

# 高温合金环形件整体铸造工艺设计优化

李朝阳<sup>1</sup>, 刘雅辉<sup>2</sup>, 王国祥<sup>2</sup>, 王 俊<sup>2, 3</sup>

(1. 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司, 贵州贵阳 550000; 2. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240;  
3. 上海中超航宇精铸科技有限公司, 上海 200030)

**摘要:** 以某航空发动机环形件的整体精铸为例, 使用数值模拟技术分析整体精铸工艺的熔体充型、铸件凝固缺陷和尺寸变形等关键问题, 为工艺设计和优化提供理论依据。模拟和试验结果表明: 通过整体浇注既满足了铸件成形需求又保证了铸件尺寸精度。通过冒口保温, 有效控制了铸件缩松缺陷。最后获得了合格铸件。

**关键词:** 高温合金; 熔模铸造; 整体铸造; 工艺设计; 数值模拟

高温合金是制造航空发动机零件的主要材料之一, 具有高熔点、高强度和难成形的特点<sup>[1]</sup>。同时由于航空发动机零件多为薄壁复杂结构, 为了保证产品合格, 传统加工方法多采用多部件机械拼接或拼焊获得一个最终零件, 这种工艺不仅工装模具复杂, 而且产品变形大、尺寸精度差, 同时后续热处理容易引起零件微观组织劣化、力学性能下降<sup>[2-8]</sup>。随着航空发动机性能需求的升级, 一体化设计的航空发动机零件结构更加复杂、尺寸更大、性能要求更高, 因此机械拼接和拼焊工艺无法满足新型航空发动机的发展需求, 而通过整体铸造工艺成形一体化设计的航发零件, 既可以保证产品性能又可以缩短产品制造周期<sup>[9]</sup>。

本文针对某航空发动机高温合金环形件的生产需求, 基于数值模拟, 实现该高温合金环形件整体精铸工艺的设计优化。通过多项措施保证该铸件的质量、精度和性能满足要求, 尝试解决铸件整体精铸工艺中凝固缺陷多、尺寸精度差、材料利用率低的普遍问题, 为航发大型复杂高温合金零件的整体精铸工艺设计提供参考。

## 1 数值模拟方案及参数设置

针对某航空发动机环形件(图1a)的结构特点, 设计相应的整体精铸工艺, 并通过数值模拟技术分析整体精铸工艺的相关问题及解决办法。根据经验设计了该零件的浇注系统及熔模铸造工艺参数。根据铸件和浇注系统模型, 建立仿真模型, 铸件和型壳的网格划分结果分别见图1b、c。该铸件材料为镍基高温合金Inconel 718, 其液相线 $1343.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 固相线 $1262.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 基体组织为 $\gamma\text{-Ni}$ , 弥散强化相为 $\gamma'$ 相和 $\gamma''$ 相<sup>[1]</sup>。陶瓷型壳厚度为 $10\text{ mm}$ 。对冒口进行保温处理以减少铸件凝固缺陷, 具体是在冒口处施加绝热边界条件。模型的整体网格尺寸为 $2\text{ mm}$ 。其他模拟参数设置见表1。合金的化学成分见表2。

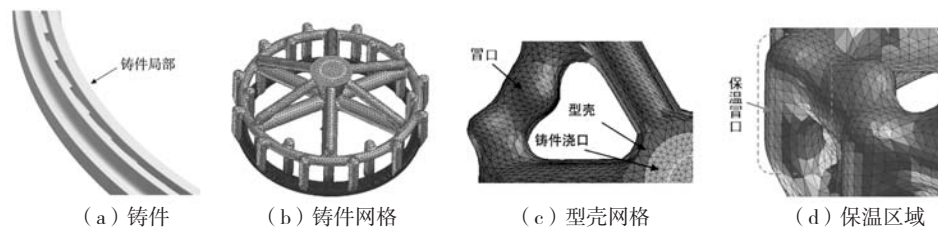


图1 铸件结构及网格图

Fig. 1 Casting structure and grid diagram

作者简介:

李 朝 阳 (1990-), 男, 硕士, 研究方向为金属材料及表面处理。E-mail: 1637347852@qq.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

08-1042-04

基金项目:

国家科技重大专项(2017-VI-0020-0093)。

收稿日期:

