DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.011

铝合金悬架摆臂低压铸造数值模拟与工艺优化

杨　闯,苏小平,周大双,康正阳
(南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211816)

摘　要:以汽车铝合金悬架摆臂为研究对象,运用数值模拟技术和田口方法,研究了低压铸造中合金液的浇注温度、模具预热温度以及充型时间3个工艺参数对铸件孔隙率大小的影响规律,并且以铸件的孔隙率最小为优化目标,寻优得到摆臂的低压铸造工艺参数。在此基础上,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。结果表明,当浇注温度为700 ℃、模具预热温度为290 ℃、充型时间为13 s时,结合合理的冷却工艺方案,可有效的消除铸件内部缺陷。经过试制生产,良品率可达86%。

关键词:铝合金摆臂;数值模拟;低压铸造;田口方法;冷却工艺

中图分类号:TG249.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)05-0371-05

Numerical Simulation and Process Optimization of Low Pressure Casting for Swing Arm of Aluminum Alloy Suspension

YANG Chuang, SU Xiaoping, ZHOU Dashuang, KANG Zhengyang
(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: With aluminum alloy suspension swing arm as the research object, using the numerical simulation technology and method, the low pressure casting alloy liquid in the pouring temperature, mould preheating temperature and filling time three the influence law of process parameters on the casting porosity size, and porosity in castings minimum as the optimization goal, optimization for the low pressure casting process parameters of the swing arm were studied. On this basis, through the design and improvement of the cooling system, the sequential solidification of the castings was realized effectively. The results show that when the casting temperature is 700 ℃, the preheating temperature of the mold is 290 ℃, and the filling time is 13 s, the internal defects of the casting can be effectively eliminated by combining with the reasonable cooling process. After trial production, the yield can reach 86%.

Key words: aluminum alloy swing arm; numerical simulation; low pressure casting; Taguchi method; cooling process

随着国家环保政策的高要求以及能源成本的快速增长，在保证机械零部件结构强度的情况下，如何减小零部件的质量成为机械领域的重点研究方向[1]。作为汽车底盘关键受力部件,国内的汽车悬架摆臂大多采用锻钢或球墨铸铁铸造。但随着对轻量化材料和铸造、热处理技术的开发,在满足使用要求的前提下,铝合金逐渐被广泛应用于汽车生产中,以达到汽车轻量化的要求[2]。低压铸造的特点是充型速度和压力大小可以控制,金属液可以对铸型的型腔进行稳定的充型,可以避免金属液在铸型内部产生飞溅和夹渣等缺陷,且铸件在可控的压力下凝固,凝固过程补缩效果好,得到的铸件组织相对致密,力学性能好等优点[3]。因此,进行铝合金悬架摆臂低压铸造工艺的研究具有重要的现实意义。

目前合理的铸造工艺参数仍然依赖于工程师经验获得[4]。随着计算机技术的发展,数值模拟技术被应用于铸造过程的模拟,有助于提高研发效率,降低生产成本,对铸件实际生产有重要的指导意义[5]。本文作者针对某公司设计研发的汽车铝合金悬架摆臂，通过MAGMASOFT对其低压铸造过程进行模拟分析,摸索出适合铝合金悬架摆臂的低压铸造工艺。

1　数值模拟模型的建立

本文以某公司设计研发的汽车铝合金悬架摆臂为研究对象,根据低压铸造浇注系统的设计原则:金属液能够平稳充满型腔,在充型过程中不产生飞溅、涡流,且有利于铸件的顺序凝固。因此根据铸件的结构,将壁厚最薄的地方设计为铝液最后充满的位置,在壁厚处设置内浇道,同时将其设计为锥形,来增大内浇道的横截面积，以防止内浇道先于铸件凝固导致金属液无法有效进行压力补缩,利用CATIA建立

收稿日期:2021-03-20
基金项目:江苏省高校自然科学研究课题(19KJB460005)
作者简介:杨　闯(1995—),江苏扬州人,硕士生.研究方向:汽车轻量化研究.电话:18761803987,
Email:1925817458@qq.com

