

基于正交试验冷却器盖压铸工艺设计与模拟优化

王顺程¹ 沈黎¹ 马勇²

(1. 重庆科技大学机械与智能制造学院, 重庆 401331; 2. 重庆勤光机械制造有限公司, 重庆 402760)

摘要 以某汽车铝合金冷却器盖为研究对象, 将数值模拟与正交试验法相结合, 对其进行压铸工艺设计及优化。首先对该铸件进行工艺分析, 根据其结构特点设计浇注系统和排溢系统, 并对冷却系统进行工艺优化。设计正交试验方案并对其分别进行数值模拟。根据试验结果得到优化工艺参数: 浇注温度为 680 °C, 模具预热温度为 180 °C, 压射速度为 3 m/s。再对优化工艺参数方案进行冷却系统优化。最后用优化后的工艺方案进行产品试制和检测, 得到的铸件外观完整, X 射线探伤结果显示无明显缩孔缩松, 满足使用要求。

关键词 铝合金; 冷却器盖; 压铸; 数值模拟; 正交试验

中图分类号 TG249.2; TP311; TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240343

Design Simulation and Optimization of Die-casting Process for Cooler Cover Based on Orthogonal Test

WANG Shuncheng¹, SHEN Li¹, MA Yong²

(1. School of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331; 2. Chongqing Qinguang Machinery Manufacturing Co., Ltd., Chongqing 402760)

Abstract: The die-casting process design and optimization were carried out for an automobile aluminum alloy cooler cover by combination of simulation and orthogonal testing. Firstly, the casting process was analyzed, and the pouring system and overflow system were designed according to its structural characteristics, meanwhile the processing optimization of cooling system was performed. Orthogonal test was designed and numerical simulation was conducted. According to the results of the experiment, the optimal process parameters were presented as follows: pouring temperature of 680 °C, mold preheating temperature of 180 °C, injection speed of 3 m/s. Then, optimization of cooling system was carried out based on the optimized processing parameters. Finally, the optimized process plan was applied for product trial production and testing, and the casting appearance was complete. X-ray flaw results indicate that there exists absence obvious shrinkage and porosities, meeting the usage requirements.

Key Words: Aluminum Alloy, Cooler Cover, Die Casting, Numerical Simulation, Orthogonal Test

近年来对汽车的要求逐渐趋于高性能、低污染、低能耗等指标, 而汽车质量对燃料经济性又起着决定性作用, 故轻量化设计已成为汽车设计的重要指标^[1-4]。由于高压压铸技术的发展, 又因铝合金具有强度高、密度低、耐腐蚀和易于回收等特点, 压铸铝合金在汽车中的应用大幅增加。压铸铝合金制品在汽车用铝中的占比已达 54%~70%^[5-9]。在压铸生产过程中, 金属液在高压作用下, 以极高的速度充填型腔, 使得铸件容易出现气孔、缩孔、缩松等缺陷, 影响铸件品质甚至导致报废。

冷却器盖是汽车冷却系统中重要的组成部分, 要求有良好的密封性和一定的强度来应对汽车在运行过程中不同程度的车身振动, 材质一般为铝合金。本研

究基于 AnyCasting 软件, 对冷却器盖压铸过程中的充型和凝固过程进行数值模拟, 并通过正交试验优化压铸工艺参数, 改善压铸过程中产生的缺陷, 最后进行产品试制, 旨在为实际生产提供参考。

1 冷却器盖工艺分析及浇排系统设计

1.1 冷却器盖工艺分析

研究的汽车冷却器盖铸件, 材质为 ADC12 铝合金, 其化学成分见表 1。

使用 UG 软件创建冷却器盖三维模型, 见图 1。该铸件最大轮廓尺寸为 296 mm×223 mm×175 mm, 最

收稿日期: 2024-08-25; 修订日期: 2024-09-26

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项资助项目 (CSTB2025TIAD—9ykjggX0463)

第一作者简介: 王顺程, 男, 1998 年出生, 硕士研究生, E-mail: 1114210656@qq.com

引用格式: 王顺程, 沈黎, 马勇. 基于正交试验冷却器盖压铸工艺设计与模拟优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1291-1296.

WANG S C, SHEN L, MA Y. Design simulation and optimization of die-casting process for cooler cover based on orthogonal test[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1291-1296.

