

曲面薄壁钛合金铸件变形工艺控制研究

张光^{1,2,3}

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

摘要: **目的** 研究曲面薄壁钛合金铸件变形规律及发生的阶段, 提出防止变形的工艺措施。**方法** 通过对出气管铸件成形过程进行计算机模拟仿真, 对蜡模、浇注成形后的铸件、热等静压后的铸件进行扫描拟合, 分析了出气管在蜡模压制、铸造成形、热等静压过程中的变形, 提出了控制蜡模变形和铸件热等静压过程变形的工艺措施, 并进行了试验验证。**结果** 出气管蜡模在压制和放置过程中, 远端浇口连接处发生翘曲变形, 变形量约 0.5 mm; 铸件在无约束的热等静压过程中, 发生扭曲变形, 变形量约 0.5 mm, 蜡模变形和热等静压过程变形叠加, 导致铸件变形约 1 mm。**结论** 计算机模拟仿真可以有效缩短铸件研制过程, 获得优质铸件; 增加蜡模胎膜和约束下铸件热等静压, 可以有效控制铸件变形, 获得合格铸件。

关键词: 曲面薄壁; 钛合金铸件; 控制变形

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.03.014

中图分类号: TG245 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)03-0077-05

Control of Thin-Walled Curved Titanium Casting Deformation

ZHANG Guang^{1,2,3}

(1. Beijing Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the deformation law of thin-walled titanium alloy casting and propose processing measures for preventing deformation. Through the computer simulation of the casting process of outlet pipes, the castings and the waxes were scanned and fitted, and the deformation was analyzed in each stage. The technological measures for controlling the deformation of wax mould and casting heat were presented and verified by testing. In the process of pressing and placing, the sprue joint of the remote end deformed, the deformation amount was about 0.5 mm. The casting was distorted in the process of hydrostatic pressure, and the deformation amount was about 0.5 mm. The deformation of wax mould was superimposed with the static pressure deformation of casting heat, resulting in the final deformation of about 1mm. Analog simulation with computers could effectively shorten the process of casting research and obtain castings of high quality. Increasing wax membrane and HIP of constrained castings can effectively control casting deformation and obtain qualified casting.

KEY WORDS: thin-walled curved; titanium casting; deformation control

钛不是稀有金属, 其在地壳中含量最丰富的结构金属中排名第4位, 仅次于铝、铁和镁。钛也是一种“贵”金属, 获得纯钛的难度大, 导致钛合金价格高; 钛合金后续加工成本较高; “贵”一定程度上

阻碍了钛及钛合金的推广和应用, 但是钛及钛合金凭借密度小、比强度高、无毒、无磁、耐腐蚀、生物相容性好等特点, 在航空、航天、医疗及石油化工领域仍得到了广泛的应用, 被誉为是继钢铁、铝

收稿日期: 2018-04-19

作者简介: 张光(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为铸造钛合金工程化应用。

材之后的“第三金属”和“战略金属”^[1-5]。国外大型先进的航空涡轮发动机的重要部件,如RB199的中介机匣、CF6-80C的风扇机匣等,都采用了大型复杂薄壁钛合金整体精铸件^[6-8]。

局限于钛合金制件的加工难度,对于曲面薄壁钛合金制件而言,熔模精度铸造工艺是成形制件的首选,具有其他工艺不具备的工艺优势,近净成形、金属利用率高、成本低等。熔模精密铸造工艺推动了钛合金在复杂曲面结构件中的应用^[9-12]。在钛合金熔模精密铸造过程中,由于钛合金热导率低,熔融态钛合金过热度低,金属液在复杂、薄壁型腔内流动性差,金属液补缩能力差,铸件内部易出现疏松、缩孔缺陷,复杂薄壁钛合金铸件在排缺补焊过程中会出现变形,导致生产成本增加甚至铸件报废。钛合金铸件曲面一般有面轮廓度尺寸要求,要求曲面满足形状尺寸和位置尺寸两方面的要求,且尺寸精度一般为 ± 0.75 mm,实现难度较大。目前,较多采用补焊、精整打磨、校型等工艺修复曲面薄壁钛合金铸件变形,铸件研制周期长、成本高、修复率低,研究一种控制曲面薄壁钛合金铸件变形的工艺,有效控制变形,并得到推广,可以拓展钛合金铸件在曲面薄壁结构件中的应用范围。

