

顺序凝固和流态优化解决 ZL105 铝合金铸件缩孔缺陷的应用探讨

赵 猛¹, 张守银², 徐志锋²

(1. 中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司, 贵州贵阳 555000;

2. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西南昌 330063)

摘要: 针对ZL105铝合金铸件中较为顽固的缩孔气孔等缺陷, 依据顺序凝固理论, 采用辅助浇道连接冒口和横浇道, 提高冒口温度, 减少铸件的热量, 有效提升了顺序凝固效果。同时, 基于双层氧化膜理论, 通过内浇道的优化设计, 改善金属液流态, 减少卷气, 有效避免了缩孔缺陷的产生。

关键词: ZL105; 顺序凝固; 缩孔缩松; 双层氧化膜; 流态优化

中图分类号: TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 01-0067-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0010

作者简介:

赵猛 (1973-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为铝合金铸造工艺设计及制备。E-mail: zhao9141@163.com

通信作者:

张守银, 男, 博士。E-mail: zhangsy@nchu.edu.cn

基金项目:

国家自然科学基金资助项目 (52165018); 江西省主要学科和技术带头人资助计划 (20225BCJ22002)。

收稿日期:

2025-07-24 收到初稿,
2025-09-05 收到修订稿。

引用格式:

赵猛, 张守银, 徐志锋. 顺序凝固和流态优化解决 ZL105 铝合金铸件缩孔缺陷的应用探讨 [J]. 铸造, 2026, 75(1): 67-73.
ZHAO Meng, ZHANG Shouyin, XU Zhifeng. Discussion on solving shrinkage cavity defects in ZL105 aluminum alloy castings by sequential solidification and flow state optimization [J]. Foundry, 2026, 75(1): 67-73.

ZL105合金为在Al-Si合金中引入1% Cu和0.5% Mg元素, 力学性能和机加工性能得到提升, 适用于形状复杂且有负载的结构件^[1-3]。该合金液相线627 °C, 固相线577 °C, 属于宽结晶温度合金, 趋向于糊状凝固方式, 铸造过程中容易产生缩孔缩松等缺陷^[4-5]。

普通重力铸造条件下, 为了稳定液流, 合金通过浇注系统从铸件底部引入, 即底注式, 合金液自下而上充填铸型。在合金液充满铸型以后, 理想的凝固顺序是自下而上进行。铸件的凝固收缩由位于铸件顶部的冒口进行补缩。为了保证冒口的补缩效果, 冒口处金属液需要维持较高的温度, 晚于铸件凝固^[6]。但底注式浇注系统中金属液从浇道进入铸件, 经过铸型型腔, 最后流向铸件的顶部和冒口中。由于经历较长的流动路径, 特别是对于复杂或薄壁的铸件, 冒口处金属液降温较多, 形成的温度场是不利于铸件的补缩的。因此, 良好的顺序凝固条件是减少缩孔缺陷的关键。另外, 铸件的疏松也可能起源于卷入的空气团^[7-8]。如果金属液表面扰动剧烈, 形成双层氧化膜, 通过折皱和折叠行为易包裹空气。铝合金的氧化物形成的双层氧化膜, 其密度接近铝液, 因此容易留在铸型中, 作为微型缩孔或缩松形成的核心。所以, 保证金属液的平稳充型, 避免卷气的产生, 也是减少或消除铸件缩孔和夹渣等缺陷的重要措施。

本研究针对ZL105铝合金后盖铸件出现气孔和缩孔等铸造缺陷, 依据顺序凝固原理, 对浇注系统重新进行了设计, 最大程度发挥冒口的补缩作用。同时, 对引入金属液的内浇道形状和位置进行了优化, 有效地解决了铸件的缺陷问题。

1 铸件结构及铸造工艺

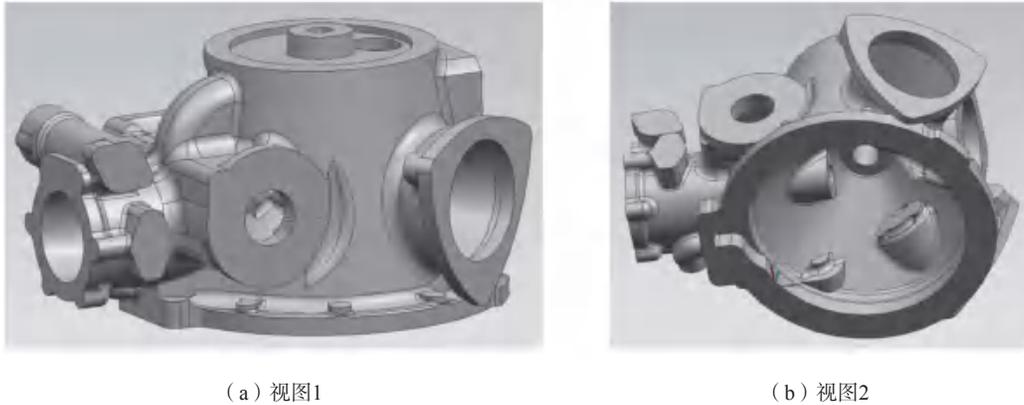
公司生产的ZL105铝合金后盖铸件 (图1) 采用砂型重力铸造工艺, 合金成分见表1。该后盖铸件尺寸为300 mm × 273 mm × 180 mm, 质量为5.4 kg, 铸件筒壁厚约

