

A356 铝合金后副车架低压铸造工艺参数的设计与优化

张弓 苏小平

(南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 211816)

摘要 为了提高 A356 铝合金后副车架低压铸造的成形质量和生产效率,以浇注温度、模具预热温度、充型时间和充型压力为优化参数,以铸件的孔隙体积、二次枝晶臂间距和凝固时间为响应指标,使用 Design-Expert 软件设计了响应面试验。利用 ProCAST 软件对铸件生产过程进行数值模拟,并通过 Matlab 软件利用遗传算法对优化参数进行多目标优化。得到的最佳参数组合:浇注温度为 707.89 °C,模具预热温度为 329.61 °C,充型时间为 3.06 s,充型压力为 14 822.30 Pa。最后通过生产试制对优化方案进行验证,发现生产的铸件符合使用要求,证明了该优化方案的可行性。

关键词 后副车架;低压铸造;响应面法;数值模拟;遗传算法

中图分类号 TG249.2;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240234

Design and Optimization of Low-pressure Casting Process Parameters for A356 Aluminum Alloy Rear Subframe

ZHANG Gong, SU Xiaoping

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 211816)

Abstract: In order to improve the forming quality and production efficiency of low-pressure casting A356 aluminum alloy rear subframe, Design-Expert software was adopted to design response surface experiment with pouring temperature, mold preheating temperature, filling time, and filling pressure as optimization parameters and pore volume, secondary dendrite arm spacing, and solidification time of castings as response indicators. Numerical simulation of producing procedure was conducted using ProCAST software, and multi-objective optimization of optimization parameters was carried out by Matlab software using genetic algorithm. The optimal parameter combination is presented as follows: pouring temperature of 707.89 °C, mold preheating temperature of 329.61 °C, filling time of 3.06 s, and filling pressure of 14 822.30 Pa. Finally, the optimization scheme was validated through trial production. The results indicate that the produced castings meet the usage requirements, validating the feasibility of optimization scheme.

Key Words: Rear Subframe, Low-pressure Casting, Response Surface Method, Numerical Simulation, Genetic Algorithms

铝合金因其密度小、力学性能良好和抗腐蚀性能好等特点^[1],在汽车零部件的生产中被广泛使用。另外,结合低压铸造的充型过程平稳,对金属液未结晶部分进行补缩等特点^[2],可生产出组织致密、力学性能好的铝合金铸件。但是,在实际生产中,铸件内部往往会产生一些缺陷。因此,减少铸件缺陷,提高铸件的成形质量,已成为低压铸造工艺中亟需解决的问题。

铸件的成形质量不仅与铸造方式和铸造设备有关,还和工艺参数紧密相关。所以,在确定浇注方案后,通过对工艺参数进行优化,寻找合理的参数组合来提高铸件成形质量和生产效率。目前的参数优化主要

是先设计优化试验方案,再通过数值模拟进行多次试验,最后利用初始算法根据试验结果来寻找最优参数组合^[3]。张东生等^[4]研究了浇注温度与保压时间对轮毂成形质量的影响,并用优化后的参数进行生产试制。KRISADA A 等^[5]利用响应面法研究了模具涂层厚度、模具预热温度和浇注温度对低压铸造铝合金轮毂中缺陷的影响,得到了优化参数组合。DHISALE M 等^[6]通过对冷却系统参数进行多目标优化,成功减少了低压铸造中铝合金轮毂的缩孔率。

本研究以某 A356 铝合金后副车架为对象,以浇注温度、模具预热温度、充型时间和充型压力为优化参

收稿日期:2024-05-30;修订日期:2024-06-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52175465)

第一作者简介:张弓,男,1999 年出生,硕士研究生, E-mail:1363442650@qq.com

引用格式:张弓,苏小平. A356 铝合金后副车架低压铸造工艺参数的设计与优化[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(7):988-994.

ZHANG G, SU X P. Design and optimization of low-pressure casting process parameters for A356 aluminum alloy rear subframe[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7):988-994.

数,以孔隙体积、最大二次枝晶臂间距(SDAS)和凝固时间为优化目标,设计三水平响应面试验方案,并通过响应面试验来分析各优化参数对优化目标的影响程度,最后使用遗传算法寻找最优参数组合,旨在为低压铸造铝合金铸件的實際生产提供参考。

1 模型结构及优化方法

1.1 后副车架模型结构

研究对象为某 A356 铝合金后副车架,其结构见图 1。该铝合金后副车架为大型薄壁件,外形尺寸为 $1\,156\text{ mm}\times 873\text{ mm}\times 306\text{ mm}$,平均壁厚为 4 mm ,最小壁厚为 3 mm ,最大壁厚为 11.7 mm ,质量为 16.88 kg 。

