

稀土镁合金压铸工艺数值模拟及正交试验研究

彭湃^{1, 2}, 吴广新^{1, 2}, 马征^{1, 2}, 王波^{1, 2}, 张捷宇^{1, 2}

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 上海大学省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444)

摘要: 采用数值模拟的方法, 研究了镁合金压铸件充型凝固过程。基于正交试验设计, 分析了浇注温度、模具温度、压射速度和保压时间等工艺参数对缩松、缩孔、热裂倾向指数的影响。结合模拟结果, 获得了最佳的压铸工艺参数: 浇注温度为690 °C, 压射速度为8 m/s, 模具温度为240 °C, 保压时间为7 s。优化后的工艺参数减少了铸件的缩松、缩孔和热裂倾向指数, 用该工艺参数进行压铸生产, 获得了质量良好的镁合金压铸件, 并对缺陷位置及微观组织进行了验证。

关键词: 正交试验; 镁合金; 压铸; 数值模拟

镁及其合金是最轻的金属结构材料, 具有高比强度、比刚度、高可回收性和商业可用性; 镁合金有望部分替代铝合金和钢, 因此, 它在电子、汽车和航空航天工业中的应用引起了极大的关注^[1-2]。高压压铸 (HPDC) 是一种高效、经济的精密制造方法, 可用于不同行业镁合金零件的大规模生产^[3]。目前, 大约90%的铸造镁合金由HPDC制造, HPDC工艺的显著特点是在凝固过程中有着高冷却速率^[4]。但在铸造过程中, 产生的缺陷会对铸件的力学性能产生不利影响, 通过试验来优化力学性能和控制其可变性是非常耗时的^[5]。因此, 提出了一种试验和仿真相结合的方法来解决这一问题。

Visput等^[6]使用Magmasoft对汽车铝合金零件进行数值模拟, 研究了压射速度、浇注温度对铸件品质的影响, 并对工艺参数进行了优化。王洪波等^[7]使用ProCAST对齿轮箱箱体的铸造过程进行了数值模拟, 分析了不同的加压压力对铸件的影响, 获得了最佳压力参数。朱洪军^[8]研究了不同工艺参数对缩孔含量的影响。潘成刚等^[9]研究了影响压铸模寿命的因素, 发现模具温度对压铸模具寿命影响最大。Wang等^[10]利用有限元分析软件ProCAST对镁合金雷达壳体进行了数值模拟, 采用正交试验设计对压射速度、浇注温度、模具温度进行了优化, 得到了最佳工艺参数。

本研究利用有限元分析软件ProCAST中HPDC模块进行数值模拟, 预测可能出现的缺陷位置及容易产生热裂的区域, 优化工艺方案, 为实际生产提供参考, 使铸件缩松、缩孔和热裂倾向指数降低, 综合性能提高。

1 零件结构分析

该镁合金材料为Mg-Zn-La-Ce-Zr, 表1是其化学成分。铸件高度为537.2 mm, 宽度为476.4 mm, 厚度为63.6 mm, 如图1所示。铸件的形状较为复杂, 壁厚相差较大, 对工艺设计和参数设置要求较高。该铸件主要由热裂倾向试样、拉伸试样、冲击试样、压缩试样、扭转试样、盐雾腐蚀试样、台阶试样、薄片试样和蛇形试样构成, 可以评估材料的流动性能、充型性能、物理性能和化学性能。其中, 热裂倾向试样的设计参考了Cao等^[11]的设计方案, 以圆球和五根不同长度的长杆组成, 凝固时圆球与长杆之间形成热节, 用来评估其连接开裂情况。圆球直径18.5 mm, 长杆直径9.8 mm, 长度 L 分别为85 mm、120 mm、195 mm、230 mm、270 mm。

作者简介:

彭湃 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为压铸工艺数值模拟。电话: 15632143161, E-mail: 809327903@shu.edu.cn

通讯作者:

王波, 男, 教授, 博士, 博士生导师。电话: 13611871355, E-mail: bowang@shu.edu.cn

中图分类号: TG249.2;
TP311

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977 (2022)
12-1548-07

基金项目:

