

模拟仿真

某种钛合金精密成形铸件铸造变形的数值模拟

崔新鹏^{1,2}, 孙志雨¹, 李峰¹, 李建崇¹, 南海¹, 周黔^{1,2}

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

摘要: **目的** 基于 ProCAST, 建立钛合金铸件铸造变形的模拟预测方法。**方法** 以某板状钛合金铸件为例, 模拟了充型凝固、型壳内冷却和脱壳后冷却 3 个过程, 并分别对各过程进行了相应假设和参数设置。为验证模拟结果, 根据模拟模型设计了浇注验证实验。**结果** 铸件中间部位向外侧凸起, 加强筋部位向内侧凹陷, 和实验结果基本一致, 变形量预测吻合度在 60%~72% 之间。**结论** 通过合理设置模拟流程和材料参数模型, 数值模拟可以预测钛合金铸件的变形规律, 并为变形量预测提供重要参考。

关键词: 数值模拟; 钛合金; 铸造变形; ProCAST

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.03.027

中图分类号: TG249; O242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)03-0149-05

Numerical Simulation on Deformation of Titanium Investment Casting

CUI Xin-peng^{1,2}, SUN Zhi-yu¹, LI Feng¹, LI Jian-chong¹, NAN Hai¹, ZHOU Qian^{1,2}

(1. AECC Beijing Engineering Research Center of Advanced Precise Forming of Titanium Alloys, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China)

ABSTRACT: The paper aims to build methods for simulation and prediction of casting deformation of Ti-alloy castings based on ProCAST. A plate shaped part was studied. The simulations of pouring, solidification, cooling inside the shell and cooling after removing the shell with the proper hypothesis and parameters were carried out successively. Confirmatory experiment of casting was designed according to the simulation model to verify the simulation result. The middle part of the casting was raised while the parts near the ribs were sunk. A good conformance in deformation trend was found between the simulation and the experiment. The accuracy rate of the deformation quantity was 60%~72%. Reasonable setting of simulation procedures and parametric model of materials could predict deformation rules for titanium alloy castings in numerical simulation and provide important reference for prediction of deformation.

KEY WORDS: numerical simulation; Ti-Alloy; deformation of casting; ProCAST

钛合金由于具有高的比强度和比模量, 良好的高温抗氧化和耐腐蚀性能, 因而在航空航天、化工、海洋工程等领域得到大量使用^[1-3]。随着工业技术的发展与推动, 金属产品制造业向近净成形方向发展。铸造技术一直被认为优于锻造和机加, 用于制造复杂结构部件^[4]。采用精密铸造方法生产的钛合金铸件尺寸精度高、表面质量好、加工余量少, 其应用日益广泛^[5]。

钛合金精密成形铸件通常壁薄、结构复杂且形状不规则, 在铸造过程中易产生欠铸、缩孔、应力变形等冶金缺陷, 缺乏有效控制手段^[6]。随着计算机软硬件的发展, 数值模拟技术应用于铸造领域, 在优化工艺、提升质量等方面发挥了重要作用^[7-8]。K. Suzuki 等使用二维模拟算法预测钛合金离心充填过程^[9], L. Yang 等针对 TiAl 合金的流动成形过程开展了模拟研

收稿日期: 2018-03-26

基金项目: 工信部民用飞机专项 (MJ-2014-G-25)

作者简介: 崔新鹏 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为铸造钛合金及数值模拟。

究^[10], Wu Shi Ping 等利用 CA 模型研究了钛合金晶粒的模拟方法^[11], Adrian 等模拟研究了铝合金的铸造变形和尺寸变化^[12]。可以看到, 对于熔点很高的钛合金, 虽然充型模拟研究较多, 但应力变形模拟则相对不足^[13—14]。文中针对某典型钛合金铸件开展铸造应力变形模拟仿真, 探讨建模方法与参数设置, 评价模拟准确率, 为工程应用提供参考。