表1 铸造铝合金ZL105化学成分
Tab. 1 Chemical compositions of the cast aluminum alloy ZL105 $w_B / \%$

Si	Cu	Mg	Mn	Be	Sn	Zn	Pb	Fe	Al
4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.6	≤0.5	≤0.1	≤0.01	≤0.3	≤0.05	0.00~0.60	余量

为5.0 mm。该铸件结构形状复杂，壁厚差异大，热节分散，合金成形及补缩较为困难。原始浇注系统采用

双直浇道方案，顶部和厚大部位设置补缩冒口（红色区域），具体方案如图2所示。

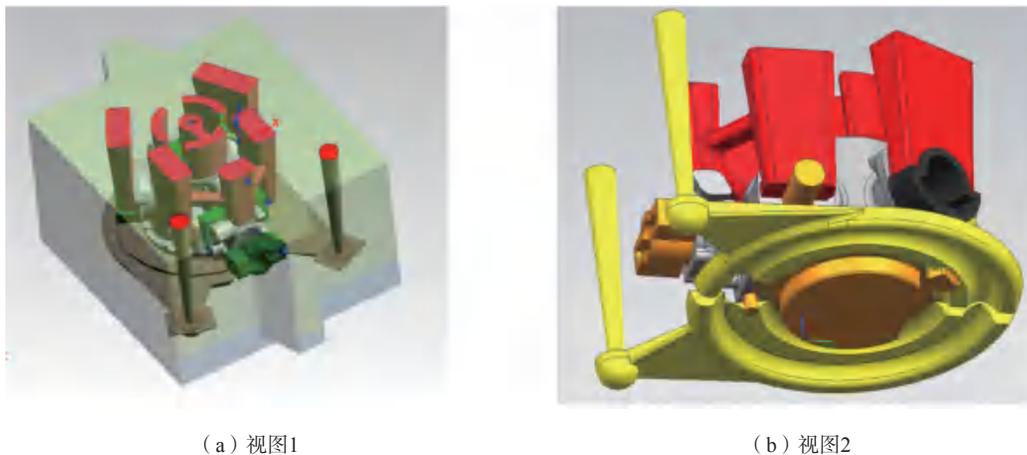


(a) 视图1

(b) 视图2

图1 铝合金后盖铸件模型

Fig. 1 The model of aluminum alloy rear cover casting



(a) 视图1

(b) 视图2

图2 铝合金后盖铸件铸造工艺

Fig. 2 The casting process of aluminum alloy rear cover casting

2 存在问题及缺陷分析

生产过程中，铸件常出现气孔和缩孔缩松等铸造缺陷，质量不稳定，铸件的一次性合格率低。经剖切检测，在铸件热节处出现大量的缩孔，在底部法兰处也出现了气孔等缺陷。部分缺陷位置见图3。

3 缺陷解决方案

3.1 基于改善顺序凝固的铸造工艺设计

由于铸件尺寸属于中小型铸件，因此考虑采用单直浇道，分别设计了三种工艺方案。其中方案一为在原始工艺（图2）的基础上，将双直浇道改为单一直浇道，如图4（a）所示。冒口沿用原始工艺的方案。由于ZL105合金的结晶温度范围较宽，因此冒口需要有足够的金属液进行补缩。而对于方案一，冒口中金属

液需要流经铸件，待铸件完成充型后，金属液再进入顶部冒口。因此金属液流动路径较长，进入冒口的金属液温度会大幅下降，从而影响补缩效果。而铸件部分可能因为大量金属液流过而产生局部过热，形成缺陷。因此，在方案二图4（b）中增加了辅助浇道。在充型过程中，金属液可从横浇道直接进入侧冒口。在方案三图4（c）中，增加了两组对称的缝隙式浇道，一方面提高铸件筒形部分的充型和补缩能力，另一方面温度较高的金属液可经由缝隙式浇道进入铸件顶部冒口。

