

基于响应面法的逆变器支撑板 工艺优化设计

唐 政¹, 桑宝光¹, 葛春东²

(1. 大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁大连 116034;

2. 大连亚明汽车部件股份有限公司, 辽宁大连 116000)

摘要: 针对铸件结构基于工程经验设计了压铸件的浇排系统和初始压铸工艺参数, 采用有限元软件ProCAST进行压铸过程的充型凝固耦合模拟仿真, 并采用Design-expert, 基于Box-Beheken的响应面法(RSM)建立了以模具温度、铝液温度和快压速度为因素, 以缺陷体积为目标响应的试验, 最终得到较优的试验方案。利用试验优化后的工艺参数进行生产试验。结果表明, 采用优化方案生产出的铸件表面质量良好, 内部易产生缺陷位置的孔隙度为1%, 整体符合质量要求。

关键词: 压铸工艺; 数值模拟; 响应面法

随着近年来汽车轻量化发展趋势越发明显, 国内各汽车制造企业在制造过程中对于铝合金材料的使用越来越广泛, 其使用量也呈直线上升趋势^[1]。如新能源汽车电机壳体、电池包壳体、变速器壳体等部件普遍采用铝合金材料。

目前计算机模拟技术在铝合金铸造方面已得到广泛应用。王成军等人^[2]基于ProCAST对铝合金缸体的铸造充型和凝固过程进行了模拟分析, 结合温度场的变化情况及铸造缺陷的位置改进了工艺方案, 有效地减少缩孔、缩松等缺陷, 提高了铸件品质。卢阳光等人^[3]采用ProCAST仿真软件, 对铝合金回转支承轴承内圈初始浇注系统产生的缺陷及分布进行分析和优化, 结合正交试验获得最佳的工艺参数, 通过浇注验证获得合格铸件。

现有的研究大多都针对流道、冷却系统等模具结构进行优化^[4-5]或采用正交试验对不同工艺参数进行优化分析^[6-7]。前者忽略了浇注温度、模具温度等工艺条件变化对铸件质量造成的影响, 后者则因为正交试验的局限性具有精度不高、预测性不佳的缺点。因此本文以逆变器支撑板为研究对象, 根据铸件本身结构及传统经验进行浇排系统及初始压铸工艺设计。采用ProCAST和Design expert进行压铸工艺的模拟仿真及选用模具温度、铝液温度、快压速度这三个铸造缺陷影响关键因素^[8-9]进行响应面法(RSM)的优化试验设计。最后使用优化后的方案与模拟分析对比及实际生产试验, 得到满足质量要求的铸件。

1 支撑板工艺性分析

本课题所研究的支撑板为新能源汽车逆变器的壳体组件之一, 对零件气密性要求较高, 需要满足He气检测要求。

如图1所示为在UG软件中的三维模型。其主体部分为尺寸295 mm × 275 mm × 61 mm的板件, 平均厚度3 mm, 最大厚度7 mm在A处, 产品压铸毛坯质量3.1 kg。正面有工作中所使用的流动槽, 背面有与箱体固定及配合用棱及柱。这些位置的根部由于铸件结构问题在凝固过程中易发生补缩困难, 进而产生铸造缺陷, 且难以通过

作者简介:

唐 政(1998-), 男, 硕士, 主要研究方向为铝合金压铸工艺。E-mail: tzgydhj@163.com

通讯作者:

桑宝光, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。E-mail: bgsang@126.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: B

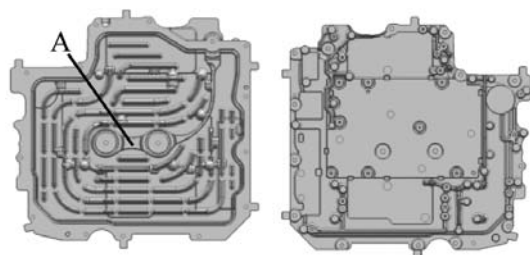
文章编号: 1001-4977(2024)

10-1453-07

收稿日期:

