

铝合金机油泵盖压铸模浇注及溢流系统仿真优化设计

宋 鹏¹, 龚海军¹, 彭 军², 舒吉平¹, 高正源¹

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆德运模具制造有限公司, 重庆 402260)

摘要: 为了高效、高质量生产某汽车发动机机油泵盖, 针对泵盖零件特征并基于压铸理论和经验设计了3种理论上可行的浇注与排溢系统方案, 然后利用ProCAST软件模拟铸件的充型及凝固过程。充型过程模拟发现铸件顶部易产生卷气, 因此提出在此处增设一个溢流槽的优化方案。铸件凝固仿真发现, 消除横浇道内侧溢流槽以及缩短内浇道长度, 对铸件的缩松、缩孔分布无影响, 还可改善横浇道内侧铸件部位的散热、减少金属液流动能量损失。方案三的浇注与排溢系统降低了卷气, 试模铸件经X光探伤表明重要位置无缩孔, 金相分析显示铸件各部位组织致密, 晶粒度等级为4, 显微硬度大于HV85, 符合产品要求。

关键词: 铝合金泵盖; 压铸模具; 浇注系统; 排溢系统; ProCAST仿真

高压压铸 (HPDC) 是一种高效的近净成形工艺, 一般铝合金铸件浇注温度约670~700 °C, 充型保压压强通常为400~500 MPa, 充填速度0.5~120 m/s, 充填时间仅需0.01~0.2 s, 具有高温、高压和高速的特点, 可以生产各型复杂、薄壁零件, 铝合金最薄处可达到0.5 mm甚至更低^[1]。正是由于压铸工艺的“高温、高压、高速”, 铝合金压铸模具及工艺稍有不合理、操作不规范都将显著影响铸件质量、生产效率和模具寿命^[2]。其中, 压铸件质量的影响因素较多, 最主要的有: 一是合金的成分和熔体质量, 二是模具浇注、溢流和排气设计, 三是压铸工艺参数^[3], 四是喷涂、开模时间等因素。合金成分决定了合金液-固相线区间大小, 从而影响合金流动性和补缩能力, 而熔体除气和除渣效果则决定了合金性能的发挥^[4]; 压铸模浇注系统不仅决定着浇注填充方向、溢流排气条件、压力传递、充填速度和充填时间, 也将影响模具温度分布和模具寿命; 压铸工艺参数同样重要, 浇注温度、压射速度和压力、模具预热温度、留模时间都将影响铸件组织的致密度和内应力^[5]。在合金成分合格和操作规范的前提下, 压铸模具的浇注、溢流和排气系统设计选择就成为压铸质量的决定性因素^[6]。

泵盖虽属小型零件, 但存在一些厚壁和曲面, 一般使用铝合金压铸成形^[7]。盖类零件压铸生产时通常会发生表面黑斑、裂纹、气孔、流痕与冷隔等缺陷^[8]。作为机油泵的重要零件, 泵盖关系到机油泵的密闭性和散热性, 其成形质量非常关键^[9]。汤文卓等人^[10]通过改变上盖横浇道的形状、调整溢流槽的位置和大小, 明显改善了型腔的卷气、铸件气孔和表面质量。李宪军等人^[11]通过对ZL102合金泵盖压铸模优化设计, 不仅使模具结构紧凑、效率提升, 还优化了模具的排气排渣能力, 稳定了产品质量。由此可见, 压铸模具设计和工艺参数选择对泵盖类零件的质量影响是复杂而显著的, 本文以铝合金机油泵盖为对象, 通过理论和经验设计并进行Procast仿真分析, 以期获得模具和工艺的最佳设计方案。

1 物理模型与数值模型建立

1.1 铸件物理模型

机油泵盖零件外形尺寸为149 mm × 110 mm × 32 mm, 使用UG建模, 并测得其

作者简介:

宋鹏 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为压铸模具设计。E-mail: sp1993@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2023) 02-0196-07

收稿日期:

