

ZTC4 钛合金铸件表层与内部组织的相关性研究

张美娟^{1,2,3} 鄢喜望^{1,2,3} 吴国清⁴ 南海^{1,2} 仇宇⁵

(1.中国航发北京航空材料研究院; 2.北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心;
3.北京百慕航材高科技有限公司; 4.北京航空航天大学; 5.航空工业信息中心)

摘要 采用组织定量分析技术,对某大型钛合金铸件产品各区域的组织进行定量评估,对比分析了铸件表层组织和内部组织的相关性,探讨了铸件本体组织评估中试样选取及观察原则。结果表明,铸件本体表层、中心层和截面获得的晶粒尺寸均值、晶粒尺寸分布半高宽均随铸件厚度增加呈线性增大的趋势,表层及中心层的晶粒尺寸分布相似并呈正态分布的特点,截面组织分布呈偏态分布的特点。结合钛合金铸件特点,在大型复杂精密钛合金铸件本体组织评估中,建议统一采用表层组织来评估铸件组织的均匀性。

关键词 钛合金;铸件;组织;统计;晶粒度

中图分类号 V221+.3;TB553;TG146.23

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Correlation between Surface and Internal Structures of ZTC4 Titanium Alloy Castings

Zhang Meijuan^{1,2,3}, Qie Xiwang^{1,2,3}, Wu Guoqing⁴, Nan Hai^{1,2}, Zhang Yu⁵

(1.Beijing Institute of Aeronautical Materials; 2.Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology; 3.Baimtec Material Co., Ltd.;
4.Beihang University; 5.Aviation Industry Information Center)

Abstract: Quantitative assessment techniques were employed to quantitatively evaluate the regional microstructure of some large titanium alloy castings, and the correlation between the surface and internal structures of castings was analyzed comparatively. The principle of sample selection and observation in the evaluation of the casting ontology was discussed. The results indicate that the average grain size and half-width of the grain size distribution obtained from the surface, central layer and cross section of the casting ontology are increased linearly with the thickness of the castings. The grain size of the surface and center layer are characterized by a normal distribution, while that of cross section is characterized by a skewed distribution. Combined with the characteristics of titanium alloy castings, it is recommended that the surface structure can be adopted to evaluate the uniformity of the casting structure in the evaluation of the casting ontology of large-scale complex precision titanium alloy.

Key Words: Titanium Alloy, Castings, Microstructure, Statistics, Grain Size

随着我国大型飞机的研制和适航认证体系的完善,对大型复杂精密钛合金铸件等飞机关键结构件的品质评估和监控成为亟待解决的关键问题之一^[1~4]。对大型钛合金铸造产品而言,在凝固生长过程中,受铸件壁厚、凝固顺序等因素的影响,铸件表层组织、中心层组织、截面组织均不一致^[5~7]。目前通过金相法获得的铸件微观组织为二维图像,无法反映铸件实际晶粒的三维形貌特征,剖切方式的不同也会导致较大差异。对于铸件本体如何剖取组织试样,如何选择观察面,还没有统一的标准或规范。实际工作中,选择哪个面进行铸件的

解剖分析,充满了不确定性。同时,铸件表层组织、中心层组织、截面组织之间的关系如何,还缺乏相关研究。对钛合金铸件而言,酸洗后的外观组织清晰可见,可通过手持显微镜获得较为清晰的晶粒尺寸信息。建立铸件表层-中心层-截面晶粒尺寸间的相关性,不仅可以实现利用表层组织预测铸件内部的组织分布特征,还为开展铸件组织的无损评估提供了可能^[8~11]。

本课题采用组织定量分析技术,对大型钛合金铸件上各区域表层-中心层-截面组织分别进行定量评估,通过对比分析研究了铸件表层组织和内部组织的相关性。

收稿日期:2021-01-29
基金项目:科工局材料专项资助项目(JPPT-KF2008-6-1)
第一作者简介:张美娟,女,1982年出生,研究员,北京(100095),E-mail:zhangmj121@126.com
通信作者:吴国清,男,1974年出生,副教授,北京(100191),E-mail:guoqingwu@buaa.edu.cn
引用格式:张美娟,鄢喜望,吴国清,等. ZTC4 钛合金铸件表层与内部组织的相关性研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):814-816.
ZHANG M J, QIE X W, WU G Q, et al. Correlation between surface and internal structures of ZTC4 titanium alloy castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):814-816.