2022-08-30 收到初稿,

2022-10-04 收到修订稿。

表1 熔模铸造工艺参数  
Table 1 Parameters of the investment casting process

模拟参数	铸件	型壳
材料	Inconel 718	熔融石英
初始温度/℃	1 480	950
铸件界面传热系数/( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	1 000	
合金浇注速度/( $kg \cdot s^{-1}$ )	2.5	-
热边界条件	空冷	空冷
网格尺寸/mm	2	10
整体网格尺寸/mm	2	-

表2 Inconel 718高温合金化学成分  
Table 2 Chemical composition of Inconel 718 superalloy  
 $w_B/\%$

Al	C	Cr	Fe	Mo	Nb	Ti	Ni
0.5	0.02	18.3	18.9	3	5	0.90	余量

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 整体浇注的充型效果分析

通过模拟可知,该环形件的充型时间为4.259 s,最终获得完整成形的铸件,见图2。由于采用了整体浇注,即浇注合金通过浇注系统快速对铸件进行同时充型,铸件在充型过程中各部位的温度场和速度场的分布相对均匀。该方法的目的是为了减小铸件中的温度梯度、缩短铸件的凝固时间、减少铸件变形。该设计中,内浇嘴在铸件两侧分布,避开了熔体对冲造成的紊乱流动。

### 2.2 冒口保温条件下的凝固缺陷统计分析

冒口在凝固至670 ℃时所需的凝固时间为340 s,

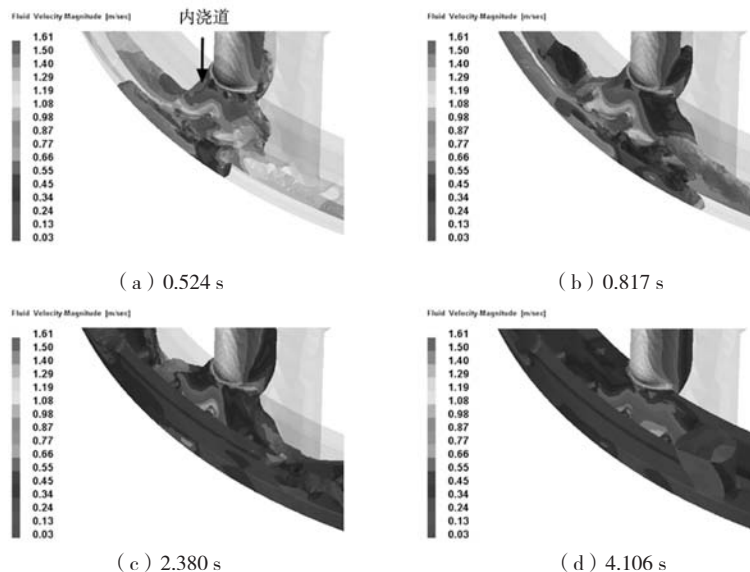


图2 铸件充型过程的速度场分布

Fig. 2 Velocity field distribution in filling process of the casting

铸件的平均温度降为500 ℃左右时所需的凝固时间约为190 s,其温度分布和凝固时间分别见图3a、b。可见,铸件凝固完毕150 s后冒口才凝固完毕,这保证了铸件顶部的补缩。通过冒口保温使局部高温区在冒口中心而非顶部,实际可根据需要调整浇注合金的质量,以调整冒口中心高温区到铸件的距离,进而调整冒口的补缩并避免内浇嘴处出现大体积缩松。冒口保温时型壳的温度分布见图3c,可见在铸件凝固结束时,冒口仍保持较高温度。

凝固后缩松区域主要存在于冒口中,见图3d。对缩松区域进行统计,结果表明:缩松区域总体积为63.792  $cm^3$ ,其中孔洞为5.932  $cm^3$ ,因此孔洞占缩松区域体积的8.279%。除了冒口的大尺寸缩松,实际铸件还会存在显微疏松孔洞。

### 2.3 高温合金精密铸件关键部位变形分析

整体精铸虽然避免了拼焊和机械拼接产生的残余应力和尺寸变形,但由于航空发动机铸件结构复杂、尺寸大,导致整体精铸件的热应力和收缩变形也增大。为了解决这个问题,本研究采用了前文提到的整体浇注和保温冒口两项措施,并合理设计工艺参数,以保证铸件关键部位的尺寸精度。