2022-05-17 收到初稿,

2022-06-21 收到修订稿。

体积为63 826.1 mm³，最大厚度10.8 mm，最小壁厚1.5 mm，平均厚度3.07 mm，如图1所示。由图1可见，铸件外形不对称，存在较复杂曲面与薄壁，局部厚度分布不均匀，有2处较厚大部位，见图中圈选区域，从

上到下壁厚分别约为10.5 mm、10.8 mm。

机油泵盖压铸材料使用ADC12铝合金，属Al-Si-Cu系合金，化学成分见表1。

为避免金属液对型芯造成冲击，同时考虑避开复

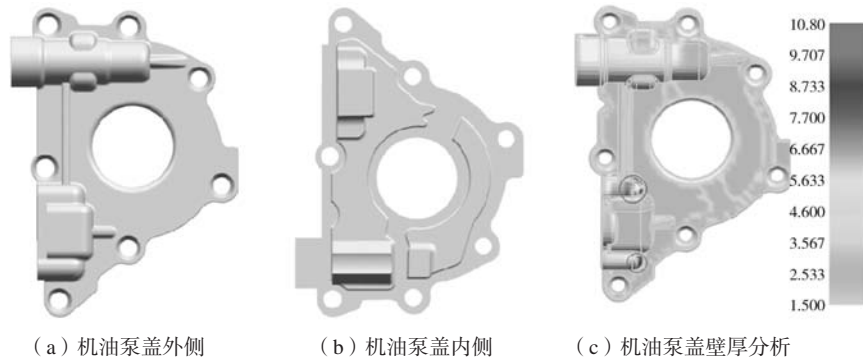


图1 机油泵盖结构及壁厚分析

Fig. 1 Analysis of structure and wall thickness of the oil pump cover

表1 ADC12合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of the ADC12 alloy

项目	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Pb	Ti	Ni	Sn	Mn	Al	w _B /%
名义含量	9.6~12	1.5~3.5	≤0.3	≤1.3	≤1.0	≤0.1	≤0.01	≤0.5	≤0.2	≤0.5	余量	
实测含量	10.35	1.84	0.24	0.72	0.71	0.02	0.01	0.04	0.01	0.25	余量	

杂薄壁部位，减少金属液流动距离，浇道设在外侧壁厚均匀处，采用左右两个侧浇道，内浇道截面面积计算如下：

$$A_g = \frac{G}{\rho v_g t} \quad (1)$$

式中： A_g 为内浇道截面积； ρ 为金属液密度； v_g 为内浇道处金属液的流速； t 为金属液填充型腔的时间； G 为通过内浇道的金属液质量（含溢流槽及排气槽）。

按照经验和模具设计理论设计模具，设计参数分别为：充型速度（ v ）2 m/s，内浇道速度（ v_g ）40 m/s，充填时间（ t ）0.22 s，内浇道厚度（ d ）2.8 mm，铸件质量（ m ）240 g，计算得到内浇道截面积（ A_g ）109 mm²。

根据铸件的形状特征与浇注系统设计理论，设计了3种浇注方案，浇注和溢流系统设计如图2。首先各方案在横浇道的端部设置了凸出部位，可以把冷污金属液、涂料残渣与气体储存在凸出部位中，同时可以稳定金属液流态；为了排出金属液前部的液体、冷污金属液，稳定流态，减少涡流，在靠近内浇道的两侧圆孔处分别设置了溢流槽；同时为了便于散热，方案二消除了横浇道内侧的溢流槽；方案三和方案二比，缩短了内浇道的长度，减少了金属液流动过程中的能量损失，减少了金属液浪费。考虑到铸件底部是两股液流汇合的地方，存在较大卷气倾向，方案一在此处增加一个溢流槽。

