

ZL101 泵壳凝固成形工艺设计数值仿真优化

洪尉尉¹ 樊振中²

(1 杭州职业技术学院特种设备学院, 杭州 310000)

(2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

文 摘 针对 ZL101 泵壳设计了两种不同的浇铸系统, 借助 FEM 方法完成了充型流动场、凝固固相场与疏松分布的数值计算对比分析。结果表明: 采用底注式浇铸系统, 合金熔体充型平稳, 型腔内部充型初期卷入的气体可有效排出, 凝固次序为自上而下与自内向外的逐层凝固, T5 热处理后本体试样平均抗拉强度、屈服强度与延伸率分别为 334.5、274 MPa 与 5.8%, 满足了 HB962-2001 II 类铸件的技术指标要求。

关键词 ZL101 合金, 凝固成形, 工艺设计, 数值仿真

中图分类号: TG244

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2019.06.003

Optimization Analysis for Solidification Process of ZL101 Pump Casting by Numerical Simulation

HONG Weiwei¹ FAN Zhenzhong²

(1 Hangzhou Vocational and Technology College, Hangzhou 310000)

(2 Beijing Institute of Aviation Materials, Beijing 100095)

Abstract Two different filling systems of ZL101 pump casting were designed in this paper, and the flowing field, solidification phase field and distribution of shrinkage were calculated by the FEM numerical simulation. The results show that the melt alloy fills smoothly and the gas inside the resin sand core exhaust effectively from the riser by adjusting the bottom injection casting system, which forms the solidification sequence from top to bottom and from inside to outside. The average tensile strength, yield strength and elongation of the bulk samples are 334.5MPa, 274MPa and 5.8% after the T5 treatment process, which meets the technical requirements of HB962-2001 Type II castings.

Key words ZL101 alloy, Solidification, Technological design, Numerical simulation

0 引言

铝合金比强度高、耐腐蚀性、加工性能优异^[1-4], 凝固成形可实现结构部件的一体化成形制造, 提高结构部件的整体刚度, 减少部件连接装配数量, 缩短产品的研发周期^[5-6]。一体化轻量结构设计目前已成为轨道交通、化工船舶、航天航空等装备制造领域的研究热点。

ZL101 合金为 Al-Mg-Si 系铸造合金, 应用最为广泛。工艺流动性能优异, 通过在合金中添加 Mg、Ti 以期提高合金的综合力学性能。与传统铸造工艺设计的“试错法”相比, 对凝固充型采用 FDM/FEM 数

值仿真计算, 可借助计算机对凝固充型流动场、温度场、固相场进行仿真预测, 缩短工艺设计周期, 提高产品的工艺出品率, 改善并提高铸件内部的冶金质量, 目前已成为铸造工艺设计的主流模式^[7-14]。

本文研究对象为某型火箭发动机 ZL101 泵壳铸件, 泵壳铸件壁薄且为拐角结构, 在凝固成形过程中如浇注工艺设计不合理, 易在拐角部位产生疏松、热裂缺陷, 研制难度较大。FDM 有限差分仿真方法温度场求解速度较快, 且精度也较高, 但流动场求解计算速度较慢, 且计算精度较差; 因此目前多采用 FEM 有限元仿真方法对凝固冷却过程进行求解计算, 可明

收稿日期: 2019-05-13

第一作者简介: 洪尉尉, 1987 年出生, 硕士, 主要从事特种设备结构设计与成型制造方面的研究。E-mail: 2129867268@qq.com

显缩短产品的研制周期,提高产品的研制合格率,Pro-Cast 有限元仿真计算软件为目前使用范围最广的 FEM 仿真计算软件。本文借助 Pro-Cast 软件完成了两种不同凝固成形工艺下充型流动场与凝固温度场的对比计算,结合仿真计算优化结果完成了 ZL101 泵壳铸件的凝固成形工艺设计参数优化,通过本体剖切与打压测试考核了铸件的性能指标,可为航天火箭发动机用铝合金铸件的工程化应用提供设计参考。

