

计算机应用

基于ProCAST的大型复杂空心叶片 精铸的数值模拟

孙长波¹, 周君华¹, 尚 伟³, 张世军², 郭海波², 李 波¹, 张鑫佳¹, 许庆彦³

(1. 中航工业沈阳黎明航空发动机集团有限责任公司, 辽宁沈阳 110043; 2. 抚顺新钢铁有限责任公司, 辽宁抚顺 113001; 3. 清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 重型燃气轮机的叶片尺寸厚大, 形状复杂, 叶身部位为空心的曲面薄壁结构, 铸件极易出现缩孔、疏松缺陷。为改进其工艺方案, 利用铸造模拟软件ProCAST对大型复杂空心叶片铸件铸造过程的温度场、流场及固相分数的分布情况进行了模拟, 对大型复杂空心叶片的型壳预热温度进行了优化; 通过采用980 ℃的高温型壳预热, 实现了大型复杂薄壁叶片的顺利充型。模拟结果预测的缩孔、疏松形成的位置与实际浇注结果十分吻合, 采取改进措施后, 铸件一次浇注成功, 消除了缩孔、疏松缺陷。

关键词: 数值模拟; 空心叶片; 精密铸造; 缩孔缩松; ProCAST

中图分类号: TG249.5; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2012) 09-1026-05

Numerical Simulation of Investment Casting of Large Complicated Hollow Blade by ProCAST

SUN Chang-bo¹, ZHOU Jun-hua¹, SHANG Wei¹, ZHANG Shi-jun², GUO Hai-bo²,
LI Bo¹, ZHANG Xin-jia¹, XU Qing-yan³

(1. AVIC Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation Ltd., Shenyang 110043, Liaoning, China;

2. Fushun New Stell Corporation Ltd., Fushun 113001, Liaoning, China;

3. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Due to large size, thick wall, complex shape and hollow of the heavy duty gas turbine blade, shrinkages and porosity easily appeared in the blade. To optimize the casting process, the liquid flow, temperature field and mushy zone evolution in the large complicated hollow blade were simulated on the basis of casting software ProCAST. The preheating temperature of shell was optimized. By shell preheating at 980 ℃, the large complicated hollow blade was filled soundly. The simulated results of positions of shrinkage and porosity agreed well with the experiment. After the process optimization, a blade without shrinkages and porosity was successfully produced by pouring once.

Key words: numerical simulation; hollow blade; investment casting; shrinkage and porosity; ProCAST

重型燃气轮机在能源方面具有重要的战略意义和现实意义。叶片是燃气轮机的核心部件, 其尺寸大, 结构复杂, 叶身部位具有复杂内腔和带孔的薄壁, 很容易出现缩孔、缩松。如果通过多次工艺试验来改进工艺, 将浪费大量的时间和昂贵的材料。

铸造的充型和凝固过程是看不到的, 人们常说“睁眼造型, 闭眼浇注”^[1]。计算机模拟技术的应用为人们认识铸造充型和凝固过程提供了新的手段, 人们可以预测缩孔、疏松、热裂及显微组织, 从而优化铸造工艺设计, 以确保铸件的质量, 缩短试制周期, 降

低生产成本^[2-3]。铸件充型凝固的计算机模拟是学科发展的前沿领域, 是改造传统铸造产业的必由之路^[4]。模拟工作对优化铸造工艺参数、降低试验成本、改善铸件质量、缩短生产周期和提高成品率有重要的意义^[5]。

在本研究中, 以重型燃机大型复杂空心叶片铸件为载体, 利用UG软件建立其三维模型, 采用铸造凝固模拟软件ProCAST对其热成形过程进行了模拟, 对铸件充型及凝固过程进行了跟踪, 能够直观地观察整个凝固过程, 掌握凝固各时段的物理变化, 使其以三维形式真实、直观地展现出来; 在此基础上, 结合缩孔、