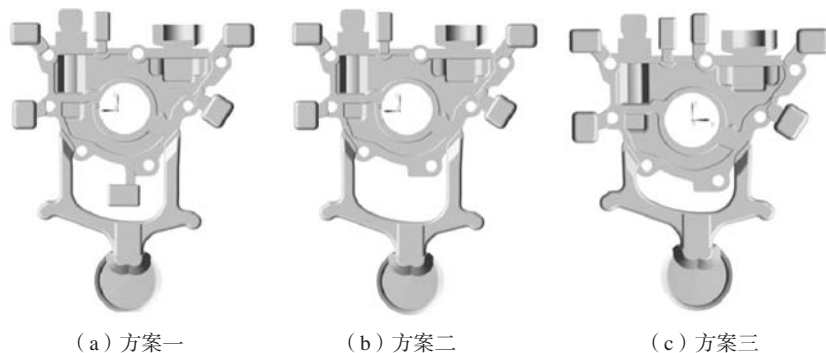


图2 机油泵浇注及溢流系统设计方案

Fig. 2 Design scheme of the oil pump casting and overflow system of the oil pump cover

1.2 压铸数值模型

压铸充型可将金属液看作不可压缩流体，其流动过程遵守质量和动量守恒定律。充型与凝固过程的控制方程为^[12]：

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial T} + \frac{\partial(\rho u_j \Phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial(D_\phi)}{\partial x} + S_\phi \quad (2)$$

式中： Φ 为通用向量； x_j 为坐标分量； u_j 为速度分量； T 为热力学温度； D_ϕ 为广义扩散系数； S_ϕ 为源项。

热传导采用傅里叶定律（Fourier）导热微分方程^[13]来描述：

$$\rho c_\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \quad (3)$$

计算对流传热用Newton冷却定律描述：

$$q = \alpha (T_f - T_w) \quad (4)$$

辐射传热遵循Stefen-Boltzman定律：

$$q = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (5)$$

式中： c_ρ 为定压比热容； λ 为热导率； Q 为热源项； α 为对流换热系数； T_f 为流体特征温度； T_w 为固体边界温度； T_s 为表面绝对温度； ε 为辐射黑度； σ 为Stefen-Boltzman常数。

1.3 压铸初始条件及边界条件

采用ProCAST的Visual-Mesh模块划分四面体网格，为了缩短计算时间，同时保证模拟精度，按照不同的网格密度分别对铸件与浇注、排溢系统划分网格，把料饼、浇道及铸件的网格尺寸划分为1 mm，压室网格2 mm，压铸模其他厚大部分网格为4 mm，整个铸件及模具的体网格数量为430万个。机油泵盖模拟计算初始条件及边界条件见表2。

表2 压铸初始条件及边界条件
Table 2 Initial conditions and boundary conditions of the die casting

初始条件	铸件与模具材料		边界条件	
	ADC12	H13钢		
液相线温度/°C	592	1 491	浇注温度/°C	650
固相线温度/°C	539	1 331	模具预热温度/°C	200
密度/(g·cm ⁻³)	2.72	7.8	冲头直径/mm	49.6
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	96.2	27.76	压射速度 V_2 /(m·s ⁻¹)	2
比热/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.965	0.46	充填速度 V_f /(m·s ⁻¹)	40
黏度/(Pa·s)	0.002	-	慢压时间 T /s	0.202
临界补缩固相率 f_{csf}	0.7	-	充填时间 T /s	0.02
结晶潜热/(J·g ⁻¹)	390	-	铸件与模具换热系数/(W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	1 500
金属液密度 ρ /(g·cm ⁻³)	2.5	-	模具间换热系数/(W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	1 000

2 模拟结果与讨论

2.1 充型过程分析

从压铸充型过程可以看出，3种方案压铸时金属液皆从两侧顺序流入型腔，见图3所示。对于方案一，当充型50%时，内浇道附近流速较快，金属液从两侧冲击型芯，左侧由于此时形状较为平整，金属液流动较平缓，右侧金属液从内浇道流入不远就受到凸起复杂部位的阻碍，局部形成紊流，容易造成裹气，凸起部位流速变慢。当充型70%时，两股金属液分别在上下两侧汇流，尤其是上侧顶部由于与金属液流动方向一致，金属液在此处被阻挡，模具受冲击比较大，但由于顶部设置了3个溢流槽，可以排出金属液，从而减小顶部受到的冲击，并排出夹杂物、气体；此时左右凸起部位均未充满，空腔处形成卷气。当充型90%时，可以看出，铸件右下角是最后充型区域，方案一在此处设置了溢流槽，此时铸件其余区域基本已充满，充型效果

