

A356 铝合金副车架低压铸造工艺参数的优化研究

林志翔^{1,2} 彭文飞¹ 冯光明² 刘亚刚² 胡奖品²

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 宁波 315211; 2. 宁波力劲科技有限公司, 宁波 315806)

摘要 为提高铝合金副车架的综合质量,以 A356 铝合金副车架为对象,运用 ProCAST 仿真软件对其进行低压铸造过程数值模拟,并通过响应曲面法以最小凝固时间和最小缩孔缩松体积为优化目标,对浇注工艺参数进行多目标优化,并以数值模拟验证优化后的工艺参数。结果表明,优化工艺参数组合是浇注温度为 700 ℃,模具预热温度为 326 ℃,充型压力为 20 kPa。优化工艺参数组合有效减少了铸件凝固时间和缩孔缩松缺陷,提高了铸件成形品质和效率。通过生产进一步验证,发现铸件表面质量良好,铸件内部无明显缺陷,铸件成形质量符合企业生产要求。

关键词 铝合金;副车架;低压铸造;ProCAST;响应曲面法

中图分类号 TP311;TG146.21;TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250061

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

LIN Zhixiang^{1,2}, PENG Wenfei¹, FENG Guangming², LIU Yagang², HU Jiangpin²

(1. College of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211; 2. Ningbo L.K. Technology Co., Ltd., Ningbo 315806)

Abstract: In order to improve the comprehensive quality of aluminum alloy subframe, A356 aluminum alloy subframe was taken as the research object by ProCAST simulation software to numerically simulate the low-pressure casting process, and through the response surface method with the minimum solidification time and the minimum shrinkage cavity (hole) and volume as the optimization objective, the pouring process parameters were optimized with multiple objectives, and the numerical simulation was used to verify the optimized process parameters. The results show that the optimal combination of process parameters are presented as follows: pouring temperature of 700 ℃, mold preheating temperature of 326 ℃, filling pressure of 20 kPa. The optimal combination of process parameters effectively reduces the solidification time and shrinkage cavity (porosity) of castings, and improves the casting quality and efficiency. Through the production experiment to further verify the casting moulding quality, the results show that the casting surface quality is satisfied, and there exists absence of obvious defects inside the casting, so the casting moulding quality is in line with the enterprise production requirements.

Key Words: Aluminum Alloy, Subframe, Low Pressure Casting, ProCAST, Response Surface Method

“以铝代钢”是汽车底盘结构件实现轻量化的主要方式之一。铝合金材料具有密度小、强度高、成形性好以及耐腐蚀等特点,是目前最理想的轻量化材料之一^[1]。低压铸造技术具有少余量、无余量成形加工的特点,同时也是实现汽车铸件精密化、薄壁化、轻量化和节能化的重要措施,但在铸造过程中仍会存在缩孔、缩松、夹渣等缺陷^[2-4]。在铝合金副车架低压铸造过程中,影响铸件质量的因素较多,包括浇注温度、模具预热温度以及浇注工艺参数

等。在铸造系统结构确定的情况下,通常是通过调整工艺参数来提高铸件的成形质量和力学性能^[5]。

得益于计算机辅助工程(Computer aided engineering, CAE)技术的发展,利用有限元法对低压铸造过程进行数值模拟仿真,通过分析仿真结果来调整和优化工艺参数,以实现产品质量改善。HUANG P H 等^[6]针对 A356 铝合金铸件的低压铸造过程开展数值模拟,通过探究不同升液管结构对金属液流动及凝固的影响,

收稿日期:2025-02-14;修订日期:2025-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075272);宁波市科技创新 2025 重大项目资助项目(2023Z037);宁波市创新甬江 2035 重点研发计划资助项目(2024Z074);浙江省自然科学基金资助项目(LMS25E050015)

第一作者:林志翔,男,2000 年出生,硕士研究生,E-mail:2607714701@qq.com

通信作者:彭文飞,男,1983 年出生,教授,E-mail:pengwenfei@nbu.edu.cn

冯光明,男,1984 年出生,高级工程师,E-mail:fgmhark@163.com

引用格式:林志翔,彭文飞,冯光明,等. A356 铝合金副车架低压铸造工艺参数的优化研究[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(5):782-788.

LIN Z X, PENG W F, FENG G M, et al. Optimization of low-pressure casting process parameters for A356 aluminum alloy subframe[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 782-788.