上大新材料 (泰州) 研究院和包头稀土院资助课题。

收稿日期:

2022-04-09 收到初稿,
2022-05-18 收到修订稿。

表1 镁合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of the magnesium alloy
w_B/%

Zn	La	Ce	Zr	Mg
0.5	0.5	0.5	0.5	余量

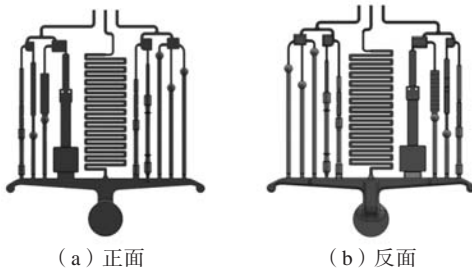


图1 压铸件三维模型图

Fig. 1 The three dimensional model of the die casting

2 数学模型的建立

对于铸件充型过程的数值模拟，通常将高温金属液近似为稳态、湍流、不可压缩的流体，流动过程遵从能量守恒、动量守恒和质量守恒，可以用以下控制方程来描述^[12]，湍流模型选取标准k-ε湍流两方程模型，参见[13]文献。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_j}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho C_p U_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q \quad (3)$$

$$Q = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (4)$$

体积函数方程：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0, \quad 0 \leq F \leq 1 \quad (5)$$

式中： t 为时间， s ； x 为位移， m ； ρ 为密度， kg/m^3 ； P 为流体压强， N/m^2 ； μ 为运动粘度， m^2/s ； g 为重力加速度， m/s^2 ； C_p 为热容， $J/(kg \cdot K)$ ； λ 为热导率， $W/(m^2 \cdot K)$ ； U 为速度， m/s ； T 为温度， K ； Q 为热源， K ； L 为结晶潜热， J/g ； f_s 为固相率； F 为相体积分。

3 热物性参数及边界条件

对铸件模型采用六面体单元进行网格划分，面网格总数为157 330，体网格总数为676 988。模具材质选用H13钢，铸件和模具之间的换热系数设定为1 000，冷却方式为空冷。型壳的应力参数定义为刚性，合金的应力参数定义为弹塑性，设置铸件X、Y、Z方向上的位移为0，保压压力设定为70 MPa。热物性参数中热导率、密度、固相率、粘度由ProCAST内置软件计算直接得出，热容、结晶潜热由Pandat基于热力学数据库计算得出，导入ProCAST进行计算，其中 L 为334.96 J/g。具体热物性参数如图2所示。