1 模型构建与前处理

1.1 铸件模型与网格划分

选取某薄板型钛合金铸件作为典型件进行数值模拟。铸件的结构见图 1, 其轮廓尺寸为 345 mm×233 mm×37 mm, 最大壁厚 7.5 mm, 最小壁厚 2.2 mm。铸件分为左件和右件, 其结构镜像对称。组焊蜡模时将左、右件用 6 根加强筋相连, 下部添加 8 个浇口, 共两组放置在浇道的两侧, 见图 2。利用 ProCAST 对模组三维模型划分四面体网格, 铸件网格边长为 4 mm, 型壳厚度 15 mm, 体网格数量约 200 万。

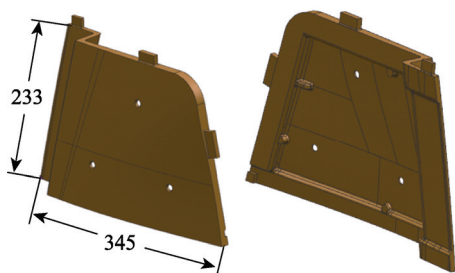


图 1 铸件轮廓
Fig.1 Profile of casting

1.2 前处理设置

为获得准确的变形结果需考虑影响铸造变形的主要环节。铸件应力模拟采用三步法, 依次模拟充型凝固、型壳内冷却和脱壳后冷却过程, 且前一步模拟结果为后一步模拟的初始条件。铸件材料选用 Ti-6Al-4V^[15], 模壳材料参数选用 ProCAST 材料数据库中的 CBSMS-M 砂, 材料参数值见表 1。

表 1 铸件和模壳材料的热物性参数

Tab.1 Thermophysical properties of casting and shell material

材料 牌号	液相线/℃	固相线/℃	比热容/ (kJ·kg ⁻¹ ·K)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K)	液态粘度 (×10 ⁻³)/(Pa·s)	弹性模 量/GPa	屈服强 度/MPa	线膨胀系数 (×10 ⁻⁶)/K ⁻¹
Ti-6Al-4V	1650	1600	0.5~1.1	7.2~34.8	2.3~3.2	0.3~103	8~827	8.6~12.6
CBSMS-M			0.8~1.33	0.6~1.1		17.6		13.3

2 实验设计与实施

为评价及验证模拟结果, 根据模拟模型设计了浇注验证实验。实验模组与模拟采用的三维模型一致,

应用 Visual-Cast 设置模拟参数: 浇注时间为 5 s, 浇注温度 1720 ℃, 型壳预热温度 200 ℃, 金属-铸型界面换热系数 $h=600 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 离心转速 180 r/min, 环境温度为 25 ℃。型壳内冷却时间 100 min, 脱壳后冷却时间 30 min, 计算结束时铸件全部冷却至 100 ℃以下。