2023-12-18 收到初稿,

2024-02-18 收到修订稿。



(a) 支撑板正面 (b) 支撑板背面

图1 支撑板三维模型

Fig. 1 3D model of the support plate

浇道及流道进行补缩。

铸件材料采用AlSi10MnMg，基于光谱仪实测的化学成分如表1所示。

表1 AlSi10MnMg合金化学成分
Table 1 Chemical composition of the AlSi10MnMg alloy
w_B /%

Si	Fe	Mg	Ti	Mn	Cu	Zn	其余	Al
9.922	0.118	0.337	0.08	0.528	0.014 5	0.008	<0.048	余量

2 压铸工艺分析

2.1 压铸机的选择

根据铸件结构，选择最大轮廓面作为分型面^[10]。设计生产一模一件。铸件在该面上的投影面积为688 cm²。计算时添加30%作为浇排系统的面积，即总面积为894.4 cm²。压射比压根据表2^[10]选择100 MPa。根据锁模力计算及比较，选用ZDC-1250TCM压铸机作为生产试验设备，最大锁模力为12 500 kN符合试验要求。

表2 推荐压射比压范围表
Table 2 Recommended ranges of the injection specific pressure

零件类型	铝合金
承受轻负荷的零件	30~40 MPa
承受较大负荷的零件	40~80 MPa
气密性面大壁厚零件	80~120 MPa

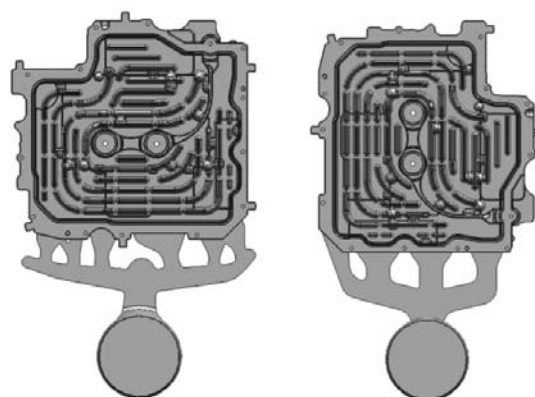
2.2 浇排系统设计及模拟边界条件确定

2.2.1 初始工艺参数设计

基于前人对压铸填充过程的研究及初步试验^[11]，设置模具温度为(200±20)℃、浇注温度(690±15)℃、慢压速度(0.15±0.5) m/s、快压速度(3.5±0.5) m/s、压室长度700 mm、高速位置(630±20) mm、压室截面直径100 mm。其中，模具温度为连铸时的循环温度。

2.2.2 边界条件设定及浇注方案对比

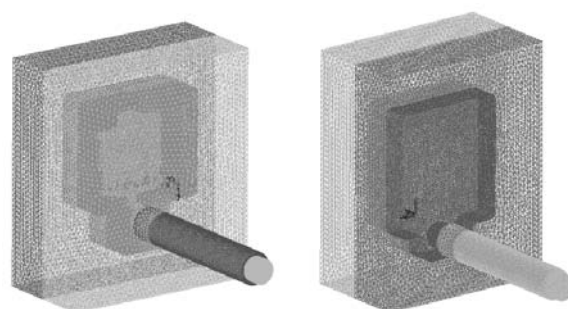
基于不同方向的浇注方案设计如图2所示。采用ProCAST的Visual-mesh模块对两种浇注方案进行网格划分。铸件及浇道位置网格长度设置为1，模具表面网格长度设置为20。其余部分依照结构和模拟精细度要求进行调整。网格划分完如图3所示。体网格总数量分别为方案A：1 944.4万个和方案B：1 974.8万个。铸件材料固相线温度为552℃、液相线温度为593℃。设置模具与铸件液相线传热系数设置为3 000 W/(m²·K)，固相线传热系数为7 000 W/(m²·K)，模具间传热系数为3 000 W/(m²·K)^[12]。采用上文设计工艺参数进行模拟。



(a) 方案A (b) 方案B

图2 基于不同方向的浇注方案

Fig. 2 Pouring schemes based on different directions



(a) 方案A (b) 方案B

图3 不同方案的网格划分

Fig. 3 Grid partitioning for different schemes

不同方案熔体由浇道进入型腔时流动情况及缺陷分析对比如图4、5所示。综合考虑铸件内熔体流动情况、缺陷分布情况及实际生产检测流程，选择方案A。方案A设置排溢系统及网格划分如图6所示。网格长度及模拟参数设置同上，体网格总数量为1 989.9万个。