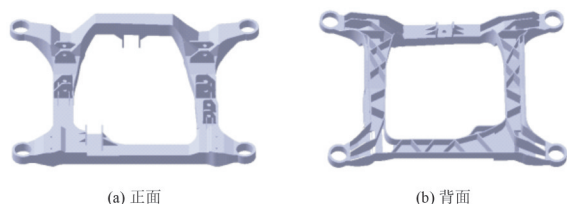


图1 铝合金后副车架

Fig.1 Aluminum alloy rear subframe

1.2 初始浇注方案设计及数值模拟结果

(1)浇注系统设计 考虑到铸件中薄壁肋板较多,而铸件正面的多数部位较为平整,为了使铸件能够平稳充型,采取底注式浇注,浇口设置在铸件正面,浇注系统结构示意图见图 2。

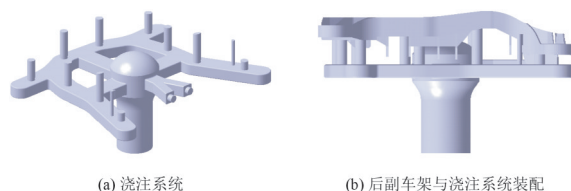


图2 后副车架低压铸造浇注系统

Fig.2 Low-pressure casting gating system for rear subframe

浇注系统的内浇道截面积按照“热节圆法”,采用的经验公式为^[7]:

$$\Sigma A_{\text{内}} = \frac{m}{\rho v t} \quad (1)$$

式中, $\Sigma A_{\text{内}}$ 为内浇道总截面积, cm^2 ; m 为铸件质量, g ; ρ 为金属液密度, g/cm^3 ; v 为内浇道出口金属液线速度,一般不超过 15 cm/s ,取 15 cm/s ; t 为充型时间,金属液在型腔中的充型速度取 2 cm/s ,型腔高度为 73.2 mm ,计算可得充型时间为 3.66 s 。

由式(1)计算得到的内浇道截面积为 113.88 cm^2 。设置内、横与直浇道的截面积比例为 $\Sigma A_{\text{内}}:\Sigma A_{\text{横}}:\Sigma A_{\text{直}}=1.0:1.7:2.3^{[8]}$,并由此计算出横浇道的截面积为 193.6 cm^2 ,直浇道的截面积为 261.92 cm^2 。内浇道和直

浇道均采用圆柱形,升液管截面尺寸与直浇道一样,浇注系统的总升液高度为 425 mm 。

(2)压力参数设置 低压铸造的铸造过程分为升液、充型、增压、保压和卸压 5 个阶段,每个阶段的时间和压力都需要分别进行设置^[9]。升液阶段的压力由下式进行计算:

$$P_1 = \mu_1 \rho g h_1 \quad (2)$$

式中, P_1 为升液压力, Pa ; μ_1 为升液阻力系数,一般取 $1.0\sim 1.5$,本研究取 1.1 ; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; h_1 为升液高度, m 。

根据式(2)得到的升液压力为 $12\,370.05\text{ Pa}$ 。另外,低压铸造中的升液速度一般在 $5\sim 15\text{ cm/s}$,取 5 cm/s ,由此计算出升液时间为 8.5 s 。

充型阶段的压力可由下式进行计算:

$$P_2 = P_1 + \mu_2 \rho g h_2 \quad (3)$$

式中, P_2 为充型压力, Pa ; μ_2 为充型阻力系数,一般取 $1.0\sim 1.5$,本研究取 1.3 ; h_2 为充型高度, m 。

根据式(3)得到的充型压力为 $14\,887.98\text{ Pa}$ 。

增压阶段的压力为:

$$P_3 = K P_2 \quad (4)$$

式中, P_3 为增压压力, Pa ; K 为增压系数,一般取 $1.3\sim 2.0$,本研究取 1.7 。

根据式(4)得到的增压压力为 $25\,309.57\text{ Pa}$ 。增压速度取 $7\,000\text{ Pa/s}$,计算可得增压时间为 1.49 s 。保压阶段的压力与增压压力保持一致,为 $25\,309.57\text{ Pa}$ 。保压时间和卸压时间根据生产经验分别取 190 s 和 3 s 。

(3)冷却系统设计 由于铸件外侧的 4 个圆环状车身安装点的厚度要远大于其余部位处的厚度,在铸造过程中容易在该处产生热节,从而形成缩松缩孔缺陷。所以,在这些部位预先设置了冷却系统,见图 3。

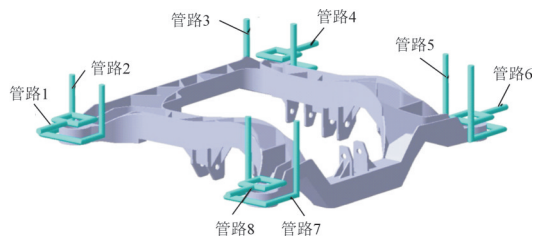


图3 冷却系统

Fig.3 Cooling System

冷却系统的相关参数设置见表 1。

数值模拟所用的 A356 铝合金的物性参数见表 2。

表1 冷却系统工艺参数

Tab.1 Process parameters for cooling system

管路编号	冷却水温/℃	冷却管直径/mm	冷却水流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	水管开启时间/s	水管闭合时间/s
1~4	20	20	1	14	50
5~8	20	20	1	20	65

