

铝合金水冷板压铸过程数值模拟研究及工艺优化

孙郑康¹, 刘小芳¹, 高明强¹, 张宁豪¹, 廖平清², 李 磊²

(1. 安徽工业大学能源与环境学院, 安徽马鞍山 243000;

2. 中电泰日升马鞍山科技有限公司, 安徽马鞍山 243000)

摘要: 采用ProCAST软件对铝合金水冷板压铸过程进行数值模拟, 通过分析压铸的充型过程、凝固过程以及缺陷出现的位置和原因, 针对水冷板压铸过程中出现的卷气、缩孔等问题, 对模具结构进行改进, 并用正交试验对工艺参数进行优化。结果显示, 改进优化后最佳的压铸工艺参数: 浇注温度660 ℃、模具温度190 ℃、压射速度4 m/s, 对改进优化后的工艺方案进行实际生产试制和检测, 铸件缺陷问题得到解决, 对水冷板实际生产具有指导意义。

关键词: 铝合金; 水冷板; 数值模拟; 工艺; 正交试验

近些年, 随着科学技术的快速发展, 全球能源及环境问题日益严重, 汽车在能源消耗以及环境污染方面的问题日益突出, 汽车节能减排成为治理环境及减少能源消耗的重要方向, 而汽车实现节能减排最有效的方法就是汽车轻量化^[1-2]。汽车轻量化的主要方向就是材料减重, 通过压铸铝合金铸件代替传统的铸铁件, 可以有效地减轻汽车30%的质量, 实现汽车轻量化目标, 达到节能减排的目的^[3-4]。目前, 汽车的铝合金零件多数都是采用高压压铸进行生产, 但在高压压铸过程中由于速度快和压力大, 空气会混入铝液内部, 使得压铸件在成形过程中容易出现气孔、缩孔和缩松等缺陷, 导致产品性能下降甚至报废^[5]。

压铸过程数值模拟软件是建立在多学科交叉基础上, 结合流体力学、传热学和应力学等多个领域知识, 可以有效计算出金属液在铸造过程中的流动、凝固和应力等情况, 预测出铸造产生的缺陷问题^[6-7]。铝合金水冷板是汽车上重要的散热零件, 要求水冷板组织致密、无气孔、缩孔和缩松等缺陷, 确保汽车零件接触紧密, 从而得到最好的散热效果^[8]。本论文采用ProCAST软件对铝合金水冷板铸件的压铸过程进行数值模拟, 预测出在实际压铸生产中, 水冷板水嘴口处内部和部分扰流柱会产生气孔缺陷, 缺陷产生的原因是这些区域出现铝液回流现象, 内部气体无法排除。针对缺陷问题, 对水冷板水嘴口处的模具结构进行优化, 保证铝液内部气体有效排除, 并采用正交试验方案对浇注温度、模具温度及压射速度等工艺参数进行分析及优化, 得到最优的工艺参数, 可为水冷板实际生产应用提供技术指导。

1 产品介绍与浇注系统的设计

压铸产品为汽车的水冷板, 选用的材料为AlSi10Mg (Fe) 铝合金, 图1是压铸产品的三维结构图, 表1为材料的化学成分。水冷板的外形尺寸为228 mm × 221 mm × 32 mm, 形状相对复杂, 壁厚分布不均, 平均壁厚为3.44 mm, 最大壁厚为12.11 mm, 最小壁厚为0.4 mm, 质量为0.925 kg。

根据铸件的结构特征, 浇注系统设计采用多浇道方案, 便于去除浇道, 缩短浇注时间, 提高铸件的质量。浇注系统的内浇道面积为282 mm², 厚度为2 mm。横浇道

作者简介:

孙 郑 康 (1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为铝合金成形工艺。E-mail: sunzhengkang1999@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)

04-0522-07

收稿日期:

2024-12-13 收到初稿,
2025-02-11 收到修订稿。

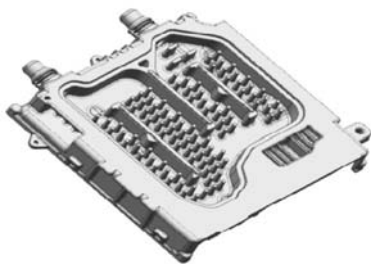


图1 铸件的三维结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure diagram of the castings

