

异形薄壁钛合金铸件熔模铸造成形数值模拟及验证

殷建锋^{1, 2, 3}, 李 峰^{1, 2, 3}, 南 海^{1, 2, 3}

(1. 北京航空材料研究院有限公司, 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形工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: 以异形薄壁钛合金进气管铸件为研究对象, 采用ProCAST数值模拟仿真软件, 结合从蜡模到铸件全流程的数字化光学尺寸测量技术, 首先对铸件进行无浇注系统的凝固模拟, 确定铸件热节位置; 依据铸件热节结构分布, 引入浇注系统进行工艺设计和浇注成形模拟迭代优化, 解决铸件热节位置缩孔问题; 根据模拟结果优化工艺进行试验投产, 将试验结果与模拟仿真结果进行对比分析。结果表明: 进气管铸件采用离心铸造方案, 上端安装槽等位置5处辅浇和下端安装槽位置2处辅浇尺寸为 $\phi 20$ mm时, 模拟结果显示金属液流动过程平稳迅速、充型能力强, 同一模组上的两件铸件缩孔分布基本一致, 上、下端各有一处缩孔在辅浇与铸件本体交接位置, 其余位置缩孔均被优化提出, 模拟结果表明该工艺设计方案可行, 试验投产结果与数值模拟结果吻合度较好, 有效解决了铸件热节缩孔问题, 铸件成形质量、冶金质量和尺寸控制达到预期效果, 计算机模拟可以有效指导实际铸件研制生产。

关键词: 钛合金; 模拟仿真; 工艺设计; 缩孔

钛及钛合金具有密度低、比强度高、耐蚀性好、可焊接等特点, 它作为一种轻质高强度耐蚀结构材料, 在航空、航天、船舶等领域具有广泛的应用前景^[1]。钛合金精密铸造作为一种先进的近净成形工艺, 可以直接成形各种复杂形状的结构件, 显著提高材料的利用率, 降低生产成本, 满足航天航空领域对于复杂薄壁铸件的需求^[2-3]。随着铸件结构的复杂化, 精密铸造充型过程也变得更加复杂, 铸件成形质量及内部缺陷往往难以控制, 采用经验和试验相结合的传统方法来研制铸件, 铸件合格率低、周期长、成本高, 已经不能满足现代铸造企业高效率、低能耗发展的趋势要求, 而采用铸造软件在计算机上对铸造充型过程和缺陷进行模拟计算和预测, 有助于缩短研制周期, 提高铸件成形质量, 降低缩孔缺陷数量, 提高铸件研制成功率^[4-6]。

本文以异形薄壁结构的钛合金进气管铸件为研究对象, 采用ProCAST数值模拟仿真软件, 通过对异形薄壁熔模精铸件浇注成形模拟迭代优化, 降低铸件缩孔缺陷数量和大小, 提高铸件冶金质量, 从而避免缩孔无法消除而通过补焊修复缩孔缺陷导致的尺寸变形问题, 研究浇注系统和铸件结构与缩孔的关系, 为类似异形复杂薄壁结构产品近无余量精铸成形技术提升奠定基础。

1 试验方法

进气管铸件重量约1.6 kg, 长320 mm, 宽230 mm, 高110 mm, 安装面的面轮廓度要求为1 mm, 存在复杂的变截面流道内腔, 流道的面轮廓度要求为3 mm, 流道壁厚2 mm, 两处安装槽壁厚5 mm, 四处安装台壁厚10 mm, 其余厚大位置分布在转接位置, 最大厚度约8~10 mm, 如图1所示, 为典型的异形薄壁结构件。因进气管铸件整体壁厚薄, 局部存在厚大热节结构, 存在浇注过程中金属液充型能力不强、厚大热节补缩困难等技术难点, 浇注成形后易产生缩松、缩孔等缺陷, 虽然缩松、缩孔

作者简介:

