ZTC4 钛合金大型复杂铸件组织及性能均匀性

郄喜望^{1,2,3},殷亚军⁴,吴国清⁵,南海^{1,3}

(1.中国航发北京航空材料研究院,北京 100095; 2.北京百慕航材高科技股份有限公司,北京 100094; 3.北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心,北京 100095; 4.华中科技大学,武汉 430074; 5.北京航空航天大学,北京 100191)

摘要:目的 以工程应用的大型复杂结构 ZTC4 钛合金铸件为研究对象,研究铸件复杂结构特征对组织、化 学成分、力学性能分布均匀性的影响规律。**方法**用金相显微镜和扫描电镜对组织形貌进行观察。结果 Ti,Al 元素在铸件各位置的分布比较均匀,V元素不均匀性较高。随铸件壁厚尺寸的增大,β晶粒尺寸和α片层间 距成近线性增加的趋势,且β晶粒尺寸增幅较α片层间距大。结论铸件壁厚尺寸增加,宏观硬度和显微硬 度呈近线性下降的趋势。

关键词: 钛合金铸件; 大型复杂结构; 微观组织; 力学性能; 均匀性

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.04.015

中图分类号: TG292 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2017)04-0085-05

Homogeneities of Microstructure and Mechanical Properties of Large Complex Castings of ZTC4 Titanium Alloy

QIE Xi-wang^{1,2,3}, YIN Ya-jun⁴, WU Guo-qing⁵, NAN Hai^{1,3}

(1.Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China;
 3.Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100095, China;
 4.Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

5.Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the influence rules of complex structure characteristics on homogeneities of microstructure, chemical compositions and mechanical properties by taking large complex in ZTC4 titanium casting of large complex structure in engineering applications as a target. Elements Ti and Al were distributed uniformly in each position of the casting. Element V had high inhomogeneity. The β grain size and α lamellar spacing increased linearly with the increase of wall thickness of castings. The increase of β grain size was larger than that of α lamellar spacing. Macro-hardness and micro-hardness decrease with the increase of wall thickness.

KEY WORDS: titanium casting; large and complex structure; microstructure; homogeneity

大型、薄壁、复杂、整体、精密钛合金铸件具 有结构性好、可靠性高、重量轻、加工成本低等优 点,这类整体铸件在航空航天领域具有广阔的应用 前景^[1-3]。由于铸件结构、铸造工艺、凝固顺序等因 素的影响,铸件的截面厚度变化范围较大,不同厚度 处的组织具有较大差异,进而会带来铸件性能的差 异,影响到铸件的综合性能^[4]。这使得大型复杂薄壁 钛合金铸件的使用存在一定的盲目性和安全隐患,限

收稿日期: 2017-05-21

基金项目:工信部民用飞机专项(MJ-2014-G-25)

作者简介: 郑喜望(1982--),男,硕士,工程师,主要研究方向为航空发动机用钛合金大型复杂构件。

制了大型复杂薄壁钛合金铸件的普及应用^[5]。

哈工大贾丽敏等^[6]研究了石墨型离心铸造 ZTC4 钛 合金铸件"工艺参数-凝固组织-力学性能"之间的定量关 系,结果表明,β晶粒尺寸和 α/β 片层间距随铸件模数 的增加或冷却速度的减少,呈增加趋势,抗拉强度随冷 却速度的增加而逐渐增加,而且铸件晶粒尺寸和片层间 距随离心力增大均略降低。其中铸件模数及冷却速度仍 然是影响铸件组织尺寸的主要因素。哈工大王志刚等^[7] 采用宏微观相结合的元胞自动机方法 CA 法,对 Ti₆Al₄V 合金立式离心铸造凝固过程中凝固组织的形成,进行了 数值模拟^[8]。研究表明,钛合金熔体过热度较低时,铸 型预热温度对凝固组织影响较小,随过热度增大,预热 温度对凝固组织的影响愈加明显。

文中以工程应用的大型复杂薄壁钛合金铸件为 对象,研究该铸件复杂结构特征对微观组织、化学成 分、硬度分布均匀性的影响,为铸造评定方法提供理 论和实验基础规范,并为铸件成形精确控制提供理论 支持。

