

热处理对 ZTi600 铸造钛合金组织与性能的影响

戚运莲, 洪 权, 卢亚锋, 杜 宇, 郭 萍, 刘 伟, 曾立英

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘 要: 研究热等静压及热处理工艺对 ZTi600 高温铸造钛合金组织与性能的影响。研究结果表明: 退火温度对屈服强度和抗拉强度以及塑性略有影响, 经过热等静压处理后, 室温拉伸塑性大幅度提高, 塑性随着热等静压温度的升高而升高, 强度变化较小; ZTi600 高温铸造钛合金组织以针状、板条状的魏氏组织为主, 热等静压后晶粒尺寸减小, 局部组织有等轴趋势。

关键词: ZTi600 钛合金; 高温钛合金; 热处理; 组织; 性能

中图分类号: TG146.2+3

文献标志码: A

Effects of heat treatment conditions on microstructures and properties of ZTi600 cast titanium alloy

QI Yun-lian, HONG Quan, LU Ya-feng, DU Yu, GUO Ping, LIU Wei, ZENG Li-ying

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Effects of heat treatment and HIP process on microstructure and the properties of ZTi600 cast titanium alloy were studied. The results show that yield strength, ultimate strength and ductility will slightly vary with the annealed temperature. The ductility at ambient temperature will improve abruptly after HIP process, and it will increase with the increase of HIP temperature. The variation of strength is small. The microstructures of ZTi600 alloy are mainly composed of needle-and plate-like Widmānstätten structures. The grain sizes will decrease after HIP process, and will tend to be equiaxed structures at local regions.

Key words: ZTi600 Ti alloy; high temperature titanium alloy; heat treatment; microstructure; property

纵观国内外铸造钛合金发展历史, 铸造钛合金是在已成熟的工业化生产的变形钛合金的基础上, 进行成分细微调整而开发的^[1-4]。Ti600 合金是一种在 600 使用的近 α 型、含稀土元素钕的高温钛合金, 具有良好的拉伸强度、蠕变和高温持久等综合性能^[5-7]。目前, 这种合金几乎全部以锻件的形式投入使用。为了降低成本和获得复杂的外形, 人们更关注其铸件^[8-10]。特别是国外一些性能优异的飞行器, 为了获得高的飞行性能, 都在应用各种复杂结构的钛合金铸件^[11-12]。钛合金铸件容易产生缩松、缩孔以及气孔等缺陷, 这些缺陷会影响铸件性能, 成为铸件失效的隐患, 特别是对于航空航天等对铸件质量要求非常高的行业, 一定要

将缺陷降低到最少。因此, 对于航空航天等行业中应用的钛合金铸件 必须采用适当的热等静压及热处理退火工艺消除这些问题, 确保铸件的使用质量^[13-15]。为此, 本文作者主要研究热等静压及热处理退火工艺对 ZTi600 高温铸造钛合金组织与性能的影响。

1 实验

铸件试样采用 10 kg 真空白耗凝壳炉熔炼。试验所用原材料为海绵钛和中间合金, 将其按一定比例混合压制成锭, 在真空白耗炉中熔合成 1 次铸锭, 然后,

将 1 次铸锭重熔得到 2 次锭以提高金属间的互溶性，使合金成分更加均匀。将成分合格的 2 次锭进行锻造加工，经车削、打磨等处理后，组焊成自耗电极备用。热等静压制度如下：温度为 900~950℃，氩气压力为 100~110 MPa，时间为 2~4 h。退火热处理制度如下：于 970~1 020℃保温 2 h，于 650℃保温 8 h，空冷。

2 结果与分析

2.1 ZTi600 化学成分

ZTi600 高温铸造钛合金的成分是在较成熟的变形钛合金 Ti600 基础上发展而来的。600℃钛合金的合金元素主要有 Al、Sn、Zr、Mo、Si 以及少量稀土元素 Y。

