

# 数值模拟辅助设计小型外壳体铸造工艺

邓高生, 刘 勇, 牟宜华, 乔兴华, 杨 旸

(中国船舶重工集团衡远科技有限公司, 重庆 404100)

**摘要:** 某小型外壳体作为动力装置外壳, 铸件不允许有缩孔、渣孔及砂眼等缺陷存在, 且组织致密。为降低铸件试制后的质量风险, 设计了5种铸造工艺方案, 利用计算机数值模拟分析技术, 分析5种方案下外壳体的充型与凝固过程, 确定最佳工艺方案并进行生产验证。结果表明, 方案5为最佳工艺方案: 外壳体内壁增加0~7 mm补贴余量和放满20 mm厚随形冷铁, 获得了无疏松和组织致密的优质铸件。

**关键词:** 铝合金; 壳体铸件; 模拟分析; 铸造工艺设计

铸件传统铸造工艺设计是否合理, 大多依赖实际生产进行验证, 以试错来设计和优化铸造工艺, 当铸件结构复杂时, 试错风险和成本往往难以承受<sup>[1-2]</sup>。数值模拟作为重要虚拟仿真技术手段, 现已广泛用于各类型铸件工艺设计、优化, 通过金属液流场与温度场可视化分析, 预测缺陷产生位置及类型, 制定风险对策, 提高铸件合格率, 缩短铸件生产开发周期、节约成本<sup>[3-5]</sup>。本文通过数值模拟, 分析外壳体铸件在5种铸造工艺方案下的充型与凝固过程, 探究其缺陷及组织变化规律, 确定最佳工艺方案, 为制备无铸造缺陷和组织致密的外壳体铸件提供指导。

## 1 铸件特点与铸造工艺方案

### 1.1 铸件特点

外壳体铸件材料为ZL101A铝合金, Sr变质, 化学成分如表1所示, 铸件3D见图1。外壳体主体平均壁厚18 mm, 最大壁厚30 mm, 最大轮廓尺寸 $\Phi 368$  mm  $\times$  136 mm, 内壁及上下端面为机加工面, 针孔度2级; 作为某动力装置外壳, 铸件需进行X射线探伤, 不允许缩孔、渣孔及砂眼等肉眼可见缺陷存在, 组织致密, 力学性能优异。

表1 ZL101A铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of ZL101A alloy

$w_B$  /%

成分	Si	Mg	Ti	Sr	Fe	Al
目标成分	6.5~7.5	0.25~0.45	0.08~0.2	0.02~0.04	$\leq 0.2$	余量
实测成分	6.99	0.36	0.15	0.027	0.063	余量

### 1.2 铸造工艺方案

外壳体铸造工艺方案1如图2所示。顶面余量6 mm, 底面及内壁余量3.5 mm, 采用底注反雨淋开放式浇注系统。根据经验法<sup>[6]</sup>, 直浇道小端截面直径取24 mm,  $\sum F_{直} : \sum F_{横1} : \sum F_{横2} : \sum F_{内1} : \sum F_{内2} = 1 : 2.6 : 3.6 : 3.7 : 4.2$ , 横2浇道末端集渣槽长度45 mm; 于主横浇道分别设置两个陶瓷过滤网增加系统滤渣能力, 过滤网规格60 mm  $\times$  60 mm  $\times$  20 mm; 法兰顶端设置8个冒口补缩, 冒口间最大距离70 mm, 冒口包覆保温棉; 内壁设置渐变随形冷铁, 底端至顶端25  $\rightarrow$  12 mm渐变, 厚大法兰下端面放置15 mm厚、30 mm宽冷铁。铸件采用树脂砂型完成浇注, 浇注质量22 kg。

作者简介:

邓高生(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为铝合金材料熔炼、热处理及铸造成形工艺设计。  
E-mail: 13098678180@163.com

