

一种航空薄壁类铝合金壳体 铸造工艺设计及优化

卢鑫, 李聪玮, 刘雪

(中国航发西安动力控制科技有限公司, 陕西西安 710077)

摘要: 燃油与控制系统是航空发动机的核心供油系统, 因此对作为供油载体的铝合金壳体质量要求很高, 本课题针对某一类型航空薄壁类铝合金的结构特点, 结合AnyCasting铸造模拟软件, 设计一种倾转型铸造工艺方案, 并通过合理的设置工艺参数, 生产出内部组织致密的优质ZL101铝合金铸件。

关键词: ZL101; 金属型倾转铸造; 气孔缺陷; 缩松缩孔缺陷; 最优工艺方案

燃油系统及其附件是航空发动机的重要组成部分, 其主要功能是向发动机燃烧室供给精确计量的燃油用于燃烧^[1-2]。而航空发动机燃油附件的铝合金壳体作为供油系统的重要组成部分, 对它的各项性能指标设计要求非常高, 压力壳体还要承受非常高的强度和气密性检验, 因此对该类壳体的组织致密性要求很高, 不允许存在缩孔、缩松和气孔等铸造类缺陷。AnyCasting数值模拟软件被广泛应用于分析铸造过程中金属液充型和凝固的信息, 并预测铸造过程中出现的铸造缺陷以及其产生的位置等。而基于AnyCasting软件不断优化迭代铸造工艺系统, 选出最优工艺方案, 从而达到大幅度降低试错成本, 提高铸件质量的目的^[3]。本课题针对某一类型航空薄壁类铝合金壳体的结构特点, 并结合AnyCasting数值模拟分析不同工艺方案的优缺点, 最终确定采用金属型重力倾转铸造工艺方案生产该类壳体。

1 零件结构分析及工艺方案设计

1.1 结构分析

铝合金壳体零件图见图1, 材质为ZL101, 质量为3.9 kg, 化学成分(质量分数, 下同)为: 7% Si, 0.4% Mg, 余量为Al。零件外形轮廓尺寸为254 mm × 147 mm × 45 mm, 最小壁厚为5 mm, 最小壁厚的面积范围为5 924 mm²。零件有一个内腔结构, 需采用砂芯成型。零件的气密性要求是在0.3 MPa压缩空气压力下保持5 min不漏气, 热处理状态为T6。

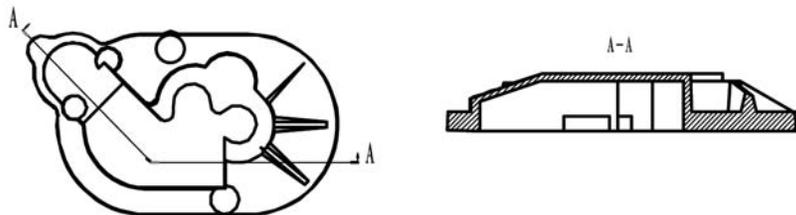


图1 壳体零件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shell parts

作者简介:

卢鑫(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为铝合金金属型铸造。电话: 17709206015, E-mail: 1192534222@qq.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2025)

02-0257-06

收稿日期:

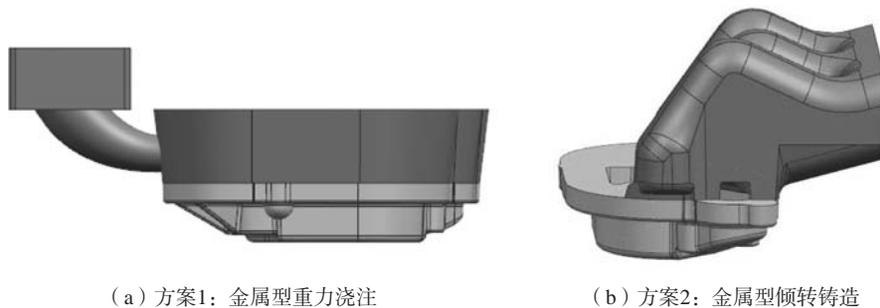
2024-10-23 收到初稿,

2024-12-09 收到修订稿。

1.2 浇注系统设计

结合零件自身特点,初步设计出如图2所示的2种浇注系统。图2(a)所示的方案1采用金属型重力浇注,结合该铸件的结构特点:铸件高度仅为48 mm且 < 1 (h 表示铸件最大外廓尺寸的高度, b 表示铸件最大外廓尺寸的宽度),因此采用顶注式浇注,浇口采用牛角式形状。这种浇注系统的优点是铝液易于充满型腔,型腔中金属的温度自下而上递增,因而补缩性能好、简单易做且节省金属液。但缺点是对铸型冲击

