

# 高效率镁合金轮毂压铸件大批量化生产工艺研究

张占领<sup>1</sup>, 张艳琴<sup>2</sup>, 郭怀宫<sup>3</sup>

( 1. 郑州科技学院 机械工程学院, 河南郑州 450064; 2. 郑州经贸学院 计算机与人工智能学院, 河南郑州 451191;  
3. 北京金辉国际投资有限公司, 北京 100120 )

**摘要:** 以AM60B镁合金轮毂为例, 研究了压射速度、铸型温度和浇注温度对压铸件缺陷的影响。通过计算由虚拟实验得到的缺陷体积的信噪比, 求解了不同因素在不同水平下的信噪比的均值和极差, 进而获得优化的压铸工艺。经大批量化生产优化, 得出的最优压铸工艺参数为: 压射速度为0.9 m/s, 铸型温度为260 °C, 浇注温度为680 °C。

**关键词:** 高效率; AM60B; 压铸件; 大批量; 生产工艺

镁合金压铸生产企业最大的追求, 就是高效率。高品质和高效率是企业生存的根本, 是参与市场竞争的主要手段, 本论文基于稳健设计<sup>[1]</sup>和大批量生产相结合的方式, 对镁合金轮毂压铸进行批量化生产工艺研究, 获得了高效高品质压铸件生产最佳工艺参数, 对大尺寸镁合金压铸件大批量生产具有较大的参考价值, 拓宽了镁合金应用范围, 具有较好的应用前景。具体做法为: 首先利用稳健设计方法对压铸件缺陷体积进行计算, 利用计算结果设计压铸件生产预成形工艺, 然后通过CAE仿真对工艺参数进行调整, 并对仿真结果进行分析, 以满足压铸件的质量要求<sup>[2]</sup>。在实际生产中, 由于存在操作误差、测量误差等不可控因素, 影响压铸件的成形质量, 使压铸成形工艺设计方案对产品的成形质量稳定性降低, 如何制定出最佳生产工艺参数, 成为获得高效高品质压铸件的关键<sup>[3]</sup>。

## 1 稳健设计方法

稳健设计 ( Robust Design ) 是一种综合考虑产品性能、质量和成本的新型低成本、高稳定性的现代设计方法。其基本思想是在不消除或减少不确定性因素的情况下, 通过设计尽量减少不确定性因素对产品质量的影响, 即通过接近目标值但波动小的设计解, 设计工艺方案, 来实现产品质量对噪声因素的稳定性。稳健设计方法最先是由田口玄一于20世纪70年代后期提出的, 是一种基于实验的优化方法。考虑的因素包括两类: 可控的设计参数和不可控的噪声因素。稳健设计方法包括两个基本工具: 信噪比和正交试验。信噪比也称SN比, 在参数设计中, 利用信噪比来模拟噪声因素对质量特性的影响。正交试验设计主要采用正交试验表的规格设计适当的试验方案, 确定参数的最优组合。这些组合具有“均匀分散性、整洁性和可比性”的特点。这样, 少量的试验就可以满足考察的要求, 大大提高了试验效率。

目前, 稳健设计方法已在化工、电子、农业等领域得到应用, 并取得了重大进展。但在材料成形过程中, 影响产品质量的因素很多, 在影响因素与产品质量之间建立简单的数学关系是很困难的。而稳健设计所需的测试条件实现成本过高, 造成稳健设计方法在材料成形中的应用受到限制。随着数值模拟技术的成熟, 对模拟结果进行小范围的试验, 成本较低, 稳健设计方法在材料成形中的应用将越来越有价值。

## 2 稳健设计方法在镁合金压铸成形中的应用

以AM60B镁合金轮毂为例, 以压铸件缺陷 ( 图1 ) 的体积为测试目标<sup>[4]</sup>, 以实际

### 作者简介:

张占领 ( 1979- ), 男, 教授, 主要研究方向镁合金成形技术及智能 CAD 专家系统。E-mail: zzlyjs@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 ( 2022 )

