

# 铝合金缸体低压铸造浇注系统优化研究

邓伟<sup>1</sup> 宋仲模<sup>1</sup> 雷基林<sup>1</sup> 罗坤<sup>1</sup> 张勇<sup>2</sup> 彭鹤<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学云南省内燃机重点实验室, 昆明 650500; 2. 成都正恒动力股份有限公司, 成都 610500; 3. 昆明云内动力股份有限公司, 昆明 650224)

**摘要** 针对铝合金缸体铸件成形质量差和铸造缺陷多的问题, 设计了两种浇注系统方案, 采用数值模拟和生产验证的方法, 研究了不同浇注方案对铝合金缸体铸件的充型过程、凝固过程的冷却速率以及缩孔、缩松的影响。结果表明, 铸件正置底注式方案的充型过程较为平稳, 未出现金属液紊流、飞溅等现象, 相较于铸件倒置底注式方案, 其平均冷却速率提高了 23.91%, 铸件的缺陷体积减少了 30.13%, 有效减少了铸件的缩孔缩松缺陷, 故铸件正置底注式方案优于铸件倒置底注式方案。经生产验证, 铸件成形质量较好, 无明显铸造缺陷, 且力学性能良好, 满足铝合金缸体铸件质量要求。

**关键词** 发动机缸体; 数值模拟; 浇注系统; 生产验证

中图分类号 TG244; TG249.2; TG146.21; TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240438

## Optimization of Gating System for Aluminum Alloy Cylinder Block by Low-pressure Casting

DENG Wei<sup>1</sup>, SONG Zhongmo<sup>1</sup>, LEI Jilin<sup>1</sup>, LUO Kun<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>2</sup>, PENG Hu<sup>3</sup>

(1. Yunnan Provincial Key Laboratory of Internal Combustion Engine, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500; 2. Chengdu Zhengheng Power Co., Ltd., Chengdu 610500; 3. Kunming Yunnei Power Co., Ltd., Kunming 650224)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor molding quality and casting defects of aluminum alloy cylinder block castings, different gating system schemes were designed, and effects of different gating system schemes on mold filling process, cooling rate of solidification process, and the shrinkage porosities and cavities in aluminum alloy cylinder block castings were investigated by numerical simulation and production verification. The results reveal that the filling process of normalized bottom injection design is relatively smooth without liquid metal turbulence, splashing and other phenomena, where the average cooling rate is increased by 23.91%, and the defective volume is reduced by 30.13% compared to that of casting inverted bottom injection design. Shrinkage defects are effectively reduced, therefore normalized bottom injection design is superior. After production verification, the molding quality of castings is satisfied without casting defects, and mechanical properties are desirable, meeting the requirements of aluminum alloy cylinder block castings.

**Key Words:** Engine Cylinder Block, Numerical Simulation, Gating System, Production Verification

铝合金具有良好的铸造性、低密度和高强度等特点, 已在汽车、航空航天等领域广泛使用<sup>[1-3]</sup>。发动机是驱动车辆的重要部件, 需要具备良好的力学性能, 但由

于发动机工作环境恶劣, 因此对铝合金缸体的铸造成形质量有较高的要求, 提高铝合金缸体铸件的性能以及降低铸件缩孔、缩松缺陷成为当前研究的热点问题

收稿日期: 2024-10-28; 修订日期: 2024-11-18

基金项目: 云南省科技厅重大科技专项计划资助项目(202202AB080011)

第一作者简介: 邓伟, 男, 1976 年出生, 教授级高工, E-mail: 1323364897@163.com

通信作者: 雷基林, 男, 1977 年出生, 教授, E-mail: lejilin@kmust.edu.cn

引用格式: 邓伟, 宋仲模, 雷基林, 等. 铝合金缸体低压铸造浇注系统优化研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(10): 1 522-1 528.

DENG W, SONG Z M, LEI J L, et al. Optimization of gating system for aluminum alloy cylinder block by low-pressure casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(10): 1 522-1 528.

[112] RAO Y Q, YAN H, HU Z, et al. Tensile property and corrosion behavior of die-casting AlSi10Cu3+0.6% (La + Yb) alloy with T6 heat treatment[J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16(4): 2 210-2 220.

[113] ZOU Y C, YAN H, HU Z, et al. Effect of (Pr + Ce) addition and T6 heat treatment on microhardness and corrosion of AlSi5Cu1Mg

alloy[J]. Materials Research Express, 2020, 7(2): 026 526.

[114] GENG Y H, JIANG Q T, WU X H, et al. The influence of rare earth elements (Ce, La, Y, Nd, Gd) on the microstructure, electrochemical and antibacterial properties of Al-Zn-In-Mg-Ti sacrificial anodes[J]. Corrosion Science, 2024, 235(10): 112 196.

