

复杂燃油调节器低压铸造工艺设计与优化研究

高瑞帅¹, 谢峰², 曹家铭¹, 杨立新², 王勇², 罗伯乐²,
茹菊红², 张伦勇^{1, 3}, 唐桢², 曹福洋^{1, 3}, 孙剑飞^{1, 3}

(1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 中国航发西安动力控制科技有限公司, 陕西西安 710077; 3. 精密热成形国家重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 复杂燃油调节器类构件具有内部油路形成的复杂腔体, 常规重力铸造方法铸件存在缩松、缩孔缺陷难抑制, 导致铸件良品率与出品率均低的重大问题。对此, 本文提出了适于此类具有复杂内腔结构的构件的低压铸造方案, 分析了某型铝合金燃油调节器的复杂结构以及内部型芯对低压铸造工艺产生的影响。采用ProCAST商业软件进行了该型复杂燃油调节器低压铸造工艺的设计, 确定了合适的充型速度, 并分析了充型凝固温度场及铸件内部缺陷产生原因。通过调整模具温度、改变铸件局部的冷却方式进行了低压铸造工艺方案优化, 之后采用该优化方案进行了试验验证。结果表明: 优化后的低压铸造工艺方案可明显消除铸件内部的缩松和缩孔缺陷, 大幅提升铸件良品率与出品率。

关键词: 燃油调节器; 铝合金; 低压铸造; 数值模拟; 工艺优化

作者简介:

高瑞帅(1997-), 男, 博士研究生, 研究方向为先进合金复杂构件反重力铸造技术。E-mail: gruishuai@163.com

通信作者:

张伦勇, 男, 副教授, 博士, 博士生导师。E-mail: zhangly@hit.edu.cn

中图分类号: TG244.3;

TP311

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

09-1282-08

收稿日期:

2025-05-06 收到初稿,

2025-05-29 收到修订稿。

复杂燃油调节器是调节航空发动机燃油流量的核心构件^[1], 保障飞机发动机在多种工作状态下(如点火、启动和加减速等)稳定工作^[2], 从而为飞机提供飞行所需动力, 因此对铸件质量要求十分苛刻。然而, 燃油调节器结构复杂, 存在大量薄壁与厚大部位交互连接, 壁厚变化大, 同时内部存在各种油路孔道和曲槽等复杂内腔结构, 导致该类铸件易于出现缩松和缩孔, 甚至浇不足和冷隔等燃油调节器不允许的铸造缺陷, 造成产品良品率低。为在一定程度上抑制上述铸造缺陷产生, 传统重力铸造或倾转浇注方法通常引入大量冒口和复杂的浇注系统, 但会造成铸件出品率较低。以某型燃油调节器为例, 目前采用的重力铸造或倾转浇注方法, 无法有效控制铸件缩松缺陷, 引起铸件漏油问题, 良品率很低, 已严重影响其装机服役, 亟需解决这一难题。

低压铸造工艺通过调整浇注压力可以较好地完成复杂铸件的平稳充型, 并有效抑制卷气、卷渣和降低缩松和缩孔等缺陷, 从而提高铸件质量, 降低生产成本^[3]。同时, 充型压力的可调性使低压铸造工艺的设计变得相对简单易行。将其用于复杂燃油调节器类构件的铸造成形, 有望解决研制生产中遇到的缺陷难以控制的瓶颈问题。

为此, 本文针对某型复杂燃油调节器进行低压铸造工艺设计与优化, 通过UG三维建模软件^[4]对燃油调节器进行建模, 进一步利用ProCAST软件开展铸件充型与凝固过程数值模拟仿真, 预测铸件缩松和缩孔等冶金缺陷的产生部位^[5-6], 进而通过模具结构与冷却条件优化低压铸造工艺, 提出合理的低压铸造工艺方案, 提高产品良品率与出品率。

1 燃油调节器结构

某型复杂燃油调节器的结构如图1所示, 其三维结构尺寸为250 mm × 260 mm

×270 mm, 该铸件选用合金为ZL101A (ZAlSi7MgA), 化学成分见表1, 密度为2.68 g/cm³, 重约16 kg。其壁厚差异较大, 内部结构复杂且多为不规则变截面, 同

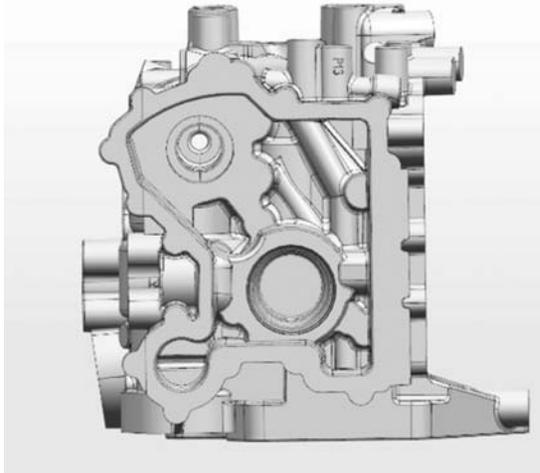


图1 某型燃油调节器三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of the fuel regulator