06-0694-04

### 基金项目:

国家自然科学基金资助项目 ( 11502120 ); 河南省高等高校重点科研资助项目 ( 22B520033 ) 。

### 收稿日期:

2022-01-10 收到初稿,

2022-03-03 收到修订稿。

压铸过程中可能出现的工艺参数误差为噪声因子，进行信噪比分析，获得最佳工艺参数组合。

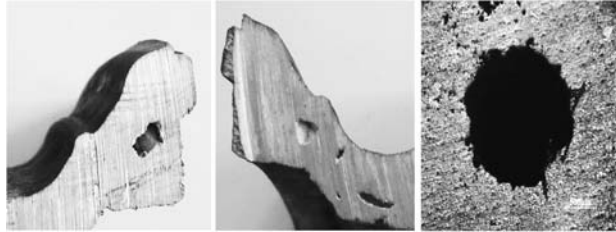


图1 铸件缩孔缩松缺陷形貌

Fig. 1 Shrinkage and dispersed shrinkage defects of the casting

## 2.1 零件三维 CAD 模型的建立

采用Pro/Engineer WildFire5.0软件进行镁合金轮毂零件的实体建模，如图2所示。轮毂铸件净重1.49 kg，最大直径460 mm，最大壁厚5.8 mm，最薄壁厚3.45 mm，材质为AM60B镁合金，具有较好的铸造性能。其化学成分见表1。根据铸件的结构和浇注系统设计的要点，压铸件浇注系统采用直流道中心浇注，无分流道设计。图1为铸件缩孔缩松缺陷形貌。



(a) 轮毂正面

(b) 轮毂反面

图2 镁合金摩托车轮毂三维造型

Fig. 2 Three dimensional modeling of the magnesium alloy motorcycle hub

## 2.2 虚拟正交试验的制定与安排

影响压铸件品质的因素很多，本论文从影响缺陷体积大小的主要工艺参数角度，确定了正交试验因素为压射

速度 $V$ 、铸型温度 $T_1$ 和浇注温度 $T_2$ 。查阅了压铸工艺参数的选择范围，得到镁合金冷室压铸的压射速度范围为0.5~1 m/s，铸型温度范围为240~260 °C，浇注温度范围为650~710 °C。考虑到在实际生产中，压力波动和温度控制误差会引起上述工艺参数的波动，将波动引起的误差视为噪声因素。根据生产现场的经验，速度波动范围在(+10%)左右，温度波动范围在(+10 °C)左右。每个噪声因子具有三个级别，如表2所示。

## 2.3 稳健性评定及结果分析

### 2.3.1 压铸件网格划分

三维模型以标准接口输出STP格式。输出文件通过GEOMESH进行优化，然后导入到ProCAST软件中。采用MeshCAST网格划分模块对三维造型进行网格划分。网格尽可能均匀，单元数量适当。三维造型网格划分后，节点数为110 553个，单元总数为562 513个。根据流动连续性原理，充填速度的三个水平值对应的压射速度分别为0.5 m/s、0.7 m/s和0.9 m/s。在ProCAST模块中，模具的边界条件选择为空气冷却，界面传热系数设定为5 000 W/(m<sup>2</sup>·K)。

### 2.3.2 虚拟正交试验结果分析

观察压铸件的充填和凝固过程。计算虚拟试验中压铸件的缺陷的体积。由于所得缺陷体积越小越好。根据所期望的信噪比函数“望小特性”，将实验结果转换为信噪比SN，分别计入各组实验中。信噪比(SN)是产品稳定性的一个重要指标。信噪比越大，产品的稳定性越好。在虚拟正交试验中，计算压铸件在没有噪声和有噪声的情况下的缺陷体积最小值和最大值，以及在噪声因子影响下的信噪比的值(表3)。

从表3可以看出，在上述9组试验中，在没有干扰因素的影响下，第1组压铸工艺参数的缺陷体积最小，

表1 AM60B化学成分

Table 1 Chemical composition of the AM60B

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	其他杂质	Mg
5.6~6.4	≤0.20	0.26~0.5	≤0.05	≤0.008	≤0.001	≤0.004	0.02	余量

为0.396 9 cm<sup>3</sup>。也就是说，当消除了所有外部条件的干扰时，第1组工艺参数的组合非常适合工业生产。然而，在实际生产过程中，不可避免地存在一些不可控因素，使得实际压铸工艺参数总是围绕理论值波动。在干扰因素的影响下，信噪比能较好地反映压铸件的质量稳定性。可以保证的缺陷体积不一定是最小的，但其波动幅度应是最小的。虚拟正交试验结果表明，第9组压铸工艺参数的信噪比最高，为7.974 3 dB。在第9组试验中，压铸件的质量稳定性最好。在干扰因素的影响下，第9组工艺参数生产的压铸件与第1组工艺参数

