

铝合金变速箱壳体压铸工艺 CAE 分析及优化

张海杰¹, 刘 军¹, 黄智红², 王宗境¹

(1. 盐城工学院 机械工程学院, 江苏盐城 224051; 2. 顺达模具科技有限公司, 江苏靖江 214500)

摘要: 运用CAE模拟软件对铝合金变速箱壳体在充型和凝固过程中的顺序和温度场进行仿真分析, 观察易产生卷气、缩松等缺陷的部位, 并分析原因。根据模拟分析的结果, 提出相关的压铸工艺改善, 即通过增加浇注系统分流道的数量以及对排溢系统进行优化设计。最后经实际生产和X光射线检测, 缺陷得到改善, 验证了该方案的可行性, 为铸造出合格的铸件提供参考。

关键词: 变速箱壳体; 缺陷; 数值模拟; 压铸工艺

随着汽车轻量化的快速发展, 零部件材料越来越多地采用轻质合金材料, 铝合金作为轻质合金满足了汽车轻量化的需求, 具有密度小、摩擦性能好等特点, 在汽车变速箱壳体等铸件生产中得到广泛应用^[1-2]。汽车变速箱壳体一般为铝合金压铸生产出毛坯后再后续机械加工, 实际生产中常由于气孔、冷隔和裂纹等缺陷影响其性能^[3]。

仿真分析是铸造工艺及模具设计最有效的辅助手段, 能准确高效地模拟真实的铸造过程, 从而缩短模具及工艺开发周期, 降低设计和生产成本^[4]。本研究对象是壳类铸件, 它结构复杂, 壁厚不均匀, 在充型和凝固的过程中可能会出现气孔、缩松和缩孔缺陷, 导致在这些部位容易产生裂纹^[5]。陈子业等人^[6]利用铸造仿真软件, 模拟分析铸件充型过程和凝固过程中温度场的变化, 分析缺陷产生的部位及原因, 并对其进行工艺优化, 提高了铸件品质。罗维等人^[7]利用仿真软件对车灯支架进行模拟仿真, 通过分析铸造过程中出现的缺陷问题, 并提出了相应的解决办法。

本研究主要是运用模拟仿真软件Anycasting对铝合金变速箱壳体的充型和凝固过程进行计算机仿真模拟, 并确定对其压铸工艺进行优化, 观察铝合金液在充型、凝固过程中流场、温度场及缺陷的分布情况, 预测缺陷产生的部位, 分析其产生的原因, 从而进行相关的工艺优化, 最后通过对最终方案的铸件生产试制, 提高产品的质量水平, 缩短生产周期。

1 模拟过程前处理

1.1 模型结构分析及材料性能

如图1为变速箱壳体压铸件的三维模型。压铸件的材质为ADC12铝合金, 模具材料为H13钢, 该模型的质量约为4.02 kg, 轮廓外形尺寸为409.9 mm × 283.2 mm × 81.9 mm, 体积约为1 487 211.88 mm³。如图2所示, 此压铸件的壁厚不均匀, 最大壁厚为19.78 mm, 平均壁厚为5.68 mm, 从正面与背面可以看出, 它属于复杂类型的零部件, 而且内部有相当多的加强筋和孔洞。变速箱壳体采用顶注式浇注系统, 内浇道设置在铸件底部, 同时在关键部位设有溢流槽, 用来排气和储藏冷料。

铸件材料为ADC12铝合金, 其液相线温度为580 ℃, 固相线温度为515 ℃。

作者简介:

张海杰(1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为铝合金压铸件工艺研究及轻量化设计。电话: 19851422887, E-mail: 1300056540@qq.com

通讯作者:

刘军, 男, 研究员级高级工程师, 硕士生导师。电话: 13813448688, E-mail: liuj@ycit.cn

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)12-1729-07

收稿日期:

2024-04-15 收到初稿,
2024-06-24 收到修订稿。



(a) 正面 (b) 背面

图1 铸件三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of the casting

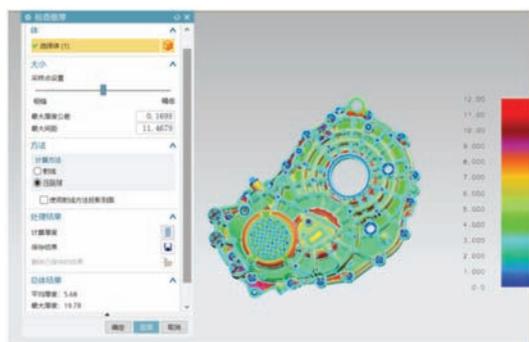


图2 铸件壁厚图

Fig. 2 Wall thickness diagram of the casting

ADC12铝合金铸造性能优良、屈服强度较高，而且在高温下抗蠕变的性能好，在铸造行业中得到了广泛的应用。ADC12合金的化学成分见表1，模具材料为H13钢，热物性参数见表2。

1.2 模型导入与网格划分

将变速箱壳体三维模型转化为STL格式并导入Any PRE软件中。使用软件中划分均匀网格的功能对其进行网格划分。为了提高划分时间和尽量减少运算量而又保证实体的每个部位不被遗漏，采用整体划分，总网格数为4 148 144个。其中，网格的划分模型见图3。由图可以看出，网格划分比较合理，没有出现断层现象。

2 压铸工艺设计

2.1 分型面与浇注位置的选择

在铸造过程中，分型面的选择对铸件的质量、制造成本及效率都有很大的影响。压铸模分型面是定模与动模的结合面。分型面应尽可能选在铸件较大轮廓面上，以便开模后压铸件仍在动模上，使模具的结构变得更加简单，这样就能确保压铸件的尺寸和表面质

表1 ADC12合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of the ADC12 alloy

$w_B / \%$

| Cu | Cu | Si | Mg | Zn | Fe | Mn | Ni | Sn | Al |
|---------|---------|----------|------|------|------|------|------|------|----|
| 1.5~3.5 | 1.5~3.5 | 9.6~12.0 | ≤0.3 | ≤1.0 | ≤1.3 | ≤0.5 | ≤0.5 | ≤0.3 | 余量 |

表2 ADC12合金和H13钢的热物性参数

Table 2 Thermophysical properties of the ADC12 alloy and H13 steel

| 材料 | 液相线温度/°C | 固相线温度/°C | 密度/($g \cdot cm^{-3}$) | 热导率/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) | 比热/($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$) |
|---------|----------|----------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 铸件ADC12 | 580 | 515 | 2.72 | 96.2 | 0.965 |
| 模具H13钢 | 1 491 | 1 331 | 7.80 | 27.76 | 0.460 |

实体数量
网格数量

5

4148144 (154x206x91)

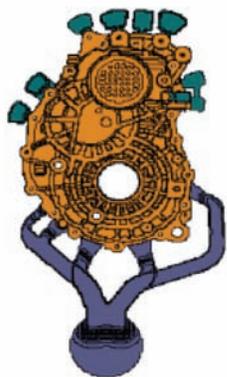


图3 压铸件的网格划分

Fig. 3 Grid division of the die casting

量；其次，分型面应位于铸造方向的朝向，这有助于使熔融金属在铸造过程中流动顺畅，并减少气孔和夹杂物的产生。本壳体的最大投影面是它底部，根据铸件的结构考虑以及模具的可行性，选择该壳体的底面作为分型面，如图4所示，这样分型便于型芯的放置、铸件的取出和清理，使得浇道与溢流槽容易去除，保证了铸件的加工质量。

2.2 浇注系统设计

浇注系统一般分为三个部分：直浇道、横浇道和内浇道^[8]。浇注系统设计的合理性对充型过程有着很大的影响。对于变速箱壳体这类复杂的铸件，内浇道设计所涉及的问题较多，尤其是内浇道厚度要适中，

