HIP parameters on the tensile strength of ZTC4 alloy
(a)temperature;(b)holding time;(c)pressure

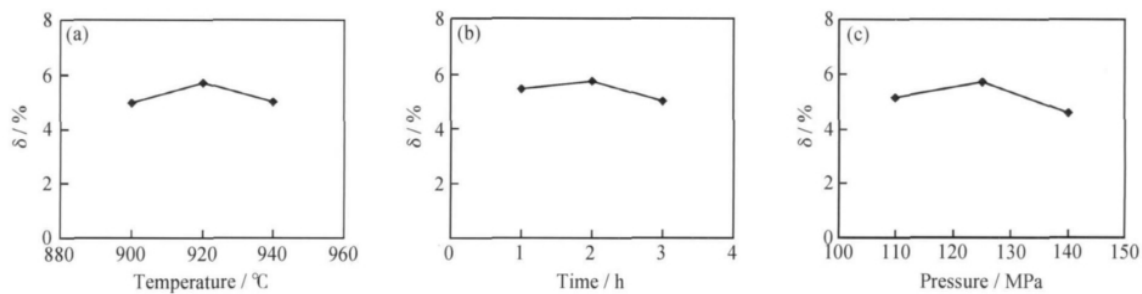


图 3 热等静压工艺参数对伸长率的影响
(a)温度;(b)时间;(c)压力

Fig. 3 Effects of HIP parameters on the elongation of ZTC4 alloy
(a)temperature;(b)holding time;(c)pressure

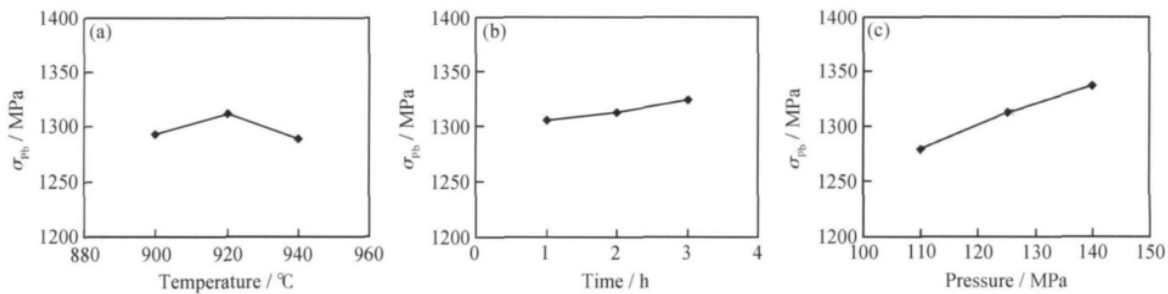


图 4 热等静压工艺参数对规定非比例弯曲应力的影响
(a)温度;(b)时间;(c)压力

Fig. 4 Effects of HIP parameters on the yield bending strength of ZTC4 alloy
(a)temperature;(b)holding time;(c)pressure

看出,随着温度的升高、压力的增大或者时间的延长,ZTC4 钛合金的规定非比例弯曲应力和抗弯强度基本上都略有提高,其中的一个例外是经过 940℃ 处理的铸板的规定非比例弯曲应力相比 920℃ 处理的铸板略有下降,但是降幅不大,在 3% 左右。

2.3 热等静压工艺对 ZTC4 钛合金室温冲击性能的影响

图 6 分别给出了热等静压温度、压力和时间对 ZTC4 钛合金室温冲击性能的影响曲线。从图 6 可

以看出,冲击韧性数据波动范围较小,热等静压工艺参数温度、时间和压力的变化对冲击韧性的影响均不明显。

2.4 讨论

从实验结果可知,热等静压工艺参数变化对 ZTC4 钛合金室温拉伸性能、弯曲性能存在影响,但对冲击性能影响不大,其中对 ZTC4 钛合金的伸长率的影响最为明显。将这些实验数据与国军标要求对比,当温度选择 900℃ 和 940℃ 时,如图 3(a) 所示伸长率

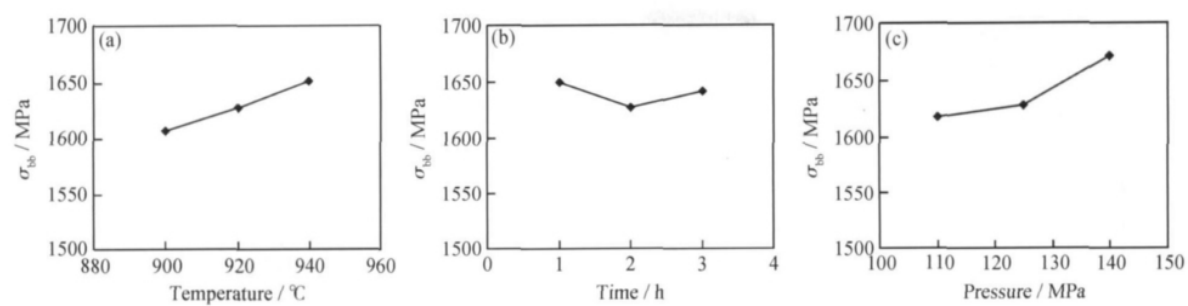


图 5 热等静压工艺参数对抗弯强度的影响
(a)温度;(b)时间;(c)压力

Fig. 5 Effects of HIP parameters on the bending strength of ZTC4 alloy
(a) temperature; (b) holding time; (c) pressure