较大,有可能冲砂、飞溅和加剧金属液的氧化^[4]。图2(b)所示的方案2采用金属型倾转铸造,这种浇注系统的优点是通过采用可调的倾转机构,允许模具和料斗一起从水平位置变速转动至垂直位置,整个过程中模具保持一定的负角度,这样金属液可以以缓慢、连续的方式进入型腔,避免了高紊流对铸件质量的影响。缺点是不当的转速控制可能导致金属卷入空气产生气孔或表面形成氧化物和金属温度降温过快产生夹渣和冷隔^[5]。



(a) 方案1: 金属型重力浇注

(b) 方案2: 金属型倾转铸造

图2 浇注方案

Fig. 2 Pouring Scheme

采用AnyCasting铸造模拟软件分析两种方案的充型和凝固过程,通过缺陷分析,比较两种方案的优缺点,择优选择最佳方案。

1.3 砂芯设计

此铸件只有一个铸造内腔,因此只需要设计一个砂芯。砂芯采用RCS9101覆膜砂成型。该种覆膜砂的优点是高强度、低发气量、低膨胀,溃散性好,形成的铸件表面光洁度高,粗糙度可达 $Ra6.3$ 。砂芯的形状如图3所示。其中定位芯头用于下芯时与金属外膜的配合,保证内砂芯在金属外模中准确的定位;内砂芯用

于形成铸件的内腔。

2 AnyCasting软件铸造仿真分析

2.1 数值模拟参数设置

2.1.1 热物性参数设置

为了验证两种不同工艺方案对铸件质量的影响,热物性参数均设置一致,如表1所示。这可防止因参数设置不同导致模拟仿真结果出现偏差,进而影响最优方案的选择。

2.1.2 充型时间设置

重力浇注方案充型时间设置为8 s,浇注直径20 mm;倾转浇注方案倾转参数设置如表2所示。

重力浇注工艺方案的充型时间按照高度方向尺寸相似、铝液进浇量近似相同的铸件的实际充型时间设定。浇注直径是依据现场同种尺寸的浇包浇注铝液时的实际浇注直径估测出来的。

倾转浇注工艺方案的倾转速度设置了3个阶段,分别为:70°~90°为进料阶段,该阶段是铝液从料斗进浇型腔阶段,此阶段的倾转速度设置非常重要,既要保

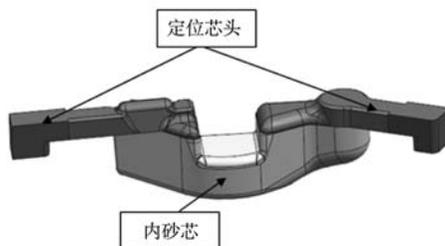


图3 型芯示意图

Fig. 3 Core schematic diagram

表1 热物性参数设置

Tab. 1 The rmophysical property parameters setting

铝合 金材料	模具 材料	铝液浇注 温度/°C	模具预热 温度/°C	型腔保温 涂层材料	型腔涂层 厚度/ μm	砂芯 材料	砂芯预热 温度/°C
ZL101	H13	720	300	ZnO	200	覆膜砂	150

表2 倾转工艺参数
Tab. 2 Tilting process parameters

倾转角度	角度/ (°)	倾转速度	速度单位/ (1/30 L·min ⁻¹)
倾倒慢速角度	70	倾倒慢速速度	-350
倾倒缓冲角度	55	倾倒快速速度	-450
倾倒最终角度	35	倾倒缓冲速度	-350