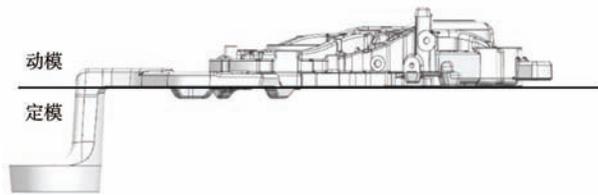


图4 分型面的确定

Fig. 4 Determination of the parting surface

能够快速充型。其中，内浇道的截面积计算公式如式(1)^[9]:

$$A_g = \frac{V}{v_{充} t} \quad (1)$$

式中： A_g 为内浇道截面积， mm^2 ； V 为铸件体积， mm^3 ； v 为填充速度， mm/s ； t 为填充时间， s 。用 nx12.0 测量变速箱壳体的体积为 $1\,487\,211.88\text{ mm}^3$ ， $v_{充}$ 按照 $40\,000\text{ mm/s}$ 计算， t 按 0.1 s 计算，计算出内浇道截面积 A_g 为 372 mm^2 。由于变速箱壳体的平均厚度为 5.68 mm ，而又选取较小的内浇道厚度，方便后期浇注系统的切除，所以内浇道厚度选择 3 mm 。而横浇道是直浇道的末端到内浇道前段的连接通道。内浇道的外形、位置、方向及大小决定了它的结构形状。横浇道的厚度由公式(2)计算得出^[10]:

$$D = (5 \sim 8) h \quad (2)$$

式中： D 为横浇道厚度， mm ； h 为内浇道厚度， mm ；取 $D=16\text{ mm}$ ，为了使得铸件更方便起模，横浇道的起模斜度一般取值为 $10^\circ \sim 15^\circ$ ，这里取 15° 。

本研究选用力劲DCC1600T卧式冷室压铸机，压室直径选取 110 mm ，料柄厚度为 30 mm 。

2.3 压铸工艺参数的选择

压铸的主要工艺参数包括浇注温度、填充速度和模具预热温度等，这些工艺参数对铸件最终质量均有影响^[11]。根据压铸件的结构特点，浇注温度选为 $670\text{ }^\circ\text{C}$ 。模具预热可以保证金属液填充时有较好的流动性，从而更好地填充。所以在生产的过程中，必须对模具预热温度进行合理的选择，模具预热温度选择为 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 。合理的填充速度可以提高压铸件的质量，但填充速度分为高速和低速，因此设定低速为 0.25 m/s ，高速为 3 m/s 。具体参数见表3。

表3 工艺参数的选择
Table 3 Selection of process parameters

| 参数 | 值 | 参数 | 值 |
|------|----------|--------|----------------------|
| 压铸机台 | 1 600 t | 高速速度 | 3 m/s |
| 冲头直径 | 110 mm | 浇注温度 | 670 $^\circ\text{C}$ |
| 低速速度 | 0.25 m/s | 模具预热温度 | 200 $^\circ\text{C}$ |

3 充型数值模拟及缺陷分析

图5为压铸件充型所用时间的模拟结果，可以看出，充型时间总共 $0.408\,7\text{ s}$ 。金属液在充型过程中的温度场如图6所示。在充型过程中，金属液的温度始终高于液相线温度 $580\text{ }^\circ\text{C}$ ，这样就保证了金属液在型腔内部具有较好的流动性。由图6a可以看出，当 $t=0.258\,2\text{ s}$ 时，金属液在压冲头的作用下金属液从浇口处进入直浇道和横浇道，然后从两处主流支流向内浇道。如图6b，当 $t=0.354\,1\text{ s}$ 时，中间两个横浇道中的金属液已经率先到达内浇道并开始填充型腔。如图6c，当 $t=0.365\,2\text{ s}$ 时，在充型过程中，型腔中间区域填充速度明显比两侧要快，这会导致料流包抄的现象，容易形成困气和卷气。如图6e，当 $t=0.405\,7\text{ s}$ 时，除了铸件两侧溢流槽与末端圆筒区域和溢流槽还没有完全填充外，其余的部分已经完成填充，但在填充的过程中，型腔内的气体会被金属液推向填充方向，因此在交汇处和填充末端，料流反转，导致该区域困气或者严重的冷料和冷隔，容易产生气孔等缺陷。当 $t=0.408\,7\text{ s}$ 时，金属液已充满铸件整个型腔，并进入溢流槽中。