殷建锋(1986-), 男, 研究生, 高级工程师, 研究方向为钛合金精密铸造。

E-mail: yinjianfeng781@163.com

中图分类号: TG292

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2022)01-0071-06

收稿日期:

2021-06-18 收到初稿。

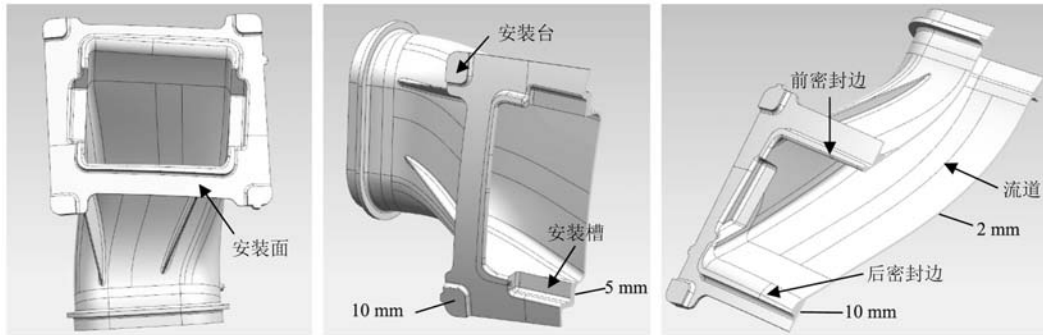


图1 进气管铸件结构图

Fig. 1 Structure drawing of intake pipe casting

缺陷可以通过热等静压进行弥合修复，但是缩孔在弥合形成压坑的过程中会对铸件轮廓变形产生影响，同时，超标的压坑需要通过补焊进行修复，补焊产生的热应力同样会对铸件轮廓变形产生较大的影响^[7]。由于钛合金结晶间距较窄，电弧熔炼的金属过热度较小以及钛的密度小，真空下凝固压头小等特点给钛合金铸件的顺序凝固带来很多困难，薄壁钛合金铸件常用离心铸造工艺，可以很好地克服钛合金真空铸造时压头小的缺点^[8-9]。因此进气管铸件宜采用熔模铸造、离心浇注工艺方案，通过工艺优化设计，避免产生缩孔，提高铸件冶金质量和尺寸控制能力。

1.1 模拟仿真

计算机模拟仿真可以有效对铸件充型过程、凝固过程、热节位置、浇冒口收缩效果以及缩孔、缩松进行预测并指导现场实际生产，可以有效提高产品研发效率^[10]。本文采用ProCAST模拟仿真软件对铸件进行充型、凝固模拟，分析铸件模拟成形质量和缩孔风险。依据实际的生产熔炼浇注参数，制定模拟仿真主要参数，如表1所示。

1.2 射线检测

实时成像是一种X射线无损检测方法，是通过显示屏实时多角度显示铸件内部缺陷的方法，实时成像方法因其检测图像直观清晰、检测速度快和成本低的优势得到业内的广泛关注，成为射线无损检测的发展新方向。本文采用GE公司Seifert x cube系列X射线实时成像检测设备对铸件进行内部冶金质量检测和评估。

表1 模拟仿真参数
Table 1 Simulation parameters

浇注材料	浇注温度/℃	浇注时间/s	型壳厚度/mm	型壳温度/℃	离心转速/(r·min ⁻¹)
ZTC4	1 720	5.5	15	250	200

1.3 热等静压

热等静压是一种热处理方法，一般情况下铸件内部的缩孔、缩松等缺陷在热等静压处理时可以降低或去除，但是大尺寸的缩孔热压后铸件表面常常出现缩陷，需进行补焊处理^[9]。本文热等静压工艺参数如表2所示。

1.4 尺寸检测

关节臂扫描仪是利用关节在空间的坐标位置变化，利用光学传感器将检测物体的距离、位置传递给电脑，由电脑软件进行计算、运行得出物体外形尺寸的测量结果，测量精度一般在0.02~0.05 mm，关节臂扫描仪具有快捷、高效等特点，适用于中小曲面结构件轮廓尺寸快速测量和判定。本文采用HEXAGON ROMER 7530系列关节臂扫描仪对铸件的轮廓尺寸进行测量和评估。

