DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.013

转向器阀壳体低压铸造浇注系统设计及工艺优化

陶　健,苏小平,康正阳,周大双
(南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211800)

摘　要:分析转向器阀壳体的结构,根据低压铸造的工艺要求设计了两种浇注系统并对其进行了数值模拟,分析缺陷产生情况后选择较优方案并进行结构改进。采用 Taguchi 正交 DOE 方法和信噪比分析,研究充型速度、浇注温度、上模具预热温度和下模具预热温度对铸件缩松缩孔的影响。试验结果表明,当充型速度 35 mm/s,浇注温度 690 ℃,上模具预热温度 370 ℃,下模具预热温度 340 ℃时,转向器阀壳体内部缩松缩孔铸造缺陷基本消除。

关键词:数值模拟;浇注系统;DOE;信噪比分析

中图分类号:TG249.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)05-0379-04

Design and Optimization of Gating System for Low Pressure Die Casting of Automobile Steering Valve Housing

TAO Jian, SU Xiaoping, KANG Zhengyang, ZHOU Dashuang
(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: The structure of the valve shell of the steering gear was analyzed. According to the technological requirements of low pressure casting, two kinds of gating systems were designed, and their numerical simulation was carried out. After analyzing the defects, the better scheme was selected and the structure was improved. The effects of filling speed, pouring temperature, preheating temperature of upper die and preheating temperature of lower die on shrinkage porosity and porosity of casting were studied by using Taguchi orthogonal DOE method and SNR analysis. The results show that when the filling speed is 35 mm/s, the casting temperature is 690 ℃, the preheating temperature of the upper die is 370 ℃, and the preheating temperature of the lower die is 340 ℃, the casting defects of shrinkage cavity and porosity in the valve shell of the steering gear are basically eliminated.

Key words: numerical simulation; gating system; DOE; signal to noise ratio analysis

近年来,环保问题日益突出,人们对汽车行业的轻量化提出了更高的要求。中国制造 2025 关于汽车整体发展规划中强调“汽车轻量化仍然为关键核心技术”[1],汽车零部件轻量化已然成为国家的重要战略,更多的轻量合金被应用到汽车零部件上,如铝合金、镁合金等[2]。

转向器阀壳体最早采用重力铸造的方式进行生产,近年来对它有一些压力铸造方面的模拟研究,但是生产出的零件致密性较低,且表面缺陷较多,废品率高[3]。低压铸造所需要的压力较低,不需要冒口,补缩效果较好,生产出的铸件的组织较紧密,污染较少[4]。得益于铸造 CAE 技术的发展,通过计算机仿真铸件成型过程成为可能,但由于模拟过程涉及参数众多,研究者的知识水平和经验积累在确定工艺参数和优化方向等方面起到关键作用。

收稿日期:2021-03-10
基金项目:江苏省高校自然科学研究课题(19KJB460005)
作者简介:陶　健(1996—),江苏南京人,硕士研究生.研究方向:铝合金成形工艺.电话:15380993443,Email:962146379@qq.com

本文作者以最小缩松缩孔率为优化目标,设计两种浇注方案,通过分析缺陷情况,选择较优方案并进行结构改进,用 Taguchi 正交 DOE 方法和信噪比分析方法,对充型速度、浇注温度、上模具预热温度和下模具预热温度进行参数化理论匹配,探究不同工艺参数对铸件质量的影响,旨在减少缺陷。

1　转向器阀壳体低压铸造工艺设计

1.1　铸件结构及材料

研究对象为某乘用车铝合金转向器阀壳体,铸件轮廓尺寸 80 mm×85 mm×67 mm,厚度为 5~9 mm。按低压铸造工艺要求,建立铝合金转向器阀壳实体和型芯三维模型,如图 1。

数值模拟计算过程中,材料属性参数的设置如下:汽车铝合金转向器阀壳体铸造材料为 A356,模具为 H13 模具钢,型芯为硅砂。A356 铝合金主要化学成分如下表 1 所示,传热系数设置为表 2。