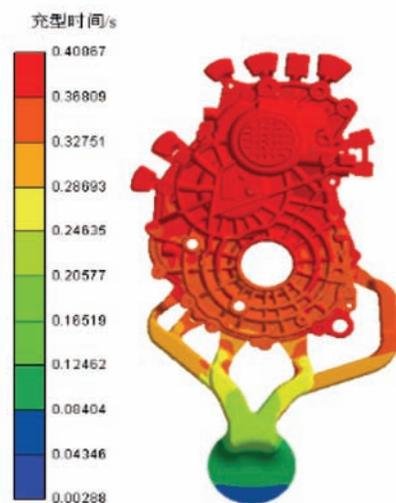


图5 填充时间的分布

Fig. 5 Distribution of the filling time

4 凝固数值模拟及缺陷分析

由图7可以看出变速箱壳体的凝固时间，铸件凝固的过程总共用时 $124.131\,6\text{ s}$ 。由图可以看出，铸件中间凹槽部位最后凝固，可能出现缩松和缩孔缺陷。铸件在凝固时不同时间的温度场如图8所示。

如图8a，金属液在充型的过程中温度无明显变化，且都高于液相线，因此在充型的过程中铸件局部不会发生凝固现象。当 $t=17.714\,7\text{ s}$ 时，铸件末端的溢流槽和较薄区域已经先开始凝固。当 $t=21.807\,6\text{ s}$ 时，

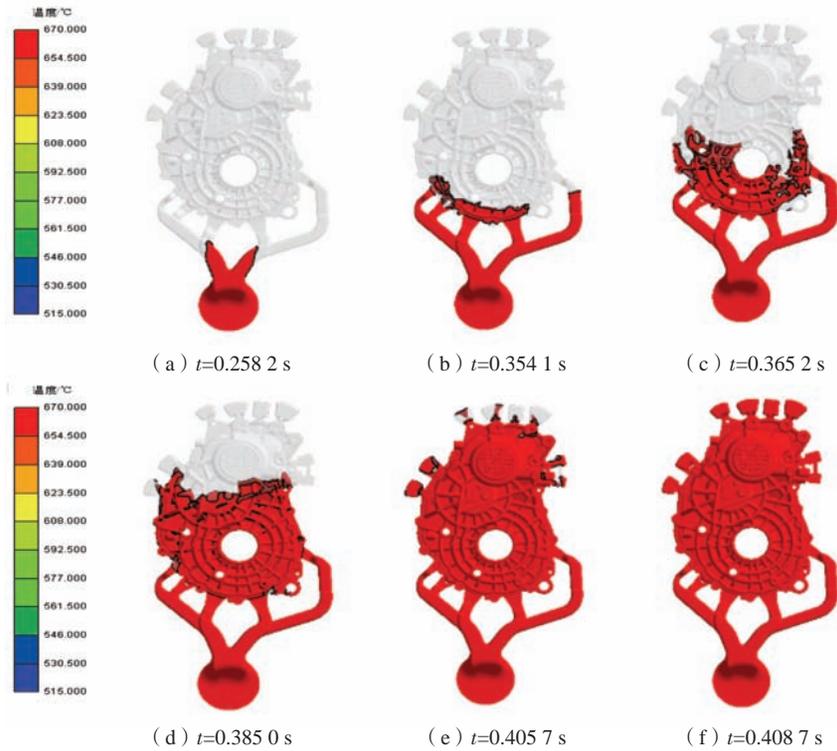


图6 金属液在不同时刻的填充过程

Fig. 6 Filling process of the liquid metal at different times

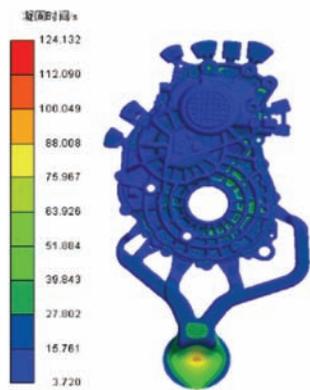


图7 凝固时间

Fig. 7 Solidification time

由图8d可以看出，铸件边缘和薄壁处温度明显降低，但铸件中间部位温度较高，金属液得不到填充，当低温区域凝固后，该处金属液处于固液共存的状态，形成孤立液相区，容易形成缩松和缩孔。如图8e，当 $t=52.0953$ s时，除了中间部分凹槽区域尚未凝固，铸件的其他部位均已凝固，其原因为壁厚较厚，存在产品顶出模具后继续冷却，产生表面凹缩或者内部形成孤立液相区，可能产生缩孔的风险。