(编辑: 栗万仲)

之一。目前,通过有限元仿真技术模拟分析铸件的铸造成形过程并改善成形品质得到广泛应用<sup>[4-5]</sup>。对于合金铸件,需要合理的浇注系统来保证其铸件成形质量。宗学文等<sup>[6]</sup>运用有限元仿真方法,研究不同方案对叶轮铸件的充型过程、凝固过程以及缩孔缩松的影响。通过数值模拟发现底注式方案优于顶注式方案,并经过实际生产验证,叶轮铸件成形质量较好,力学性能合格,满足钛合金铸件的要求。郭居魁等<sup>[7]</sup>以吊舱薄壁铸件为研究对象,对初始浇注系统方案进行改进(增加内浇道,并优化内浇道的形状),提高冒口对缩孔缩松的补缩能力,改善了铸件成形质量。经数值模拟可知优化改进后的方案减少了镁合金薄壁铸件的缩孔缩松缺陷。WANG D等<sup>[8]</sup>设计了不同的浇注系统方案,研究各方案对铸造过程中金属液的充型温度场和固相分数变化的影响,并防止在铸造过程中缺陷的形成。结果表明,优化后的浇注系统有效地防止了铸件缩孔、缩松缺陷的产生。CHEN H等<sup>[9]</sup>对发动机支架的浇注系统结构进行了分析。根据铸造工艺要求设计了不同浇注系统方案,并分别进行数值模拟分析。结果表明,经优化改进后的浇注系统增强了金属液的流动性,使充型更加完整,减少了浇注过程中的氧化夹杂物和铸造缺陷,提高了发动机支架铸件的品质。

综上,通过对浇注系统的优化设计可以获得成形品质较好的产品。本研究采用数值模拟和生产验证的方法,对ZL101A铝合金缸体铸件的浇注系统进行优化设计,研究不同浇注系统设计方案对缸体铸件的充型过程、凝固过程的冷却速率以及缩孔、缩松的影响,以期减少铸造缺陷,获得成形品质较好的铸件,为铝合金铸件的铸造工艺设计和实际生产提供参考。

## 1 数学模型

### 1.1 充型过程理论

金属液的充型过程模拟仿真涉及连续性方程、动量守恒方程以及能量守恒方程<sup>[10-11]</sup>。

连续性方程的表达式为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的速度分量。

动量守恒方程的表达式为:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

式中, $\rho$ 为流体密度; $t$ 为充型时间; $p$ 为压力; $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ 分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的分量; $\mu$ 为黏度。

能量守恒方程的表达式为:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (5)$$

式中, $c$ 为比热容; $T$ 为温度; $k$ 为热导率; $S$ 为内热源项。

### 1.2 凝固过程理论

在充型完成后,金属液的温度由液相线温度下降至固相线温度直至室温,在此过程中铸件自上而下进行顺序凝固,使得高温合金液从液态变成固态。在凝固过程中,有关热力学传热方式主要有热量的传导、热量对流以及热量辐射<sup>[12-14]</sup>。

热量传导的表达式为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (6)$$

式中, $c_p$ 为定压比热容。

热量对流的表达式为:

$$q = h(T_w - T_f) \quad (7)$$

式中, $q$ 为热流密度; $h$ 为传热系数; $T_w$ 为合金液的温度; $T_f$ 为模具预热温度。

热量辐射( $E$ )通常使用斯蒂芬-玻尔兹曼定律来定义,其表达式为:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (8)$$

式中, $E$ 为热辐射的辐射力; $\epsilon$ 为辐射系数; $\sigma$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.76 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_s$ 为环境温度。

### 1.3 缩孔缩松形成机理及预测判据

在铸造过程中,浇注系统的不合理、工艺参数的不合适等原因会导致铸件产生缩孔、缩松等铸造缺陷,降低铸件的成形品质和使用寿命。在铸造仿真模拟中,通常采用Niyama判据预测缩孔缩松<sup>[15-16]</sup>:

$$G/\sqrt{R} \leq C_{\text{Niyama}} \quad (9)$$

式中, $G$ 为温度梯度; $R$ 为冷却速度; $C_{\text{Niyama}}$ 为判断是否

出现缩松缩孔的临界值。

2 铸件分析及浇注系统设计

2.1 铸件结构与材料

以某型 4 缸发动机缸体作为对象,其三维模型见图 1。缸体铸件质量为 18.83 kg,缸筒内径为  $\phi 68\text{ mm}$ ,轮廓尺寸为  $371.5\text{ mm}\times 348.7\text{ mm}\times 282.6\text{ mm}$ 。铸件材质为 ZL101A 铝合金,其化学成分见表 1。

