

# 铝合金某薄壁壳体件铸造工艺数值模拟及优化

冀晓磊, 郝圆亮, 孟晓东, 邢昌勇, 王立召, 王子阳, 许龙欢

(河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750)

**摘要:** 采用ProCAST软件对某铝合金壳体熔模铸造工艺设计进行了优化, 预测出原方案造成的铸件疏松问题并改进了工艺。采用优化前后工艺方案试制了壳体铸件, 无损检测结果表明, 原工艺方案造成的试样件缺陷位置与数值模拟结果相符, 采用优化后工艺方案试制的样品件无缺陷, 符合产品质量要求。

**关键词:** ZL101A; 壳体; 熔模铸造; 数值模拟

铝合金作为一种较为成熟的合金材料, 具有较高的比强度和优异的加工性能, 因此在航空航天、船舶、汽车等多个领域被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。随着现代科学技术的飞速发展, 航空铝合金铸件也逐渐向整体化、精密化和复杂化的方向发展<sup>[4-5]</sup>, 且对铝合金铸件的质量要求越来越高, 因此生产“零缺陷”和“近无余量”铸件是现代生产的目标<sup>[6-7]</sup>。熔模精密铸造工艺可以生产出不加工或少加工的精密复杂铸件, 因此在成形高端铝合金铸件方面具有非常独到的优势<sup>[8-9]</sup>。而Procast数值模拟软件可以对铸件成形过程中的温度场、流场以及缺陷分布进行分析<sup>[10-12]</sup>, 预测铸件缺陷的产生位置, 从而优化浇道设计和工艺方案<sup>[13-15]</sup>, 进而缩短生产周期、节约成本。

本研究的铝合金铸件为某航空飞行器中的壳体零件, 该壳体件要求气密性好, 并且不允许补焊, 因此对冶金质量有着严格要求。为了缩短研发周期, 并且生产出合格的铸件, 本研究采用ProCAST软件对该铸件组合工艺进行了数值模拟, 分析了铸件凝固过程温度的变化、固相率的变化以及凝固完后的缺陷分布, 根据缺陷情况进行了工艺优化, 并采用优化前和优化后工艺进行实验, 验证了数值模拟结果的准确性。

## 作者简介:

冀晓磊(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为轻质合金精密铸造工艺设计。E-mail: 1203052021@qq.com

## 通讯作者:

郝圆亮, 男, 工程师, 硕士。电话: 18617802518, E-mail: leijix1234@163.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)

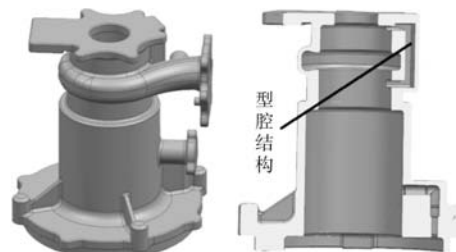
10-1363-06

## 收稿日期:

2022-09-14 收到初稿,  
2023-06-27 收到修订稿。

## 1 铸件结构特性分析

该铸件所用材料为ZL101A, 铸件属于复杂型腔类壳体铸件, 铸件重量约为2.5 kg, 尺寸约为200 mm × 200 mm × 250 mm, 铸件形状如图1所示。且壁厚分布不均匀, 最薄壁厚为3 mm, 最大壁厚约为20 mm, 壁厚变化大且无规律; 该铸件还存在狭小型腔结构如图1剖视图所示, 该型腔侧壁区域处于孤立位置不易补缩, 因此该型腔侧壁区域是冶金成形的难点, 极易产生疏松缺陷。



(a) 正视图

(b) 剖视图

图1 铝合金壳体铸件图

Fig. 1 Aluminum alloy shell casting

## 2 原铸造工艺设计

### 2.1 原方案及模型处理

结合铸件的结构特点及冶金成形难

点, 根据以往工艺人员的熔模铸造经验对该铸件进行了原浇注系统和模组方案的设计, 设计得到的铸造工艺方案如图2所示, 该设计的原则是在铸件的厚大部位布置冒口, 防止因补缩不足造成冶金缺陷, 因此在铸件壁厚20 mm的位置以及其他厚大的位置均设置了冒口。