采用MAGMASOFT软件对改进的工艺方案进行了数值模拟。浇注温度为720℃，铸型温度为80℃，铸件与砂型的换热系数为800 W/(m·K)。经计算，约需要17 s充满铸型。

图5（a）-（c）为三种浇注系统方案充型完成时的温度分布，图5（d）-（e）分别为三种浇注系统对应的

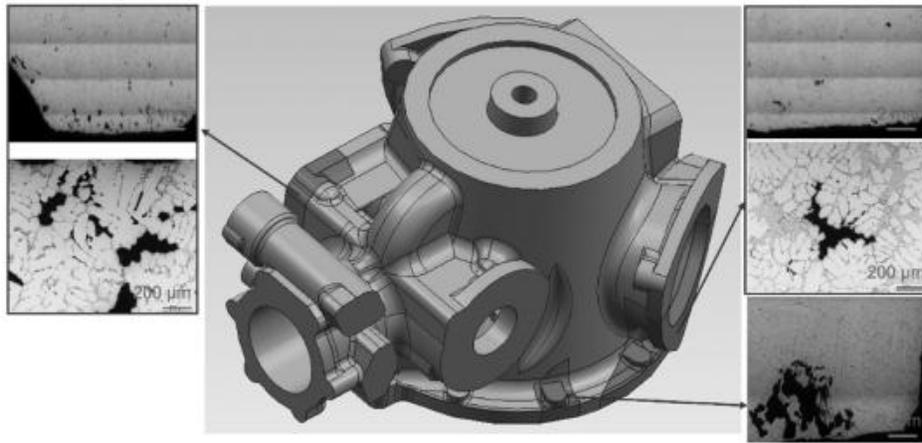
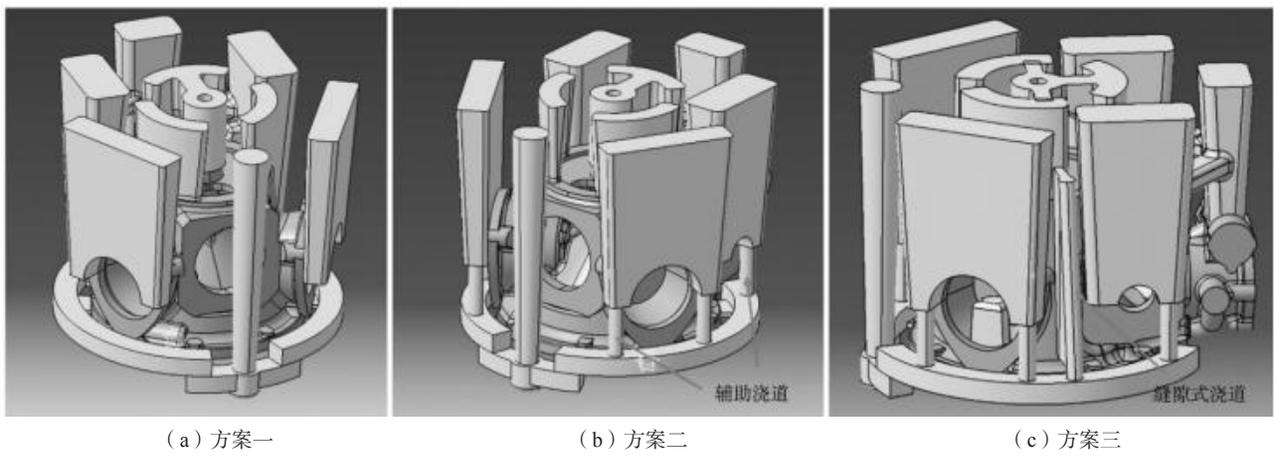


图3 铸件缩孔缺陷位置及光镜图

Fig. 3 Locations of shrinkage cavity defects in the casting and the optical microscope images