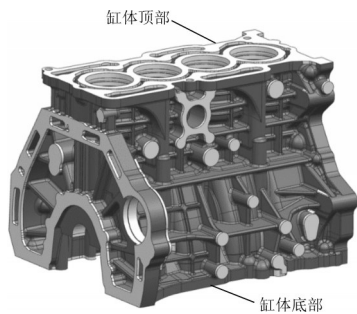


图 1 发动机缸体三维模型

Fig.1 3D model of engine cylinder block

表 1 ZL101A 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL101A alloy %

| $w_B$ |      |      |      |       |       |      |      |    |
|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|----|
| Si    | Mg   | Ti   | Fe   | Cu    | Mn    | Zn   | Pb   | Al |
| 6.83  | 0.35 | 0.12 | 0.15 | 0.002 | 0.003 | 0.03 | 0.01 | 余量 |

通过 JMatPro 软件计算可得到合金的热物性参数<sup>[17]</sup>,见图 2。该合金的液相线温度为  $616\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、固相线温度为  $556\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

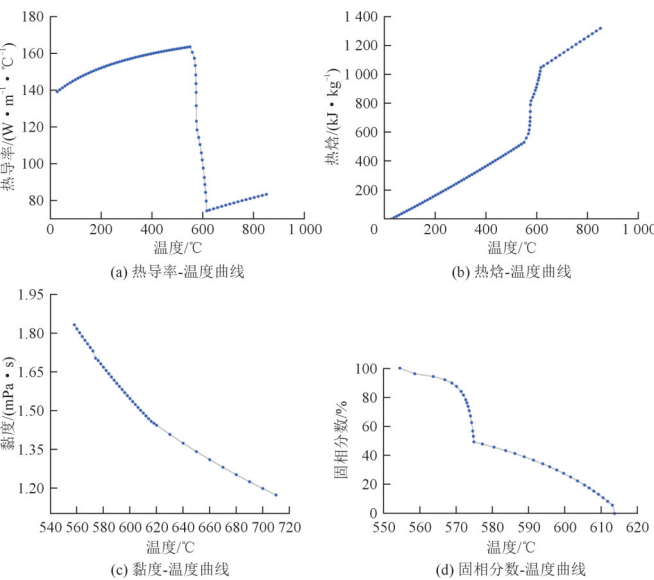


图 2 ZL101A 合金材料的热物性参数

Fig.2 Thermophysical parameters of ZL101A alloy

2.2 浇注系统设计

对于发动机缸体铸件,合理的浇注系统设计是合金液平稳充型的关键,并且还能减少型腔内的气体卷

入到金属液中,有助于获得质量较好的铸件<sup>[18]</sup>。首先,通过经验公式计算缸体铸件的内浇道横截面积,其计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$\sum A_{内} = \frac{m}{\rho v t} \tag{10}$$

$$t = \frac{h_{缸}}{v_0} \tag{11}$$

式中, $A_{内}$ 为内浇道横截面积, $\text{cm}^2$ ;  $m$ 为缸体铸件质量,  $\text{kg}$ ;  $\rho$ 为金属液密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $v$ 为金属液在内浇道出口处的线速度,  $\text{cm}/\text{s}$ ;  $h_{缸}$ 为缸体铸件高度,  $\text{cm}$ ;  $v_0$ 为合金液在型腔内的上升速度,  $\text{cm}/\text{s}$ 。

在确定缸体铸件内浇道横截面积的基础上,根据封闭式浇注系统的设计原则<sup>[20]</sup>,确定内浇道、横浇道和直浇道横截面积的合适比值为:

$$\sum A_{内} : \sum A_{横} : \sum A_{直} = 1 : 1.5 : 2 \tag{12}$$

根据缸体铸件结构和铝合金的铸造性能,设计了 A、B 两种浇注系统方案,见图 3。方案 A 为铸件倒置底注式方案,其内浇道位于缸筒一侧,同时在缸体铸件的壁厚处设置内浇道,并设计相应的冒口和溢流槽等补缩通道。方案 B 为铸件正置底注式方案,其内浇道设计与方案 A 相反,位于曲轴箱一侧,同样在铸件的壁厚位置设计内浇道,在铸件顶部设计了相应的冒口和溢流槽。基于有限元软件 ProCAST,分别对 A、B 两方案进行数值模拟,通过对比分析充型过程、凝固过程的冷却速率以及缩孔、缩松缺陷,从而确定较为合理的浇注系统方案。