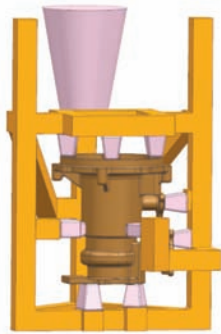


图2 铸造工艺图  
Fig. 2 Casting process diagram

利用三维制图软件UG将设计好的组合方案绘制出组合方案系统实体, 然后将组合方案系统实体导入ProCAST软件进行数值模拟, 将模型在前处理区进行网格划分, 设置面网格大小为5 mm, 生成的模壳厚度为6.5 mm, 然后进行数值模拟参数的设置, 模拟参数的设置主要包括浇注温度、浇注速度以及界面换热系数等, 该模型的数值模拟参数的设置情况如表1所示。

## 2.2 数值模拟结果分析

### 2.2.1 凝固过程分析

待铸件数值模拟完成后, 对铸件冷却30 s时的温度场进行分析, 可以发现, 此时在铸件本体上发现很多温度高点(图3中的红色区域), 这些区域是最后凝固的地方, 如果这些区域得不到补缩将会产生疏松缺陷, 通过与组合冒口对比可以发现, 这些红色区域是冒口位置, 因此可以排除缺陷的产生; 对于有成形风险的狭小型腔侧壁区域, 为了便于观察将铸件进行刨切(图4), 在型腔位置的底部也发现了温度高点, 并

表1 数值模拟参数设置表

Table 1 Numerical simulation parameter setting table

金属材质	型壳材质	型壳厚度/mm	界面换热系数/( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	浇注时长/s	浇注温度/ $^{\circ}C$	型壳温度/ $^{\circ}C$	冷却方式
ZL101A	莫来石	6.5	200	10	720	400	空冷