采用扇形，截面呈梯形，主要是为了改善金属液的流动，保持浇道内的压力传递，减少金属液流动过程中产生的卷气^[9]。在金属液最后充填的部位以及壁厚的位置设置排溢系统，有利于型腔内气体排出以及冷料的收集。图2为浇注系统的三维示意图。

2 数值模拟与结果分析

2.1 网格划分

将水冷板的三维图导进ProCAST模拟软件中，

表1 AlSi10Mg (Fe) 铝合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of the AlSi10Mg (Fe) aluminum alloy

 $w_B / \%$

Fe	Si	Mn	Ni	Cu	Ti	Zn	Mg	Al
≤1	9~11	≤0.55	≤0.15	≤0.1	≤0.2	≤.15	0.2~0.45	余量

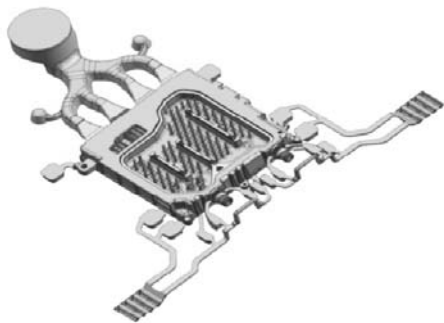


图2 浇注系统的三维示意图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of the pouring system

2.2 压铸工艺参数的设置

压铸方式选择高压压铸，铸件材料选择AlSi10Mg (Fe) 合金，模具材料选择H-13钢，铸件的浇注温度为660 ℃，模具温度为200 ℃，压射速度为4.5 m/s，铸件和模具的换热系数设置为1000 W/(m²·K)，模具外表面的冷却方式设置成空冷。

2.3 充型过程分析

图3是铸件的充型过程。由图可知，当充型达到40%时，中间两支横浇道的金属液已经通过内浇道开始填充铸件的型腔，而两边横浇道的金属液刚抵达内浇道处。当充型达到60%时，型腔右侧结构较为平顺，所以右侧的金属液填充快，金属液已经到达铸件的末端，并且金属液开始向左右两端开始填充，使中间型腔形成了许多未填充空白区域，可能会产生卷气现象。当充型达到80%时，铸件的末端已经完全填充，中间和左下侧型腔尚未完成填充，中间型腔内出现被金属液包裹的闭合区域，导致该区域的气体难以排

使用ProCAST中的mesh模块对水冷板进行面网格的划分，采用1 mm的网格尺寸对水冷板进行划分，采用2 mm的网格尺寸对浇注系统和排溢系统进行划分，采用20 mm的网格尺寸对模具进行划分。铸件进行网格划分后的单元格数量为11 828 419个^[6]。

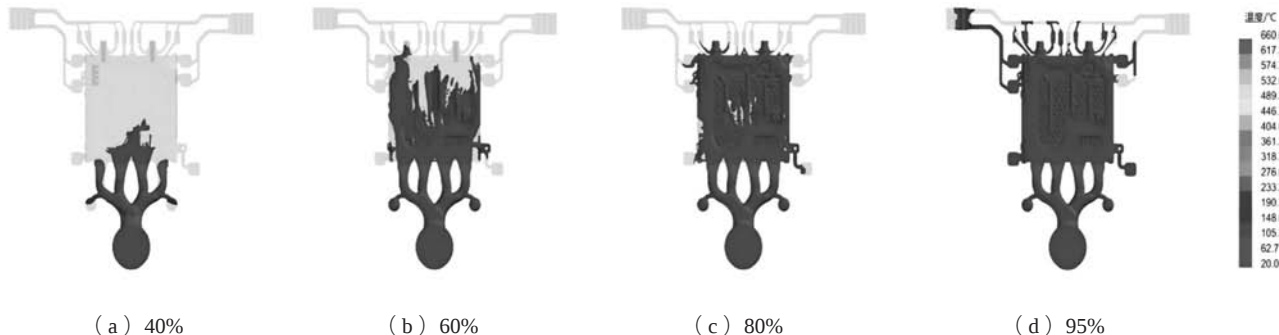


图3 铸件的充型过程

Fig. 3 Filling process of the castings

出,容易产生缺陷。当充型达到95%时,铸件已经完成充填,金属液流向铸件末端的溢流槽和排气槽。在铸件上设置溢流槽和排气槽不仅可以起到收集金属液内部的气体、冷污金属液以及氧化夹杂物的作用,还可以控制金属液的填充流态,消除压铸缺陷。从铸件充型的整个过程来看,在金属液填充型腔的开始阶段,金属液的填充过程相对平稳,因为产品结构复杂的原因,在后面填充的过程中出现了回流和卷气的现象。