证一定的充型速度以防止铝液热量流失过多，导致充型充不起来，又要防止铝液从料斗进浇型腔时速度过快而产生紊流，导致铝液中卷气，最终在铸件中产生气、渣孔缺陷。55°~70°为型腔快速充型阶段，铝液从进浇方向充满整个型腔的85%左右，此阶段设置倾转速度比较快，可有效减少冷隔、浇不足等缺陷。35°~55°为型腔最终充型完毕阶段，此阶段设置倾转速度比较慢，目的是使倾转浇注机平缓降落，防止因急停而产生震动，而导致砂芯掉砂，落入型腔中，最终在铸件上产生夹砂缺陷。

2.2 数值模拟分析结果

2.2.1 充型速度模拟结果

AnyCasting模拟软件目前还无法对气孔缺陷进行模

拟^[6-7]，因此本课题从铝液的充型速度来预测气孔产生的倾向性。从重力浇注模拟结果分析（图4-5），充型15%时铝液在重力作用下以103 cm/s左右的充型速度从直浇道直接浇到型腔底部，冲击力很大，造成了液面翻卷。充型55%时从直浇道到型腔底面的45°角左右的充型路径附近铝液速度仍然达到了79 cm/s以上，其余部位充型速度放缓。充型85%时从直浇道到型腔中部的5°角左右的充型路径上铝液速度又升高至103 cm/s左右。

J. Campbell^[8-9]的研究指出当合金液的流速超过50 cm/s时，合金液的表面会产生紊流，而这容易导致卷气的产生，最终在铸件上形成气渣孔缺陷。纵观重力浇注的整个充型模拟过程，铝液高速流动充斥了整个充型过程，实际生产中有极大可能在铸件上产生气渣孔缺陷。