表 1 ADC12 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ADC12 aluminum alloy %

w_B							
Si	Cu	Fe	Zn	Mn	Mg	Pb	Al
10.6	1.6	0.9	0.9	0.2	0.2	0.1	余量

大壁厚为 19.88 mm, 平均壁厚为 5.71 mm, 体积为 1 163.22 cm³, 质量为 3.14 kg。该铸件属于壳体类零件, 结构不规则, 壁厚不均匀, 腔道较多且铸件多处内凹, 整体形状复杂。经过计算锁模力, 使用 DCC900 冷室压铸机生产。

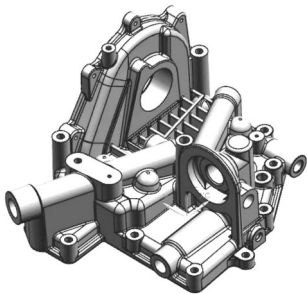


图 1 汽车冷却器盖铸件三维图
Fig.1 3D diagram of cooler cover

1.2 浇排系统设计

浇注系统对金属液的流动方向、排气条件、模具的热分布、压力传递、充填时间和内浇口处的金属液流速起着重要的作用^[10]。该铸件为壳体, 整体形状复杂、壁厚不均匀, 成形难度较大。浇排系统布置见图 2。为保证铸件内部品质, 采用扇形浇道系统, 设置 5 处横浇道。根据铸件结构, 内浇口选择侧浇口。铸件底部形状复杂, 存在多处通孔, 两垂直面之间设有加强筋, 单一浇口会出现多处死角, 易产生缺陷, 故在铸件底部布置 5 处侧浇口, 利于壳体铸件主体充型且后续去除浇口方便。靠近铸件壳体中部位置存在 3 处相交的腔道, 存在死角, 属于难充型位置, 为防止出现缺陷, 在此部位腔道端口设置 1 个内浇口。排溢系统与浇注系统在整个

型腔充填过程中属于一个整体, 排溢系统由溢流槽和排气槽两部分组成^[10]。由图 2 可知, 本次研究未设置排气槽, 是由于压铸件等限制因素, 转而设置多处溢流槽来进行替代。溢流槽设置在 5 处侧抽机构端面上, 这些部位多为型腔深处金属液最后填充位置, 存在死角且金属液在这些部位汇流。溢流槽的设置, 能够很好地排出进入型腔的气体、夹杂物、涂料残渣以及冷污金属等, 以保证铸件质量、消除铸件部分缺陷^[11-13]。

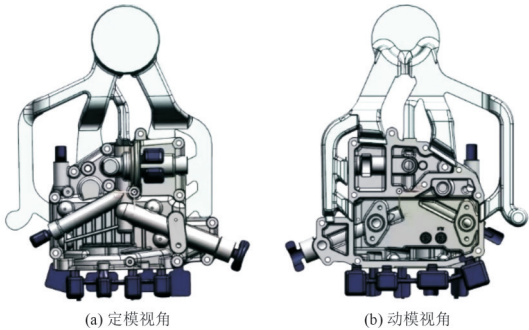


图 2 汽车冷却器盖铸件浇排系统位置

Fig.2 Location of pouring and overflow system of cooler cover

2 压铸过程模拟及工艺优化

2.1 预处理

使用 UG 软件建立铸件及浇排系统的三维模型, 并导入 AnyCasting 软件。对铸件进行网格划分, 划分后共有 50 084 892 个网格。铸件材质为 ADC12 合金, 模具材质为 H13 钢。

金属液与模具之间的传热系数为 0.15 W/(cm²·K), 模具与冷却水道之间的传热系数为 0.40 W/(cm²·K), 模具与环境之间的传热系数为 0.001 W/(cm²·K)。高压压铸时室温温度为 25 ℃, 浇注温度为 640 ℃, 模具预热温度为 200 ℃, 低压射速度为 0.3 m/s, 高压射速度为 4 m/s。