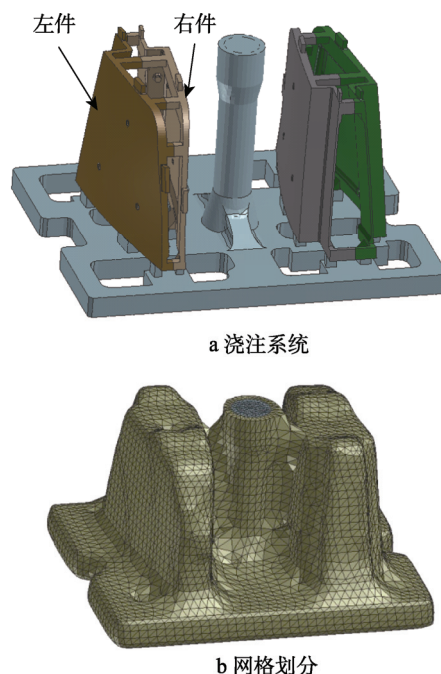


图 2 三维模拟模型
Fig.2 3-D models for simulation

钛合金铸造成形经历 1700 ℃至室温的温度历程, 期间经历液态、高温蠕变、低温弹塑性等多种力学行为状态, 若要在应力变形模拟中考虑全部各状态, 不仅模拟时间将大幅延长, 而且某些参数难以获得反而导致准确率下降。事实上, 在精密铸造中, 钛合金在液态和高温蠕变态的停留时间相对很短, 对最终变形量的影响微小, 可以进行适当简化。文中在应力计算时, 铸件材料在固相率高于 50%时设置为弹塑性, 低于 50%则关闭应力计算。另外陶瓷型壳属于脆性材料, 塑性较差, 可假设其在整个铸造过程中仅发生弹性形变, 因此选用弹性模型。

确保模拟与实验结果具有可比性。实验包含蜡模组焊、型壳制备、浇注、清壳和吹砂等流程, 模壳总厚度约为 15 mm, 脱蜡后的模壳情况见图 3。铸件材料为 Ti-6Al-4V, 采用真空自耗凝壳炉进行离心浇注, 离心转速为 180 r/min, 模壳预热温度设定为 200 ℃。

浇注成形的铸件见图 4。使用 EV4030 型激光影像仪对铸件和蜡模进行尺寸测量, 并与模拟预测的变形结果进行对比分析, 评价模拟结果的准确率。



图 3 陶瓷模壳
Fig.3 Ceramic shell

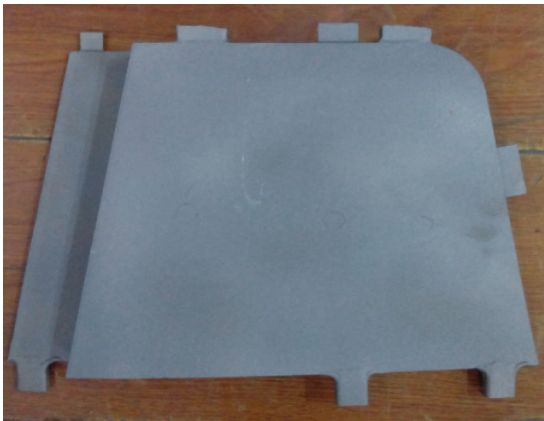


图 4 浇注完成后的铸件
Fig.4 Casting after pouring

3 模拟结果与分析

3.1 铸件充型凝固过程分析

凝固模拟过程中不同时间点的铸件温度场分布见图 5。可知, 浇注开始后 80 s 铸件本体即全部凝固

完毕。铸件在冷却过程中温度分布不均, 中心薄壁部位冷却快、温度较低, 而边缘厚大部位冷却慢、温度较高。此外铸件靠近浇口部位温度较高, 属于铸件的热节区域。冷却速率分布的不均导致铸件受到热应力的影响, 其中中心部位壁厚较薄, 变形抗力较差, 容易发生铸造变形。

3.2 铸件变形分析

选取与铸件大平面垂直的 x 方向, 分析铸件的弯曲变形。模拟结束时铸件 x 方向的位移见图 6, 分析模拟结果可知, 铸件中心平面部位 (图中位置 1) 在热应力的影响下向外侧突起, 而上部厚大加强筋 (位置 2、3) 蓄热能力相对较强, 脱壳后会继续冷却收缩导致附近面凹陷, 另外左件的变形量大于右件, 原因是右件与直浇道间夹有厚大型壳, 型壳的蓄热作用使右件各部位的温差减小, 热应力和变形也相对减小。实验铸件的尺寸测量情况见图 7, 结果显示实验铸件中心部位向外凸起、上部加强筋部位向内凹陷, 且左件变形量大于右件, 这说明实验结果与模拟预测的变形趋势吻合很好, 验证了模拟的准确性。

