

薄壁 AlSi10MnMg 结构件压铸工艺数值模拟与优化

赵旭, 王平, 常东旭, 孙晶莹

(东北大学材料学院EPM实验室, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 以某薄壁AlSi10MnMg铝合金结构件为研究对象, 利用正交试验法, 设计多因素多水平正交试验寻求优化工艺参数组合。利用Pro/Engineer对浇注系统和铸件整体进行三维建模。在Flow-3D软件导入几何模型, 对不同参数水平组合下的铸件充型状态进行数值模拟, 得到充型结束后的卷气模型示意图。利用Photoshop对输出图片中铸件的卷气含量比例进行计算, 对单指标的试验结果进行直观分析, 得出最优参数, 从而完成对压铸工艺的优化。使用优化的工艺进行生产验证, 微观组织观察和X射线检测结果显示铸件质量良好。

关键词: AlSi10MnMg合金; 压铸; Flow-3D; 数值模拟; 工艺优化

近年来, 由于汽车轻量化的需求, 如悬挂梁、承重梁及轮毂等AlSi10MnMg铝合金压铸件在汽车工业中得到了越来越多的应用^[1-2]。其密度低、流动性好、收缩率低及力学性能优良等优点, 使得这类零件广泛应用在汽车白车身或底盘等结构部分^[3-4]。AlSi10MnMg压铸件具有尺寸精度高、壁厚小且结构复杂等特点^[5-7], 在充型过程中, 铝合金熔体在压力作用下以极快的速度充入型腔, 但会因为参数设计不合理等原因导致型腔内气体没有足够时间排出, 导致卷气等缺陷的发生, 因此分析充型过程中的卷气情况是此类零件加工过程中的一个关键问题^[8-10]。

本文采用了Pro-E对压铸模具进行了建模, 使用流体建模软件Flow-3D对不同参数下压铸充型过程中的卷气模型进行数值模拟, 使用Photoshop软件对卷气比例进行了计算, 采用正交试验的方法分析了不同压铸工艺参数对薄壁压铸件充型的影响, 确定了最终合理的工艺参数, 并对优化后的参数进行了实际生产验证, 验证了优化参数的合理性, 为后续生产提供指导与参考。

1 建模初始条件及正交试验设计

图1为由Pro-E建立的该薄壁铝合金结构件的三维模型。零件材质为AlSi10MnMg合金, 其化学成分如表1所示, 合金各物理参数如表2所示。模具材料为H13钢, 模具材料物理参数如表3所示。浇注系统采用梳状设计, 边缘壁厚6 mm, 主体部分壁厚3 mm, 加强筋高度2 mm, 外形尺寸250 mm × 80 mm × 6 mm。

模拟过程取网格尺寸为0.8 mm, 网格总数为16 945 929。用于数值模拟的初始边界条件如表4所示, 熔体温度为650~740 °C, 模具温度为120~195 °C, 充型速度1~3.5 m/s, 模具与铸件间换热系数为2 000 W/(m²·K), 模具间换热系数为1 000 W/(m²·K)。

压铸充型过程中的影响因素很多, 主要为压射压力、充型速度、熔体温度与模具温度等, 这些因素相互影响, 对铸件质量产生交互作用。本文主要针对压铸过程中的熔体温度、模具温度与充型速度对充型过程中卷气情况的影响进行研究, 进行3因素6水平的正交试验模拟, 从而得到一组优化的生产参数, L₃₆(6³)正交试验

作者简介:

赵旭(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为铝合金结构件的加工工艺及相关连接性能。E-mail: zhaoxu19900104@163.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

06-0623-05

收稿日期:

2019-03-21 收到初稿,

2019-05-16 收到修订稿。

的各因素和水平如表5所示。

2 模拟结果分析及讨论

根据 $L_{36}(6^3)$ 正交试验表对36组不同参数下充型过程的卷气情况进行了模拟,参数组合如表6所示。如图2所示为经过数值模拟得到的36组卷气模型中的3组典型数值模拟结果。

