DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2024.3266

# 铝合金某壳体件铸造工艺数值模拟及优化

邵文宝，冀晓磊，刘晓杰，李园园，潘煜曜，刘鑫霞，葛学伟
(河北钢研德凯科技有限公司，河北 保定 072750)

**摘　要**：铝合金铸件易产生疏松、缩孔缺陷，靠传统经验的方法设计浇注系统会导致较长的开发周期、较高的铸造成本。为了获得高质量的合格铸件，并缩短研发周期，本文采用 ProCAST 软件对某铝合金壳体熔模铸造工艺设计进行了优化。模拟结果显示原始组合方案下铸件 2 处位置会产生疏松缺陷，并通过试验验证试样件缺陷数量与位置与数值模拟结果相符，而优化后工艺方案所生产的试样件无缺陷产生，符合产品质量要求。

**关键词**：ZL101A；工艺优化；熔模铸造；数值模拟
**中图分类号**：TG249.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2024)07-0699-06

# Numerical Simulation and Optimization of the Casting Process for a Certain Aluminium Alloy Shell Component

SHAO Wenbao, JI Xiaolei, LIU Xiaojie, LI Yuanyuan, PAN Yuyao, LIU Xinxia, GE Xuewei
(Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, China)

**Abstract**: Aluminium alloy castings are prone to porosity and shrinkage defects. Designing a gating system based on traditional experience can lead to longer development cycles and higher casting costs. To obtain high-quality qualified castings and shorten the research and development cycle, ProCAST software was used to optimize the investment casting process design of an aluminium alloy shell. The simulation results show that porosity defects occur at two positions in the casting prepared by the initial combination plan. The number and location of the defects in casting are experimentally verified to be consistent with the numerical simulation results, while no defects are observed in casting after optimizing the process plan, meeting the product quality requirements.

**Key words**: ZL101A; process optimization; numerical simulation; investment castings

熔模铸造为近净成型工艺技术，多用于复杂或特殊形状零件的铸造[1-3]。传统熔模铸造浇注系统设计都是根据经验来确定[4-6]，根据浇注铸件的冶金质量对铸造工艺进行反复的修改，以获得合格的铸件，但这样的试错方法会导致较长的开发周期、较高的铸造成本，难以获得高质量的合格铸件[7-9]。为了降低熔模铸造铸件的成本，缩短研发周期[10-13]，采用计算机数值模拟技术对浇注工艺及参数是否可行进行预测，而 ProCAST 是铸造模拟中常使用的软件，可以模拟铸造凝固及流动过程，准确预测铸件的疏松、缩孔等缺陷[14-17]。

本文所研究壳体为铝合金铸件，其对管路部分气密性要求极其严格，因此对铸件的冶金质量有很高要求。为了获得高质量的合格铸件，并缩短研发周期，采用 ProCAST 软件对该铸件的组合工艺进行了数值模拟，分析铸件凝固过程中固相率的变化以及疏松缺陷分布。随后根据缺陷情况进行工艺优化，并对优化前和优化后的工艺进行了实验，验证了数值模拟结果的准确性。

## 1　铸件工艺分析

铸件所用材料为 ZL101A，属于复杂的型腔壳体类铸件，质量约为 2.0 kg，尺寸大小约为 215 mm×155 mm×180 mm，铸件形状如图 1 所示。而且零件结构壁厚不均匀，最薄壁厚为 3 mm，最大壁厚约为 22 mm，存在多处局部热节，不利于实现顺序凝固，

收稿日期：2023-11-07
作者简介：邵文宝，1980 年生，工程师. 主要从事轻质合金铸条件方面的工作. Email: shaowenbao@126.com
通讯作者：冀晓磊，1988 年生，工程师. 主要从事轻质合金精密铸造工艺设计等模拟方面的工作. Email: 1203052021@qq.com
引用格式：邵文宝，冀晓磊，刘晓杰，李园园，潘煜曜，刘鑫霞，葛学伟. 铝合金某壳体件铸造工艺数值模拟及优化[J]. 铸造技术，2024, 45(7): 699-704.
SHAO W B, JI X L, LIU X J, LI Y Y, PAN Y Y, LIU X X, GE X W. Numerical simulation and optimization of the casting process for a certain aluminium alloy shell component[J]. Foundry Technology, 2024, 45(7): 699-704.