1 实验方案

1.1 材料

采用熔模精密铸造工艺生产了 1[#], 2[#], 3[#]这 3 个 ZTC4 钛合金铸件,分别在 3 个铸件的典型位置处进 行取样,取样位置涵盖了铸件的厚区(A 区,尺寸为 30~40 mm,厚大安装边位置)、关键区(B 区,尺寸 为 15~25 mm,主承力安装节位置)、薄区(C 区,尺 寸为 3~5 mm,薄壁曲面位置)、薄厚转接区(D 区, 尺寸为 10~30 mm,薄壁曲面与厚大安装边相连区域) 的表层、中心层和截面,取样位置见图 1。

1.2 方法

采用 EVOMA10 型扫描电子显微镜附带的牛津 EDS 对铸件不同部位化学成分进行面扫描。采用 XioObserverA1m 金相显微镜和 Image-ProPlus 程序软 件对不同部位进行金相观察与微观组织尺寸测量。采 用 HBRV-187.5 型布络维硬度计、HV-1000 维氏硬度 计检测试样的微观硬度(HV)和宏观硬度(HRC)。



图 1 铸件切剖和分析位置 Fig.1 Schematic illustration showing locations in the castings for dissection and analysis

2 结果与讨论

2.1 化学成分不均匀性

1[#], 2[#], 3[#]铸件各区截面上相同位置主元素的 EDS 成分检测结果见表 1。对 1[#], 2[#], 3[#]这 3 个铸件进行比 较,得到 Al 元素的质量分数波动范围分别为±0.51%, ±0.325%,±0.115%; V 元素的质量分数波动范围分别 为±0.61%,±0.84%,±0.84%。3 个铸件的化学成分均匀 性评估结果见图 2,结果显示,同一铸件中 Ti, Al 元 素在各位置的分布比较均匀, V 元素不均匀性高于 Al 元素,在关键区、薄厚转接区明显较高。

利用熔模精密铸造技术浇铸钛合金复杂结构铸件时,铸件在冷却凝固过程中,熔体内不同组元密度引起的重力作用及凝固时固相的收缩、移动,均会引起铸件宏观偏析^[9]。一般铸件结晶偏析程度用分布系数 k 大小来衡量。在熔炼过程中,k 值除与元素本身扩散系数有关外,也取决于工艺条件的变化,因此制定合理的工艺参数以扩大温度梯度,提高凝固速度, 是提高 k 值控制宏观偏析的主要措施之一^[10—11]。

$$C = KC_0 \left(1 - \zeta\right)^{k-1}$$

式中: *C* 为结晶时每瞬间溶质组元浓度; *C*₀ 为溶 质组元原始配比浓度; *č* 为已结晶部分体积百分比; *K* 为溶质组元分布系数; *k* 为熔质组元分布系数。

					-			-		-		
铸件	A区			B区			C区			$D \boxtimes$		
	Al	V	Ti	Al	V	Ti	Al	V	Ti	Al	V	Ti
1#	5.48	3.07	91.45	6.50	2.86	90.65	6.42	3.76	89.83	6.10	4.08	89.82
2#	6.05	3.12	90.83	10.41	4.40	89.47	5.90	3.69	90.41	6.55	4.80	88.65
3#	6.02	3.45	90.36	_	-	-	5.97	4.02	90.00	6.11	3.55	90.34

表 1 铸件不同区域的元素的质量分数 Tab.1 Chemical compositions in different positions of castings



图 2 铸件的化学成分均匀性评估结果 Fig.2 Valuation results of chemical composition homogeneity of castings

2.2 组织不均匀性

1[#]铸件各区的典型显微组织形貌见图 3。可以看 出,铸造钛合金 β 晶粒为等轴晶,随铸件等轴晶在 铸件位置上的不同,其晶粒尺寸大小不等,利用 Image-ProPlus 程序软件对 β 晶粒尺寸和 α 片层厚度 进行测量,均匀性评估结果见图 4。从整体测量结果 来看,1[#]铸件的 B 区平均 β 晶粒尺寸最大,C 区最 小,而 2[#], 3[#]铸件的 A 区平均 β 晶粒尺寸最大,C 区 最小。1[#], 2[#], 3[#]铸件的平均 β 晶粒尺寸最大相差分别 为 167%, 138%和 148%,铸件壁厚对 α 片层厚度的 影响较小,平均 α 片层间距最大相差分别为 13%, 28%和 22%。