较好。

从图3a可以看出，在圆形型芯的左右两侧以及内浇道附近，金属液的流动较快。为了加快铸件冷却，方案二去除了浇道内侧的溢流槽，充型过程与方案一基本一致。方案三缩短了支横浇道的长度，并在铸件顶部增加了一个溢流槽，与方案二对比，充型过程也相差不大，但对比充型70%与90%时的金属液流速，方案三流速较快区域比方案二大，说明缩短支横浇道长度确实起到了减少金属液流动能量损失的作用。对比3种浇注方案，总的来说方案三的设计较合理。

2.2 凝固过程分析

方案一、二、三的铸件完全凝固时间分别是9.96 s、9.61 s、9.56 s，方案三凝固最快，如图4，3种方案凝固5 s时情况基本一致，铸件的薄壁及远离内浇道位置先凝固，厚壁和靠近内浇道位置后凝固，溢流槽比铸件

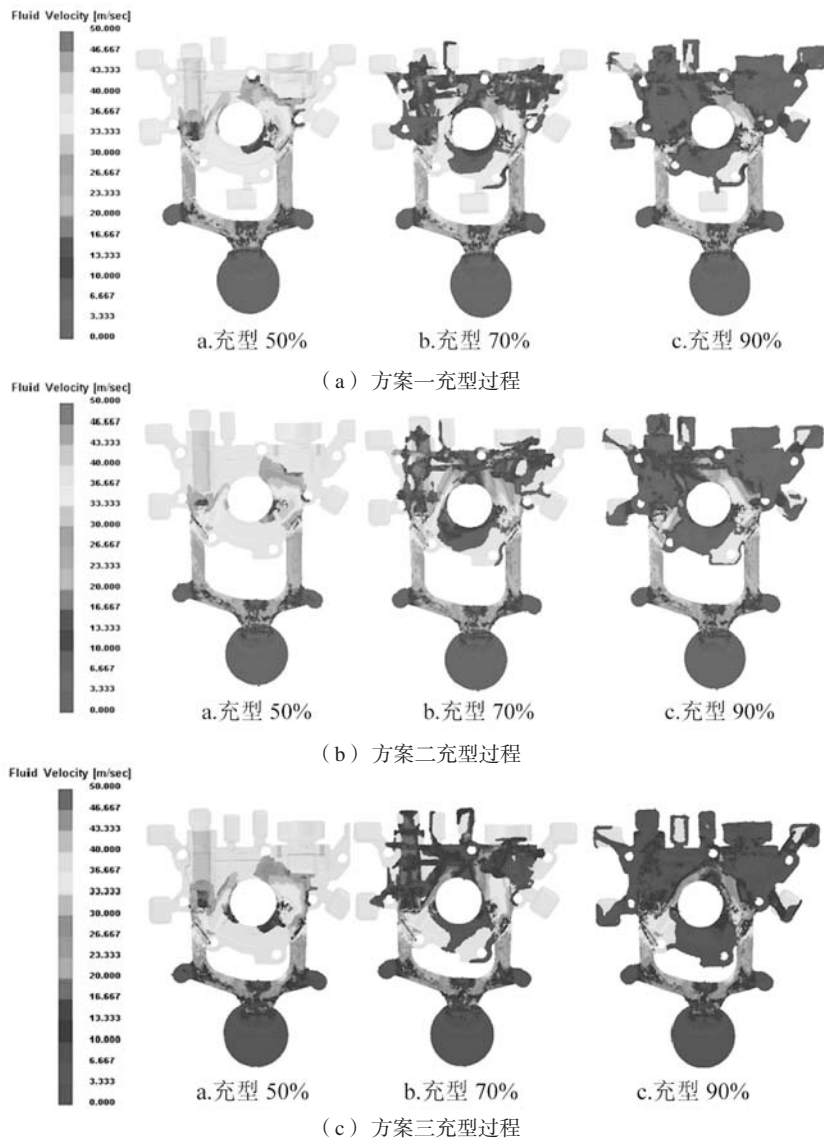


图3 不同方案的压铸充型过程流场速度

Fig. 3 Flow field velocities of the filling process of the die casting with different schemes