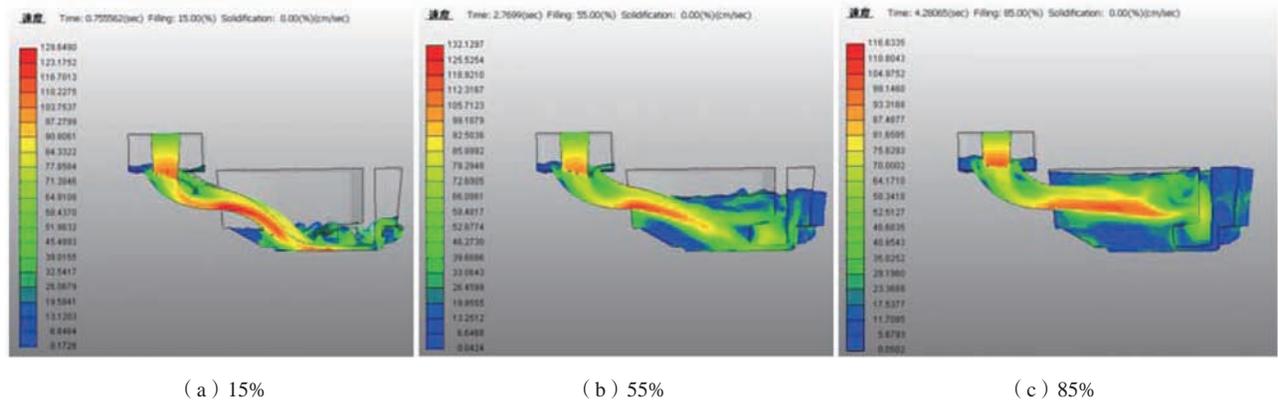


图4 方案1充型速度模拟结果

Fig. 4 Simulation result of filling speed in scheme 1

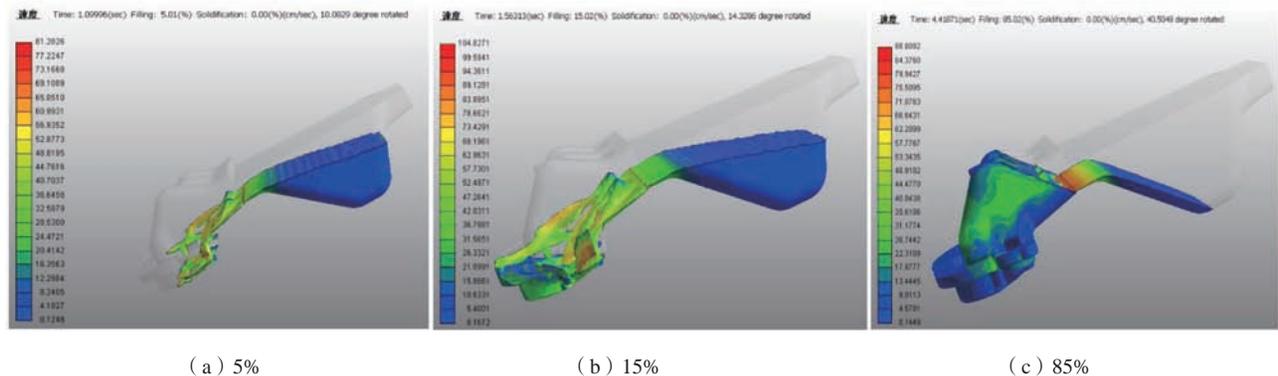


图5 方案2充型速度模拟结果

Fig. 5 Simulation results of filling speed in scheme 2

从倾转浇注模拟结果分析, 充型5%时铝液沿着浇注面从料斗缓慢的流入型腔中, 流速在48 cm/s左右; 充型15%时, 型腔中铝液的最快流速在57 cm/s左右; 充型85%时型腔中铝液的最快流速在35 cm/s左右。可以看出, 在铝液充型的前期和后期两个阶段, 前期充型速度在50~60 cm/s左右, 后期充型速度在30~40 cm/s左右。这是因为随着铝液在型腔中充型量的增加, 料斗中的进浇铝液与型腔中的铝液高度差愈来愈小, 由重力以及倾转所引起的铝液加速距离也越来越短, 所以铝液的流速也越来越慢。相比于重力铸造, 倾转铸造的整个充型过程中, 铝液一直处于低流速状态, 这可有效减少因高速充型而发生卷气现象、进而产生侵入性气孔缺陷的概率。

2.2.2 温度场模拟结果

图6分别截取了方案1中35%、55%、85%凝固过程中的温度场分布图。从图中可以看出, 随着凝固率的增加, 铸件部位温度逐渐降低。且每个凝固阶段铸件的温度有明显的从上到下的温度层次梯度, 这种温度分布有利于从冒口部位形成有效的补缩通道。说明在预防铸件缩松缺陷方面该方案设计的比较合理。

图7分别截取了方案2中35%、52%和87%凝固过程中的温度场分布图。从图7可以看出, 随着凝固率的增加, 铸件部位温度逐渐降低。且每个凝固阶段铸件的温度有明显的温度层次梯度, 都是从内到外、从上到下依次降低, 这种温度分布可以在铸件凝固阶段可以形成有效的补缩通道。说明在预防铸件缩松缺陷方面该方案设计的比较合理。

