

精密铸造大型蜡模成形过程的数值模拟

崔新鹏, 李 峰, 蔡诗雅, 张爱斌, 南 海

(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)

摘要: 基于Moldflow软件对某大型复杂蜡模的成形过程进行了数值模拟, 并在同等工艺条件下通过注蜡试验评价计算准确性。选用的KC4017B造型蜡具有非牛顿流体特征。计算结果表明, 流体前沿在行进至内环面时出现了明显停滞, 流动前沿温度突然降低, 形成12处充填不足的区域。试验蜡模在相同位置也出现了充填不足的孔洞, 验证了数值模拟的准确性。

关键词: 数值模拟; 大型蜡模; 成形过程; 充填不足

熔模铸造通常是用易熔材料(蜡料、塑料)制成模样, 在模样表面覆盖耐火材料制成型壳, 经过脱蜡和高温焙烧后进行浇注的铸造方法^[1]。采用精密铸造技术生产的钛合金铸件尺寸精度高、表面质量好, 因此在航空航天、汽车制造、化工等领域得到广泛应用^[2-3]。作为熔模铸造的第一步, 研究指出蜡模尺寸和表面质量会被最终产品所继承, 20%~70%的产品缺陷由蜡模不合理引起^[4-6]。传统上采用试错法设计压蜡工艺, 耗费大量成本和时间, 且难以获得最优方案。近年来数值模拟技术不断发展, 已成为铸造工艺设计的有力工具^[7-8]。然而不足的是, 蜡料与金属有着截然不同的物理特性, 数值模拟常用于金属充型凝固过程, 针对蜡料充填过程的数值模拟研究较少, 对于大型复杂蜡模成形过程的数值模拟与工程验证更是很少有学者报道^[9-10]。本研究以某大型结构件蜡模为研究对象, 借助Moldflow软件对注蜡过程进行计算, 分析蜡模成形过程和缺陷, 并通过工程试验评估数值模拟结果的准确性。

1 试验方法

试验蜡模为带有支板的中介机匣, 如图1所示。外轮廓尺寸为 $\Phi 920$ mm \times 231 mm, 共有2个环面和5处厚大法兰, 环面间由12处支板相连。流道系统由1个注蜡口、12个均布的横浇道和36个均布的内浇道组成, 直径分别为10 mm、18 mm和18 mm。铝制模具的外形轮廓为 $\Phi 1\ 100$ mm \times 400 mm。充填蜡料是Paramelt公司提供的KC4017B型蜡, 其环球软化点为64.4 °C。试验在MPI-150t压蜡机上开展, 注蜡口位于模具下端, 压蜡工艺参数为注射流量220 cm³/s, 射蜡嘴直径8 mm, 蜡料温度65 °C, 模具初始温度25 °C, 环境温度23 °C, 保压压力1 MPa, 保压时间300 s。

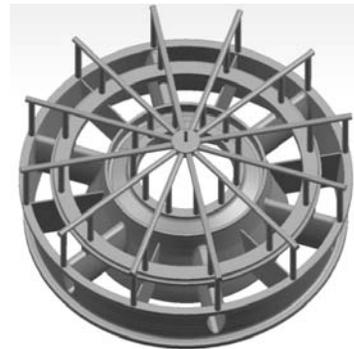


图1 蜡模及其浇道模型

Fig. 1 Model of the wax pattern and its gating system

2 数值模拟前处理

首先, 采用CAD软件绘制蜡模三维实体模型, 然后, 将蜡模的三维数模导入Moldflow软件, 使用软件网格划分模块产生蜡模模型3D网格, 网格边长为4 mm, 网格单元总数约120万。设置分析序列为填充+保压, 计算蜡模成

作者简介:

崔新鹏(1988-), 男, 硕士生, 工程师, 主要从事钛合金精密铸造及其数值模拟研究工作。电话: 010-62498437, E-mail: cuixinpeng123@126.com

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)09-1150-04

收稿日期:

2021-11-10 收到初稿,
2022-02-28 收到修订稿。

形过程蜡料充填、凝固、收缩等物理变化。蜡模材料选择KC4017B蜡料，其热物性参数值如表1所示，液态KC4017B蜡料属于非牛顿流体，其粘度随温度和剪切速率而变化^[12]，如图2所示。模具材料选择Moldflow材料库中的A1铝，设置为刚性体，其热物性参数如表2所示。模具与蜡料之间的换热系数设置为 $5\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

表1 KC4017B蜡料的热物性参数

Table 1 Thermo-physical parameters of the KC4017B wax

熔体密度 / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	固体密度 / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	比热容 / $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热导率 / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
0.86	1.00	2 468	0.20

表2 A1铝的热物性参数

Table 2 Thermo-physical parameters of the A1 aluminium

密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	比热容/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热导率/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
2.8	880	190