(a) 方案一

(b) 方案二

(c) 方案三

图4 改进的铸造工艺

Fig. 4 Improved casting processes

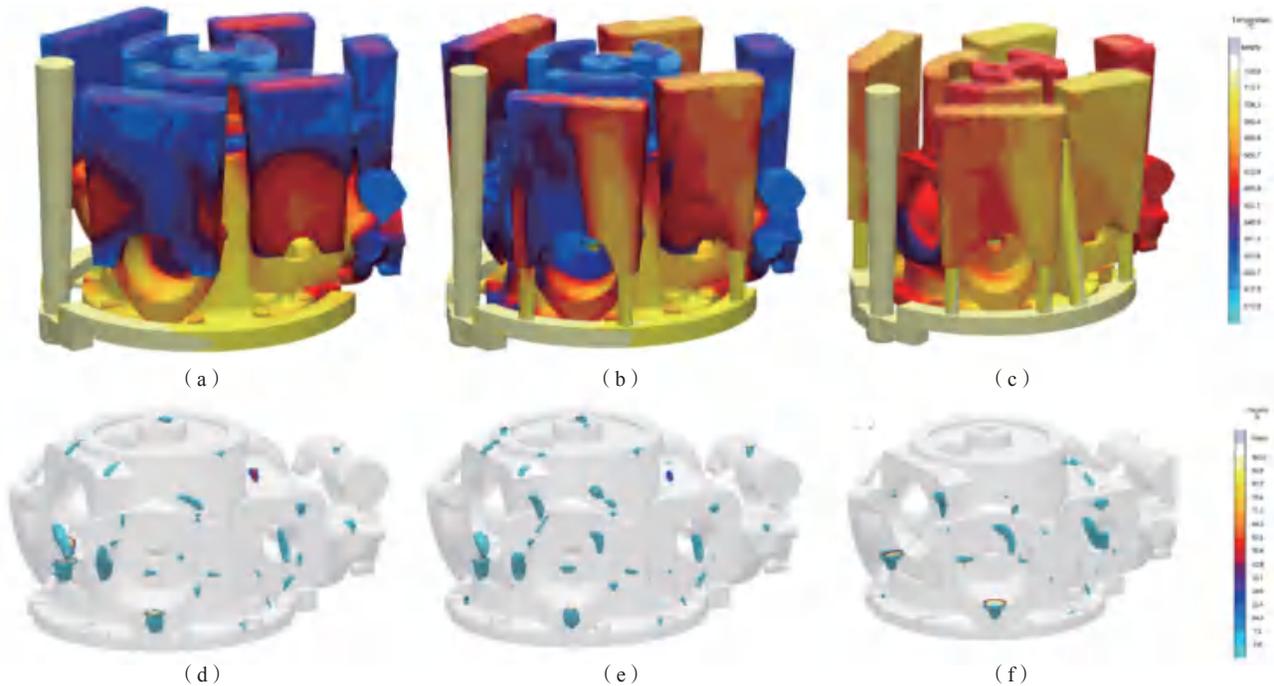


图5 三种方案充型完成时的温度场分布 (a) - (c) 及缩孔缺陷预测 (d) - (e)

Fig. 5 Temperature field distributions (a) - (c) and shrinkage cavity defect predictions (d) - (e) after mold fillings were finished for three schemes

缩孔缺陷预测。可以看出，浇注方案三的缺陷数量和尺寸均明显减少。

根据右侧的色温表，可以获得金属液充满型腔时铸件及冒口的温度分布情况。分析可知，对于浇注方案一，冒口处金属液的温度下降较多，金属液温度处于620~650℃范围，而铸件的温度较高。可以推断，冒口的补缩能力会明显降低，无法对铸件进行有效的补缩。在方案二中，侧冒口的温度明显升高，而铸件的温度低于方案一。说明辅助浇道的设计有利于改善顺序凝固趋势，提高冒口的补缩能力。对于方案二中铸件顶部冒口温度较低的现象，在方案三中增加了披缝式浇注系统，将金属液直接引入顶部冒口。由图5(c)可以看出，中心的冒口温度也有明显的升高。

基于顺序凝固的铸造工艺方案，在侧冒口底部增加流动通道，增加辅助缝隙式浇道，调整铸件的凝固顺序，对后盖铸件进行充型和凝固补缩进一步优化。数值模拟结果显示，法兰面缺陷大幅减少，缺陷数量和缺陷大小均有明显的改善，说明通过调整凝固顺序，底部位置率先凝固且增强了补缩作用，有效减少了缩孔缩松缺陷的数量和大小。

3.2 基于改善流态的内浇道优化设计

Campbell的双层氧化膜理论是铸造领域的一个重要理论，以全新的角度系统阐述了铸件缺陷如气孔、疏松和热裂等的形成机制。Campbell的双层氧化膜理论认为，在铸造过程中金属液表面会形成一层氧化膜，当这层氧化膜被卷入到金属液内部时，会形成双层结构，称为双层氧化膜。这种双层氧化膜的存在是导致铸件产生多种缺陷的关键因素。双层氧化膜在金属液充型过程中容易被卷入，从而带入气体和夹杂物等，这些被卷入的氧化膜及其携带的物质会在铸件中形成