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

带浇注系统的摆臂三维模型如图 1。

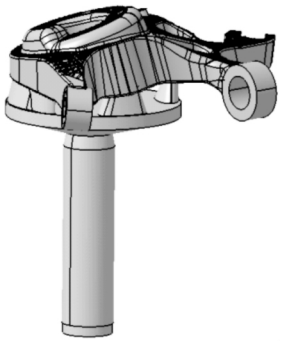

图 1 摆臂三维模型(带浇注系统)
Fig.1 Three dimensional model of swing arm (with gating system)

对于铸造数值模拟计算,材料属性参数的设置将直接影响模拟计算结果的准确性[6-7]。本汽车铝合金悬架摆臂的材料为 A356，其热物理参数如表 1。模具的材料为 H13。

表1 A356铝合金的热物理参数
Tab.1 Thermophysical parameters of A356 aluminum alloy

密度 /(kg·m^{-3})	液相温度 /℃	固相温度 /℃	潜热 /(kJ·kg^{-1})	导热系数 /(W·m^{-1}·K^{-1})
2 430	613	542	430.518	70

2 低压铸造工艺参数寻优

低压铸造工艺中的浇注工艺参数主要有升液压力、升液时间、充型压力、充型时间、保压压力、保压时间、浇注温度以及铸型温度等[8]。每个参数都会对摆臂的成形质量产生不同程度的影响,而每个参数都有多种取值导致有多种组合,那么如何通过少量且代表性的试验来得到一组最佳的工艺参数组合显得尤为重要。

2.1 田口方法

田口方法是一种低成本高效益的质量工程方法,主要使用标准的正交矩阵和信噪比以保证通过最少数目的试验,得到能够影响试验目标的所有试验因子的信息[9-10]。根据摆臂的结构特征选取了浇注温度、模具预热温度、充型时间作为因素,每个因素设置 4 个水平,具体取值见表 2。为了更直观地评价铸件中缩松缩孔缺陷的严重程度,采用创建目标函数的方法来对数值模拟的结果进行评价，对低压铸造数值模拟结果中铸件孔隙率的大小进行取值,孔隙率最小的取 1,而取 10 表示孔隙率最大。

表2 因素和水平设置
Tab.2 Factors and factor levels

水平	因素		
	A 浇注温度 /℃	B 充型时间 /s	C 模具预热温度 /℃
1	690	9	280
2	700	11	290
3	710	13	300
4	720	15	310

信噪比(S/N)可以反映质量特性的平均值和变化,通过控制具有显著影响的工艺参数,可以提高产品质量特性的稳定性。其中有 3 种类型的质量特性:望小特性、望目特性和望大特性。本文研究的重点是铸件产生的孔隙率最小,即目标函数值越小越好,实现质量特性中的“望小”特性。“望小”特性的信噪比计算公式如下:

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

式中,y_i 是铸件孔隙率大小的目标函数值;m 为该因素组合的试验次数(在本文中该值为 1)。

本次试验采用正交表 $L_{16}(4^3)$。经查正交表得出试验方案,连同结果如表 3。

表3 正交试验方案及计算结果
Tab.3 Orthogonal test scheme and calculation results

试验编号	试验因素			缩松缺陷	
	A/℃	B/℃	C/℃	试验值	信噪比
1	690	9	280	4.3	-12.669
2	690	11	290	2.6	-8.299
3	690	13	300	2.4	-7.604
4	690	15	310	7	-16.902
5	700	9	290	3.2	-10.103
6	700	11	280	2	-6.021
7	700	13	310	9.2	-19.276
8	700	15	300	2.2	-6.848
9	710	9	300	9	-19.085
10	710	11	310	9.5	-19.554
11	710	13	280	8	-18.062
12	710	15	290	5.3	-14.486
13	720	9	310	10	-20
14	720	11	300	9.7	-19.735
15	720	13	290	1	0
16	720	15	280	4	-12.041