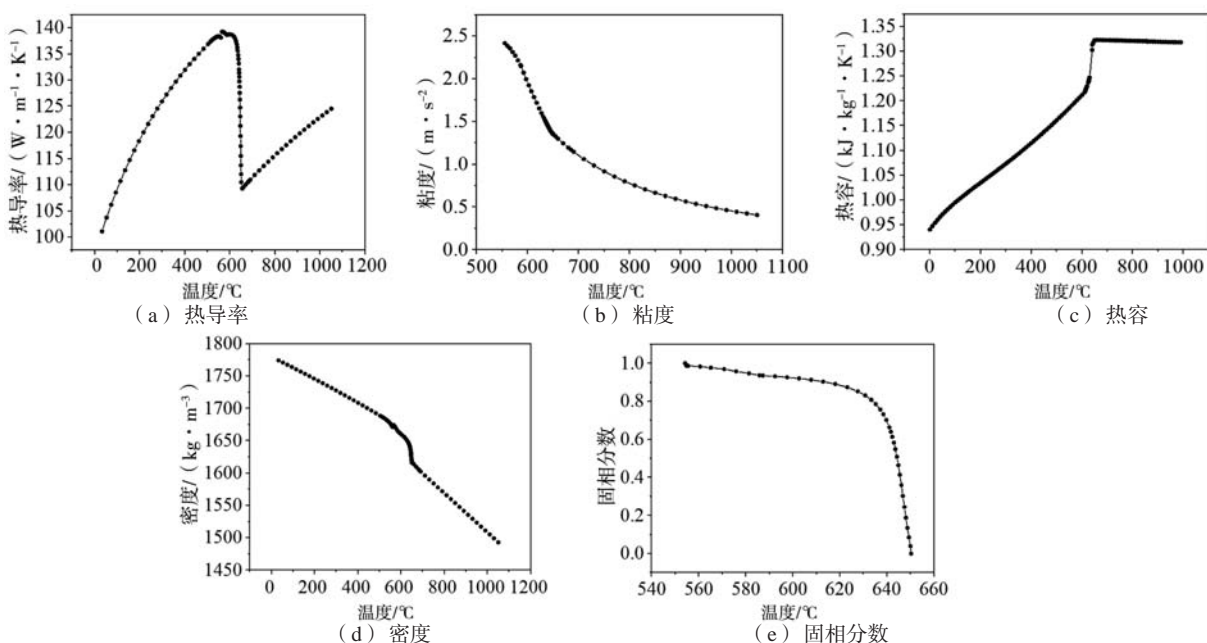


图2 热物性参数

Fig. 2 Thermophysical parameters

4 正交试验设计

诸多因素可以对铸件的品质产生影响，如模具预热温度、浇注温度、压射速度、保压时间等。本文试验目的是为了获得缩松、缩孔和热裂倾向指数较小的高质量铸件，且要尽量减少压铸时间。正交试验是一种高效的多因素分析方法，通过正交表设计试验，可以得出每个因素对试验指标的影响趋势，从而获得最优工艺参数。因此采用正交试验的方法，以浇注温度（A）、模具温度（B）、压射速度（C）、保压时间（D）为因素，缩松、缩孔、热裂倾向指数为指标建立四因素三水平正交试验。表2为因素水平表，表3为正交试验结果。

表2 四因素三水平表
Table 2 Table of the four factors and three levels

因素	水平1	水平2	水平3
浇注温度(A)/°C	690	710	730
模具温度(B)/°C	200	220	240
压射速度(C)/(m·s ⁻¹)	4	6	8
保压时间(D)/s	3	5	7

表3 L9 (3⁴) 正交试验结果
Table 3 The results of the L9 (3⁴) orthogonal experiment

试验序号	A/°C	B/°C	C/(m·s ⁻¹)	D/s	Y1/cm ³ (缩松缩孔)	Y2 (热裂倾向)
1	690	200	4	3	0.744 0	0.172 6
2	690	220	6	5	0.750 6	0.172 9
3	690	240	8	7	0.740 0	0.165 0
4	710	200	6	7	0.852 2	0.193 4
5	710	220	8	3	0.803 0	0.194 5
6	710	240	4	5	0.744 1	0.181 4
7	730	200	8	5	0.853 1	0.217 0
8	730	220	4	7	0.817 8	0.206 7
9	730	240	6	3	0.805 5	0.193 5

缩松、缩孔仅统计中间部分的零件，浇注系统和溢流槽中缺陷体积排除在外；热裂倾向指数HTI (Hot Tearing Indicator) 通过选取铸件中各个部位具有代表性的节点，比如模型中的薄壁区、厚壁区、远端以及薄厚连接过渡区等，如图7所示。将这些节点的热裂倾向指数进行相加，作为每组工艺参数下热裂倾向的评价指标。HTI热裂纹预测模型通过计算固相分数在50%和99%之间的网格中节点的塑性总应变的积累值，来衡量铸件在不同节点处的热裂纹敏感性^[14]。值得注意的是，该模型只能给出热裂纹预测的敏感可能性，并不能判断是否一定会出现热裂纹。

$$HTI = e_{ht} = \int_{t_c}^{t_s} \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right) \dot{\epsilon} : \dot{\epsilon}} dt, \quad t_c \leq t \leq t_s \quad (6)$$