2 结果与讨论

2.1 模拟仿真分析

2.1.1 铸件结构导致热节的凝固模拟

依据铸件薄壁、多热节、轮廓度要求高等结构特点，首先对铸件进行无浇注系统的凝固模拟，拟确定铸件热节位置。凝固模拟结果如图2所示，结果表明，完整充型后12 s内流道就已经完全凝固，安装槽、安装台、后密封边以及2处三面交汇处成为孤立液相区，这些部位实际浇注过程中最终凝固前如果得不到及时的金属液补充，极容易发生缩孔、缩松缺陷，在浇注设计时需要重点考虑。

表2 热等静压参数
Table 2 Hot isostatic pressing parameters

温度/℃	压力/MPa	介质	保温时间/h	冷却条件	出炉温度/℃
900±15	120±20	氩气	2~2.4	随炉冷却	<250



图2 无浇注系统凝固模拟结果

Fig. 2 Simulation results of solidification without gating system

2.1.2 一次优化铸造成形模拟

依据凝固模拟结果，结合铸件结构情况，制定进气管铸件的浇注系统和组模工艺方案，通过计算机模拟仿真模拟铸件金属液充型过程，分析缩孔分布情况，并制定迭代优化方案和计算机模拟仿真，直至缩孔全部提出。

铸件长宽比1.4 : 1，考虑到铸件成形和尺寸控制要求，设计了横向组模的工艺方案。其中，方案1设置了5处底浇口，由于热节位置分散，且为孤立结构，不利于设计大量冒口，首先考虑通过设计辅浇结构来解决热节位置金属液补缩能力不足导致的缩孔问题。因

此，方案2在方案1的基础上，在上端的安装槽、安装台、密封边位置增加了5处辅浇，辅浇尺寸为 $\Phi 10$ mm，下端的安装槽、密封边得益于金属液流程短、充型速度快、补缩能力强等优势，设计2处辅浇，辅浇尺寸为 $\Phi 10$ mm。模拟结果显示，方案2铸件金属液充型过程快于方案1，表明增加辅浇结构有助于提高金属液的充型能力和完整充型的速度；两种方案的缩孔分布基本一致，缩孔主要分布在上端的安装槽转角位置和密封边局部热节位置，辅浇结构对消除缩孔没有起作用，下端的安装槽转角位置有小体积的缩孔，铸造充型过程及缩孔分布如图3和4所示。

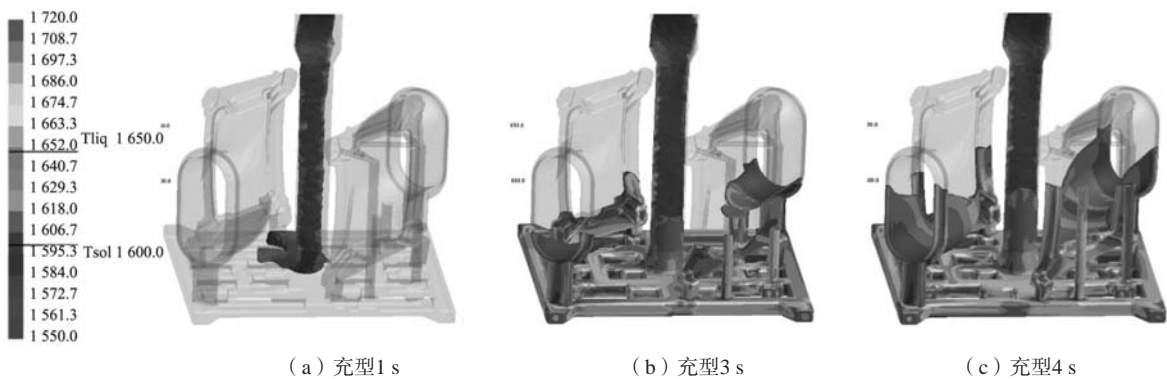


图3 一次优化铸造成形模拟结果（充型过程）

Fig. 3 Results of the casting forming simulation for the first optimization design (filling process)