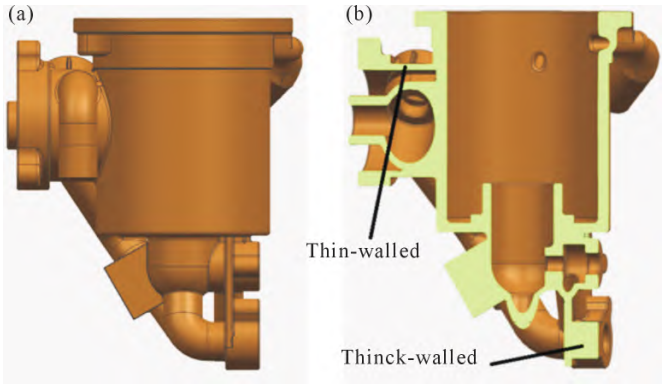



图 1 三维图：(a) 正视图；(b) 剖视图
Fig.1 Three-dimensional view: (a) front view; (b) cutaway view

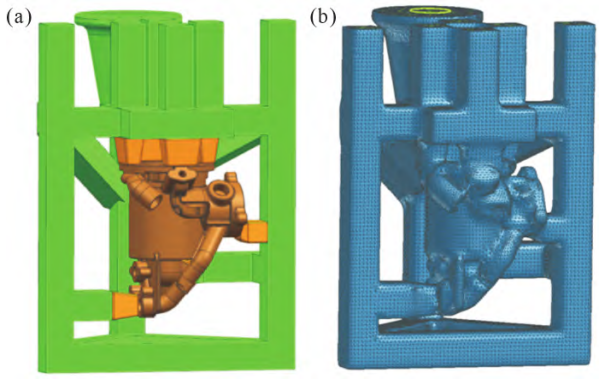



图 2 初始浇注系统设计方案及型壳网格划分：(a) 浇注系统方案；(b) 网格划分
Fig.2 Designing scheme of the initial gating system and grid division of the shell: (a) pouring system scheme; (b) grid division

因此铸件极易产生疏松缺陷。

## 2 初始工艺设计及模拟结果分析

### 2.1 初始方案及模型设置

结合铸件结构特点及冶金成型难点，根据熔模铸造特点采用传统经验法对该铸件进行了初版组合工艺设计。该初版工艺的设计原则是在铸件厚大的部分放置冒口，以保证铸件能够得到足够的补缩。初版工艺设置的组合图如图 2 所示，且铸件的管路及型腔采用传统的浆料进行涂制并无采用陶瓷型芯，因此后期模拟时设置无需单独考虑管路的换热系数。采用 UG 三维软件对铸件的组合工艺进行实体建模，然后将组合工艺实体导入 ProCAST 软件进行数值模拟，将模型进行网格划分，设置面网格大小为 5 mm，生成的模壳网格厚度为 6 mm，然后再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 [18-21]，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

固相率是指溶液中固体物质的比例，随着温度的降低，溶液中的固体物质会越来越多，固相率也就越高。通过对固相率的分析可以清晰观察到铸件的整个凝固过程，如果铸件在凝固过程中有孤立液相产生，这说明铸件在凝固过程无法形成顺序凝固，会导致铸件产生疏松缺陷。如图 3 所示，透明部分表示铸件已经凝固，而深色部分则表示铸件金属处于液态或半凝固状态。从图 3 可以看出，当 $t$ 为 30 s 时，铸件从薄壁处开始凝固，并逐渐向壁厚处进行；$t$ 为 100 s 时，铸件有 1 处区域因补缩通道断开，产生 1 处孤立液相区域；$t$ 为 330 s 时，同样因冒口补缩不到位，导致铸件产生孤立液相区域，这 2 处区域可能就会产生缩松、缩孔缺陷。

表 1 数值模拟参数
Tab.1 Parameter settings for the numerical simulation

| Metal material | Shell material | Shell mold thickness/mm | Interfacial heat transfer coefficient/W·m$^{-2}$·K$^{-1}$ | Pouring time /s | Pouring temperature/℃ | Shell temperature/℃ | Cooling method |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZL101A | Mullite | 6.5 | 200 | 15 | 710 | 350 | Air cooling |