晚凝固，横浇道及余料最后凝固，浇注系统对铸件起到了补缩作用，如图4。铸件凝固过程中，局部区域由于补缩通道提前凝固，压力无法传递至铸件热节处，导致铸件热节处最终产生凝固收缩缺陷。若铸件热节处加强冷却（如采用点冷），则会避免或减小缩松缺陷。由图4可以看出，方案一、二的热节分布差别不大，方案二减少了一个溢流槽，减少了金属液浪费；方案三和方案二相比，内浇道长度较短，减少了金属液浪费，并且降低了金属液流动的温度、速度损失。

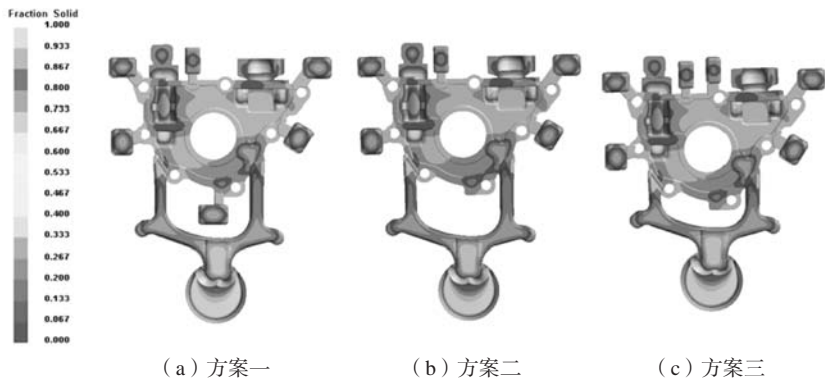
2.3 缩松缩孔分析

方案一、二浇注方案的缩松、缩孔分布基本一致，见图5所示。可以看出，缺陷主要分布在溢流槽与铸件较厚部位，对比图5a与5b，两内浇道之间的溢流

槽存在或取消，此处均无缩孔、缩松出现，可考虑此处不设置溢流槽。去除方案一中两内浇道之间的溢流槽有两个作用，一是可缩短内浇道，降低熔体压力和温度损失，二是可减少高温浇道附近的金属填充量，与浇注系统远端的金属实现基本顺序凝固，从而提高铸件整体冷却效率。方案三相比方案一、二，圈里面的缺陷更小，说明方案三顶部增加的渣包起到了一定的减少铸件内部缺陷的作用。