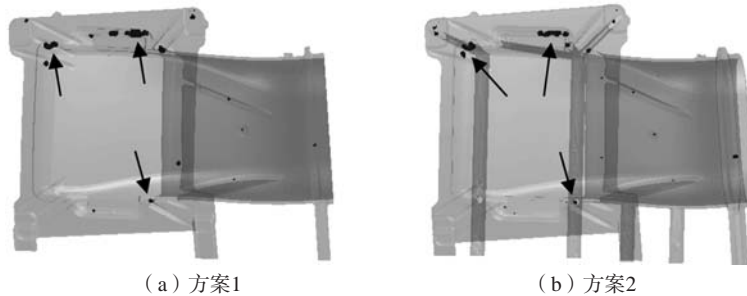


图4 一次优化铸造成形模拟结果（缩孔分布）

Fig. 4 Results of the casting forming simulation for the first optimization design (shrinkage distribution)

2.1.3 二次优化铸造成形模拟

根据上述模拟结果优化辅浇结构，方案3在方案2的基础上，将上端的安装槽、安装台、密封边位置5处辅浇尺寸由 $\Phi 10$ mm调整为 $\Phi 20$ mm，下端的安装槽转角区位置2处辅浇尺寸由 $\Phi 10$ mm调整为 $\Phi 20$ mm。模拟结果显示，金属液流动过程平稳迅速、充型能力强，同一模组上的两件铸件缩孔分布基本一致，上、下端各有一处缩孔在辅浇与铸件本体交接位置，其余位置缩孔均被优化提出，模拟结果表明该工艺设计方案

可行，铸造充型过程及缩孔分布如图5和6所示。

2.2 铸造工艺设计

依据上述计算机模拟仿真结果，分别采用组模工艺方案1和方案3为设计方案，采用离心铸造工艺，依据表1所示参数作为熔炼浇注参数，对进气管铸件进行试验投产，跟踪铸件浇注成形及缩孔结果，分析模拟仿真可行性和准确性。

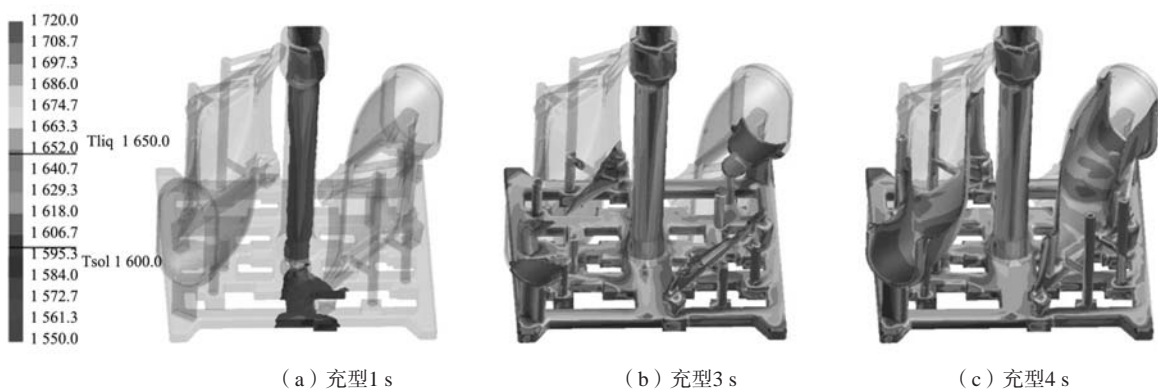


图5 二次优化铸造成形模拟结果（充型过程）

Fig. 5 Results of the casting forming simulation for the second optimization design (filling process)