表2 工艺参数与噪声因子级别  
Table 2 Process parameters and noise factor level

因子	级别			
	1	2	3	
工艺参数	压射速度 $V/(m \cdot s^{-1})$	0.5	0.7	0.9
	铸型温度 $T_1/^\circ C$	240	250	260
	浇注温度 $T_2/^\circ C$	650	680	710
噪声因子	压射速度 $V/(m \cdot s^{-1})$	0.9V	1.0V	1.1V
	铸型温度 $T_1/^\circ C$	0.95 $T_1$	1.0 $T_1$	1.05 $T_1$
	浇注温度 $T_2/^\circ C$	0.98 $T_2$	1.0 $T_2$	1.02 $T_2$

表3 虚拟工艺参数正交试验结果  
Table 3 Orthogonal test results under the virtual process parameters

试验号	A压射速度 $V/(m \cdot s^{-1})$	B铸型温度 $T_1/^\circ C$	C浇注温度 $T_2/^\circ C$	缺陷体积/ $cm^3$			信噪比/dB
				无噪声	有噪声		
					最大值	最小值	
1	0.5	240	650	0.356 9	0.518 9	0.449 2	6.668 3
2	0.5	250	680	0.497 1	0.498 3	0.368 4	7.492 8
3	0.5	260	710	0.514 0	0.519 0	0.355 7	7.824 3
4	0.7	240	680	0.577 8	0.604 9	0.459 4	5.307 7
5	0.7	250	710	0.582 7	0.611 6	0.447 9	5.842 3
6	0.7	260	650	0.439 3	0.452 3	0.375 6	7.622 3
7	0.9	240	710	0.506 9	0.622 9	0.397 9	5.885 4
8	0.9	250	650	0.543 1	0.547 3	0.352 4	6.921 5
9	0.9	260	680	0.453 5	0.475 1	0.356 3	7.974 3

相比质量更稳定。

信噪比的值对应于各因素的水平。通过计算各级各因子的信噪比均值，进一步获得了信噪比因子水平的极差值。可以预测出针对试验目标响应的测试因子的最佳组合，即一套保证了产品质量的最稳定压铸工艺参数。同时，极差值的大小表示了相应因素的影响大小，极差值较大，表明该因素较活跃，其变化对结果影响也很大；极差值较小，其变化对结果影响也很小。该算法简单、直观，易于使用。在表4列出了信噪比均值和不同级别因素的极值的对比结果。

从表4可以看出，极差值最大对应的是铸型温度，最小对应的是浇注温度，因此，试验因素的顺序是铸型温度、压射速度和浇注温度。表4中各因素的平均信噪比用图3表示，可以更直观地解释工艺参数对缺陷的影响。从图3可以看出，当压铸工艺参数的组合为

表4 信噪比均值与极差

Table 4 Mean and range of different signal-to-noise ratios

因子	A压射速度	B铸型温度	C浇注温度
	$V/(m \cdot s^{-1})$	$T_1/^\circ C$	$T_2/^\circ C$
1级信噪比均值	7.329	5.953	7.066
2级信噪比均值	6.254	6.752	6.996
3级信噪比均值	6.926	7.804	6.685
极差	1.075	1.851	0.381

A1B3C1时，信噪比最大，即压铸件的质量稳健性最好。此时，压射速度为0.9 m/s，铸型温度为260 °C，浇注温度为680 °C，与上述9组试验中第9组工艺参数正好吻合。若上述9组试验中没有优化得到的工艺参数组合，需要重新模拟和验证。

当工艺参数为A1B3C1时，采用ProCAST软件进行数值模拟，得到不考虑噪声的缺陷体积(0.398 3  $cm^3$ )。当受噪声因素影响时，缺陷的最大体积为0.436 1  $cm^3$ ，