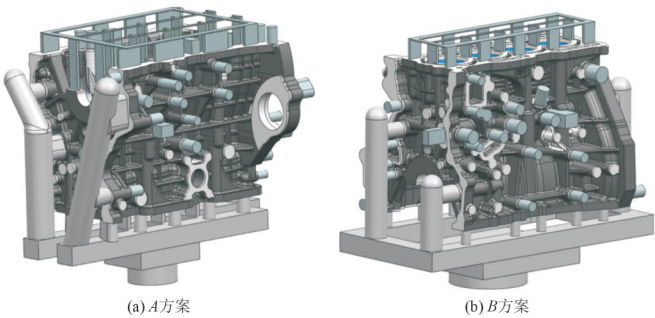


图 3 A、B 两种浇注系统的设计方案

Fig.3 Design schemes for gating system A and B

3 数值模拟结果分析与生产验证

3.1 初始及边界条件设置

基于 ProCAST 软件,分别对缸体铸件和浇注系统进行网格划分得到有限元模型,见图 4。方案 A 的网格数为 2 714 430 个,方案 B 的网格数为 2 639 598 个。网格划分完成后,进入 Visual-Cast 模块设置相应的边界

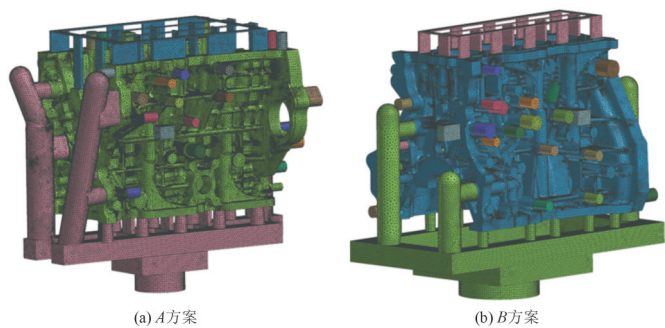


图4 A、B两种浇注系统方案的有限元模型

Fig.4 Finite element modeling of gating system scheme A and B 条件。充型方式为反重力充型,模具材料为树脂砂,空冷<sup>[21]</sup>,对砂箱的外表面进行冷却处理。其铸造参数设定见表2。

表2 模拟参数设定

Tab.2 Simulation parameter settings

| 浇注温度/<br>℃ | 模具预热温度/<br>℃ | 充型时间/<br>s | 保压压力/kPa | 密度/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 泊松比  | 杨氏模量/<br>GPa | 传热系数/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 模具与铸件 | 铸件与冷铁 |
|------------|--------------|------------|----------|------------------------------|------|--------------|--------------------------------------------|-------|-------|
| 700        | 50           | 20         | 60       | 2.68                         | 0.33 | 70           | 500                                        | 2 000 |       |

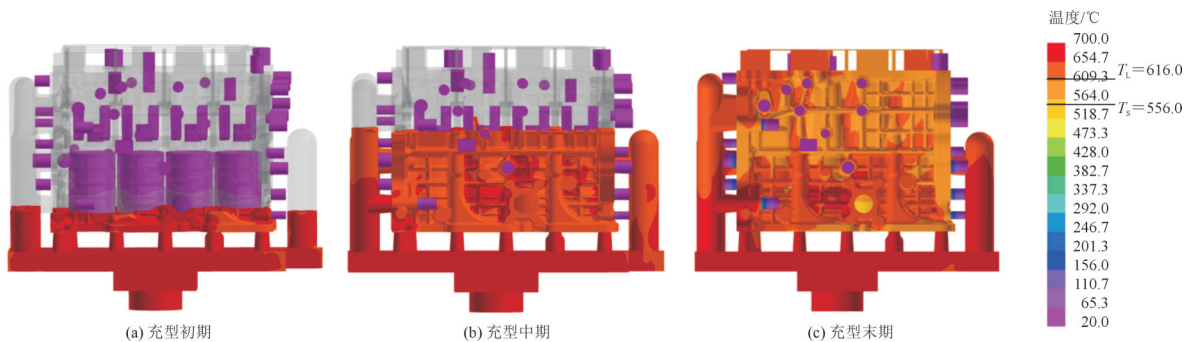


图5 方案A充型过程的温度场变化示意图

Fig.5 Schematic diagram of temperature field variation for filling process of scheme A

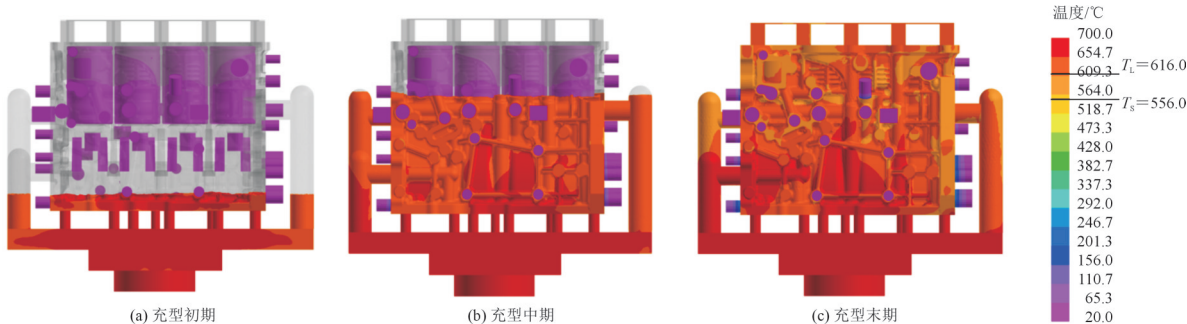


图6 方案B充型过程的温度场变化示意图

Fig.6 Schematic diagram of temperature field variation for filling process of scheme B