以图 6 中位置 1 与位置 2、3 的位移差作为参考变形量, 对模拟和实验结果进行对比, 结果见表 2。对于铸件左件, 模拟预测的变形量小于实验变形量, 准确率分别为 60.5%与 72.2%, 模拟与实验结果的吻合度较高; 对于铸件右件, 模拟预测的变形量同样小于实验变形量, 位置 1、3 之间位移差的预测准确率为 72.1%, 而对于位置 1、2 之间的位移差, 预测准确率仅有 43.7%。实验右件在位置 2 处存在表面凹坑, 很可能是缩孔被热等静压闭合后产生的表面缺陷, 非铸造变形所致, 而本次模拟并未考虑缩孔因素, 因此带来较大误差。

综上所述, 不考虑意外误差, 铸件的变形位置得到预测, 变形量的模拟准确率约在 60%~72%之间, 表明模拟仿真能较准确预测变形趋势, 而在定量预测方面也具有较高的参考价值。随着钛合金高温力学参数和力学模型的不断完善, 铸造变形定量模拟预测的准确率有望继续提高。

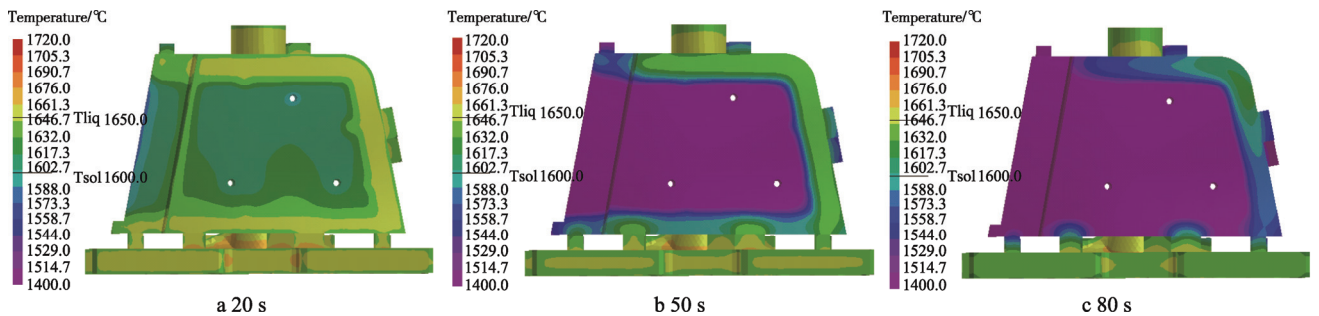


图 5 浇注开始后铸件温度场模拟结果
Fig.5 Simulation results of temperature field after starting pouring

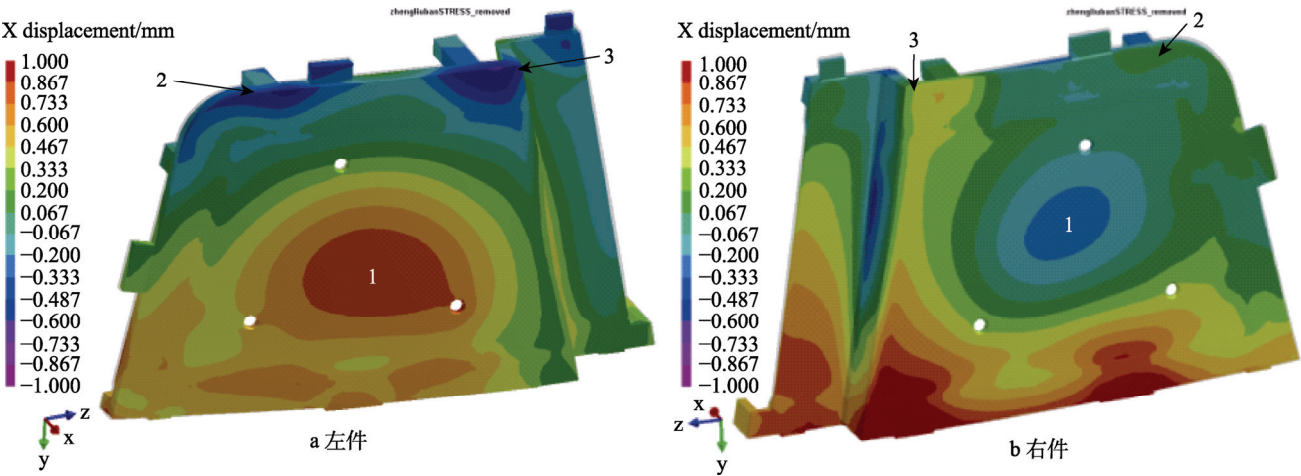


图 6 模拟结束时铸件 x 方向的位移
Fig.6 Displacement in x direction of casting at the end of simulation