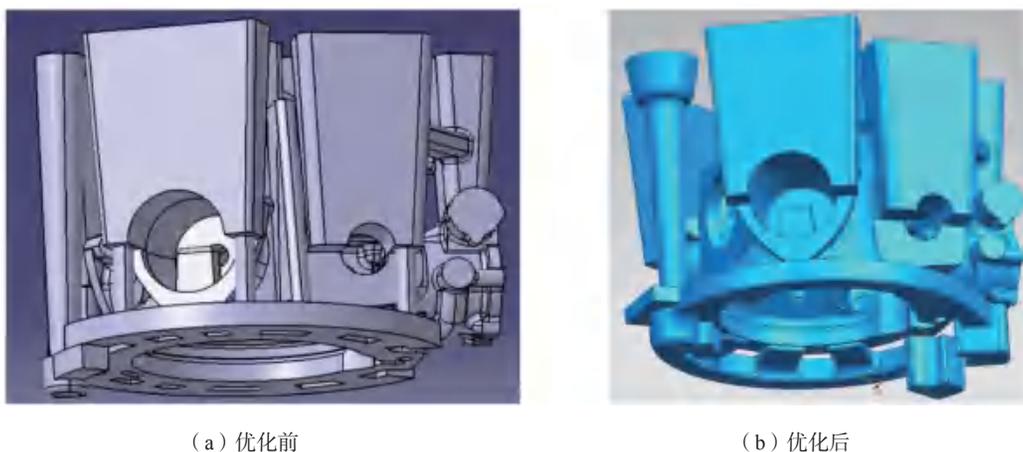
气孔、疏松和热裂等缺陷^[7]。此外，双层氧化膜还会影响金属液的流动性和充型过程，进一步加剧缺陷的形成。为了减少双层氧化膜的卷入，Campbell提出了一系列控制措施，包括优化浇注系统设计、控制金属液湍流及充型流速等。这些措施有助于抑制氧化膜的卷入，从而降低铸件缺陷的发生率。

因此，在优化的顺序凝固工艺方案的基础上，对内浇道进行了重新设计，分析其对引入金属液流动形态的影响。图6为优化内浇道前后的浇注系统。优化前的内浇道为扁平式，从横浇道底部引入铸件。优化后，采用横截面逐渐收缩的内浇道，由横浇道内侧面向铸件收缩，搭接在铸件的法兰面上，见图6(b)。针对这两种内浇道的设计，采用FLOW 3D软件进行了卷气分析。

图7为内浇道优化前后的卷气分析。从图中可以看出，在充型开始阶段，金属液前端存在大量卷气位置(红色区域)，见图7(a)和(b)。金属液由内浇口进入铸件型腔时，容易直接冲击砂型，即底部法兰内侧面的位置，金属液前沿较不平稳，可能产生卷气或带来夹渣风险。随充型的进行，卷气有所减少，但铸件液面前端仍存在较多卷气区域，如图7(c)所示。

对比发现，内浇道形状优化后，金属液前端的卷气位置大量减少，如图7(d)和(e)所示。金属液由横浇道经内浇道引入铸型时，金属液自下而上进入底部法兰位置，随后沿壁面上升，不需经过改向，因此充型更为平稳，减少了卷气风险。在浇注中期，即5 s时，金属液前端卷气现象几乎消失，如图7(f)所示。经计算，优化后的铸造工艺方案如图6(b)所示，工艺出品率为31%。