文中以国外某型发动机出气管钛合金铸件为研究对象,拟从复杂薄壁件的模具设计、蜡模压制、成形工艺、热处理工艺几个方面开展研究,探究影响曲面薄壁钛合金铸件变形的主要因素,为深一步研究变形规律奠定基础。

1 研究方法

铸件采用熔模精密铸造工艺进行研制,共8种图号,结构类似,包含筒体、安装边、圆管3个结构,高300 mm,长254 mm,宽120 mm,整体壁厚1.875 mm,质量约1.5 kg。安装边壁厚1.875 mm,面轮廓度要求 ± 0.5 mm,且存在加强筋,无法通过校型、焊接工艺修复变形,安装边一旦出现变形,超出面轮廓度控制要求,修复难度大,甚至报废,见图1。铸件沿圆管轴向剖开,测量剖面厚度尺寸,可以看出厚度集中在R转接处及铸件加工面,厚度在6~10 mm之间,是筒体壁厚的3~5倍,铸件各位置收缩差异大,易变形,见图2。由于铸件整体壁厚1.875 mm,金属液充型通道狭窄,厚薄差距大,加上ZTC4钛合金过热度低等因素,金属液充填型腔能力一般,补缩能力差,铸件浇注成形时易出现疏松、缩孔缺陷,修复缺陷易导致铸件变形。文中以其中一件出气管铸件为例,结合计算机模拟仿真成形技术,研究该类铸件防变形工艺方案。

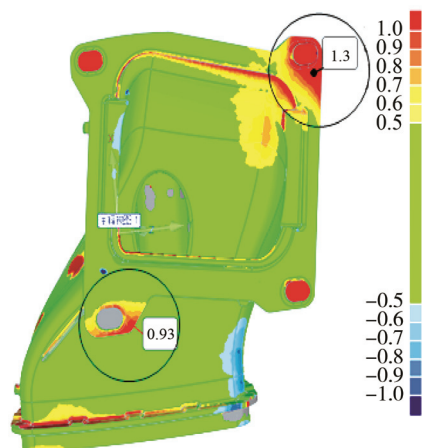


图1 出气管变形位置及变形量
Fig.1 Deformation position and deformation amount of outlet pipe

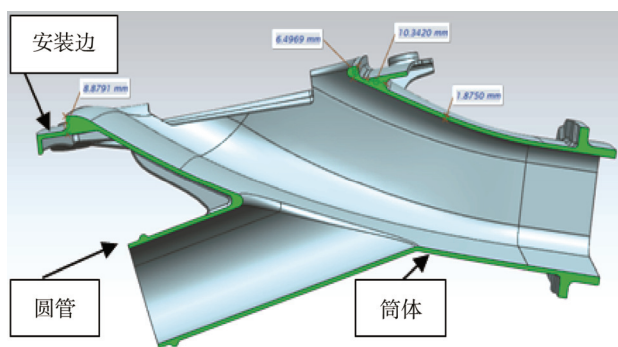


图2 某型发动机出气管铸件剖面
Fig.2 Profile for intake pipe casting of a certain type of engine

1.1 计算机模拟仿真(组模工艺设计)

资料显示^[3-5],所有CAE用户都不会否认目前模拟软件对铸件的凝固过程、热节、温度梯度、冒口补缩状态、液相孤立区以及缩孔缩松的预测已经可以有效指导实际生产。根据铸件薄壁、异形、安装边面轮廓度要求高等结构特点,设计出气管组模工艺。