2.2 均值分析

对 3 个指标的信噪比进行均值和极差计算分析,并对各因素的影响权重进行比较,结果如表 4。

由表 4 可知，模具预热温度的信噪比均值极差最大,其次是浇注温度,最小的是充型时间,表明这 3 个因素中对铸件孔隙率的影响程度的大小顺序为模具预热温度>浇注温度>充型时间。根据表 4 中的数据,图 2 给出了浇注温度、充型时间、模具预热温度 3 个因素的信噪比主效应图,从图 2 中可知,随着浇注温度的增加，其信噪比均值先减小后不同程度得增大,说明如果浇注温度过低,金属液充填末端过早凝固，影响保压时的补缩效果；而浇注温度过

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

表 4 均值和极差分析表

Tab.4 Mean and range analysis table

因素	A/℃	B/℃	C/℃
K_{1j}	-45.474	-61.857	-48.793
K_{2j}	-42.248	-53.609	-32.888
K_{3j}	-71.187	-44.942	-53.272
K_{4j}	-51.776	-50.277	75.732
k_{1j}	-11.368 5	-15.464 25	-12.198 25
k_{2j}	-10.562	-13.402 25	-8.222
k_{3j}	-17.796 75	-11.23 55	-13.318
k_{4j}	-12.944	-12.569 25	-18.933
极差 R	7.234 75	4.2287 5	10.711
权重排序	2	3	1
优水平	A2	B3	C2

注：K_{ij} 为水平 i 因素 j 所对应的信噪比之和；kij 为 Kij 的均值；R 为 k_{ij} 的极差

高，铸件在高温下凝固体积收缩大导致缩松缩孔缺陷。充型时间的快慢反应充型速度的快慢，过慢导致金属液的热量损失大，过快则导致充填过程中产生飞溅卷气，影响铸件的成形质量。随着模具温度的增加，其信噪比均值现减小后增大，说明温度过低金属液受到激冷作用流动速度降低，过早凝固，保压补缩不充分导致铸件厚大区域出现缩松；温度过高则会使铸件凝固过程中出现热节，产生缩松缩孔缺陷。由此可见合理的工艺参数组合对铸件质量起着至关重要的作用。

根据质量特性的“望小”特性，信噪比均值最小的点为各因素的最优水平，即浇注温度为 700 ℃、模具预热温度为 290 ℃、充型时间为 13 s。利用寻优后的工艺参数如表 5，对摆臂进行数值模拟分析，缩松缩孔分布如图 3。

通过模拟仿真后发现在铸件在局部壁厚处以及结构复杂处仍然存在缩松缩孔缺陷，造成缺陷的原因是铸件在凝固过程中在结构复杂处会出现热节点，形成孤立液相区，导致金属液无法及时补缩，

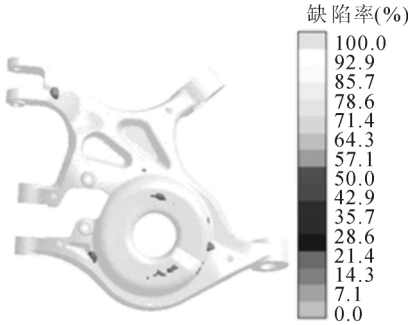

图 3 摆臂缩松缩孔分布图

Fig.3 Distribution diagram of swing arm shrinkage cavity

使得铸件无法实现顺序凝固，从而导致铸件在凝固结束后会产生缩孔、缩松缺陷，降低铸件的力学性能。因此需要对工艺做进一步改进。

3 冷却工艺的设置

3.1 初始冷却工艺方案

根据铸件结构和缺陷所在位置，决定采用点冷的方式对其凝固过程进行冷却，冷却介质为水，通过对特定部位的加速降温来达到良好的顺序凝固梯度，改善铸件的缩松缩孔缺陷，初始冷却工艺参数如下表 6 所示，铸件及初始冷却系统布置如下图 4。