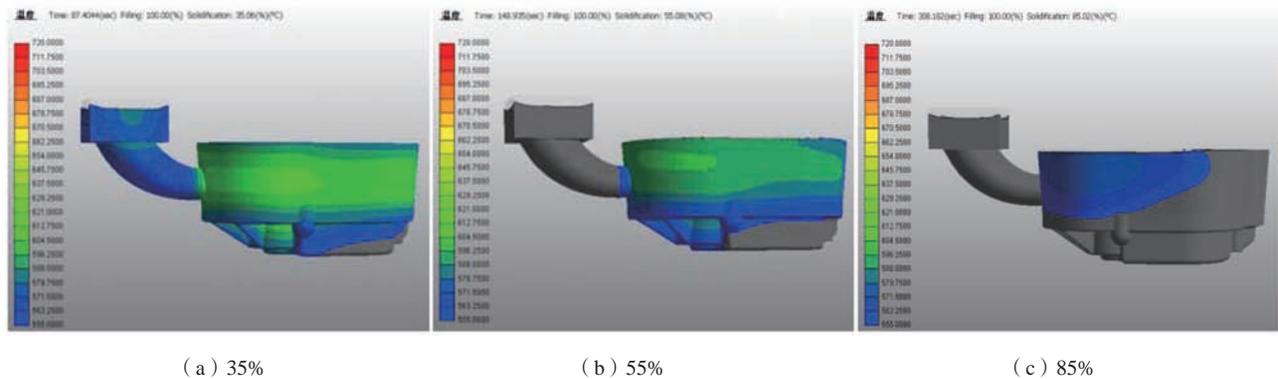


图6 方案1温度场模拟结果

Fig. 6 Simulation results of temperature field in scheme 1

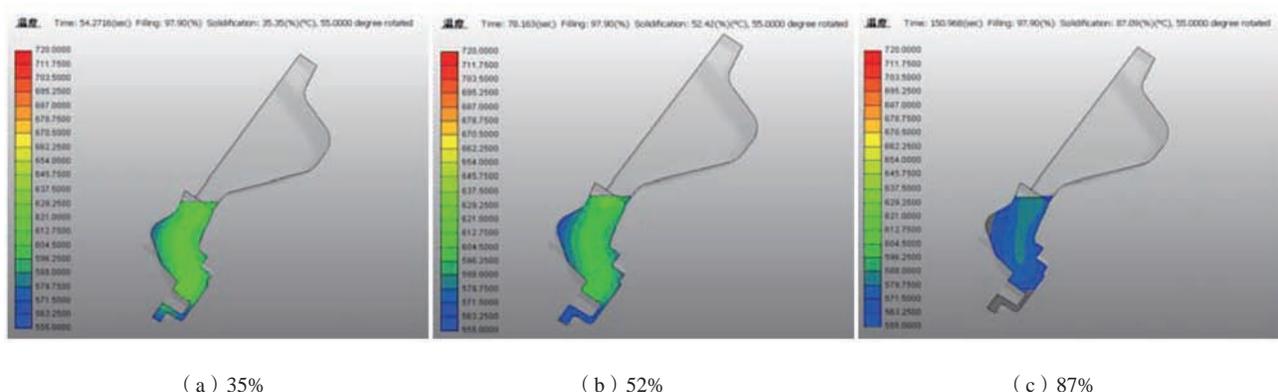


图7 方案2温度场模拟结果

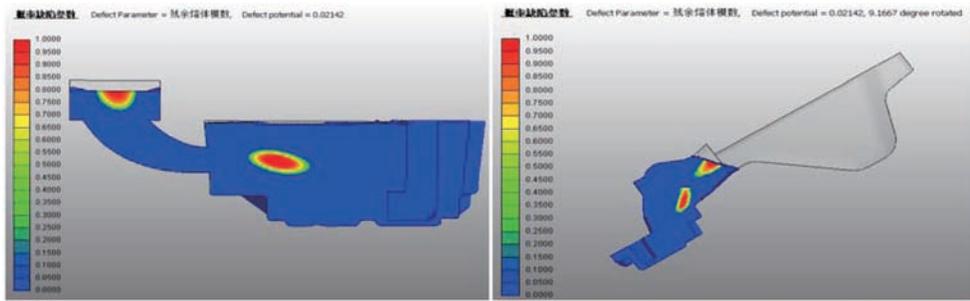
Fig. 7 Simulation results of temperature field in scheme 2

2.2.3 缩松缩孔缺陷模拟结果

模拟结果中(图8), 方案1和方案2的残余熔体均位于铸件的冒口位置, 铸件热节部位无孤立熔池, 无缩松缩孔缺陷。这与温度场的模拟结果相吻合, 说明两种工艺方案都实现了通向冒口的补缩通道, 消除了铸件几何热节处的缩孔, 实现了顺序补缩。

3 实际生产方案的选择

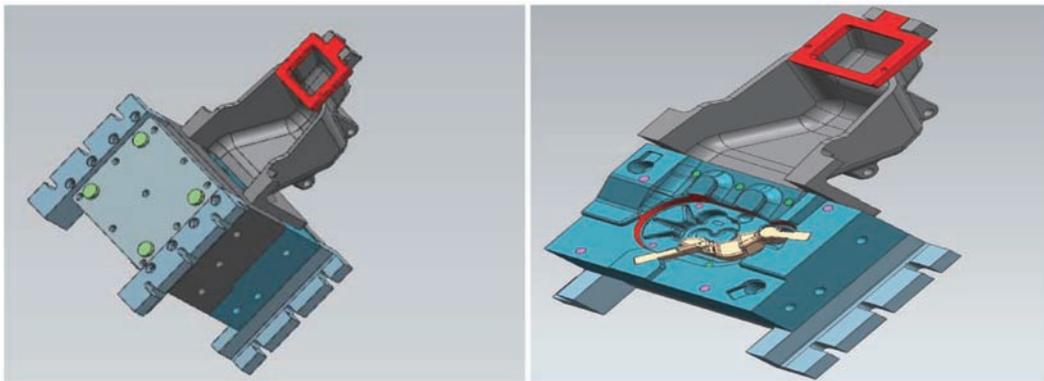
通过AnyCasting数值模拟分析, 倾转浇注方案在预防铸件气孔缺陷方面优于重力浇注方案, 在预防铸件缩孔缺陷上, 两种方案都达到了理想的效果。综合考虑下, 实际生产中采用了倾转浇注方案。图9为倾转浇注方案的模具三维图。