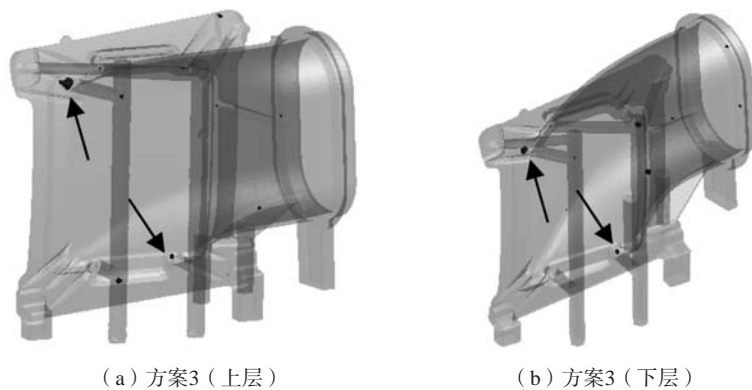


图6 二次优化铸造成形模拟结果（缩孔分布）

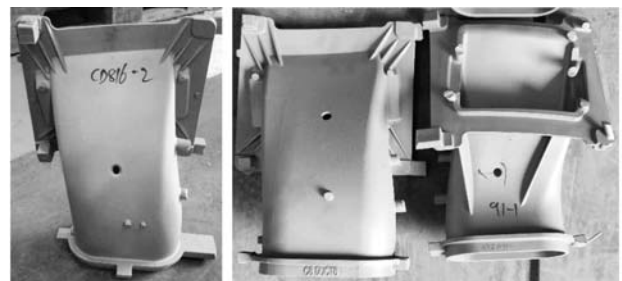
Fig. 6 Results of the casting forming simulation for the second optimization design (shrinkage distribution)

2.3 表面质量

铸件浇注成形完整，无欠注、鼓胀、冷隔等缺陷，结果如图7所示，表明组模工艺方案1和方案3合理可行，均可实现铸件完整成形，试验结果与模拟仿真预测结果吻合。

2.4 冶金质量

完成浇注成形后，采用X射线实时成像检测设备对铸件进行内部冶金质量检测，结果如图8所示。采用组模工艺方案1浇注成形的铸件内部缩孔较多，主要分布在安装槽转角、密封边热节以及上边两处安装台位



(a) 方案1

(b) 方案3

图7 浇注成形结果

Fig. 7 Results of casting forming

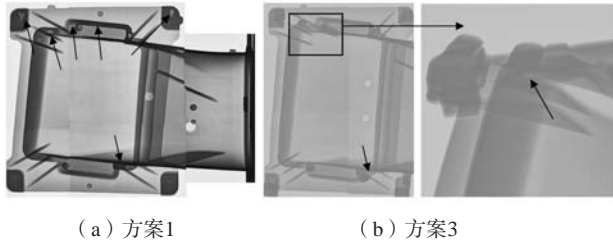


图8 实时成像结果

Fig. 8 Results of real time imaging detection

置，缩孔位置和体积与计算机模拟结果吻合；采用组模工艺方案3浇注成形的铸件内部质量整体较好，仅有一处较大体积缩孔分布在密封边热节位置，处于辅浇与铸件本体交接位置，缩孔位置和体积与计算机模拟结果基本一致。

铸件在经过表面清洁处理后进行热等静压处理，内部的缩孔、缩松缺陷在热等静压处理时可以被压合，大尺寸的缩孔热压后会在表面出现缩陷，结果如图9所示。采用组模工艺方案1浇注成形的铸件热等

静压后表面出现多处压坑，是实时成像结果的外观显示；采用组模工艺方案3浇注成形的铸件热等静压后表面仅有一处压坑，是实时成像结果显示的密封边热节位置缩孔压实后的外观显示，由于铸件内部缩孔离铸件反面距离较近，热等静压后压坑位置显示在铸件的反面，铸件表面的压坑可以通过补焊进行修复，需要控制补焊引起的铸件变形。