合金中添加少量硅可以明显提高合金的强度与耐热性。但硅的加入量不宜过大，一般不大于 0.3%，否则有可能析出 Ti3Si5 质点，致使合金脆化。因此，ZTi600 高温铸造钛合金的最大 Si 含量规定为 0.13%。采用稀土元素钇合金化高碳铸造钛合金的显微组织，具有细小圆形 TiC 析出相均匀分布的特点，可以大幅度提高铸造合金的综合性能。

为提高合金延性，将合金成分中的强化元素 Al 减小，以减小晶格畸变，削弱固溶强化效果，同时，结合常用铸造钛合金牌号国家标准中对杂质元素含量的规定，对合金的杂质含量进行限定。

2.2 ZTi600 合金的室温拉伸性能

ZTi600 高温拉伸性能如表 1 所示。由表 1 可以看出：未进行热处理的 ZTi600 合金强度为 850 MPa，室温塑性很差，呈脆断。经(970℃，2 h)+(650℃，8 h)固熔时效处理后，室温拉伸性能强度提高达 1 010 MPa，伸长率为 2.5%。经高温固熔时效处理后(1 020℃，2 h，AC)+(650℃，8 h)，强度升高到 1 060 MPa，塑性基本不变，为 2.5%。因此，固熔时效处理可提高 ZTi600 合金的抗拉强度和塑性。

表 1 ZTi600 的室温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of ZTi600 alloy at room temperature

Heat treatment	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
Casting state	850	—	—	—
(970℃, 2 h, AC)+(650℃, 8 h, AC)	1 010	935	2.5	7.5
(1 020℃, 2 h, AC)+(650℃, 8 h, AC)	1 060	975	2.5	6.0

2.3 ZTi600 合金的高温拉伸性能

表 2 所示为 ZTi600 合金经热处理后于 600℃的高温拉伸性能。由表 2 可以看出：经(970℃，2 h，AC)+(650℃，8 h)固溶时效处理后，强度为 625 MPa，伸长率为 1.0%。经高温处理后时效((1 020℃，2 h，AC)+(650℃，8 h))，强度升高到 700 MPa，塑性提高为 4.0%。ZTi600 合金经热处理后其高温拉伸强度可以满足使用要求，但塑性较差，不能满足使用要求。

表 2 ZTi600 的高温拉伸性能

Table 2 Tensile properties of ZTi600 alloy at elevated temperature

Heat treatment	Test temperature/℃	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
(970℃, 2 h, AC)+(650℃, 8 h, AC)	600	625	520	1.0	6.5
(1 020℃, 2 h, AC)+(650℃, 8 h, AC)	600	700	565	4.0	6.0

2.4 ZTi600 合金的热等静压态的组织 and 性能

重要铸件在浇注成型后，为消除其内部缺陷，需进行热等静压处理。ZTi600 热等静压后的室温拉伸性能见表 3。从表 3 可以看出：ZTi600 合金经过 900℃、103 MPa、2 h 热等静压处理后，合金具有较高的拉伸强度(1 020 MPa)，室温塑性提高到 5%~6%；随着热等静压温度的升高(950℃)，强度基本不变，塑性大大提高，为 11.5%~12.5%，断面收缩率为 18.5%~23.5%。

ZTi600 热等静压后的高温拉伸性能见表 4。从表 4 可以看出：ZTi600 合金经热等静压后的高温拉伸性能(600℃)较好。经过 900℃、103 MPa、2 h 热等静

表 3 ZTi600 热等静压后的室温拉伸性能

Table 3 Tensile properties of ZTi600 alloy after HIP process at room temperature

Heat treatment	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
900℃, 103 MPa, 2 h	1 020	925	5.0	16.0
	1 010	915	6.0	17.0
	1 010	895	12.5	23.5
950℃, 103 MPa, 2 h	1 010	905	11.5	18.5