1 实验

1.1 材料

表 1 所示为 ZL101 铝硅铸造合金的化学成分。铸锭的熔化采用电阻熔化炉,坩埚容量为 500 kg,添加新疆众和生产的高纯铝锭(99.99wt%)升温至 740℃直至完全熔化,升温至 780℃加入氟钛酸钾,降温至 735℃加入 Al-12Si、高纯 Mg 锭(99.99wt%),降温至 725℃通入 Ar 气、C₂Cl₆进行精炼除气 15 min,静置 10 min 后降温至 710℃进行浇铸。ZL101 合金 T5 热处理按照 HB963—2005 标准执行,热处理工艺参数见表 2。固溶处理由成都宏德 WJT-580 井式固熔炉完成(温控精度为±5℃,峰值温限为 800℃),时效处理由保定精工 ETD-24LS 型数控时效炉完成(温控精度为±3℃,峰值温限为 450℃)。T5 热处理完成后切取本体试样并加工成标准 Φ5mm 力学性能测试试样,见图 1。力学性能实验由 ETS-120KN 试验机完成,夹头移动速度为 1.8 mm/min。压力测试由学院自行设计的压力测试设备完成,压力测试介质为室温水,压力测试载荷最高值为 20 MPa。

表 1 ZL101 铝合金化学成分

Tab.1 Chemical component of ZL101 aluminium alloy

wt/%					
Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Al
6.8	0.42	0.18	0.12	0.08	Bal

表 2 ZL101-T5 热处理工艺参数

Tab.2 T5 heat treatment parameters of ZL101 alloy

热处理状态	保温温度/℃	保温时间/h	冷却介质	转移时间/s
固溶	540	6	水/25℃	≤20
时效	150	5	空气	—

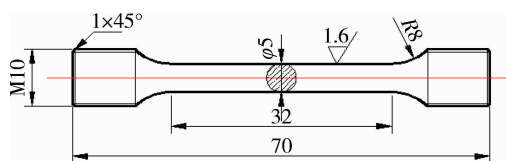
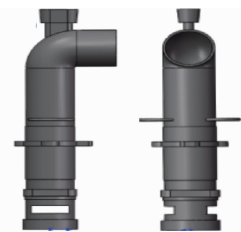


图 1 力学性能拉伸试样示意图

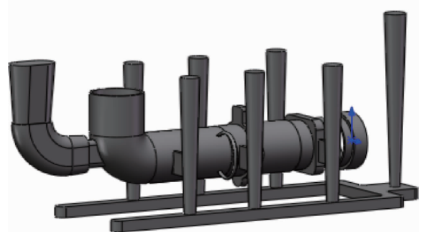
Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen for mechanical properties testing

1.2 凝固成形工艺设计

ZL101 泵壳三维结构与浇铸系统设计见图 2。三维尺寸为 314 mm×248 mm×586 mm,壁厚最厚为 52 mm,最薄为 8 mm,平均为 12 mm。泵壳为 HB962—2001 II 类铸件,材料状态为 T5,本体试样要求抗拉强度≥300 MPa,屈服强度应≥245 MPa,延伸率应≥3.5%。铸型材料选择为呋喃树脂自硬砂,黏结剂为 Beta-24 型呋喃树脂,添加量占硅砂总重的 1.2%~1.5%,硅砂粒度为 75~109 μm,涂料为 Gsteu-36 型耐高温涂料。ZL101 泵壳需进行耐压测试,测试压力为 3.5 MPa,压力测试时间为 15 min,压力测试期间压降不高于 2%。



(a) 左视图 (b) 主视图



(c) 底注式浇铸系统



(d) 立注式浇注系统

图 2 ZL101 泵壳结构与凝固工艺设计图

Fig.2 Structure and solidification process design of ZL101 pump casting

ZL101 泵壳设计了底注式与立注式两种浇铸系统,底注式浇铸系统中,直浇道直径为 Φ16 mm,高度为 426 mm,拔模斜度为 1.8°;横浇道宽度为 46 mm,高度为 38 mm;缝隙浇道直径为 Φ15mm,高度为 332 mm,拔模斜度为 1.5°;内浇道截面尺寸为 46 mm×12 mm,工艺出品率为 54%。立浇式浇铸系统中,直浇道直径为 Φ18 mm,高度为 684 mm,拔模斜度为 1.2°;横浇道截面尺寸为 48 mm×22 mm,内浇道截面尺寸为