在模拟中,设置金属液与模具、金属液与砂芯、模具与砂芯界面传热系数分别为 2 000、750 和 300 W/(m²·K),模具与空气的传热系数为 10 W/(m²·K)。

表 2 A356 铝合金的物性参数

Tab.2 Thermophysical parameters of A356 aluminum alloy			
密度/(kg·m ⁻³)	液相线温度/℃	固相线温度/℃	潜热/(kJ·kg ⁻¹)
2 680	615	544	430

初始方案中浇注温度为 700 ℃,模具预热温度为 320 ℃。通过 ProCAST 软件模拟得到初始方案在 8.56 s 时完成升液,在 12.21 s 时完成充型,由此可认为压力和时间参数设置合理。根据模拟结果得到初始方案的孔隙体积为 0.189 cm³,孔隙率为 1.69%,最大二次枝晶臂间距为 42.89 μm,铸件完全凝固用时为 146.76 s。初始方案的数值模拟结果见图 4。

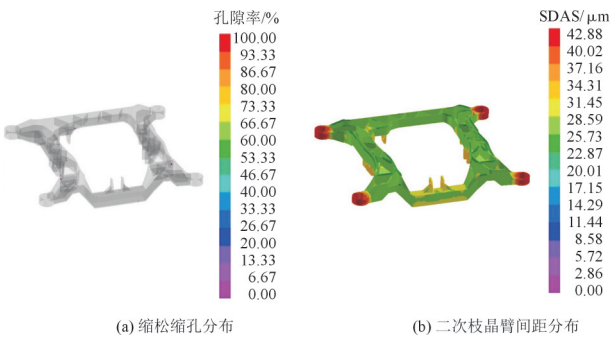


图 4 初始方案的数值模拟结果

Fig.4 Numerical simulation results of initial scheme

2 响应面试验设计及结果分析

2.1 响应面试验设计及数值模拟结果

在低压铸造中,铸件缺陷主要包括气孔、裂纹,疏松和缩孔等^[10]。在数值模拟中,通常是将铸件内部孔隙体积,二次枝晶臂间距和凝固时间作为铸造工艺的评价指标。其中,孔隙体积和凝固时间都可以直接得到,而二次枝晶臂间距则需要在 view 模块中调用 result 选项中的 Metallurgical Tools 功能,通过输入金属液的固、液相线温度进行计算得到,一般是以二次枝晶臂间距的最大值作为评价价值。另外,低压铸造中涉及到的工艺参数较多,有升液时间、升液压力、充型时间、充型压力、增压时间,增压压力、保压时间、保压压力、浇注温度和模具预热温度等^[11]。其中,浇注温度和模具预热温度对上述 3 个评价指标均有直接影响,而充型时间和充型压力也是影响金属液充型性能的两个重要参数。所以,本研究以浇注温度(X_1)、模具预热温度(X_2)、充型时间(X_3)和充型压力(X_4)作为优化参数,以孔隙体积(Y_1)、最大二次枝晶臂间距(Y_2)和凝固时间(Y_3)作为响应指标,通过 Design-Expert 软件进行三水

平 Box-Behnken 响应面试验设计,并通过试验结果分析各参数对响应指标的影响程度。响应面试验具有精度高、成本低等特点^[12],不仅可以分析单个因素对响应指标的影响,还可以分析双因素对响应指标的影响^[13]。此外,响应曲面法还能够处理实际问题中的不确定性和变异性,进一步提高过程优化的可靠性^[14]。响应面试验因素-水平表见表 3。

表 3 响应面试验因素-水平表

Tab.3 Factors level table of response surface test				
水平	因素			
	浇注温度/℃	模具预热温度/℃	充型时间/s	充型压力/Pa
-1	680	300	2.44	14 306.92
0	700	325	3.05	14 791.14
1	720	350	3.66	15 275.36

响应面试验设计共 27 组,其中浇注温度和模具预热温度的范围可通过现有研究及生产经验确定^[15]。充型时间和充型压力通过初始方案模拟后,证明其取值合理。一般低压铸造中充型速度为 2~3 cm/s,依据此范围来确定充型时间的上下限取值,而充型压力的上下限取值可通过式(3)中充型阻力系数的范围来确定。27 组试验的数值模拟结果见表 4。