1.2　浇注方式的选择及改进措施

根据铸件形状、结构尺寸以及铸件质量的要求,低压铸造常采用的浇注系统类型有底注式和垂直缝隙

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

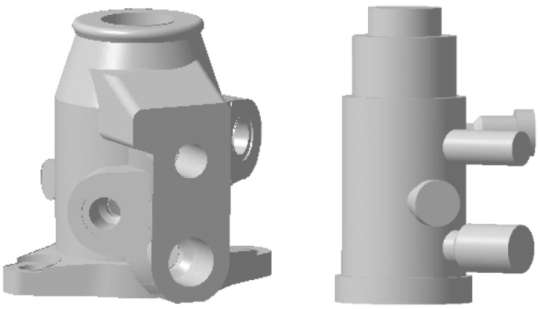


图 1 转向器阀壳实体及型芯三维模型
Fig.1 3D model of automobile steering valve housing and its core

表 1 A356 铝合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of A356 aluminum alloy

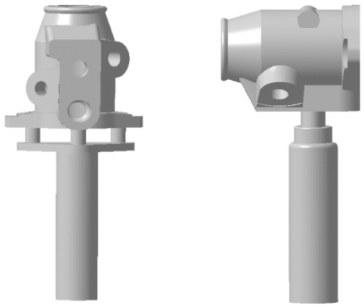
Si	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Sn	Ni	Ti	Al
7.00	0.40	0.50	0.30	0.10	0.03	0.05	0.01	0.10	0.15	余量

表 2 传热系数 /(W/m 2K)
Tab.2 Heat transfer coefficient

材料	铸件-型芯	铸件-模具	模具之间	模具-型芯
传热系数	500	400~620	3 500	500

式，浇口形式有单浇口和多浇口两种形式[5]。根据汽车转向器阀壳体的结构形状，采用底注式浇注系统，设计两种浇注方式，分型面各取铸件最大截面处。

方案 1 将零件竖置，从底部浇注，由于零件底部形状限制，采用 3 个浇道，截面为圆形；方案 2 将零件横置，采用 1 个内浇道，截面为圆形。采用封闭式浇注系统，两种方案内浇道截面积为 220 mm^2，按照：$\Sigma A_{内}$:$\Sigma A_{横}$:$\Sigma A_{直}$=1:1.7:2.5 来设计横浇道与直浇道，浇注方式如图 2 所示。

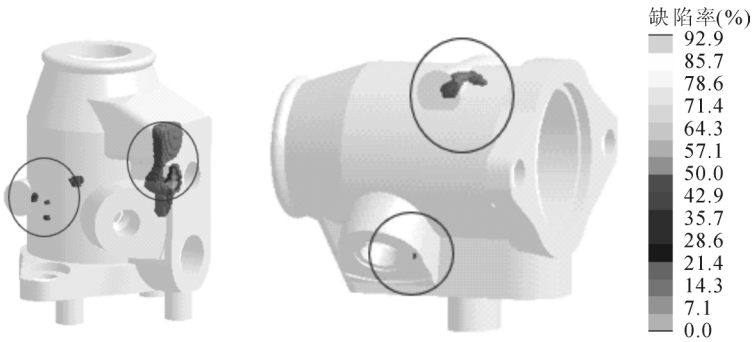


方案1　　方案2

图 2 浇注方式 1 和 2
Fig.2 Pouring position 1 and 2

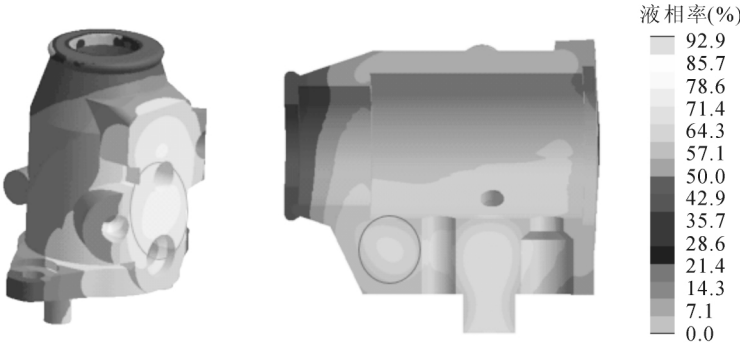
初始参数设置为：充型速度 40 mm/s，浇注温度 700 ℃，模具预热温度 320 ℃，升液压力 2.6 kPa，充型压力 7.5 kPa，保压压力 20 kPa，保压时间 150 s。对两种方案进行数值模拟，发现其充型过程都较为平稳且充满整个型腔，方案 1 和方案 2 模拟的缩松缩孔结果如图 3。