表1 ZL101A铝合金的主要化学成分
Tab. 1 Main chemical composition of ZL101A aluminium alloy

						$w_B/\%$
Mg	Si	Ti	Cu	Zn	Mn	Al
0.25~0.45	6.50~7.50	0.08~0.20	≤0.20	≤0.30	≤0.35	余量

时铸件使用了多个型芯, 给铝合金液的充型及顺序凝固带来了很大困难。

2 浇注方案设计

2.1 浇注系统设计

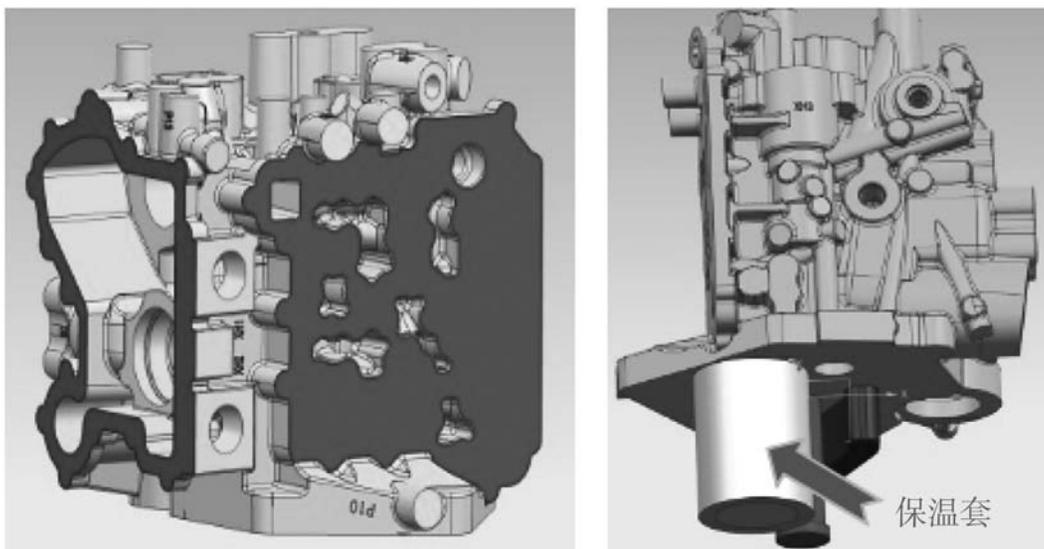
低压铸造是一种金属液逆重力向上充填的铸造工艺。根据该铸件的结构特点以及结合图2(a)所示铸件毛坯图(基准面和加工面等), 为保证金属液充型过程平稳、避免金属液在充型过程中出现“过山车”现象以及克服型芯阻力, 使金属液实现顺序凝固, 本文采用单一升液管结合单一直浇道的低压浇注系统方案。考虑到型芯位置, 以及在升液管周围包覆一陶瓷纤维类保温套, 圆柱式升液管存在一最大直径, 该直径约为55 mm, 其浇注系统设计方案如图2(b)所示。

2.2 升液管设计

对于铝合金的低压铸造而言, 目前多采用铸铁材料制造升液管, 但铸铁材质易腐蚀, 故此次铸件的低压铸造设计选择不锈钢管, 不锈钢管的壁厚约为2.5 mm, 实际升液管的高度以升液管底端距离坩埚底部来确定。

3 充型与凝固过程工艺设计

由于该铸件结构复杂, 对铸件质量要求高, 采用模拟仿真技术可以直观分析金属液在充型及凝固过程



(a) 铸件毛坯图

(b) 升液管布置方案

图2 浇注系统设计示意图

Fig. 7 Microstructure morphologies of the test steels at the start point Bs and the finish point Bf of bainite phase transitions under different austenitising temperatures

中的温度场和流场，并预测可能出现的铸造缺陷及其分布位置，进而为低压铸造工艺方案设计优化提供理论依据。

3.1 工艺参数设计

3.1.1 充型加压工艺设计

在低压铸造工艺中影响铸件质量的一个关键参数便是充型速度。根据低压铸造过程中的压力特征可将低压铸造细分为如图3所示的5个过程^[7]，即金属液在升液管中的升液过程、充型过程、金属液结壳和结晶的增压过程、凝固保压过程以及卸压过程。