表 4 响应面试验设计及数值模拟结果

Tab.4 Design and numerical simulation results of response surface experiment

序号	优化参数				响应指标		
	X_1 /℃	X_2 /℃	X_3 /s	X_4 /Pa	Y_1 /cm ³	Y_2 /μm	Y_3 /s
1	680	300	3.05	14 791.14	0.411	38.75	113.44
2	720	300	3.05	14 791.14	0.213	40.51	132.42
3	680	350	3.05	14 791.14	0.249	42.51	148.91
4	720	350	3.05	14 791.14	0.062	43.82	165.87
5	700	325	2.44	14 306.92	0.321	41.54	142.57
6	700	325	3.66	14 306.92	0.160	41.56	144.29
7	700	325	2.44	15 275.36	0.120	41.59	140.03
8	700	325	3.66	15 275.36	0.233	41.63	141.82
9	680	325	3.05	14 306.92	0.376	40.72	134.46
10	720	325	3.05	14 306.92	0.072	42.26	151.41
11	680	325	3.05	15 275.36	0.202	40.74	130.68
12	720	325	3.05	15 275.36	0.120	42.31	149.41
13	700	300	2.44	14 791.14	0.341	39.67	122.53
14	700	350	2.44	14 791.14	0.183	43.21	157.21
15	700	300	3.66	14 791.14	0.316	39.71	123.93
16	700	350	3.66	14 791.14	0.160	43.23	159.05
17	680	325	2.44	14 791.14	0.358	40.71	130.49
18	720	325	2.44	14 791.14	0.143	42.41	149.64
19	680	325	3.66	14 791.14	0.312	40.92	133.17
20	720	325	3.66	14 791.14	0.140	42.21	150.01
21	700	300	3.05	14 306.92	0.368	39.67	125.12
22	700	350	3.05	14 306.92	0.104	43.09	160.39
23	700	300	3.05	15 275.36	0.198	39.69	122.63
24	700	350	3.05	15 275.36	0.147	43.23	157.41
25	700	325	3.05	14 791.14	0.056	41.58	141.31
26	700	325	3.05	14 791.14	0.056	41.58	141.31
27	700	325	3.05	14 791.14	0.056	41.58	141.31

2.2 响应面试验结果分析与讨论

根据上述27组数值模拟结果得到的关于响应指标的响应面模型拟合参数见表5。通过这些参数可以确定拟合度最高的响应面模型。根据拟合参数确定响应指标的响应面模型为二阶响应面模型。

表 5 二阶响应面模型拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of second-order response surface models				
响应指标	<i>P</i> 值	<i>R</i> ²	<i>R</i> ² _{adj}	<i>C.V.</i> /%
孔隙体积 <i>Y</i> ₁	<0.000 1	0.995 0	0.986 7	3.96
二次枝晶臂间距 <i>Y</i> ₂	<0.000 1	0.996 3	0.982 1	3.88
凝固时间 <i>Y</i> ₃	<0.000 1	0.995 7	0.981 6	4.19

表5中的*P*值、*R*²和*R*²_{adj}都是用来判断响应面模型与模拟数据的拟合程度。当*P*值小于0.05时,可认为响应面模型与模拟数据之间的误差较小^[16]。*R*²为多重判定系数,当*R*²≥0.8时,可认为该响应面模型可用,*R*²越接近1,响应面模型的拟合度越高。*R*²_{adj}为调整后的多重判定系数,通常作为最终判定系数。*C.V.*为变异系数,若该值大于15%,则需要考虑是否存在异常数据。从表5中可以看出,二阶响应面模型与模拟数据拟合度较好,可以用该模型继续进行响应面试验。

(1)孔隙体积分析 孔隙体积的显著性分析见表6。表6中的*P*值反映了各优化参数对响应指标的影响显著性。当*P*值小于0.05时,表示该参数对响应指标影响显著;当*P*值小于0.01时,表示该参数对响应指标

表 6 孔隙体积的显著性分析

Tab.6 Significance analysis of pore volume		
优化参数	<i>P</i> 值	<i>F</i> 值
模型	<0.000 1	298.24
浇注温度 <i>X</i> ₁	<0.000 1	1 522.12
模具预热温度 <i>X</i> ₂	<0.000 1	1 226.92
充型时间 <i>X</i> ₃	0.000 8	19.48
充型压力 <i>X</i> ₄	<0.000 1	118.96

影响高度显著。*F*值反映了各优化参数对响应指标的影响程度,*F*值越大,则影响程度越大。从表6中可知,4个优化参数对孔隙体积的影响都是高度显著,其中浇注温度与模具预热温度的影响程度最大。孔隙体积的双因素交互作用三维响应面图见图5。

从图5可以看出,孔隙体积会随着浇注温度或模具预热温度的升高而降低,而在一定温度之后,降低幅度变缓。当温度较低时,一些部位容易提前凝固从而阻隔补缩通道,进而形成孤立液相区,形成缩松缩孔;当浇注温度过高时,金属液容易发生氧化,其吸气量和总收缩量增大,从而增加铸件缺陷的产生。从图5b、图5d和图5f可以看出,充型时间过长或过短都会导致孔隙体积增加。这是因为当充型时间过短时,金属液的流动速度较大,容易在充型过程中出现飞溅现象;当充型时间过长时,铸件可能会出现提前凝固现象,从而降低金属液的补缩性。从图5c、图5e和图5f可以看出,当充型压力增加时,孔隙体积会随之降低;当充型压力达到一定值后,孔隙体积会随着充型压力的增加而增加。在充型过程中,充型压力过低会导致金属液的流动速