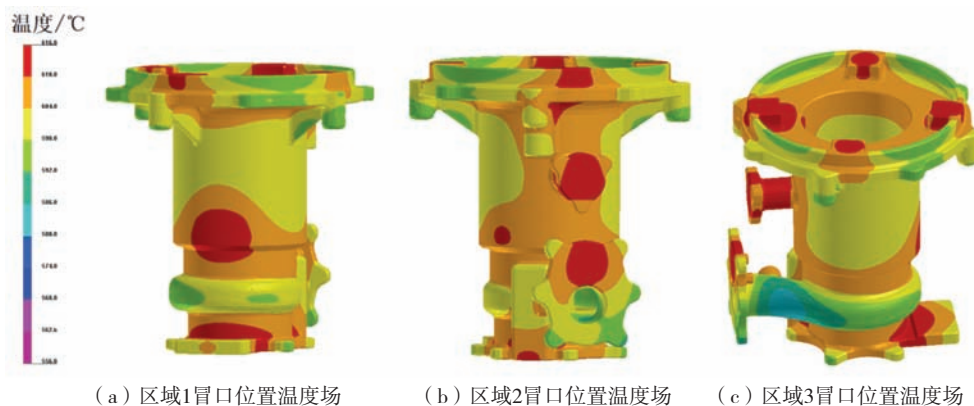


图3 温度场分布图

Fig. 3 Distributions of the temperature field

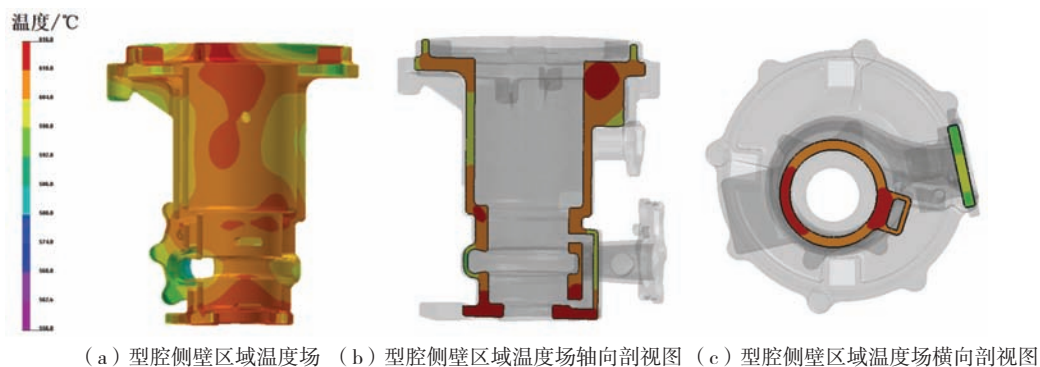


图4 温度场剖视图

Fig. 4 Section views of the temperature field

且该位置未有补缩冒口，因此该位置极易产生疏松缺陷。

通过对整个铸件的凝固过程分析发现，铸件在浇注完后160 s开始凝固，在第330 s时出现孤立液相区

(图5a中标注区域)，其他位置的液相均有冒口补缩故不会形成疏松缺陷，该位置正是狭小型腔结构的侧壁区域，说明该位置会出现疏松缺陷。

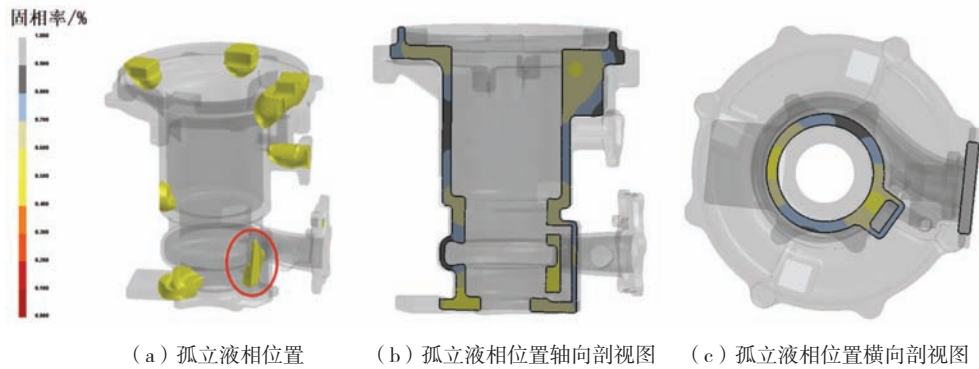


图5 凝固特征分布图

Fig. 5 Distributions of the solidification characteristics

### 2.2.2 疏松缺陷分析

该铸件的疏松缺陷分析采用的是ProCAST软件中的疏松、缩孔判据，即POROS判据，该判据可以分析铸件中的微观疏松和宏观疏松，在疏松率大于1%的情况下，铸件会出现疏松。如图6所示，发现该疏松区域在结构上处于孤立，即区域的前后面和上面与其他区域未连接，下面虽然与其他区域有连接，但壁厚只有

约2.5 mm，不易从该通道进行补缩，能进行补缩的只有与该区域连接的左边通道和右边通道，而现有的工艺在该区域的正下方放置了一个冒口，由于该冒口的辐射导致了该疏松区域温度较高，最后凝固，无法从左右通道得到补缩，从而形成独立热节，最后形成疏松。