中图分类号: TG292;  
TP391.99

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)  
12-1761-05

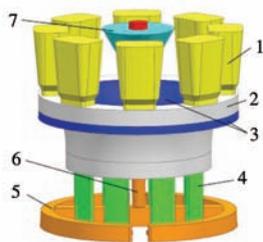
收稿日期:

2024-04-29 收到初稿,  
2024-06-12 收到修订稿。



图1 外壳体毛坯3D模型

Fig. 1 3D model of the housing shell blank



1.冒口 2.铸件 3.冷铁 4.内浇道 5.横浇道 6.直浇道 7.浇口杯

图2 外壳体铸造工艺方案1

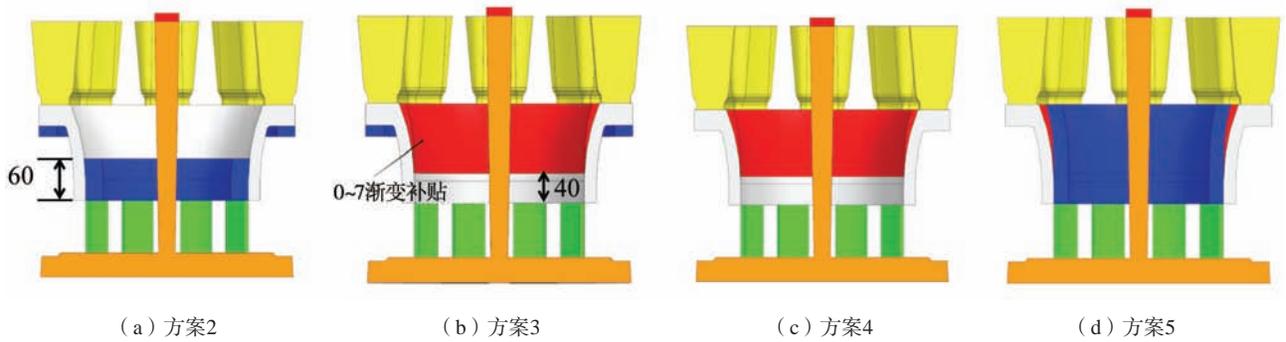
Fig. 2 The first casting process of the housing shell

在工艺方案1的基础上,对冷铁布置及补贴余量进行调整,设计铸造工艺方案2-5(图3)。图3a中方案2取消方案1内壁整面放置的渐变冷铁,保留渐变冷铁距离壳体底部端面60 mm高度的部分;方案3取消方案1中内壁整面渐变冷铁,内壁在原余量基础上由下至上增加0~7 mm渐变补贴,见图3b红色区域所示;为增强冒口对外壳体主体壁厚区域补缩效果,图3c中,方案4保留方案3中0~7 mm渐变补贴,取消法兰下端面15 mm厚冷铁;方案5在方案4的基础上,在壳体内壁整面放置20 mm厚随形冷铁,见图3d。通过计算机模拟仿真分析,评估5种铸造工艺方案对外壳体铸件质量影响及优劣。

## 2 仿真分析

### 2.1 参数及设置

外壳体主要仿真参数见表2,铸件-砂型换热系数及铸件-冷铁换热系数见图4。为保证仿真分析精度,5种工艺方案最小网格尺寸均划分为2 mm。浇注时间 $t$ 由式 $t=S\sqrt[3]{m_{\text{浇总}}}$ 计算<sup>[7]</sup>,其中 $m_{\text{浇总}}$ 为铝液浇注总质量, $S$ 为经验系数,取 $S=4$ ,计算得到外壳体增加补贴余量前