基金项目: 难加工航空零件的数字化制造基础研究 (973计划2011CB706801)。

收稿日期: 2012-07-16收到初稿, 2012-07-22收到修订稿。

作者简介: 孙长波 (1978-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事熔模铸造及其计算机数值模拟技术研究。电话: 024-24830730,

E-mail: sunchangbo@126.com

疏松产生机理与预测判据, 对其进行缺陷预测, 同时提出了改进工艺方案并一次浇注成功。

1 物理模型

1.1 三维结构

研究的铸件为大尺寸、壁厚不均匀无余量精铸件, 叶片全高约250 mm, 叶片铸件重约6.6 kg, 无余量铸造, 叶片内腔为大型交错网格状结构(图1b), 结构极其复杂, 铸造工艺难度大, 易出现缩孔、疏松。选用的材料是K4104镍基铸造高温合金, 单台数量48片。叶片采用顶注法单壳真空浇注。根据实际工艺情况对叶片的几何形状及浇冒口系统进行UG建模(三维CAD造型), 其三维CAD造型如图1所示。

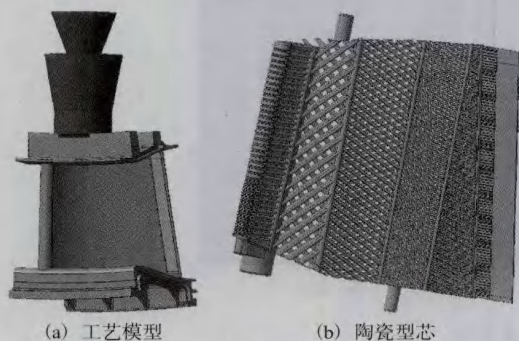


图1 叶片的三维CAD造型

Fig. 1 Three dimensional CAD model of the blade

1.2 材料的热物性参数

叶片材料采用K4104镍基合金, 热物性参数见表1, 型壳及陶瓷型芯材料采用莫莱石, 热物性参数在ProCAST软件数据库中选取。

表1 K4104合金热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of K4104 superalloy

温度/℃	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
室温	8.75	411
100	10.2	428
200	12.1	451
300	14.1	474
400	16	496
500	17.8	519
600	19.6	541
700	21.2	564
800	22.8	587
900	24.2	609
1 000	25.4	632

1.3 浇注工艺参数设置

按照实际浇注情况确定重力加速的方向(此处为Z轴方向), 型壳预热温度为980℃, 浇注温度为1480℃, 运行参数采用重力浇注默认设置, 终止计算的条件设置为冷却到850℃。

2 数学模型

2.1 缺陷判据

充型过程流场计算的同时耦合温度场计算, 在充型完成后, 近似认为液体不再流动, 继续求解温度场, 计算铸件各个位置的固相率。

计算过程中, 根据每一点瞬时的温度和固相率计算体积收缩量。采用基于Darcy定律发展的宏微观耦合缩孔、缩松模型^[6], 其控制方程:

$$\operatorname{div}\left[-\rho_l \frac{K}{\mu}(\operatorname{grad} p_l - \rho_l g)\right] - \rho_l \frac{\partial g_p}{\partial t} = -(\rho_s - \rho_l) \frac{\partial g_p}{\partial t} - (1 - g_s - g_p) \frac{\partial \rho_l}{\partial t} - g_s \frac{\partial \rho_s}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ρ_l , ρ_s 为液体、固体密度, kg/m³; K 为枝晶间渗透率, m²; g 为重力加速度, m/s²; p_l 为压强, Pa; g_s 为固体体积分数, 无量纲; g_p 为孔隙体积分数, 无量纲; t 为时间, s。通过凝固结束时各个部位 g_p 的大小就可以判定各个位置缩孔缩松形成的趋势。

2.2 界面换热系数

此处的界面换热包括三部分, 即型壳与型芯、合金与型壳、合金与型芯, 其赋值分别为 $h_1=100$ W/(m²·℃), $h_2=500$ W/(m²·℃), $h_3=500$ W/(m²·℃)。