一般而言，低压铸造遵循快速升液和慢速充型的原则，快速升液可以减少金属液的热损失，保证金属液的充型温度，慢速充型可以避免金属液出现卷气和夹渣等缺陷，提高铸件质量。一般采用公式(1)进行升液和充型阶段的压力 P 的理论估算：

$$P = \mu \rho g h \quad (1)$$

式中： μ 为阻力系数，即金属液在实际升液充型过程中需要克服模具、型芯等的阻力，一般取1.1~1.5； ρ 为金属液的密度； g 为重力加速度； h 为金属液上升高度；由于本文主要进行的是仿真模拟，因此设计压力参数时不考虑阻力系数。升液管高度设为100 mm，计算获得金属液在升液阶段的压力 P_1 为2.7 kPa，升液速度一般为5~15 cm/s，结合升液管直径和高度，取升液时间为3 s；铸件高度为250 mm，计算得金属液在充型完成时（含 P_1 ）的压力 P_2 为9.5 kPa，充型速度一般取2 cm/s^[8]，即充型时间约为13 s。

充型完成后，进入增压阶段，该阶段主要提供金属液的结晶、补缩压力等，增压压力 P_3 一般采用公式(2)计算：

$$P_3 = k P_2 \quad (2)$$

式中： k 为增压系数，对于金属型而言，该值一般为1.3~1.6，由于该铸件较为复杂，故增压系数取1.6，即增压压力约为15 kPa；增压速度一般为0.5~1.5 kPa/s，取增压速度1.1 kPa/s，计算可得增压时间约为5 s。

增压完成后，进入保压阶段，该阶段持续为金属液提供补缩压力，进而提高铸件的致密度，直至金属液凝固完成。保压压力与增压压力相同，为15 kPa。保压时间不能过长，否则金属液将在升液管中凝固，保压时间过短则不能使铸件内部金属液完全凝固，因此保压时间将根据模拟结果而定。保压完成后卸压。

3.1.2 模具温度

根据图2(a)铸件毛坯图可以看出，该铸件一侧存在薄壁型腔，该侧金属液温度冷却较快，同时在靠近升液管一侧存在凸出的三角区，该处金属液温度同

样冷却较快。若此两处先凝固，则将堵塞补缩通道而导致金属液无法得到充分补缩，铸件内部将出现疏松和缩孔等缺陷。因此铸件毛坯图中红色面对应的两侧金属模具温度应略高于其他两侧，即将红色面对应的两侧金属模具定为A处模具，温度初步定为330 ℃，空冷；另外两侧定为B处模具，温度初步定为300 ℃，空冷；上金属模具温度初步定为100 ℃，采用水冷，以增强铸件顺序凝固（自上而下）的能力；底模温度初步定为340 ℃，以期尽可能保证金属液在升液管中最后凝固。

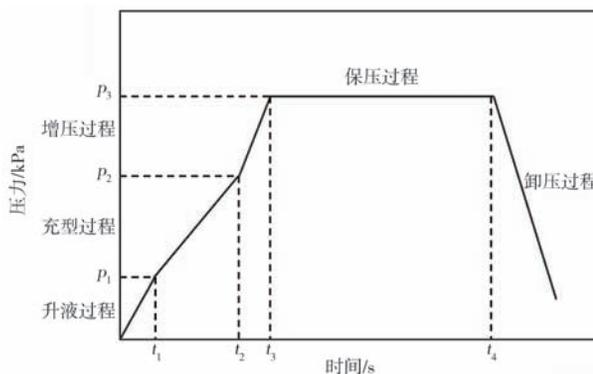


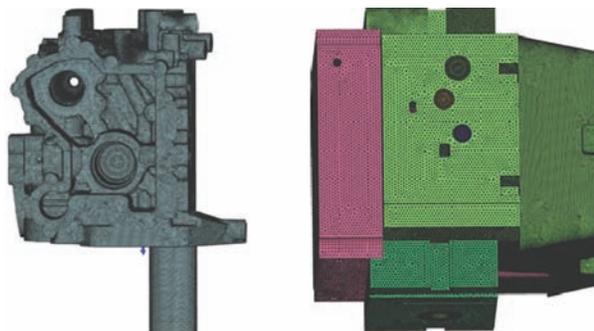
图3 低压铸造工艺简要示意图

Fig. 3 The brief schematic diagram of the low pressure casting process

3.2 充型和凝固过程数值模拟

3.2.1 数值模拟前处理

采用UG软件进行铸件和铸型的三维建模，以.x_t格式导入ProCAST模拟软件中。图4为面网格和体网格划分后的铸件与铸型网格模型，面网格总数为1 385 794个，体网格总数为14 094 126个。金属液的浇注温度为700 ℃，保温套温度为25 ℃；保温套与铸件之间的换热系数为100 W/(m²·K)，铸型、型芯与铸件之间的换热系数分别为1000 W/(m²·K)和300 W/(m²·K)。