式中： t_c 为温度达到固相线温度时的时间，s； t_s 为温度达到晶粒相互接触时的时间，s； $\dot{\epsilon}$ 为等效应变速率。

5 模拟结果分析

根据正交试验的结果，分析铸件缩松、缩孔、铸件热裂倾向指数，结果见表4。

表4 极差分析表
Table 4 Range analysis table

因素	水平	A	B	C	D
缩松	K ₁	0.744 9	0.816 4	0.768 6	0.784 2
	K ₂	0.799 8	0.790 5	0.802 8	0.782 6
缩孔	K ₃	0.825 5	0.763 2	0.798 7	0.803 3
	R ₁	0.080 6	0.053 2	0.034 1	0.020 7
热裂倾向指数	K ₁	0.170 2	0.194 3	0.186 9	0.186 9
	K ₂	0.189 8	0.191 4	0.186 6	0.190 4
	K ₃	0.205 7	0.180 0	0.192 2	0.188 4
R ₂	0.035 6	0.014 4	0.005 6	0.003 6	

5.1 缩松、缩孔的极差分析

针对缩松、缩孔的统计结果进行极差分析，结果如图3所示。可知，浇注温度对缩松、缩孔的影响尤为显著，浇注温度越高，铸件整体温度分布越不均匀，不利于凝固，故铸件的缩松、缩孔呈增加的趋势；模具温度越高，铸件的缩松、缩孔呈逐渐减小的趋势；压射速度越大，充型过程中金属液的流动状态越紊乱，缩松、缩孔呈先增加后减小的趋势；保压时间越长，缩松、缩孔呈先减小后增加的趋势。压铸工艺参数对缩松、缩孔的影响程度由大到小依次为：浇注温度、模具温度、压射速度、保压时间。

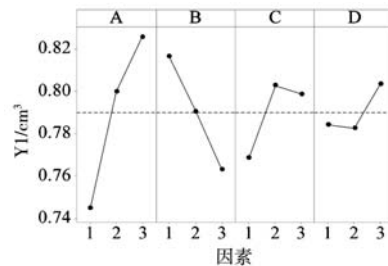


图3 缩松缩孔的均值

Fig. 3 The mean value of the shrinkage porosity

5.2 热裂倾向指数的极差分析

针对热裂倾向指数的统计结果进行极差分析，结果如图4所示。可知，浇注温度越高，镁合金氧化越

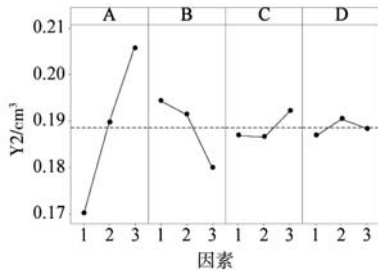


图4 热裂倾向的均值

Fig. 4 The mean value of the hot tearing tendency

严重,且容易产生黏膜,在凝固过程中增大了铸件的收缩力,铸件的热裂倾向指数呈现增加的趋势;模具温度越高,铸件凝固时的冷却速率越低,温度梯度越小,铸件凝固得越均匀,铸件的热裂倾向指数呈现减小的趋势;压射速度越大,铸件的热裂倾向指数呈现先减小后增加的趋势;保压时间越长,铸件的热裂倾向指数先增加后减少。压铸工艺参数对热裂倾向指数的影响程度由大到小依次为:浇注温度、模具温度、压射速度、保压时间。