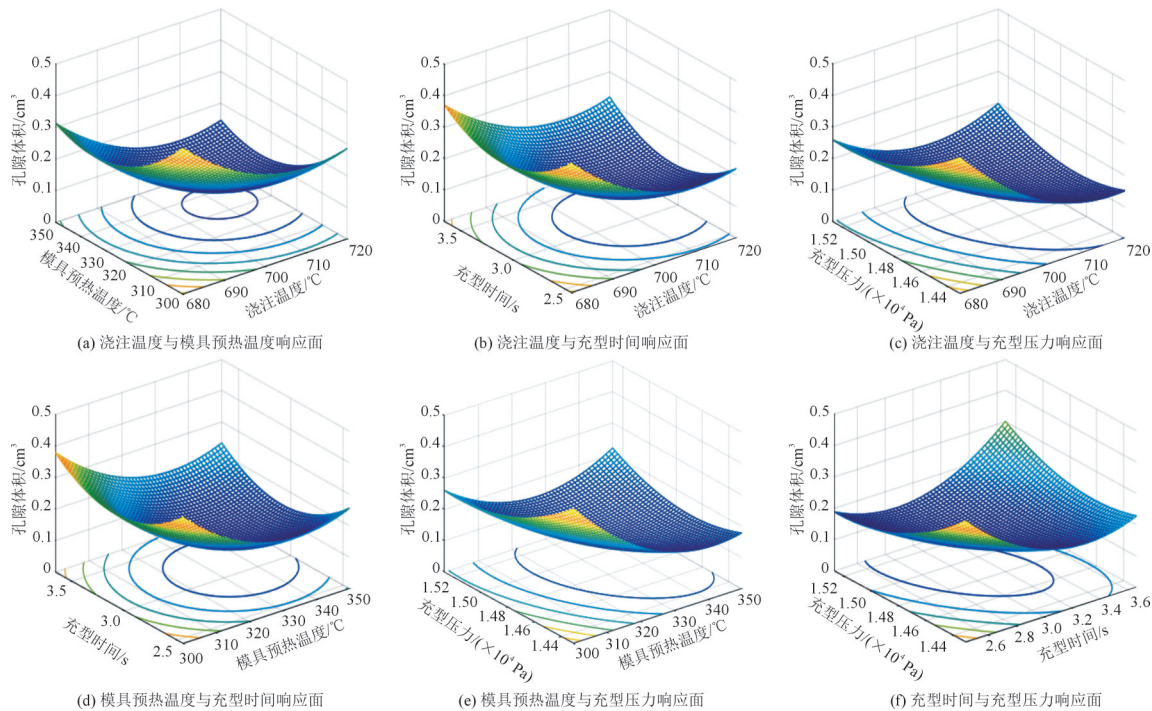


图 5 孔隙体积的双因素交互作用三维响应面图

Fig.5 Three dimensional response surface diagram of dual factor interaction of pore volume

度变慢,对于薄壁或结构复杂的铸件容易出现充型不充分的问题,也无法很好地起到补缩作用,而充型压力过高会导致金属液的流动速度变快,易出现飞溅、喷射现象,增加了铸件产生缺陷的可能性。以孔隙体积为响应指标的回归方程如下:

$$Y_1=265.501-0.38X_1-0.17X_2-5.70X_3-0.01X_4+5.5\times10^{-6}X_1X_2+8.81\times10^{-4}X_1X_3+5.73\times10^{-6}X_1X_4+3.3\times10^{-5}X_2X_3+4.4\times10^{-6}X_2X_4+2.32\times10^{-4}X_3X_4+2.08\times10^{-4}X_1^2+1.52\times10^{-4}X_2^2+0.27X_3^2+2.28\times10^{-7}X_4^2 \quad (5)$$

(2)SDAS 分析 SDAS 的显著性分析见表 7。从表 7 中可知,充型时间和充型压力对 SDAS 的影响程度低于浇注温度和模具预热温度。SDAS 的双因素交互作用三维响应面图见图 6。从图 6a 中可以看出,模具预热温度对 SDAS 的影响程度要大于浇注温度。从图 6a~图 6e 可以看出,随着温度增加,SDAS 也随之增加。一般来说,在温度较高的情况下,金属液的冷却速率较低,可能会导致枝晶生长时间延长,铸件

表 7 SDAS 的显著性分析

Tab.7 Significance analysis of SDAS

优化参数	P 值	F 值
模型	<0.000 1	6 803.48
浇注温度 X_1	<0.000 1	15 060.70
模具预热温度 X_2	<0.000 1	79 663.54
充型时间 X_3	0.107 5	3.03
充型压力 X_4	0.000 5	21.94

晶粒粗化。从图 6f 可见,当充型压力增加时,SDAS 也会随之略微增加。而当充型压力处于较高水平时,SDAS 会随着充型时间的增加呈先减小后增加的趋势,但是变化的幅度较小。充型时间和充型压力对金属液的流动性有很大影响。充型时间过短或充型压力过大会使充型不平稳,金属液与型腔内表面之间的摩擦也会增加,这可能会导致充型过程中的温度场分布不均匀,影响枝晶的生长;充型时间过长或充型压力过小会增加充型时间,可能会造成某些部位的金属液停留时间较长,局部温度较高,从而导致 SDAS 增加。以 SDAS 为响应指标的回归方程为:

$$Y_2=-155.83+0.28X_1+0.34X_2+5.40X_3+1.61\times10^{-3}X_4-2.25\times10^{-4}X_1X_2-8.40\times10^{-3}X_1X_3+7.74\times10^{-7}X_1X_4-3.28\times10^{-4}X_2X_3+2.48\times10^{-6}X_2X_4+1.70\times10^{-5}X_3X_4-1.08\times10^{-4}X_1^2-2.25\times10^{-4}X_2^2+0.06X_3^2-9.95\times10^{-8}X_4^2 \quad (6)$$