2.4 凝固过程分析

图4是铸件的凝固过程温度,图5是固相分数分布图。结合两图可以得出,当凝固达到40%时,排气槽和部分溢流槽已经凝固,铸件型腔还呈现液相状态。当

凝固达到60%时,型腔区域已经基本处于固相状态,少部分区域没有完全凝固。主要原因是壁厚的区域传热慢,壁厚处的周围区域已经凝固,铸件的壁厚区域还未凝固。这些区域无法通过横浇道的金属液进行补缩,在凝固过程中会产生缩孔和缩松缺陷。当凝固达到80%时,铸件温度已经达到固相线以下,除了浇注系统还未完成凝固,其他部分已经完成凝固。从凝固过程的整体来看,铸件凝固的温度和固相分数相差梯度较小,凝固过程相对均匀,但是内部壁厚区域相比较周围凝固时间长,周围区域已经凝固时,铸件壁厚区域还未完全凝固,产生孤立的液相区,可能会产生缩孔缺陷。

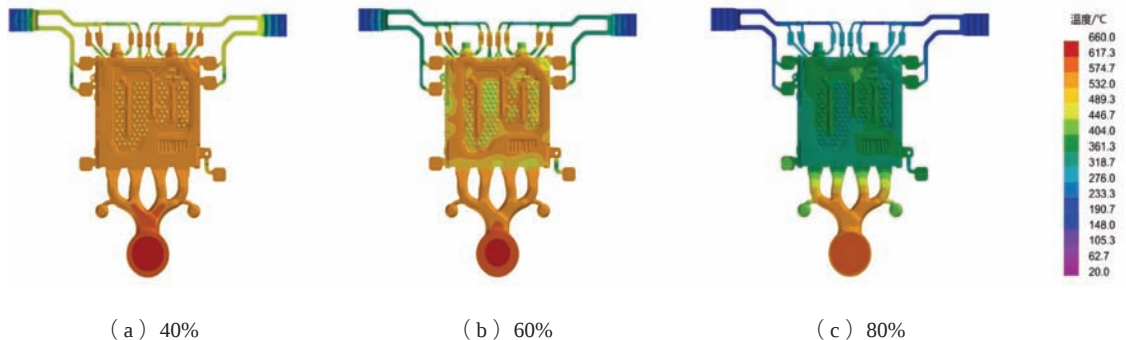


图4 铸件的凝固过程

Fig. 4 The solidification process of the castings

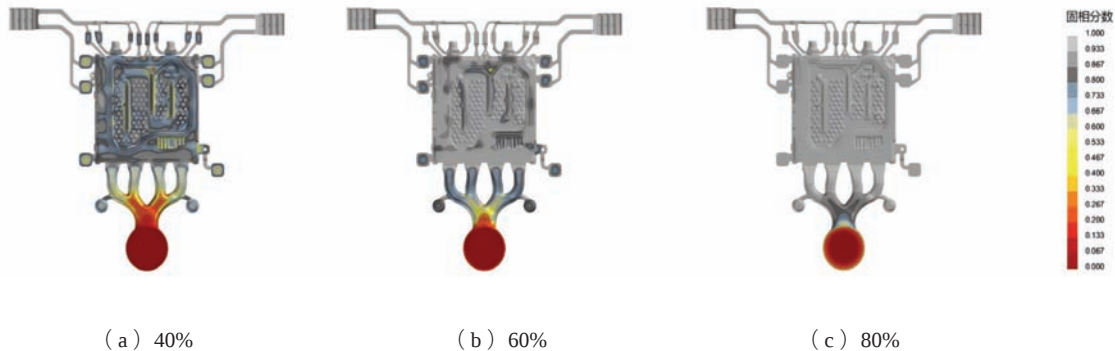


图5 固相分数分布

Fig. 5 Solid fraction distribution

2.5 铸件缺陷分析

图6是铸件卷气量的分布图。从图中可知,在铸件的水嘴处以及型腔的中间区域卷气量明显高于周围,主要原因是含气体的金属液在区域发生回流的现象,导致该区域的含气量偏高,容易产生气孔缺陷^[10]。