(a) 铸件网格模型

(b) 铸型网格模型

图4 网格模型

Fig. 4 Grid model

3.2.2 金属液充型速度的确定

金属液在充型阶段的流动形态是影响铸件质量的关键因素,若充型过程中由于增压速度过大导致金属液出现紊流,铸件内部极易出现卷气和夹渣等缺陷,严重降低铸件质量。此外,金属液充型速度还影响整个充型凝固过程的温度场。若不首先确定充型速度,则该铸件的低压铸造工艺设计与优化过程将变得繁杂。为此,首先验证通过前述理论公式(1)和(2)估算出的充型速度是否合理,并进一步对其优化。

图5为金属液充型模拟结果。可以看到,采用预估充型速度进行充型,在充型阶段初期[图5(b)和图

5(c)],金属液的流动出现了一定程度的紊流,之后消失,这主要是因为升液管内的金属液以较高速度进入型腔时受到了型腔内部较多型芯的扰动。之后降低充型阶段的增压速度,将充型时间延长至17 s。可以发现,金属液在整个充型过程中的流动变得较为平稳,由此设定该铸件低压铸造工艺数值模拟的充型时间为17 s。

3.2.3 低压铸造工艺数值模拟

根据前文设计的低压铸造工艺参数,得到了该型铸件充型与凝固的数值模拟结果,见图6。充型过程中

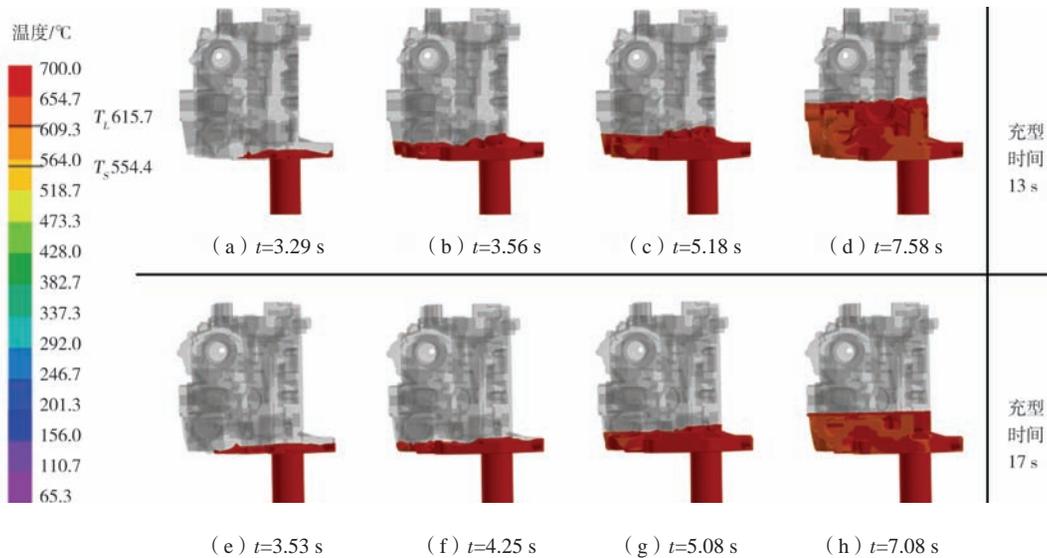


图5 充型模拟结果

Fig. 5 Simulation results of the filling

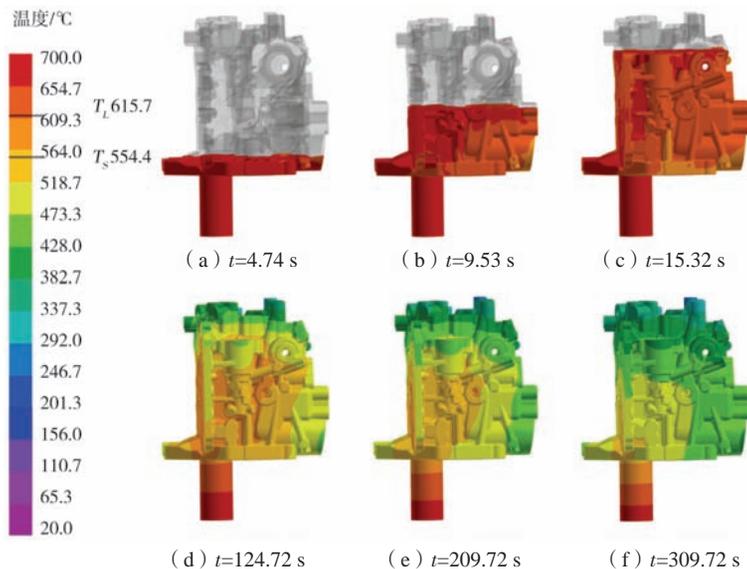


图6 充型与凝固模拟结果

Fig. 6 Simulation results of the filling and solidification

金属液充型平稳,无卷气、紊流出现。在凝固阶段,其凝固顺序自上而下向升液管部位推进,且在铸件凝固过程中,升液管中的金属液始终未凝固,保压压力可以持续作用于铸件,说明前文设计的参数基本合理。

