

基于 ProCAST 的排气机匣熔模铸造数值模拟与优化

陈方桃

(上海汽车集团股份有限公司乘用车公司, 上海 201805)

摘要: 针对排气机匣在熔模铸造过程中的缩孔缩松缺陷与铸件上下法兰处尺寸变形的问题, 采用ProCAST软件对现有排气机匣熔模铸造工艺进行数值模拟分析, 获得铸件缺陷分布, 并优化了其铸造工艺。结果表明, 采用双环底注式浇注系统浇注后, 铸件内部没有缺陷产生, 且铸件的上下法兰变形程度得到改善。

关键词: 熔模铸造; 排气机匣; 浇注系统; 变形

随着现代航天制造技术的发展, 轻量化设计、结构特性复杂、高精度要求已成为国内外航天零部件制造的统一趋势^[1]。排气机匣是航空发动机典型的零部件之一, 其工作环境恶劣且包含较多的薄壁结构, 铸造难度大, 易产生铸造缺陷与尺寸变形^[2-4]。

熔模铸造是一种精密铸造方式, 制备的铸件具有尺寸精度高、表面光滑等优点^[5], 近年来, 随着计算机技术并喷式发展, 数值模拟仿真技术在熔模铸造得以广泛应用^[6-8], 通过温度场、速度场、应力场等变化预测在浇注过程中容易出现缩孔缩松缺陷部位以及铸件尺寸变形程度, 为实际铸件的生产提供了科学的指导^[9-10]。

本文针对排气机匣熔模铸造过程中的尺寸变形问题, 采用ProCAST数值模拟对排气机匣现有工艺下的浇注系统进行应力分析与优化, 采用环状结构将铸件的应力转移, 从而减小排气机匣的尺寸变形, 以期为其实际生产提供指导。

1 试验材料及方法

1.1 排气机匣铸件结构特征

图1为排气机匣的三维模型, 排气机匣整体尺寸: 长440 mm、宽440 mm、高96 mm, 主要是由外环、内环以及支板组成。外环的半径220 mm, 内环的半径108.5 mm, 外环与内环壁厚均为1 mm, 支板的长87 mm, 宽34 mm, 厚度仅0.78 mm, 由于存在大量的薄壁结构, 在铸造过程中容易产生尺寸变形的现象。

1.2 材料设置与边界条件

排气机匣铸件选择浇注的合金为K4169, 表1为K4169合金的化学成分, 该合金具有良好的综合性能, 广泛应用于复杂航天零部件生产铸造。模拟分析的边界条件与初始条件为: 型壳和铸件之间的传热系数为1 000 W/(m²·K), 浇注温度为1 500 °C, 型壳焙烧温度为1 000 °C, 浇注时间为3.5 s, 型壳材料为莫来石, 应力应变设置中将铸件设置为Elasto-Plastic, 型壳设置为Linear-Elastic。

2 原有工艺设计与数值模拟

2.1 浇注系统设计与网格划分

图2为排气机匣浇注系统与网格划分。可以看出, 浇注系统整体高度对称, 类似

作者简介:

陈方桃(1967-), 男, 工程师, 从事汽车钣金件模具设计与制造及车身钣金件的质量管控工作。电话: 18201868669, E-mail: chenfangtao@saicmotor.com

中图分类号: TG249.5
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2022)12-0102-04

收稿日期:

2021-05-17 收到初稿,
2021-07-01 收到修订稿。

八爪鱼形状，分为浇口杯和流道两部分，网格尺寸分别为8 mm和5 mm，铸件网格尺寸为3 mm；由图2还可知，网格单元尺寸分布均匀合理，不存在较大畸变网格，网格过渡处平缓，表明网格质量较好，型壳厚度为6 mm。

2.2 充型过程与缺陷分布

“八爪鱼式”浇注系统的充型过程如图3所示，金属液首先通过浇口杯流入直浇道，通过位于直浇道上下方的横浇道对内外环进行填充，在填充的过程中排气机匣的支板相当于内浇道，将金属液引入外环，整个填充过程较为平稳。

