

两种铸造模拟软件在钛合金铸件研制中的应用对比

李峰¹, 崔新鹏¹, 王丽娟², 南海^{1,2}, 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. 北京百慕航材高科技股份有限公司, 北京 100094)

摘要: **目的** 研究分析两种铸造模拟软件在钛合金铸件模拟方面的差异及准确性。**方法** 利用华铸 CAE 和 ProCast 软件对某钛合金铸件的温度场、流场和缩孔缺陷进行数值模拟。为了验证模拟结果的准确性, 进行实际浇注验证实验, 并通过 X 射线探伤, 检测缩孔缺陷的位置。**结果** 华铸 CAE 网格剖分简单、计算时间短, 但是模型边界拟合较差, ProCast 软件网格划分复杂、计算时间较长, 但是网格可以较好地反映模型形状, 模型边界拟合较高。**结论** 两种软件对温度场的模拟差异不大, 凝固顺序基本一致, 两种模拟软件的缩孔预测结果和实际缩孔位置吻合性都较好, 说明两种数值模拟软件可以很好地预测钛合金铸件内缩孔分布。

关键词: 数值模拟; 钛合金; 华铸 CAE; ProCast

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.03.029

中图分类号: TG249; O242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)03-0163-05

Comparison of Two Kinds of Casting Simulation Software on Titanium Alloy Castings Preparing

LI Feng¹, CUI Xin-peng¹, WANG Li-juan², NAN Hai^{1,2}, ZHOU Qian^{1,2}

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

ABSTRACT: The paper aims to study differences and accuracy of two kinds of casting simulation software in simulation of titanium alloy castings. Temperature field, flow field and shrinkage cavity defects of a certain titanium alloy casting were numerically simulated with Huazhu CAE and ProCast software. To verify accuracy of simulation results, an actual pouring verification experiment was performed. The position of shrinkage defect was detected by X-ray inspection. Huazhu CAE was simple in grid generation and its calculation was fast; but the model boundary was poorly fitted. The ProCast software was complex in grid generation and its calculation was long; but the grid could reflect the model shape well, and the calculation accuracy was good. The simulation of the temperature field of the two kinds of software has little difference, and the solidification sequence is basically the same. The simulated shrinkage cavity results of two kinds of software are in good agreement with the actual casting shrinkage cavity position, indicating that the numerical simulation can effectively predict shrinkage cavity distribution in titanium alloy casting.

KEY WORDS: numerical simulation; titanium alloy; Huazhu CAE; ProCast

传统熔模铸造的工艺方案设计及优化主要凭借产品工程师的工作经验和物理实验, 为了生产出合格铸件, 在正式投产前往往需要经过多次试制, 但

是工程师对于铸件质量的把控缺乏科学的理论依据, 采用这种试错方法, 增加了产品的研发周期和企业成本并且铸件的质量也难以保证^[1-3], 已经不能

收稿日期: 2018-04-19

作者简介: 李峰 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为钛合金铸造数值模拟。

满足现代铸造企业数字化、高效率、低能耗的发展要求^[4]。随着 CAE 仿真技术的发展,传统铸造方法结合计算机技术的应用,越来越得到铸造企业的认可。铸造模拟软件在降低企业成本、减少生产周期、提高铸件质量等方面具有重大作用,可以为企业带来明显的经济效益^[5]。

目前商业化的铸造模拟软件有很多,国内如华中科技大学的华铸 CAE、清华大学的 FT-STAR,国外如法国 ESI 的 ProCAST、美国的 FLOW-3D、德国的 MAGMA 等^[6]。文中针对广泛应用的两种模拟软件华铸 CAE 和 ProCAST 来开展研究,对比分析两种软件在钛合金铸件模拟方面的差异和准确性。