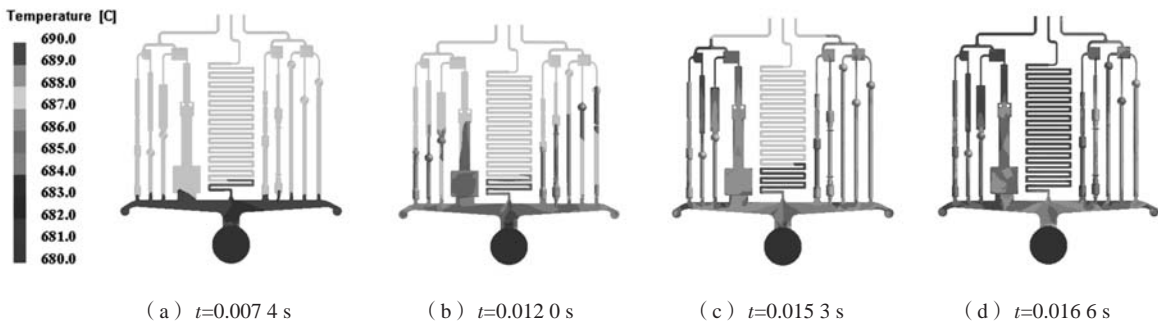


图5 镁合金压铸铸件充型模拟过程图

Fig. 5 Mold filling simulation process of the magnesium alloy die casting

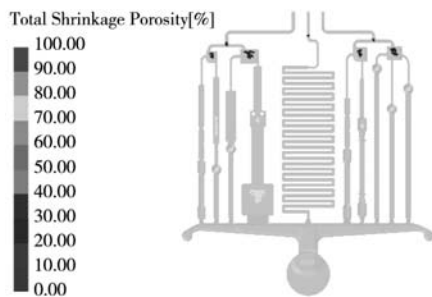


图6 缩孔、缩松分布及统计区域

Fig. 6 Distribution and statistical area of the shrinkage porosity

依据极差分析结果可得,第3组缩松、缩孔最少,为 0.7400 cm^3 ;热裂倾向指数最小,为 0.1650 ,故实际生产中按照缺陷数量和热裂倾向指数最优工艺参数进行试验,即第3组工艺参数:浇注温度 $690 \text{ }^\circ\text{C}$ 、模具温度

6 优化方案数值模拟

据优化出的工艺参数对镁合金压铸铸件进行数值模拟,铸件充型过程、缺陷分布、热裂结果预测分别见图5-图7。

由图5可知,金属液经过浇注系统进入型腔内,先填充左右两部分,然后向中间蛇形区域填充,直到铸件被填满,充型过程完毕。在充型过程中,速度较快,耗时较短,铸件金属液温度均在液相线温度以上,避免了产生冷隔缺陷。

由图6可知,随着铸件凝固的进行,体积小的区域率先凝固,使得凝固后期体积大的区域无法获得足够的金属液进行补缩,因此这些区域容易出现缩孔、缩松缺陷。

由图7可知,铸件的薄厚过渡区域和圆角较大区域的热裂倾向性较大,如圆球与长杆的连接处、不同厚度台阶的过渡区等,这些部位是应力集中区域,其他区域热裂倾向性较低。

以缩松、缩孔及热裂倾向指数为主要参考因素,

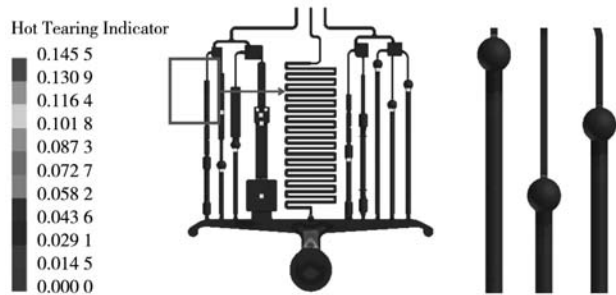


图7 热裂预测结果及节点选取位置

Fig. 7 The prediction result of the HTI and node selection location

$240 \text{ }^\circ\text{C}$ 、压射速度 8 m/s 、保压时间 7 s 。

7 生产验证

选用FRECH QC830冷室压铸系统,利用优化的

工艺参数进行压铸生产。图8a为生产出来的铸件，图8b为热裂倾向试样的细节照片，图中试样热裂倾向较小，无热裂纹的产生。此铸件尺寸较小，为了验证模拟的指导意义，使用模拟结果最差的工艺参数浇注铸件，即正交表中第7组参数：浇注温度为730 ℃、模具温度为200 ℃、压射速度为8 m/s、保压时间为5 s，如