实现对铸件孔隙率的预测及优化,从而有效提升铸件质量。CHEN K C等^[7]通过MagmaSoft软件分析了冷却条件对铸造缺陷的影响,并采用Taguchi法获得了最佳工艺参数组合。FAN P等^[8]建立了铝合金铸件低压铸造数值模拟模型,揭示了A356铝合金车轮中Si宏观偏析规律。TIMELLI G等^[9]研究表明,Sr添加量配合动态压力调控,可显著影响低压铸造铝合金铸件的微观组织,其中,增加Sr的添加量可使铸件微观组织更致密并细化共晶Si相。HIDALGO R等^[10]探讨了气孔缺陷对铝合金低压铸件疲劳极限及寿命的影响机制。KAMAL M R M等^[11]对铸件浇注系统的设计与仿真进行了研究。姜巨福等^[12]利用ProCAST软件对铝合金铸件的充型及凝固过程进行模拟,确定了局部增压铸造的最佳工艺参数。周振等^[13]通过ProCAST软件对铝合金铸件在低压铸造双边浇空冷工艺中的充型与凝固过程开展数值模拟,结合模拟结果表明,采用水冷工艺减小了双边浇工艺的缺陷并进行了验证。

虽然研究者针对低压铸造数值模拟仿真工艺进行了大量研究,但是主要考虑单个工艺参数对铸件质量的影响,因此对于工艺参数的优化需要深入研究。本研究以A356铝合金副车架为对象,运用数值模拟+响应曲面法对其低压铸造工艺进行优化,旨在提高铝合金副车架的成形质量和效率,为铝合金副车架的实际生产提供参考。

1 ProCAST 仿真分析

1.1 铝合金副车架结构

研究对象为铝合金副车架,其外观见图1。铸件轮廓尺寸为1 240 mm×820 mm×298 mm,平均壁厚为4 mm,质量为25.85 kg。浇注系统设计见图2。



图1 铝合金副车架
Fig.1 Aluminum subframe

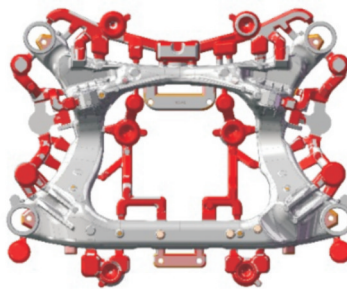


图2 铝合金副车架浇注系统

Fig.2 Gating system for aluminum alloy subframe casting

1.2 模型前处理

将副车架三维模型导入ProCAST软件中,在Mesh模块中进行几何检查及修复,并对其进行面网格及体网格划分,其中,面网格数量为579 160,体网格数量为3 734 217。隐藏砂箱网格划分图见图3。

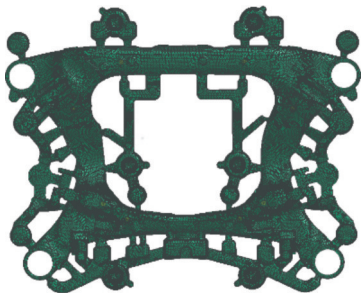


图3 副车架网格划分
Fig.3 Subframe grid meshment

副车架材质为A356铝合金(AlSi7Mg0.3),其化学成分见表1。将表1中各元素的含量输入ProCAST软件材料数据库,进行合金热力学计算,得到A356铝合金材料的热物性参数,其中固相线温度为556℃,液相线温度为616℃。模具材质选用H13钢,直接选用ProCAST软件的材料数据库中的H13模具钢参数。H13钢主要化学成分见表2,其固相线温度为1 355℃,液相线温度为1 473℃。

表1 A356铝合金的化学成分

Tab.1 The chemical component of A356 aluminum alloy %							
w_B							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
6.50~7.50	≤0.20	≤0.05	≤0.10	0.25~0.45	≤0.10	≤0.15	余量

表2 H13钢的主要化学成分

Tab.2 Main chemical composition of H13 steel %							
w_B							
C	Si	Mn	Cr	V	Mo	Fe	
0.32~0.45	0.80~1.20	0.20~0.50	4.75~5.50	0.80~0.12	1.10~1.75	余量	

1.3 参数设置

金属液在凝固过程中,界面传热系数是随温度和时间变化的。根据相关研究对副车架铸造过程的界面传热系数进行设置,见图4^[14]。根据加工工艺,设置充

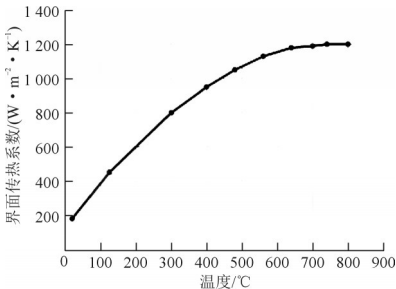


图4 界面传热系数^[14]

Fig.4 Interfacial heat transfer coefficient^[14]