1 软件特点

华铸 CAE 为华中科技大学自主研发的铸造模拟软件,自 1985 年起,至今已有 30 余年的历史,是基于有限差分 FDM 原理来解析流动传热和应力问题,可以模拟分析大部分铸造类型的流动和温度场分析,但是还不具备应力场分析功能,文件导入接口也只有 STL 格式^[7-8]。ProCast 软件为法国 ESI 公司开发的铸造模拟软件,采用有限元 FEM 方法来解析传热、流体、应力等问题,可以预测缩孔缩松、浇不足、冷隔等铸造缺陷,并且可以对应力变形、微观组织等进行模拟仿真分析,适用于砂型、金属型、熔模铸造、消失模铸造、压力铸造、离心铸造、连铸等铸造工艺^[9]。两种软件在国内外铸造行业以及铸造学术界均具有较

大的影响。

两种数值计算方法相比,有限元法适合处理复杂区域,精度高但是内存和计算量巨大,而有限差分(FDM)不能进行应力分析,处理不规则区域难度大,与模型拟合较差,对区域的连续性要求较严^[10]。两种软件特点的对比见表 1^[11-13]。

表 1 两种软件特点对比
Tab.1 Comparison of two kinds of software

	华铸CAE	ProCast
文件接口	STL	多种文件接口
算法	有限差分FDM	有限元FEM
适用范围	温度场、流场	温度场、流场、应力场
计算效率	速度快	速度慢
与模型拟合度	边界拟合差	边界拟合好

2 数值模拟

2.1 结构分析及网格剖分

选取的铸件为典型的环形类钛合金铸件,铸件模型及网格剖分见图 1,具体尺寸如下:下环半径为 141 mm,上环半径为 123 mm,高度为 236 mm,下部附有 3 个弯管,见图 1a。华铸 CAE 采用有限差分的方法剖分网格,网格总数为 2 912 000 个,见图 1b,可以看出,网格剖分边界呈阶梯状,与模型拟合较差。Procast 软件采用有限元方法剖分网格,网格总数为 2 380 287 个,见图 1c,拟合较好。



图 1 铸件模型及网格剖分

Fig.1 Model and mesh generation of casting

2.2 参数设置

两种软件都有相应的数据库,同时 ProCast 软件还可以根据合金成分进行热力学计算,得到材料的热物性参数。铸件材料为 Ti-6Al-4V,模壳材料选择硅

砂(因为两种软件中的钛合金铸造用模壳材料热物性数值不适合钛合金精铸模拟,因此模拟中选用硅砂),浇注温度为 1720 ℃,模壳预热温度为 200 ℃,静止浇注。铸件材料热物性参数见表 2。

表 2 铸件材料的热物性参数
Tab.2 Parameters for thermophysical properties of casting material

材料	Liquidus/℃	Solidus/℃	比热容/ (kJ·kg ⁻¹ ·K)	电导率/ (W·m ⁻¹ ·K)	黏度/ (10 ⁻³ Pa·s)	弹性模 量/GPa	屈服强 度/MPa	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

3 验证试验

为了验证模拟结果的准确性，按照设计的环形类钛合金铸件浇注系统工艺方案进行了实际浇注试验。铸件材质为 Ti-6Al-4V，模壳面层材料为 Y₂O₃，背层材料为 Al₂O₃，模壳厚度约为 15 mm。采用真空自耗凝壳炉进行了静止浇注，铸件成形完整，没有出现跑火等浇注异常，该实验结果可以用于模拟结果的验证。成形铸件见图 2。针对浇注出的铸件进行了 X 射线无损检测，获得了铸件内部缩孔缺陷分布底片。



图 2 浇注完成后的左右半铸件
Fig.2 Left and right half of casting after pouring

4 模拟结果分析

4.1 凝固过程分析

针对环形类钛合金铸件实际浇注实验设计的浇注系统工艺方案，采用两种模拟软件进行了模拟充型和凝固模拟研究。温度场的计算是凝固模拟计算的基

础，Procast 和华铸 CAE 模拟不同时刻凝固率的变化分别见图 3 和图 4。可以看出两种软件模拟出的凝固过程基本一致，都是铸件外壁首先开始凝固，下部弯管冷却较快，法兰边及凸台厚大区域冷却缓慢，铸件上的拐角及圆角散热较差，凝固过程较为缓慢，从图 3b 红色圆环位置可以看出，凝固过程中形成了孤立液相区，补缩通道中断，此处很有可能形成缩孔缺陷。