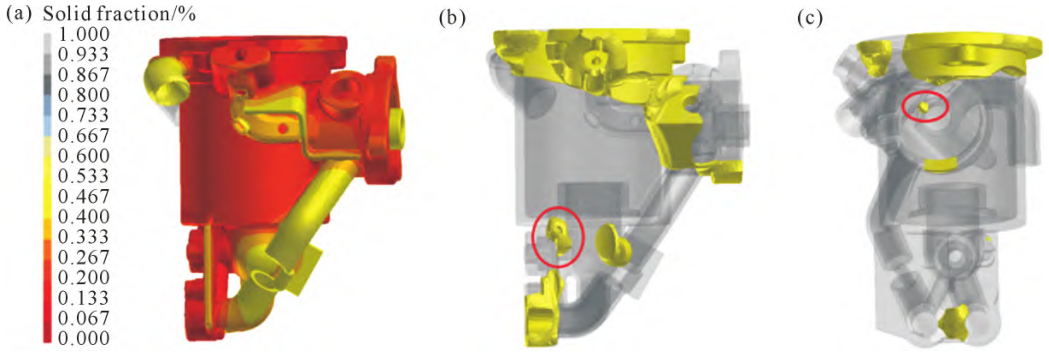



图 3 凝固过程固相分布：(a) 30 s; (b) 100 s; (c) 330 s
Fig.3 Distribution of the solid phase during the solidification process: (a) 30 s; (b) 100 s; (c) 330 s

#### 2.2.2　疏松缺陷分析

对于铸件模拟结果疏松缺陷的分析，可以采用 ProCAST 软件中的缩松缩孔判据，该判据通过孔隙率模型分析铸件中产生的疏松缺陷；如果铸件在缩松率大于 1%的情况下依然有疏松体积存在，则说明该组合工艺会存在疏松缺陷。该初版工艺所产生的疏松缺陷位置分布如图 4 所示，该铸件产生 2 处疏松，分析产生原因是因为该 2 处疏松区域均为铸件的厚大部位，且在整个凝固过程中没有得到足够的金属液补充，故产生了疏松缺陷。

## 3　工艺优化及模拟结果分析

### 3.1　优化方案及模拟设置

为了解决铸件 2 处不同位置(图 5)的疏松缺陷，将初版组合工艺方案进行改进，位置 1 处的疏松是因为冒口距疏松位置太远，无法及时保证补缩导致产生缺陷，因此将冒口位置进行调整如图 6 所示；位置 2 的疏松是因为该位置属于热节区域，但是缺少冒口补缩，因此需要在此位置增加冒口如图 7 所示，改进后的浇注系统增加了 1 处横浇道并与增加的冒口连接，其它位置的浇道的并未改变，改进后的整体组合工艺如图 8 所示；然后再将改进后的组合工艺进行模拟，模拟设置参数同表 1。

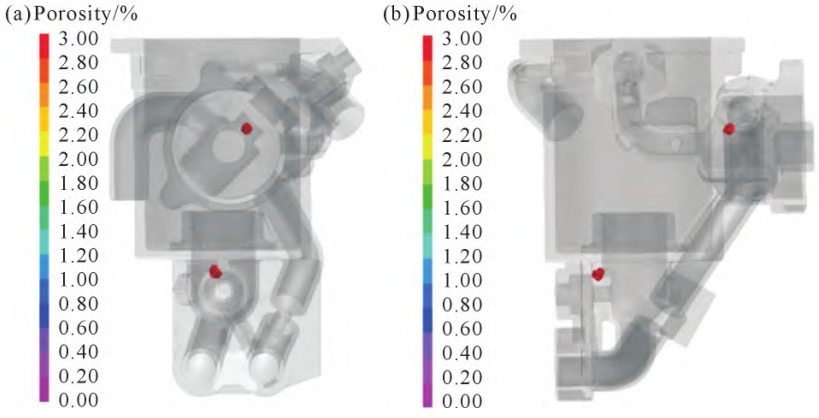



图 4　疏松缺陷分布：(a) 正视图；(b) 侧视图

Fig.4　Distribution of the porosity defect: (a) front view; (b) side view

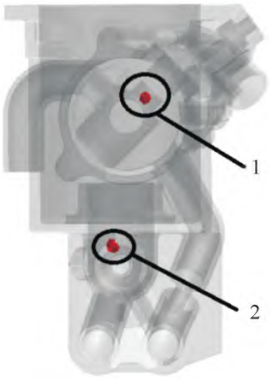



图 5　铸件疏松位置示意图

Fig.5　Schematic diagram of the porosity distribution in the casting

### 3.2　模拟结果分析

#### 3.2.1　凝固过程分析

从图 9 可以看出，铸件刚开始的凝固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；不同的是在 $t$=100 s 时，在初版组合工艺产生孤立液相的位置，工艺改进后并未产生孤立液相；在 $t$=330 s 时，在初版组合工艺产生的第二处孤立液相位置，工艺改进后也并未产生孤立液相，这说明增加冒口和更改冒