图4为铸件的等效应力分布,等效应力最大值为94.57 MPa,位于冒口与铸件连接处的圆角。由于铸件基体的应力较小,因此铸件的应力集中水平较低,这有利于减小铸件变形。由于冒口上端为自由端,因此在热应力作用下冒口上端变形量最大(图5a)。铸件关键部位(叶片)的变形量在0.02 mm以内(图5b)。铸件最大变形量位于铸件和冒口的连接部位(图5c、

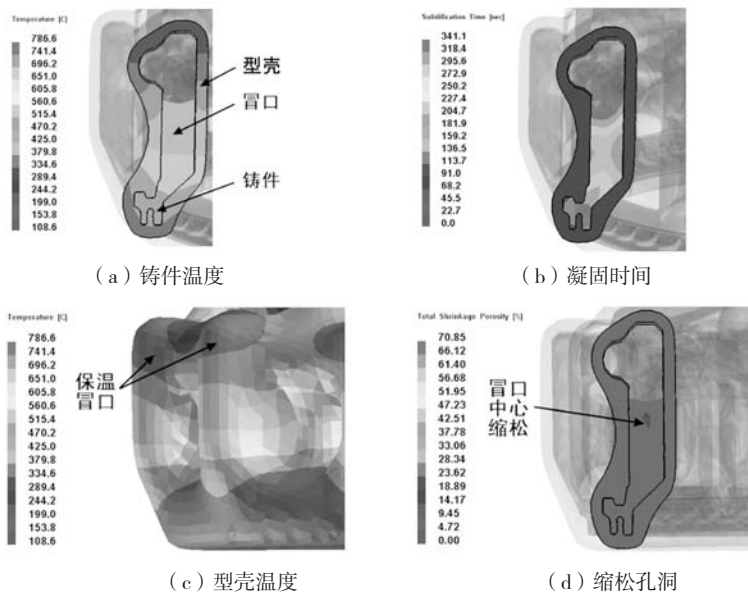


图3 凝固过程设置及结果  
Fig. 3 Setting and result of solidification process

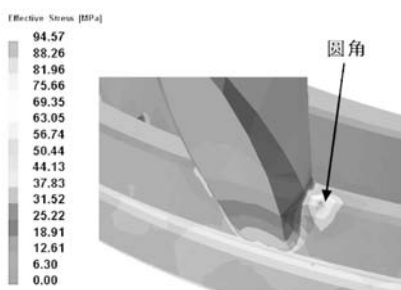


图4 铸件等效应力云图  
Fig. 4 Effective stress contour of the casting

d)。由上可见，通过整体浇注降低了浇注系统变形不均匀对铸件精度的影响。

### 2.4 生产验证和产品验收

根据该高温合金环形件的工艺分析结果，制定其整体精铸工艺，主要的措施包括：（1）采用整体浇注控制铸件的温度梯度，进而控制降低铸件的缩松倾向和尺寸变形倾向，同时达到缩短铸件制造周期的目的；（2）采用保温冒口方式，控制铸件的冷却顺序，将缩松控制在冒口中央，避免铸件产生严重的缩松缺

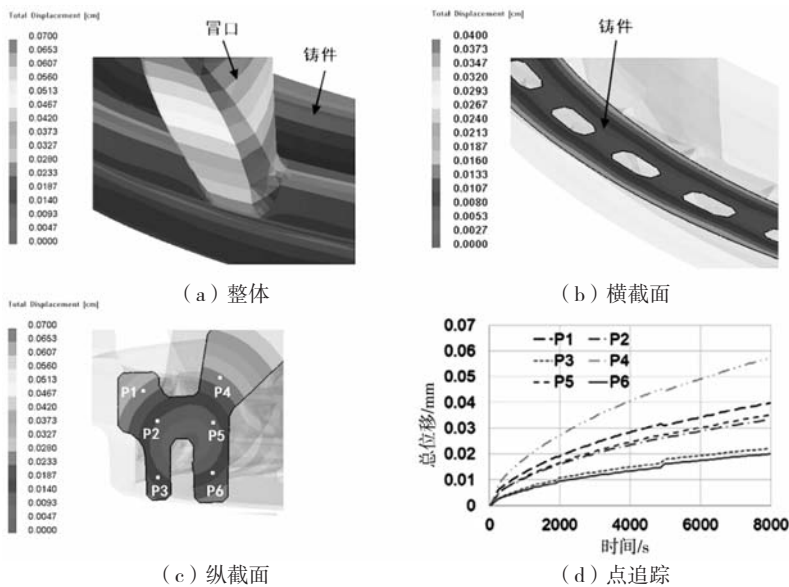


图5 总位移  
Fig. 5 Total displacement

陷, 以达到提高铸件性能的目的。此外, 整体精铸成形实现了该环形件的整体一次成形, 使铸件微观组织和力学性能相对拼焊和机械拼接件更均匀。实际生产的高温合金环形铸件实物见图6, 其金相观察表明铸件微观组织致密(图7)。该铸件各项指标合格。