2.2 充型过程、凝固过程及缺陷分析

(1) 充型过程分析 铸件充型顺序见图 3。可以看

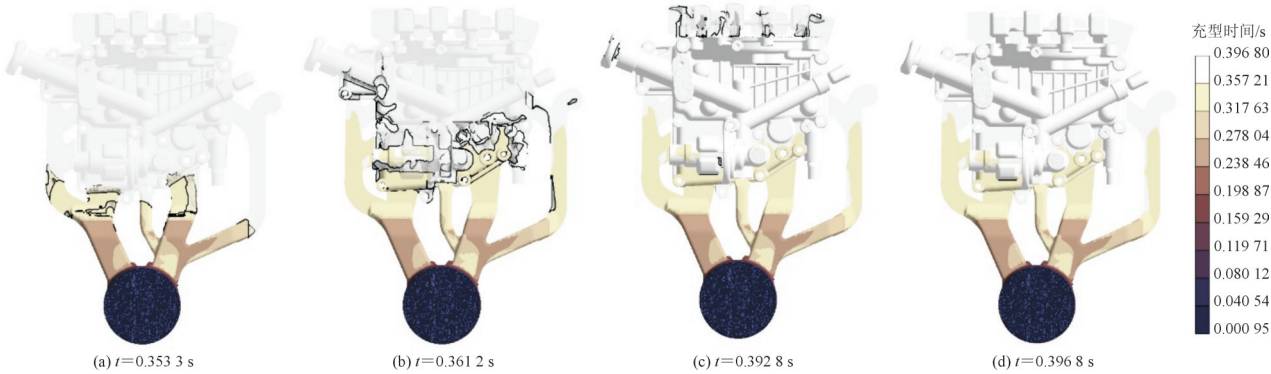


图 3 汽车冷却器盖充型顺序图
Fig.3 Filling sequence diagram of cooler cover

出,整个充型过程所用时间为0.396 8 s,低速压射时间共0.353 3 s,高速压射时间共0.043 5 s。低速充型阶段,压射速度为0.3 m/s,是为了防止金属液从加料口溅出,同时使压室内的空气有充分的时间溢出。 $t=0.353\ 3\text{ s}$ 时,金属液到达距横浇道最近的内浇口,从型腔底部开始充型,此时低速压射结束,高速压射开始。 $t=0.361\ 2\text{ s}$ 时,其余金属液到达距横浇道最远的内浇口,从型腔两侧开始充型,避免金属液因温度降低而流动性变差导致缺陷产生。高速压射使金属液通过内浇口后迅速充满型腔,并出现压力峰,将铸件压实,消除或减小缩孔、缩松等缺陷。 $t=0.392\ 8\text{ s}$ 时,金属液充满整个型腔,多余金属液开始进入溢流槽。 $t=0.396\ 8\text{ s}$ 时,充型结束。

(2)凝固过程分析 铸件凝固场见图4,整个凝固过程所用时间为106.047 2 s。 $t=2.743\ 3\text{ s}$ 时,铸件从

溢流槽、加强筋、横浇道以及铸件四周等边缘部位开始凝固,因为这些部位热量分散,与模具型腔壁直接接触,将热量快速传递给模具。 $t=9.068\ 0\text{ s}$ 时,铸件外部主体、内浇口以及横浇道等部位已经凝固完成,铸件内部以及结构复杂等部位壁厚大,热量较为集中,所以散热慢,还未凝固。 $t=21.717\ 5\text{ s}$ 时,型腔内的铸件已全部凝固完成,由于料饼紧靠压铸机压室冲头高温部位,所以散热最慢、凝固时间最长。 $t=106.047\ 2\text{ s}$ 时,包括料饼在内的铸件整体全部凝固完成。从凝固过程可以看出,铸件外部壳体和内浇口凝固完成时,铸件内部结构复杂部位还未凝固,导致保压过程中压力无法传递,无法补缩,从而出现缩孔、缩松等缺陷,需进行工艺优化来加快铸件内部结构复杂部位的凝固速度。