(3)凝固时间分析 凝固时间的显著性分析见表 8。从表 8 中可知,模具预热温度的影响程度最大,浇注温度次之,充型时间的影响程度最小。凝固时间的双因素交互作用三维响应面图见图 7。可以看出,温度对凝固时间的影响最显著,浇注温度和模具预热温度越高,凝固时间越长。而当充型时间越长或充型压力越小时,凝固时间随之增加;当充型时间越短或充型压力

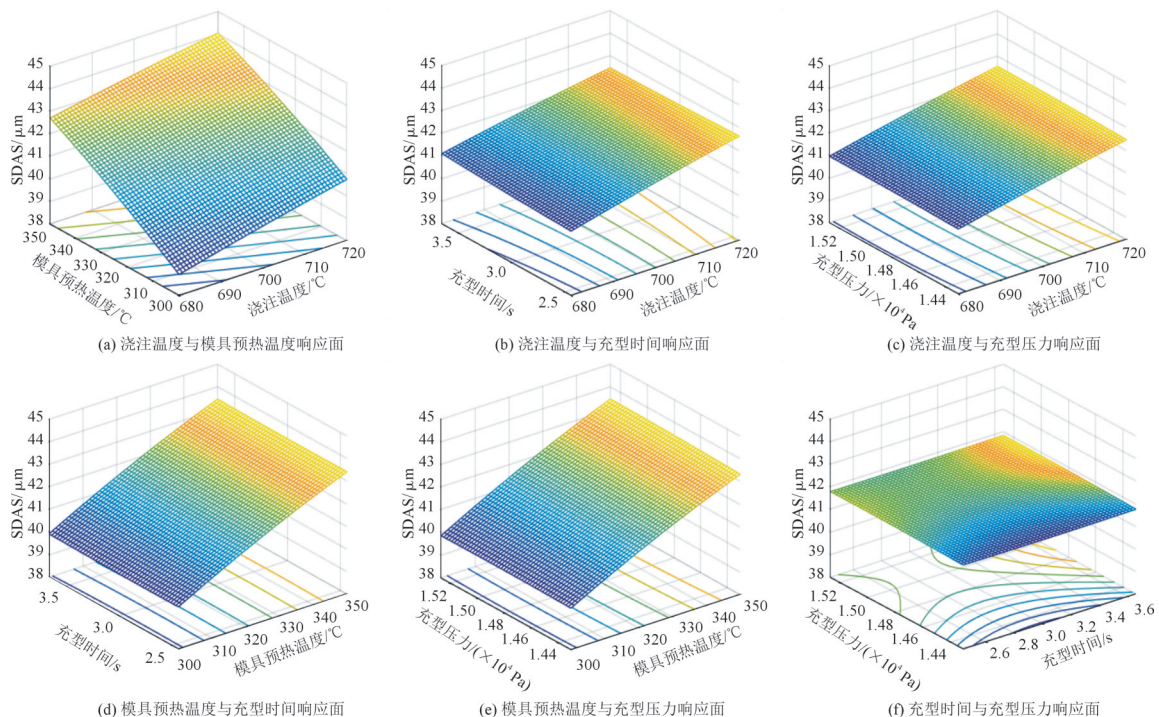


图 6 SDAS 的双因素交互作用三维响应面图

Fig.6 Three dimensional response surface diagram of dual factor interaction of SDAS

表 8 凝固时间的显著性分析

Tab.8 Significance analysis of solidification time

优化参数	P 值	F 值
模型	<0.000 1	12 362.81
浇注温度 X_1	<0.000 1	35 986.51
模具预热温度 X_2	<0.000 1	135 500
充型时间 X_3	<0.000 1	298.52
充型压力 X_4	<0.000 1	820.77

越大时,凝固时间随之增大。以凝固时间为响应指标的回归方程为:

$$Y_3 = -320.16 + 2.12X_1 + 2.22X_2 + 30.15X_3 - 0.13X_4 - 1.01 \times 10^{-3}X_1X_2 - 0.05X_1X_3 + 4.60 \times 10^{-5}X_1X_4 + 7.21 \times 10^{-3}X_2X_3 - 1.00 \times 10^{-5}X_2X_4 + 5.9 \times 10^{-5}X_3X_4 - 1.34 \times 10^{-3}X_1^2 - 1.06 \times 10^{-3}X_2^2 + 0.18X_3^2 + 3.20 \times 10^{-6}X_4^2 \quad (7)$$