32 mm×14 mm,工艺出品率为 68%。

2 数值仿真计算结果分析

2.1 充型流动场

图 3 所示为两种浇铸系统的 FEM 网格剖分示意图。浇注系统网格剖分尺寸为 4 mm,砂箱吃砂量设计为 80 mm,网格剖分尺寸为 10 mm;图 3(a)所示网格剖分数量为 336 842,图 3(b)所示网格剖分数量为 246 237。

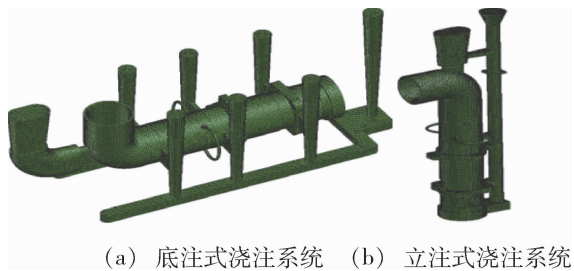


图 3 网格剖分示意图

Fig.3 Schematic diagram of meshing system

由图 4 所示底注式浇铸系统充型流动场的 FEM 数值计算结果可知,底注式浇注系统下 ZL101 合金熔体自缝隙浇道与内浇口对树脂砂型腔进行熔体充填,浇注初期熔体流动高度落差较大,见图 4(b)箭头位置所示。当充型至 2.2 s 时,泵壳已完成约 50% 的体积充填,随着充型过程的持续进行,合金熔体逐步对冒口区域进行充填,凝固末期在冒口的补缩下逐序凝固,见图 4(f)。立注式浇铸系统充型流动场 FEM 数值计算结果见图 5,相比之下,立注式浇铸系统下合金熔体在充型初期高度落差较大,易形成紊流,同时在型腔内部卷入一定量的气体,见图 5(b)箭头位置所示。随着充型过程的持续进行,合金熔体自上、下内浇道同时对型腔进行体积充填,充型初期卷入的气体得不到有效的排出,不断被包裹在熔体内部,如图 5(c)(d)所示。当充型至 0.72 s 时,泵壳已基本充填完毕,汇聚在铸件顶部的气体被合金熔体包覆,直至铸件最终凝固完毕。