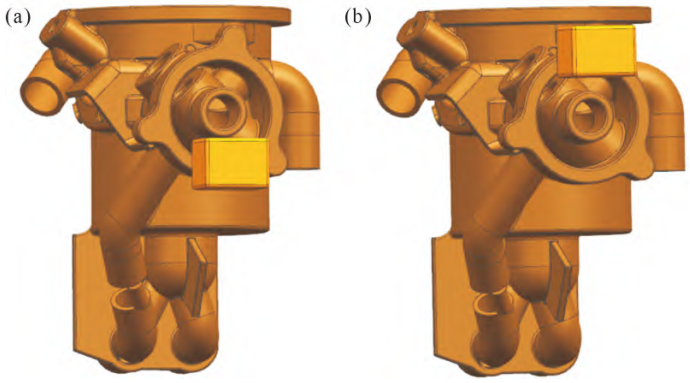



图 6　疏松位置 1 冒口调整：(a) 调整前；(b) 调整后

Fig.6　Riser adjustment for porosity position 1: (a) before adjustment; (b) after adjustment

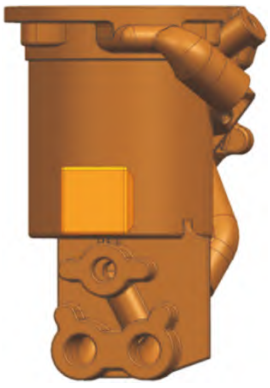


图 7 疏松位置 2 增加冒口
Fig.7 Riser added at porosity position 2

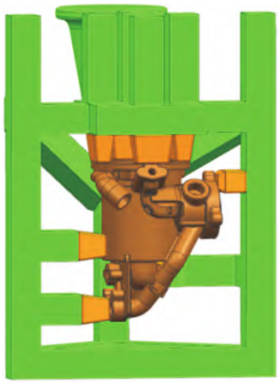


图 8 改进后组合工艺
Fig.8 Improved combination process

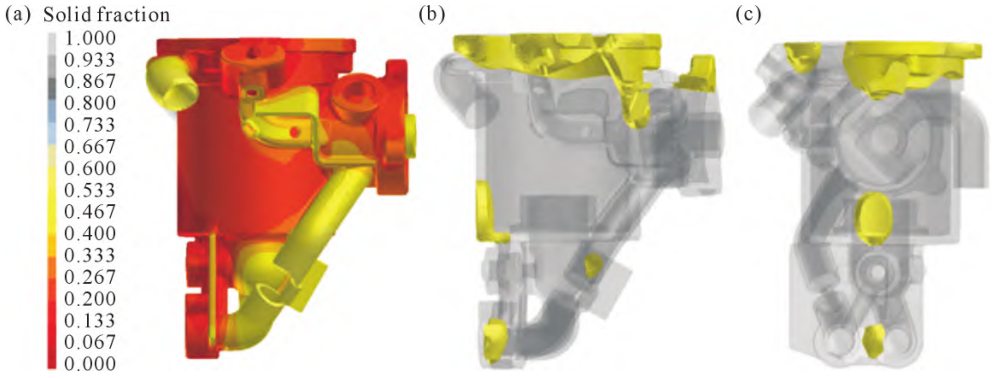



图 9 凝固过程分布:(a) 30 s; (b) 100 s; (c) 330 s
Fig.9 Distribution during the solidification process: (a) 30 s; (b) 100 s; (c) 330 s

口位置改善了铸件凝固顺序，从而解决了因冒口补缩不足产生的疏松缺陷。

### 3.2.2 疏松缺陷分析

工艺改进后，采用相同的缩松缩孔判据对 ProCAST 模拟结果进行评判,从图 10 可以看出,整个铸件并未有疏松缺陷产生，这说明工艺改进后实现了铸件的顺序凝固，解决了原来初版组合工艺产生的 2 处疏松缺陷。