型压力参数见图 5。初步设置浇注温度为 710 ℃, 模具预热温度为 330 ℃。

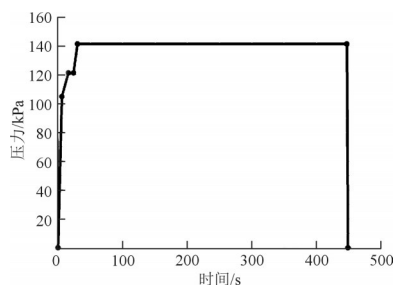


图 5 充型压力参数

Fig.5 Filling pressure parameters

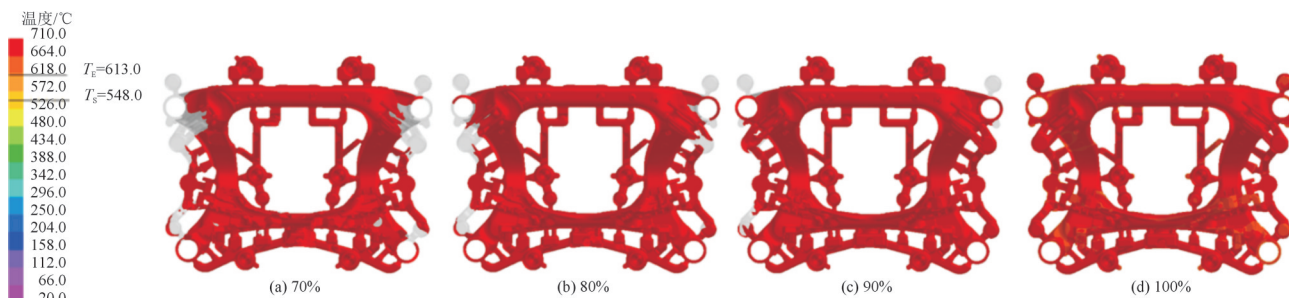


图 6 充型过程温度场分布

Fig.6 Temperature field distribution during mold filling

金属液一直保持较高的温度, 温度场分布合理, 可以保证金属液维持良好的流动性, 浇注系统和初始工艺参数能够满足铸件的充型要求。

1.5 凝固过程模拟结果分析

副车架凝固过程中型腔内铝液的固相率分布情况见图 7。可以看出, 铸件固相率分布整体上遵循薄壁区固相率高, 厚壁区固相率低的规律。凝固整体过程按

1.4 充型过程模拟结果分析

副车架充型过程温度场分布见图 6。可以看出, 充型过程中, 金属液平稳无飞溅现象, 型腔内的金属液始终保持较高的温度, 未出现明显下降。当充型率达到 100% 时, 型腔内的金属液出现温度差, 尤其是副车架下横梁区域, 温度梯度在 60 ℃ 左右, 说明充型即将完成前金属液温度已经有所降低, 可能会降低金属液的流动性, 影响最后充型, 但整个充型过程型腔内金属液仍在液相线(616 ℃)以上, 整个充型过程并未出现提前凝固的现象。通过分析温度场可知, 铸件整个充型过程中,

铸件先凝固, 冒口和浇道后凝固的顺序, 符合凝固要求。当固相率达到 80% 时, 副车架下横梁部分区域出现较小的孤立液相区, 可能导致缩孔缩松缺陷。当铸件完全凝固时, 冒口区域固相率约为 60%, 说明整个凝固过程冒口一直在发挥补缩作用。