图7是铸件缩孔和缩松的分布图。从图中可以得知,可能产生缩孔的地方主要位于铸件壁厚的区域,

主要原因是这些区域的壁厚较大,在凝固的过程中温度下降的慢,而周围壁厚较薄,温度下降快,使得这些区域形成孤立的液相区,外来金属液无法对这些区域进行补缩,可能会导致缩孔缺陷的产生。通过ProCAST软件测量出缩孔的体积为 $3.658\ 4\text{ cm}^3$,铸件质量要求较高,因此需要通过优化压铸工艺对内部缺陷进行消除。

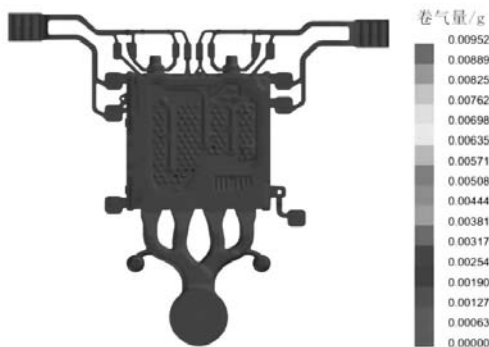


图6 铸件卷气量的分布

Fig. 6 Distribution of the air entrainment volume of the castings

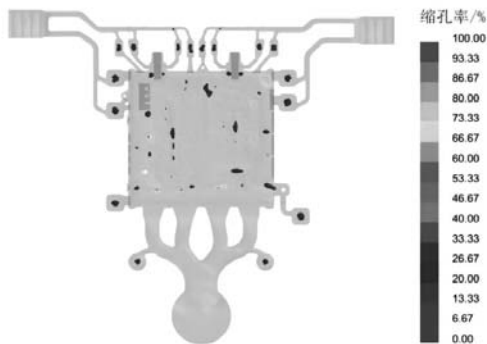


图7 铸件缩孔、缩松的分布

Fig. 7 Distribution of the shrinkage and porosity in the castings

3 工艺优化

3.1 模具结构优化

图8是实际生产铸件的缺陷图。通过X射线检查发现,在实际生产过程中的铸件在水门口处会出现气孔缺陷,主要原因是高压压铸生产铝液内部会进入空气,铸件的水门口处不能设置溢流槽,使得该区域发生回流现象,气体无法排出,容易产生气孔,与模拟的结果相一致。

针对这一问题对模具的结构进行局部改进,因为产品要求压铸出的产品水门口处不能进行后期的CNC加工,所以不能在水门口端设置溢流槽,因此在每个水门口成形滑块上增加微小的两道出气孔,帮助排出水门口内部气体,同时可以保证金属液无法流入气孔。模具结构优化方案如图9所示,图中滑块内部的黄色区域就是优化后的逃气孔道。

3.2 正交试验设计

实际压铸生产时,工艺参数对铸件的充型、凝固、模具寿命以及稳定生产等方面有巨大影响,其中浇注温度对铸件的生产效率和质量有着重要影响。合理的模具温度可以避免液体因为激冷而产生的裂纹,改善排气条件。合理的压射速度可以有利于气体排出,提高产品质量^[11]。