图9c、d所示。图中合金热裂倾向试样充型完好，无热裂纹的产生，但薄片试样和台阶试样厚度较小区域无法完全充型。

对于此铸件，热裂倾向试样数量最多，以长杆的长度由短到长分别记为试样1、2、3、4、5。以试样3为例，选取一些点进行缺陷位置验证，如图9所示。

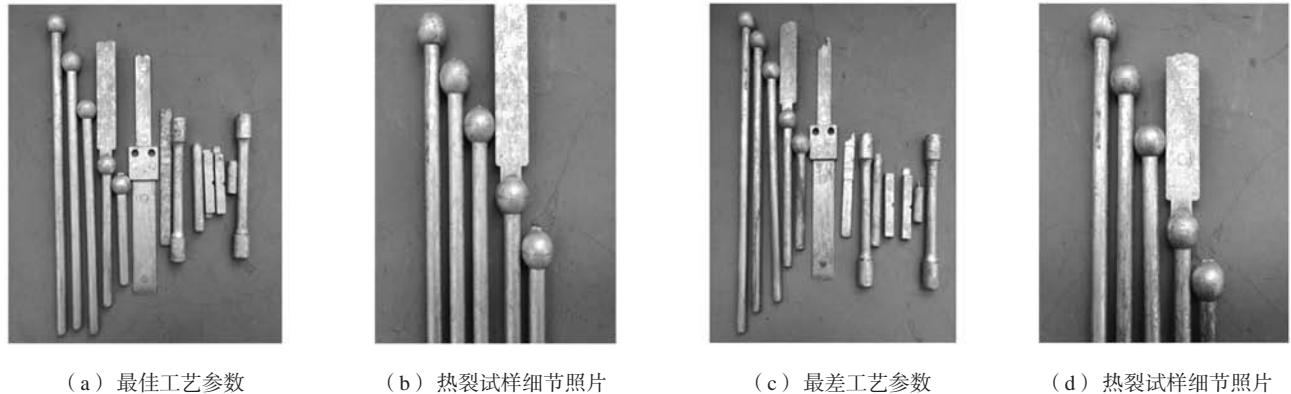


图8 镁合金压铸铸件照片

Fig. 8 Images of the magnesium alloy die castings



图9 选点示意图

Fig. 9 The schematic drawing of the choose points

按照图的取点部位，对最优工艺参数组合中的热裂倾向试样3横截面进行切割，结果如图10所示。可见在点4截面处存在缩松、缩孔缺陷，中心部位尤为明显，其他部位无缺陷产生，这和数值模拟的结果相一致。

采用ProCAST中CAFé模块对以上四个截面进行微观组织模拟，采用的形核和生长参数为：面形核 $\Delta T_{s,max}=36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_{s,\sigma}=1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $n_{s,max}=4.1109\text{ m}^{-2}$ ，体形核 $\Delta T_{v,max}=8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_{v,\sigma}=2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $n_{v,max}=7.81014\text{ m}^{-3}$ ，生长参数为 $a_2=1.0\times 10^{-7}\text{ ms}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$ 、 $a_3=3.5\times 10^{-8}\text{ ms}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-3}$ 。四个截面表面和中心的微观结构分析结果和模拟结果如图11所示。结果表明，模拟得到的晶粒形貌与试验结果基本一致。

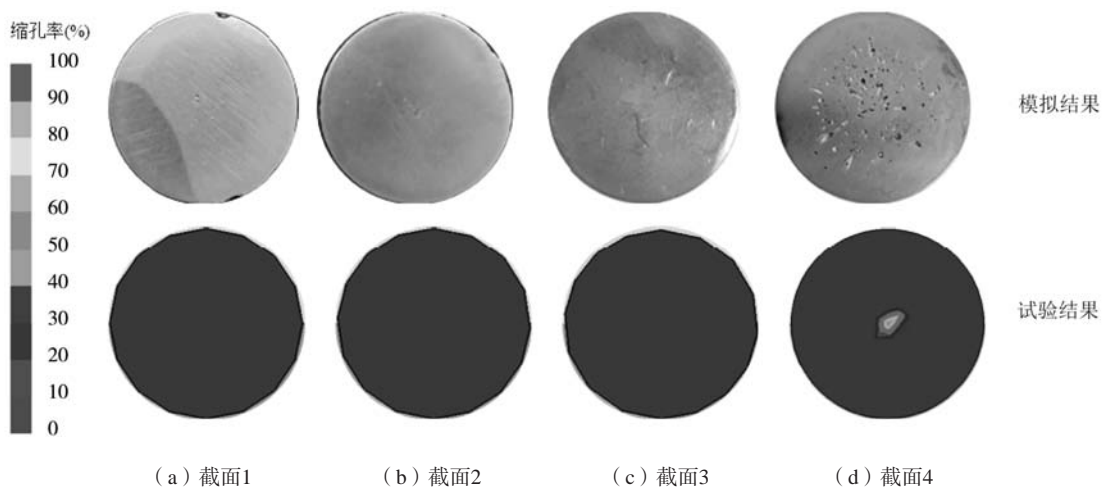


图10 试样3不同位置模拟与试验结果

Fig. 10 Simulation and experimental results of the sample 3 at different positions