本文采用正交试验方法,利用部分试验代替了整体试验。为了解决实际所做的少数试验与要求掌握的内在规律之间的矛盾,我们需要对试验结果进行分析,从而掌握试验的本质规律。但是Flow-3D仅能输出包含浇注系统的整体卷气率,无法获取准确的零件内卷气含量数据,并且该零件为3 mm薄壁件,可以将模拟结果正视图中卷气区域作为三维卷气区域进行考察,所以利用Photoshop对Flow-3D输出的卷气模型正视图中的含气区域进行像素计算,并与零件本体总像素数进行比较,从而根据后续的正交试验结果进行卷气率分析。首先在Photoshop中打开卷气模型图片,然后利用磁性套索工具圈出零件部分,通过直方图查看零件的像素值。再使用色彩范围选择出卷气区域,即零件图片内浅色区域,通过直方图查看卷气区域的像素,如图3所示。利用公式卷气比=卷气区域像素数/零件总像素数,获取含气比例。正交试验各参数及对应数值模拟卷气模型的含气比例如表6所示。

根据表6中各列的各水平效应值来计算 K_{mf} 、 $\overline{K_{mf}}$ 以及极差 R 值(K_{mf} : m 列中 f 号的水平相应指标值之和; $\overline{K_{mf}}$: m 列中 f 号码水平的重复次数;极差 R 是反映数据波动大小的重要指标),计算结果如表7所示。对于A因素,即熔体温度因素, $\overline{K_{A2}} > \overline{K_{A3}} > \overline{K_{A1}} > \overline{K_{A5}} > \overline{K_{A4}} > \overline{K_{A6}}$,则最佳熔体温度为740℃;对于B因素,即充型速度, $\overline{K_{B5}} > \overline{K_{B3}} > \overline{K_{B2}} > \overline{K_{B4}} > \overline{K_{B6}} > \overline{K_{B1}}$,则最佳充型速度为1 m/s;对于C因素,即模具温度, $\overline{K_{C5}} > \overline{K_{C6}} > \overline{K_{C4}} > \overline{K_{C3}} > \overline{K_{C1}} > \overline{K_{C2}}$,则最佳模具温度为135℃。

3 生产验证

以正交分析所得最优水平组合为工艺参数进行实际的零件压铸。首先,在保温炉中将坩埚预热至300~400℃。然后,将预热到200℃的铝锭放入坩埚中,并在坩埚炉中加热。当熔体的温度达到740℃时,用氩气保护后准备压铸。然后利用喷枪将模具加热到135℃,采用400 t压铸机进行生产,实际零件重量1 270 g(含浇注系统),外观如图4所示。从零件的左、中、右各部分切割金相测试样品,使用Leica金相显微镜观察零件的微观组织。本试验观察了零件各部分100倍微观组织,如图5所示。随后对生产出的零件

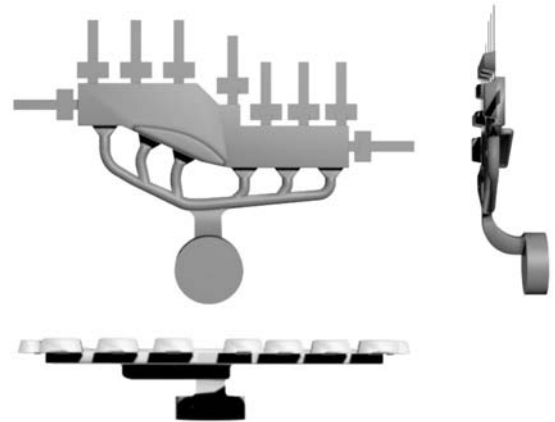


图1 薄壁AlSi₁₀MnMg结构件及浇注系统的三维模型三视图
Fig. 1 Three-dimensional three views of gating system models for thin-wall AlSi₁₀MnMg structural parts

表1 AlSi₁₀MnMg合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of AlSi₁₀MnMg alloy $w_B/\%$

Si	Mg	Mn	Fe	Mn/Fe	Ti	Sr	Zn	Cu	Al
10.57	0.361	0.526	0.228	2.31	0.061	8.0	0.014	4.0	0.000 9300.001 89 88.2

表2 AlSi₁₀MnMg合金的物理参数^[5]
Table 2 Materials parameters of AlSi₁₀MnMg alloy^[5]

密度	液相线	潜热	比热
$/(kg \cdot m^{-3})$	/固相线/K	$/(kJ \cdot kg^{-1})$	$/(kJ \cdot kg^{-1} K^{-1})$
2 472	897/825	332	1.245

表3 H13钢的物理参数^[5]

Table 3 Physical parameters of H13 steel

密度	液相线	热导率	比热
$/(kg \cdot m^{-3})$	/固相线/K	$/(W \cdot m^{-1} K^{-1})$	$/(kJ \cdot kg^{-1} K^{-1})$
7 367	1 148/11 475	28.07	0.726 2