3 产品质量分析

通过对机油泵3种模具设计方案的充型、凝固、缩松和缩孔模拟结果的分析，发现方案三最合理，按照方案三开模，模具整体结构见图6a所示。压铸量产铸



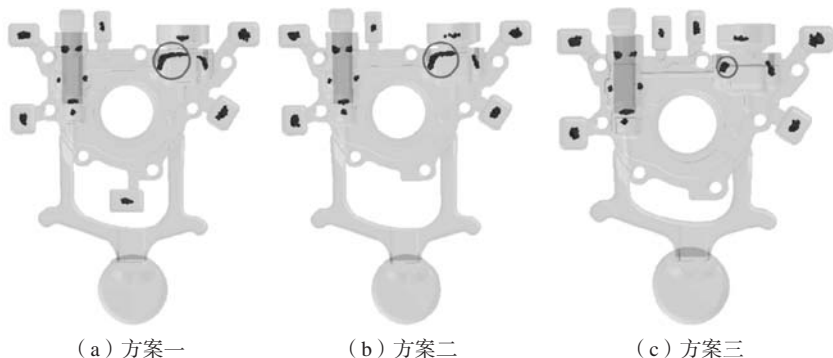
(a) 方案一

(b) 方案二

(c) 方案三

图4 不同方案凝固5 s

Fig. 4 Solidification of different schemes for 5 s



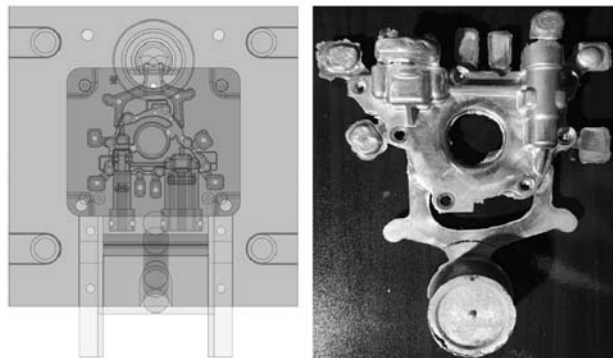
(a) 方案一

(b) 方案二

(c) 方案三

图5 不同压铸模方案缩松、缩孔预测结果

Fig. 5 Prediction results of the shrinkage porosity and shrinkage cavity of different die casting schemes



(a) 模具总体结构

(b) 压铸产品

图6 压铸模及压铸样品

Fig. 6 Die casting die and die casting sample

件（含浇注和溢流系统）如图6b所示。由图6b可以看出，铸件表面光洁，无流痕、裂纹、浇不足等缺陷。由此可见，采用方案三设计的浇注和溢流系统以及配套工艺参数对铸件表面质量来说是有保障的。该设计方案已在重庆德运模具制造有限公司量产。

为确保泵盖铸件不渗漏，对铸件内部进行X光探伤，如图7所示。与缩松、缩孔仿真结果（图5中的方案3）进行比较，可以看出，整个铸件（含溢流槽）缩孔、缩松位置与仿真预测结果基本是一致的。铸件区

域探测到2处内部微孔缺陷，见图中A、B部位。根据图1c的铸件壁厚分析，A、B两处正好是铸件最大壁厚位置之一，此区域尽管设置了容积较大的溢流槽，但未完全将缩孔转移到该集渣包中，但是A、B两处微小的缩孔处于铸件外侧且靠近渣包，说明渣包对铸件起到了一定的顺序凝固作用。需要指出的是，这两个微孔出现的地方是铸件装配面，且位于铸件外侧，对机油泵盖密封性没有影响。D、E两处缩松都位于渣包之中，说明这两处渣包起到了转移铸件缩松到渣包的作用。

根据充型仿真分析，图7中铸件C处是金属液最后充填部位，也是两股液流汇聚的区域，不仅容易形成卷气，还可能产生冷隔，但X-Ray检测未发现孔洞和裂纹缺陷，说明铸件C位置不设溢流槽的模具设计及相应工艺参数的选择是合理的。

为了分析机油泵盖的显微组织，从机油泵盖铸件壁厚最大部位A处及最后充型区域C处取样，在金相显微镜下观察，如图8a、b所示。壁厚最大的A处晶粒较粗大且组织不均匀，存在小而分散的缩松缺陷，组织主要由块状的 α -Al相及针状的共晶Si相。由于 α 相与Si相间分布有因凝固收缩形成的微观缩松，且针状的共晶Si强度与塑性都很低，A处组织的力学性能较差。考虑到

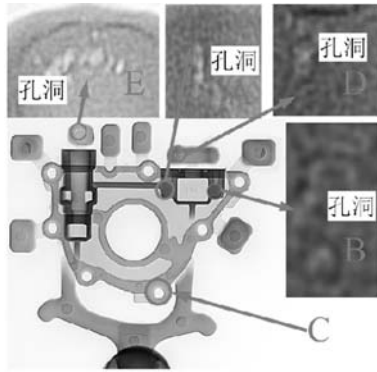
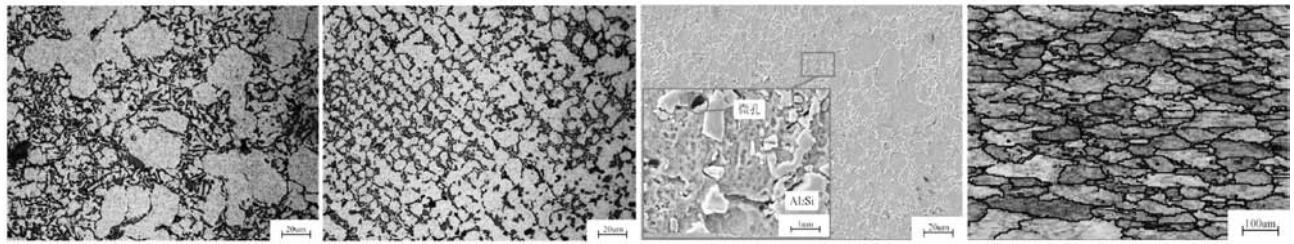