从图 4 液相图可知，方案 1 当 t=26.68 s 时出现一块大的孤立区域，表明此处温度分布不均，且因为孤立区域下部存在孔特征，导致浇口无法对零件起到补缩作用；方案 2 当 t=14.82 s 时孤立区也因孔特征无法完成补缩，但是区域较小，且离浇口较近，预



方案1　　方案2

图 3 浇注方式 1 和 2 模拟的缩松缩孔结果
Fig.3 Simulated shrinkage hole and porosity for pouring position 1 and 2



方案1当t=26.68 s　　方案2当t=14.82 s

图 4 浇注方式 1 和 2 模拟的液相分布
Fig.4 Simulated liquid phase distribution for pouring position 1 and 2

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计通过改善压力曲线和浇口尺寸可以消除此处缺陷，因此最终选择方案2。

方案2主为优化方案：

（1）因孔特征限制尺了寸，将浇口形状改为椭圆，适当扩大浇口面积20%。

（2）针对顶部缩松缩孔缺陷，设计冷却系统，如图5，其参数为：半径12mm，流量0.5m³/h，水温20℃，开启时间为 t=10 s，关闭时间为 t=80 s。

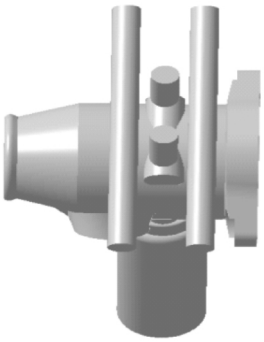


图5　基于浇注方式2设计的冷却系统

Fig.5　Designed cooling system based on pouring position 2

表3 改进后工艺参数

Tab.3 Improved process parameters

工艺参数	升液压力	升液时间	充型压力	充型时间	保压压力	保压时间
数值	2.9 kPa	3.3 s	8.1 kPa	4.7 s	20 kPa	120 s

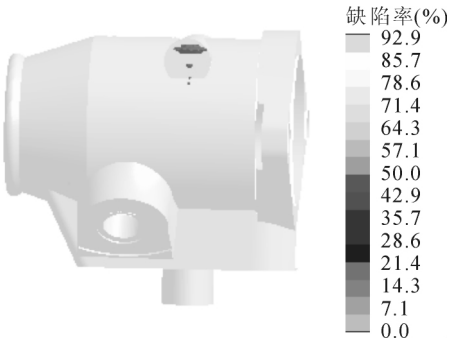


图6　浇注系统优化结果

Fig.6　Result of gating system optimization

（3）对铸造参数进行改进，如表3，结果如图6。

由模拟结果可以得知，下方孔附近的缺陷已经基本得到消除，但铸件顶部缺陷留有一些，当铸件缩孔位置集中且位于铸件上部时，说明金属液补缩通道畅通且支晶没有形成骨架[6]。

2　铝合金转向器阀壳低压铸造工艺试验设计

2.1　Taguchi 试验设计方法

Taguchi 方法是稳健设计方法的一种，它使用成本较低且能创建一个稳定的工程系统，能够反映产品的某项性能对某个因素的敏感程度[7]。影响因子分为可控因子和噪声因子，利用信噪比来测量性能能够极大地减少噪声因子对产品质量的影响[8]。