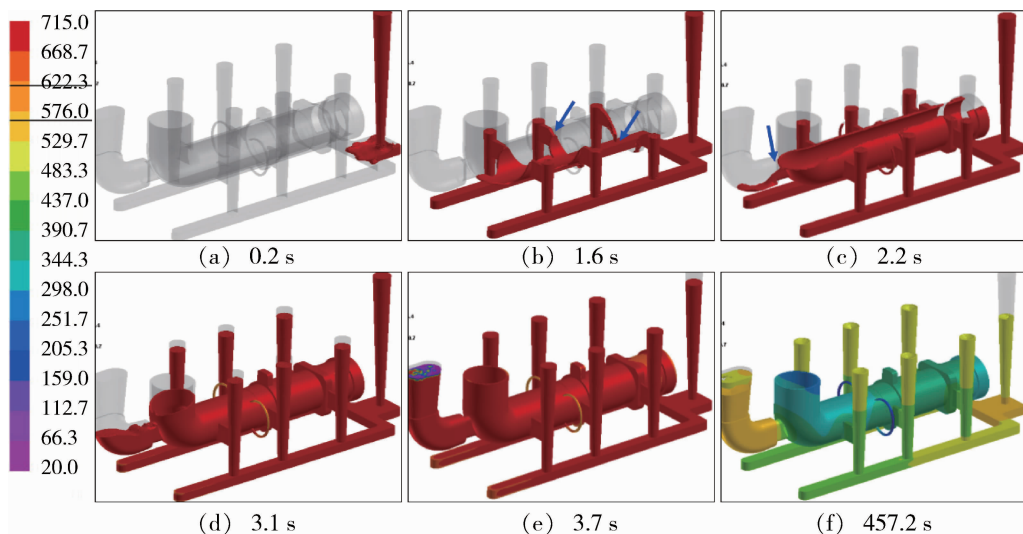


图 4 充型过程 FEM 仿真计算结果

Fig.4 FEM simulation results of filling process

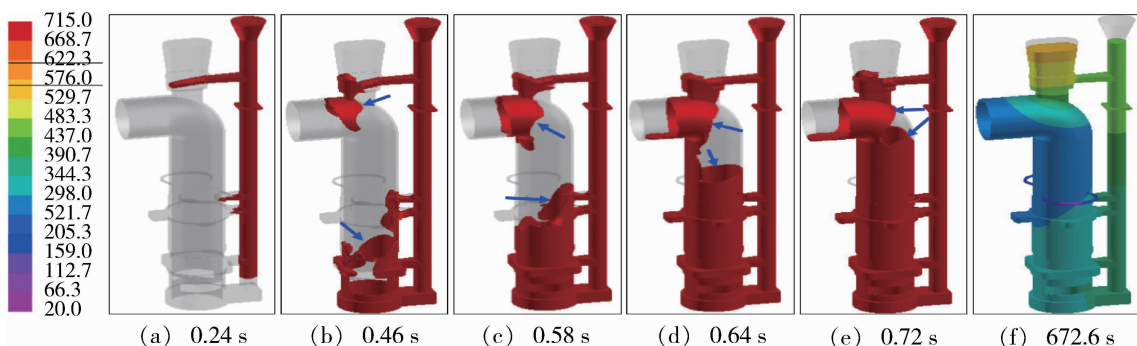


图 5 充型过程 FEM 仿真计算结果

Fig.5 FEM simulation results of filling process

2.2 凝固固相场

底注式浇铸系统凝固固相分布 FEM 计算结果见图 6。可知,ZL101 泵壳先于浇铸系统凝固冷却,凝固固相在 27.2 s 时起始于铸件顶端区域,见图 6(c)。随着凝固过程的持续进行,泵壳自上而下与自内向外逐序凝固,冒口在凝固末期对铸件进行了有效的熔体补缩,见图 6(d)。当凝固至 127.2 s 时,除厚大法兰部位外,泵壳已基本凝固完毕。如图 6(f) 所示,ZL101 泵壳在 307.2 s 时凝固终了。立注式浇注系统

凝固固相分布 FEM 数值计算结果见图 7。如图 7(b) 所见,泵壳于 16.7 s 开始凝固,凝固次序为自心部向两端,在顶部冒口的补缩作用下依序逐层凝固。当凝固至 67.1 s 时,泵壳上半部已基本凝固完毕;在 93.0 s 时除厚大法兰部位外,泵壳已基本实现 100% 的凝固。凝固末期,合金熔体在顶端冒口与直浇道的作用下,对铸件自下而上进行有效的补缩,ZL101 泵壳在立注式浇铸系统下于 231.1 s 时凝固结束。