图7 X光整体探伤结果

Fig. 7 Results of the X-ray global flaw detection

此处是铸件厚壁区，组织内部微小的缩松缺陷不会影响机油泵盖的密封性，缩松是可以接受的。

比较而言，铸件壁厚较小的C处晶粒细小、组织分布均匀，无明显缺陷，这与方案3的凝固结果相互印证。铸件C处壁薄、且是由充型末端的金属填充，凝固速度最快，所以C处的晶粒最细小、分布也均匀。图8c是铸件C处样本的同倍扫描电镜（SEM）组织，将框选区进一步放大，可以更清晰地看到组织内部也有两处孔，但整体来说晶粒较细小，该处存在 α -Al基体与片状 Al_2Si 共晶体。图8d是铸件C处组织的背散射衍射（EBSD）的结果，显示的是C区域的晶粒形貌，可以看出，该处晶粒细小且晶粒大小均匀，经与国标GB/T



(a) 铸件A处截面光镜组织

(b) 铸件C处截面光镜组织

(c) 铸件C处扫描电镜组织

(d) 铸件C处晶粒形貌

图8 机油泵盖的金相、SEM及晶粒形貌

Fig. 8 Metallography, SEM and grain morphology of the oil pump cover

6394—2017比较，可确定晶粒度为4级。

从铸件C处取样进行拉伸试验，用扫描电镜观察拉伸试样断口，形貌如图9所示。可以看出，断口表面较粗糙，断面存在大量解理平面及撕裂棱，解理面较小，还有少量韧窝，具有解理断裂与韧性断裂的混合断裂特征，属于准解理断裂，符合ADC12铝合金韧性较低的特性。

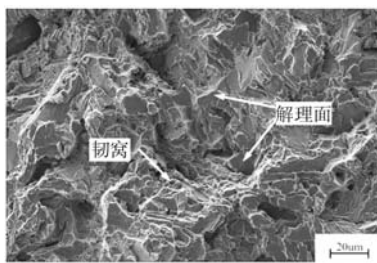


图9 铸件断口形貌

Fig. 9 The fracture morphology of the casting

在铸件的厚壁处A与薄壁处C各取5点样做显微硬度测试，结果见图10。厚壁A处的平均显微硬度为HV94.2，薄壁C处平均显微硬度为HV101.6，ADC12铝合金泵盖硬度要求不低于HV85，故机油泵盖压铸件硬度满足产品要求。

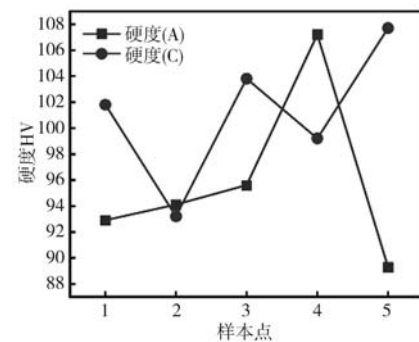


图10 A、C区域不同位置处的显微硬度

Fig. 10 Microhardness at different locations in areas A and C

4 结论

(1) 压铸充型凝固过程仿真发现，浇注及溢流系统设计方案三相较于方案一和二，通过消除内浇道内侧的渣包，缩短内浇道长度，减少了金属液流动能量损失，铸件实现了顺序凝固，最为合理。