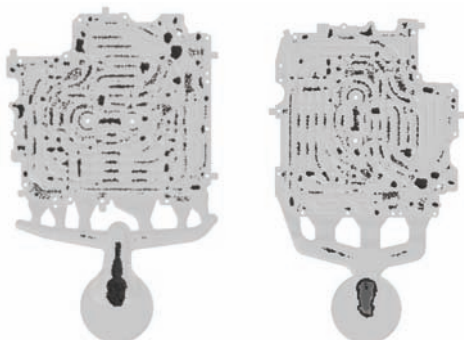


(a) 方案A

(b) 方案B

图4 不同方案熔体进入型腔时流动情况

Fig. 4 Flow situation of the melt entering the mold cavity under different schemes

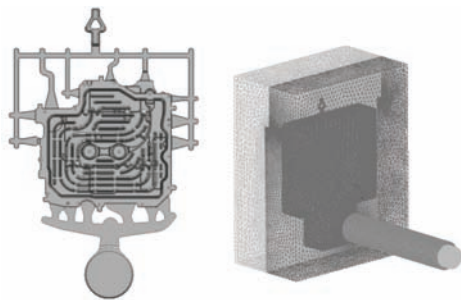


(a) 方案A

(b) 方案B

图5 不同方案的缺陷分析

Fig. 5 Defect analysis of different schemes



(a) 排溢系统设计

(b) 网格划分

图6 方案A排溢系统设计及简模网格划分

Fig. 6 Design of overflow system and simple model grid division of the scheme A

3 基于响应面法的工艺优化

3.1 试验设计及结果

基于上文所设置的工艺参数,以模具温度(A)、铝液温度(B)、快压速度(C)三个变量为影响要素,以ProCAST后处理分析所给出的缺陷体积(Y)为响应值,设计三水平的响应面试验如表3所示。

表3 响应面法试验因素及水平表

Table 3 Test factors and levels table of the response surface method

水平	因素		
	A模具温度/℃	B铝液温度/℃	C快压速度/(m·s ⁻¹)
-1	180	675	3
0	200	690	3.5
1	220	705	4

将响应面法试验表条件带入ProCAST模拟仿真,结果如表4所示。由表可以看出,缺陷体积随着模具温度、铝液温度及快压速度的改变有较明显的变化。且在序号为6的试验中取得最大值5.573 41 cm³,序号为12的试验中取得最小值4.788 76 cm³。

表4 响应面法试验表及结果

Table 4 Experimental table and results of the response surface method

序号	A/℃	B/℃	C/(m·s ⁻¹)	Y/cm ³
1	200	705	4	5.215 06
2	200	690	3.5	5.093 68
3	180	690	3	5.078 96
4	200	690	3.5	5.182 31
5	220	690	4	4.984 45
6	180	705	3.5	5.573 41
7	180	690	4	5.250 01
8	200	690	3.5	5.182 31
9	220	705	3.5	5.026 99
10	200	690	3.5	5.182 33
11	200	675	4	5.147 56
12	220	690	3	4.788 76
13	220	675	3.5	5.055 90
14	200	675	3	5.018 57
15	200	705	3	5.310 21
16	180	675	3.5	5.110 48
17	200	690	3.5	5.182 31

3.2 试验结果分析

3.2.1 方差分析

该模型的方差分析如表5所示。方差分析的 P 值($P_{\text{rob}} > F$) <0.05 视为显著、小于0.01视为极显著。由表可知,该响应面模型 P 值($P_{\text{rob}} > F$)小于0.01为极显著,说明该模型有统计学意义,可利用该模型进行进一步的优化设计。一次项A、B及二次项AB为极显著,说明模具温度和铝液温度及其交互作用在该次试验中对缺陷体积有极其重要的影响;一次项C及二次项B²、C²为显著,说明快压速度在该次试验中对缺陷体积有

表5 响应面法方差分析结果
Table 5 Variance analysis results of the response surface method

来源	平方和	自由度	均方	F值	$P_{\text{rob}} > F$
模型	0.41	9	0.046	15.10	0.000 8
A	0.17	1	0.17	55.51	0.000 1
B	0.079	1	0.079	26.10	0.001 4
C	0.020	1	0.020	6.66	0.036 5
AB	0.060	1	0.060	20.07	0.002 9
AC	1.517E-004	1	1.517E-004	0.050	0.828 9
BC	0.013	1	0.013	4.17	0.080 5
A ²	0.015	1	0.015	5.05	0.059 5
B ²	0.032	1	0.032	10.63	0.013 9
C ²	0.026	1	0.026	8.71	0.021 4
残差	0.021	7	3.013E-003		
失拟	0.015	3	4.937E-003	3.14	0.148 8
误差	6.285E-003	4	1.571E-003		
矫正	0.43	16			
R^2 : 0.951 0		$R \text{ Adj}^2$: 0.888 0		C.V.%: 1.07	