在初始工艺方案条件下, 铸件缩孔缩松缺陷模拟结果见图 8。可以看出, 初始缩孔缩松体积为 3.096 cm³, 铸件缩孔缩松缺陷基本分布在上述出现孤立液相区的区

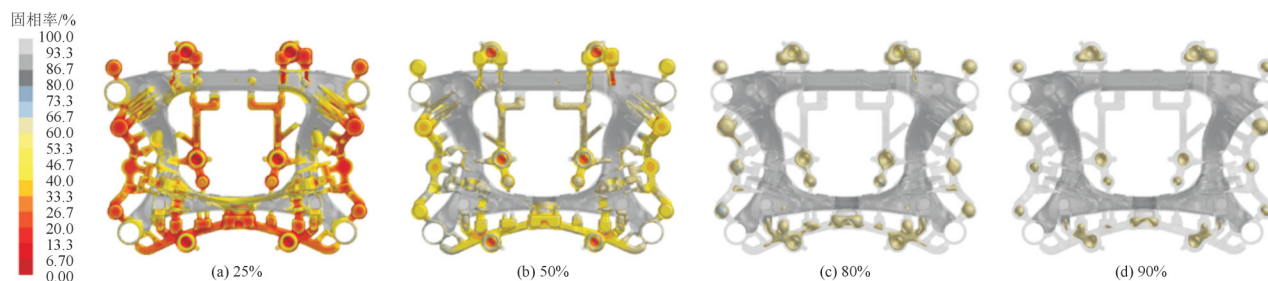


图 7 凝固过程固相率分布

Fig.7 Solid phase fraction distribution during solidification process

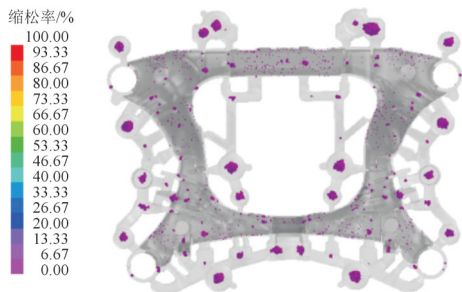


图 8 缩孔缩松缺陷模拟结果

Fig.8 Simulation results of shrinkage porosities(cavities) defects

域。因此为了减少缺陷, 需对工艺参数进行优化。

2 工艺参数优化及验证

2.1 响应曲面试验设计及结果统计

响应曲面法(Response surface methodology, RSM) 是一种通过对回归方程分析寻求最优工艺参数, 解决多变量问题的一种统计与数学建模技术, 由于考虑了多因素间的交互作用, 更适合多组分材料的配合比

优化^[15]。

为研究多个工艺参数在交互作用下对凝固时间和缩孔缩松体积的影响,以浇注温度、模具预热温度和充型压力为优化参数,以凝固时间(Y_1)和缩孔缩松体积(Y_2)为优化目标,设计响应曲面试验。各因素依据实际工程经验选取3个水平,通过Design-Expert软件进行3因素3水平试验设计。响应曲面试验因素-水平表见表3。

表3 响应曲面试验因素-水平表

Tab.3 Response surface test factor-level table			
水平	因素		
	浇注温度(A)/℃	模具预热温度(B)/℃	充型压力(C)/kPa
1	700	320	20
2	710	330	25
3	720	340	30

通过ProCAST软件对A356铝合金副车架低压铸造过程进行数值模拟,统计相应的模拟结果。响应曲面试验设计及结果统计见表4。

表4 响应曲面试验设计及模拟结果统计

Tab.4 Response surface experimental design and simulation results statistics					
序号	A/℃	B/℃	C/kPa	Y_1 /s	Y_2 /cm ³
1	720	320	25	158.779	3.09
2	710	330	25	159.953	3.04
3	700	330	20	157.757	2.98
4	710	340	20	171.904	2.97
5	710	330	25	161.336	3.05
6	710	330	25	160.977	3.02
7	710	320	20	154.713	3.08
8	710	330	25	164.083	3.06
9	720	340	25	173.758	2.93
10	710	340	30	170.453	2.89
11	700	340	25	164.898	3.06
12	720	330	30	166.229	2.97
13	710	320	30	155.609	3.12
14	700	330	30	159.298	3.04
15	710	330	25	162.089	3.04
16	700	320	25	153.884	3.16
17	720	330	20	164.502	2.96
—	—	—	—	—	—

2.2 凝固时间响应曲面试验结果分析

以凝固时间作为目标响应变量,基于试验设计方案及实测数据构建并分析数学模型,获取响应面模型的方差分析结果,见表5。凝固时间模型的拟合汇总表6。

一般而言,对于良好的模型, $P<0.01$,表示高度显著; $0.01<P<0.05$,表示显著; $0.05<P$,表示不显著。决定系数 R^2 应不小于0.8,且 R^2 的值越接近1表明模型数据拟合度越高。

由表5可知,凝固时间模型的方差分析中, P 值为

表5 凝固时间模型方差分析结果

Tab.5 Solidification time model ANOVA results					
因素	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	527.63	9	58.63	25.76	0.000 1
A	94.06	1	94.06	41.34	0.000 4
B	420.88	1	420.88	184.97	<0.000 1
C	0.919 9	1	0.919 9	0.404 3	0.545 1
AB	3.93	1	3.93	1.73	0.230 2
AC	0.008 7	1	0.008 7	0.003 8	0.952 5
BC	1.38	1	1.38	0.605 1	0.462 1
A^2	0.006 9	1	0.006 9	0.003 0	0.957 6
B^2	5.89	1	5.89	2.59	0.151 7
C^2	0.377 1	1	0.377 1	0.165 7	0.696 1
残差	15.93	7	2.28		
失拟项	6.39	3	2.13	0.894 0	0.517 4
纯误差	9.53	4	2.38		
总值	543.55	16			

表6 凝固时间模型拟合汇总

Tab.6 Summary of solidification time model fitting		
R^2	R^2_{adj}	$C_V/\%$
0.970 7	0.933 0	0.929 0