(a) 方案2

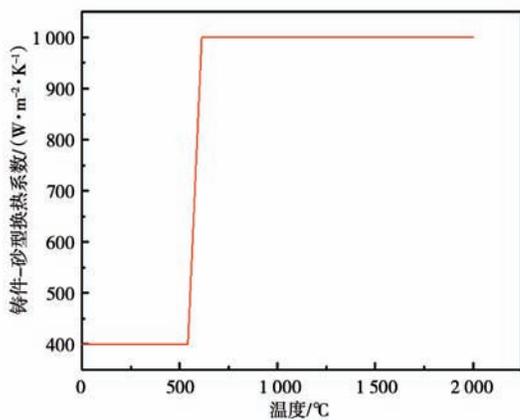
(b) 方案3

(c) 方案4

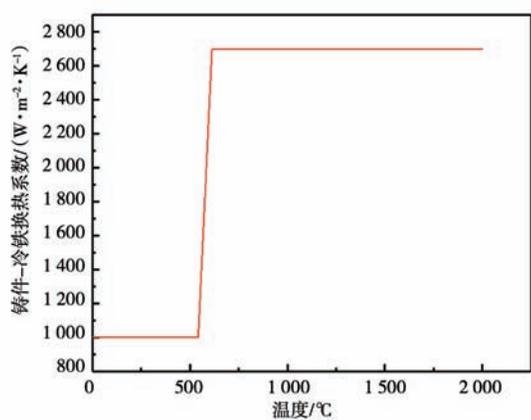
(d) 方案5

图3 铸造工艺方案2-5

Fig. 3 Casting processes of scheme 2 to scheme 4



(a) 铸件-砂型换热系数



(b) 铸件-冷铁换热系数

图4 换热系数

Fig. 4 Heat transfer coefficients

表2 外壳体主要仿真工艺参数  
Table 2 Main simulation process parameters of the housing shell

材料	浇注温度	铸型温度	有效补缩率	铸件-砂型换热系数	铸件-冷铁换热系数	铸型-冷铁换热系数
ZL101A	710 °C	40 °C	70%	见图4a	见图4b	800 W/(m <sup>2</sup> ·K)

后的浇注时间分别为11.2 s和11.3 s。在外壳体纵向剖面壁厚中心处设置温度粒子观测点Point 1- 6，见图5，粒子间间距35 mm。

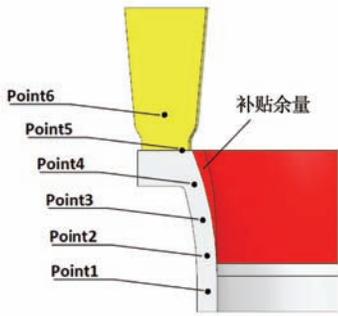


图5 温度粒子位置  
Fig. 5 Positions of temperature particles

## 2.2 充型结果分析

图6和图7为外壳体工艺方案1的充型过程温度场分布及气压分布。铝液由内浇道进入，从底部平稳充填至铸型顶部。11.2 s充型结束时，内浇道对应部位存在过热趋势，此区域外壳体下端温度高于上端，温差为15~30 °C，这是由于内浇道流出铝液不断冲刷所致；外壳体内浇道之间的区域温度分布则与内浇道对应部位

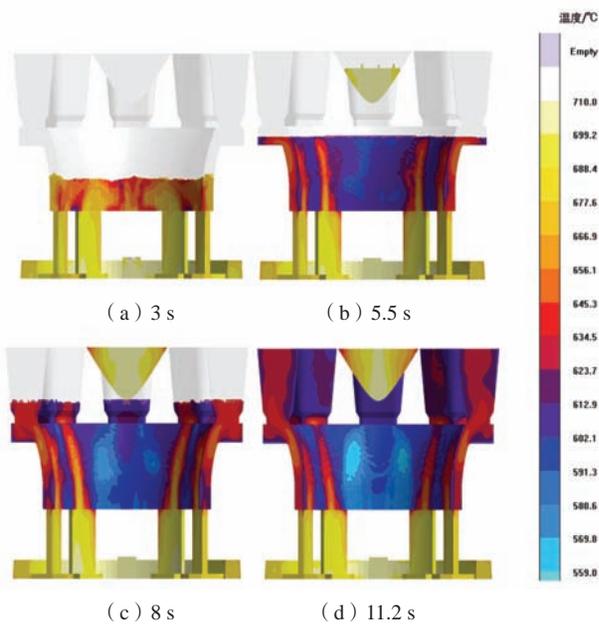


图6 外壳体工艺方案1充型过程温度场  
Fig. 6 Temperature distributions of the filled process of scheme 1 of the housing shell