重要影响。

$R^2 > 0.8$, 说明数学模型可用于拟合实际数据;
 $R^2 = 0.951\ 0$ 、 $R \text{ Adj}^2 = 0.888\ 0$, 说明模型预测值与实际值符合度较好; C.V.%=1.07说明预测值与实际值偏差度较低, 试验有较好的可靠性。

基于方差分析所得缺陷体积相对于一次项、二次项及交互项的响应面回归方程为:

$$Y = 5.16 - 0.14 \times A + 0.099 \times B + 0.050 \times C - 0.12 \times AB + 6.158E-003 \times AC - 0.056 \times BC - 0.060 \times A^2 + 0.080 \times B^2 - 0.079 \times C^2$$

3.2.2 残差概率值分布及实际与预测的拟合图

残差的正态概率分布图及预测值与实际值分布图如图7所示。若模型适应性好, 则残差的正态概率及预测值分布图应尽可能在一条直线上。从图可以看出, 利用响应面法拟合模型适应性良好。

3.2.3 基于等高线图及3D图的交互作用分析

图8、9为基于不同的交互影响下的等高线图和三

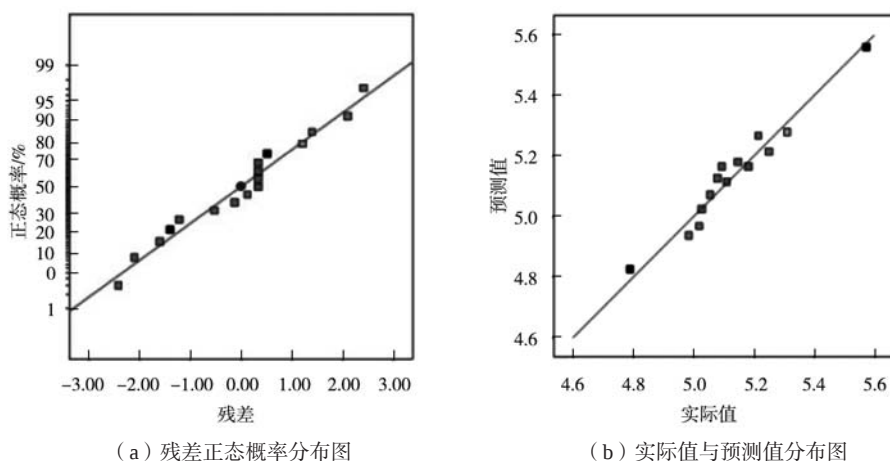


图7 残差正态概率及实际值与预测值分布图

Fig. 7 Residual normal probability and distribution of actual and predicted values

维立体响应曲面。由图8a可知, 相较于模具温度, 等高线在铝液温度方面更为稠密, 因此可认为对缺陷体积的影响程度: 铝液温度>模具温度。由图9a可知, 随着模具温度降低及铝液温度升高, 缺陷体积明显增大。由图8b可知, 相较于快压速度, 等高线在模具温度方面更为稠密, 因此可认为对缺陷体积的影响程度: 模具温度>快压速度。由图9b可知, 随着模具温度降低及快压速度提高, 缺陷体积明显增大。由图8c可知, 相较于快压速度, 等高线在铝液温度方面更为稠密, 因此可认为对缺陷体积的影响程度: 铝液温度>压射速度。由图9c可知, 随着铝液温度降低及快压速度

提高, 缺陷体积先下降后上升。

综上所述, 因素对缺陷体积的影响程度由大到小分别为: 铝液温度>模具温度>压射速度。

3.2.4 优化结果

利用Design-expert软件的优化模块及综合考虑实际压铸环境, 得出最优工艺参数为: 模具温度220 ℃, 铝液温度690 ℃, 快压速度3 m/s, 对应预测缺陷体积4.825 cm³。Procast相同数据模拟得出的缺陷体积为4.789 cm³。对比误差为0.75%, 说明该模型与实际模拟的相关性足够, 可以用在模型预测上。