5 优化方案设计及分析

从模拟上看，在开始时，合金液的充型过程比较平稳，随后在填充型腔过程中出现了一些卷气和冷

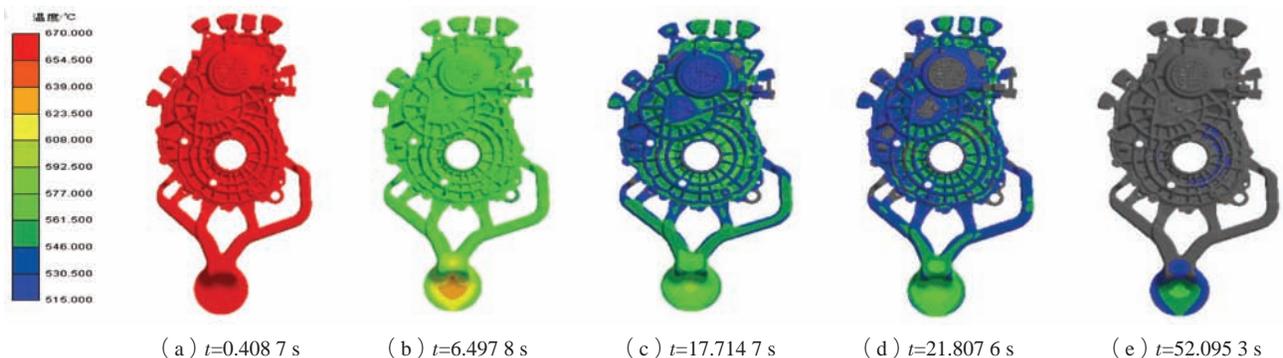


图8 铸件在凝固中温度场的分布

Fig. 8 Distribution of temperature field of the casting in solidification

隔现象,从而形成气孔。在凝固的过程中,铸件厚壁和凹槽结构处存在孤立液相区,从而形成缩松和缩孔缺陷。针对上述壁厚较厚导致的问题,在铸件的两侧各增加一个分流道,加快该区域的充型速度,减少卷气的缺陷。同时,在铸件上增加几个溢流槽和排气系统,防止局部产生困气现象,还可以更好地排除型腔内的气体。其次,通过调整浇口的位置和数量,改变熔融金属的流动方向和速度,从而缩短铸件凹槽的凝固时间,减少缩松和缩孔缺陷的产生。图9为优化方案结构示意图,两侧新增的两个分流道,为了更好地收集冷料和气体,在铸件尾部凹槽区域增加溢流槽和排气系统。



图9 优化方案示意图

Fig. 9 Schematic diagram of optimization scheme

根据上述的优化方案,对优化后的产品进行了充型和凝固分析。如图10可知,内浇道附近金属液填充良好,无明显卷气现象,原始方案中铸件的末端圆孔处出现了困气现象,但优化后的铸件在末端新增了溢流槽和排气系统,用来收集冷料和气体的作用,因此末端的困气问题得到了解决。如图11和图12所示,优化后铸件的凝固时间为121.872 0 s,比优化前的时间更少,主要原因是在优化前处理过程中,在原有基础上延长喷涂时间2 s,具有更好降低模具温度的作用,从而提高了金属液在模具中的凝固效率,使得铸件的凝固时间缩短。与优化前铸件相比,中间凹槽温度较高的部位区域明显减少,则该部位出现缩松和缩孔缺陷的概率降低。如图13,将铸件从箭头X方向剖开,优化前后截面X处的缺陷如图14所示,将两者进行对比,不难看出,优化后凹槽处缺陷明显减少,除了一些圆筒孔处和溢流槽,但位于浇排系统的位置附近可以忽略,因为在后期的加工会被切除。总体来说,优化后的方案降低了卷气、缩松和缩孔的风险,提高了生产效率。