1 试验材料

以某 ZTC4 钛合金机匣为对象,机匣采用熔模精密铸造方法制备,型壳为氧化物陶瓷型壳(面层为氧化钇涂料浆),重力浇注。机匣各部位壁厚为 4~40 mm,具有板筋交接、内外环等复杂结构,在典型区域 A~F 取样并进行试验分析,见图 1。

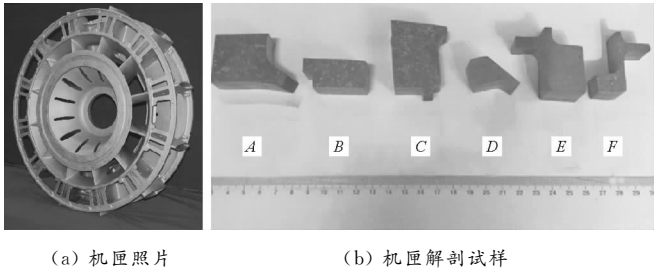


图 1 ZTC4 钛合金机匣铸件

Fig.1 ZTC4 titanium alloy case castings

铸件的化学成分见表 1,符合《GB/T15073-1994》^[12]的要求。

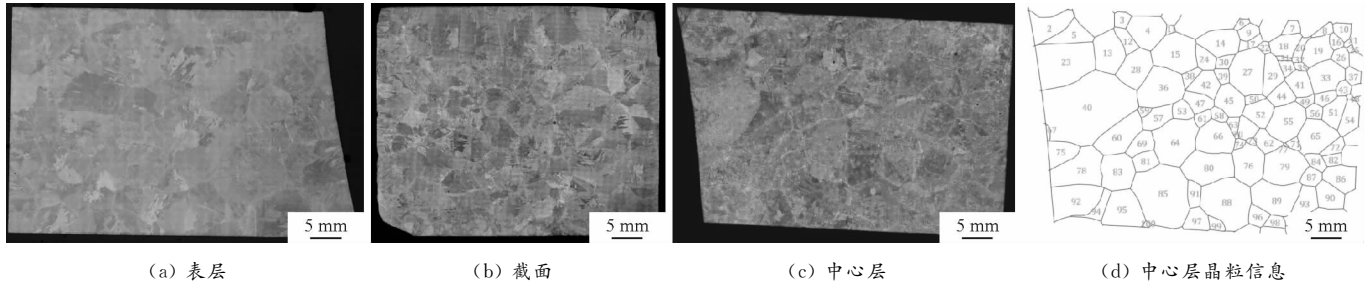


图 2 铸件表层、中心层、截面金相组织和晶粒信息照片(A 区)

Fig.2 Metallographic structure and grain information graphs of the surface/central layer/cross section

中心层晶粒略小,截面晶粒分布较表层、中心层更不均匀,这与钛合金铸件凝固速度较快有关。

图 3 为铸件各区域表层、截面、中心层和铸件整体晶粒尺寸分布曲线,各区域的表层-中心层-截面晶粒尺寸分布具体指标见表 2。可以看出,截面组织晶粒尺寸的分布范围为 8~7 502 μm ,平均晶粒尺寸约为 742