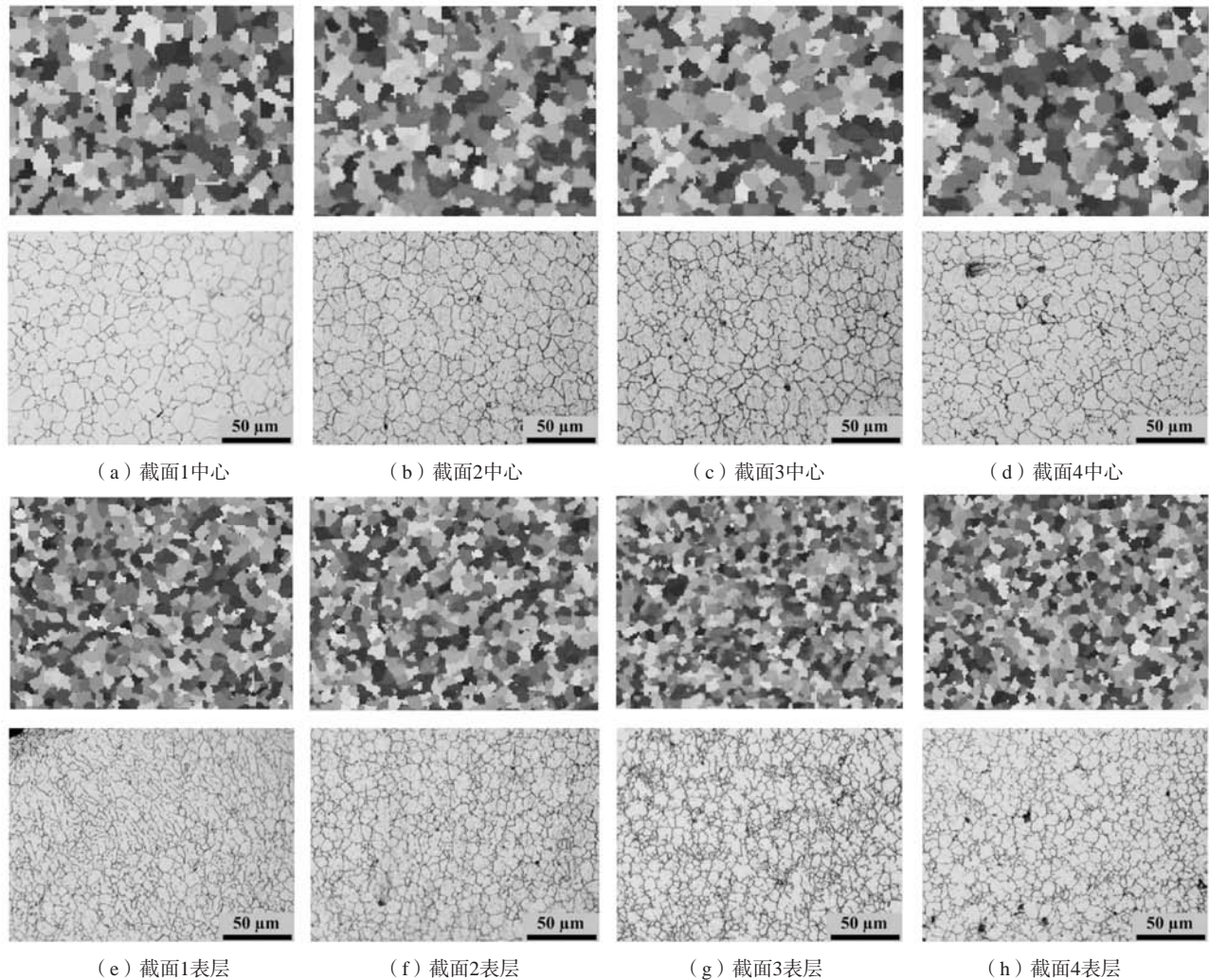


图11 模拟结果与试验结果的对比

Fig. 11 Comparison between simulation results and test results

8 结论

(1) 对稀土镁合金铸件进行了压铸工艺数值模拟, 得到了优化后的工艺参数: 浇注温度为 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$, 模具温度为 $240\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压射速度为 8 m/s , 保压时间为 7 s 。