图8为浇注开始阶段内浇道优化前后的金属液流速



(a) 优化前

(b) 优化后

图6 内浇道的优化设计
Fig. 6 Optimized ingate design

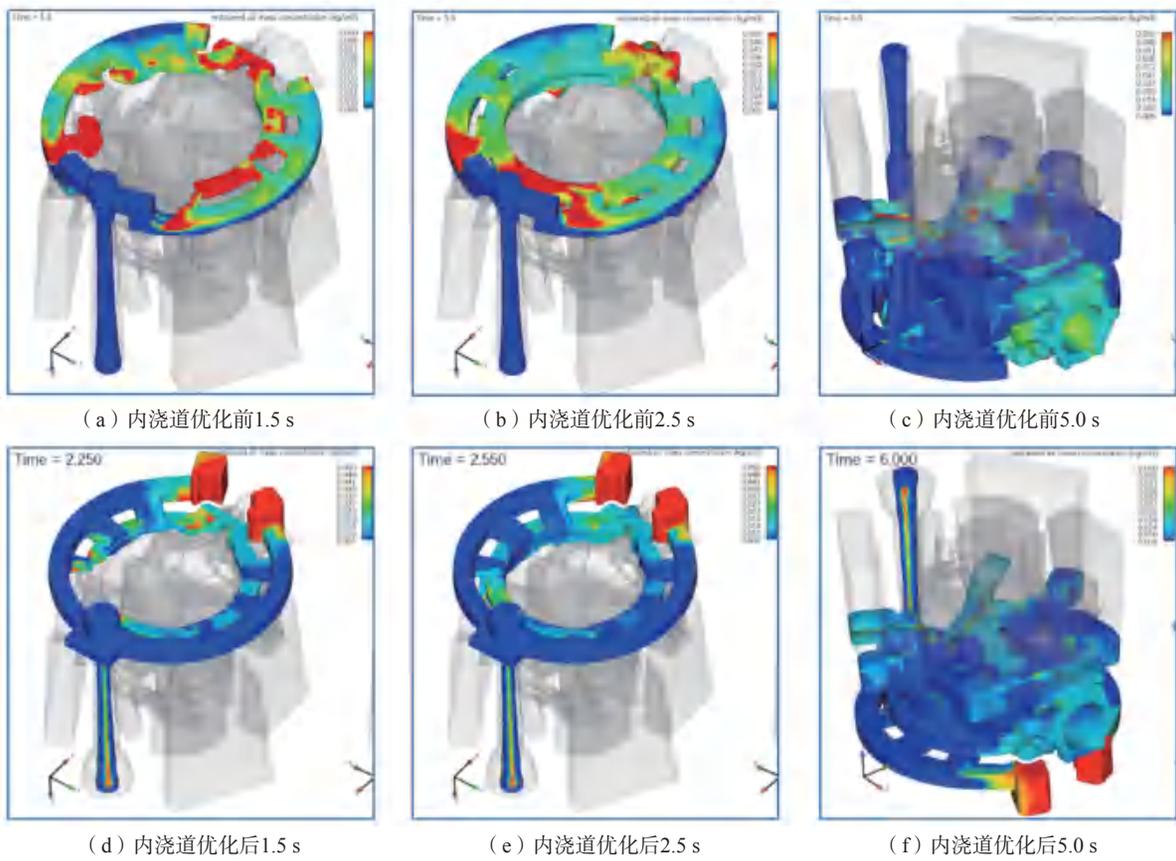


图7 浇注系统卷气分析

Fig. 7 Analysis of gas entrainment in the gating system

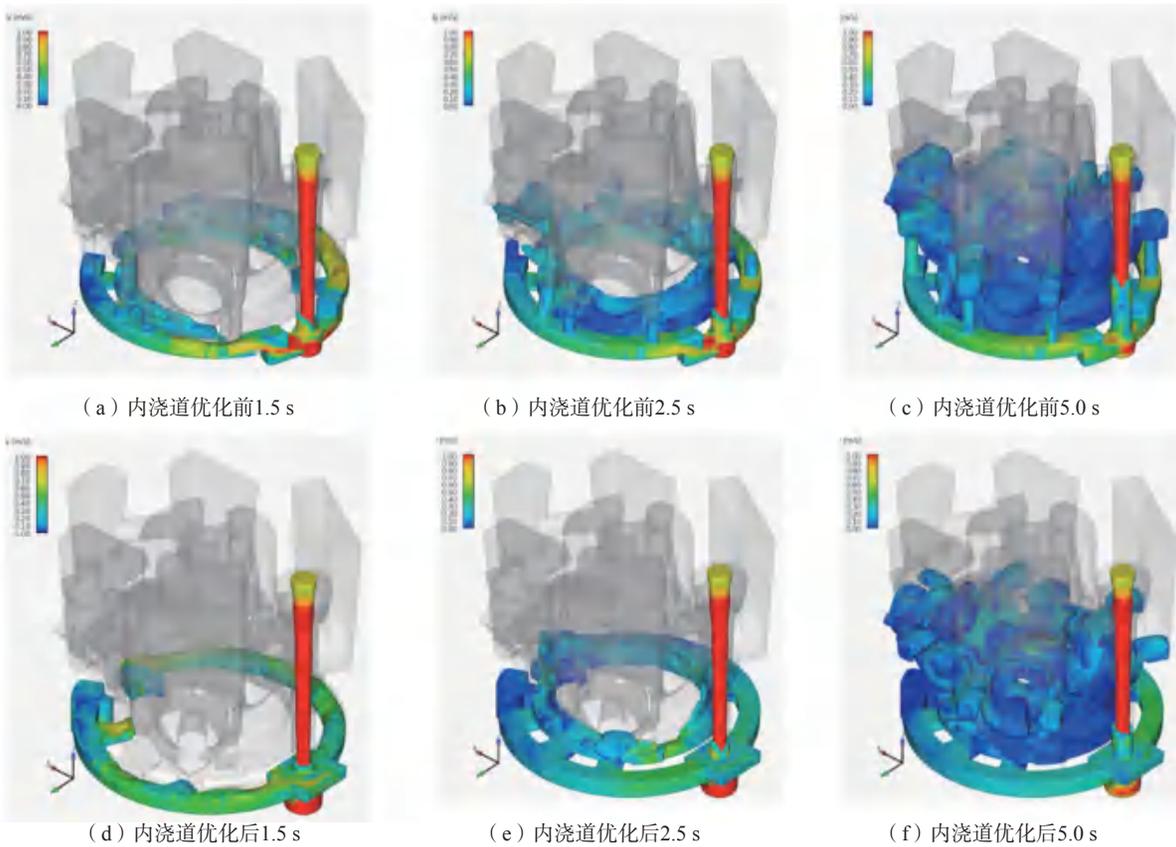


图8 浇注系统金属液流速

Fig. 8 velocity of molten metal in the gating system

模拟结果。对比上下两组图片发现，在浇口窝、横浇道以及内浇道附近，优化后的浇注系统流速更小，表明通过内浇道形状的优化设计，可以降低金属液流动速度，且流动更为平稳。

3.3 铸件试制及结果

依据优化工艺方案，设计了砂型模具，并采用3DP（3D printing）工艺制备了3套砂型模具。图9为3D打印砂型经组装后进行浇注的现场图片。浇注温度为 $720\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，浇注时间控制在约15 s。

图10为铸件及易出现缺陷位置的X射线探伤结果。底部法兰等多处易形成缩松及渣孔等缺陷的部位，经分析均未发现缺陷。

图11为不同取样位置和对应的剖面图片及金相图，见图11（a）-（c）的右下角。从剖面图片和金相结果可以看出，在这几个关键铸件位置均无缩孔、缩松和气孔缺陷。图11（a）处由于处在底部位置，晶粒组织较为细小；而位于铸件中部贴边冒口附近的剖面 and 顶部位置剖面晶粒尺寸较为粗大，但均未发现缺陷，如图11（d）-（f）所示。根据优化工艺方案进行了开模试制，投入生产50件，铸件成品率在60%以上。