## 4 实验验证

为了验证模拟结果的准确性和改进后工艺方案的可行性，将初版组合工艺和优化后组合工艺方案进行试验,2 种工艺方案除了组合系统不一致外其它铸造参数完全一致,在经过蜡模压制、蜡模组焊、制壳、脱蜡、型壳焙烧、浇注、水力清壳、去除浇冒口等一系列工序后得到了产品浇注，将铸件进行无损探伤检测，结果显示按初版组合工艺生产的铸件存在 2 处疏松,疏松位置正好与模拟位置相对应。而按优化后的组合工艺生产的铸件，无损探伤结果显示并未有疏松缺陷产生,如图 11 所示。将优化后的工艺方案进行小批量生产,所生产铸件全部合格,实际生产的铸件如图 12 所示,验证了模拟的准确性及优

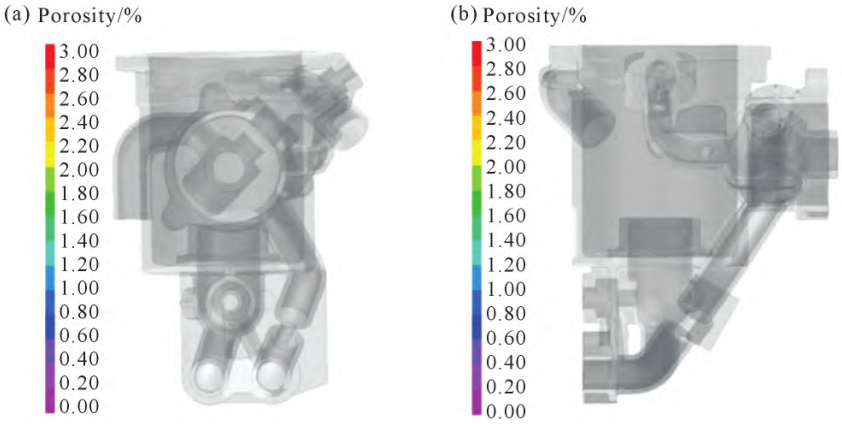



图 10 疏松缺陷分布:(a) 正视图;(b) 侧视图
Fig.10 Distribution of the porosity defects: (a) front view; (b) side view

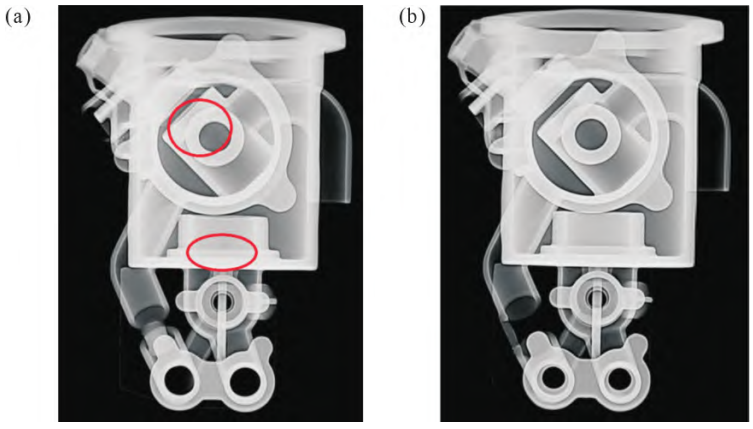



图 11　工艺优化前后铸件疏松缺陷情况对比：(a) 优化前；(b) 优化后

Fig.11　Comparison of porosity defects in the casting before and after process optimization: (a) before process optimization; (b) after process optimization