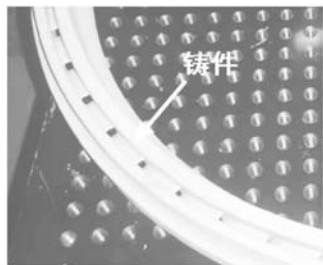


图6 航空发动机高温合金环形整体精铸件  
Fig. 6 Aeroengine superalloy ring integral casting

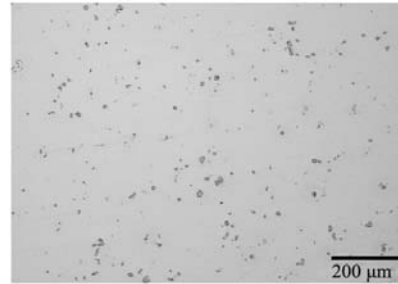


图7 高温合金环形铸件的微观组织

Fig. 7 Microstructure of the superalloy ring casting

前提下, 控制铸件的温度梯度, 使铸件关键部位尺寸变形在0.02 mm以内, 同时节省了铸造时间。

(2) 采用保温冒口方式, 控制铸件的冷却顺序, 避免了铸件产生严重的缩松缺陷, 仅存于冒口的缩松体积约为63.792 cm<sup>3</sup>, 缩松中孔洞体积为5.932 cm<sup>3</sup>, 孔洞体积占缩松体积的8.279%。

(3) 采用整体精铸成形, 实现高温合金环形件一次浇注成形, 保证了铸件组织、性能和精度满足要求。

### 3 结论

(1) 采用整体浇注, 在保证铸件充型100%的前

#### 参考文献:

- [1] 介子奇. 微量元素及熔体处理对K4169高温合金组织和性能的影响 [D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [2] 陈争新. 航空发动机进气机匣焊接组件焊接变形控制技术 [J]. 电焊机, 2021, 51 (12): 56-62.
- [3] 徐林, 于浩, 李健. 某新结构机匣机械加工新工艺研究 [J]. 中国新技术新产品, 2021 (17): 88-90.
- [4] 吴旭刚, 李东岷, 窦远. 某焊接机匣加工方法探析 [J]. 中国新技术新产品, 2021 (22): 64-66.
- [5] 纪春雨. 涡轮机匣焊接数值模拟及控制工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [6] 刘晓娟. 高温合金薄壁机匣焊接应力变形控制及加工工艺优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [7] 高献娟, 黄青松, 王立成, 等. 某发动机双层结构预旋喷嘴精密焊接研究 [J]. 中国新技术新产品, 2014 (1): 114.
- [8] 李蓓, 潘明乐, 李姣. 整流叶片及其整流叶片连接结构: CN209457987U [P]. 2019-10-01.
- [9] 孙宝德, 王俊, 康茂东, 等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势 [J]. 金属学报, 2022, 58 (4): 412-427.

## Design Optimization of Integral Casting Process for Superalloy Ring Component

LI Zhao-yang<sup>1</sup>, LIU Ya-hui<sup>2</sup>, WANG Guo-xiang<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>2,3</sup>

(1. AECC Guizhou Liyang Aviation Power Co., Ltd., Guiyang 550000, Guizhou, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Zhongchao Aerospace Precision Casting Technology Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

#### Abstract:

The integral casting process is the first choice for forming aeroengine parts with integrated design, for example, changing the welded or mechanically connected ring parts into an integral precision casting. Taking the integral investment casting of an aeroengine ring as an example, this paper analyzed the key problems of the integral investment casting process, such as melt filling, casting solidification defects and dimensional deformation, using numerical simulation technology, to provide a theoretical basis for the process design and optimization. The simulation and experimental results showed that the integral casting can not only meet the requirements of the casting forming, but also ensure the dimensional accuracy of the castings. The shrinkage porosity of the casting was effectively controlled by insulating the riser. Finally, the qualified castings were obtained.

#### Key words:

superalloy; investment casting; integral casting; process design; numerical simulation