图4为铸件凝固完成后缺陷分布图。可以看出，缺陷的位置不全部分布在冒口和浇口部位，在排气机匣铸件的内外环上分布着大量的缺陷，并且支板上也有少许缺陷，这是由于铸件内外环以及支板壁厚较薄，在短时间内就完成了凝固的过程。

2.3 变形结果分析

图5为采用“八爪鱼”式浇注系统下的总变形量，排气机匣铸件内环的法兰处变形最大，大约在0.5 mm左右，其次为外环的法兰处的变形，变形量大约在0.4 mm左右，内环以及外环法兰处的严重变形将会影响与其他部件的装配。



图1 排气机匣三维模型
Fig. 1 3D model of the exhaust casing



图2 排气机匣浇注系统与网格划分

Fig. 2 Gating system and grid division of the exhaust casing

表1 K4169镍基高温合金化学成分
Table 1 Chemical composition of the K4169 nickel-based superalloy

C	Cr	Co	Mo	Al	Ti	Nb	$w_B / \%$
≤0.10	17.0~21.0	≤1.00	2.8~3.3	0.3~0.7	0.65~1.15	4.4~5.4	

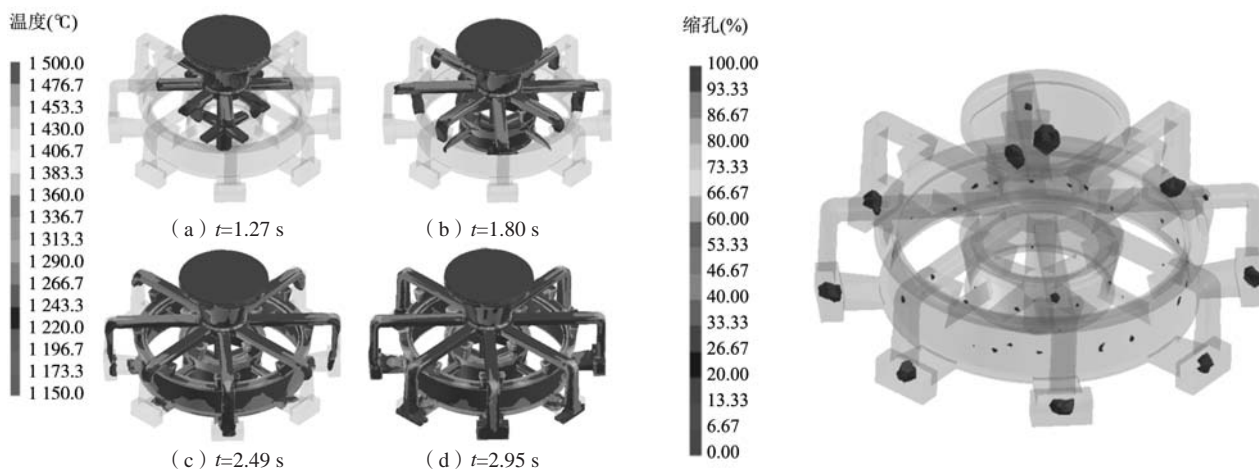


图3 充型过程
Fig. 3 Filling process

图4 铸件缺陷分布
Fig. 4 Distribution of casting defects

3 浇注系统优化

3.1 双环底注式浇注系统

图6为本文设计的一种双环底注式浇注系统，金属液从浇口流入由铸件的底部向上填充，充型过程平稳，金属液在进入型腔后，后续的金属液推动先注入的金属液前进，型腔内的气体容易顺利排出，浇注系统和冒口的金属材料相对于原有的八爪鱼浇注系统得到减少，采用双环的目的是在凝固的过程中将排气机匣外环的变形转移倒上下方的双环上，从而减小排气机匣外环的尺寸变形。

3.2 凝固过程分析

图7为双环底注式浇注系统的凝固时间分布。可以看出，排气机匣铸件完成凝固过程中，上下方的环形浇道与冒口较晚凝固，能够很好地对铸件进行金属液的补充，解决缩孔缩松的问题，采用双环底注式浇注系统对排气机匣铸件整体实现了顺序凝固。