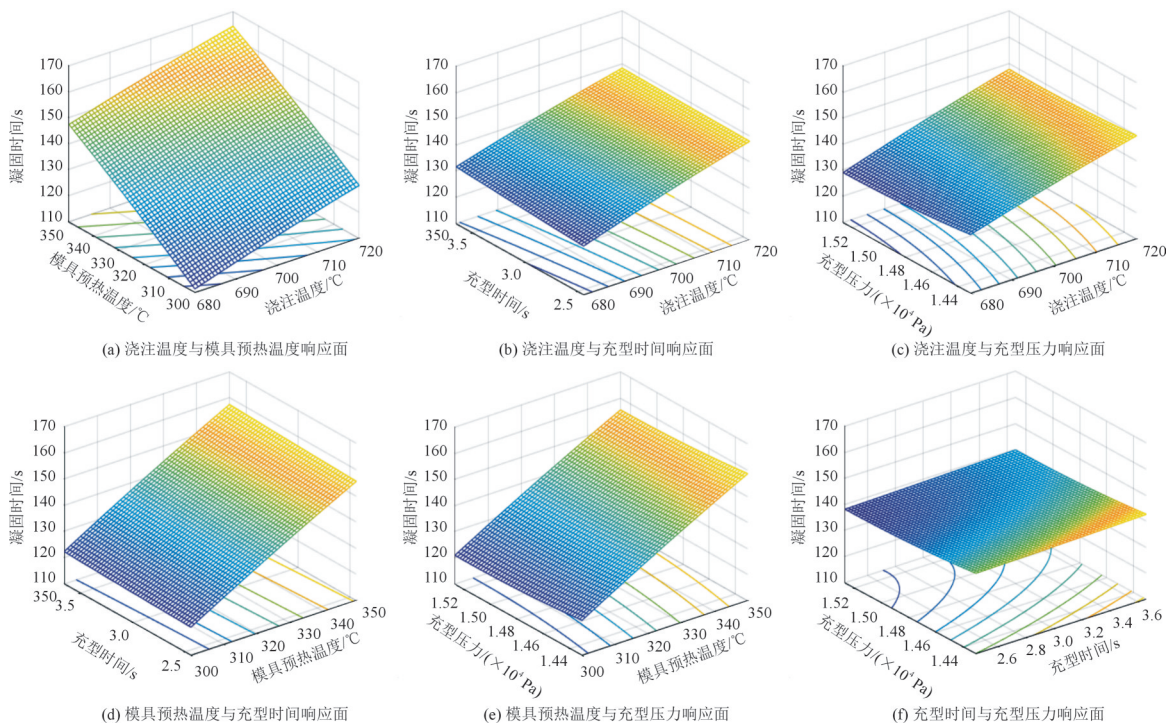


图 7 凝固时间的双因素交互作用三维响应面图

Fig.7 Three dimensional response surface diagram of dual factor interaction of solidification time

3 工艺参数优化

根据得到的响应指标的回归方程,建立的优化问题的数学模型如下:

$$\begin{cases} \min f_1(X_1, X_2, X_3, X_4) = Y_1 \\ \min f_2(X_1, X_2, X_3, X_4) = Y_2 \\ \min f_3(X_1, X_2, X_3, X_4) = Y_3 \\ 680 \leq X_1 \leq 720 \\ 300 \leq X_2 \leq 350 \\ 2.44 \leq X_3 \leq 3.66 \\ 14\,306.92 \leq X_4 \leq 15\,275.36 \end{cases} \quad (8)$$

针对上述的多目标优化问题,选择通过设置权重来将该多目标优化问题转化为单目标优化问题。设置后的单目标优化目标函数如下:

$$Y(X_1, X_2, X_3, X_4) = w_1 Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) + w_2 Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) + w_3 Y_3(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (9)$$

式中, w_1 为孔隙体积分数的权重系数; w_2 为 SDAS 的权重系

数; w_3 为凝固时间的权重系数。

由于铸件首先要保证内部无明显缺陷,所以孔隙体积分数的权重系数要大于另外两个。另外,3个目标函数的数值大小差别过大,在加权系数一致时,求解结果会偏向数值较大的目标。为了消除这种影响,权重系数的大小应与对于目标的数值大小成反比。最终确定权重系数 w_1 、 w_2 和 w_3 分别取 0.7、0.2 和 0.1。以遗传算法作为优化算法^[17],使用 Matlab 软件来进行遗传算法的计算过程,将式(9)作为目标函数,设置种群数量为 50,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1,迭代次数为 200 次。当经过 163 次迭代计算后得到的最优参数组合是浇注温度为 707.89℃,模具预热温度为 329.61℃,充型时间为 3.06 s,充型压力为 14 822.30 Pa。

4 优化结果及试验验证

对优化后的参数组合进行数值模拟,得到孔隙体积为 0.093 cm³,相比初始方案减少了 51%;最大二次枝晶臂间距为 42.39 μm,相比初始方案减小了 1.17%;凝

