

# 基于 ProCAST 本体件熔模铸造工艺优化设计

杨武强, 冀晓磊, 王琳, 刘鑫霞, 刘晓杰, 邢昌勇, 许龙欢, 王立召

(河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750)

**摘要:** 利用ProCAST软件对铝合金本体铸件熔模铸造工艺进行了数值模拟, 预测了铸件侧壁会有缺陷产生, 对缺陷产生原因进行了分析并提出了优化方案。对优化后工艺方案再次进行数值模拟, 解决了铸件疏松缺陷问题, 并实际投产获得了合格铸件, 验证了优化后工艺方案的可行性。

**关键词:** 铝合金铸件; 数值模拟; 熔模铸造; 工艺优化

铝合金具有质量轻、强度高的特点, 广泛应用于航天航空、汽车等领域<sup>[1-3]</sup>; 熔模铸造工艺具有尺寸精度高、表面粗糙度好、近净成形的特点, 在生产复杂精密的铝合金铸件方面具有独特的优势<sup>[4-6]</sup>; 铝合金在铸造中易产生疏松、缩孔等缺陷, 而传统的工艺设计依据设计人员的经验进行“试错迭代试验”。为了降低成本和生产周期, 可以采用数值模拟软件对铸件成形过程进行分析, 从而预测铸件缺陷产生位置<sup>[7]</sup>。本文利用 ProCAST软件对本体铸件的凝固过程进行了数值模拟, 确定了铸件疏松产生位置, 并分析其产生的原因, 通过在浇注系统上增设保温棉确保了冒口的补缩能力, 消除了铸件内部的缺陷, 并在生产中得到了验证。

## 1 铸件工艺分析

该产品属于本体类铸件, 尺寸大小约为217 mm × 193 mm × 206 mm, 所用材料为ZL114A, 铸件质量约为6 kg, 三维模型如图1所示。该铸件壁厚分布不均匀, 最薄壁厚为6 mm, 最大壁厚为23 mm, 因壁厚区域面积较大, 因此是冶金成型的难点, 极易产生疏松、缩孔等缺陷。

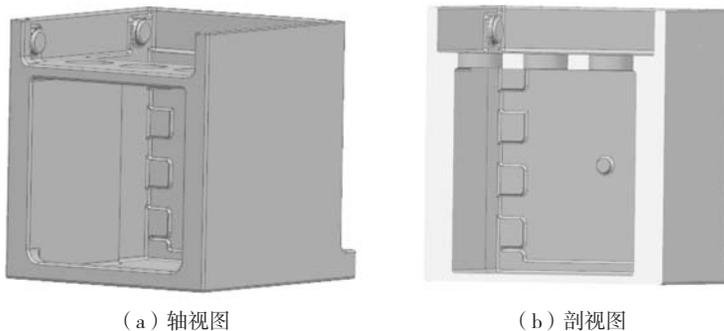


图1 三维图

Fig. 1 Three-dimensional view

## 2 初始工艺设计及数值模拟分析

### 2.1 初始方案及模型设置

根据铸件结构特点以及冶金成型的难点, 为了防止因补缩不足造成冶金缺陷,

#### 作者简介:

杨武强 (1989-), 男, 工程师, 主要研究方向为轻质合金精密铸造工艺设计。电话: 13910656412, E-mail: yangwuqiang1989@qq.com

#### 通讯作者:

冀晓磊, 男, 工程师。电话: 18617802518, E-mail: 1203052021@qq.com

中图分类号: TG249.5

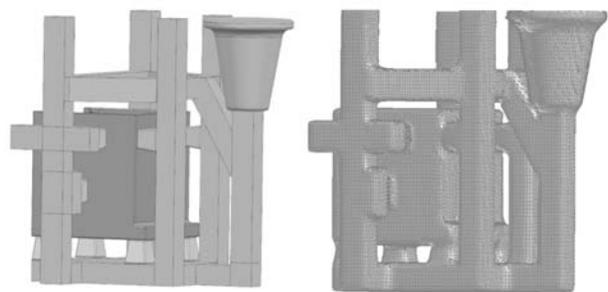
文献标识码: B

文章编号: 1001-4977 (2023) 11-1477-05

#### 收稿日期:

2023-02-01 收到初稿,  
2023-05-31 收到修订稿。

在铸件的厚大区域布置了较大冒口，设计了初版浇注系统，如图2所示。将设计好的组合方案系统利用三维制图软件UG进行实体建模，然后将实体导入ProCAST



(a) 浇注系统方案 (b) 网格划分

图2 初始浇注系统设计及型壳网格划分

Fig. 2 Initial designing scheme of gating system and mould shell mesh generation

软件进行网格划分，设置面网格大小为4 mm，生成的型壳厚度为6 mm；再进行浇注温度、浇注速度以及界面换热系数等模拟参数的设置<sup>[8]</sup>，该模型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