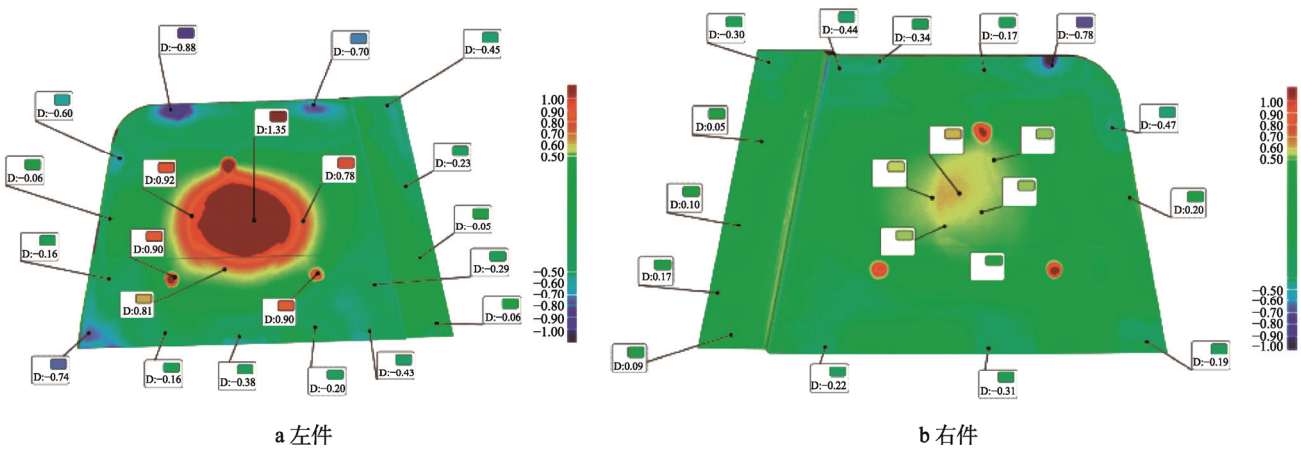


图 7 实验铸件的扫描成像结果
Fig.7 Scanning images of experimental casting

表 2 模拟与实验的铸件变形量对比
Tab.2 Comparison between deformation amount of simulation and experiment

铸件	位置1与位置2的位移差			位置1与位置3的位移差		
	模拟结果/mm	实验数据/mm	准确率/%	模拟结果/mm	实验数据/mm	准确率/%
左件	1.35	2.23	60.5	1.48	2.05	72.2
右件	0.60	1.38	43.7	0.75	1.04	72.1

4 结论

1) 模拟的变形趋势为中间部位向外侧凸起，加强筋部位向内侧凹陷，且右件的变形量小于左件。实验的变形趋势与模拟结果基本吻合，表明模拟仿真能准确预测变形趋势。

2) 模拟变形量的预测准确率在 60%~72%之间，表明铸造变形的定量模拟结果具有较高的参考价值。

参考文献:

[1] YUAN C, CHEN X, HOLT G S, et al. Investment

casting of Ti-46Al-8Nb-1B Alloy Using Moulds with CaO-stabi- lized Zirconia Face Coat at Various Mould Pre-heat Temperatures[J]. Ceramics International, 2015, 41: 4129—4139.
[2] 隋艳伟, 李邦盛, 刘爱辉, 等. 离心铸造钛合金件的力学性能变化规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 251—254.
SUI Yan-wei, LI Bang-sheng, LIU Ai-hui, et al. Mechanical Properties of Centrifugal Casting Titanium Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2): 251—254.
[3] 王刚, 徐东生, 杨锐. Ti-6Al-4V 合金中片层组织形成