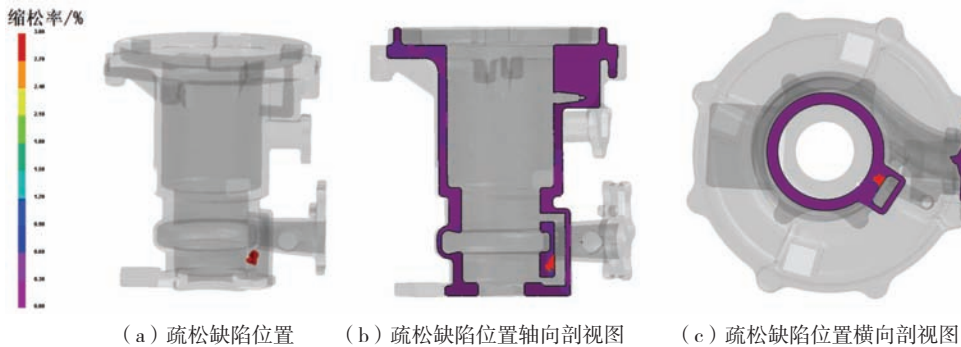


图6 疏松缺陷分布情况

Fig. 6 Distributions of the dispersed porosity defects

## 3 优化铸造工艺分析

### 3.1 优化铸造工艺方案

原组合工艺(图7)除了该型腔侧壁区域疏松外，其余冶金质量良好，在充分分析了疏松产生的原因后，决定根据现有的组合工艺适当调整疏松位置的冒口，使疏松位置区域能够实现顺序凝固，达到解决疏松的目的，调整后冒口位置如图8所示(其余未显示冒口位置保持不变)，调整后远离冒口的位置会形成冷端，有冒口的位置会形成热端，凝固会从冷端开始逐步凝固，从而实现疏松区域的顺序凝固，解决疏松问题。



图7 原工艺冒口位置

Fig. 7 Location of the original process riser

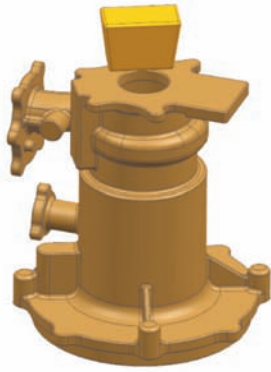
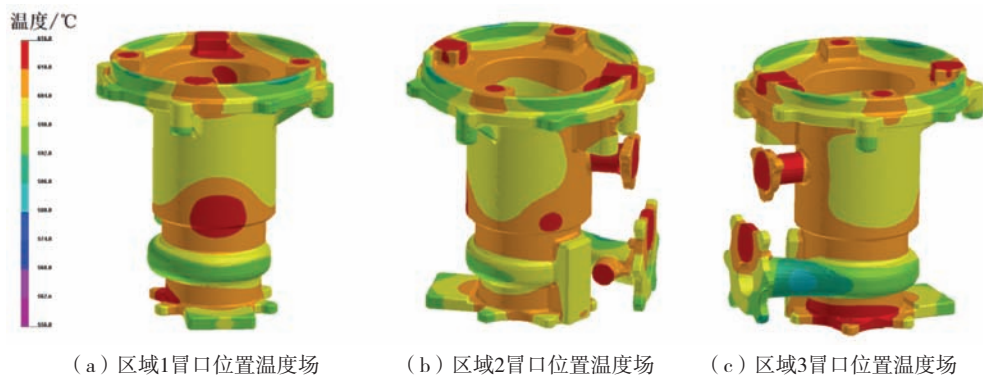


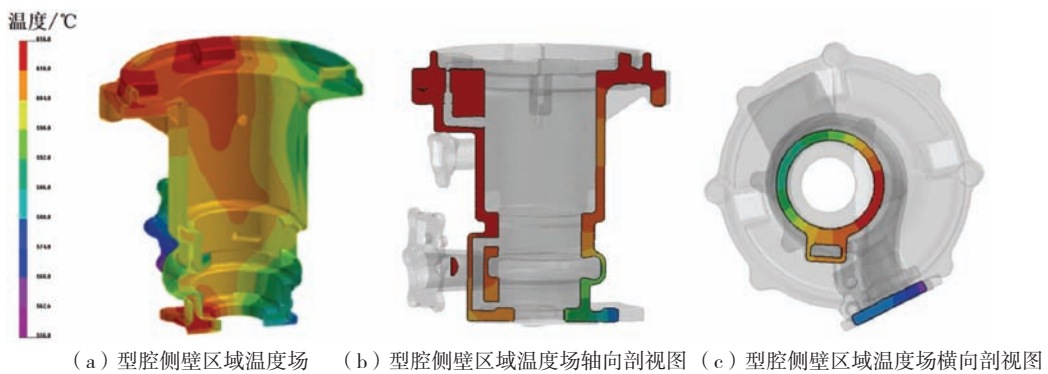
图8 工艺优化后冒口位置  
Fig. 8 Position of the riser after optimization