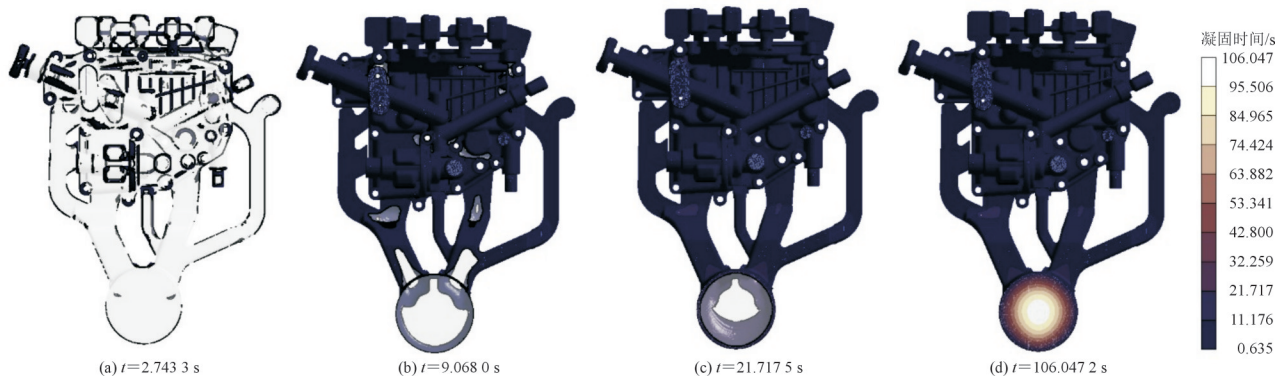


图4 汽车冷却器盖铸件凝固顺序图

Fig.4 Solidification sequence diagram of cooler cover

(3)卷气缺陷分析 铸件卷气缺陷见图5,采用反向云图对铸件卷气顺序进行分析。可以看出, $t=0.352\ 3\text{ s}$ 时,横浇道开始有卷气发生,浇道部位不影响铸件质量。 $t=0.379\ 8\text{ s}$ 时,铸件部分壳体端口处发生卷气,这

些部位靠近或连接溢流槽,对铸件整体质量不产生明显影响。 $t=0.391\ 5\text{ s}$ 时,卷气发生在顶部溢流槽分布位置。通过卷气顺序,分析浇注过程中型腔排气情况,可知卷气对该铸件成形质量影响较小,满足要求。