2.3 表面边界条件

边界条件包括型壳与炉壁的对流、辐射换热, 浇注温度, 液流横截面积, 浇注速度, 及位移约束等, 其赋值略。

2.4 网格划分

将图1所示的三维模型导入ProCAST进行网格划分。该件采用熔模精密铸造法, 模拟中考虑到实际型壳的形状, 在铸件外生成一个均匀的12 mm厚的型壳。采用真空热壳浇注, 型壳温度很高, 必须考虑型壳与铸型室壁的辐射换热^[7]。三维工艺模型(包括型壳)的体网格(共500多万个四面体单元)见图2。

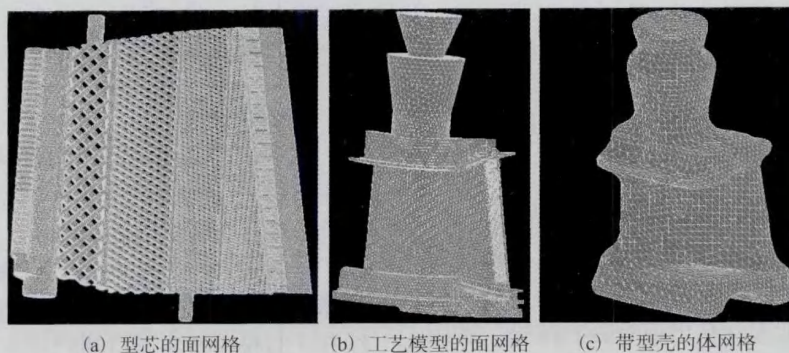
3 模拟结果及分析

3.1 充型过程的流场及温度场分布

图3右侧色标表示温度数值的大小, 可以看出: 金属液浇注到浇口杯后, 液态金属首先充满整个直浇道, 依靠金属液在直浇道中产生的静压力, 依次由铸型上部两侧向铸型底部引入合金液成形, 整个充型过程完成需10 s。

3.2 充型过程的速度场分布

图4右侧色标表示该速度数值的大小, 图中白色箭头表示该时刻的速度方向。在图的右上侧标示出该时刻的速度值。液流进入叶身后, 其液流分为左右两股流速大的部分, 这与型芯对液流的阻滞作用有关。