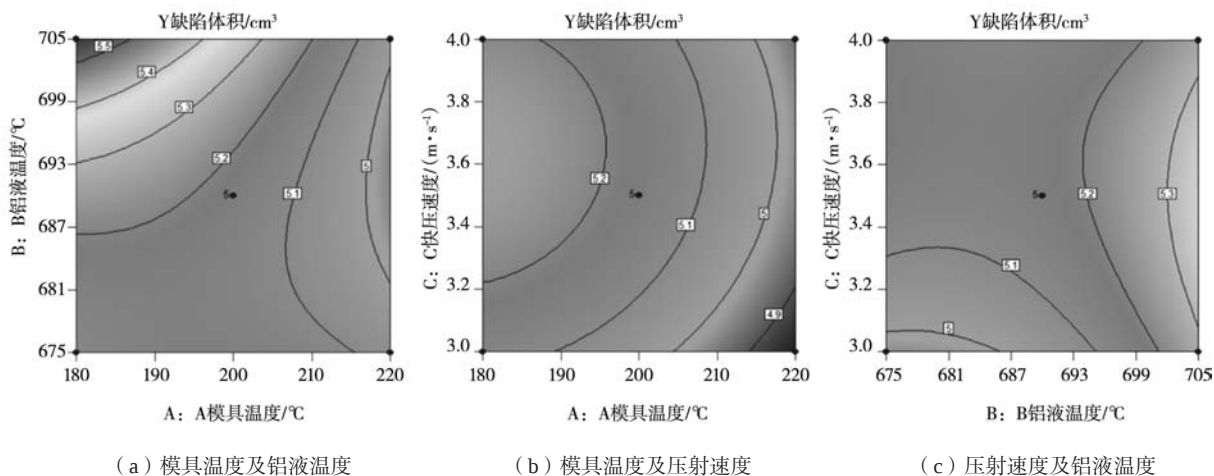


图8 交互作用对缺陷体积影响的等高线图
Fig. 8 Contour plots of the effect of interaction on the defect volume

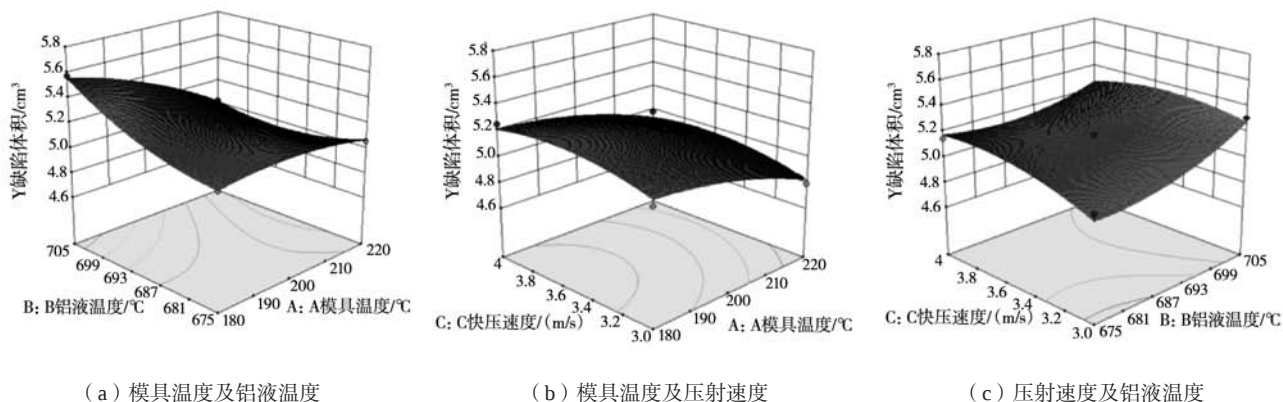
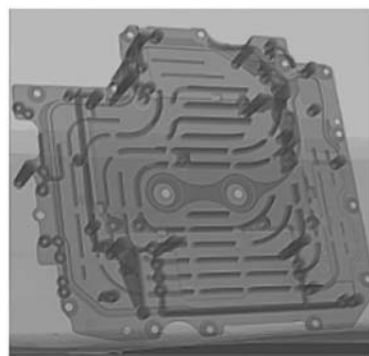
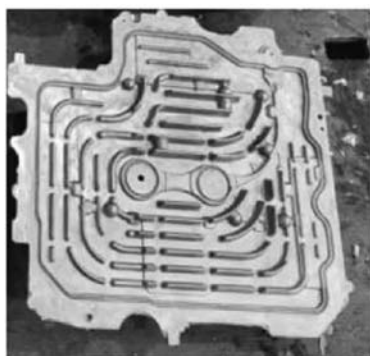