(a) 区域1冒口位置温度场 (b) 区域2冒口位置温度场 (c) 区域3冒口位置温度场

图9 工艺优化后温度场分布图

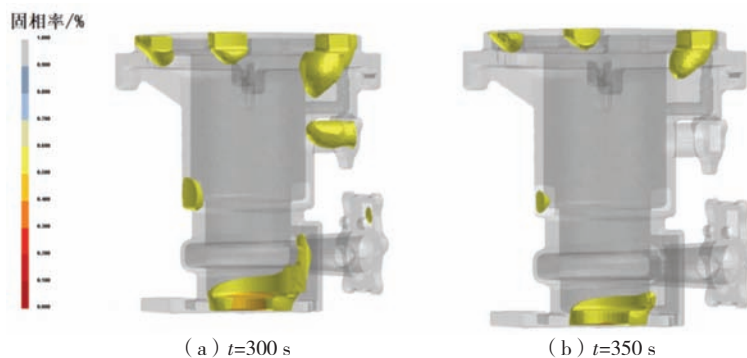
Fig. 9 Temperature field distribution diagrams after process optimization



(a) 型腔侧壁区域温度场 (b) 型腔侧壁区域温度场轴向剖视图 (c) 型腔侧壁区域温度场横向剖视图

图10 工艺优化后温度场剖视图

Fig. 10 Section views of the temperature fields after process optimization



(a)  $t=300$  s (b)  $t=350$  s

图11 工艺优化后凝固特征分布图

Fig. 11 Solidification characteristics distribution maps after process optimization

## 3.2 数值模拟结果分析

### 3.2.1 凝固过程分析

数值模拟完成后,对冷却30 s时铸件的温度场进行分析可以看出,图9中红色区域都是冒口位置,可以排除缺陷的产生;从图10中可以看出,狭小型腔侧壁位置温度梯度明显,实现了铸件的顺序凝固。

从图11的孤立液相上分析看出, $t=300$  s时,原有孤立液相位置的金属液与底部冒口连接,在 $t=350$  s时,狭小型腔侧壁区域的金属液逐渐向冒口位置凝固,整个凝固过程中并未产生孤立液相区,原孤立液相位置可以通过底部冒口得到有效补缩,可以解决铸件存在的疏松缺陷问题。



### 3.2.2 疏松缺陷分析

从铸件的疏松、缩孔率的分析可以得出(图12),在疏松率为1%的情况下优化后的组合工艺方案可以解决铸件疏松缺陷,数值模拟验证并未产生疏松缺陷。

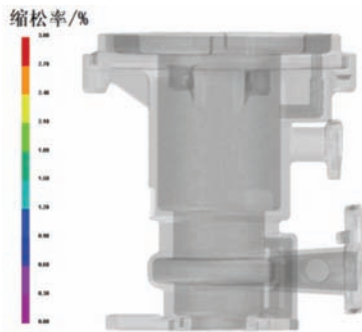


图12 工艺优化后缩孔缺陷分布情况

Fig. 12 Distribution of the shrinkage defects after process optimization

## 4 实验验证

为了验证优化前后工艺方案所生产的铸件缺陷位置是否与数值模拟结果相符,将铸件按优化前后的工艺方案各投产1件,然后进行组焊得到蜡模,在经过制壳、脱蜡、焙烧、铝液浇注、清壳和冒口切除等一系列工序后得到铸件;后采用无损检测技术对试件进行检测,结果显示,采用优化前工艺方案所生产的铸件有疏松缺陷产生,该缺陷位置与数值模拟有缺陷的位置相符(图13);优化后工艺方案所生产的铸件无损检测,结果显示,铸件气孔、缩孔等指标均符合产品质量要求,检测结果如图14所示;在后续投产中也表明了优化后工艺方案具有较高的稳定性与可靠性。