S/N（signal-noise ratio）信噪比是 Taguchi 在试验设计法中提出的，本次试验的优化目标为缩松缩孔缺陷率，目标值越小表明缺陷越少，因此采用望小特性信噪比进行计算[9]。其计算公式如下：

$$S/N=-10\lg\left(\frac{1}{m}\Sigma_{i=1}^{m}y_i^2\right) \quad (1)$$

式中，y_i 为某因素组合的试验观测值；m 为该因素组合的试验次数（在本文中该值为1）。

2.2　试验设计与结果

本文选用金属液浇注温度、上模温度、下模温度以及充型速度四个工艺参数为研究对象，研究这四个参数对铸件质量的影响。因素水平表如表4所示。本次试验为4因素3水平，因此采用正交表 $L_9(3^4)$，结果如表5。

表4 因素水平表

Tab.4 The table of factors and levels

水平	因素			
	A 浇注温度 /℃	B 上模温度 /℃	C 下模温度 /℃	D 充型速度 /mm·s⁻¹
1	690	300	330	35
2	700	320	350	40
3	710	340	370	45

表5 正交试验方案与试验结果

Tab.5 The scheme and result of orthogonal experiment

试验编号	因素				缩松缺陷	
	浇注温度 /℃	上模温度 /℃	下模温度 /℃	充型速度 / mm·s⁻¹	试验值	信噪比
1	690	300	330	35	1	0
2	690	320	350	40	4	-12.041 2
3	690	340	370	45	2	-6.020 6
4	700	300	350	45	5.5	-14.807 3
5	700	320	370	35	2.5	-7.958 8
6	700	340	330	40	5	-13.979 4
7	710	300	370	40	3	-9.5424 3
8	710	320	330	45	9	-19.084 9
9	710	340	350	35	1.5	-3.5218 3

1. 结果分析和讨论

由式（1）计算出缩松缩孔缺陷的信噪比，对四个指标的信噪比进行均值和极差分析，并对影响的权重进行比较，结果如表6。

由表6可知，充型速度对转向器阀壳体低压铸造工艺缩松缩孔缺陷影响最大，受型芯的影响，充型速度过快，铝液充型压力不均匀，金属液可能会出现飞溅，卷气等现象，大大提高缩松缩孔率。

对于缩松缩孔缺陷，四个因素的影响顺序为 D>A>B>C。最优的工艺组合为 A1B3C3D1，即浇注温度690℃，上模温度340℃，下模温度370℃，充

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表6 信噪比S/N 均值与极差值分析表
Tab.6 The analysis table of mean and range values of signal

因素	A	B	C	D
水平 1	-18.061 8	-24.349 7	-33.064 3	-11.480 6
水平 2	-36.745 5	-39.084 9	-30.370 3	-35.563
水平 3	-32.149 1	-23.521 8	-23.521 8	-39.912 7
水平 1 均值	-6.020 6	-8.116 56	-11.021 4	-3.826 88
水平 2 均值	-12.248 5	-13.028 3	-10.123 4	-11.854 3
水平 3 均值	-10.716 4	-7.840 61	-7.840 61	-13.304 2
极差 R	6.227 885	5.187 675	3.180 808	9.477 36
权重	2	3	4	1

型速度 35 mm/s。对此工艺参数进行数值模拟，缺陷基本得到消除，其结果如图 7。

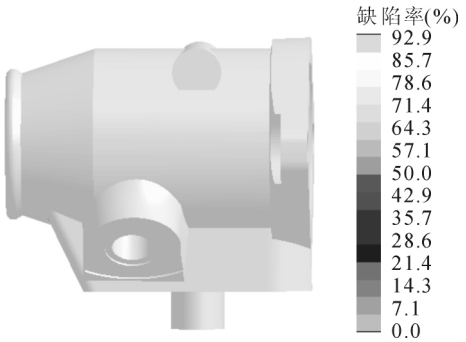


图 7 工艺参数优化模拟结果
Fig.7 Simulation result of process parameters optimization

3 结论

（1）根据转向器阀壳体的形状及结构特点，本文设计了两种浇注系统，针对其缺陷产生情况，选择了将零件横置从底部直通式浇注方案，此方案补缩效果较好。

（2）为优选方案设置冷却系统，改进浇口结构和尺寸，优化压力曲线，极大地降低了缩松缩孔率。

（3）通过 Taguchi 方法和信噪比分析可知对转向器阀壳体缺陷影响最大的为充型速度，其最优工艺参数为：充型速度 35 mm/s，浇注温度 690 ℃，上模预热温度 340 ℃，下模预热温度 370 ℃，在此工艺参数下铸件缺陷得到消除。