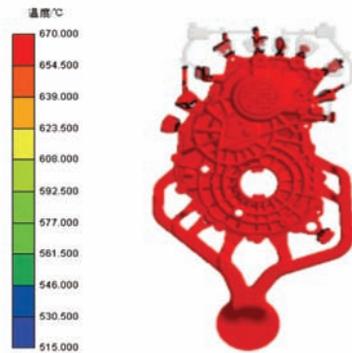


图10 优化后充型过程

Fig. 10 Optimized filling process

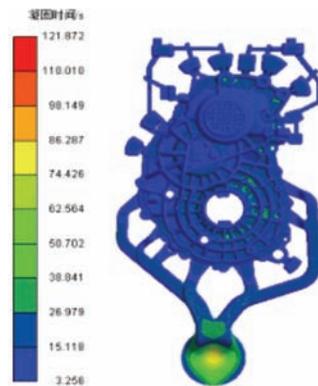


图11 优化后凝固时间

Fig. 11 Optimized solidification time

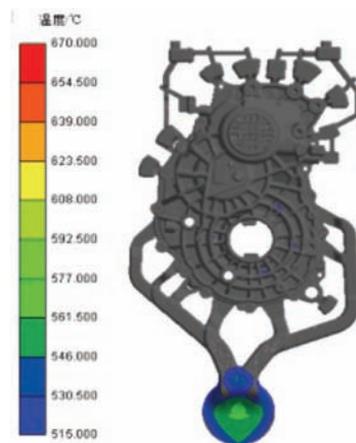


图12 优化后凝固温度

Fig. 12 Optimized solidification temperature

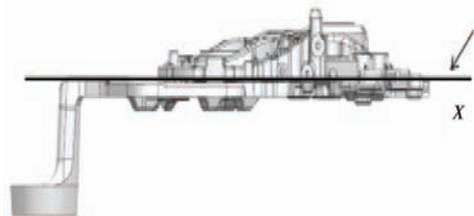


图13 铸件截面X的位置

Fig. 13 Position of section X of the casting

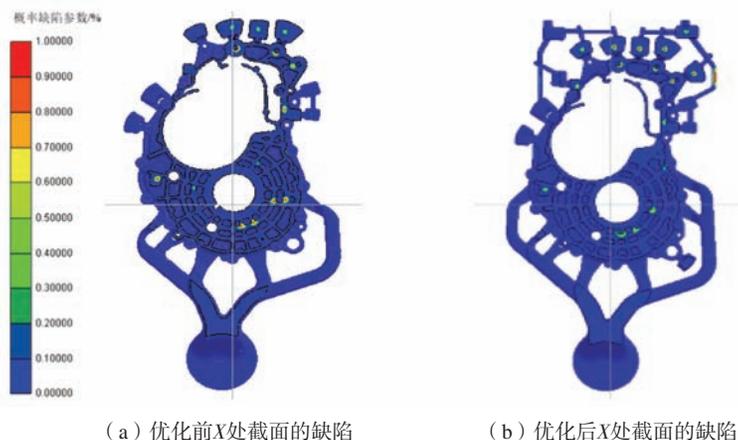


图14 优化前后X截面缺陷对比图

Fig. 14 Comparison of defect of X-section before and after optimization

6 产品生产验证

为了进一步验证工艺优化方案的可行性，将优化后的铸件方案在16 000 kN上的力劲压铸机上进行生产验证，压铸产品实体如图15所示。经验证，变速箱后壳体外观表面良好，没有出现气孔和冷隔等缺陷。再对铸件进行X射线检测，结果如图16所示，内部良好，未发现明显缩松和缩孔现象。