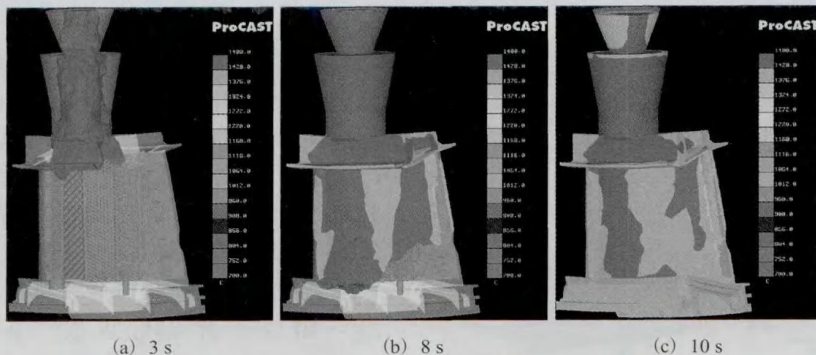
(a) 型芯的面网格

(b) 工艺模型的面网格

(c) 带型壳的体网格

图2 网格剖分结果

Fig. 2 Result of mesh division



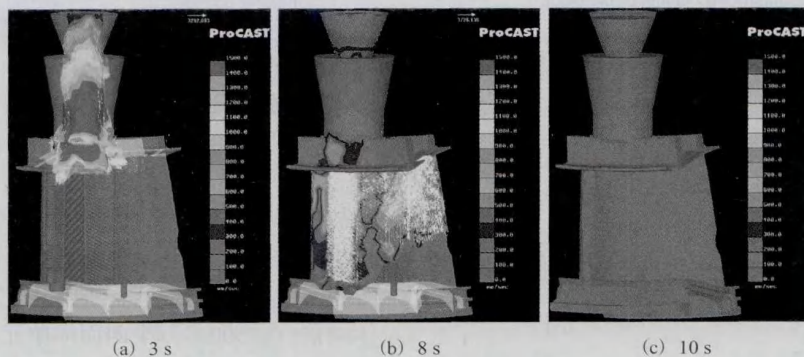
(a) 3 s

(b) 8 s

(c) 10 s

图3 充型过程中的液流及温度场

Fig. 3 Flow and temperature fields during filling



(a) 3 s

(b) 8 s

(c) 10 s

图4 充型过程中的速度分布

Fig. 4 Velocity distribution during filling

3.3 凝固过程的温度场分布

图5中铸件在凝固阶段不同时刻的温度场分布是一个动态的非均匀分布,各处的温度分布存在明显的差异,由外向内形成一个“8”字形区域,该区域温度较高,这会对后续的凝固产生重要的影响。

由于该叶片型腔复杂,且壁厚不均匀,考虑到顶注工艺,因此不同的型壳温度对充型过程影响很大,型壳温度直接影响到铸件的成形和铸件质量。模拟中分别采用700℃、800℃及900℃的型壳温度,经过对充型凝固过程模拟结果进行对比分析后发现,当型壳温度为700℃时金属液在临近充满铸型前,在铸件某

些部位发生凝固,从而影响后续金属液的流入,容易产生浇不足现象。当型壳温度高于900℃时,见图6a,由固相分数模拟结果可看出,当铸件充型结束时,薄壁叶片还没有固相出现,不会出现因为铸件某些部位先凝固而影响后续金属液的注入从而产生浇不足这种缺陷。因此,选择在此型壳温度以上进行浇注(980℃),实现了大型复杂空心叶片的顺利充型。

3.4 凝固过程的固相分数分布

图6为铸件在凝固过程的固相分数分布情况。铸件在凝固的末期,在“8”字形区域,即铸件的下部(接近大缘板处)出现孤立“液带”,将会出现缩孔、缩

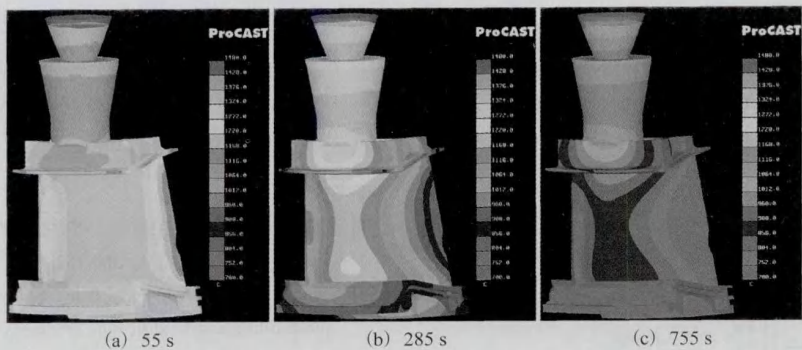


图5 凝固过程中的温度场

Fig. 5 Temperature field during solidification

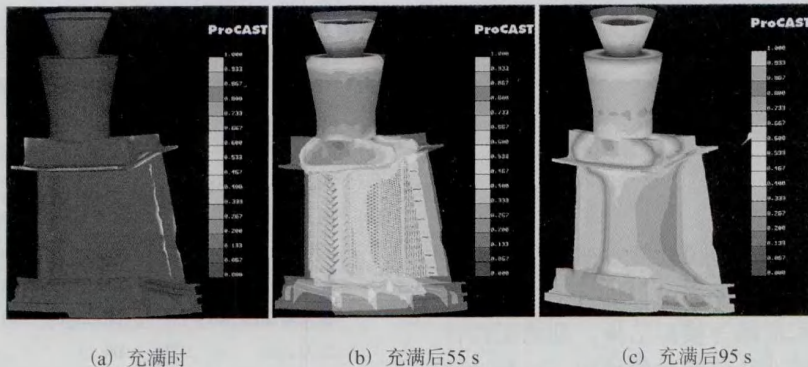


图6 凝固过程中的固相分数 (大于0.5)