表 4 ZTi600 热等静压后于 600℃时的高温拉伸性能

Table 4 Tensile properties of ZTi600 alloy at 600℃after HIP process

Heat treatment	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
900℃, 103 MPa, 2 h	645	515	14.5	30.0
	655	520	17.0	30.0
950℃, 103 MPa, 2 h	605	485	14.0	26.5
	610	500	15.0	25.0

压处理后, 合金具有较高的高温拉伸强度(645~655 MPa), 室温塑性为 14.5%~17.0%。随着热等静压温度的升高(950), 强度降低约 45 MPa, 塑性基本不变。

2.5 ZTi600 合金的组织及断口

图 1 所示为热等静压前、后组织对比结果。其中：图 1(a)和(b)所示为热等静压前显微组织, 图 1(c)和(d)

所示为热等静压后显微组织。从图 1 可以看出：热等静压后晶粒尺寸减小, 局部组织有等轴趋势。

一般来说, 合金的拉伸断口韧窝深度大, 塑性变形能力强, 反之, 韧窝深度小, 塑性变形能力弱。ZTi600 合金拉伸断口 SEM 像见图 3。由图 2(a)可以看出：ZTi600 合金未经热处理的室温拉伸断口是沿晶界的脆断, 这与拉伸性能没有数值的现象相符合。经过

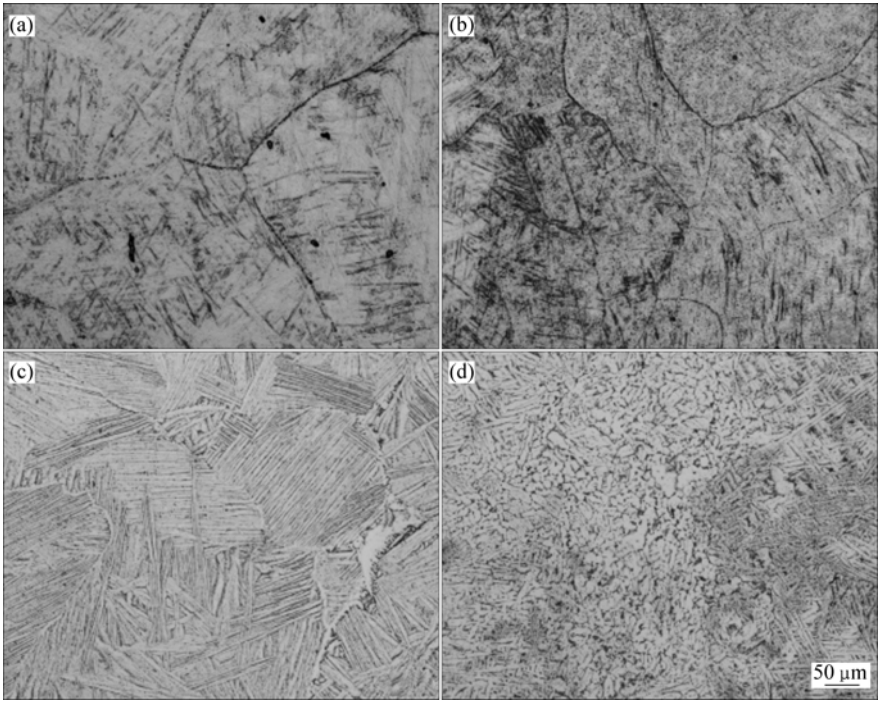


图 1 ZTi600 合金在热等静压前、后的组织

Fig.1 Microstructures of ZTi600 alloys before and after HIP process: (a) As-cast (outside); (b) As-cast (center); (c) 950 °C, 103 MPa, 2 h (outside); (d) 950 °C, 103 MPa, 2 h (center)