因此本文选取浇注温度、模具温度和冲头的压射

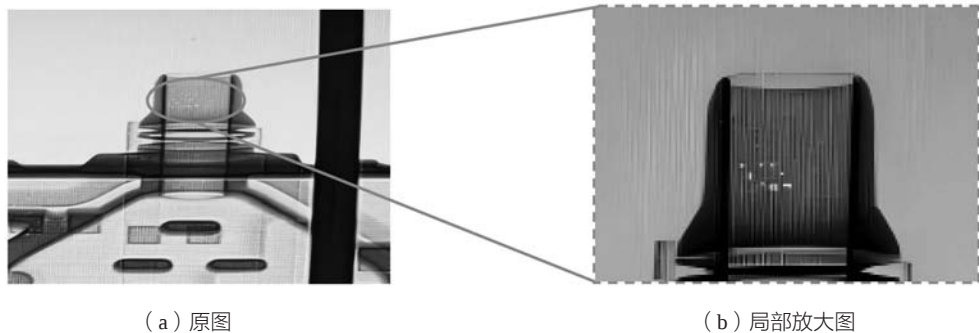


图8 实际生产铸件的缺陷

Fig. 8 Defects in the actual production castings

速度作为正交试验的影响因素,每个因素选取3个水平,表2是正交试验的因素水平表,建立 $L_9(3^3)$ 正交表,按照正交表进行9组试验,将试验结果中的凝固时间、卷气量和缩孔体积作为评价指标,表3为正交试验方案与试验结果。

3.3 正交试验结果分析

根据表3的正交试验结果,对卷气量进行了极差分析,计算得出极差分析表4。通过表4可以分析出压

铸工艺参数对卷气量影响的主次规律,并绘制出各个因素对卷气量的影响规律图,如图10所示。由表4可知,压铸工艺参数对卷气量影响程度的主次顺序为: $B(模具温度) > C(压射速度) > A(浇注温度)$ 。模具温度对卷气量影响最明显,卷气量随着模具温度的提高而升高,所以选取一个合适的模具温度有利于减少卷气量。由图10可知,在仅考虑卷气量的情况下,当浇注温度为 $670\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、模具温度为 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压射速度为 4 m/s ,卷气量最小,所以最优的压铸工艺参数组合为

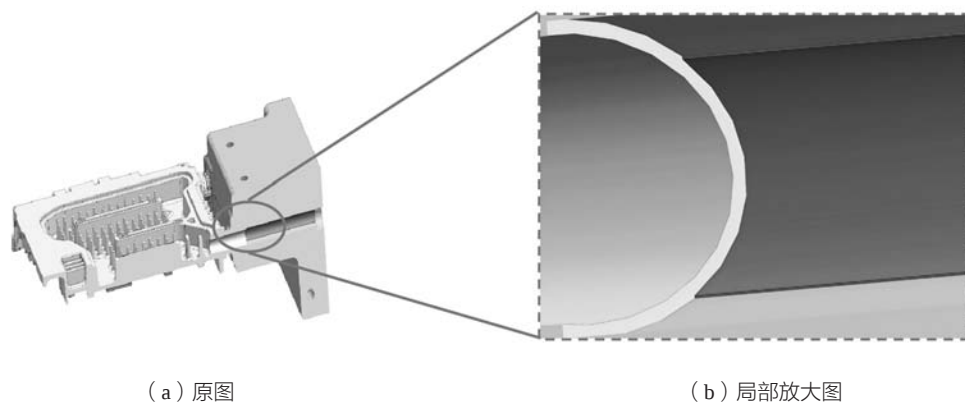


图9 模具结构优化

Fig. 9 Optimization of the mold structure

表2 正交试验的因素水平表
Tab. 2 Factor level table of orthogonal test

水平	浇注温度/℃	模具温度/℃	压射速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	650	190	3.5
2	660	200	4
3	670	210	4.5

A3B1C2。

根据表3的正交试验结果,对缩孔和缩松进行了极差分析,计算得出极差分析表5。通过表5可以分析出压铸工艺参数对缩孔和缩松影响的主次规律,并绘制出各因素对缩孔和缩松的影响规律图,如图11所示。由表5可知,压铸工艺参数对缩孔和缩松影响的主次

表3 正交试验方案与试验结果
Tab. 3 Orthogonal test scheme and test results

试验序号	浇注温度/℃	模具温度/℃	压射速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	卷气量/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	缩孔体积/ cm^3
1	650	190	3.5	0.000 194	1.524 6
2	650	200	4	0.000 191	1.553 7
3	650	210	4.5	0.000 193	1.568 3
4	660	190	4	0.000 182	1.529 0
5	660	200	4.5	0.000 197	1.475 1
6	660	210	3.5	0.000 200	1.467 2
7	670	190	4.5	0.000 190	1.703 5
8	670	200	3.5	0.000 183	1.761 2
9	670	210	4	0.000 196	1.649 8