图7(a)给出了铸件的内部温度场,在靠近升液管一端的铸件内部存在较多型芯,型芯在此局部区域

累积了较多热量,导致该处出现较大热节。这一内部热节^[9]导致该处部位出现了缩松缺陷,如图7(b)。因此,结合数值模拟结果,对设计的低压铸造工艺参数进一步优化,以期消除该部位的铸造缺陷,获得最佳的低压铸造工艺方案。

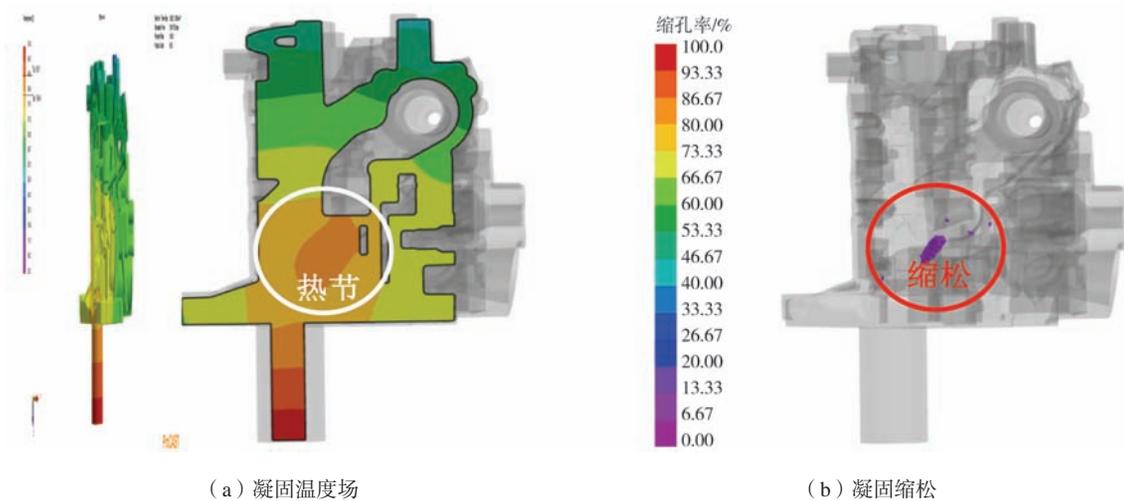


图7 铸件缺陷情况
Fig. 7 Defects of the casting

3.2.4 低压铸造工艺优化

考虑上述热节部位靠近升液管,同时主要由型芯造成,故本文将下金属模具的预热温度调高至380℃,希望通过增加铸件凝固后期升液管中金属液的温度,以驱动热节转移至升液管部位。同时将侧金属模具预热温度降低,A处模具温度降为300℃,B处模具温度降

为240℃,以此加强铸件散热,使原有热节处的型芯温度降低,进一步构建起自升液管到型芯部位的温度梯度,驱动热节转移。图8给出了模具预热温度调整后的温度场及缺陷预测结果,可以看到,通过调整模具预热温度尚难以有效消除铸件内的凝固缺陷,在原有热节处仍存在一定的缩松缺陷,仅通过调整模具预热温

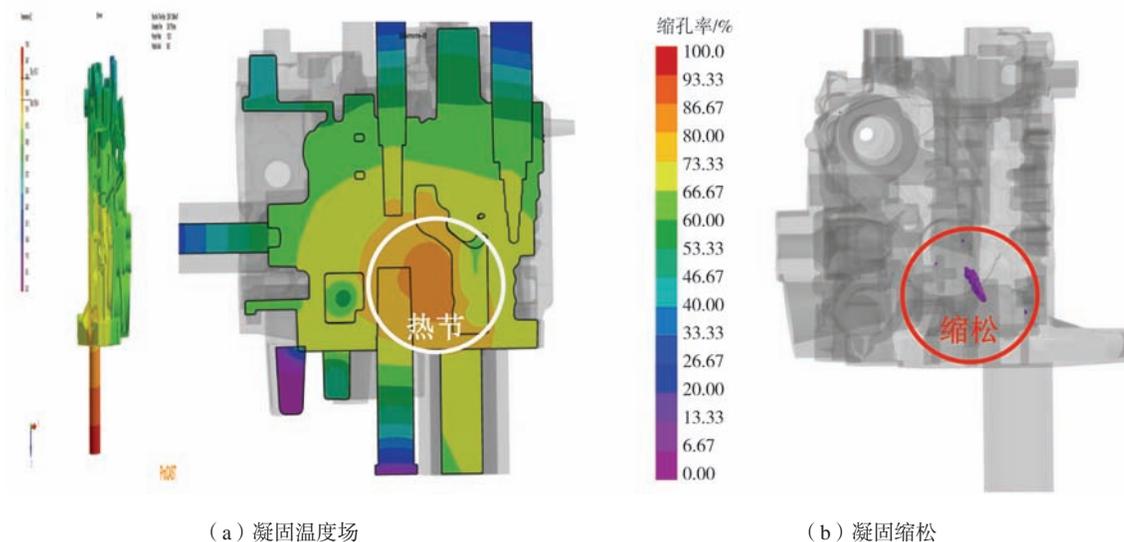


图8 第一次优化工艺参数后凝固模拟结果
Fig. 8 Solidification simulation results after the first optimization of the process parameters