Fig. 6 Solid fraction during solidification

松,这与上面的温度场分析结果一致。

3.5 缺陷预测

根据对大型复杂空心叶片铸件成形过程有关物理场的数值模拟结果,可以对其各部位的缩孔、缩松进行预测。图7中圆圈区域中有部位判据数值大于产生缩孔、缩松的临界值(对于等轴晶铸造高温合金,据经验选择0.2),该部位将产生缩孔、缩松。其他彩色区域,判据数值小于产生缩孔、缩松的临界值,这些部位将不会产生缩孔、缩松的倾向。模拟后的预测结果显示:叶片铸件靠近大缘板及进气边的叶身部位、大缘板与叶身交接处存在不同程度的缩孔、缩松缺陷(如图7中圆圈部分),这与上面分析的结果一样,该铸

件的实际浇注结果与模拟结果十分吻合。图8是叶片实际浇注时缘板及进气边的叶身部位的缩孔、缩松缺陷的实物解剖,实际缺陷出现的位置与计算的非常吻合。

3.6 改进后的工艺方案

根据模拟及实际浇注结果,大缘板与叶身交接处有热节,导致缩孔、缩松,因此,需要对原有方案进行改进,加快此处的凝固,实现自下而上的顺序凝固。增大浇口杯直径及高度;增加直浇道的直径、斜度及高度;在型壳外表面包上保温毡,由下向上逐层增厚,大缘板的凹坑部位用铁丸涂料填平,如图9,这样一来增加了冒口的补缩长度,实现了顺序凝固。实际浇注证明,该法消除了铸件的缩孔、缩松缺陷。

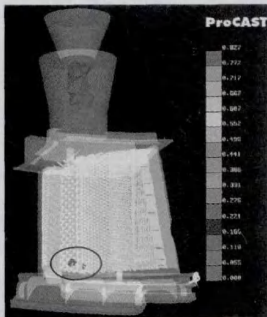


图7 叶片铸件的缺陷预测

Fig. 7 Prediction of defects in the blade

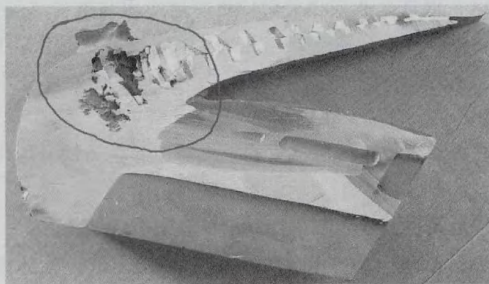


图8 叶片铸件缺陷的实物解剖

Fig. 8 Section of experimental casting defects in the blade

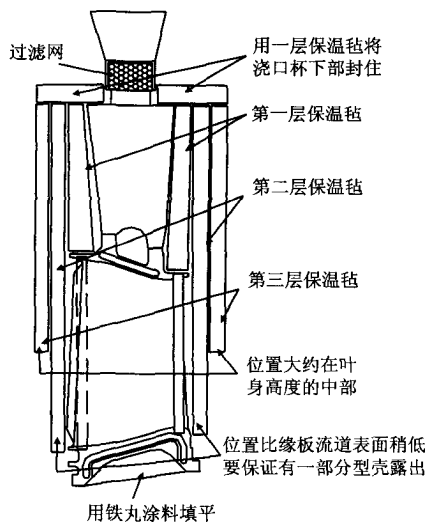


图9 改进后的方案
Fig. 9 Optimized process

4 结论

(1) 采用ProCAST铸造模拟软件对镍基合金大型复杂空心叶片铸件的充型及凝固过程进行了模拟, 根据充型过程、温度场和流场等模拟结果, 预测了铸件中与充型过程有关的铸造缺陷发生的部位, 且与试验结果基本相符。