表4 用于计算机模拟的初始和边界条件
Table 4 Initial and boundary conditions for the simulation

模具温度	熔体温度	快速充型速度	模具间换热系数	模具与铸件换热系数
/℃	/℃	$/(m \cdot s^{-1})$	$/(W \cdot m^2 K^{-1})$	$/(W \cdot m^2 K^{-1})$
120~195	650~740	1~3.5	1 000	2 000

表5 $L_{36}(6^3)$ 正交试验因素水平表
Table 5 Factors and levels for $L_{36}(6^3)$ orthogonal experiment

因素/水平	熔体温度/℃	模具温度/℃	充型速度/ $(m \cdot s^{-1})$
1	665	120	1
2	680	135	1.5
3	695	150	2
4	710	165	2.5
5	725	180	3
6	740	195	3.5

表6 36组数值模拟参数及所得卷气模型的含气比例
Table 6 36 groups of filling parameters and corresponding air entrapment ratio

试验 序号	熔体温度 /°C	充型速度 / (m·s ⁻¹)	模具温度 /°C	含气比例 /%	试验 序号	熔体温度 /°C	充型速度 / (m·s ⁻¹)	模具温度 /°C	含气比例 /%
1	665	1	120	7.06	19	710	1	165	7.49
2	665	1.5	135	8.29	20	710	1.5	150	8.08
3	665	2	150	10.23	21	710	2	135	8.29
4	665	2.5	165	7.06	22	710	2.5	120	7.67
5	665	3	180	10.3	23	710	3	195	9.18
6	665	3.5	195	7.59	24	710	3.5	180	7.4
7	680	1	135	7.27	25	725	1	180	7.06
8	680	1.5	120	9.61	26	725	1.5	195	7.55
9	680	2	165	10.48	27	725	2	150	8.00
10	680	2.5	150	7.47	28	725	2.5	165	9.56
11	680	3	195	10.13	29	725	3	120	9.24
12	680	3.5	180	7.51	30	725	3.5	135	7.38
13	695	1	150	6.72	31	740	1	195	7.02
14	695	1.5	165	8.27	32	740	1.5	180	7.56
15	695	2	120	9.58	33	740	2	165	7.09
16	695	2.5	135	7.85	34	740	2.5	150	7.93
17	695	3	180	11.04	35	740	3	135	8.14
18	695	3.5	195	8.61	36	740	3.5	120	4.31

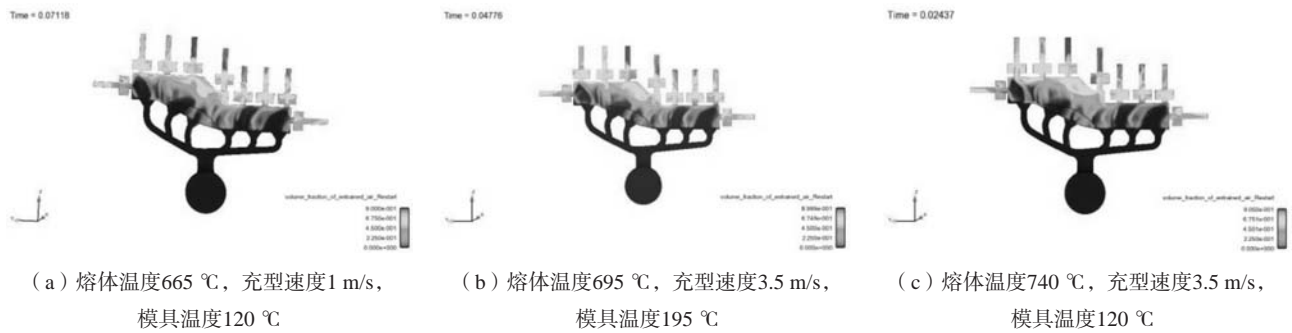


图2 L₃₆ (6³) 正交试验充型过程卷气模型模拟结果 (a.序号1, b.序号18, c.序号36)
Fig. 2 Air entrapment simulation results of filling process in L₃₆ (6³) orthogonal experiment (a. No.1, b. No.18, c. No.36)