4.2 缩孔分析

钛合金铸造缺陷主要有缩孔、缩松、夹杂、气孔等，对于小尺寸缩孔和气孔可以通过热等静压来压合，而对于大尺寸缩孔必须进行补焊处理^[14—15]。ProCast 预测的铸件内缩孔的位置见图 5，按照经验 ProCast 软件孔隙率选择 0.3，从图 5 可以看到，缩孔主要分布在铸件外轮廓上的凸台，弯管法兰及铸件左右连接的热节处，这与凝固过程的预测相吻合。华铸 CAE 预测的铸件内缩孔的位置见图 6，参照 ProCast 孔隙率选择 0.3，可以看出，与 ProCast 软件预测结果不同的是，铸件外轮廓上的凸台未见明显缩孔，侧冒口根部存在缩孔，其他位置基本相同。分析结果差异的原因是两种软件的缩孔判据不一样，当选择同一孔隙率时，缩孔预测结果会出现一定差异。这说明针对不同的模拟软件，孔隙率不能选取同样的数值，否则会出现模拟结果局部不一致的现象。

为了验证两种软件预测的准确性，对试验铸件进行了 X 射线探伤，检测结果见图 7。铸件实际缩孔位置与两种软件的模拟结果吻合很好，缩孔形貌多呈长条圆弧状，这证明了两种模拟软件都适合钛合金精铸模拟，可以用于铸造工艺优化，从而逐渐代替传统的

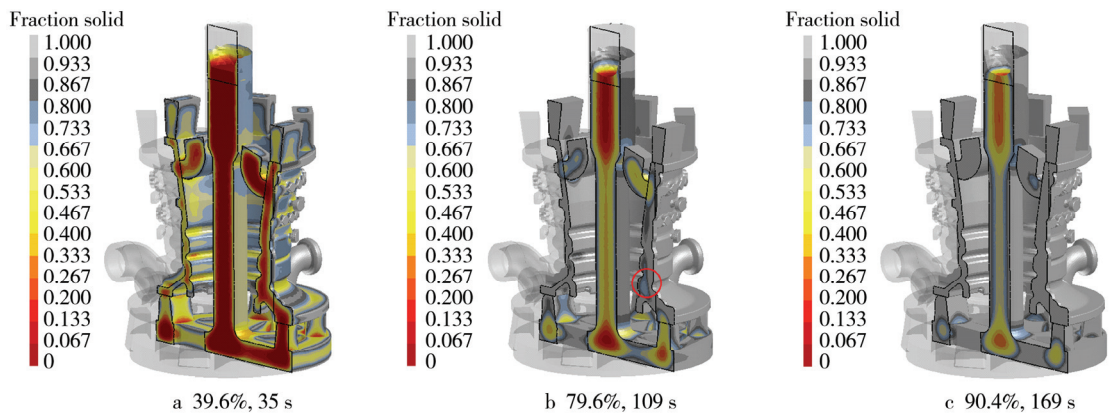


图 3 ProCast 中铸件凝固过程分析
Fig.3 Analysis on solidification process of casting in ProCast package