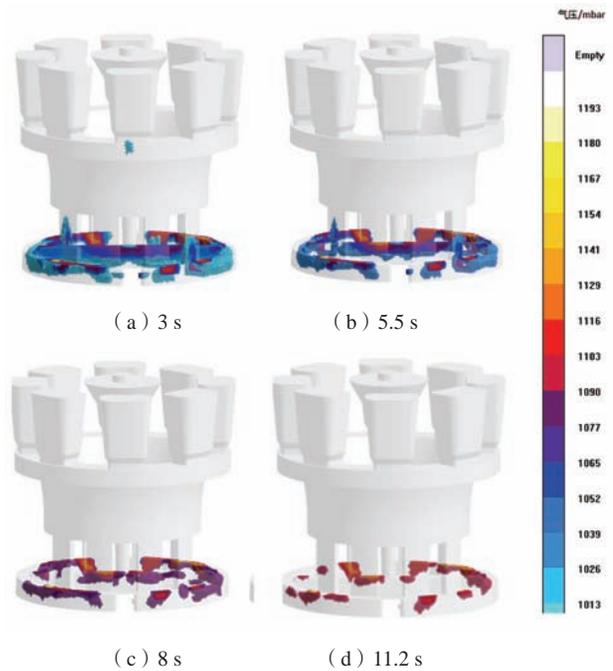


图7 外壳体工艺方案1充型过程气压分布  
Fig. 7 Air pressure distributions of the filled process of scheme 1 of the housing shell

趋势则相反，上端温度高于下端温度，随着铝液的流动，铝液温度虽不断降低，但铸件内壁自底端至顶端的25→12 mm渐变随形冷铁，下端冷铁激冷效应大于上端，加之顶部冒口补缩效应，因此外壳体铸件上端温度略高于下端10~20 °C。充型过程中，仅直浇道及横浇道顶面存局部憋气区域，气压压力<120 kPa，铸件产生氧化夹渣、卷气及砂眼等风险较低。

## 2.3 凝固结果分析

图8为外壳体方案1-5疏松分布仿真计算结果。方案1中内壁整面放置渐变随形冷铁虽加速铸件凝固速率，但无法实现顺序补缩凝固，外壳体壁面弥散分布较多疏松缺陷。图8b中，方案1随形渐变冷铁高度由138→60 mm时，疏松缺陷完全消失。完全取消内壁渐变随形冷铁，保留15 mm厚法兰冷铁，外壳体内壁增加补贴余量，补贴余量底端至顶端0→7 mm渐变，上端法兰靠近内壁区域产生4处疏松缺陷，见图8c；当图8d中取消法兰冷铁后，4处疏松缺陷消除，表明该法兰冷铁阻碍冒口→厚大法兰→内壁的补缩，与铸件内部质量无益，凝固开始时，Point1~Point5