图9 采用3D打印砂型铸造

Fig. 9 Casting using 3D printed sand molds

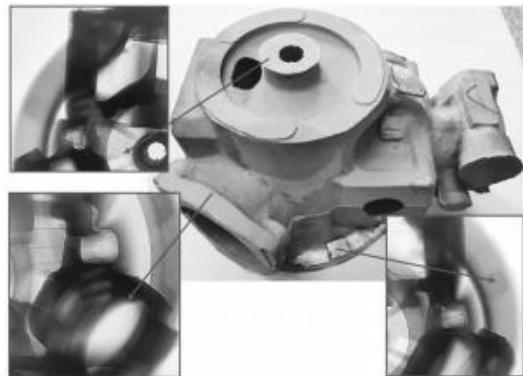


图10 铸件及X射线探伤

Fig. 10 Casting and X-ray inspection

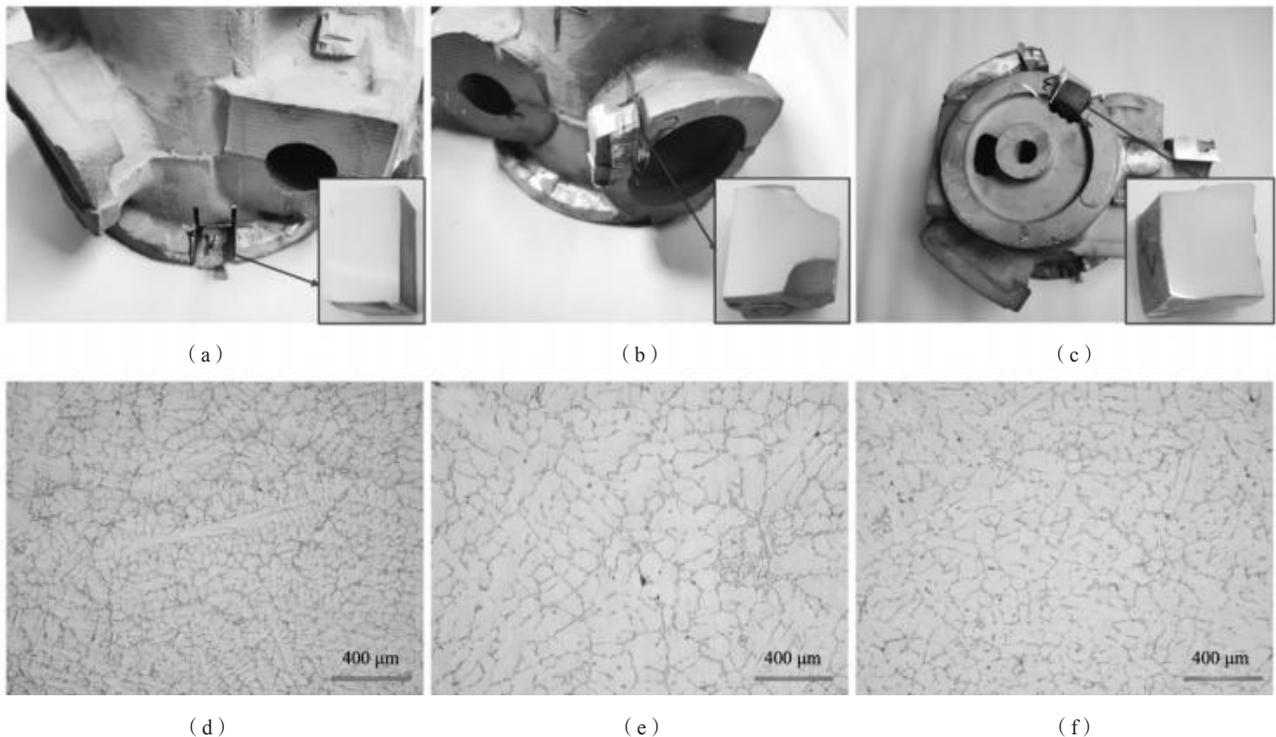


图11 不同取样位置剖面（a）-（c）和对应的微观组织（d）-（f）

Fig. 11 Profiles at different locations (a) - (c) and the corresponding microstructures (d) - (f)

4 结束语

通过顺序凝固和流态优化设计,对某型铝合金铸件进行了铸造工艺优化,解决了铸件气孔和缩孔缩松等缺陷。研究表明,通过辅助浇道的设计,可以提高冒口的温度,实现更为有效的顺序凝固补缩。内浇道的设计对平稳充型,尤其是金属液引入型腔时流

态的控制至关重要。通过流态优化,可以避免卷气,也可以有效减轻铸件中的气孔和缩孔等缺陷。Campbell的双层氧化膜理论为理解铸件缺陷的形成机制提供了新的视角,并为控制和减少这些缺陷提供了理论依据和实践指导。在铸造生产过程中,应充分考虑双层氧化膜的影响,并采取相应的措施来降低其对铸件质量的不利影响。

参考文献:

- [1] 罗传彪. 提高ZL105A燃油壳体铸件力学性能的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [2] 郭红丽, 李勇. 半固态挤压铸造下稀土Y强化机械零件用ZL105铝合金的制备与性能 [J]. 材料与冶金学报, 2022, 21(6): 442-447.
- [3] 陈晖, 周焯, 曾敏, 等. 混合稀土(Pr+Ce)变质处理ZL105铝合金摩擦磨损性能研究 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2022, 50(4): 71-76.
- [4] 赵莉. 热处理工艺对ZL105A航空铝合金力学性能的影响研究 [J]. 冶金与材料, 2023, 43(12): 154-156.
- [5] 刘军伟, 白祥. 熔体超声振动对ZL105合金组织及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2023, 72(10): 1322-1328.
- [6] 介万奇. 铸造技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [7] 李殿中, 李依依. 铸造原理 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011: 268-269.
- [8] 孙晶莹. 铝合金发动机缸体低压铸造缺陷控制的工艺及机理研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2020.

Discussion on Solving Shrinkage Cavity Defects in ZL105 Aluminum Alloy Castings by Sequential Solidification and Flow State Optimization

ZHAO Meng¹, ZHANG Shou-yin², XU Zhi-feng²

(1. AECC Guizhou Honglin Aero Engine Control Technology Co., Ltd., Guiyang 555000, Guizhou, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract:

Aiming at the relatively intractable shrinkage cavity and blowhole defects in ZL105 aluminum alloy castings, based on the theory of sequential solidification, auxiliary ingates were used to connect the feeders and runners, increasing the feeder temperatures and reducing the heat of the casting, which effectively improved the sequential solidification effect. Simultaneously, based on the bifilm oxide theory, through optimizing the ingate design, improving the flow behavior of molten metal and reducing the generation of gas entrapment, which effectively avoided the formation of shrinkage cavity defect.

Key words:

ZL105; sequential solidification; shrinkage cavity and shrinkage porosity; bifilm oxide; flow state optimization