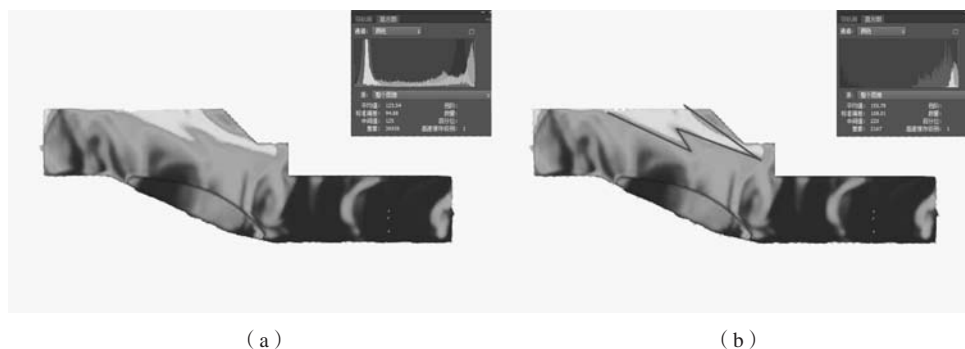


图3 使用Photoshop对数值模拟卷气模型中卷气比例进行像素处理
Fig. 3 Pixel processing for air entrapment ratio using Photoshop

表7 数值模拟铸造工艺参数正交分析结果
Table 7 Orthogonal analysis results for different filling parameters

K	A (熔体温度)	B (充型速度)	C (模具温度)	\bar{K}	A (熔体温度)	B (充型速度)	C (模具温度)
K_1	50.53	42.62	47.47	\bar{K}_1	8.42	7.10	7.91
K_2	52.47	49.36	47.22	\bar{K}_2	8.75	8.23	7.87
K_3	52.07	53.67	48.43	\bar{K}_3	8.68	8.95	8.07
K_4	48.11	47.54	49.95	\bar{K}_4	8.02	7.92	8.33
K_5	48.79	58.03	50.87	\bar{K}_5	8.13	9.67	8.48
K_6	42.05	42.8	50.08	\bar{K}_6	7.01	7.13	8.35
极差 R	A (1.74)		B (2.57)		C (0.61)		
因素主次	充型速度>熔体温度>模具温度		最佳水平组合		充型速度1 m/s >熔体温度740 °C >模具温度135 °C		

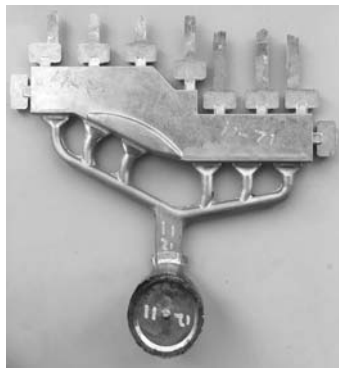


图4 实际生产的压铸件外观形貌
Fig. 4 Surface morphology of actual produced die-casting parts

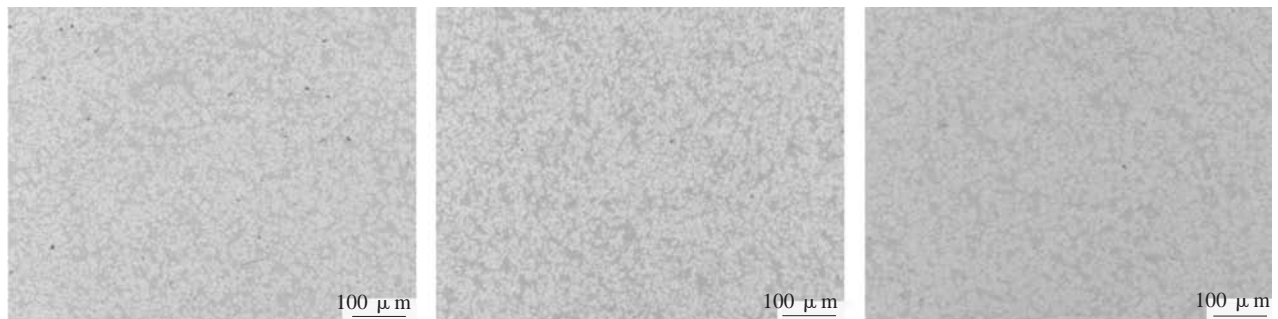


图5 压铸件的各部分金相组织
Fig. 5 Microstructures of different positions of die-casting parts