通过对铸件凝固过程的固相率分析可以直观看到铸件的补缩情况，图3中的深色部分表示金属处于液态或半固态，透明部分表示铸件已经完全凝固。从图3可以看出，在 $t=200$  s时，铸件从薄壁处开始凝固，并逐渐向壁厚处进行； $t=500$  s时，铸件薄壁已经凝固完成，两侧的厚大部位及浇注系统开始凝固； $t=800$  s时，浇注系统已经基本凝固完成，此时铸件的厚大部位还未完全凝固，这表明该厚大部位得不到冒口的补缩，会产生缩松、缩孔缺陷。

表1 数值模拟参数设置表

Table 1 Parameters setting table for numerical simulation

金属材质	型壳材质	型壳厚度/mm	界面换热系数/( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	浇注时长/s	浇注温度/ $^{\circ}C$	型壳温度/ $^{\circ}C$	冷却方式
ZL114A	莫来石	6	200	10	710	350	空冷

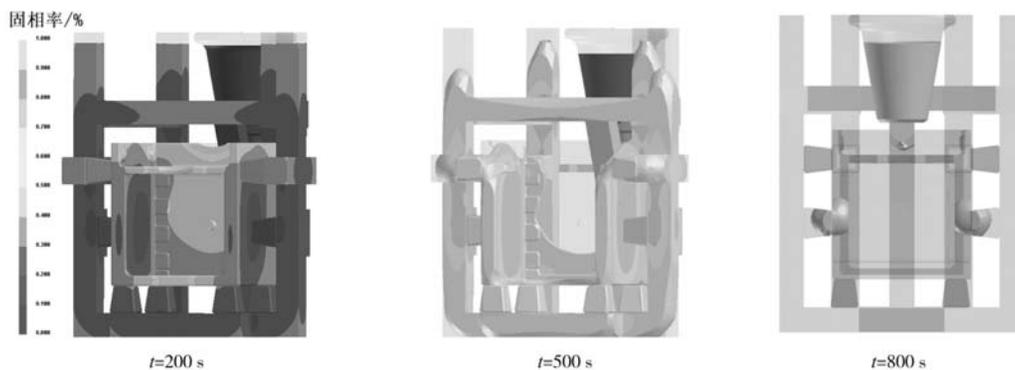


图3 凝固过程固相率分布图

Fig. 3 Solid fraction distribution map during solidification process

### 2.2.2 疏松缺陷分析

疏松缺陷分析采用的是ProCAST 软件中的缩松缩孔判据，该判据采用孔隙率模型可以分析铸件中的微观疏松和宏观疏松，在缩松率大于1%的情况下，在实际生产中铸件大概率会出现缩松。铸件中的缺陷分布如图4所示，从图4a中可以看出疏松主要产生于两侧壁的冒口根部，从图4b可以看出在两侧壁的位置产生了疏松。分析产生原因，侧壁区域为铸件的厚大部位，该部位为铸件最后凝固区域，虽然该区域有冒口补缩，但冒口早于铸件凝固，故得不到冒口补缩而产生疏松缺陷。

## 3 工艺优化及模拟结果分析

### 3.1 优化方案及模拟设置

为了解决因浇注系统过早凝固而导致的疏松缺陷，可以通过以下2种方案进行改进：一种是在浇道上包裹保温棉，延长浇道凝固时间从而达到解决铸件疏松的目的；另一种是增大铸件两侧的浇道体积来保证补缩目的；综合考虑第2种方案会降低工艺出品率，增加生产成本，因此采用第1种方案，即在浇道上增加保温棉，并在ProCAST模拟中增加了保温棉的设置情况如图5所示，该部位的界面传热系数为 $1 W / (m^2 \cdot K)$ <sup>[9]</sup>，实际保温棉的包裹状态如图6所示，其他参数设置情况与表1相同。