图8为采用双环底注式浇注系统的凝固过程，内外环壁厚较薄最先凝固，双环结构以及上下方的冒口能有效对铸件内环以及外环的法兰处进行补缩，整个过程没有孤立相的产生。图9为凝固过程完成后排气机匣的缺陷分布，缺陷全部集中于浇注系统中，铸件内部没有任何缺陷分布。

3.3 变形结果分析

图10为采用双环底注式浇注系统进行浇注后的

总变形量，采用双环的设计有效改善了排气机匣内外环法兰处的变形，内环法兰处的变形量降至0.2 mm左右，外环法兰处的变形量降至0.32 mm左右，将大部分应力转移至双环上，导致环形浇道变形较大，有效减小铸件尺寸变形，改善了铸件内外环的圆度，图11为实际生产排气机匣铸件，铸件圆度得到有效改善。

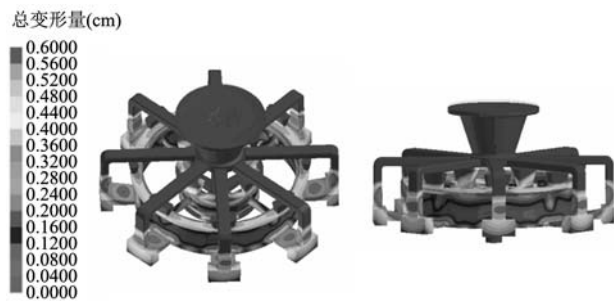


图5 八爪鱼式浇注系统总变形量

Fig. 5 Total deformation of the octopus gating system

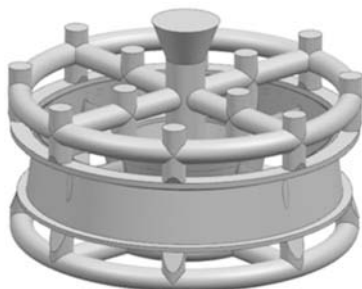


图6 双环底注式浇注系统

Fig. 6 Double-ring bottom pouring system

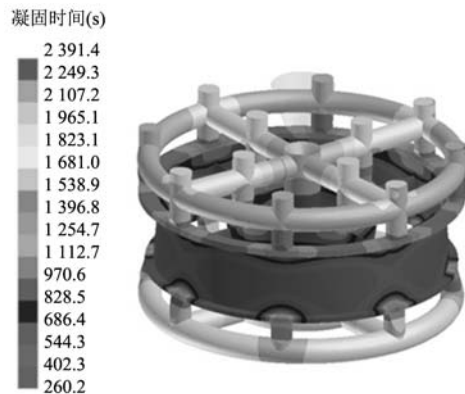


图7 双环底注式浇注系统凝固时间分布

Fig. 7 Solidification time distribution of the double-ring bottom-cast gating system