2.5 铸件尺寸

采用关节臂扫描仪对蜡模和铸件进行扫描检测，评估蜡模和铸件的轮廓、壁厚尺寸，结果如图10所示。采用金属模具压制的蜡模整体轮廓度可以控制在1 mm以内，流道壁厚偏差可以控制在±0.3 mm以内，蜡模变形量小、壁厚均匀性高；采用组模工艺方案1和方案3浇注成形的铸件，安装面的面轮廓度可以控制在1 mm以内，流道的面轮廓度可以控制在3 mm以内，流道壁厚偏差可以控制在±0.3 mm以内，符合设计要求。

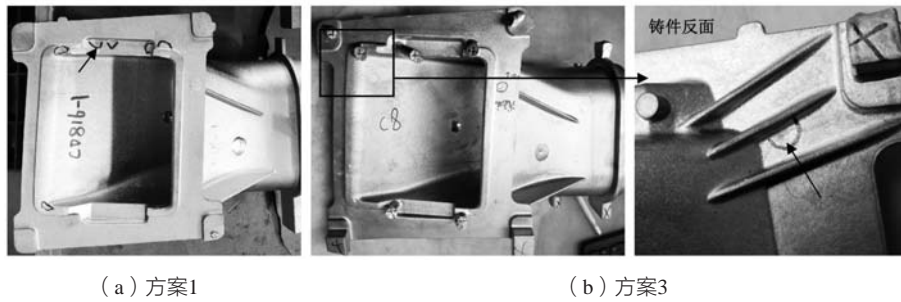


图9 热等静压结果

Fig. 9 Results of hot isostatic pressing

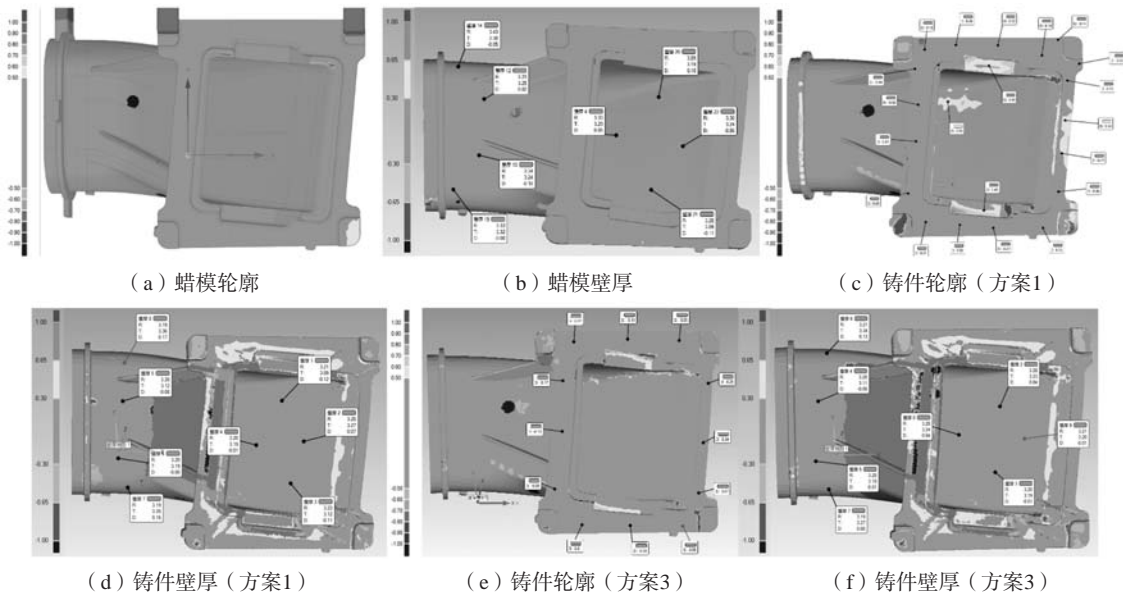


图10 尺寸测量结果

Fig. 10 Results of dimensional measurements

3 结论

(1) 进气管铸件采用离心铸造方案, 上端的安装槽、安装台、密封边位置5处辅浇和下端的安装槽转角区位置2处辅浇尺寸为 $\Phi 20$ mm时, 模拟结果显示金属液流动过程平稳迅速、充型能力强, 同一模组上的两件铸件缩孔分布基本一致, 上、下端各有一处缩孔在辅浇与铸件本体交接位置, 其余位置缩孔均被优化提出。