度来消除热节的方案效果有限, 需要进一步调整。

分析发现, 在热节处附近存在一大尺寸型芯, 若能增强该型芯对铸件的冷却效果, 对铸件内部热节部位的热量进行强制散热, 进而可消除热节所造成的缩松缺陷。本文通过在侧面大型芯上引入水冷通道, 将该处型芯的换热方式由原来的空冷改为水冷[换热系数等效为 $5\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]的方式达到这一目的。图9示出了优化后的型芯结构图。此外, 进一步调整模具温度, 将下金属模具温度继续调高至 $400\text{ }^\circ\text{C}$, A处模具温度降为 $280\text{ }^\circ\text{C}$, B处模具温度降为 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 。优化后的充型凝固温度场及凝固相场如图10所示。从充型凝固温度场可以看出, 金属液充型平稳, 且为自上而下的顺序凝固, 并且升液管内金属液在整个充型凝固过程提供了足够的热流, 保证了压力的持续作用^[10]。由凝固相场可以看到, 凝固起始于铸件外壳, 在凝固过程中, 铸件内部得到了良好的补缩, 并无孤立的液相区存在, 在凝固时间为 258 s 时, 铸件基本完全凝固, 最终的凝固时间为 265 s , 除去升液时间、充型时间和增压时间, 保压时间作用 240 s 即可, 这样不仅可以保证铸件整体质量, 而且可以使升液管内的金属液大部分回流。

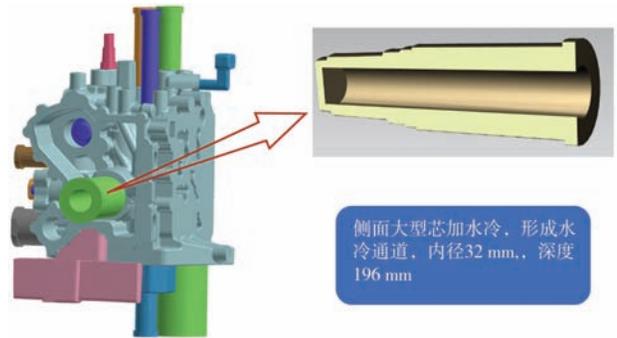


图9 优化铸件散热示意图

Fig. 9 Schematic diagram of optimizing casting heat elimination

图11所示为相应的铸件进行缺陷预测结果。铸件内部温度场结果显示, 大尺寸型芯处热节成功转移至升液管中, 铸件内部已无热节产生。图11(b)所示铸件缩松、缩孔分析结果表明, 铸件内部孔隙类缺陷消失。