图8 外壳体方案1-5缩松分布

Fig. 8 Distributions of porosity in scheme 1 to scheme 5 of the housing shell

温度分别为647.9 ℃、649.9 ℃、649.2 ℃、650 ℃、650.8 ℃和652.6 ℃。图8e中保留补贴取消、取消法兰冷铁，内壁面放满20 mm厚随形冷铁，此时图5中6处热电偶粒子位置凝固过程温度-时间曲线见图9，由于冒口及增加补贴后的壁厚效应，当充型结束、凝固开始时，Point1~Point5温度分别为611.4 ℃、614.4 ℃、618.6 ℃、619.9 ℃、620.5 ℃和623.9 ℃，较方案4分别下降5.6%、5.5%、4.7%、4.6%、4.7%和4.4%，且在后续凝固过程中， $T_{Temp}(\text{Point 1}) < T_{Temp}(\text{Point 2}) < T_{Temp}(\text{Point 3}) < T_{Temp}(\text{Point 4}) < T_{Temp}(\text{Point 5}) < T_{Temp}(\text{Point 6})$ ，可知：较方案4，方案5激冷效应增加的同时，也实现了顺序补缩凝固，凝固后铸件无疏松缺

陷，铸件组织致密。

### 3 生产验证

方案2、方案4和方案5计算机分析结果显示：3种工艺方案均能获得无疏松缺陷铸件。方案2未放补贴，加工成本低于方案4与方案5，但外壳体作为某动力装置重要零部件，需部分承力，对组织及力学性能要求较高。由约翰逊-梅尔方程导出的在 $t$ 时间内形成的晶核数 $P(t)$ 与形核率 $N$ 及晶粒长大速率 $v_g$ 之间关系、霍尔佩奇公式中多晶体屈服强度 $\sigma_s$ 与晶粒平均直径 $d$ 之间的关系可知<sup>[8-9]</sup>：方案5中，外壳体内壁布满20 mm厚冷铁，可获得更加细小的铸态晶粒组织，力学性能优于其他两种工艺方案<sup>[10-12]</sup>。

$$P(t) = k \left( \frac{N}{v} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中： $k$ 为与晶核形状有关的常数； $K$ 为与晶界结构有关的常数， $\sigma_0$ 为晶界内部对于形变的阻力。对工艺方案5进行生产验证，外壳体铸件实物及X射线探伤检测结果如图10所示，铸件外观无肉眼可见缺陷，浇注饱满，组织致密，无肉眼可见疏松、气孔及氧化夹渣等缺陷，符合验收要求，品质合格。

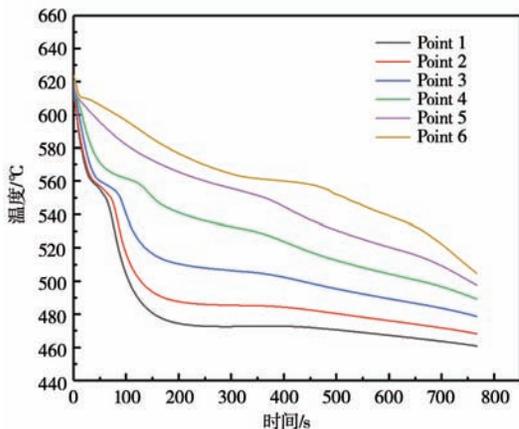
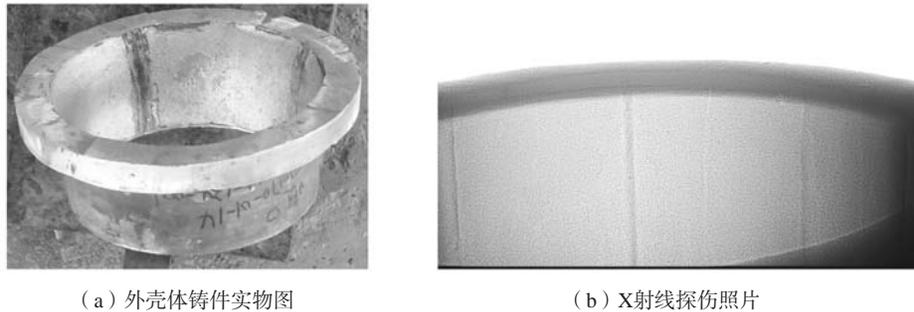