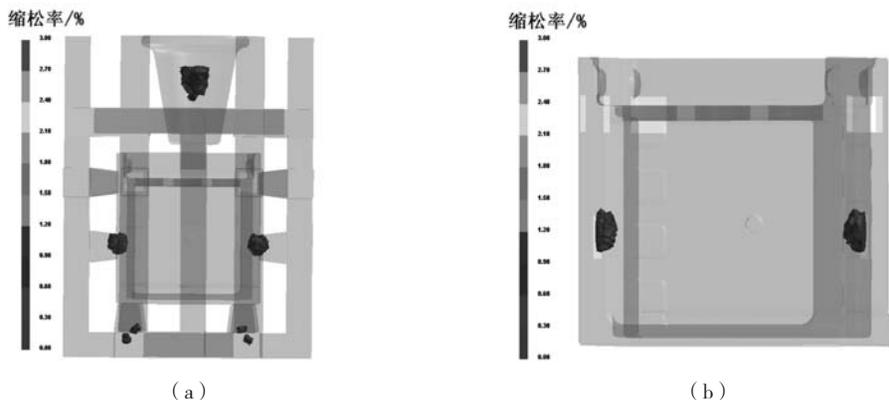


图4 疏松缺陷分布图  
Fig. 4 Microshrinkage defects distribution map

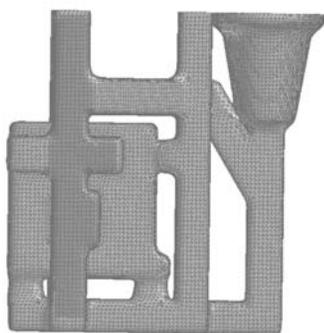


图5 加装保温棉  
Fig. 5 Adding insulation asbestos

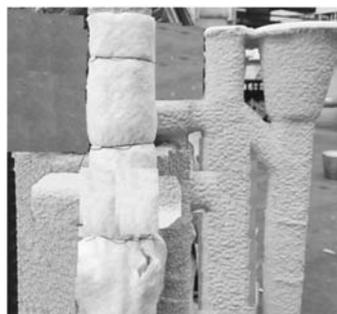


图6 实际保温状态  
Fig. 6 Actual heat preservation state

### 3.2 模拟结果分析

#### 3.2.1 凝固过程分析

从图7可以看出,  $t=500\text{ s}$ 之前, 铸件的凝固的情况与工艺优化前铸件凝固情况基本保持一致, 都是从铸件薄壁开始凝固, 并逐渐向壁厚区域进行;  $t=810\text{ s}$

时, 铸件已经完全凝固, 此时浇道还未凝固完成, 这说明增设保温棉延长了浇道凝固时间, 确保了冒口的补缩能力, 从而解决了因冒口补缩不足产生的疏松缺陷。

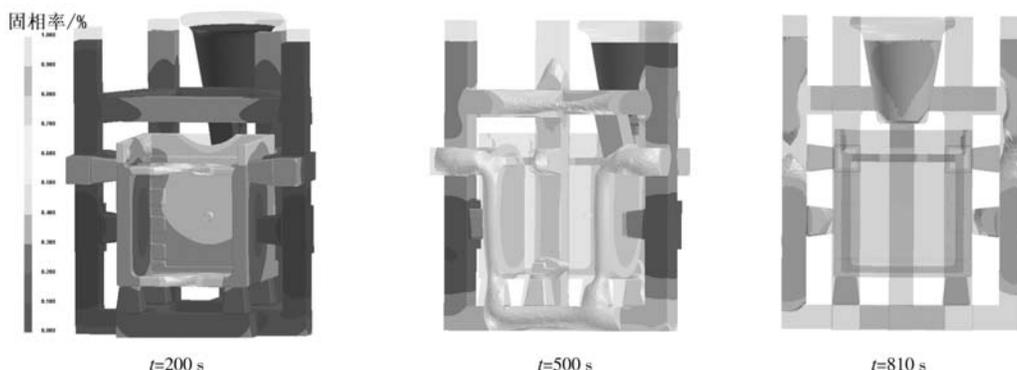


图7 凝固过程固相率分布图  
Fig. 7 Solid fraction distribution map during solidification process