1.2 模具设计

模具选用锻铝材质进行制作,其实物见图3,根



图3 模具
Fig.3 Mould

据零件结构特点，选用合适的收缩率：整体收缩率 0.5%，酸洗量单边 0.2 mm，个别厚大区域及凸台收缩率按 1%。

1.3 热处理工艺设计

依据客户提供的技术条件，确定热等静压参数，铸造包括温度、压力、保压时间、出炉温度，具体参数见表 1。

表 1 铸件热等静压参数
Tab.1 HIP parameter of casting

温度/℃	压力/MPa	保压时间/h	出炉温度/℃
900	120	2	<250

分析铸件特点及热等静压过程中易变形的区域，确定铸件热等静压过程中的放置方式，以铸件口部端面为放置平面，竖直放置在热等静压工装上，其摆放方式见图 4。

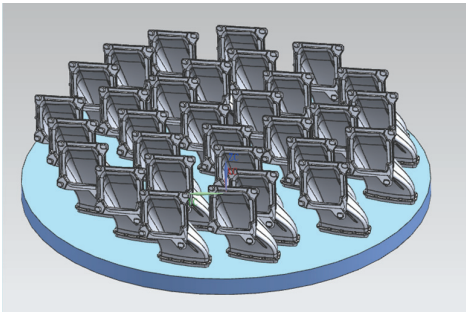


图 4 热等静压摆放方式
Fig.4 Display during HIP

1.4 检测方法

出气管铸件面轮廓度要求 1 mm，且多为曲面形状，在蜡模检测、铸件检测方面，选用关节臂扫描方式，精度 0.02 mm。

为便于对比分析，将出气管 S 面按“米”字型分为 8 个区域，在易变形的 4 个角上选取 2 个点，其余位置选取一个点进行测量，共计 12 个测量点，标识为 S1, S2, ..., S12，见图 5。

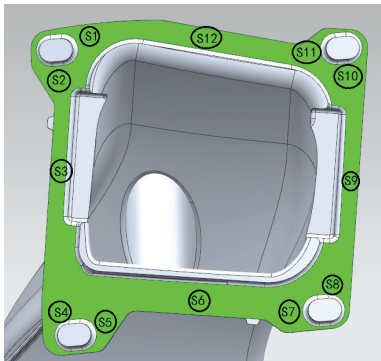


图 5 检测位置
Fig.5 Measure points

2 研究结果

2.1 计算机模拟仿真结果

成形方案一：铸件侧卧式组模，浇口搭接在安装边一侧，引出内浇口与安装边 4 个角搭接，筒体侧壁设置一个浇口；成形方案二：铸件直立组模，在筒体底部端面设置 4 个内浇口，计算机模拟浇注过程见图 6。利用 Visual-Cast 前处理模块对有限元模型进行材料性能、边界条件、初始条件等参数设置^[5]，铸件与铸型的界面传热系数 $h=750\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ，浇注时间 6 s，采用离心浇注，转速 260 r/min，铸件冷却至 200 ℃时停止模拟。

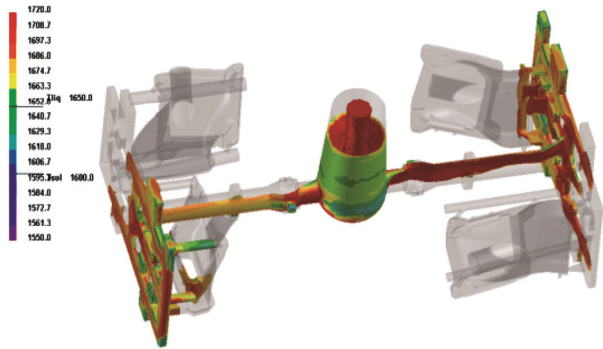


图 6 计算机模拟浇注过程
Fig.6 Computer simulation of casting process

冶金缺陷出现的位置见图 7，可以看出，两种组模方案均存在大小不同、数量不等的缩松、缩孔缺陷，缺陷出现集中在厚大区域，大部分缺陷远离内浇口。圆管的根部和口部出现缩松、缩孔缺陷。侧卧式比直立式缺陷少，且分布更有规律性，更容易在工艺优化中减少或消除缺陷。经过计算机模拟仿真确认，铸件应变主要在圆管根部、浇口等位置，最大变形量约 0.5 mm。铸件等效应变分布见图 8。