(2) 基于数值模拟进行精铸工艺参数的优化, 得到了满足充型条件的适宜型壳温度。经过改进优化后

一次浇注成功, 消除了铸件的缺陷, 从而可以以模拟结果为依据对制订熔铸工艺参数进行优化, 这不仅缩短了制造周期, 节约了开发成本, 而且提高了产品质量及生产效率。

参考文献:

- [1] 李殿中, 康秀红, 夏立军, 等. 可视化铸造技术的研究与应用 [J]. 铸造, 2005, 54 (2): 148-152.
- [2] Xiong Shoumei, Liu Baicheng. Study on numerical simulation of mold-filling and solidification processes of shaped casting [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 1999, 12 (1): 4-10.
- [3] Liu Baicheng, Qiu Wei, Shen Houfa, et al. Study and application of mold filling simulation of shaped casting [J]. Mater. J. Sci. Technol., 1997, 13: 313-322.
- [4] 熊守美, 柳百成, 许庆彦, 等. 铸件充型凝固过程数值模拟研究 [J]. 现代铸铁, 2002 (1): 16-20.
- [5] 薛祥, 尹成明, 周彼德, 等. 镍基合金精铸叶片充型及凝固过程的数值模拟 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2002, 7 (1): 43-46.
- [6] Pequet Ch, Gremaud M, Rappaz M. Modeling of microporosity, macroporosity, and pipe-shrinkage formation during the solidification of alloys using a mushy-zone refinement method: applications to aluminum alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33 (7): 2095-2106.
- [7] John S Tu, Foran R Kelly. An integrated procedure for modeling investment castings [J]. JOM, 1995, 47 (10): 64-68.

(编辑: 潘继勇, pjy@foundryworld.com)

全国铸造喂丝球化处理技术学习班预通知

长期以来我国大部分铸造企业都采用敞口包冲入法球化处理, 镁吸收率低, 镁光、烟尘大, 不仅影响环保而且造成球铁质量波动。铸造行业准入条件和铸造行业发展规划已将敞口包冲入法球化处理列入限制使用和逐渐淘汰的工艺。喂丝球化处理是先进的球化处理方法之一, 能有效克服敞口包冲入法处理的许多弊端。

为了帮助企业掌握喂丝球化处理技术, 促进企业全面提高产品质量、降低生产成本、消除环境污染, 以及减轻操作工人劳动强度, 克服铸造技术人员和工人在认识上存在的许多误区, 促进企业或相关单位更好地应用与推广这项技术, 中国机械工程学会铸造分会铸铁及熔炼技术委员会拟于2013年元月在哈尔滨市举办“全国铸造喂丝球化处理技术学习班”。

主办单位: 中国机械工程学会铸造分会铸铁及熔炼技术委员会、哈尔滨理工大学、哈尔滨铸造学会

承办单位: 哈尔滨科德威冶金股份有限公司

办班时间: 2013年1月14-17日 (哈尔滨国际冰雪节期间, 暂定)

学习费用: 为减轻企业负担, 费用尽可能低, 只收取资

料、参观交通、会议室费等; 学员食宿自理。

注意事项: 本学习班限额60名, 以报名回执先后为序, 人满为止。凭报名回执发正式通知。(未进入第一期学习班人员, 第二期学习班另行通知)

联系方式:

联系人: 张忠仇

电话: 0371-67983208, 67991701 (传真)

手机: 13526763230

电子信箱: zhangzhongchou@126.com;

联系人: 吴玉彬

手机: 13703617015

电子信箱: wuyubin@126.com;

联系人: 吴荷生

电话: 0451-84348468, 84348469 (传真)

手机: 13703617037

电子信箱: wuhesh@126.com

中国机械工程学会铸造分会
铸铁及熔炼技术委员会