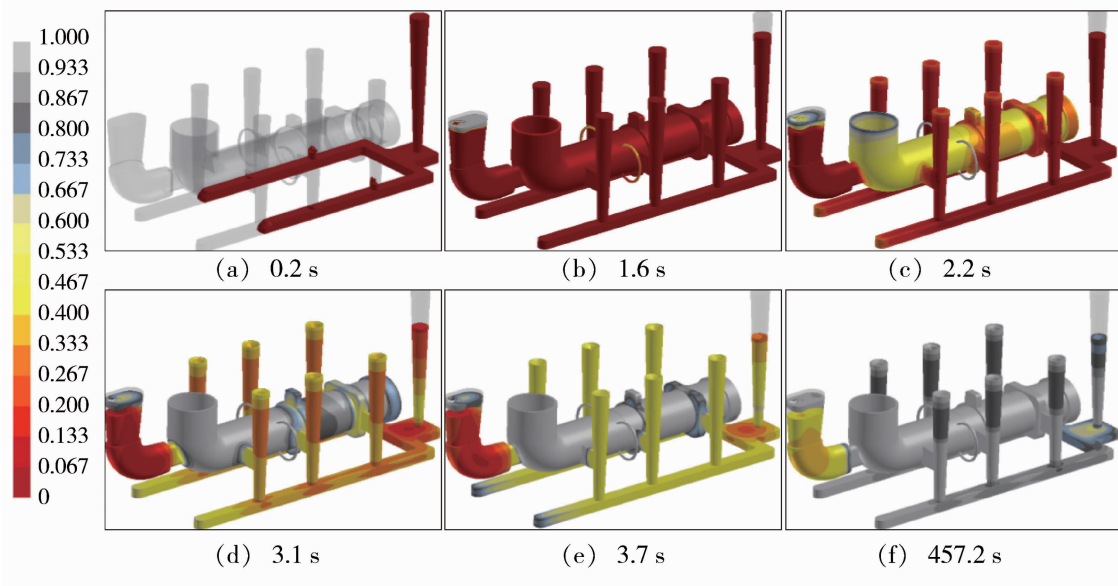


图 6 凝固固相分布 FEM 仿真计算结果

Fig.6 FEM simulation results of solid phase distribution

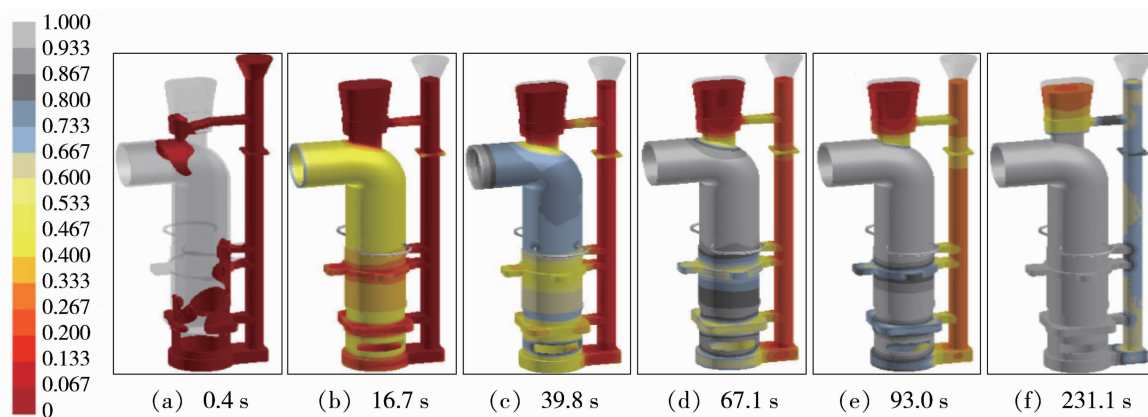


图 7 凝固固相分布 FEM 仿真计算结果

Fig.7 FEM simulation results of solid phase distribution

2.3 凝固疏松分布

图 8 所示为两种不同浇注系统下泵壳内部疏松分布 FEM 仿真计算结果。可知,与立注式浇铸系统相比,采用底注式浇铸系统,浇铸初期合金熔体充型较为平稳,充型初期卷入的气体可通过冒口进行排出,同时较低的凝固高度更易于形成逐层凝固,减少疏松冶金缺陷的数量与严重程度。如图 8(a) 箭头所

示,ZL101 泵壳铸件仅在拐角区域分布少量的疏松缺陷;当采用立注式浇注系统时,充型初期卷入树脂砂型腔的大量气体得不到有效的排出,被大量包裹在铸件内部,凝固结束时在铸件内部形成较为严重的疏松与缩孔冶金缺陷,见图 8(b) 箭头位置所示。图 8(c) 所示为 ZL101 泵壳设计初期选用立注式浇铸系统生产的产品。