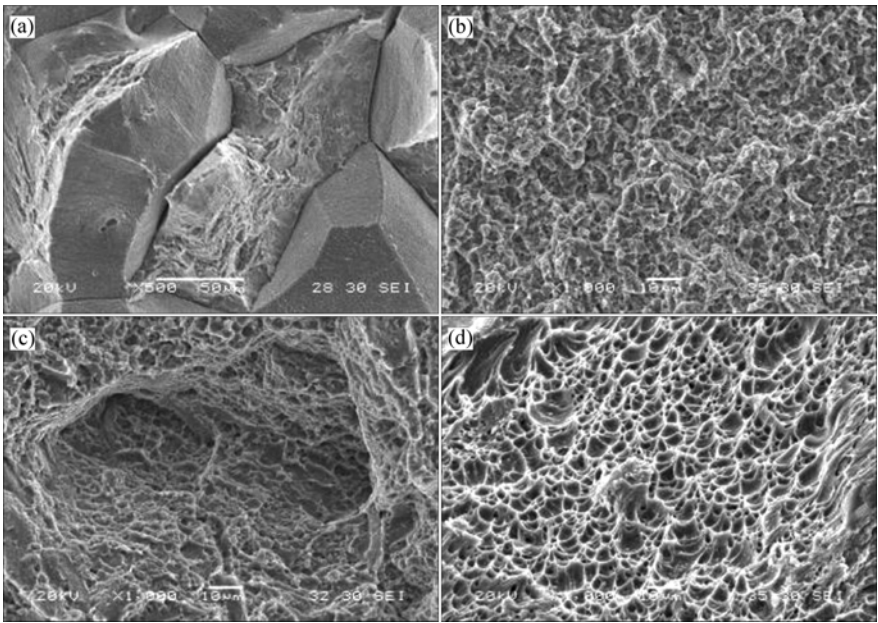


图 2 ZTi600 合金拉伸断口 SEM 像

Fig.2 SEM images of fractographs of ZTi600 alloys: (a) At room temperature (as-cast); (b) At room temperature (900 °C, 103 MPa, 2 h); (c) At room temperature (950 °C, 103 MPa, 2 h); (d) At 600 °C (900 °C, 103 MPa, 2 h)

900 °C, 103 MPa, 2 h 热等静压处理后的室温拉伸断口呈韧性断裂(见图 2(b)), 随着处理温度的升高, 断口韧窝增多、加深, 表明塑性提高(见图 2(c)), 这也解释了处理温度升高而塑性提高的原因。ZTi600 合金高温拉伸断口韧窝大小均匀, 纤维组织比较明显, 合金具有比较好的塑性(如图 2(d))。

3 结论

1) 退火温度对 ZTi600 高温铸造钛合金屈服强度和抗拉强度以及塑性的影响不大, ZTi600 高温铸造钛合金经过热等静压处理后, 室温拉伸塑性大大提高。当热等静压温度为 900 °C 时, 伸长率提高 1 倍; 热等静压温度为 950 °C 时, 伸长率提高 2 倍, 强度基本不变。