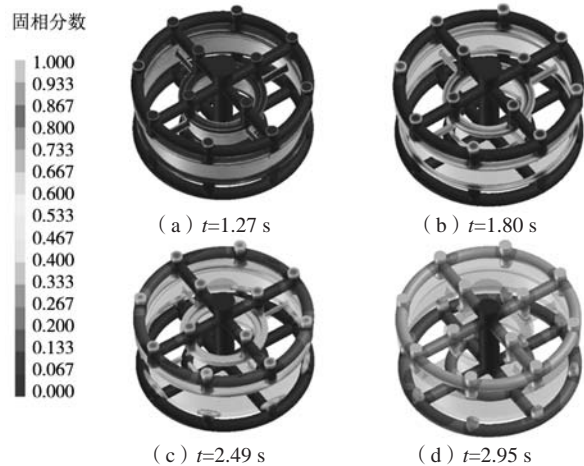


图8 双环底注式浇注系统凝固过程

Fig. 8 Solidification process of the double-ring bottom pouring system

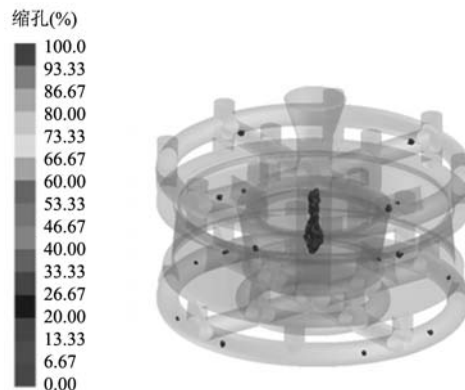


图9 双环底注式浇注系统缺陷分布

Fig. 9 Defect distribution of the double-ring bottom injection gating system

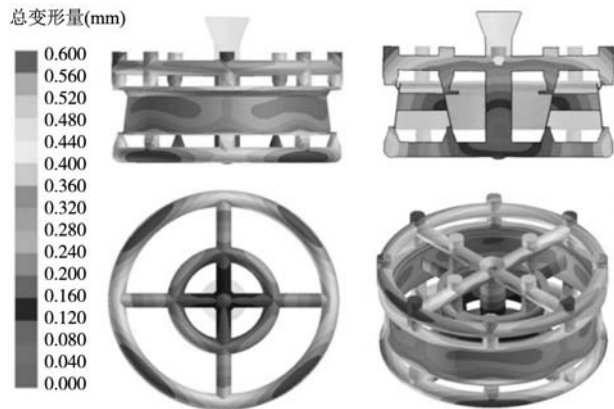


图10 双环底注式浇注系统总变形量

Fig. 10 Total deformation of the double-ring bottom casting gating system

4 结论

(1) 采用ProCAST软件对K4169镍基高温合金浇注的排气机匣铸件进行熔模铸造数值模拟, 分析得出

现有“八爪鱼式”浇注系统浇注机匣铸件时, 产生缺陷的原因及缩松缩孔分布特征。

(2) 采用双环底注式浇注系统, 解决了原有工艺中铸件薄壁处容易产生缩孔缩松缺陷的问题, 并通过上下环形浇道减少了排气机匣的尺寸变形, 经实际生产排气机匣铸件验证, 铸件圆度得到有效改善。

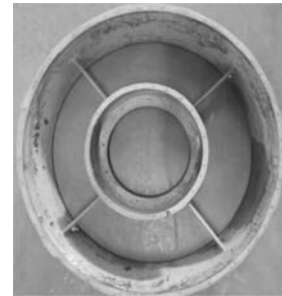


图11 排气机匣铸件

Fig. 11 Exhaust casing casting

参考文献:

- [1] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (9): 38-52.
- [2] 李飞, 赵彦杰, 李玉龙, 等. 钛合金中介机匣快速熔模铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (6): 637-639.
- [3] 刘为亮, 寇佐, 陆加见. 燃气轮机发动机机匣铸造工艺设计及质量控制 [J]. 大型铸锻件, 2018 (5): 1-3.
- [4] 范文龙. K4169合金双环薄壁机匣熔模铸造工艺研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [5] 沈昀, 郑功, 冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (1): 54-62.
- [6] 冉兴, 吕志刚, 曹建, 等. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 139-146.
- [7] 谭诗薪, 郝新, 胡兵, 等. 离心泵壳体精密铸造数值模拟研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (7): 770-773.
- [8] 王晋忠, 杨国超, 杨小建, 等. 基于ProCAST的座圈熔模铸造工艺数值模拟及优化 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (3): 64-66.
- [9] 崔新鹏, 刘建伟, 王红, 等. 钛合金精密铸造型壳力学参数与应力模拟 [J]. 铸造, 2020, 69 (5): 506-509.
- [10] 王晓明. K435高温合金叶片凝固过程与应力数值模拟及铸造工艺优化 [D]. 哈尔滨工业大学, 2018.

Numerical Simulation and Optimization of Investment Casting for Exhaust Casing Based on ProCAST

CHEN Fang-tao

(Saic Motor Corporation Limited Passenger Vehicle Co., Shanghai 201805, China)

Abstract:

Aiming at the problems of shrinkage and porosity of the exhaust casing in the investment casting process and the size deformation of the upper and lower flanges of the casting, this paper used ProCAST numerical simulation software to analyze the temperature field and solidification process under the existing process, and the defect distribution was obtained. Moreover, the casting process of the exhaust casing was optimized. The results show that after the double-ring bottom pouring system was poured, there is no defect inside the casting, and the deformation degree of the upper and lower flanges of the casting was improved.

Key words:

Investment casting; exhaust casing; gating system; deformation