固时间为146.11 s,相比初始方案减少了0.043%。经由ProCAST计算,优化后的铸件孔隙率为0.21%,小于ProCAST中的缩松缩孔缺陷判定值1%。对优化后的方案进行生产试制并进行采样检测,经检验,成品铸件的内部无明显缺陷,质量符合使用要求。铸件成品及采样金相组织见图8。

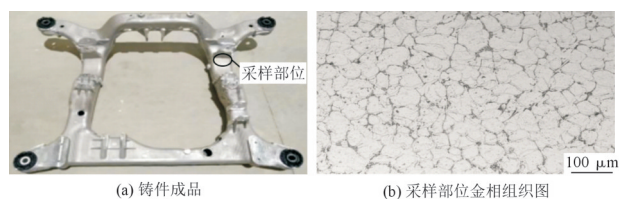


图8 铸件成品及金相组织图

Fig.8 Products and metallographic structure of casting

5 结 论

(1)由响应面法分析可知,对于孔隙体积而言,浇注温度、模具预热温度、充型时间和充型压力过高或过低都会导致孔隙体积增加;对于SDAS而言,浇注温度和模具预热温度对其影响程度较大,会随着浇注温度和模具预热温度的升高而增加;对于凝固时间而言,其会随着浇注温度、模具预热温度和充型时间的增加而增加,随着充型压力的增加而减小。

(2)根据响应面法得到的优化目标函数,并通过遗传算法寻找最优参数组合。计算后得到的优化后的参数组合是浇注温度为707.89℃,模具预热温度为329.61℃,充型时间为3.06 s,充型压力为14 822.30 Pa。相比于初始方案,孔隙体积减少了51%,铸件质量明显提高。SDAS和凝固时间也略有减少。对优化方案进行生产试制并进行采样试验,验证了铸件质量符合使用要求,证明了该优化方案的可行性。

参 考 文 献

- [1] 陈吉清,兰凤崇. 汽车结构轻量化设计与方法[M]. 北京:北京理工大学出版社,2017.
- [2] 周志明,王春欢,黄伟九. 特种铸造[M]. 北京:化学工业出版社,2014.
- [3] 姜月明. 某复杂铝合金铸件低压铸造数值模拟及工艺研究优化[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
- [4] 张东生,李世德,徐佐,等. A356铝合金轮毂低压铸造数值模拟以及组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报,2023,33(6):1 720-1 731.
- [5] KRISADA A, SUPREECHA Y. Quality improvement in a low pressure die casting process of alloy wheels by applying Box-Behnken design[A]//Proceedings of the International Conference on Data Engineering[C]. Krung Thep Maha Nakhon, Engineering King Mongkuts University, 2019.
- [6] DHISALE M, VASAVADA J, TEWARI A. An approach to opti-

mize cooling channel parameters of low pressure die casting process for reducing shrinkage porosity in aluminium alloy wheels[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 3 189-3 196.

- [7] 曹杨婧,李元东,罗晓梅,等. 铸造方式对A356铝合金组织、热导率和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1 424-1 430.
- [8] 周本建. 接触网零部件定位支座本体低压铸造工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(10): 1 300-1 302.
- [9] 李增晖. 铝合金副车架设计及低压铸造工艺优化[D]. 长春:吉林大学, 2019.
- [10] 李宁,朱培浩,胡亚辉,等. 铝合金轮毂低压铸造的模具设计及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(5): 494-497.
- [11] 闫庆斌,王月琴,李世嘉,等. 薄壁铝合金铸件低压铸造工艺优化及设计[J]. 铸造技术, 2014, 35(1): 206-208.
- [12] 詹泉泉,朱德智,陈维平,等. 响应面法优化3D打印呋喃树脂砂工艺条件[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(9): 981-983.
- [13] 陈子业,苏小平,康正阳. A356铝合金套筒低压铸造工艺参数的优化[J]. 热加工工艺, 2024, 53(3): 129-134.
- [14] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
- [15] 董秀琦. 低压及差压铸造理论与实践[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [16] 陶健,苏小平,康正阳. 基于响应面法的A356铝合金转向器阀壳体低压铸造参数优化[J]. 热加工工艺, 2024, 53(3): 140-144.
- [17] 雷英杰,张善文. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2014.

(编辑:张正贺)

2025年数智化铸造与增材制造 专题征稿

专题学术主编:华中科技大学 计效园 教授

征稿范围:

1. 基于人工智能、机器学习算法的产品设计、模型优化技术。
2. 构建数智化铸造与增材制造数据管理系统、基于大数据分析、模拟仿真技术,对增材制造工艺参数(如激光功率、扫描速度等)进行精准优化。
3. 新型智能化铸造与增材制造设备的研发、利用传感器、机器视觉等技术实现质量监控与检测、构建基于数据驱动的质量预测模型。
4. 针对数智化铸造与增材制造的新型材料研发。
5. 数智化铸造与增材制造在航空航天、医疗、汽车等领域的应用案例。

专题文章收录满之后将享有优先发表机会,欢迎踊跃投稿。

投稿网址: www.special-cast.com

收稿截止日期: 2025年9月