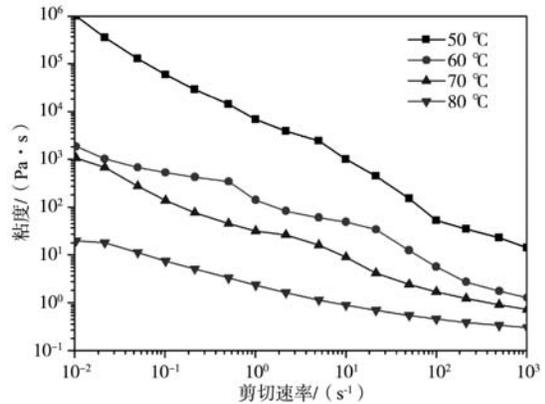


图2 KC4017B蜡料粘度曲线

Fig. 2 Viscosity curves of KC4017B wax

在模型注蜡口处设置入流边界，工艺参数设置与实际压蜡试验参数相同，勾选重力影响和惯性影响，其余采用默认设置。

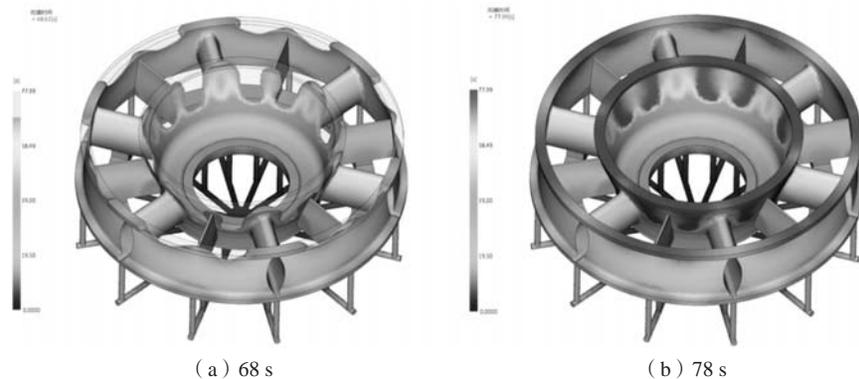


图3 蜡料充填时间数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of wax material filling time

3 结果与分析

蜡料充填时间的数值模拟结果如图3所示。高粘度的蜡料流体在注射口处喷射进入模具型腔内部，由横浇道分流后从内浇道进入产品本体区域，流动前沿形成凸起界面，无飞溅，总充填时间约为78 s。流动动画显示在内环面部位，流动前沿在行进至支板两侧时出现了明显停滞，蜡料在此处不再流动，形成12个局部成形不足的区域，在流动模拟完成后显示为局部异常色。对于外环、支板等其他部位，蜡料由下往上充填完整。

为了分析内环充填不足的原因，可以观察流动前沿温度分布情况，如图4所示。在蜡料充填过程中，通常是靠近注射口位置的蜡料温度较高，但同时会受到局部壁厚的影响。可以看到支板两侧的内环环面是蜡料前沿温度最低的区域，当充填到此位置时，蜡

料温度下降至 $49\ ^\circ\text{C}$ ，已达到其玻璃化转化温度，不再具有流动性。图4中圈定的区域与图3中的最后充填区域相对应，说明此处壁面较薄，蜡料降温迅速，前沿温度过低容易导致蜡料充填不足缺陷。

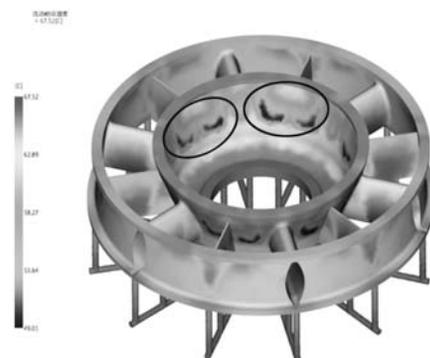


图4 蜡料流动前沿温度

Fig. 4 Flow front temperature of the wax material

压蜡试验获得的实际结构件蜡模如图5所示。观察实际蜡模的成形情况,发现在支板两侧的内环部位出现了充填不足缺陷,形成大孔洞。由于试验具有更大的随机性,孔洞数量共10处,相互之间的形态和大小也略有差别,但试验中的孔洞位置与数值模拟结果基本一致,且形态与图4中圈定的区域大致吻合,验证了数值模拟的准确性和实用性。

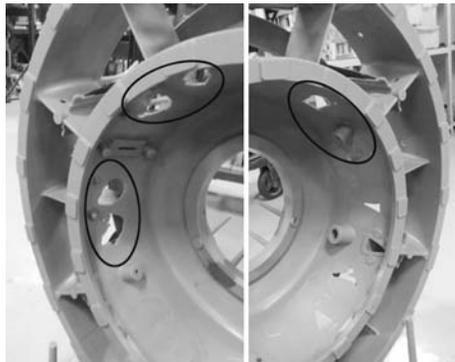


图5 试验蜡模的充填不足缺陷

Fig. 5 Insufficient filling defects of the experimental wax pattern

在改进方案中,将注射速率从 $220\text{ cm}^3/\text{s}$ 提高至 $470\text{ cm}^3/\text{s}$,其余参数不变。数值模拟结果显示,充填时间由 78 s 缩短至 33 s ,说明蜡料能更快地流动至内环并完成充填,流动前沿温度的最小值由 $49\text{ }^\circ\text{C}$ 提高至 $58\text{ }^\circ\text{C}$,相比于 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 的注射温度仅下降了 $7\text{ }^\circ\text{C}$,显著高于此蜡料的玻璃化转变温度,充填过程顺利,确保了蜡模成形完整,如图6所示。结果表明,适当提高注射速率能够缩短蜡料充填时间,提高蜡料流动前沿温度,消除充填不足缺陷。