3.2.2 凝固过程的冷却速率分析

在铸件冷却凝固过程中,冷却速率是评价铸件成形品质的重要指标<sup>[22]</sup>。随着冷却速率增加,金属过冷程度则会相应的增大,其对凝固组织的影响也会随之增大。从形核机理来看,形核率随过冷度的增加而升

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 充型过程分析

图5和图6分别为方案A和方案B充型过程的温度场变化示意图。由图5可知,方案A充型初期,金属液经直浇道上升至横浇道,一部分金属液通过内浇道由缸筒一侧进入,开始对缸体铸件充型,此时金属液出现不规则运动,不利于金属液的充型;在充型中期,另一部分金属液开始通过侧浇道进入型腔,与底部金属液汇聚,此时出现金属液飞溅现象;在充型末期,金属液充满整个缸体铸件,充型完成。

由图6可以看出,方案B中,金属液先进入横浇道通道,然后一部分金属液通过内浇道由曲轴箱一侧进入,对铸件进行充型,另一部分金属液则通过侧浇道进入型腔,与底部金属液汇聚,进一步填充铸件各位置。在整个充型过程中,金属液液面平稳,充型速度合适,未产生金属液紊流、飞溅等现象。综合比较,方案B的充型过程更加平稳,其速度更加合理,有利于获得成形质量较好的铸件。

高,同时也使合金的微观组织更加细化。此外,当温度迅速下降时,形成的大量晶粒在生长前就被冷却凝固,进一步细化了晶粒组织<sup>[23-24]</sup>。

针对方案A和方案B所得到的缸体铸件,分别选取12个节点进行温度变化研究。为保证计算结果的精度,在选择温度节点时应使节点的选取更加均匀,故将

缸体铸件从顶部到底部划分为4个梯度,在每个梯度高度处选取3个温度变化点。图7为缸体铸件温度节点的分布示意图。12个节点的温度变化情况见图8。可以看出,A、B两方案在节点温度上均符合浇注温度-液相线温度-固相线温度-室温的顺序,并且在曲线中未出现温度畸变严重的节点。

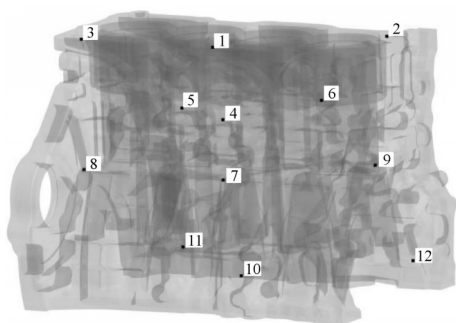


图7 缸体铸件温度节点分布示意图

Fig.7 Schematic diagram of temperature node distribution of cylinder block casting

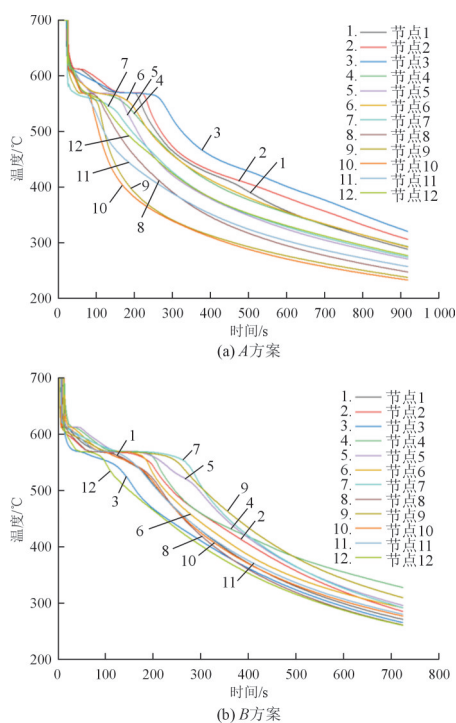
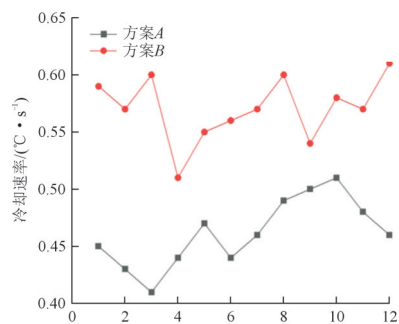