图9 外壳体方案5凝固过程温度-时间曲线

Fig. 9 Temperature curves during solidification of scheme 5 of the housing shell

### 4 结论

(1) 5种方案下，铝液由底部平稳充填至铸型顶部，铸件产生夹砂、氧化夹渣及针孔等风险较低；方



(a) 外壳体铸件实物图

(b) X射线探伤照片

图10 方案5外壳体铸件实物与X射线探伤检测结果

Fig. 10 Results of the housing shell casting and X-ray inspection after process optimization

案2中, 内壁整面渐变冷铁高度由138→60 mm, 方案1壁面弥散分布的疏松缺陷得以消除; 方案3内壁增加0~7 mm渐变余量后, 法兰冷铁的存在阻碍冒口→厚大法兰→内壁的凝固补缩, 方案4取消法兰冷铁后, 法兰与内壁交接区域疏松缺陷消失; 较方案4, 方案5内壁增加20 mm随形冷铁, 激冷效应增加的同时, 也实现了

顺序补缩凝固, 凝固后铸件无疏松缺陷, 铸件组织致密。

(2) 对工艺方案5进行生产验证, 外壳体铸件外观无肉眼可见缺陷, X射线探伤检测铸件内部无肉眼可见疏松、气孔及氧化夹渣等缺陷, 组织致密, 符合验收要求。

#### 参考文献:

- [1] 杨武强, 冀晓磊, 王琳, 等. 基于ProCAST本体件熔模铸造工艺优化设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (11): 1477-1481.
- [2] 李浩, 康永飞, 白朴存. 复杂薄壁铝合金铸件铸造过程数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (11): 1195-1198.
- [3] 渠志刚, 刘江南, 贺辛亥, 等. 熔模精密铸造技术在汽车工业上的应用及发展 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (1): 11-14.
- [4] 丁华锋, 金先志, 陈涛, 等. 车用水箱弯管接头熔模铸件工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (2): 248-252.
- [5] 胡怡, 汪东红, 吴文云, 等. 复杂混流泵外壳铸造工艺设计与数值模拟 [J]. 铸造, 2019, 68 (9): 1026-1030.
- [6] 李传斌, 李魁盛. 铸造技术应用手册 第四卷 铸造工艺及造型材料 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [7] 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.
- [8] 胡震祥, 蔡珣. 材料科学基础 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [9] 代雨成, 樊自田, 蒋文明, 等. Sr变质对ZL114A合金共晶硅形貌和拉伸性能的影响 [J]. 铸造, 2014, 63 (3): 221-231.
- [10] 米国发, 王狂飞, 刘翔宇, 等. 冷铁工艺对Al-Si-Mg合金二次枝晶间距及致密度的影响 [J]. 铸造, 2008, 57 (3): 261-265.
- [11] 毛红庚, 党惊知, 刘智锋. 激冷作用对ZLSi7Cu2Mg合金组织及性能的影响 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (4): 763-765.
- [12] 樊振中, 丛延, 吴凌华, 等. ZL114A导弹弹体低压铸造工艺与组织性能研究 [J]. 铸造, 2023, 72 (12): 1548-1559.

## Numerical Simulation Assisted Design of Small Housing Shell Casting Process

DENG Gao-sheng, LIU Yong, MOU Yi-hua, QIAO Xing-hua, YANG Yang  
(CSSC Hengyuan Technology Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

#### Abstract:

A small housing shell serves as the housing for a power device, and the castings are not allowed to have defects such as shrinkages, slag pores, and sand inclusions, and the organization is dense. In order to reduce the quality risks after the trial production, five casting process solutions were designed, and the filling and solidification processes of the housing shell were analyzed using computer numerical simulation technology. The optimal process solution was determined and validated through production. The results showed that scheme 5 was the optimal process solution. The inner wall of the housing shell was increased by 0-7 mm of allowance, and 20 mm thick conformal chill was placed to obtain a shrinkage-free, dense casting.

#### Key words:

aluminum alloy; shell casting; simulation analysis; casting process design