0.000 1,表明模型高度显著,一次项浇注温度和模具预热温度的 P 值小于0.01,对凝固时间的影响非常显著。通过表6可知,模型的決定系数 R^2 为0.970 7,修正決定系数 R^2_{adj} 为0.933 0,均接近1,表明预测模型与实际值有较好的符合度。变异系数 C_V 为0.929 0%,在合理范围内,表明模型可靠性较高。基于试验数据开展二次回归分析,构建响应变量(Y_1)与自变量一次项(A,B,C)、交互项(AB,AC,BC)及二次项(A^2 , B^2 , C^2)的回归模型为:

$$Y_1 = 3\,010.792\,01 - 2.376\,34A - 13.825\,77B + 2.679\,79C + 0.009\,913AB + 0.000\,932AC - 0.011\,734BC - 0.000\,405A^2 + 0.011\,828B^2 + 0.011\,971C^2 \quad (1)$$

图9为以 Y_1 模型绘制的响应曲面图,直观展现浇注温度和模具预热温度、充型压力两两交互作用对 Y_1 的影响规律。从图9a可以看出,当充型压力为25 kPa时,凝固时间随浇注温度升高而有所延长,约延长了5 s;凝固时间随着模具预热温度的升高从153 s延长到166 s,延长趋势显著。在浇注温度与模具预热温度同时升高的交互作用下,凝固时间从153 s延长到175 s,这是因为随着浇注温度和模具预热温度升高,导致金属液与模具间温差减小,冷却速率下降,从而导致凝固时间上升。从图9b可知,当模具预热温度为330 ℃时,凝固时间随着浇注温度升高而有所延长,约延长了6 s;凝固时间随着充型压力的增大变化幅度不明显。在浇注温度与充型压力同时升高的交互作用下,凝固时间从159 s上升到166 s,说明充型压力越大,金属液流动

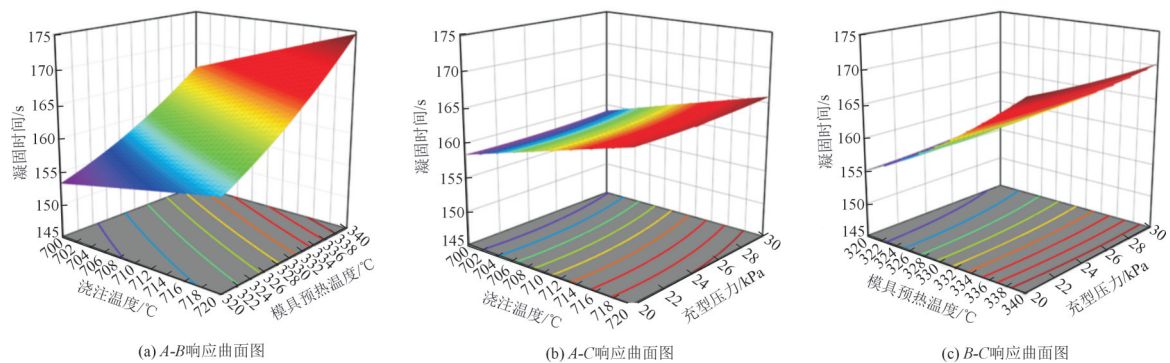


图9 凝固时间响应曲面图

Fig.9 Solidification time response surface plot

时间越少,与模具热交换越少,从而使凝固时间没有明显的变化。从图 9c 可知,当浇注温度为 710 ℃ 时,凝固时间随模具预热温度升高而显著延长,约延长了 16 s,而充型压力变化对凝固时间的影响幅度不明显。在两因素交互作用下,凝固时间从 155 s 延长到 171 s,原因与上述相似。综上可知,模具预热温度对铸件凝固时间的影响最显著,其次是浇注温度,充型压力影响最小,模具预热温度和浇注温度通过影响金属液冷却速度,从而影响铸件的凝固时间。

2.3 缩孔缩松体积响应曲面试验结果分析

以缩孔缩松体积作为目标响应变量,基于试验设计方案及实测数据构建并分析数学模型,获取响应面模型的方差分析结果,见表 7。缩孔缩松体积模型的拟合汇总见表 8。

表 7 缩孔缩松模型方差分析结果

Tab.7 ANOVA results of the shrinkage cavity (porosities) model					
因素	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.073 0	9	0.008 1	12.08	0.001 7
A	0.010 5	1	0.010 5	15.64	0.005 5
B	0.045 0	1	0.045 0	66.95	<0.000 1
C	0.000 1	1	0.000 1	0.167 4	0.694 7
AB	0.000 9	1	0.000 9	1.34	0.285 2
AC	0.000 6	1	0.000 6	0.929 9	0.367 0
BC	0.003 6	1	0.003 6	5.36	0.053 8
A ²	0.000 1	1	0.000 1	0.141 3	0.718 1
B ²	0.002 2	1	0.002 2	3.24	0.114 8
C ²	0.010 4	1	0.010 4	15.50	0.005 6
残差	0.004 7	7	0.000 7		
失拟项	0.003 8	3	0.001 3	5.80	0.061 3
纯误差	0.000 9	4	0.000 2		
总值	0.077 8	16			