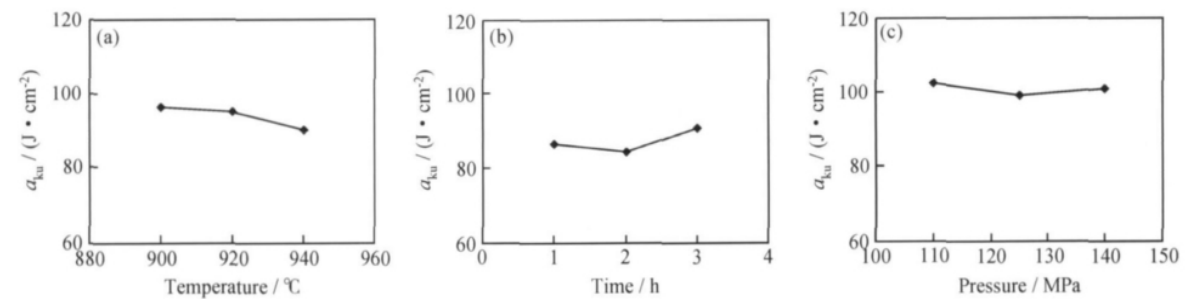


图 6 热等静压工艺参数对冲击韧性的影响
(a)温度;(b)时间;(c)压力

Fig. 6 Effects of HIP parameters on the impact toughness of ZTC4 alloy
(a) temperature; (b) holding time; (c) pressure

刚达到国军标的要求(大于 5%);当时间选择 3h 时,如图 1(b)所示屈服强度未达到国军标的要求(765MPa);当压力选择 140MPa 时,如图 3(c)所示伸长率低于国军标的要求(大于 5%),如图 1(c)所示屈服强度低于国军标的要求(765MPa)。因此,在选择工艺参数时,应避免选择过高的压力,并且热等静压时间不宜过长,温度不宜过低。在 920℃/125MPa/2h 热等静压工艺条件下获得了较好的综合力学性能。

表 3 所示为热等静压前后 ZTC4 钛合金室温力学性能,铸造态 ZTC4 钛合金的屈服强度,抗拉强度和伸长率分别是 753, 891MPa 和 3.45%,经过温度为 920℃,时间为 2h 和压力为 125MPa 的热等静压工艺

处理后 ZTC4 铸件的室温拉伸屈服强度提高了 30MPa 左右,抗拉强度小幅下降,伸长率大幅度提高。这主要是因为热等静压后铸件中宏观和微观铸造缺陷得到愈合,提高了承受载荷的截面积,缺陷处优先形变屈服的现象得到抑制,使得合金达到规定非比例拉伸强度所需要的载荷加大,导致屈服强度提高了。同时,由于缩松、气孔、缩孔等铸造缺陷得到压合,并且压合处金属产生扩散,发生冶金结合,压合处的平面裂纹产生得到抑制,在拉伸过程中,裂纹的形成较之前更为困难,伸长率得到提高。然而,在热等静压过程中,晶粒尺寸增加,片层间距变宽,同时合金内部位错密度下降,内应力得到释放,这导致抗拉强度稍有下降。

表 3 热等静压前后 ZTC4 钛合金室温力学性能的对比
Table 3 Mechanical properties of as-casting and HIPed ZTC4 alloy

	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	σ_{pb} /MPa	σ_{bb} /MPa	$a_{ku}/(J \cdot cm^{-2})$
HIP(920℃/125MPa/2h)	782.1	876.5	5.73	1331.9	1651.9	94.8
As-casting	753	891	3.45	1344.8	1666.9	86.4
D-value	29.1	-14.5	2.28	-12.9	-15	8.4
(D-value/As-casting)/%	3.86	-1.63	66.09	-0.96	-0.90	9.72

考虑到实际工况条件,建议 ZTC4 钛合金铸件的热等静压工艺为:温度 $920^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$,压力 $120\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$,时间 $1\sim 2\text{h}$ 。