2.2 蜡模检测结果

蜡模变形检测结果见图 9，对蜡模进行关节臂扫描检测，标示出 S1~S12 测量点的变形量。由图 9 可以看出，蜡模左上角、右上角（浇口）区域发生

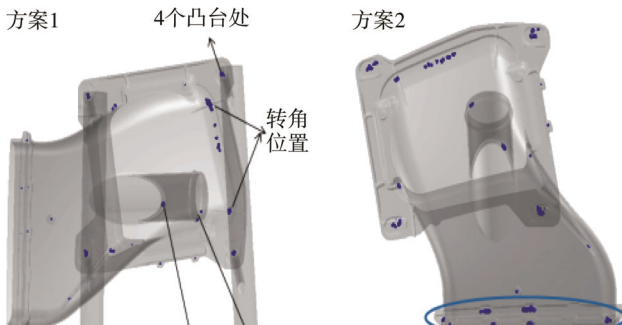


图 7 冶金缺陷出现的位置
Fig.7 Location of metallurgical defects

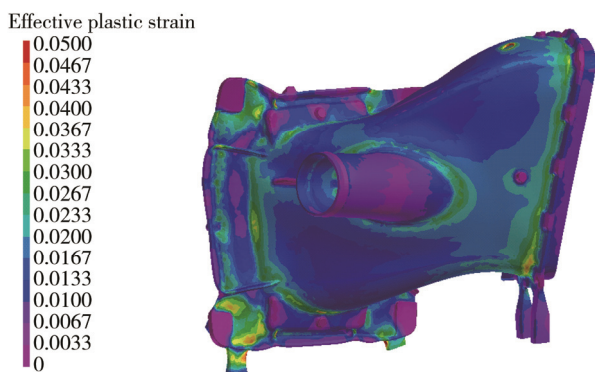


图8 铸件等效应变分布

Fig.8 Effective strain distribution of casting

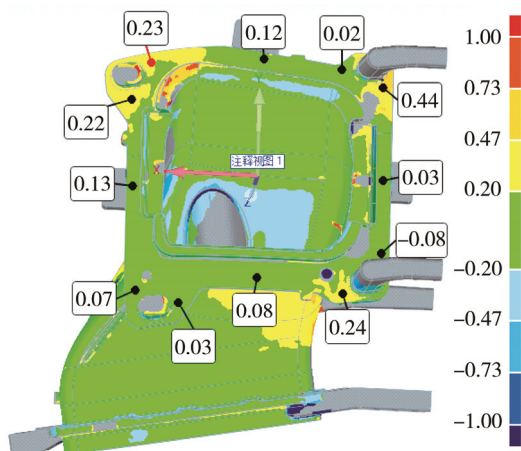


图9 蜡模变形检测结果(mm)

Fig.9 Testing results of wax deformation (mm)

了明显变形, 最大变形量 0.44 mm, 超出了蜡模 ± 0.2 mm 控制要求, 接近铸件 ± 0.50 mm 控制要求。

2.3 铸件浇注后检测结果

铸件浇注浇注成形后 S 面 12 个测量点变形量见图 10。可以看出, 铸件 S 面变形量由 $-0.21 \sim 0.24$ mm, 变形区域位于铸件浇口附近。

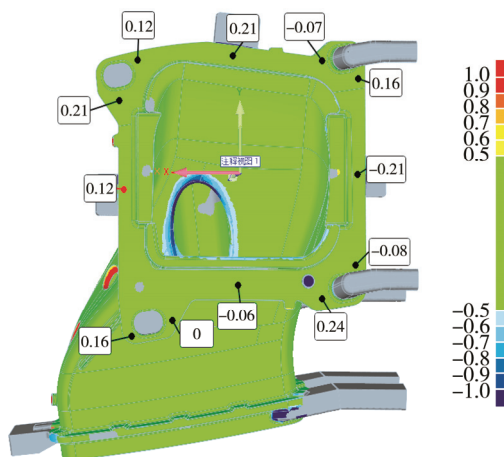


图10 铸件变形检测结果(mm)

Fig.10 Testing results of casting deformation (mm)

2.4 铸件热处理检测结果

铸件热等静压后变形测量结果见图 11, 可以看出, 铸件最大变形量 0.43 mm, 变形位置发生在浇口附近。

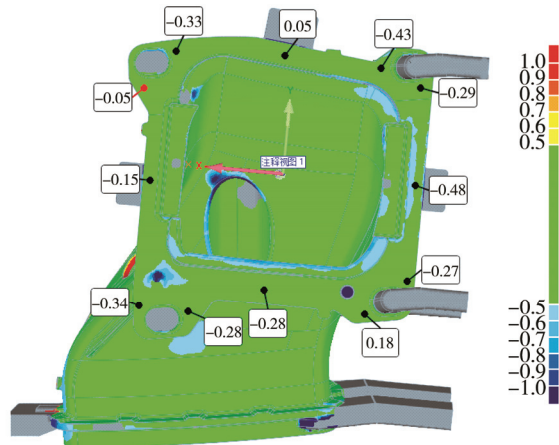


图11 铸件热等静压后变形检测结果(mm)

Fig.11 Testing results of casting deformation after HIP (mm)

3 结论

1) 试验中采用的数模分别是蜡模数模、铸件浇注后数模、铸件热等静压后数模, 其关系为:

蜡模数模 = (铸件浇注后数模) $\times$ 蜡模-铸件收缩率 = (铸件热等静压后数模 + 单边酸洗量) $\times$ 蜡模-铸件收缩率。

2) 出气管铸件蜡模和热等静压是变形的主要阶段, 蜡模变形量约为 0.2~0.4 mm, 热等静压过程变形量约为 0.5 mm。出气管蜡模放置一段时间后, 变形量减少约 0.2 mm, 即蜡模放置阶段变形方向与已有变形方向相反。蜡模组模方向与放置方向一致, 一定程度上减少了涂料过程中的变形。

参考文献:

- [1] 马洪亮. 钛合金离心铸造充型与传热过程耦合模拟软件系统的改进[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
MA Hong-liang. Improvements on the Software System for Simulations of Centrifugal Mold-Filling and Coupled Heat-Transfer Processes of Titanium Castings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [2] 徐达鸣, 李鑫, 安阁英, 等. 钛合金离心精密铸造充型过程计算机模拟[J]. 铸造, 2002, 51(1): 39—43.
XU Da-ming, LI Xin, AN Ge-ying, et al. Computer Simulation for Centrifugal Mold-filling of Precision Titanium Casting[J]. Foundry, 2002, 51(1): 39—43.
- [3] 李建, 张文超. 组合弯曲成型 TC4 板材的有限元力学模型[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1): 403—405.
LI Jian, ZHANG Wen-chao. Finite Element Mechanics

- Models of Combined Bending and Forming TC4 Sheet[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(1): 403—405.
- [4] 叶勇, 王金彦. 钛合金的应用现状及加工技术发展概况[J]. *材料导报*, 2012, 26(2): 360—363.
- YE Yong, WANG Jin-yan. An Overview on Application Status and Processing Technology Development of Titanium Alloy[J]. *Materials Review*, 2012, 26(2): 360—363.
- [5] 庞盛永, 陈立亮, 周建新, 等. 铸造充型过程模拟中复杂固壁法向量计算方法研究[J]. *铸造*, 2010, 59(4): 363—366.
- PANG Sheng-yong, CHEN Li-liang, ZHOU Jian-xin, et al. Normal Calculation of Complex Mould in Casting's Mold Filling Simulation[J]. *Foundry*, 2010, 59(4): 363—366.
- [6] 王新英, 谢成木. ZTC4 钛合金固溶时效热处理工艺研究[J]. *金属学报*, 2002, 38(1): 89—92.
- WANG Xin-ying, XIE Cheng-mu. Study on Solution-Aging Heat Treatment of ZTC4 Titanium Alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2002, 38(1): 89—92.
- [7] 杨锐, 崔玉友, 贾清, 等. 大尺寸薄壁钛合金筒体结构的离心精密铸造[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(3): 56—59.
- YANG Rui, CUI Yu-you, JIA Qing, et al. Centrifugal Casting of Large Thin-Wall Cylindrical Structure of Titanium Alloys[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2013, 43(3): 56—59.
- [8] BARBOSAJ, RIBEIRO S. Influence of Superheating on Casting of Gamma-TiAl[J]. *Intermetallics*, 2007, 15: 945—955.
- [9] SUZUKI K, NISHIKAWA K, WATAKABE S. Mold Filling and Solidification during Centrifugal Precision Casting of Ti-6Al-4V Alloy[J]. *Materials Transactions JIM*, 1996, 37(12): 1793—1801.
- [10] 范兴平, 王军. 钛及钛合金的成型方法及应用[J]. *材料导报*, 2013, 27(2): 349—367.
- FAN Xing-ping, WANG Jun. Processing Methods and Application of Titanium and Its Alloys[J]. *Materials Review*, 2013, 27(2): 349—367.
- [11] 冯芝华, 王红红, 谢成木, 等. 热工艺对 ZTC4(Ti-6Al-4V)钛合金铸件残余应力的影响[J]. *航空材料学报*, 2005, 25(3): 25—27.
- FENG Zhi-hua, WANG Hong-hong, XIE Cheng-mu, et al. Effect of Heat Processing on Titanium Alloy(Ti-6Al-4V) Castings Residual Stress[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2005, 25(3): 25—27.
- [12] 李超. 钛合金铸件应力的测量与数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- LI Chao. Numerical Simulation and Measurement of Stress Field about Ti-6Al-4V Casting[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.