表 8 缩孔缩松体积模型拟合汇总

Tab.8 Summary of shrinkage volume model fitting		
R ²	R ² _{adj}	C _v /%
0.939 5	0.861 7	0.856 5

由表 7 可知,缩孔缩松体积模型的方差分析中,P 值为 0.001 7,表明模型高度显著,其中一次项浇注温度和模具预热温度的 P 值小于 0.01,对缩孔缩松体积的影响非常显著。通过表 8 可知,模型的决定系数 R² 为 0.939 5,修正决定系数 R²_{adj} 为 0.861 7,均接近 1,表明预测模型与实际值有较好的符合度。变异系数 C_v 为 0.856 5%,在合理范围内,表明模型可靠性较高。基于试验数据开展二次回归分析,构建响应变量(Y₂)与自变量一次项(A,B,C)、交互项(AB,AC,BC)及二次项(A²,B²,C²)的回归模型为:

$$Y_2 = -36.874\,25 + 0.119\,575A - 0.036\,150B + 0.475\,750C - 0.000\,150AB - 0.000\,250AC - 0.000\,600BC - 0.000\,047A^2 + 0.000\,228B^2 - 0.001\,990C^2 \quad (2)$$

图 10 为以 Y₂ 模型绘制的响应曲面图,直观展现浇注温度、模具预热温度和充型压力两两交互作用对 Y₂ 的影响规律。由图 10a 可知,当充型压力为 25 kPa 时,缩孔缩松体积随着浇注温度升高而略有降低,随着模具预热温度的升高而减少,约减少了 0.1 cm³。在两因素同时升高的交互作用下,缩孔缩松体积从 3.45 cm³ 下降至 3.25 cm³,这是由于模具预热温度和浇注温度的升高,有助于增强金属液流动性和补缩能力,从而减小缩孔缩松体积。由图 10b 可知,当模具预热温度为 330 ℃ 时,浇注温度升高使缺陷体积轻微降低,随着充型压力的增大表现出先上升后下降的趋势,整体略有上升。在两因素同时升高的交互作用下,缩孔缩松体积表现出先增大后减小的非线性趋势,整体从 3.34 cm³ 下降至 3.26 cm³,这是由于充型压力越大,充型时间越短,金属液上升速度越快,金属液上升不平稳,容易产生飞溅,从而使铸件中出现气孔等缺陷,但是当压力持续增大到一定程度,过大的压力有助于后续的补缩,从而使缩孔缩松缺陷减少。充型压力越小,充型时间越长,金属液流速慢,充型平稳,缩孔缩松减少,但是过低的压力会导致金属液在充型过程中因热量损失过多而提前凝

固,容易发生冷隔等缺陷。从图 10c 可知,当浇注温度为 710 ℃时,模具预热温度升高使缺陷体积下降 0.1 cm³。缩孔缩松体积随着充型压力增大表现出先上升后下降的趋势,整体有所上升。在两因素同时升高