表6 初始冷却工艺参数

Tab.6 Initial cooling process parameters

冷却管道	流量 /($m^3 \cdot h^{-1}$)	开启时刻 /s	关闭时刻 /s	初始水温 /℃
1~5	0.5	18	90	20

图 5 为初始冷却工艺下铸件缩松缩孔缺陷分布情况。相比较之前缩松缩孔有了一定程度的改善。但由于冷却系统采用点冷形式，冷却管道对模具相应位置的冷却范围较小，所以无法对远离冷却管道的热节起到很好的冷却作用，造成铸件的厚大连接部分在凝固过程中仍然出现了热节点，使得铸件无法实现顺序凝固。同时由于冷却管道开闭时间以及流

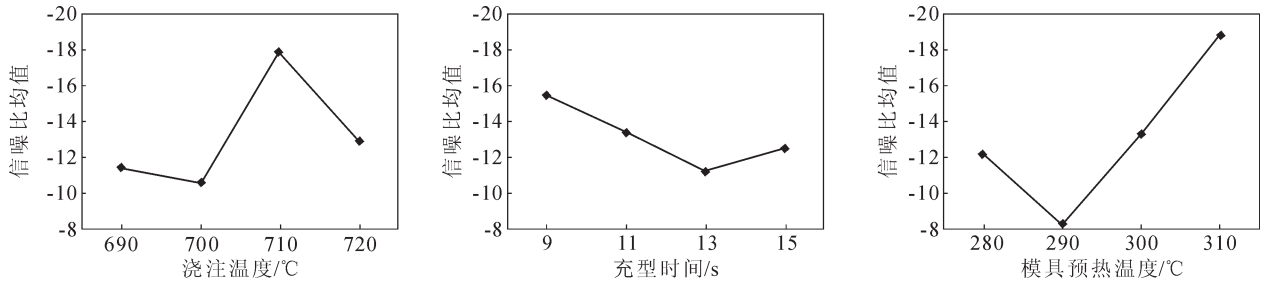

图 2 信噪比主效应图

Fig.2 SNR main effect diagram

表5 摆臂低压铸造浇注工艺参数

Tab.5 Casting process parameters of swing arm in low pressure casting

升液压力 /kPa	升液时间 /s	最大充型压力 /kPa	充型时间 /s	保压压力 /kPa	保压时间 /s	浇注温度 /℃	模具预热温度 /℃
8.02	5	14.37	13	40	315	700	290

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

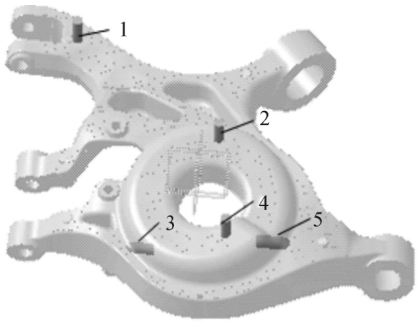

图 4 带冷却系统三维模型图
Fig.4 Three dimensional model with cooling system

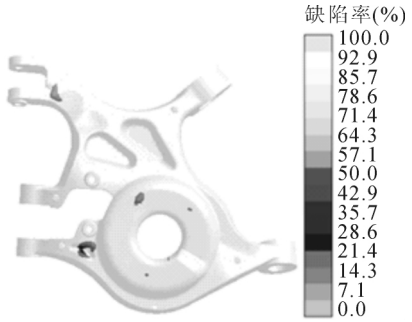

图 5 初始冷却工艺摆臂缩松缩孔缺陷分布
Fig.5 Shrinkage cavity distribution of swing arm for initial cooling process

量大小设置的不合理，导致缩松缩孔区域有所转移，导致本来完好的地方出现了缺陷。

3.2 冷却系统改进

根据初始冷却工艺下的结果分析，在铸件出现热节的部位增加冷却管道，加快其冷却速度，防止形成孤立的液相区影响铸件的顺序凝固。调整冷却管道开启的时间，避免开启的太早导致凝固的过快从而阻塞了金属液的补缩通道，产生新的缺陷，也避免开启的时间过长损坏模具增加制造成本。不断调整冷却水管的位置流速以及开闭时间，经过反复多次的数值模拟，得到改进后的冷却参数如表 7 所示，冷却模型如下图 6。