2) ZTi600 高温铸造钛合金组织以针状、板条状的魏氏组织为主, 热等静压后晶粒尺寸减小, 局部组织有等轴趋势。

REFERENCES

- [1] 南海, 谢成木. 国外铸造钛合金及其铸件的应用与发展[J]. 中国铸造装备与技术, 2003(6): 1-3.
NAN Hai, XIE Cheng-mu. The application & development of cast titanium alloys and their castings abroad[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2003(6): 1-3.
- [2] 闫平, 王利, 赵军, 汪志华, 张春辉, 游涛. 高强度铸造钛合金的应用及发展[J]. 铸造, 2007, 56(5): 451.
YAN Ping, WANG Li, ZHAO Jun, WANG Zhi-hua, ZHANG Chun-hui, YOU Tao. Development and applications of the high-strength cast titanium alloy[J]. Foundry, 2007, 56(5): 451.
- [3] FLOWER H M. Ti95 science and technology[C]//Proceedings of the Eighth World Conference on Titanium. Birmingham, UK, 1995: 2462-2469.
- [4] 张满, 南海, 黄东, 曹国平. 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.
ZHANG Man, NAN Hai, HUANG Dong, CAO Guo-ping. Study of heat isostatic pressing and thermohydrogen treatment of titanium alloy castings[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2002(5): 1-3.
- [5] CUI W F, LIU C M, ZHOU L. Characteristics of microstructures and second-phase particles in Y-bearing Ti-1100 alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2002, 323: 192-197.
- [6] 洪权, 张振祺, 杨冠军. Ti600 合金的热机械加工工艺与组织性能[J]. 金属学报, 2002(增刊): 135.
HONG Quan, ZHANG Zhen-qi, YANG Guan-jun. Influences of thermo-mechanical processing and treatment on microstructure and mechanical properties of Ti600 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002(S): 135.
- [7] 张振祺, 罗国珍, 洪权, 杨冠军. Ti600 合金的性能与显微组织的研究[J]. 航空材料学报, 1999, 19(4): 6.
ZHANG Zhen-qi, LUO Guo-zhen, HONG Quan, YANG Guan-jun. Microstructures observation and mechanical properties test of near alpha titanium alloy Ti600[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1999, 19(4): 6.
- [8] 陈红, 刘宏宇, 苏贵桥, 曲玉福, 刘时兵, 游涛. ZTA15 铸造钛合金材料的性能与应用[J]. 铸造, 2007, 56(6): 645-647.
CHEN Hong, LIU Hong-yu, SUN Gui-qiao, QU Yu-fu, LIU Shi-bing, YOU Tao. Mechanical properties and application of ZTA15 cast titanium alloy material[J]. Foundry, 2007, 56(6): 645-647.
- [9] 南海, 谢成木, 黄东, 刘茜珂. ZTC4(Ti-6Al-4V)铸造钛合金的退火热处理工艺[J]. 中国铸造装备与技术, 2004(5): 1-3.
NAN Hai, XIE Cheng-mu, HUANG Dong, LIU Qian-ke. The anneal treatment technology of ZTC4(Ti-6Al-4V) cast titanium alloy[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2004(5): 1-3.
- [10] 苏贵桥, 谢华生, 张春辉, 赵军, 王利, 于志强, 刘宏宇. ZTi-3B 铸造钛合金材料的组织和性能[J]. 钛工业进展, 2005, 22(2): 26-29.
SU Gui-qiao, XIE Hua-sheng, ZHANG Chun-hui, ZHAO Jun, WANG Li, YU Zhi-qiang, LIU Hong-yu. Microstructures and mechanical properties of ZTi-3B cast titanium alloy material[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(2): 26-29.
- [11] 舒群, 郭永良, 陈子勇, 孔凡涛, 陈玉勇. 铸造钛合金及其熔炼技术的发展现状[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(3): 332-336.
SHU Qun, GUO Yong-liang, CHEN Zi-yong, KONG Fan-tao, CHEN Yu-yong. Development of casting and melting technology of titanium alloys[J]. Materials Science & Technology, 2004, 12(3): 332-336.
- [12] 彭德林, 王蔚. 钛合金精密铸造陶瓷型芯[J]. 铸造, 2006, 55(10): 1082-1084.
PENG De-lin, WANG Wei. Ceramics core of titanium alloy precision casting[J]. Foundry, 2006, 55(10): 1082-1084.
- [13] 王声宏. 热等静压(HIP)技术在金属材料方面的应用[J]. 粉末冶金工业, 1999, 9(6): 18-24.
WANG Sheng-hong. Application and development of hip technology in the field of metallic materials[J]. Powder Metallurgy Industry, 1999, 9(6): 18-22.
- [14] ELLEBRECHT C. Production of large titanium investment castings[C]//Titanium Science and Technology Munich, 1984: 145-149.
- [15] THORNE J K, et al. Advances in titanium alloy casting technology[C]//Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1988: 20-27.

(编辑 陈灿华)