的交互作用下,缩孔缩松体积表现出先增大后减小的非线性趋势,原因与上述相似。综上可知,模具预热温度对缩孔缩松体积影响最显著,其次是浇注温度,充型压力影响最小。

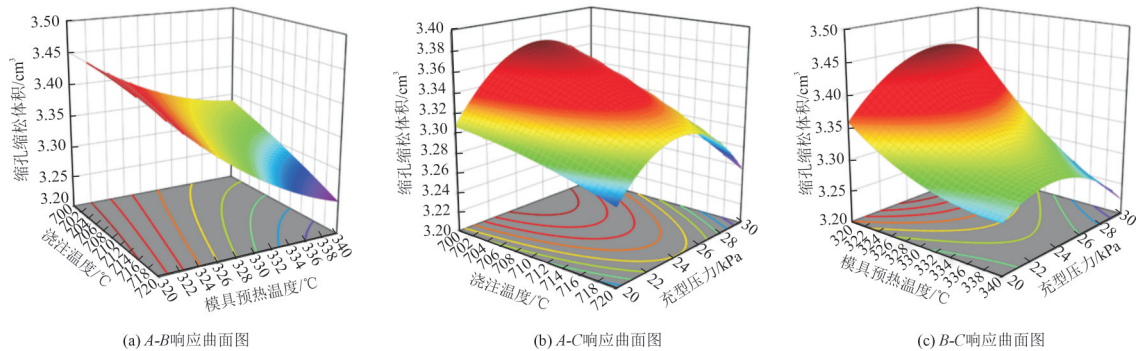


图 10 缩孔缩松体积响应曲面图

Fig.10 Shrinkage hole shrinkage volume response surface plot

2.4 工艺参数优化

为实现铸件凝固时间与缩孔缩松体积的协同控制,依托 Design-Expert 软件对工艺参数组合进行寻优。表 9 为各指标参数优化范围。根据表 9 中各指标范围通过 Design-Expert 软件的 Numerical 模块对工艺参数进行多目标优化,得到优化工艺参数组合:浇注温度为 700 ℃、模具预热温度为 326 ℃、充型压力为 20 kPa。对最优化工艺参数组合进行预测,凝固时间预测值为 155.897 s,缩孔缩松体积的预测值为 3.021 cm³。

表 9 各指标参数优化范围

Tab.9 Optimization range of each index parameter

工艺参数	A/℃	B/℃	C/kPa	Y ₁ /s	Y ₂ /cm ³
目标	范围内	范围内	范围内	最小	最小
低水平	700	320	20	153.884	2.89
高水平	720	340	30	173.758	3.16

2.5 数值模拟验证

根据最佳工艺参数组合,对铝合金副车架低压铸造过程进行数值模拟验证。方案结果对比见表 10,凝固时间、缩孔缩松体积数值模拟对比见图 11 和图 12。通过对比预测优化方案与实际优化方案可以看出,铸件凝固时间为 156.521 s,提高了 0.624 s,缩孔缩松体积为 2.998 cm³,减小了 0.023 cm³,相对误差较低,证明方法准确可靠。通过对比初始方案和优化方案可以看出,优化后铸件凝固时间和缩孔缩松体积都相对减少,

表 10 方案结果对比

Tab.10 Comparison of program results

工艺参数	初始方案	优化方案(预测)	优化方案(实际)
Y ₁ /s	160.343	155.897	156.521
Y ₂ /cm ³	3.096	3.021	2.998