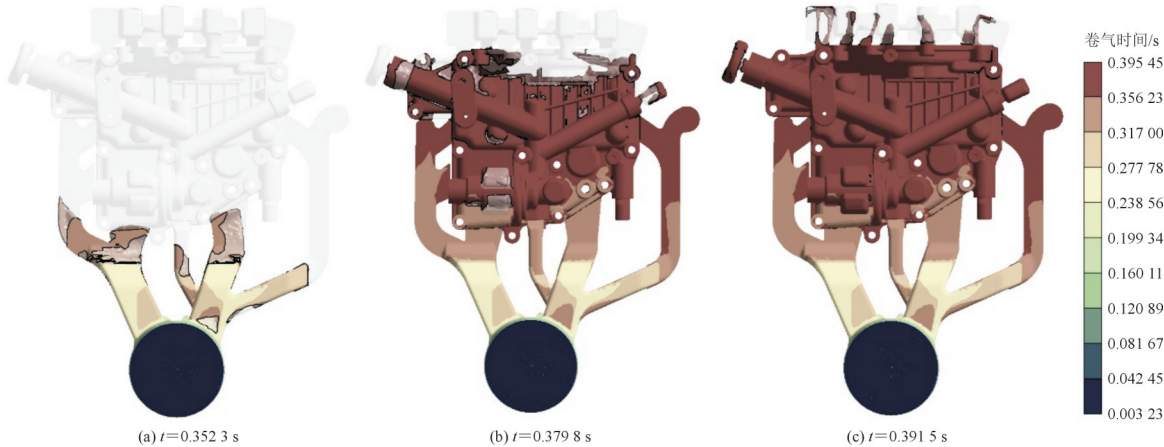


图5 汽车冷却器盖铸件卷气缺陷分析

Fig.5 Gas-entrapment analysis of cooler cover

(4)缺陷分析 缺陷分析见图6。使用AnyCasting软件中的概率缺陷参数模块,采用残余熔体模数法对铸件外部和内部进行缩孔、缩松等缺陷分析。激活剖

面,观察铸件内部,可见铸件内部存在高亮区域,高亮区域为缩孔、缩松等缺陷出现部位。可见缺陷多分布在铸件内部拐角、加强筋、抽芯等结构复杂、壁厚较大

的部位。通过缺陷分析,知晓料饼、溢流槽等处的缺陷对铸件整体结构没有影响,属于多余部分。可以进行

加工切除。针对铸件内部缺陷,需后续进行工艺优化。

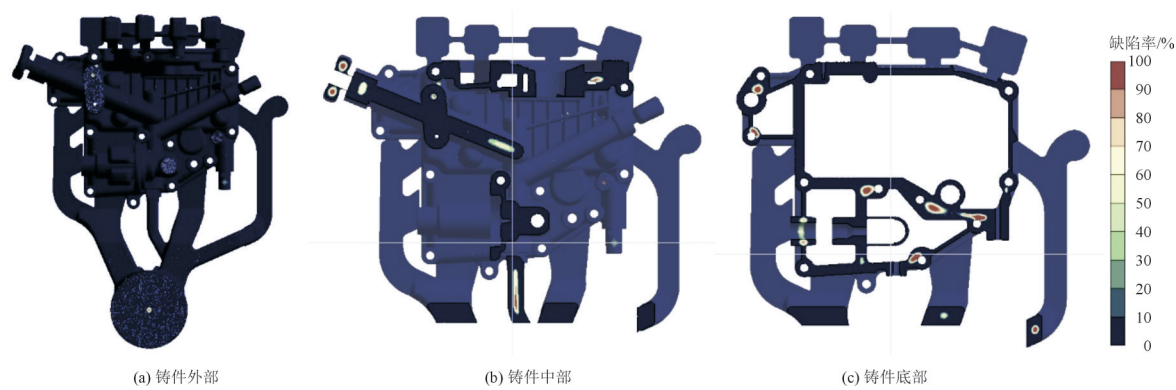


图6 铸件不同位置的缺陷分析图

Fig.6 Defect analysis of cooler cover at different positions

(5)冷却系统优化及优化结果 根据上述数值模拟结果,针对铸件内部出现的缩孔等缺陷,对其进行冷却系统优化。在缺陷产生的位置,排布冷却水道,加快该区域的冷却速度,改善铸件凝固顺序,避免或改善缩孔、缩松等因凝固速度、凝固顺序而产生的缺陷。利用UG软件对冷却水路进行3D建模并导入AnyCasting软件,设置管道入口水温为25℃,出口水温为70℃。铸件冷却系统见图7。图8为优化后的缺陷分析图。通过与图6进行对比可以发现,在图8b铸件中部左侧侧抽底部位置缺陷明显缩小,图8c铸件底

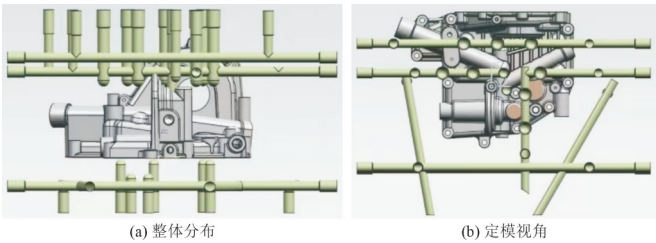


图7 铸件冷却系统分布

Fig.7 Cooling system distribution

部中大部分位于铸件壳体的缺陷被消除,小部分缺陷存在于靠近内浇口的位置,可通过调整工艺参数来进行进一步优化。

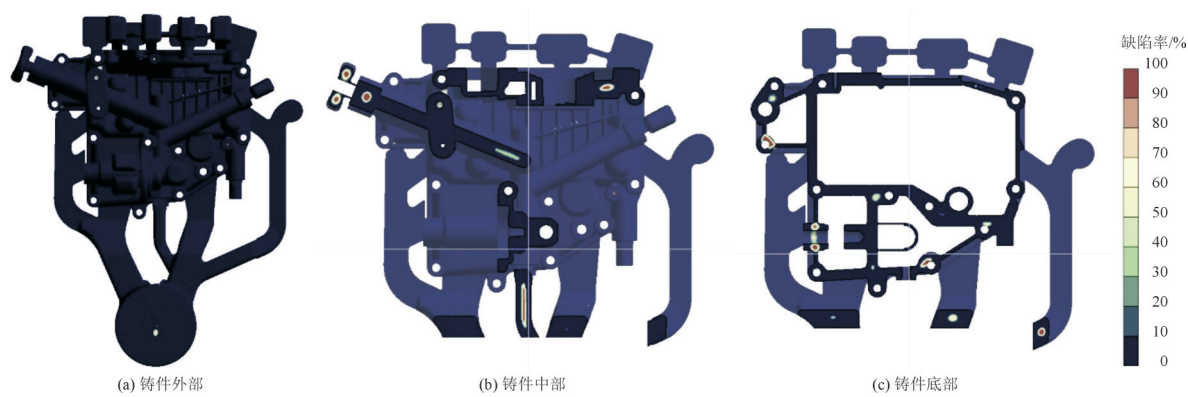


图8 优化后的铸件缺陷分析图

Fig.8 Optimized defect analysis of cooler cover

3 正交试验设计及结果分析

3.1 正交试验设计

试验取浇注温度、模具预热温度和压射速度作为正交试验中的因素,设计了正交试验的因素水平表,见表2。正交试验设计为3因素3水平,使用 $L_9(3^3)$ 正交表。通过AnyCasting软件进行模拟分析,并使用软件中定量分析模块计算得出铸件缩孔体积,将其作为评