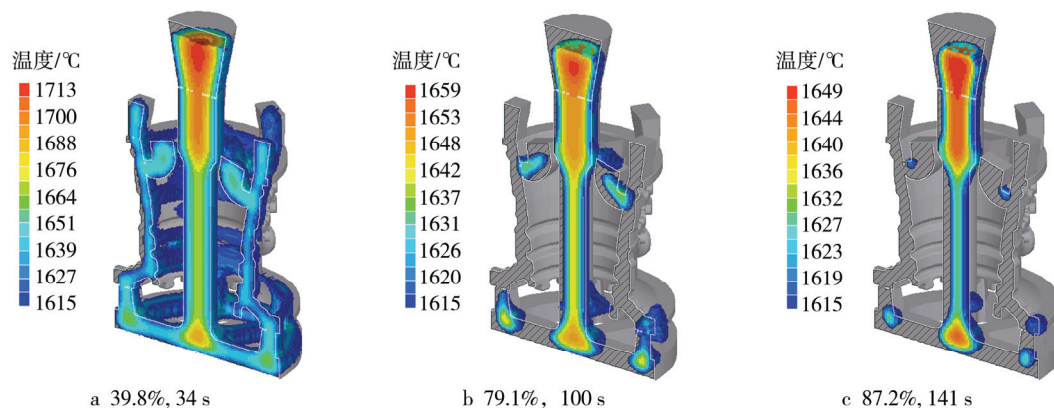


图4 华铸 CAE 中铸件凝固过程分析

Fig.4 Analysis on solidification process of casting in Huazhu CAE package

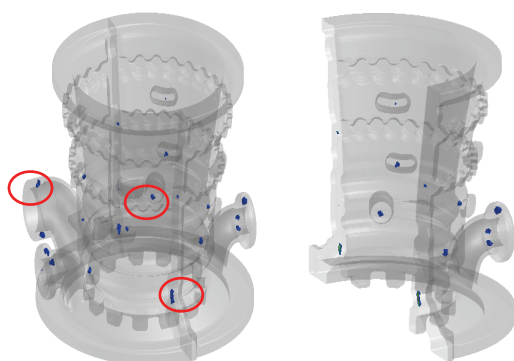


图5 ProCast 预测的缩孔缺陷位置

Fig.5 Shrinkage porosity prediction by ProCast

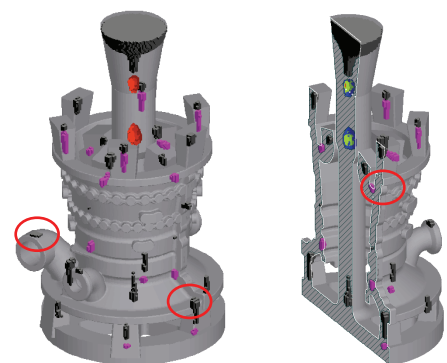


图6 华铸 CAE 预测的缩孔缺陷位置

Fig.6 Shrinkage porosity location predicted by Huazhu CAE

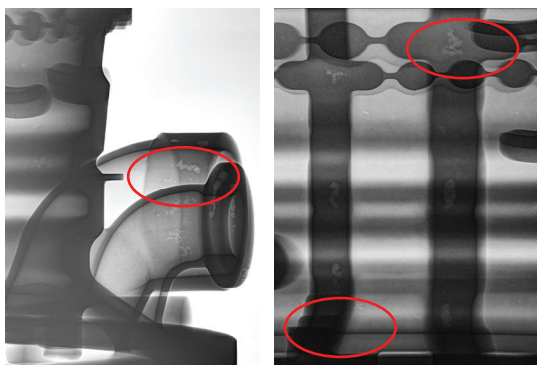


图7 实际缩孔位置

Fig.7 Location of actual shrinkage porosity

凭经验和多次物理实验相结合的落后工艺优化方法,促进钛合金精铸技术的数字化、智能化发展。

5 结论

利用华铸 CAE 和 ProCast 软件对同一钛合金铸件进行了数值模拟计算,并对两种软件在方面网格剖分、温度场模拟、缩孔缺陷预测进行了比较,得出了以下结论。

1) 华铸 CAE 采用有限差分方法,剖分网格简单,计算时间短,但是模型边界拟合较差。ProCast 软件采用有限元方法,剖分网格复杂,计算时间长,模型拟合精度高,能更好的反映复杂铸件的形状。

2) 在温度场预测方面,两种软件预测结果基本一致,凝固过程的变化都是铸件外壁首先开始凝固,下部弯管冷却较快,法兰边及凸台厚大区域冷却缓慢,铸件上的拐角及圆角散热较差,凝固过程较为缓慢。

3) 在缩孔位置预测方面,当选择同一空隙率时,两种软件模拟出的缩孔位置略有差异,这说明针对不同的模拟软件,孔隙率不能选取同样的数值,否则会出现模拟结果局部不一致的现象。结合实际探伤结果验证,两种软件都可以准确地预测到弯管法兰及铸件左右连接热节位置的缩孔。