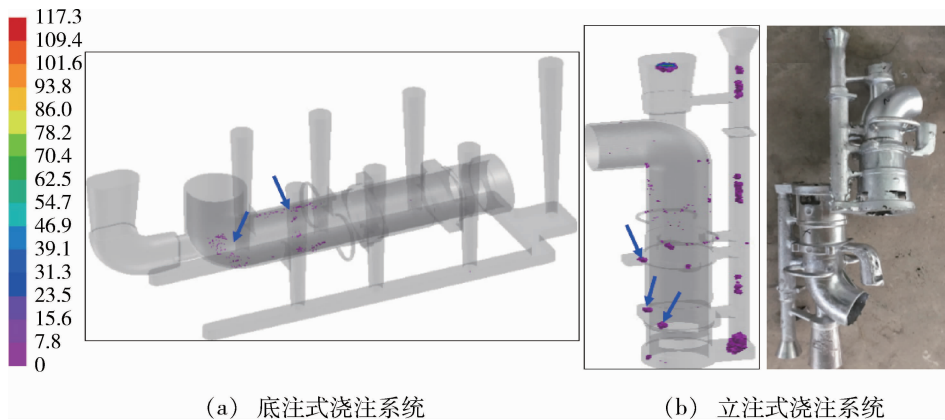


图 8 凝固疏松 FEM 仿真计算结果

Fig.8 FEM simulation results of solid shrinkage

表 3 所示为研制阶段分别采用不同浇注工艺下 ZL101 泵壳铸件的产品质量统计结果。可知,与底注式浇铸系统相比,虽然立注式浇铸系统工艺出品率提高了 14%,但研制阶段采用立注式浇铸系统进行产

品生产时,合格率仅为 30%,ZL101 泵壳铸件内部多存在夹渣、疏松与气孔冶金缺陷;选用底注式浇铸系统生产时,产品合格率由 30%提高至 80%,提高了约 160%,改善效果显著。

表 3 ZL101 泵壳铸件产品质量统计结果

Tab.3 Product quality statistics results of ZL101 pump casting

序号	底注式浇注系统		立浇式浇铸系统		序号	底注式浇注系统		立浇式浇铸系统	
	合格	—	不合格	缺陷		合格	—	不合格	缺陷
1	合格	—	不合格	夹渣	6	合格	—	不合格	夹渣
2	合格	—	不合格	疏松	7	合格	—	合格	—
3	合格	—	不合格	气孔	8	不合格	疏松	合格	—
4	合格	—	合格	—	9	合格	—	不合格	气孔
5	不合格	热裂	不合格	气孔	10	合格	—	不合格	气孔

图 9 所示为不同浇铸系统下 ZL101 泵壳铸件内部冶金质量 X 光无损检测结果。对比图 9(a)可知:当选用立注式浇铸系统时,由于充型初期大量气体被

包裹在型腔内部,无法得到有效的排出,凝固结束时 ZL101 泵壳铸件内部可见大量的气孔冶金缺陷,见图 9(b)箭头位置所示。

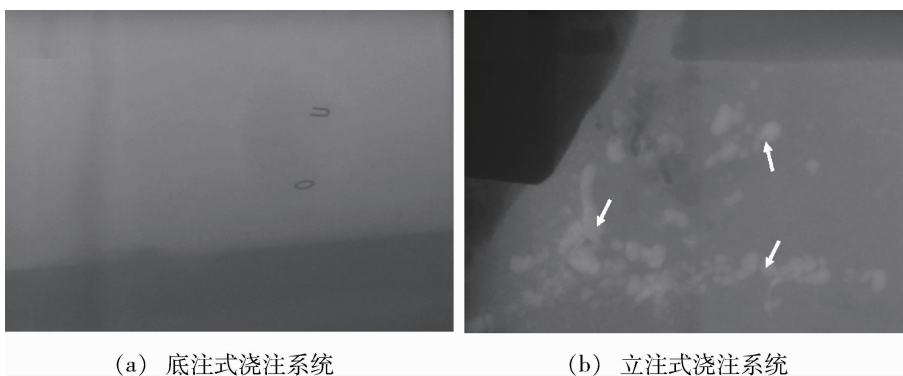


图 9 ZL101 泵壳铸件 X 光探伤结果

Fig.9 X-ray detection results of ZL101 pump casing

3 力学性能与压力测试

ZL101 泵壳铸件 T5 态本体试样力学性能测试结果见图 10。可知,ZL101 泵壳选用底注式浇铸系统经宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2019 年 第 6 期

T5 热处理后本体试样抗拉强度最大值为 342 MPa,最小值为 326 MPa;屈服强度最大值为 285 MPa,最小值为 262 MPa;延伸率最大值为 7.6%,最小值为 4.7%,均

满足了 HB962—2001 II类铸件的技术指标要求。图 11 所示为 ZL101 泵壳铸件压力打压测试结果。可知：ZL101 泵壳铸件在 15 min 压力测试期间，最低压力为 3.47 MPa，最大压降为 0.85%，低于设计要求的 2%，满足了技术指标的要求。