- 的相场模拟[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 343—347.
- WANG Gang, XU Dong-sheng, YANG Rui. Phase Field Simulation on Sideplates Formation in Ti-6Al-4V Alloy [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(6): 343—347.
- [4] 高婷, 赵亮, 马保飞, 等. 国外铸造钛合金及其铸件的应用与发展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(21): 5—11.
- GAO Ting, ZHAO Liang, MA Bao-fei, et al. Present Situation and Development Trend of Titanium Alloy Casting Technology[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(21): 5—11.
- [5] 苏鹏, 刘鸿羽, 赵军, 等. 钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状[J]. 铸造, 2012, 61(12): 1401—1404.
- SU Peng, LIU Hong-yu, ZHAO Jun, et al. Research Status of Shell Mold Preparation for Titanium Alloy Investment Casting[J]. Foundry, 2012, 61(12): 1401—1404.
- [6] 崔新鹏, 张晨, 范世玺, 等. 框架型钛合金铸件应力和铸造变形的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(3): 257—259.
- CUI Xin-peng, ZHANG Chen, FAN Shi-xi, et al. Numerical Simulation of the Casting Deformation and Stress Field of the Ti-alloy Casting with Framework Structure[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(3): 257—259.
- [7] 肖树龙, 陈玉勇, 朱洪艳. 大型复杂薄壁钛合金铸件熔模精密铸造研究现状及发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 678—681.
- XIAO Shu-long, CHEN Yu-yong, ZHU Hong-yan. Recent Advances on Precision Casting of Large Thin Wall Complex Castings of Titanium Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(5): 678—681.
- [8] 韩大平, 杨武, 彭志江. 基于 ProCAST 的大型薄壁机匣件整体熔模铸造工艺研究[J]. 铸造, 2013, 62(10): 979—982.
- HAN Da-ping, YANG Wu, PENG Zhi-jiang. Process Optimization of Whole Investment Casting of Large Thin Wall Cartridge Receiver Based on ProCAST Software[J]. Foundry, 2013, 62(10): 979—982.
- [9] SUZUKI K, YAO M. Simulation of Mold Filling and Solidification during Centrifugal Precision Casting of Ti-6Al-4V Alloy[J]. Metals and Materials International, 2004, 10(1): 33—38.
- [10] YANG L, CHAI L H, LIANG Y F. Numerical Simulation and Experimental Verification of Gravity and Centrifugal Investment Casting Low Pressure Turbine Blades for High Nb-TiAl Alloy[J]. Intermetallics, 2015, 66: 149—155.
- [11] WU Shi-ping, LIU Dong-rong, GUO Jing-jie. Numerical Simulation of Microstructure Evolution of Ti-6Al-4V Alloy in Vertical Centrifugal Casting[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 426: 240—249.
- [12] ADRIAN, S. SABAU. Alloy Shrinkage Factors for the Investment Casting Process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37B(2): 130—140.
- [13] 赵恒义. 熔模铸造型壳抗弯弹性模量的研究[J]. 铸造技术, 2004, 25(6): 443—444.
- ZHAO Heng-yi. Study on Bend Elastic Modulus of Ceramic Shell in Investment Casting[J]. Foundry Technology, 2004, 25(6): 443—444.
- [14] CHEN Tao, TANG Yu-long, LIAO Dun-ming, et al. Simulation of Casting Deformation Based on Mold Surface Element Method[J]. China Foundry, 2017, 14(1): 28—33.
- [15] BOIVINEAU M, CAGRAN C, DOYTIER D. Thermo-physical Properties of Solid and Liquid Ti-6Al-4V(TA6V) Alloy[J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(2): 507—529.