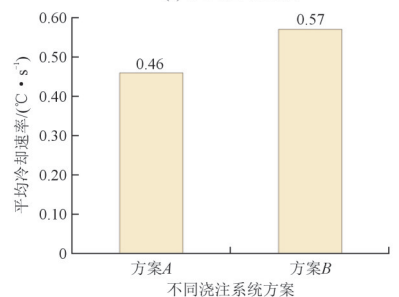
图8 方案A和方案B各节点温度变化数值模拟结果示意图

Fig.8 Schematic diagram of numerical simulation results for temperature node variation under gating system scheme A and B

选取浇注温度(700℃)至合金材料固相线温度以下(220℃)的温度变化区间和冷却凝固时间,通过计算冷却速率,直观地比较A、B两方案下各节点冷却速率的大小。图9为A、B两种浇注系统方案下12个节点的冷却速率曲线图和平均冷却速率直方图。可以看出,A、B两方案下的12个节点的平均冷却速率分别为0.46和0.57℃/s。与方案A相比,方案B的冷却速率提高了23.91%,其具有较高的冷却速率,能减少铸造缺陷的产生。



(a) 冷却速率曲线图



(b) 平均冷却速率直方图

图9 方案A和方案B下12个节点的冷却速率曲线图和平均冷却速率直方图

Fig.9 Cooling rate curves and average cooling rate histograms for 12 nodes under gating system scheme A and B

### 3.2.3 缩孔缩松分析

在低压铸造过程中,缩孔缩松缺陷能够直观反映出铸件的质量和性能<sup>[25]</sup>。铸件的关键部位出现缩孔缩松缺陷会产生应力集中现象,从而严重降低铸件的力学性能。经ProCAST数值模拟,分别提取A、B两种浇注系统方案的缩孔、缩松缺陷体积数值模拟结果,并进行对比分析,见图10。可以看出,方案A中铸件产生了

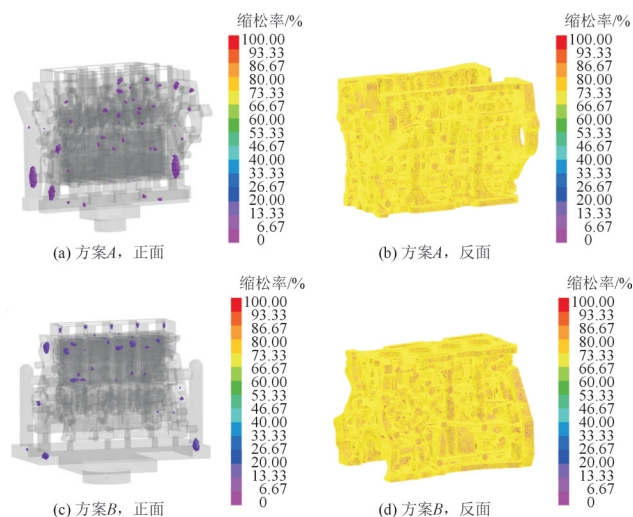


图10 A、B两种浇注方案的缩孔缩松体积模拟结果

Fig.10 Schematic diagram of numerical simulation results for volume of shrinkage and cavities under gating system scheme A and B

较多的缩孔、缩松缺陷,其缺陷体积为 154.59 cm<sup>3</sup>,方案 B 中铸件的缺陷主要位于缸筒一侧,其缺陷体积为 108.01 cm<sup>3</sup>。与方案 A 相比,方案 B 中铸件的缺陷体积减少了 30.13%,有效减少了缸体铸件的缩孔、缩松缺陷,有利于提高铸件品质。

3.3 生产验证

采用铸件正置底注式方案 B 进行实际生产试制浇注。可以看出,缸体铸件外观完整,无开裂、缩孔缩松以及浇不足等明显铸造缺陷,外观质量良好,见图 11。对缸体铸件进行 CT 检测,见图 12。可以看出,在缸孔的周围以及部分局部薄壁位置未发现超过标准的缩孔缩松缺陷,仅在铸件内部存在一些微量缩孔缩松和细小针孔。这与数值模拟结果基本一致,达到 GB/T 9438-2013 对铸件质量的要求。