图15 铸件实物图

Fig. 15 Physical drawing of the casting

7 结论

(1) 为了有效地解决缺陷问题，通过增加浇注系

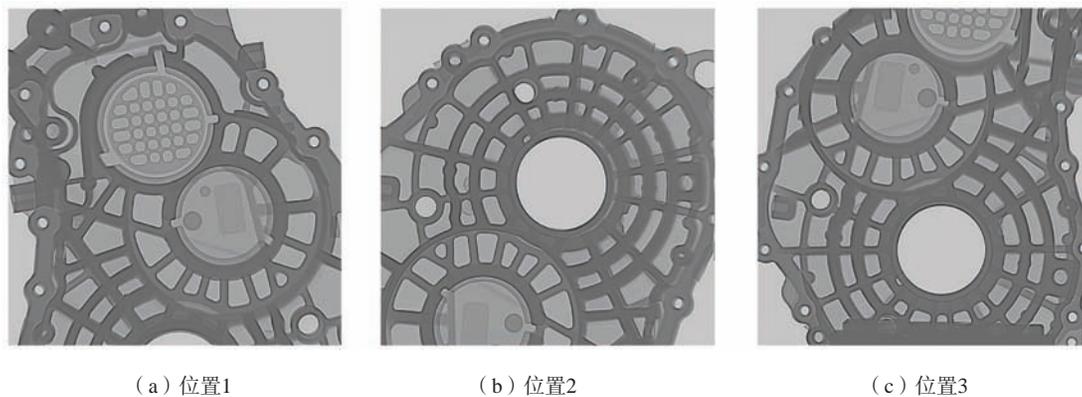


图16 铸件X射线检测

Fig. 16 X-ray inspection of the casting

统分流道的数量以及对排溢系统进行优化设计。通过模流分析，优化后铸件质量得到了改善，缺陷率有效的降低，可以实现产品的批量生产，为实际生产提供参考。

(2) 针对变速箱壳体在压铸过程中容易产生缺

陷，生产效率较低的问题，通过AnyCasting仿真模拟对铸件进行了数值分析，将模拟结果与铸件的X射线探伤进行比较，发现两者较为一致，说明该软件能够有效地预测铸件在生产过程中可能出现缺陷的位置。

参考文献:

- [1] DWIVEDI D K. Adhesive wear behavior of cast aluminium-silicon alloys: Overview [J]. *Materials and Design*, 2010, 31: 2517–2531.
- [2] 宋丽华, 曹世伟, 王学民, 等. 基于MAGMA的发动机缸体模具压铸工艺分析 [J]. *模具工业*, 2011, 37 (7): 53–59.
- [3] 高东强, 翟彦青, 朱小倩, 等. 汽车减速器箱盖砂型铸造工艺模拟分析 [J]. *铸造*, 2020, 69 (5): 523–527.
- [4] NIKAWA M, USUI K, IWAHORI H, et al. Estimation of die release force of mbox JIS - ADC12aluminum alloy die castings manufactured through high-pressure die casting via computer simulation [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2018, 12 (6): 955–963.
- [5] 肖悦辉, 程永奇, 陈宇航, 等. 过渡元素Ni对铸造Al-Mg-Si合金组织和性能的影响 [J]. *材料科学与工艺*, 2021, 29 (4): 58–66.
- [6] 陈子业, 苏小平. 铝合金发动机支架压铸工艺设计及优化 [J]. *铸造*, 2021, 70 (12): 1466–1470.
- [7] 罗维, 贾志欣, 李继强, 等. 汽车车灯支架压铸工艺CAE分析及模具设计 [J]. *铸造*, 2024, 73 (2): 202–207.
- [8] 范勇, 冷晟, 余宁, 等. 复合材料传动轴RTM工艺仿真与模具设计 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42 (12): 104–105.
- [9] 彭玲玲. 基于Flow-3D软件的变速箱壳体压铸工艺数值模拟 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45 (3): 68–70.
- [10] 江昌勇, 沈洪雷, 姜伯军, 等. 压铸成形工艺与模具设计 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [11] 张俊涛, 李建, 陈华伟, 等. 减速器壳体铸造工艺设计的探讨 [J]. *铸造技术*, 2014, 35 (5): 1105–1107.

CAE Analysis and Optimization of Die Casting Process of Aluminum Alloy Gearbox Housing

ZHANG Hai-jie¹, LIU Jun¹, HUANG Zhi-hong², WANG Zong-jing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China; 2. Shunda Mould Technology Co., Ltd., Jingjiang 214500, Jiangsu, China)

Abstract:

The sequence and temperature field of aluminum alloy gearbox shell during filling and solidification were simulated and analyzed by CAE simulation software, and the defects such as gas trapping and dispersed shrinkage were observed, and the reasons were analyzed. According to the results of simulation analysis, the related improvement of die casting process was proposed, that is, by increasing the number of diverting channels in the pouring system and optimizing the design of the overflow system. Finally, through actual production and X-ray detection, the defects were improved, which verified the feasibility of the scheme and provided a reference for casting qualified castings.

Key words:

gearbox housing; defect; numerical simulation; die casting process