(2) 采用ProCAST数值模拟仿真技术, 结合从蜡模到铸件全流程的数字化光学尺寸测量方法, 发现异形复杂薄壁进气管类铸件缺陷分布和变形规律, 在此基础上高效精准优化铸件铸造工艺, 可以实现铸件完整成形, 有效解决了热节位置的缩孔问题, 关键尺寸控制达到设计要求, 实验投产结果与数值模拟结果吻合度较好, 该研究为类似异形复杂薄壁结构产品近无余量精铸成形技术提升奠定基础。

参考文献:

- [1] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] 谢成木, 莫畏, 李四清. 钛近净成形工艺 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [3] 张美娟, 南海, 鞠忠强, 等. 航空铸造钛合金及其成形技术发展 [J]. 航空材料学报, 2016, 36 (3): 13-19.
- [4] 曹岩, 张浩, 石亚茹, 等. 基于ProCAST的薄壁叶片熔模精铸过程模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (11): 1226-1229.
- [5] 李峰, 崔新鹏, 王丽娟, 等. 两种铸造模拟软件在钛合金铸件研制中的应用对比 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (3): 163-167.
- [6] 宗学文, 刘文杰, 熊聪. 钛合金叶轮精铸成形数值模拟及实验验证 [J]. 航空材料学报, 2019, 39 (5): 103-112.
- [7] 王新英, 黄东, 赵嘉琪, 等. 钛合金熔模精密铸造中常见缺陷及其预防措施 [J]. 材料工程, 2003 (增刊): 235-237.
- [8] 吴鹤, 戴介泉, 谢成木. 盘型钛合金铸件铸造工艺的优化设计 [J]. 铸造, 2000, 49 (9): 551-553.
- [9] 谢成木. 钛及钛合金铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [10] 张光. 曲面薄壁钛合金铸件变形工艺控制研究 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (3): 77-81.

Numerical Simulation and Experimental Validation Study on Investment Precision Casting of Special-Shaped Thin-Walled Titanium Alloy Casting

YIN Jian-feng^{1,2,3}, LI Feng^{1,2,3}, NAN Hai^{1,2,3}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials 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 100095, China)

Abstract:

The special-shaped thin-walled titanium alloy intake pipe casting was taken as the research object in this paper, combined with digital optical dimension measurement technology for the whole process from wax mold to casting, and the ProCAST numerical simulation software was used to simulate the solidification of the casting. Firstly, without gating system, it was simulated to determine the location of the hot spot of the casting. Secondly, according to the distribution of the hot spot structure, the process design with gating system and iterative optimization of pouring forming simulation were carried out to solve the shrinkage in the hot spot position. According to the simulation results of the optimization design, the experimental production was carried out, and the experimental results were compared with the simulation results. When the size of the 5 auxiliary gates at the upper mounting groove position and the 2 auxiliary gates at the lower mounting groove position were 20 mm in diameter, the simulation results of the intake pipe casting by centrifugal casting solutions showed that the liquid metal flow process was stable and the rapid filling ability was strong, and the shrinkage distribution of two castings on the same module was basically the same. The upper and lower positions each had a shrinkage cavity at the interface position between the auxiliary gate and the casting body, and the other shrinkage cavities were optimized. The simulation results showed that the process design scheme was feasible, and the experimental production results were in good agreement with the numerical simulation results, and the scheme can effectively solve the shrinkage problem in the hot spot position of the casting. The casting forming quality, metallurgical quality and dimension control can achieve the desired results, and the simulation results can effectively guide the development and production of the actual casting.

Key words:

titanium alloy; numerical simulation; process design; shrinkage