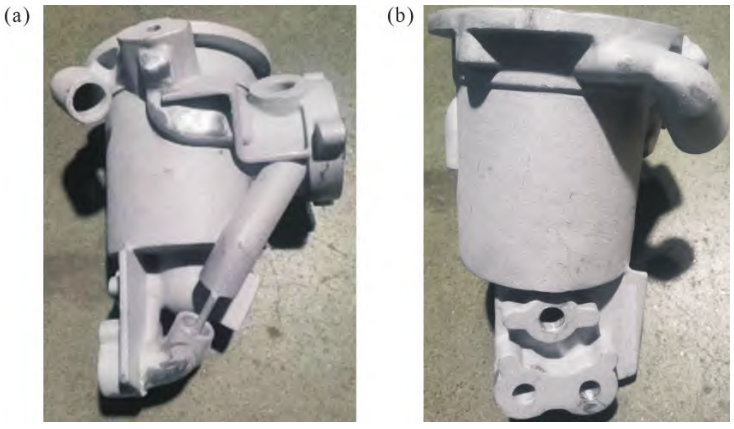



图 12　实际生产的铸件

Fig.12　Actual production of the castings

化后方案的可行性。

## 5　结论

(1)采用数值模拟的方法优化了组合工艺方案，解决了原有工艺中铸件产生的疏松缺陷问题，并对优化前和优化后组合工艺方案进行了试验，结果表明验证优化前工艺方案所生产的试样件缺陷位置是与模拟结果相符，优化后工艺方案所生产的试样件无缺陷产生，符合产品质量要求。

(2)数值模拟结果与无损检测结果高度一致，为同类铝合金铸件产品的研制和工艺方案优化提供了可靠的依据和分析方法，为类似铸件的熔模精密铸造成形技术提升奠定了基础。

**参考文献：**

[1] 罗杨，杨家财，罗丽. 铝合金汽车转向节重力铸造工艺优化[J]. 铸造工程，2023, 47(5): 16-18.
LUO Y, YANG J C, LUO L. Research on casting process optimization of automobile steering knuckle[J]. Foundry Engineering, 2023, 47(5): 16-18.

[2] 朱嘉伟，张文达，刘云，刘士渊，侯建斌，陈利华. 基于 ProCAST 的一模多腔 YL112 铝合金压铸件数值模拟及工艺优化[J]. 热加工工艺，2024, 53(8): 113-117.
ZHU J W, ZHANG W D, LIU Y, LIU S Y, HOU J B, CHEN L H. Numerical simulation and process optimization of one mold multi-cavity die casting YL112 aluminum alloys based on ProCAST [J]. Hot Working Technology, 2024, 53(8): 113-117.

[3] 蒋梦麒，陈双，齐兵，何博. 基于 ProCAST 的支座件熔模铸造浇注系统设计[J]. 计算机与数字工程，2023, 51(4): 978-982.
JIANG M Q, CHEN S, QI B, HE B. Design of investment casting pouring system for support parts based on ProCAST[J]. Computer and Digital Engineering, 2023, 51(4): 978-982.

[4] 牛森. 现代熔模铸造工艺技术设计与管理[J]. 山西冶金，2023, 46(5): 88-90, 96.
NIU S. Design and management of modern investment casting technology[J]. Shanxi Metallurgy, 2023, 46(5): 88-90, 96.

[5] 许庆彦. 熔模铸造过程数值模拟研究进展[J]. 铸造，2022, 71(7): 803-813.
XU Q Y. Research on numerical modeling of investment casting process[J]. Foundry, 2022, 71(7): 803-813.

[6] 张晓光，王云鹏，王晓鹏，李远志，陈奇. 合金钢支架熔模铸造的工艺优化[J]. 铸造，2023, 72(9): 1175-1180.
ZHANG X G, WANG Y P, WANG X P, LI Z Y, CHEN Q. Process optimization of investment casting for alloy steel bracket[J]. Foundry, 2023, 72(9): 1175-1180.

[7] 王果，黄嘉敏，陈振明，赵海东. 低压铸造铝合金轮毂模具热变形的数值模拟[J]. 精密成形工程，2023, 15(10): 95-103.

WANG G, HUANG J M, CHEN Z M, ZHAO H D. Numerical simulation of thermal-deformation of molds for low pressure die-casting aluminum alloy wheel hubs[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(10): 95-103.

[8] 刘珍君, 朱小平, 栗尼娜, 徐永涛, 孙瑛聪, 张荣强, 陈正阳. 熔模铸造钛合金中介机匣应力数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(1): 129-134.
LIU Z J, ZHU X P, LI N N, XU Y T, SUN Y C, ZHANG R Q, CHEN Z Y. Numerical simulation of stress in investment casting titanium alloy intermediate casing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1): 129-134.

[9] 郑亚平. 铝合金壳体模具高密度压铸成型模拟研究[J]. 金属功能材料, 2022, 29(3): 97-103.
ZHENG Y P. Simulation of high density die casting of aluminum alloy shell die[J]. Metallic Functional Materials, 2022, 29(3): 97-103.

[10] 苏连升. 熔模铸件缩松缺陷原因分析及解决方案[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(10): 1309-1312.
SU L S. Analysis and solution of shrinkage porosities defects in investment castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(10): 1309-1312.