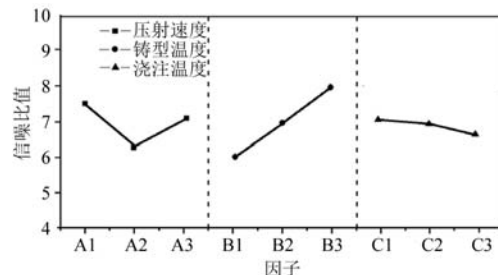


图3 工艺参数不同对应的信噪比值

Fig. 3 Signal noise ratio values corresponding to different process parameters

最小体积为0.319 9  $cm^3$ ，信噪比为8.211 4 dB，虽然比正交试验表中任何一组试验结果都大了一些，但也是信噪比值最大的，结果是一致的。

### 3 生产验证

通过ProCAST软件模拟结合稳健设计方法对压铸工艺参数进行优化下，得到的最佳压铸工艺参数为：压射速度为0.9 m/s，铸型温度为260 °C，浇注温度为680 °C。根据该工艺参数对镁合金轮毂铸件进行的大批量生产验证，在实际生产中，压铸工艺参数分别取压射速度为0.7~1.3 m/s，铸型温度为200~300 °C，浇注温度为650~710 °C，结合生产效率需要，保压时间设定为20 s。利用抗拉强度、伸长率、硬度和冲击韧性四个力学性能指标进行表征，生产实践表明，当压射速度为0.8~1.0 m/s、浇注温度为670~690 °C、铸型温度为250~270 °C时，铸件的生产效率最高，力学性能最好，即品质最好。在最佳工艺参数下得到的轮毂铸件(图4)，从图4a可以看出，镁合金轮毂压铸件外型完整，外观无缺陷，经机加工后的轮毂表面光滑，加工成产品后对表面进行涂装(图4b、4c)，外观质量美观。最后对镁合金轮毂铸件进行力学性能检测结果为：抗拉强度为227 MPa、布氏硬度为HBS71、伸长率为

10.7%和抗冲击韧性为 $18.7 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ ，以上力学性能表明，该轮毂铸件达到了轮毂技术标准要求，轮毂铸件内

部无严重缺陷，铸件经过大批量生产后，产品质量稳定，表明上述模拟结果准确。



图4 压铸镁合金摩托车轮毂铸件及最后涂装图

Fig. 4 Die cast magnesium alloy motorcycle wheel hub casting and final coating

## 4 结论

(1) 在不考虑干扰因素的情况下，第1组工艺参数的缺陷体积最小，其信噪比相对较小，但不能保证压铸件质量最稳定。当镁合金轮毂的压射速度为0.9 m/s、铸型温度为260 °C、浇注温度为680 °C时，压铸件的质量稳健性最好，同时也证明了稳健设计方法在压铸工

艺参数优化中具有可行性和指导性。

(2) 通过计算信噪比的平均值，分析各因素的影响范围，得出各因素对产品稳健性的影响程度。影响压铸件缺陷体积稳定性的最主要因素是铸型温度，其次是压射速度，浇注温度对疏松缺陷稳定性的影响最小。

### 参考文献:

- [1] 赵杰, 陈荣发, 黄志刚, 等. 数值模拟在镁合金钉枪枪体压铸工艺优化中的应用 [J]. 铸造, 2015, 64 (8): 758-761.
- [2] 黄裕飞, 李晓棠, 陈流, 等. 基于Any Casting的镁合金缸盖结构设计与工艺参数优化 [J]. 铸造, 2012, 61 (5): 489-493.
- [3] 洪杰, 沈玉芃, 王永锋, 等. 动力涡轮转子结构系统力学特性稳健设计方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2018 (9): 1-12.
- [4] 刘丽敏, 单忠德, 刘丰, 等. 基于多材质复合铸型的铸铁件铸造工艺数值模拟与试验研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (11): 955-960.

## Study on Process for Mass Production of High Efficiency Magnesium Alloy Hub Die Castings

ZHANG Zhan-ling<sup>1</sup>, ZHANG Yan-qin<sup>2</sup>, GUO Huai-gong<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University for Science & Technology Zhengzhou, Zhengzhou 450064, Henan, China; 2. College of Computer and Artificial Intelligence, Zhengzhou University of Economics and Business, Zhengzhou 451191, Henan, China; 3. Beijing Jinhui International Investment Co., Ltd., Beijing 100120, China)

### Abstract:

Taking AM60B magnesium alloy hub as an example, the effects of injection speed, mold temperature and pouring temperature on die casting defects were studied. By calculating the signal-to-noise ratio of defect volume obtained by virtual experiment, the mean and range of signal-to-noise ratio of different factors at different levels were solved, and then the optimal die-casting process was obtained. Through the optimization of mass production trial production, the optimal die-casting process parameters are as follows: the injection speed is 0.9 m/s, the mold temperature is 260 °C, and the pouring temperature is 680 °C. The produced die-casting parts had the best quality, the fastest and the best stability. At the same time, it is found that the mold temperature was the most important factor affecting the quality stability of the die-casting parts, the filling speed was the second, and the pouring temperature had the least influence on it. Increasing the transition fillet of the mold can greatly avoid cracks.

### Key words:

high efficiency; AM60B; die-casting parts; mass production; production process