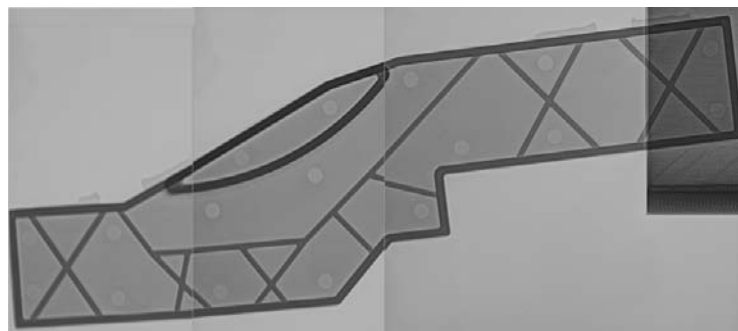


图6 实际生产压铸件X射线探伤结果
Fig. 6 X-ray testing results of actual produced die-casting parts

进行了X射线检测（检测结果如图6所示），由金相照片可以看出以最佳水平组合生产出的零件内部组织致密，在关键检测位置几乎不存在卷气现象，X射线检测结果中同样观察不到明显的气孔存在，实际生产结果与通过数值模拟得到的优化结果符合良好。

4 结论

（1）经过对正交试验结果的分析，得到了三个影响因素对压铸试验的影响主次以及该试验设计下的优化工艺参数。根据极差的大小判断，在变化的水平范

围内，充型速度对结果造成的影响最大，三个因素的主次排序为充型速度>熔体温度>模具温度；根据卷气比例平均值的大小判断每个因素的最优水平，一般希望卷气含量越少越好，因此得到的最优水平组合为熔体温度740℃、充型速度1 m/s、模具温度135℃，此即为该试验设计下的优化工艺参数。

（2）根据数值模拟所得优化工艺参数进行实际生产试验，制备的AlSi10MnMg结构件具有良好的内部质量。试验结果与模拟结果符合良好，即采用数值模拟得到的优化工艺参数，成功生产出形状一致、表面光滑、组织致密的薄壁AlSi10MnMg结构件。

参考文献：

- [1] 李荣德, 于海朋, 袁晓光, 等. 压铸技术的发展与应用 [J]. 铸造, 2003 (8): 597-601.
- [2] 彭余恭, 陈金城. 压铸机的分类及其工作方式 [J]. 铸造, 2005 (2): 179-181.
- [3] 葛继龙. 压铸速度对ADC12压铸件微观组织与力学性能的影响 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [4] 朱必武, 刘筱. 铝合金薄壁压铸件研究现状及进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (9): 931-934.
- [5] ZHU Biwu, LI Luoxing, LIU Xiao, et al. Effect of viscosity measurement method to simulate high pressure die casting of thin-wall AlSi10MnMg alloy castings [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24 (12): 5032-5036.
- [6] 付宇. 压铸技术在汽车零部件生产中的应用 [J]. 金属加工 (热加工), 2009 (11): 16-19.
- [7] JIANG Wenming, FAN Zitian. Gating system optimization of low pressure casting A356 aluminum alloy intake manifold based on numerical simulation [J]. China Foundry, 2014, 11 (2): 119-124.
- [8] 黄锐. 汽车安全带旋转芯轴压铸件的充型模拟及模具设计 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [9] 薄兵. 汽车用铝合金压铸件的工艺优化与组织及缺陷控制 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [10] 李戡, 雷富军. 铸件中气孔缺陷成因分析 [J]. 冶金信息导刊, 2008, 45 (6): 47-49.

Numerical Simulation and Optimization of Die-Casting Processes for Thin-wall AlSi10MnMg Structural Parts

ZHAO Xu, WANG Ping, CHANG Dong-xu, SUN Jing-ying

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China.)

Abstract:

This study takes a thin-wall AlSi10MnMg structural part as the research object, an orthogonal experiment with multi factors and levels was designed for studying the optimal die-casting process parameters. Three-dimensional gating system and casting parts were modeled by Pro-E software. Simulation software Flow-3D was employed to import the geometrical model and to simulate the filling state of the mold cavity under different levels of parameter combinations. The air entrapment volume at the end of the filling stage was measured to calculate the air entrapment ratio of the casting in the output picture by software Photoshop. The experimental results of the single output index were analyzed intuitively and the optimal parameters were obtained. The optimization results were verified by actual production, and the experimental results showed that the components produced by optimized parameters have a satisfying quality.

Key words:

AlSi10MnMg alloy; die casting; Flow-3D; numerical simulation; process optimization