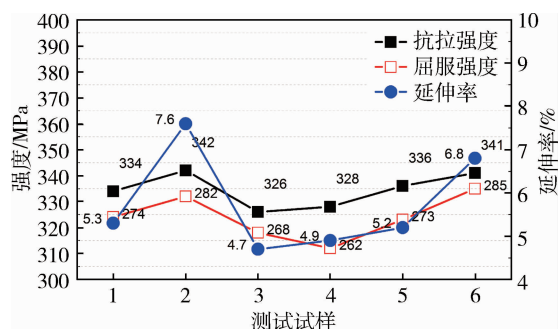


图 10 力学性能测试结果

Fig.10 Mechanical properties of bulk samples

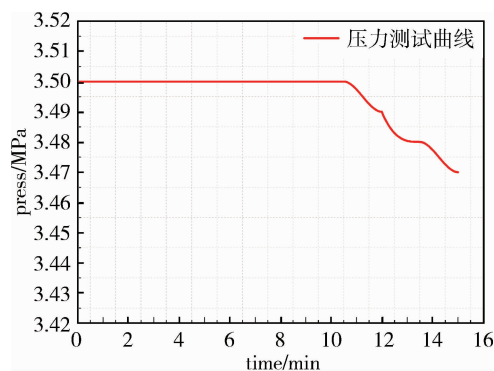


图 11 ZL101 泵体压力测试结果

Fig.11 Pressure test results of ZL101 pump casting

4 结论

(1) 本文借助 Pro-Cast 软件针对 ZL101 泵壳分别设计了底注式浇铸系统与立注式浇铸系统，并完成了两种不同浇铸系统下充型流动场、凝固固相场与疏松分布的 FEM 仿真计算对比分析。

(2) 采用底浇式浇铸系统，合金熔体浇铸初期充型平稳，卷入树脂砂型腔内部的气体通过冒口得到了有效的排出，泵壳实现了自上而下与自内向外的逐序凝固，疏松缺陷得到了有效的控制；与立注式浇铸系统相比，产品研制合格率由 30% 提高至 80%，提高了约 160%，改善效果显著。

(3) 经 T5 热处理后 ZL101 泵壳本体试样抗拉强度最大值为 342 MPa，最小值为 326 MPa；屈服强度最大值为 285 MPa，最小值为 262 MPa；延伸率最大值为 7.6%，最小值为 4.7%，均满足了 HB962—2001 II类铸件的技术指标要求。

参考文献

- [1] 张勇乐. 铸造铝合金技术的现状及未来发展[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(16): 583-585.
- [2] 杨忠敏, 肖军. 汽车轻量化的发展趋势[J]. 铸造工程, 2018(3): 1-7.
- [3] 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(22): 32-35.
- [4] 高忠玉. 浅析汽车工业的铸造铝合金研究初探[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(21): 939.
- [5] 王春涛, 姚杰, 赵海东, 等. Al-7Si-Mg 铝合金挤压铸造过程热-力行为的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(9): 977-980.
- [6] 李忠芳, 杨思一, 周李明, 等. 铝合金箱体砂型铸造数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 721-723.
- [7] 文波, 夏志单, 季珊林, 等. 复杂薄壁框类铝合金铸件工艺设计及数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 768-771.
- [8] 奚磊, 张洁, 张可人, 等. 熔模铸造 A356 铝合金铸件数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(12): 1289-1291.
- [9] 樊振中, 齐向军, 施晓雪, 等. ZL114A 支架凝固成形曲面结构控制工艺研究[J]. 铸造, 2017, 66(9): 919-923.
- [10] 徐秋湘, 赵占西. 工艺参数对铝合金梯级铸件压铸过程的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(5): 518-521.
- [11] 王元庆, 刘静, 陈强, 等. Procast 软件在大型复杂铝合金铸件上的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(11): 1024-1027.
- [12] 曹流, 廖敦明, 胡柏乐, 等. 铸造充型过程中浇不足缺陷的数值计算研究[J]. 铸造, 2018, 67(6): 487-491.
- [13] 林雪健, 黄宏军, 王浩磊, 等. 水轮机转轮体铸造工艺设计与优化[J]. 铸造, 2018, 67(1): 41-44.
- [14] 赵见知, 韩旭, 顾登禹. 基于 CAE 技术的铝合金变速箱箱体铸造工艺设计[J]. 热加工工艺, 2017(3): 97-100.