[11] 白绍卿. 基于 ProCAST 的行星架铸造模拟及系统优化工程[J]. 品牌与标准化, 2023(S1): 153-158.
BAI S Q. Planetary carrier casting simulation and system engineering based on ProCAST[J]. Enterprise Standardization, 2023 (S1): 153-158.

[12] 张孝元, 王孝国, 杨光印. 基于 ProCAST 的压壳铸造工艺设计及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(7): 823-826.
ZHANG X Y, WANG X G, YANG G Y. Design and optimization of shell-pressing casting process based on ProCAST software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7): 823-826.

[13] 曹学锋, 朱大智, 张少文, 刘云志. 铝合金车轮铸造裂纹研究[J]. 铸造, 2022, 71(9): 1178-1181.
CAO X F, ZHU D Z, ZHANG S W, LIU Y Z. Study on casting cracks for aluminum alloy wheel[J]. Foundry, 2022, 71(9): 1178-1181.

[14] 薛冠霞, 钟鼓, 洪尧, 王占坤, 任思蒙, 罗安民, 陈德斌, 李虎田, 郭世杰. 铸造工艺对 ER5356 铝合金焊丝缺陷和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(8): 1079-1084.
XUE G X, ZHONG G, HONG Y, WANG Z K, REN S M, LUO A M, CHEN D B, LI H T, GUO S J. Effect of casting process on defect formation and mechanical property of ER5356 aluminum alloy welding wires[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8): 1079-1084.

[15] 孟晓东, 张荣强, 冀晓磊, 邢昌勇, 李波, 许龙欢. 熔模铸造 ZM5 合金界面换热系数研究[J]. 铸造, 2022, 71(9): 1154-1157.
MENG X D, ZHANG R Q, JI X L, XING C Y, LI B, XU L H. Research on interface heat transfer coefficient of ZM5 alloy under investment casting conditions[J]. Foundry, 2022, 71(9): 1154-1157.

[16] 李梅, 彭银利. 低压铸造铝合金轮毂的数值仿真[J]. 中国机械, 2023(19): 52-55.
LI M, PENG Y L. Numerical simulation of low pressure casting aluminum alloy wheel hub[J]. Machine China, 2023(19): 52-55.

[17] 夏琨, 徐向阳, 段士伟. 基于 ProCAST 的转子盘熔模铸造数值模拟研究[J]. 铸造技术, 2022, 43(5): 375-381.
XIA K, XU X Y, DUAN S W. Numerical simulation of investment casting of rotor disc based on ProCAST[J]. Foundry Technology, 2022, 43(5): 375-381.

[18] 周传龙, 何强, 周宏根, 李国超, 符博峰, 赵明. 基于 ProCAST 的柴油机活塞铸造工艺模拟及优化[J]. 铸造, 2022, 71(5): 632-636.
ZHOU C L, HE Q, ZHOU H G, LI G C, FU B F, ZHAO M. Simulation and optimization of casting process for diesel engine piston based on ProCAST[J]. Foundry, 2022, 71(5): 632-636.

[19] 陈伟博, 孙嵩, 陈继霞, 赵铜剑. 铝合金铸造壳体高速铣削参数优化研究[J]. 新技术新工艺, 2020(6): 70-74.
CHEN W B, SUN S, CHEN J X, ZHAO T J. Research on optimization of high speed milling parameters for aluminum alloy casting shell[J]. New Technology & New Process, 2020(6): 70-74.

[20] 李欣然, 苏彦庆, 王亮, 李平, 赵俊岩. 基于数值模拟的铸钢凸圈消失模铸造工艺方案设计[J]. 铸造, 2023, 72(3): 305-309.
LI X R, SU Y Q, WANG L, LI P, ZHAO J Y. Design of lost foam casting process plan for steel convex rings based on numerical simulation[J]. Foundry, 2023, 72(3): 305-309.

[21] 陈正阳, 杨树峰, 谢锦丽, 于鸿垚, 毕中南, 张继. 钛合金异形薄壁壳体铸造工艺数值模拟及优化[J]. 中国冶金, 2022, 32(10): 105-110.
CHENG Z Y, YANG S F, XIE J L, YU H Y, BI Z N, ZHANG J. Numerical simulation and optimization of titanium alloy shaped thin-walled shell casting process[J]. China Metallurgy, 2022, 32 (10): 105-110.