表4 卷气量的极差分析表
Tab. 4 Analysis table of the air entrainment volume

因素	卷气量/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)			
	均值1	均值2	均值3	极差
A	1.927×10^{-4}	1.930×10^{-4}	1.897×10^{-4}	3.3×10^{-4}
B	1.887×10^{-4}	1.903×10^{-4}	1.963×10^{-4}	7.7×10^{-4}
C	1.923×10^{-4}	1.897×10^{-4}	1.933×10^{-4}	3.7×10^{-4}

顺序为:A(浇注温度)>B(模具温度)>C(压射速度)。浇注温度对缩孔、缩松影响最明显,因为铸件产生缩孔缺陷的主要原因就是在凝固过程中壁厚的区域凝固慢,处于液相状态,周围凝固快,处于固相状

表5 缩孔和缩松的极差分析表
Tab. 5 Range analysis table of the shrinkage cavity and porosity

因素	卷气量/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)			
	均值1	均值2	均值3	极差
A	1.548 9	1.490 4	1.704 8	0.280 6
B	1.585 7	1.596 7	1.561 8	0.095 7
C	1.584 3	1.577 5	1.582 3	0.083 0

态,该区域得不到外来金属液补充,而浇注温度对铸件凝固过程可以起到改善作用^[12]。由图11可知,在仅考虑缩孔和缩松的情况下,当浇注温度为660℃、模具

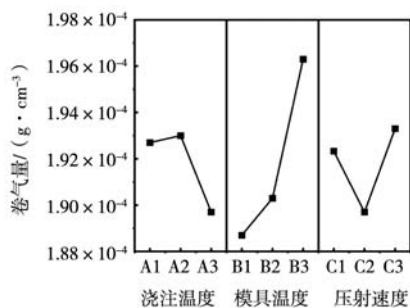


图10 各因素对卷气量的影响规律图

Fig. 10 The influence of various factors on the air entrainment volume

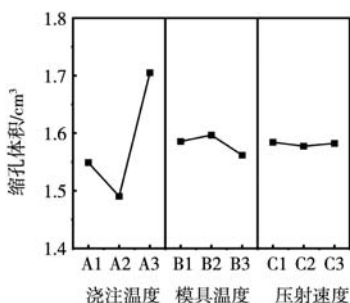


图11 各因素对缩孔和缩松的影响规律图

Fig. 11 The influence of various factors on the shrinkage and porosity

温度为210 ℃、压射速度为4 m/s，缩松体积最小，所以最优的压铸工艺参数组合A2B3C2。

在实际的生产过程中工艺参数的选取需要考虑许多因素，经过综合考虑缩孔体积和卷气量后，最终得出铝合金水冷板的最佳压铸工艺参数为浇注温度660 ℃、模具温度190 ℃、压射速度4 m/s。

4 压铸生产验证

针对上述优化过后的模具以及工艺参数，采用伊之密DM800T压铸机进行试验生产，工艺参数设置为：浇注温度为660 ℃、模具温度为190 ℃、压射速度为4 m/s，生产出的铸件经过切边，去除溢流槽、排气槽和浇注系统，得到最终铸件，如图12所示，产品外观良好，表面没有明显的缺陷。