价指标,表3为正交试验结果。

表2 正交因素水平表

Tab.2 Orthogonal factor levels

水平	因素		
	浇注温度 (A)/℃	模具预热温度 (B)/℃	压射速度(C)/ (m·s ⁻¹)
1	640	180	3
2	660	200	4
3	680	220	5

表3 正交试验方案及结果表

Tab.3 Orthogonal test scheme and results

序号	A/℃	B/℃	C/(m·s ⁻¹)	缩孔体积/cm ³
1	640	180	3	1.857 6
2	640	200	4	2.118 9
3	640	220	5	2.360 9
4	660	180	4	1.835 5
5	660	200	5	2.037 6
6	660	220	3	2.344 3
7	680	180	5	1.874 1
8	680	200	3	2.007 9
9	680	220	4	2.409 6

3.2 试验结果分析

为了确定3个因素对缩孔体积的影响,对模拟结果进行分析,作缩孔体积极差分析表,见表4。

表4 缩孔体积极差分析表

Tab.4 Range analysis for shrinkage volume

因素	缩孔体积/cm ³		
	A	B	C
均值1	2.112 5	1.855 7	2.069 9
均值2	2.072 5	2.054 8	2.121 3
均值3	2.097 2	2.371 6	2.090 9
极差R	0.040 0	0.515 9	0.051 4

由表4可知,3个因素对铸件缩孔体积的影响程度大小为:模具预热温度>压射速度>浇注温度。模具预热温度对铸件缩孔体积影响最为明显,浇注温度和压射速度对缩孔体积的影响较小。图9为工艺参数对缩孔体积均值的主效应图。可以看出,当浇注温度为660℃,模具预热温度为180℃,压射速度为3 m/s时,铸件的缩孔体积最小。

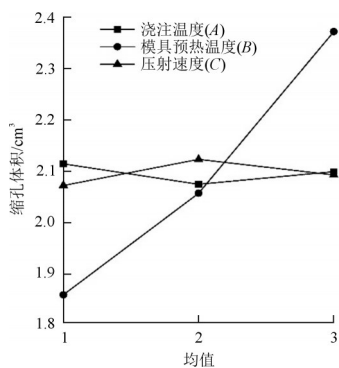


图9 工艺参数对缩孔体积均值的主效应图

Fig.9 Main effect of process parameters on the mean value of shrinkage volume

综上所述,浇注温度对缩孔体积影响较弱,考虑到该铸件结构的复杂度和充型过程中金属液的流动性,故选取合适范围内较高的浇注温度。本研究采取浇注温度为680℃。压射速度对缩孔体积影响较弱,而压射速度过大,会增加充型过程中发生卷气的概率,故采用

压射速度为3 m/s。模具预热温度对缩孔体积影响最为明显,故采用模具预热温度为180℃。因此优化工艺参数:浇注温度为680℃,模具预热温度为180℃,压射速度为3 m/s。

4 生产验证

为了进一步验证优化后的压铸工艺方案和模具结构是可行的,试生产使用力劲DCC900压铸机,浇注温度为680℃,模具预热温度为180℃,压射速度为3 m/s,对产品进行试制。试制铸件实物图见图10。从图10a可见铸件品质良好,无表面缺陷产生。使用X射线探伤机对铸件内部结构进行检测,结果见图10b,可见铸件内部无明显缩孔、缩松缺陷,铸件品质满足生产要求。



(a) 铸件实物

(b) X射线检测

图10 铸件实物图和X射线检测图

Fig.10 Entity of casting and X-ray inspection

5 结论

(1)对冷却器盖铸件进行工艺分析,分析其结构特点,并使用UG软件建立铸件三维图和压铸模具设计。

(2)设计正交试验,选取浇注温度、模具预热温度和压射速度作为正交试验中的因素,通过数值模拟进行9组试验,并采用缩孔体积作为评定标准,得到优化工艺参数:浇注温度为680℃,模具预热温度为180℃,压射速度为3 m/s。

(3)采用优化方案对产品进行试制,并使用X射线对试制的产品进行检验,结果显示产品品质良好。

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] 陈建华,秦国利. 汽车零部件用ADC12-0.25Ti铝合金的组织及铸造性能研究[J]. 热加工工艺,2023,52(1):71-73.
- [3] 项文杰,佟志国. 铝合金压铸件设计要点[J]. 科技质讯,2017(27):102-104.
- [4] 董显明,蹇超. 铝合金压铸标准现状及展望[J]. 铸造,2017,66(10):1122-1124.
- [5] 刘云志,曹帅兵. 浅析汽车压铸及铸造铝合金研究[J]. 建筑机械,2018(7):941.