参考文献：

[1] 王利刚，李军，李彤光. 我国乘用车轻量化进展与发展思考[J]. 汽车工艺与材料，2017(9):56-60.
[2] 付彭怀，彭立明，丁文江. 汽车轻量化技术:铝 / 镁合金及其成型技术发展动态[J]. 中国工程科学，2018，20(1):84-90.
[3] 代兵，龚豪，孔德佳，等. 汽车转向器阀壳体压铸成形模拟分析与优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2016，30(11):29-35.
[4] 任凯，冯立超，孙立，等. 低压铸造铝合金轮毂的研究现状[J/OL]. 热加工工艺:1-6[2021-01-14].
[5] 符继麟，苏小平. 制动器安装底板低压铸造浇注系统设计及工艺参数优化[J]. 热加工工艺，2020，49(17):68-71.
[6] 张雅晴，谭建波. C5M4 铝合金端盖低压铸造工艺模拟及优化[J]. 特种铸造及有色合金，2019，39(8):863-866.
[7] 段慧珍，李星，邱慧，等. 基于稳健设计的铝合金端盖压铸工艺参数优化[J]. 热加工工艺，2016，45(7)：98-100.
[8] 张响，童水光，朱训明. 基于 Taguchi 方法的低压铸造铝合金车轮工艺优化[J]. 铸造技术，2007，28(9)：1235-1237.
[9] 彭安华，王天宇，张同保，等. 基于信噪比与相对关联度的齿轮热处理工艺参数优化[J]. 热加工工艺，2020，49(14):119-123.

（上接第 374 页）

差分析，发现工艺参数对铸件孔隙率大小的影响权重顺序为：模具预热温度>浇注温度>充型时间。获得最佳工艺参数组合为：浇注温度为 700 ℃、模具预热温度为 290 ℃、充型时间为 13 s。

（2）通过对冷却系统的设计与改进，有效的实现了铸件的顺序凝固，消除了铸件的缩孔、缩松缺陷。同时减少产品的反复试制次数，降低研发及时间成本，良品率达到 86%。

参考文献：

[1] 李世芸，李世萍. 铸件在凝固过程中瞬态温度场和热应力场分析[J]. 昆明理工大学学报，2000，25(1)：26-31.
[2] 邢雷杰，范真，凌智勇，等. 基于数值模拟的低压铸造铝合金压气机壳浇注系统的优化 [J]. 热加工工艺，2016，45 (3)：80-83.
[3] Penghuai Fu, Alan A Luo, Haiyan Jiang.Journal of Materials Processing Technology[J], 2008, 205:224.
[4] 张响. 铝合金车轮数字化仿真及工艺优化[D]. 杭州：浙江大学，2008.
[5] 代志功，毕俊喜. 基于 ProCAST 的泵体底座低压铸造工艺分析[J]. 热加工工艺，2018，47(13)：84-86.
[6] 郭志宏. AZ80 镁合金挤压铸造工艺仿真与复合材料制备[D]. 太原：中北大学，2014.
[7] Microstructure and Mechanical Properties of Hyper-eutectic Al-Si Alloys Fabricated by Spray Casting[J]. Min Ryou,Chul-Hyun Kim, Myung-Ho Kim. Journal of Materials Science & Technology. 2008 (1).
[8] 陈春蕾. 铝合金飞轮壳的低压铸造模具设计及铸造工艺仿真[D]. 济南：山东大学，2014.
[9] 陈丽君，王宏松. 一模两腔不对称薄壁注塑件的工艺参数的 Taguchi 方法优化[J]. 塑料工业，2012，40(11)：50-53.
[10] 段慧珍，李星，邱慧，等. 基于稳健设计的铝合金端盖压铸工艺参数优化[J]. 热加工工艺，2016，45(7)：98-100.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net