图 7 为改进方案下摆臂凝固过程的温度场，可以看出其凝固过程中的温度场分布及变化情况。在上文中摆臂产生缩松缩孔缺陷的位置没有出现热节，其主要受力的连接孔结构处基本实现了铸件由远离浇口位置至内浇口的顺序凝固，有效的提高了铸件的内部质量。

经过实际的试制生产，实物铸件如下图 8，可见在该低压铸造工艺方案下能够得到充型完整且表面质量良好的铸件，良品率可达 86%，且有着良好的机械性能。说明该方案的有效可行性。

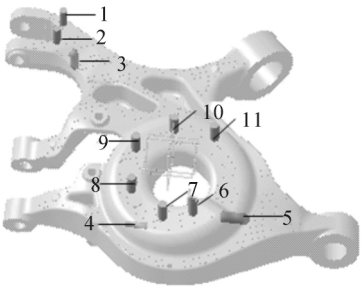

图 6 改进后的冷却系统三维模型图
Fig.6 3D model of improved cooling system

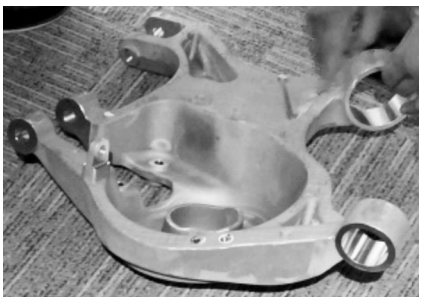

图 8 摆臂实物图
Fig.8 Finished swing arm part

4 结论

(1)根据摆臂的形状以及结构特点，通过 CATIA 设计并建立铸件浇注系统三维模型，运用田口方法和数值模拟技术对其进行低压铸造工艺参数的寻优，通过对目标函数值的信噪比分析以及均值和极

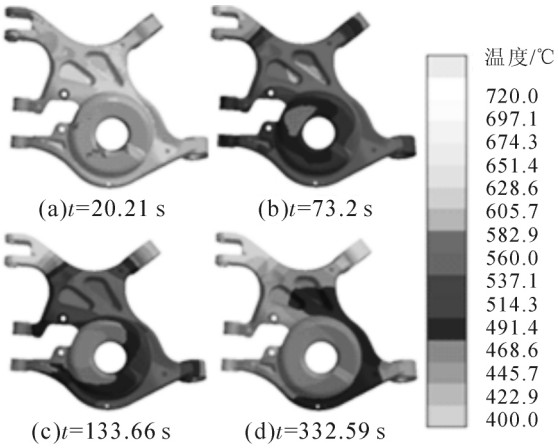

图 7 铸件凝固过程温度场
Fig.7 Temperature field of casting solidification

表 7 改进的冷却工艺参数
Tab.7 Improved cooling process parameters

冷却管道	流量 /($m^3 \cdot h^{-1}$)	开启时刻 /s	关闭时刻 /s	初始水温 /℃
1~2	2	20	70	20
3	1	18	70	20
4	1	40	110	20
5	1	18	80	20
6~11	0.5	20	80	20

（下转第 382 页）

(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。

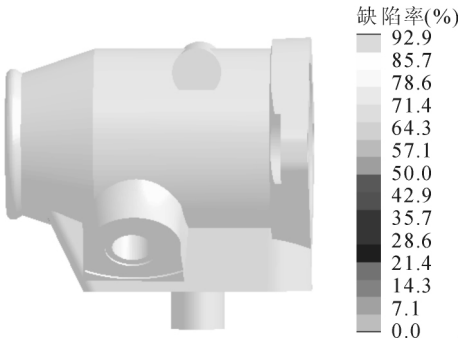

图 7 工艺参数优化模拟结果
Fig.7 Simulation result of process parameters optimization

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