(2) 采用方案三压铸，铸件表面质量好，内部探伤未发现重要区域存在孔洞和裂纹，装配位置两处微小缩孔缺陷对机油泵盖的密闭性无影响。组织分析发现，铸件薄壁区域组织致密、晶粒细小且分布均匀，晶粒度可达4级。

(3) 铸件薄壁位置断口属于准解理断裂，厚壁和

薄壁平均硬度分别可达HV94.2和HV101.6, 硬度满足泵盖硬度要求。采用浇注与溢流系统设计方案三可生产

出合格压铸件, 表明基于理论和经验设计的压铸模具经仿真分析验证可极大提高设计效率。

参考文献:

- [1] 樊振中, 袁文全, 王端志, 等. 压铸铝合金研究现状与未来发展趋势 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 159-166.
- [2] 周涛, 龚海军, 李欢, 等. 铝合金凸轴轮盖压铸模浇注系统设计 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40 (11): 1244-1248.
- [3] 吴跃翔, 苏小平. 铝合金变速器壳体压铸工艺设计及优化 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 311-315.
- [4] 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.
- [5] 李平, 魏建华, 李锋军, 等. 基于CAE分析的铝合金基座压铸工艺优化设计 [J]. 铸造, 2018, 67 (5): 420-423.
- [6] 朱洪军. 基于正交试验及数值模拟的下缸体压铸工艺优化 [J]. 铸造, 2021, 70 (6): 670-674.
- [7] 李宏杰, 张君, 王保华. ADC12-0.15V0.03In铝合金箱盖的压铸工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (13): 83-86.
- [8] 吴星, 宋伟奇. 基于CAD/CAM的计价器上下盖压铸模具设计与数控加工 [J]. 铸造, 2019, 68 (12): 1387-1393.
- [9] ZHANG Yu-xi. The calculation and adjusting of die-casting parameters of car pump cover [M]. Mechatronics and Industrial Informatics, Applied Mechanics and Materials Vols. 2013, 179-183, 321-324.
- [10] 汤文卓, 米国发, 王凯, 等. ES8B2上盖压铸工艺设计及数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (3): 271-275.
- [11] 李宪军, 黄继战. ZL102合金泵盖压铸模优化设计 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (3): 274-276.
- [12] 周香, 丁林. 基于ProCAST的铝合金连接套压铸模具及工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (8): 822-825.
- [13] 曹岩, 张浩, 石亚茹, 等. 基于ProCAST的薄壁叶片熔模精铸过程模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (11): 1226-1229.

Simulation and Optimization Design of Pouring and Overflow System for Die Casting Mold of Aluminum Alloy Oil Pump Cover

SONG Peng¹, GONG Hai-jun¹, PENG Jun², SHU Ji-ping¹, GAO Zheng-yuan¹

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Deyun Mould Manufacturing Co., Ltd., Chongqing 402260, China)

Abstract:

In order to produce an automobile engine oil pump cover efficiently and with high quality, three kinds of theoretically feasible pouring and overflow systems were designed according to the characteristics of the pump cover parts and based on the die-casting theory and experience. Then ProCAST software was used to simulate the filling and solidification process of the casting. It was found that the top of the casting was prone to air entrainment during mold filling process simulation, so an optimized scheme was proposed to add an overflow tank here. Casting solidification simulation showed that eliminating the overflow groove inside the sprue and shortening the length of the inner sprue had no effects on the distribution of shrinkage cavity and porosity of the casting, and could also improve the heat dissipation of the casting inside the sprue and reduce the energy loss of metal liquid flow. The casting and overflow system of scheme 3 reduced the air entrainment. X-ray flaw detection showed that there were no shrinkages in the important positions of the casting. Metallographic analysis showed that the structure of each part of the casting was compact, the grain size was 4, and the microhardness was more than HV 85, which met the requirements of the product. The die design method optimized based on die casting theory and experience combined with ProCAST simulation analysis is convenient and efficient, which provides a useful reference for die design of the die casting.

Key words:

aluminum alloy pump cover; die casting mold; pouring system; overflow system; ProCAST simulation