3.3 生产验证

采用该工艺进行生产验证, 铸件的X射线探伤结

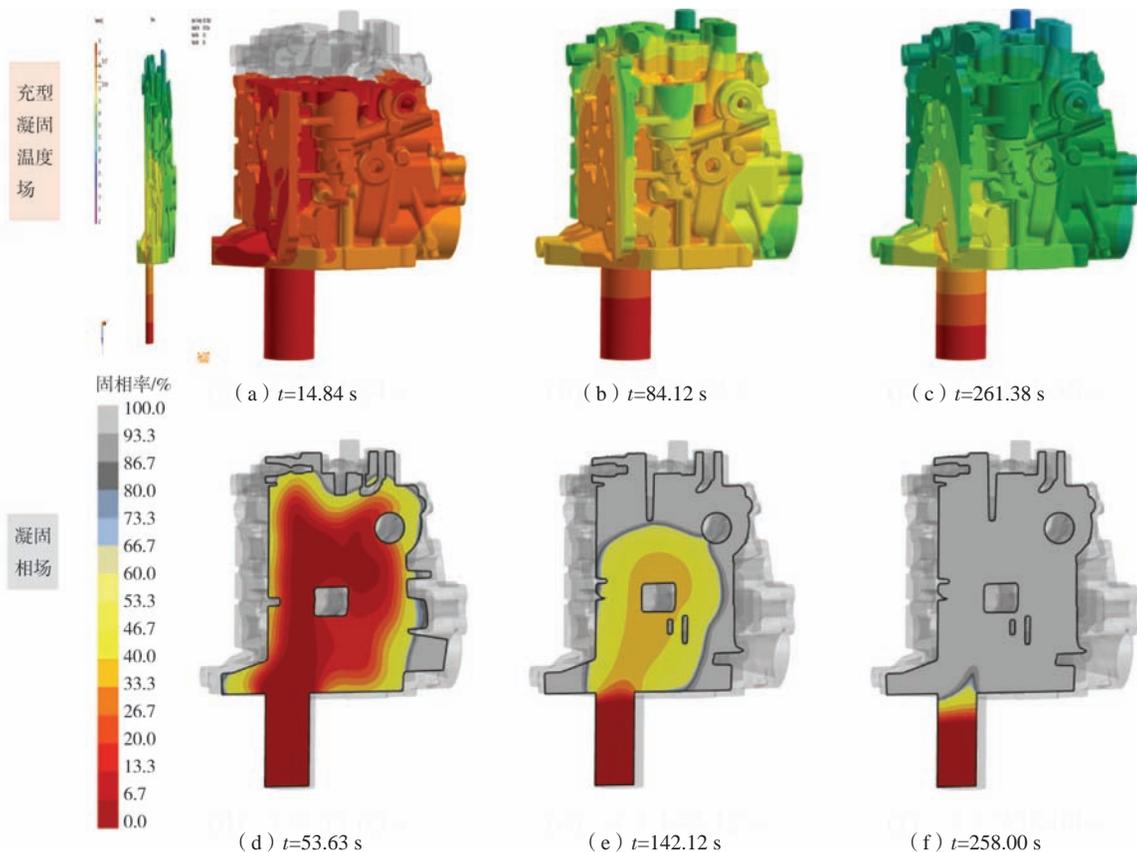
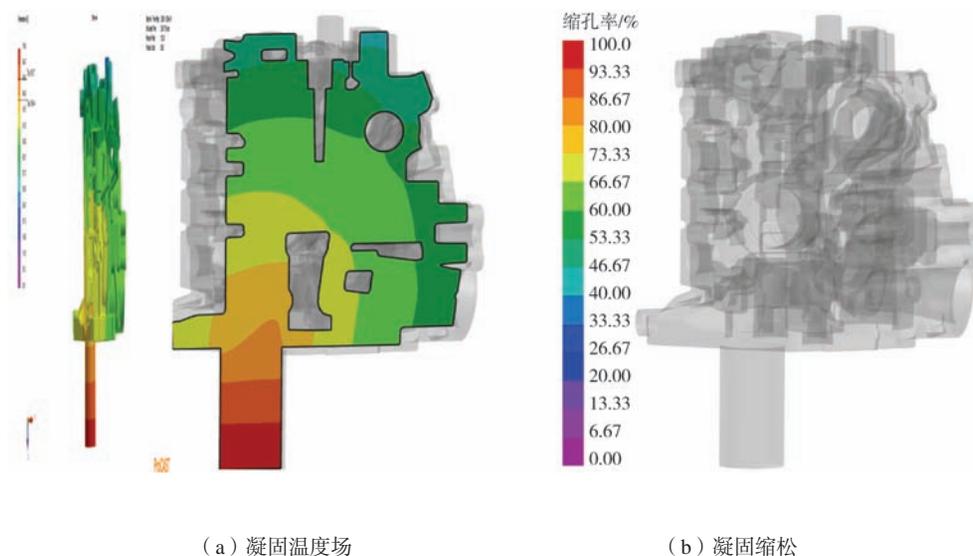


图10 第二次优化工艺参数后模拟结果

Fig. 10 Simulation results after the second optimization of the process parameters