3 结论

- (1)热等静压工艺参数变化对 ZTC4 钛合金室温拉伸性能、弯曲性能存在影响,但对冲击性能影响不大,其中对 ZTC4 钛合金的伸长率的影响最为明显。在选择工艺参数时,应避免选择过高的压力,并且热等静压时间不宜过长,温度不宜过低。
- (2)在 $920^{\circ}\text{C}/125\text{MPa}/2\text{h}$ 热等静压工艺条件下的确获得了较好的综合力学性能,屈服强度为 782MPa ,抗拉强度为 876.5MPa ,伸长率达到 5.73% ,在该工艺条件下,弯曲性能和冲击性能适中。考虑上述因素和实际工况,建议 ZTC4 钛合金的热等静压工艺为:温度 $920^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$,压力 $120\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$,时间 $1\sim 2\text{h}$ 。

参考文献

[1] LEYENS C,PERERS M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications[M]. WILEY-VCH: Verlag GmbH & Co, 2003. 8-12.

[2] 张喜燕,赵永庆,白晨光. 钛合金及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005. 68-69.

(上接第 41 页)

3 结论

- (1)线性摩擦焊焊缝温度超过 1100°C ,超过 β 的相变温度,焊缝组织在焊接过程中发生相变。
- (2)与母材组织相比,焊缝组织在热力耦合作用下被明显细化,并发生了明显的再结晶现象,振幅越大,再结晶晶粒尺寸越大。
- (3)焊后界面依然存在,界面处存在成分过渡区,并随振幅的增大,典型原子的扩散距离增大。

参考文献

[1] 马铁军,张学军,杨思乾,等. TC4 钛合金线性摩擦焊接头的冲击韧性及断口特征[J]. 航空材料学报,2007,27(6):40-44.

[2] VAIRIS A,FROST M. Modelling the linear friction welding of titanium blocks[J]. Materials Science and Engineering, 2000,A292(1):8-17.

[3] VAIRIS A,FROST M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy [J]. Wear, 1998, 217 (1):117-131.

[3] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京:机械工业出版社,2004. 314-318.

[4] 南海,谢成木,魏华胜,等. 大型复杂薄壁类钛合金精铸件的研制[J]. 中国铸造装备与技术,2001,(2):12-14.

[5] SAMAROV, SELIVERSTOV. HIP modeling of complex shape parts: experience, trends and perspectives[A]. Powder Metallurgy World Congress (PM'94)[C]. Paris:European Powder Metallurgy Association,1994. 771-774.

[6] HEBESUEN J C. HIP casting densification[A]. Pressure Vessels and Piping (PVP) Conference[C]. New York: ASME,1999. 125-138.

[7] 张满,南海,黄东,等. 钛合金铸件的热等静压和氢处理工艺研究[J]. 中国铸造装备与技术,2002,(5):1-3.

[8] 王晓林,王兰芳,朱仲忍,等. 热等静压处理对 TC10 合金铸造组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2005,10(增刊):34-37.

[9] 史昆,谢华生,赵军,等. 热等静压对超低温 Ti-5Al-2.5SnELI 合金铸造组织和性能的影响[J]. 铸造,2009,58(7):659-661.

[10] 王小娥,王红红. 热等静压处理对 ZT4 钛合金精铸件组织与性能的影响[J]. 金属热处理,1992,(4):30-34.

基金项目:北京市科技新星计划(2007B016);教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0805)

收稿日期:2010-09-01;修订日期:2011-02-27

作者简介:赵嘉琪(1980—),男,工程师,硕士,从事钛合金铸造方面的研究,联系地址:北京航空材料研究院铸钛技术中心,北京市 81 信箱 21 分箱铸钛技术中心(100095),E-mail:zhaojq@ sina. com. cn

[4] 马铁军,杨思乾,张勇,等. TC4 线性摩擦焊接头的力学性能及组织变化特点[J]. 焊接学报,2007,28(10):17-21.

[5] 马铁军,杨思乾,张勇,等. LC9 超硬铝线性摩擦焊研究[J]. 热加工工艺,2007,36(11):25-26.

[6] 张田仓,韦依,周梦慰,等. 线性摩擦焊接在整体叶盘制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2004,(11):56-57.

[7] WANJARA P, JAHAZI M. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: processing, microstructure, and mechanical-property interrelationships [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2005,36A(8):2149-2163.

[8] LANG B,ZANG T C,LI X H,et al. Microstructural evolution of a TC11 titanium alloy during linear friction welding[J]. Journal of Materials Science,2010,45(10):6218-6224.

[9] 毛卫民,赵新兵. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京:北京工业出版社,1996.

收稿日期:2011-03-09;修订日期:2011-07-07

作者简介:张传臣(1981—),男,博士研究生,主要从事摩擦焊接理论研究工作,联系地址:北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学材料学院主楼 416 黄继华(100083),E-mail:zhangchuanchen@sohu. com