图9 交互作用对缺陷体积影响的三维图
Fig. 9 3D diagrams of the impact of interaction on the defect volume

4 生产验证

为了将优化方案与实际相结合,进而验证其可靠性,采用优化后的方案及上文所设计工艺参数进行实

际压铸生产试验。生产铸件及无损检测如图10所示。经验证,铸件毛坯尺寸精度符合要求,无损检测无明显缺陷。



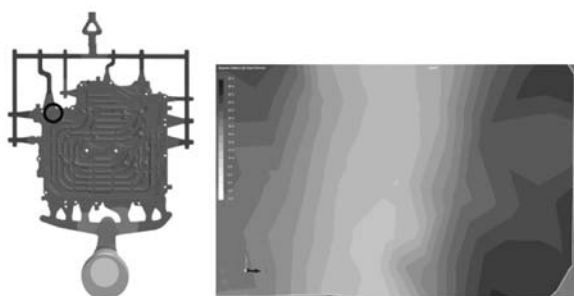
(a) 实际生产铸件图 (b) 无损检测图

图10 实际生产试验铸件及无损检测

Fig. 10 Actual production test castings and non-destructive testing

Niyama判据是一种基于枝晶间显微缩松的预测判据,其判据值适用于评定显微缩松产生的倾向性,可以较准确地预测出显微缩松产生的位置^[13]。ProCAST分析结果中Niyama判据值较低、易产生缺陷的位置如图11。该位置实际铸件剖切图如图12。由图可知,实际铸造缺陷出现位置与模拟中易产生缺陷位置较为一致,表明模拟软件可以很好地预测铸造缺陷出现的位置;易出现缺陷位置孔隙度为1%,优于规定的2.5%,说明铸件整体内部质量符合要求。

试生产100件对其进行He气气密性检测。检测的



(a) 判据值较低位置示意 (b) 该位置切面判据值大小观察

图11 模拟分析中易产生缺陷位置

Fig. 11 Defect prone locations in the simulation analysis

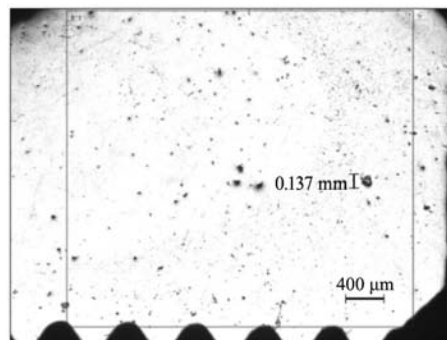
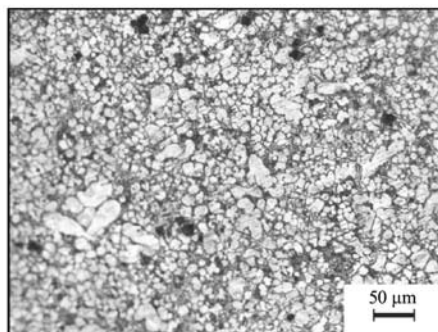


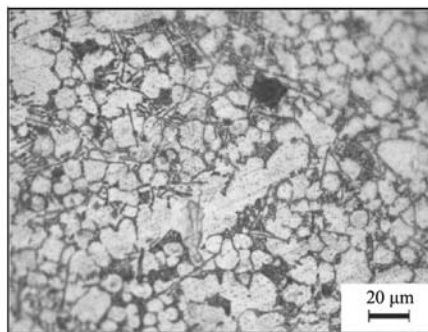
图12 实际铸件同位置图, 孔隙度1%

Fig. 12 Actual casting at the same location with a porosity of 1%

合格率达到95%以上,说明优化方案对实际铸件生产质量保证起到有效地指导作用。对未合格件进行人工检测,确定了密封面泄漏点与上文中判据值检测易产生缺陷位置相同。对泄漏点切割后进行金相观察如图13所示。结合200倍与500倍金相观察图可以看出,泄漏点位置存在着较为明显缩松、缩孔及少量的气孔。这些孔洞在三维上相互联通即为导致铸件气密性检测不合格的原因。因此通过优化工艺参数减少铸件内部缺陷可以有效提高铸件气密性检测合格率。