对水冷板整体进行X射线检测，铸件内部品质良

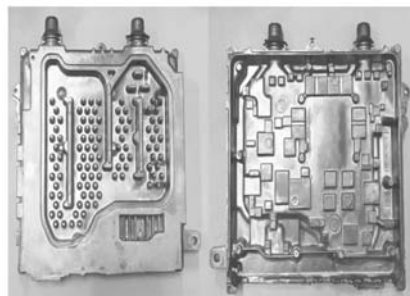


图12 铸件生产实物图

Fig. 12 Casting production physical drawing

好，没有气孔、缩孔和缩松缺陷，水嘴口处的气孔缺陷得以解决，见图13。

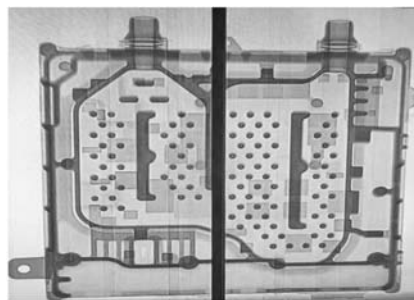


图13 X射线检测图

Fig. 13 X-ray test picture

5 结论

(1) 采用ProCAST软件对铝合金水冷板铸件的压铸过程进行数值模拟，分析模拟结果，预测出压铸过程产生的缺陷以及原因。

(2) 针对铸件缺陷问题，首先对模具结构进行优化，在铸件水嘴口处增加一个微小的出气孔道，其次采用正交试验方案，对工艺参数进行优化，优化后的最佳工艺参数组合为：浇注温度为660 ℃、模具温度为190 ℃、压射速度为4 m/s。

(3) 基于模拟分析、模具结构优化以及工艺参数优化对铸件进行压铸试制，质量检测后缺陷问题得以解决，无明显缺陷，对水冷板实际生产具有指导意义。

参考文献:

- [1] 乔英俊, 赵世佳, 伍晨波, 等. “双碳”目标下我国汽车产业低碳发展战略研究 [J]. 中国软科学, 2022 (6): 31-40.
- [2] 于东阳, 罗艳托, 刘馨, 等. 新能源汽车产业发展趋势及对油气企业的影响 [J]. 油气与新能源, 2023, 35 (4): 33-40.
- [3] 唐见茂. 新能源汽车轻量化材料 [J]. 新型工业化, 2016, 6 (1): 1-14.
- [4] 李龙, 夏承东, 宋友宝, 等. 铝合金在新能源汽车工业的应用现状及展望 [J]. 轻合金加工技术, 2017, 45 (9): 18-25, 33.
- [5] 龙广鹏. 新能源汽车铝合金轻量化零部件生产工艺的应用与发展 [J]. 大众科技, 2023, 25 (11): 63-65.

- [6] 陈文超. 关于汽车铸件及其铸造技术的研究 [J]. 内燃机与配件, 2022 (20) : 100-102.
- [7] MAYER R A, OLIVEIRA D R W, FALS C D H , et al. Die soldering and corrosion failure of high temperature tool steel for high-pressure die casting Al alloy [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 108314: 1350-6307.
- [8] 金建新. 铝合金水冷板的铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2002 (2) : 47-49.
- [9] 宋政骢, 米国发, 王有超, 等. ES6ZCA上盖压铸工艺设计与数值模拟优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (21) : 67-71.
- [10] 潘威武, 张松利, 刘明杰, 等. 发动机缸体压铸工艺数值模拟及合金成分优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (12) : 1502-1505.
- [11] 张继龙, 陈龙, 田晶晶, 等. 镁合金汽车抬头显示支架压铸工艺模拟与优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (8) : 1141-1144.
- [12] 邵熠羽, 彭文飞, 崔杰, 等. 差速器壳体高压压铸工艺模拟及优化 [J]. 铸造, 2023, 72 (12) : 1624-1630.

Numerical Simulation and Process Optimization of Die Casting Process of Aluminum Alloy Water-Cooled Plate

SUN Zheng-kang¹, LIU Xiao-fang¹, GAO Ming-qiang¹, ZHANG Ning-hao¹, LIAO Ping-qing², LI Lei²

(1.School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, Anhui, China; 2.CLP Tai Risen Ma'anshan Technology Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China)

Abstract:

Using ProCAST software to perform numerical simulation of the casting process, the filling and solidification processes, as well as the location and causes of defects, were analyzed. Based on the problems of air entrapment and shrinkage holes that occurred during the water cooler plate casting process, the mold structure was improved, and the process parameters were optimized using orthogonal test. The results showed that the optimal casting process parameters after improvement and optimization are: pouring temperature of 660 °C, mold temperature of 190 °C, and injection speed of 4 m/s. The actual production trial and testing of the improved and optimized process scheme showed that the defect problems of the castings have been solved, and it has guiding significance for the actual production of the water cooler plate.

Key words:

aluminum alloy; water-cooled plate; numerical simulation; process; orthogonal test