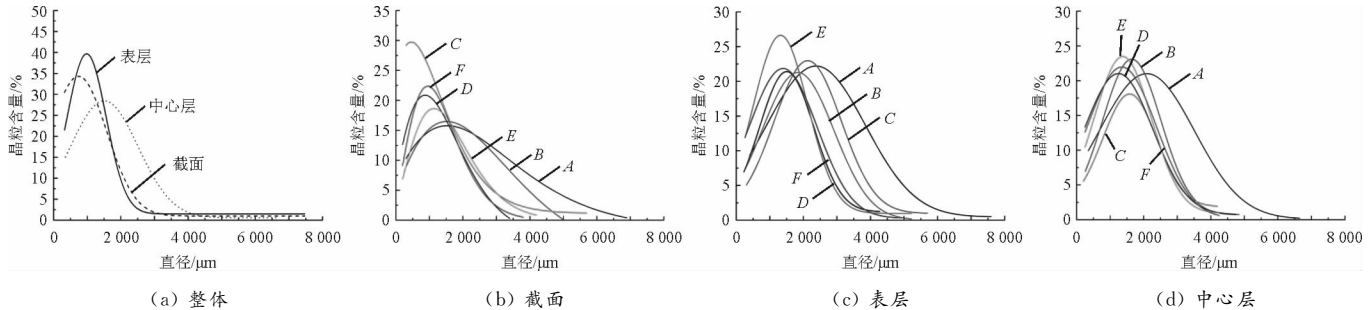


图 3 铸件各区域及整体晶粒尺寸均值分布曲线

Fig.3 Average grain size distribution curves of each region and the entirety

宽。可见,截面组织分布状况受壁厚影响变化较大。
表层组织晶粒尺寸的分布范围为 44~7 660 μm ,平均晶粒尺寸约为 984 μm ,晶粒尺寸半高宽约为 1 157

表 1 ZTC4 铸造钛合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZTC4 titanium alloy %

ω_B									
Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti	
5.5~6.8	3.5~4.5	≤ 0.40	≤ 0.15	≤ 0.10	≤ 0.05	≤ 0.015	≤ 0.25	余量	

参照无损评估拍照区域对铸件相应位置进行解剖取样和金相检测,作为对比,采用体积分数为 1%的 HF+3%的 HNO_3 +96%的 H_2O 组成的腐蚀剂腐蚀。采用 CARL ZEISS 型金相显微镜,按照《GB/T5168-2008》^[12]执行高倍组织检验,获得铸件表层(以下均指外表层)、中心层、截面组织照片,利用钛合金铸件组织晶粒度测定及评估方法^[13]对每个区进行晶粒统计分析,其中每个区统计的晶粒数量不低于 600 个。

2 试验结果与分析

铸件 A 区表层、截面、中心层的典型金相组织照片见图 2,图 2d 为中心层金相组织照片图像处理后的晶粒信息。可以看出,铸件 A 区表层晶粒尺寸较为粗大,

μm ,晶粒尺寸半高宽约为 1 675 μm 。截面的晶粒尺寸呈偏态分布,并表现出较大的半高宽值(图 3b)。随铸件壁厚的增加,截面晶粒尺寸分布的峰值呈增大趋势。当铸件厚度较小时,晶粒间相互竞争,生长受抑制,晶粒尺寸普遍偏小,且分布范围较窄。随着铸件壁厚增加,晶粒生长空间增大,整体晶粒尺寸偏大,且分布范围较

μm ;中心层组织晶粒尺寸的分布范围为 17~6 868 μm ,平均晶粒尺寸约为 1 507 μm ,晶粒尺寸半高宽约为 2 021 μm 。从图 3c 和图 3d 可以看出,铸件表层和中

表 2 铸件表层、截面、中心层晶粒分布情况
Tab.2 Grain distribution of the surface/cross section/central layer

区域	铸件厚度/mm	平均值/ μm			半高宽/ μm		
		表层	中心层	截面	表层	中心层	截面
A	40	2 380	2 087	1 780	2 541	2 726	3 474
B	30	2 176	1 589	1 776	2 328	2 040	2 684
C	18	1 874	1 505	1 352	1 648	1 741	2 210
D	18	1 595	1 354	1 009	1 669	1 988	1 704
E	16	1 375	1 303	1 295	1 538	1 747	1 671
F	13	1 277	1 198	1 090	1 412	1 394	1 443
整体	—	984	1 507	742	1 157	2 021	1 675

心层的晶粒尺寸分布相似,呈正态分布,并随铸件壁厚呈现规律性变化。

图 4 为铸件晶粒尺寸均值和半高宽随铸件厚度的变化。可以看出,铸件表层、截面和中心层的晶粒尺寸均值、晶粒尺寸分布半高宽均随铸件厚度增加而呈线性增大趋势。随着铸件壁厚的逐渐增加,表层、中心层、截面之间的平均晶粒尺寸变化曲线近似平行,而截面组织的半高宽增长曲线与表层、中心层差异随着壁厚增加明显增大。铸件表层、截面和中心层所得的晶粒尺寸均值、晶粒尺寸分布半高宽与铸件厚度的关系可分别采用下式进行拟合:

$$d = M_1 + M_2 h \tag{1}$$

$$\omega = N_1 + N_2 h \tag{2}$$

式中, d 为铸件表层、截面和中心层所得晶粒尺寸均值,mm; h 为铸件厚度,mm; ω 为晶粒尺寸分布半高宽,mm; M_1 、 M_2 、 N_1 、 N_2 为拟合系数,与浇注温度、工艺、材料本身性能等因素有关。通过拟合获得的相关参数见表 3。