在实际压蜡过程中,蜡缸内蜡料温度通常保持不变,能调节的工艺参数包括注射速率、注射压力和



图6 改进方案的蜡料流动前沿温度

Fig. 6 Wax flow front temperature of the improved scheme

保压时间。本次改进方案中,适当提高注射速率,减小蜡料与模具型腔内的流动时间,可以达到提高蜡料前沿温度的目的,而且不引起流痕等其他缺陷。适当增大注射压力能增大蜡料充填的动力,从而提高成形性,但过高的注射压力容易导致蜡料飞溅。改变保压时间一般来说不影响蜡料流动阶段的完整性。

按照上述数值模拟的改进方案进行了注蜡试验,获得的蜡模成形完整,无充填不足缺陷,证实了数值模拟是优化蜡模制备工艺的有效手段。

4 结论

(1) 针对某大型机匣蜡模充填时间的数值模拟结果显示,蜡料流体前沿在进行至内环环面时出现了明显停滞,流动前沿温度突然降低,形成12处充填不足的区域,与试验蜡模中出现的孔洞位置和形态吻合,验证了数值模拟结果的准确性。

(2) 适当提高注射速率能够缩短蜡料充填时间,提高蜡料流动前沿温度,消除充填不足缺陷。

参考文献:

- [1] 贾清,崔玉友,杨锐.钛合金精密铸造用陶瓷模壳研究[J].金属学报,2004,40(11):1170-1174.
- [2] 苏鹏,刘鸿羽,赵军.钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状[J].铸造,2012,61(12):1401-1404.
- [3] SABAUA S. Alloy shrinkage factors for the investment casting process [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2006, 37(1): 131-140.
- [4] ZHANG D H, JIANG R S, LI J L. Cavity optimization for investment casting die of turbine blade based on reverse engineering [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48: 839-848.
- [5] MOORWOOD G, CHRISTODOULOU P, LAHNAM B. Contraction of investment cast H13 tool steel [J]. International Journal of Cast Metals 2000, 12: 457-467.
- [6] MISHRA S, RANJANA R. Reverse solidification path methodology for dewaxing ceramic shells in investment casting process [J]. Materials and Manufacturing Processes 2010, 25: 1385-1388.
- [7] BAZHENOV V E, KOLTYGIN A V, FADEEV A V. The use of the ProCast software to simulate the process of investment casting of alloy based on titanium aluminide TNM-B1 into ceramic molds [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2014, 55(1): 15-19.
- [8] YANG L, HAI L H, LIANG Y F. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb-TiAl alloy [J]. Intermetallics, 2015, 66: 149-155.

- [9] PIWONKA T S, WOODBURY K A, WIEST J M. Modeling casting dimensions: effect of wax rheology and interfacial heat transfer [J]. *Materials and Design*, 2000 (21) : 365–372.
- [10] GEBELIN J C, JOLLY M R, CENDROWICZ A M, et al. Simulation of die filling for the wax injection process: part I. models for material behavior [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B* 2004, 35: 755–759.
- [11] GEBELIN J C, JOLLY M R, CENDROWICZ A M, et al. Simulation of die filling for the wax injection process: part II. numerical Simulation [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B* 2004, 35: 761–768.
- [12] WANG Donghong, HE Bo, LI Fei. Numerical simulation of the wax injection process for investment casting [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28 (2) : 220–224.

Numerical Simulation of the Forming Process for a Large-Sized Wax Pattern of Investment Casting

CUI Xin-peng, LI Feng, CAI Shi-ya, ZHANG Ai-bin, NAN Hai

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing Engineering Research Center of Advanced Precise Forming of Titanium Alloys, Beijing 100095, China)

Abstract:

The numerical simulation of the forming process for a large-sized complex wax pattern was carried out based on Moldflow software, in addition, the calculation accuracy was evaluated through the wax injection experiment under same process conditions. The selected KC4017B modelling wax was of typical non-Newtonian fluid characteristics. The calculation results show that the fluid fronts stop obviously when they advance into the inner ring surface, and the fluid front temperature here dropped sharply, leading to produce 12 misrun areas. The experimental wax patterns showed the similar defects, which verified the accuracy of the numerical simulation.

Key words:

numerical simulation; large-sized wax pattern; forming process; misrun