对缸体铸件本体进行取样,图 13 为缸体铸件的取样位置和拉伸试验试样,根据 GB/T 228.1-2021 对所

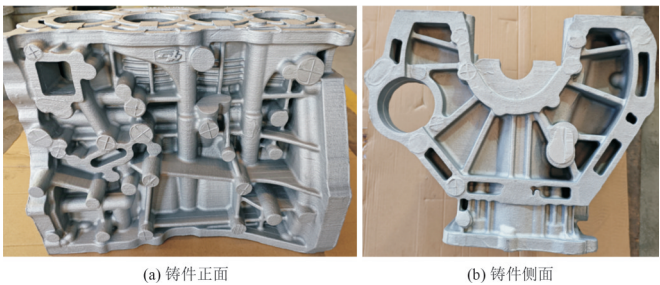


图 11 发动机缸体铸件示意图  
Fig.11 Schematic diagram of engine block casting

取的 4 个试样进行拉伸试验。在常温条件下测得缸体铸件的抗拉强度、屈服强度和伸长率均值分别为 286.5 MPa、247.3 MPa 和 3.2%,力学性能良好,满足铝合金缸体铸件要求。对拉伸试样断口进行电镜检测,其拉伸断口微观形貌见图 14。可以看出,拉伸断口存在较多韧窝,且比较均匀,能观察到许多涟波花样,力学性能较好。结果表明,铸件正置底注式方案 B 下生产的铝合金缸体铸件满足使用要求。

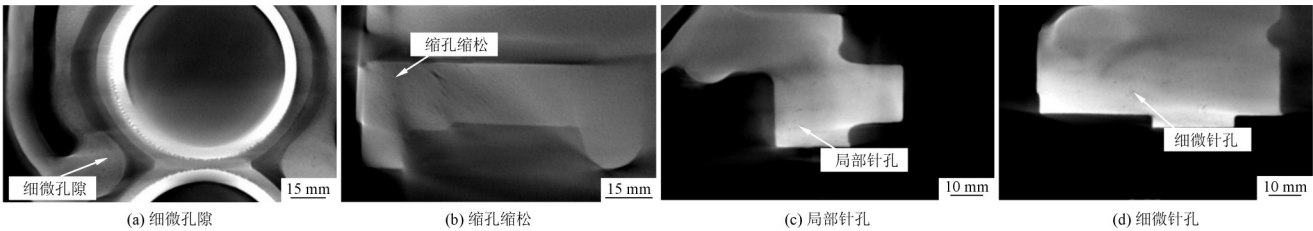


图 12 缸体铸件 CT 检测结果  
Fig.12 CT test results of cylinder block castings

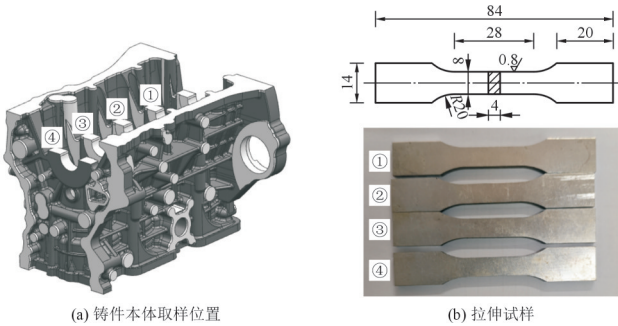


图 13 缸体铸件本体取样位置及拉伸试样  
Fig.13 Cylinder body casting body sampling position and tensile test specimen

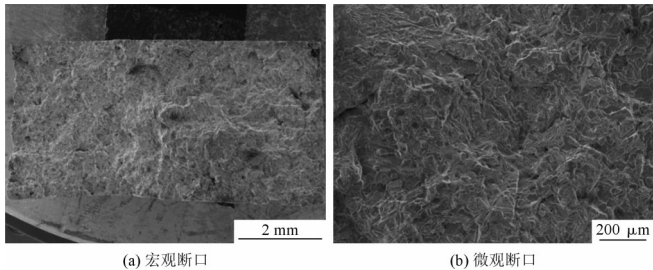


图 14 拉伸断口微观形貌 SEM 图片  
Fig.14 SEM images of micro morphologies of tensile fracture

4 结 论

(1)通过对两种浇注系统方案的充型过程和凝固过程的冷却速率数值模拟结果对比分析可知,铸件正置底注式方案的充型过程较为平稳,未出现金属液紊流、飞溅等现象,其冷却速率比倒置底注提高了 23.91%,具有较高的冷却速率,铸造缺陷减少。

(2)通过对两种浇注系统方案的缩孔、缩松体积数值模拟结果对比分析可知,倒置底注和正置底注铸件的缩孔缩松体积分别为 154.59 和 108.01 cm<sup>3</sup>,与倒置底注相比,铸件正置底注式方案铸件的缺陷体积减少了 30.13%,可显著减少缸体铸件的缩孔、缩松缺陷,提高铸件的成形品质。

(3)采用铸件正置底注式方案进行实际生产验证,所得缸体铸件外观完整,未出现冷隔、开裂、缩孔缩松以及浇不足等铸造缺陷,外观质量良好。在缸孔的四周以及局部薄壁处均未出现超过标准的缩孔缩松缺陷,仅在铸件内部存在一些微量缩孔缩松和细小针孔,满足 GB/T9438-2013 对铸件质量的要求。抗拉强度、