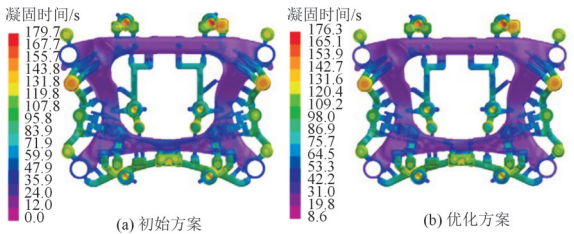


图 11 凝固时间对比

Fig.11 Comparison of solidification times

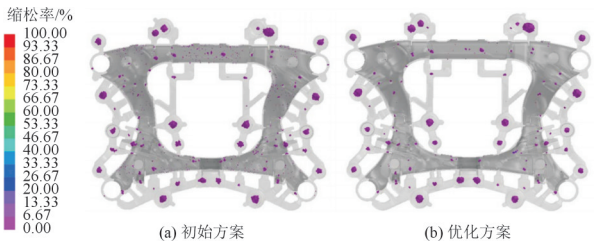


图 12 缩孔缩松体积对比

Fig.12 Comparison of shrinkage volume

铸件的成形质量和力学性能都有所提高。

3 试验验证

3.1 生产试验

采用最佳工艺参数进行生产,获得的副车架低压铸件见图 13。可见副车架表面光洁,无裂纹、飞边、冷隔等缺陷,质量良好。

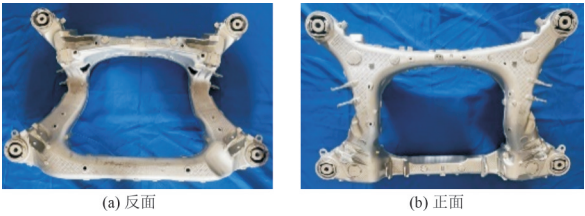


图 13 副车架铸件实物图

Fig.13 X-ray flaw detection of subframe

3.2 X射线探伤验证

通过X射线实时成像检测系统对副车架铸件的各个区域进行观测,检验铸件的内部质量。图14为副车

架各个区域X射线探伤检测结果。可以看出,铸件内部无明显缩孔缩松、气孔、夹渣等缺陷,成形质量良好,满足要求。

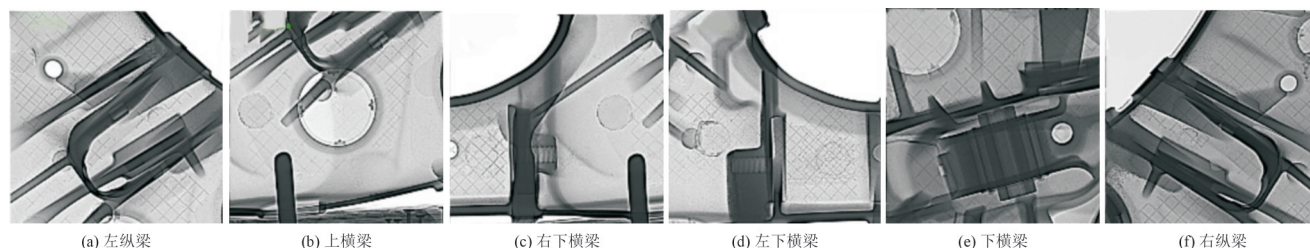


图14 X射线探伤检测结果

Fig.14 X-ray flaw detection results

4 结 论

(1)对A356铝合金副车架低压铸造过程进行数值模拟,验证了浇注系统和初始工艺参数方案能够满足铸件的充型要求。

(2)通过响应曲面图对比分析,得出工艺参数对凝固时间和缩孔缩松体积的影响。最终得到优化工艺参数组合:浇注温度为700℃,模具预热温度为326℃,充型压力为20 kPa。

(3)对优化后的工艺参数进行数值模拟验证,优化后铸件凝固时间和缩孔缩松体积均相对减少,铸件的成形质量和力学性能都有所提高。

(4)采用优化工艺参数进行副车架生产,铸件表面质量良好,进行X射线探伤,发现铸件内部无明显缺陷。

参 考 文 献

- [1] 陈来,王占坤,邹纯,等.汽车用铝合金副车架成形工艺及应用现状[J].铸造,2019,68(4):390-395.
- [2] 郑小秋,谢世坤,易荣喜,等.低压铸造技术:发展历程、研究现状和未来趋势[J].材料导报,2016,30(7):74-80,85.
- [3] SUN J Y, LE Q C, FU L, et al. Gas entrainment behavior of aluminum alloy engine crankcases during the low-pressure die-casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 274-282.
- [4] WANG R J, WU S P, CHEN W. Mechanism of burst feeding in ZL205A casting under mechanical vibration and low pressure [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(8): 1 514-1 520.
- [5] 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.
- [6] HUANG P H, WU W J, SHIEH C H. Numerical simulations of low pressure die-casting for A356 aluminum rims [J]. Materials Science Forum, 2017, 4440: 276-280.
- [7] CHEN K, CHIU J Y, WANG S. Analysis of Cooling Conditions of A356 Aluminum Alloy Rim Low-pressure Casting [C]// Science and Engineering Research Center. Proceedings of 2017 2nd Interna-

tional Conference on Electrical and Electronics: Techniques and Applications (EETA2017). Beijing, 2017.

- [8] FAN P, COCKCROFT S, MAIJER D, et al. Examination and simulation of silicon macrosegregation in A356 wheel casting [J]. Metals, 2018, 8(7): 503.
- [9] TIMELLI G, CALIARI D, RAKHMONOV J. Influence of process parameters and Sr addition on the microstructure and casting defects of LPDC A356 alloy for engine blocks [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 30(6): 515-523.
- [10] HIDALGO R, ESNAOLA J A, LLAVORI, et al. Fatigue life estimation of cast aluminum alloys considering the effect of porosity on initiation and propagation phases [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125: 468-478.
- [11] TU C, KEVIN O, SANTOS M S, et al. Industry 4.0 foundry data management and supervised machine learning in low-pressure die casting quality improvement [J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 17(1): 414-429.
- [12] 姜巨福,匡君,张颖,等. A356.2铝合金轮毂局部增压铸造过程数值模拟[J].中国有色金属学报,2022,32(2):313-321.
- [13] 周振,卢德宏,何宇航,等.大尺寸铝合金轮毂双边浇注低压铸造工艺的模拟及优化[J].特种铸造及有色合金,2024,44(4):484-489.
- [14] 汪壮显,洪润洲,熊艳才,等.铝合金砂型低压铸造界面传热系数的测定[J].特种铸造及有色合金,2018,38(12):1 323-1 327.
- [15] 周梅,白金婷,郭凌志,等.基于响应曲面法的煤矸石地聚物注浆材料配比优化[J].材料导报,2023,37(20):123-131.

(编辑:张正贺)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

欢迎登陆《特种铸造及有色合金》杂志官方网站投稿、阅读、审稿,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载pdf文件,并可体验AI导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!