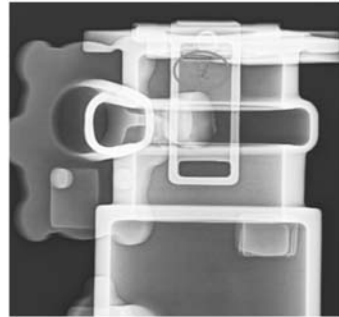


图13 工艺优化前铸件

Fig. 13 Casting before process optimization

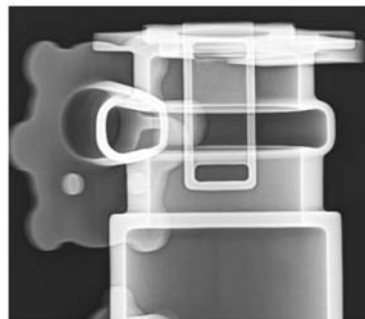


图14 工艺优化后铸件

Fig. 14 Casting after process optimization

## 5 结语

采用ProCAST数值模拟软件对某铝合金壳体组合浇注系统进行了优化,预测出了原方案铸件会产生疏松问题并改进了工艺,并将原方案和优化后方案进行了壳体铸件产品试制,经过无损检测表明,原工艺方案造成的试样缺陷位置与数值模拟结果相符,采用优化后工艺方案试制的样品无缺陷,符合产品质量要求。

### 参考文献:

- [1] 张丽娇. 航空航天高强铝合金材料应用及发展趋势研究[J]. 新材料产业, 2021(3): 7-11.
- [2] 沈桂荣, 解起东. 铝合金熔模铸造[J]. 特种铸造及有色合金, 2000(6): 48-50.
- [3] LI Y M. Effect of the casting process variables on microporosity and mechanical properties in an investment cast aluminium alloy[J]. Science and Technology of Advanced Materials. 2001(3): DOI: 10.1016/S1468-6996(01)00069-9.
- [4] 纪小虎. 铝合金薄壁件熔模精密铸造研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [5] 熊艳才. 精密铸造技术在航空工业中的应用和发展[J]. 航空制造技术, 2008, 51(22): 32-35.
- [6] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J]. 铸造, 2012, 61(4): 347-356.
- [7] 孟晓东, 张荣强, 冀晓磊, 等. 熔模铸造ZM5合金界面换热系数研究[J]. 铸造, 2022, 71(9): 11564-1157.
- [8] 蔡森, 王晓巍, 卢影峰. ZM5航空用大型复杂镁合金壳体铸造工艺模拟[J]. 铸造, 2022, 71(1): 77-83.
- [9] 贾志宏, 符浩, 张义刚, 等. 车用增压器涡轮熔模铸造过程数值模拟优化[J]. 铸造, 2022, 71(6): 760-765.
- [10] PAN L, GAO Y, GAO W, et al. Prediction of shrinkage porosity (hole) in TiAl based alloy blade and its processing optimization based on the ProCAST[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 190(5): DOI: 10.3870/tzzz.2010.06.005.
- [11] 周君华, 孙长波, 尚伟, 等. ProCAST软件在熔模铸造工艺优化中的应用[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(5): 109-112.
- [12] 马煜林, 刘少华, 纪良鑫, 等. Procast吸阀壳体铸铝件铸造工艺设计[J]. 铸造, 2021, 70(1): 94-98.

- [13] 魏剑辉, 蒋梦麒. 基于ProCAST的K423衬板熔模铸造工艺优化设计 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 ( 11 ) : 1259-1261.
- [14] 李豫川, 宋丹路. 某微型涡轮增压发动机涡轮熔模铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2015, 64 ( 3 ) : 220-224.
- [15] GUO Jukui, LI Yongxin, FU Jia. Design and improvement of the investment casting process for the ring-shaped aluminum alloy based on PROCAST software [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 382 ( 4 ) : DOI: 10.1088/1757-899X/382/4/042006.

---

## Numerical Simulation and Optimization of Casting Process for Aluminum Alloy Thin Wall Shell

JI Xiao-lei, HAO Yuan-liang, MENG Xiao-dong, XING Cang-yong, WANG Li-zhao, WANG Zi-yang, XU Long-huan  
(Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

### Abstract:

The investment casting process design of an aluminum alloy shell was optimized by using ProCAST software, and the casting shrinkage porosity caused by the original scheme was predicted and the process was improved. The shell casting was trial produced by using the optimized and pre optimized process plan. The nondestructive testing results showed that the defect positions of the sample pieces caused by the original process plan were consistent with the numerical simulation results. The sample pieces produced by the optimized process plan had no defects and met the product quality requirements.

### Key words:

ZL101A; shell; investment casting; numerical simulation

---