(a) 200倍金相观察图



(b) 500倍金相观察图

图13 泄漏点切面金相组织

Fig. 13 Metallographic microstructures of the leakage point section

5 结论

(1) 铸件缺陷体积在所设计工艺范围内,随着模具温度升高而快速降低,随着铝液温度升高先缓慢降低后快速增加,随着快压速度提高先缓慢增加后逐渐

降低。

(2) 通过响应面优化结果及结合模拟验证,得到最佳工艺参数为:模具温度220℃,铝液温度690℃,快压速度3 m/s。

参考文献:

- [1] 南迪. 汽车铝合金轻量化材料的应用及技术工艺研究 [J]. 汽车检测报告, 2022 (7): 124-126.
- [2] 王成军, 韩董董, 陈蕾. 基于ProCAST的铝合金缸体压铸工艺数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (10): 1055-1058.
- [3] 卢阳光, 赵磊, 石静静, 等. 基于ProCAST的铝合金回转支承内圈铸造工艺数值模拟及优化 [J/OL]. 热加工工艺: 1-4[2023-09-20]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20212741>.
- [4] 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.
- [5] BABU J S S, SEO Hyung Yoon, SEO Pan Ki, et al. Simulation and experimental investigation of die design for the fabrication of spider arm component by AlSi10Mg2.7 alloy [J]. International Journal of Metalcasting: Leading the Transfer of Research and Technology for the Global Metalcasting Industry, 2022, 16 (3): 1606-1618.
- [6] 刘元赫. 铝合金轮毂半固态压铸成形数值模拟及工艺参数优化 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [7] REN Shuyang, WANG Feng, SUN Jingying, et al. Gating system design based on numerical simulation and production experiment verification of aluminum alloy bracket fabricated by semi-solid rheo-die casting process [J]. International Journal of Metalcasting: Leading the Transfer of Research and Technology for the Global Metalcasting Industry, 2022, 16 (2): 878-893.
- [8] 李真胜. 压铸速度对铝合金充型流动状态及孔隙率的影响研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [9] KONG Weibing, WANG Zhi, GUO Changsheng, et al. Process optimization for high pressure die casting of marine propeller with a hypoeutectic Al-Si-Mg Alloy [J]. Metallurgical Research & Technology, 2016, 113 (4).
- [10] 潘宪曾. 压铸模设计手册 (第三版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] YU W, YUAN Z, GUO Z, et al. Characterization of A390 aluminum alloy produced at different slow shot speeds using vacuum assisted high pressure die casting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27 (12).
- [12] 朱洪军, 黄潇苹, 闫德海. 基于AlSi10MnMg电池罩盖压铸工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (7): 977-980.
- [13] 潘利文, 郑立静, 张虎, 等. Niyama判据对铸件缩孔缩松预测的适用性 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (12): 1534-1540.

Optimization Design of Inverter Support Plate Process Based on Response Surface Methodology

TANG Zheng¹, SANG Bao-guang¹, GE Chun-dong²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian University of Technology, Dalian 116034, Liaoning, China; 2. Dalian Yaming Automotive Parts Co., Ltd., Dalian 116000, Liaoning, China)

Abstract:

Firstly, based on engineering experience, the pouring system and initial die-casting process parameters for the casting structure were designed. Subsequently, the finite element software ProCAST was used to simulate the coupling of mold filling and solidification during the die casting process. Design expert was used to establish an experiment based on Box Behken's Response Surface Method (RSM), with mold temperature, aluminum liquid temperature, and fast pressing speed as research factors and defect volume as the target response. The optimal experimental plan was ultimately obtained. Then, production experiments were conducted using the optimized process parameters. The results showed that the surface quality of the castings produced using the optimized plan was good, and the porosity of the internal defect prone positions was 1%, which overall met the quality requirements.

Key words:

die casting process; numerical simulation; response surface method