钛合金 β 晶粒是在铸件冷却凝固过程中形核、长 大形成的,由于钛合金冷却凝固过程中非自生晶核很 少,且凝固过程放出大量结晶潜热,钛合金熔体和固 体导热性差,导致晶粒长大时间延长,因此铸件倾向 于生成尺寸不均匀的粗大 β 晶粒组织。钛合金 β 相向 a 相的转变过程也是新相形成与长大过程,同样受到 固态相变潜热和铸件导热性的影响^[12-13],因此 β 晶粒 尺寸和 a 片层间距均受铸件冷却速率的影响较大^[2]。

3个铸件不同位置的微观组织定量分析结果见图 4,通过对比分析可以看出,铸件不同位置的β晶粒 尺寸、α片层间距不均匀,其中β晶粒尺寸不均匀性 更高,这与取样位置密切相关。铸件不同位置的



c 1[#]-C ⊠

d 1[#]-D ⊠

图 3 试样截面的显微组织 Fig.3 Microstructure of cross sections in region





冷却速率不同,而铸件的冷却速率与铸件壁厚相关, 文中对铸件壁厚与 β 晶粒尺寸和 α 片层间距的测量数 据采用 Origin 软件进行拟合回归处理,铸件组织随壁 厚的变化关系见图 5,得到 ZTC4 钛合金 β 晶粒尺寸 d_{β} 、 α 片层间距 d_{α} 与铸件壁厚 b 实验数据的拟合函数 关系分别见式^[14](1)和式(2)。

$d_{\beta=}1114.9536+21.7142b$	(1)
$d_{a} = 2.66141 + 0.00671b$	(2)
可见,铸件 β 晶粒尺寸和 α 片层间]距均与壁厚尺



图 5 铸件组织随壁厚的变化关系 Fig.5 Relationship of microstructure and wall thicknesses of castings

寸近似成线性关系。β 晶粒尺寸的回归系数 21.7142 远 高于与α片层间距的回归系数 0.006 71,即β 晶粒尺寸 受铸件壁厚的影响更大。主要是因为β 晶粒形成于钛合 金熔体结晶过程,α片层形成于固态相变过程。与液态 结晶相比,α片层形核长大温度低,原子扩散能力远小 于液态,且α片层形核位置多在晶界、空位、位错等缺 陷处,受过冷温度的影响相对较小^[12,15],所以α片层间 距相比β 晶粒尺寸受铸件壁厚尺寸的影响小。

2.3 硬度不均匀性

1[#]铸件的宏观硬度范围为 29.0HRC ~ 57HRC,显 微硬度范围为 260.2HV ~ 331.6HV, 2[#]铸件的宏观硬 度范围为 22.0HRC ~ 39.3HRC,显微硬度范围为 253.2HV ~ 311.8HV,3[#]铸件的宏观硬度范围为





图 7 铸件的硬度均匀性评估结果 Fig.7 Valuation results of hardness homogeneity of castings

宏观硬度和显微硬度与铸件壁厚测量数据的拟 合回归曲线见图 8,得到 ZTC4 钛合金洛氏硬度 HRC、



图 8 铸件硬度随其壁厚的变化规律 Fig.8 Relationships of hardness and wall thicknesses of castings

显微硬度 HV 与铸件厚度 b 实验数据的拟合函数关系,洛氏硬度与铸件壁厚的关系见式(3),显微硬度与铸件壁厚的关系见式(4)。

$$\begin{array}{l} H_{\rm HRC} = 35.42607 - 0.17538b & (3) \\ H_{\rm HV} = 298.94315 - 0.6572b & (4) \end{array}$$

可以看出,随铸件壁厚的增加,宏观硬度和显微 硬度呈近线性下降的趋势。铸件壁厚与宏观硬度的回 归系数 0.175 38 低于与显微硬度的回归系数 0.6572, 即显微硬度受铸件壁厚尺寸的影响更大。

3 结论

1) ZTC 钛合金铸件中 Ti, Al 元素在各位置的分布 比较均匀, 与铸件取样位置关系不大, V 元素分布均 匀性较差, 在关键区、薄厚转接区含量明显较高。这 与母合金锭成分均匀性、母合金锭熔化过程及铸件凝 固过程有关。

2)随着铸件壁厚尺寸增加,β晶粒尺寸和α片层间距呈近线性增大的趋势。α片层间距受铸件壁厚的影响相对较小,主要是因为α片层形成于固态相变过程,形核、长大温度低,原子扩散能力小,受铸件不同位置冷却速率影响较小。

3)铸件不同部位的硬度值范围波动较大,这与 组织尺寸及晶体取向不均匀性有关。各铸件的洛氏硬 度均高于维氏硬度,其原因是洛氏硬度的压痕深度和 投影面积均较大,受α集束界面强化作用影响更大。

参考文献:

 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
 ZHOU Yan-bang. An Introduction to Titanium Alloy

Casting[M] Beijing: Aviation Industry Press, 2000.