(a) 方案1 (b) 方案2

图8 方案1和2的缩松缺陷模拟结果

Fig. 8 Simulation results of shrinkage defects in scheme 1 and 2



(a) 模具外型

(b) 模具内腔

图9 倾转浇注模具示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the tilting pouring mold

4 生产验证

经生产验证，铸件表面质量良好，经X射线探伤及加工后均无铸造缺陷。毛坯内部平均合格率为91%，在机加阶段合格率为96%，且机加完成后产品100%通过了强度和气密性试验。在毛坯内部和机加阶段零件报废的原因多为磕碰伤以及打磨伤等外伤，只有极少数为铸件冶金缺陷。X射线底片见图10，铸件实物见图11。



图11 铸件实物图

Fig. 11 Physical picture of casting



图10 X射线底片

Fig. 10 X-ray negative

5 结论

(1) AnyCasting软件可以准确预测温度场以及由温度场和铸件结构引起的缩松缺陷，但对卷入性气孔缺陷无法直接模拟，需结合铝液充型时的流场进行预测。

(2) 重力浇注与倾转浇注各有优缺点，需结合铸件具体结构选择适合该铸件结构特点的工艺方案。选择合理的工艺方案可有效提高铸件合格率，减少废品

损失。

(3) 倾转浇注需依据铸件结构设置合理的冒口位置、倾转角度和倾转速度, 这些工艺参数对减少铸件

的气孔缺陷以及缩松缺陷至关重要, 该铸件的倾转工艺参数设置对同类型铸件的工艺方案设计有一定的借鉴、参考作用。

参考文献:

- [1] 苏志善, 李华聪, 徐刚刚, 等. 航空发动机燃油系统附件低温试验方法 [J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 94-100.
- [2] 徐健, 王淑云, 吴小刚, 等. 航空发动机燃油系统数值模型仿真与验证 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(2): 41-44.
- [3] 姜月明, 李屹, 丁旭. 砂型铸造铝合金盖子数值模拟及工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(10): 1061-1063.
- [4] 王文清, 李魁盛. 铸造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] 张云峰, 丛培军, 张鹏, 等. 重力倾转铸造工艺在铝合金底盘结构件上的应用 [J]. 铸造, 2021, 70(8): 980-985.
- [6] 朱洪军. 基于AnyCasting缸盖罩盖压铸工艺研究 [J]. 铸造, 2021, 70(2): 248-252.
- [7] 邢小颖, 汤彬, 马运, 等. AnyCasting虚拟仿真在砂型铸造中的应用及缺陷分析 [J]. 铸造, 2019, 68(5): 508-511.
- [8] 姜巨福, 匡君, 张颖, 等. A356.2 铝合金轮毂局部增压铸造过程数值模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(2): 313-321.
- [9] DÁNIEL MOLNÁR. Filling simulation of tilt casting [J]. Materials Science and Engineering, 2017, 42(1): 94-101.

Casting Process Design and Optimization of an Aviation Thin-Walled Aluminum Alloy Shell

LU Xin, LI Cong-wei, LIU Xue

(AVIC Xi'an Power Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, Shannxi, China)

Abstract:

The fuel and control system is the core fuel supply system of aircraft engines, so the quality requirements for the aluminum alloy shell as the fuel supply carrier are very high. This project focuses on the structural characteristics of a certain type of thin-walled aluminum alloy for aviation, and combines AnyCasting casting simulation software to design a tilting casting process scheme. By setting the process parameters reasonably, high-quality ZL101 aluminum alloy castings with dense internal structure are produced.

Key words:

ZL101; metal mold tilting casting; blowhole defect; shrinkage porosity defect; optimal process plan