4) 通过 ProCast 软件和华铸 CAE 在同一钛合金铸件上应用对比,数值模拟技术可以很好的预测铸件内缩孔缺陷,可以显著降低企业成本,减少重复试验,为解决工程问题提供极大的帮助。实际企业生产过程中,应结合两种软件的优势,在研发周期短、计算机运算速度慢的条件下,可采用华铸 CAE 进行数值模拟;在研发周期长、计算机运算速度快或者需要应力变形模拟时,可采用 ProCast 软件进行模拟。

参考文献:

- [1] 柳百成, 荆涛. 铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

- LIU Bai-cheng, JING Tao. Simulation and Quality Control of Casting Engineering[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001.
- [2] 柴增田. 计算机技术与熔模精密铸造[J]. 铸造纵横, 2004(2): 4—17.
- CHAI Zeng-tian. Computer Technology and Investment Casting[J]. Foundry, 2004(2): 4—17.
- [3] 蔡临宁, 杨秉俭, 苏俊义. 充填过程数值模拟技术的现状和发展[J]. 铸造技术, 1996(3): 30—34.
- CAI Lin-ning, YANG Bing-jian, SU Jun-yi. Status Quo and Development of Numerical Simulation of Filling Processes[J]. Foundry Technology, 1996(3): 30—34.
- [4] 良辰. 优质-高效-绿色铸造行业的发展之路: 访中国铸造协会副理事长黄天佑[J]. 航空制造技术, 2011(1/2): 68—70.
- LIANG Chen. Quality-Efficient-Development of the Green Foundry Industry: An Interview with Huang Tianyou, Vice Chairman of China Foundry Association[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(1/2): 68—70.
- [5] HEISSER C. Progress and Developments in Simulation Technology[J]. Foundry Management & Technology, 2005, 133(1): 57—58.
- [6] 李日. 铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- LI Ri. Casting Process Simulation ProCAST From Getting Started to Proficient[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010.
- [7] 曹广军. 凝固模拟 CAE 系统若干接口的研究与开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- CAO Guang-jun. Research and Development of Several Interfaces in Solidification Simulation CAE System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [8] 廖敦明, 林汉同, 刘瑞祥, 等. 铸造热应力场数值模拟研究的最新进展[J]. 现代铸铁, 2000(4): 4—7.
- LIAO Dun-ming, LIN Han-tong, LIU Rui-xiang, et al. Recent Developments in Numerical Simulation of Casting Thermal Stress Fields[J]. Modern Cast Iron, 2000(4): 4—7.
- [9] 美国通力有限公司. ProCAST 铸造过程仿真软件[M]. 北京: 通力公司, 1999.
- American Tonic Co., Ltd. ProCAST Casting Process Simulation Software[M]. Beijing: Tongli Company, 1999.
- [10] OLIVEIRA E R D, 陈玉田. 有限元和有限差分的区别与相似点[J]. 华水科技情报, 1985(4): 91—98.
- OLIVEIRA E R D, CHEN Yu-tian. Differences and Similarities Between Finite Element and Finite Difference[J]. Huashui Science and Technology Information, 1985(4): 91—98.
- [11] Apelian D. Advanced Casting Technologies in Japan and Europe[J]. 1997.
- [12] ESTRIN L. A Deeper Look at Casting Solidification Software[J]. Modern Casting, 1994, 84(7): 20—24.
- [13] MIDEA T C, SCHMIDT D. 1999 Casting Simulation Software Survey[J]. Modern Casting, 1999, 89(5): 47—51.
- [14] 肖树龙, 陈玉勇, 朱洪艳, 等. 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(5): 678—681.
- XIAO Shu-long, CHEN Yu-yong, ZHU Hong-yan, et al. Research Status and Development of Investment Casting for Large and Complex Thin-walled Titanium Alloy Castings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006(5): 678—681.
- [15] VENKATESH V, PILCHAK A L, ALLISON J E, et al. Proceeding of the 10th World Conference on Titanium[C]. Hamburg: Wiley-VCH, 2004.