屈服强度以及伸长率分别为 286.5 MPa、247.3 MPa 和 3.2%，力学性能良好，满足铝合金缸体铸件相关要求。

## 参 考 文 献

- [1] 孙冬恩,程和法,周宏伟,等. 低压铸造铝合金轮毂的数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2020,40(7):763-767.
- [2] 申志康,李文亚,蔡自强,等. 套筒设计对异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊接头成形的影响[J]. 机械工程学报,2021,57(18):137-143,152.
- [3] 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.
- [4] ARULRAJ M, PALANI P K, SOWRIRAJAN M. Optimization of squeeze casting parameters of hybrid aluminium matrix composite using Taguchi approach[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2021, E235(4): 1 073-1 081.
- [5] 钟发勇,龚海军,李福军,等. 大型复杂重载车钩熔模铸造浇注系统优化[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(12):3 788-3 797.
- [6] 宗学文,刘文杰,熊聪. 钛合金叶轮精铸成型数值模拟及实验验证[J]. 航空材料学报,2019,39(5):103-112.
- [7] 郭居魁,马骁,任凌宝,等. 基于 ProCAST 的某超大型镁合金飞机吊舱铸件工艺仿真与改进[J]. 热加工工艺,2024,53(11):138-143,149.
- [8] WANG D, DONG A, ZHU G, et al. Rapid casting of complex impeller based on 3D printing wax pattern and simulation optimization[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(9): 2 629-2 635.
- [9] CHEN H, GAO Q, WANG Z, et al. Optimization of casting system structure based on genetic algorithm for A356 casting quality prediction[J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(3): 1 948-1 969.
- [10] 刘文才,丁德华,王永博,等. Al-7Si-0.35Mg-0.1Ti 合金压铸工艺模拟优化及组织性能[J]. 中国有色金属学报,2021,31(9):2 357-2 370.
- [11] 祁明凡,康永林,朱国明,等. 镁合金薄壁件压铸成形的工艺及数值模拟[J]. 中国有色金属学报,2017,27(3):448-458.
- [12] 张东生,李世德,徐佐等. A356 铝合金轮毂低压铸造数值模拟以及组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报,2023,33(6):1 720-1 731.
- [13] LIAO Q, GE P, LU G, et al. Simulation study on the investment casting process of a low-cost titanium alloy gearbox based on Pro-CAST[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022 (1): 4 484 762.
- [14] FENG Y, LIAO D, CHEN T. Confluence and cold shut computation based on time field in casting simulation[J]. China Foundry, 2021, 18(2): 101-109.
- [15] 匡锐,曹鑫,马敏团,等. 应急柴油机组电动泵 M3402 不锈钢泵壳精密铸造工艺研究[J]. 热加工工艺,2024,53(11):110-115.
- [16] 赵国超,张一鸣,王慧,等. ZG20SiMn 铸钢摇臂壳体铸造过程数值仿真及工艺优化[J]. 材料科学与工艺,2024,32(3):78-86.
- [17] 时俊克,廖敦明,陈宇豪,等. 钛合金立式离心熔模铸造凝固缺陷数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(11):1 360-1 365.
- [18] 姜月明. 某复杂铝合金铸件低压铸造数值模拟及工艺优化研究[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
- [19] DENG W, LUO K, LEI J, et al. Optimization of engine block casting process based on new aluminum alloy material of Al-Si-Cu system[J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18(4): 3 580-3 598.
- [20] YAVUZ H, ERTUGRUL O. Numerical analysis of the cooling system performance and effectiveness in aluminum low-pressure die casting[J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 15(1): 216-228.
- [21] LIU X, HAO Z, HUANG M. Optimization of vacuum counter-pressure casting process for an aluminum alloy casing using numerical simulation and defect recognition techniques[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(5): 2 783-2 795.
- [22] XU Z, WANG S, WANG H, et al. Effect of cooling rate on microstructure and properties of twin-roll casting 6061 aluminum alloy sheet[J]. Metals, 2020, 10(9): 1 168.
- [23] BENJUNIOR B, AHMAD A H, RASHIDI M M, et al. Effect of different cooling rates condition on thermal profile and microstructure of aluminium 6061 [J]. Procedia Engineering, 2017, 184: 298-305.
- [24] WANG Y, LI Y, QIAN X, et al. Effect of the cooling rate of vacuum centrifugal casting on microstructure and mechanical properties of 7055 aluminum alloy[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(12): 1 769.
- [25] 李红强,朱广,何伟国. 一种 GIS 用低压铸造盖板铸件仿真分析与工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2024,44(9):1 282-1 285.

(编辑:张正贺)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵,文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造  
(关注铸造及有色合金  
领域重要研究成果)



压铸界  
(压铸领域最新动态  
及研究)



青稞讲堂  
(金属领域青年科学家  
最新研究成果)



特种铸造及有色  
合金杂志  
(文章动态时刻关注)