(2) 建立镁合金压铸的正交试验, 得出浇注温度

对缩松、缩孔和热裂倾向指数综合影响相对较大。

(3) 根据镁合金压铸的数值模拟结果, 进行了压铸试验, 获得铸件表面平整、光滑, 没有明显的裂纹等缺陷, 并且对缺陷位置和微观组织进行了试验验证。

参考文献:

- [1] 陈月凤, 陈玉师. 镁合金轮毂的铸造工艺与组织性能 [J]. 铸造, 2020, 69 (7): 737-742.
- [2] 樊振中, 陈军洲, 陆政, 等. 镁合金的研究现状与发展趋势 [J]. 铸造, 2020, 69 (10): 1016-1029.
- [3] 魏言标, 陈少旭, 王俊有, 等. 管理六因素 (5M1E) 的压铸工艺维稳策略 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 327-333.
- [4] WEI J, WANG Q D, ZHANG L, et al. Effects of Gd addition on the microstructure and tensile properties of Mg-4Al-5RE alloy produced by three different casting methods [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 34 (10): 1361-1374.
- [5] DOU K, LORDAN E, ZHANG Y J, et al. Numerical simulation of fluid flow, solidification and defects in high pressure die casting (HPDC) process [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 529 (1): 1-6.
- [6] VISPUTE P, CHAUDHARI D. Utilizing flow simulation in the design phase of a casting die to optimize design parameters and defect analysis [J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 04 (8): 9256-9263.
- [7] 王洪波, 董金善. 基于ProCAST的减速电机齿轮箱体挤压铸造模拟分析 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (23): 70-72+75.

- [8] 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.
- [9] 潘成刚, 雷志斌, 周家林, 等. 基于ProCAST和正交试验法优化压铸模具寿命 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (6): 611-614.
- [10] WANG D, SU Y, BAI M, et al. Design and optimization of die casting process for magnesium alloy radar shell based on numerical simulation [A]. 2017 International Conference on Mechanical and Mechatronics Engineering [C]. Lancaster: DEStech Publications, 2017: 234-239.
- [11] CAO G, KOU S. Hot hearing of ternary Mg-Al-Ca alloy castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37 (12): 3647-3663.
- [12] KWON H J, KWON H K. Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2018, 55: 147-153.
- [13] 李二龙, 冯孔方, 郭海荣, 等. 多流式连铸过渡包的结构优化 [J]. 钢铁研究学报, 2021, 33 (9): 943-951.
- [14] LIU S S, BAI L, WANG B, et al. Numerical simulations of solidification and hot tearing for continuous casting of duplex stainless steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27 (6): 643-655.

Numerical Simulation and Orthogonal Experimental Study on Die Casting Process of Rare Earth Magnesium Alloy

PENG Pai^{1,2}, WU Guang-xin^{1,2}, MA Zheng^{1,2}, WANG Bo^{1,2}, ZHANG Jie-yu^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract:

In this paper, the filling and solidification process of magnesium alloy die casting was numerically simulated. Based on orthogonal experimental design, the effects of pouring temperature, mold temperature, injection speed and holding time on shrinkage porosity, hot tearing tendency were studied. Combined with the simulation results, the best die casting process parameters was obtained: 690 °C pouring temperature, 8m/s injection speed, 240 °C mold temperature and 7 s holding time. The optimized die casting process parameters reduced the shrinkage porosity and hot tearing tendency on the die casting. Good quality magnesium alloy die casting was obtained by using process parameters, and the defect location and microstructure were verified.

Key words: orthogonal test; magnesium alloy; die casting; numerical simulation