(a) 凝固温度场

(b) 凝固缩松

图11 第二次优化后铸件缺陷情况

Fig. 11 Defects of the casting after the second optimization

果如图12所示。探伤结果表明，采用该工艺生产的铸件基本无缩松、缩孔缺陷，铸件质量较好，表明优

化后的低压铸造工艺方案适于成形某型燃油调节器铸件。

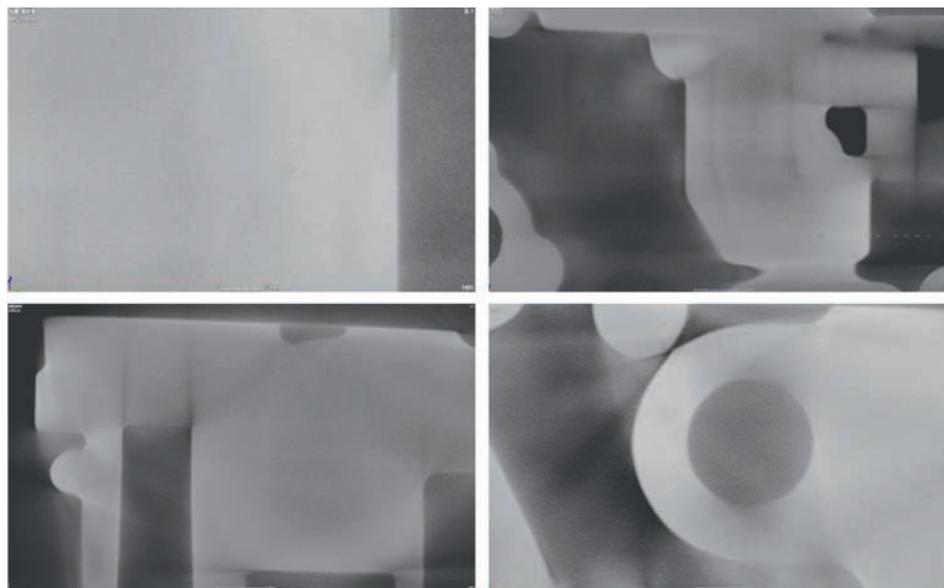


图12 铸件X射线探伤照片

Fig. 12 Radiographic testing (RT) images of the casting

4 结论

针对某型复杂燃油调节器重力铸造或倾转铸造铸件缩松等铸造缺陷难控制的问题，开发了适于该型燃油调节器成形的低压铸造工艺。通过数值模拟分析了低压铸造充型凝固过程中的温度场和凝固相场，进行了缩松和缩孔缺陷预测。结果表明，该型燃油调节器内部大尺寸型芯处易于形成热节，造成缩松和缩孔缺

陷。通过系统调整模具温度和增强大尺寸型芯冷却能力，优化铸件凝固温度场，可完全消除铸件内部缩松和缩孔缺陷，解决重力铸造或倾转铸造铸件缩松等铸造缺陷难控制的问题，为进一步开展该型复杂燃油调节器低压铸造成形试制与工艺验证优化奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 韩永健, 蒋安常, 蒋发敏, 等. 某型航空发动机燃油调节器参数匹配多目标优化 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43 (7): 293-300.
- [2] 司国雷, 陆亮, 陈君辉, 等. 航空发动机燃油调节器技术发展综述 [J]. 液压与气动, 2022, 46 (5): 167-174.
- [3] 袁庆锋, 陈国民. 复杂构件反重力铸造生产技术工艺研究 [J]. 航天制造技术, 2012 (1): 9-13, 3.
- [4] 梁秋华, 韩伟, 黄凌森, 等. 水冷机壳低压铸造凝固过程数值模拟及工艺优化 [J]. 铸造, 2019, 68 (4): 353-358.
- [5] 古良, 马亮, 吴昊, 等. 某机型铝合金舱门低压铸造工艺设计 [J]. 金属加工 (热加工), 2023 (10): 126-128.
- [6] 朱慧明, 苏小平, 昂飞. 铝合金制动器卡钳低压铸造工艺设计及优化 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (21): 54-56, 60.
- [7] 李新雷, 郝启堂, 介万奇. 反重力铸造装备技术的应用与发展 [J]. 铸造技术, 2011, 32 (3): 380-383.
- [8] 顾方秋, 苏小平. 铝合金变速器操纵箱体低压铸造工艺设计及其优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (12): 1542-1547.
- [9] 韩伟, 段海峰, 童洲, 等. 电动客车水冷机壳低压铸造工艺设计与优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (8): 857-860.
- [10] 樊振中, 丛延, 吴凌华, 等. ZL114A异形结构导弹壳体凝固成形工艺设计 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (1): 1-8.

Low Pressure Casting Process Design and Optimization of a Fuel Regulator with Complex Structure

GAO Rui-shuai¹, XIE Feng², CAO Jia-ming¹, YANG Li-xing², WANG Yong², LUO Bo-le², QIE Ju-hong², ZHANG Lun-yong^{1,3}, TANG Zheng², CAO Fu-yang^{1,3}, SUN Jian-fei^{1,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 2. Xi'an Aero-Engine Controls Technology Co., Ltd., Xi'an, 710077, Shaanxi, China; 3. National Key Laboratory for Precision Hot Forming, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract:

Due to internal oil passages, complex fuel regulator has complex cavity structure, which brings great challenge to the conventional gravity casting process, it is difficult to suppress the defects of shrinkage porosity and shrinkage cavities, resulting in low qualified product rate and yield rate of castings. To address this issue, this paper proposed a low-pressure casting scheme suitable for components with such complex internal cavity structures, and analyzed the complex structure of an aluminum alloy fuel regulator and the influence of the internal core on the low-pressure casting process. The low-pressure casting process for this type of complex fuel regulator was designed through the ProCAST simulations, determined the appropriate filling speed, and analyzed the filling and solidification temperature field as well as the causes of internal defects of the castings. The low-pressure casting process scheme was optimized by adjusting the mold temperature and changing the local cooling method of the castings and the proposed optimization solution was later experimentally verified. The results showed that the optimized low-pressure casting process scheme significantly eliminated the shrinkage porosity and shrinkage cavity defects inside the castings, and greatly improved the qualified product rate and yield rate of the castings.

Key words:

fuel regulator; aluminum alloys; low pressure casting; numerical simulations; process optimization