#### 3.2.2 疏松缺陷分析

从铸件的疏松缺陷分布情况可以得出, 优化后的组合工艺在冒口根部并未产生疏松缺陷, 如图8所示,

这说明增设保温棉实现了铸件的顺序凝固, 可以解决疏松缺陷。

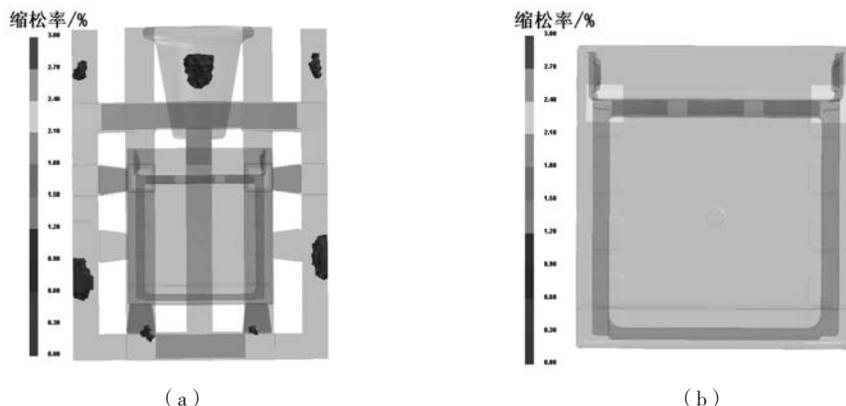


图8 工艺优化后疏松缺陷分布图

Fig. 8 Microshrinkage defects distribution map after process optimization

## 4 试验验证

为了验证数值模拟结果的准确性及优化后工艺方案的可行性，将优化前和优化后方案进行试验。2种方案的其他铸造工艺参数完全一致，经过压蜡、蜡模组焊、制壳、浇注、清壳、冒口去除等一系列工序后获得铸件。对铸件进行无损探伤检测，结果显示初版组合工艺试制的铸件在两侧壁位置产生了疏松，如图9所示。按照优化后的工艺方案试制生产的铸件，经过无损探伤检测内部没有出现疏松、缩孔等缺陷，如图10所示。采用优化后方案进行小批量生产，铸件全部

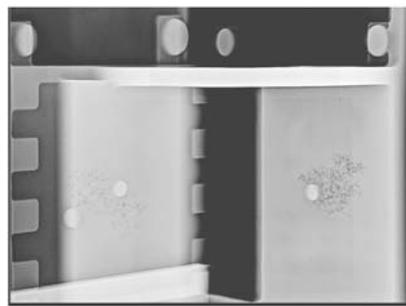


图10 工艺优化后铸件

Fig. 10 Casting after process optimization

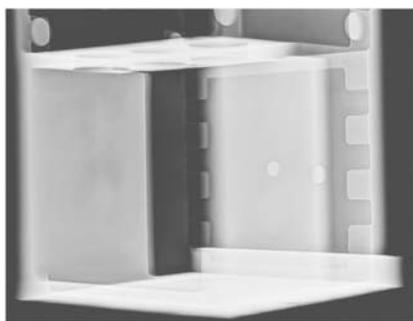


图9 工艺优化前铸件

Fig. 9 Casting before process optimization

合格，验证了数值模拟的准确性及优化后方案的可行性。

## 5 结束语

通过ProCAST软件对铝合金本体件熔模铸造工艺进行了数值模拟，并分析了疏松缺陷产生的原因，根据分析结果进行了工艺优化。计算和试验结果表明，为浇注系统增设保温棉可以延长浇道凝固时间，增加冒口对厚大部位的补缩能力，从而消除铸件内部的疏松缺陷。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 边明勇. 高强度铝合金铸造与热处理技术研究 [J]. 山西冶金, 2021, 44 (5): 200-202.
- [3] YU W B, CAO Y Y, GUO Z P, et al. Development and application of inverse heat transfer model between liquid metal and shot sleeve in high pressure die casting process under non-shooting condition [J]. China Foundry, 2016, 13 (4): 269-275.
- [4] 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.

- [5] WANG M, ZHANG C, XIAO H, et al. Inverse evaluation of equivalent contact heat transfer coefficient in hot stamping of boron steel [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87 (9) : 1-8.
- [6] 徐文才, 郎利辉, 黄西娜, 等. 铝合金复杂薄壁件热等静压成形数值模拟 [J]. *锻压技术*, 2019, 44 (6) : 65-72.
- [7] 魏娟娟, 米国发, 周志杰, 等. 铝合金蜗壳低压铸造工艺设计及数值模拟 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2018, 38 (2) : 172-1175.
- [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.

---

## Optimization Design of Investment Casting Process for Entity Parts Based on ProCAST

YANG Wu-qiang, JI Xiao-lei, WANG Lin, LIU Xin-xia, LIU Xiao-jie, XING Chang-yong, XU Long-huan, WANG Li-zhao  
(Hebei Gangyan Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

### Abstract:

The investment casting process of aluminum alloy entity casting was numerically simulated by using of ProCAST software. The defects on the side wall of the casting were predicted, the causes of the defects were analyzed, and an optimization scheme was proposed. Then the optimized process scheme was numerically simulated again. The results showed that the problem of casting porosity was solved, and qualified castings were obtained in actual production, which verified the feasibility of the optimized process scheme.

### Key words:

aluminum alloy casting; numerical simulation; investment casting; process optimization

---