- [2] 李壮,康少酺,于欢欢,等. TC4 钛合金冷却过程中组织 变化分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2014(5): 44—49.
 LI Zhuang, KANG Shao-pu, YU Huan-huan, et al. The Microstructural Evolution of TC4 Alloy during Cooling from the Solution Temperature[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2014(5): 44—49.
- [3] 赵永庆, 葛鹏. 我国自主研发钛合金现状与进展[J]. 航空材料学报, 2014(4): 51—61.
 ZHAO Yong-qing, GE Peng. Current Situation and Development of New Titanium Alloys Invented in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014(4): 51—61.
- [4] 修清磊. 砂型铸造钛合金薄壁铸件凝固与变形数值模 拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012. XIU Qing-lei. Study on Numerical Simulation of Solidification and Deformation of Titanium Alloy Thin-walled Castings during Sand Casting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [5] 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. NAN Hai, XIE Cheng-mu, WEI Hua-sheng, et al. The Study of Large Thin-wall Complex Integrated Titanium

Precision Casting[J]. China Foundry Equipment & Technology, 2001(2): 12-14.

- [6] 贾丽敏. 钛合金离心精密铸造凝固组织与力学性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
 JIA Li-min. Experimental Analyses on Solidified Structures and Mechanical Properties of Centrifugal Precision
 - tures and Mechanical Properties of Centrifugal Precision Titanium Castings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [7] 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.
 WANG Zhi-gang. Numerical Simulation of Solidification Structure of Ti Alloy During Vertical Centrifugal Casting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [8] 凌云,王红红,周建新,等. 钛合金离心铸造数值模拟 技术及应用[J]. 铸造设备与工艺, 2015(1): 31—34. LING Yun, WANG Hong-hong, ZHOU Jian-xin, et al. Simulation Technology and Application on the Process of Complex Titanium by Casting[J]. Foundry Equipment and Technology, 2015(1): 31—34.
- [9] 石德珂. 材料科学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.SHI De-ke. Materials Science Foundation[M]. Beijing:
- Mechanical Industry Press, 2003. [10] 陈战乾,高颀,刘新,等. Ti-1023 合金铸锭铁偏析控制 [J]. 金属学报, 2002, 38(Z1): 320—321. CHEN Zhan-qian, GAO Qi, LIU Xin, et al. Control of Iron Segregation in Ti-1023 Titanium Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(Z1): 320—321.
- [11] 柳玉起, 吴树森. 材料成形原理[M]. 北京: 机械工业 出版社, 2008.
 LIU Yu-qi, WU Shu-sen. Material Foring Theory[M].
 Beijing: Mechanical Industry Press, 2008.
- [12] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
 XIE Cheng-mu. Titanium and Titanium Alloy Casting[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005.
- [13] 孙曙宇, 吕维洁. TC18 钛合金在热变形过程中的组织 不均匀现象[J]. 稀有金属材料与工程, 2016(6): 1545— 1548.
 SUN Shu-yu, LYU Wei-jie. Microstructure Heterogeneity of TC18 Ti Alloy during Hot Deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016(6): 1545—1548.
- [14] 赵嘉琪,杨伟光,南海,等. 热等静压工艺参数对 ZTC4 钛合金力学性能的影响[J].材料工程,2011(10): 42—46.
 ZHAO Jia-qi, YANG Wei-guang, NAN Hai, et al. Effects of Hot Isostatic Pressing Treatment Parameters on Mechanical Properties of ZTC4 Casting Titanium Alloy[J]. Material Engineering, 2011(10): 42—46.
- [15] 徐洲. 金属固态相变原理[M]. 科学出版社, 2004.
 XU Zhou. Metal Solid Phase Transformation Principle[M]. Science Press, 2004.
- [16] 蒋玉平,杨锦,袁本福,等. 锻造和热处理对 TC2 钛合 金硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(14): 166—169.
 JIANG Yu-ping, YANG Jin, YUAN Ben-fu, et al. Influences of Forging and Heat Treatment on Hardness of TC2 Alloy[J]. Material & Heat Treatment, 2011, 40(14): 166—169.
- [17] Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness[J]. 2007.