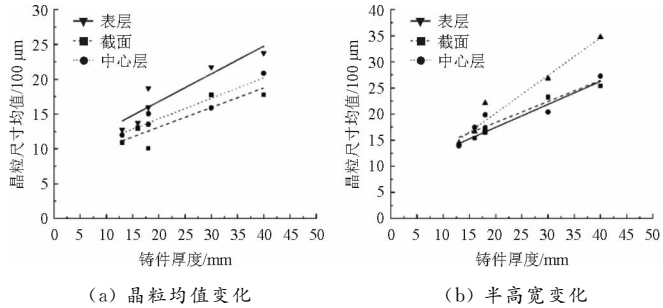


图 4 晶粒尺寸均值和半高宽随铸件厚度的变化
Fig.4 The variation of average grain size and half-width with the thickness of castings

表 3 晶粒尺寸均值和晶粒尺寸半高宽随铸件壁厚变化关系的相关系数
Tab.3 The correlation coefficient between average grain size and half-width with the thickness of castings

系数	M_1	M_2	N_1	N_2
表层晶粒	885	40	865	44
中心层晶粒	845	29	1 031	40
截面晶粒	750	28	570	72

上述结果表明,铸件表层和中心层组织存在较好的

相关性,并呈现正态分布的特点,可以用表层组织评估预测中心层组织的分布状况,而铸件截面组织随壁厚变化波动较大,并呈现偏态分布的特点。在大型复杂精密钛合金铸件本体组织评估中,结合钛合金铸件特点,建议统一采用表层组织来评估铸件组织的均匀性,这也为将来利用铸件表层组织酸洗后清晰可见的特点对铸件进行组织分布状况的无损评估提供了可能^[14]。

3 结 论

- (1)铸件表层、截面和中心层的晶粒尺寸均值、晶粒尺寸分布半高宽均随铸件厚度增加而呈线性增大趋势。
- (2)铸件表层组织和中心层组织存在较好的相关性,并呈现正态分布的特点,可以用表层组织评估预测中心层组织的分布状况,而铸件截面组织随壁厚变化波动较大,并呈现偏态分布的特点。
- (3)在大型复杂精密钛合金铸件本体组织评估中,结合钛合金铸件特点,建议统一采用表层组织来评估铸件组织的均匀性。

参 考 文 献

[1] 张美娟,南海,鞠忠强,等. 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.

[2] PROSSER W H. Development of structural health management technology for aerospace vehicles[C]. NASA LarcJannaf Cs/Aps/Pshs/Mss Joint Subcom Meeting, 2003.

[3] SOHN H, FARRAR C R, HEMEZ F M, et al. A review of structural health monitoring literature: 1996-2001, LA-13976-MS[R]. US: Los Alamos National Laboratory Report, 2003.

[4] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(1): 17-21.

[5] SAHA R L, JACOB K T. Casting of titanium and its alloys[J]. Defence Science Journal, 2014, 36(2): 121-141.

[6] 史成龙,高富辉,闫金. 国内外 Ti-6Al-4V 钛合金铸造技术标准的对比[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(7): 612-615.

[7] CAI C, SONG B, XUE P J, et al.Effect of hot isostatic pressing procedure on performance of Ti-6Al-4V: Surface qualities, micro-structure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 686(1): 55-63.

[8] 刘松平,刘菲菲. 航空工业中的无损检测技术及其进展[J]. 无损检测, 2017, 39(6): 56-60.

[9] 李毅洋. 民航客机维修中红外检测技术的应用及开展[J]. 国防制造技术, 2016, 6(2): 63-74.

[10] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.

[11] GJB 2896A-2007. 钛及钛合金熔模精密铸件规范[S].

[12] GB/T 15073-2014. 铸造钛及钛合金[S].

[13] 吴国清,鄧喜望,文富华,等. ZTC4 钛合金铸件组织晶粒度测定及评估方法研究[J]. 精密成型工程, 2018, 10(3): 110-116.

[14] 赵文正,鄧喜望,吴国清,等. 基于组织统计分析的大型铸件无损评估方法[J]. 航空材料学报, 2018, 38(6): 89-96.

(编辑:彭瑾)