

基于灰色关联度分析的熔模铸造工艺优化

王 伟^{1,2} 魏赛男^{1,3} 刘瑞雪¹ 马意智³ 孙路宁³

(1. 河北科技大学材料科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 河北省材料近净成形技术重点实验室, 石家庄 050018; 3. 河北科技大学纺织服装学院, 石家庄 050018)

摘 要 以某不锈钢三通阀体为对象, 针对其在熔模铸造生产中出现缩孔、缩松和变形情况较多的问题, 利用 ProCAST 软件和灰色关联度分析对其生产工艺进行研究。通过改进浇注系统, 分析原方案出现缺陷的原因。以缩松、缩孔和变形量为质量目标设计了正交试验, 通过灰色关联度分析确定了理论最佳工艺参数, 分析了不同因素对铸件影响的显著性。结果表明, 灰色关联度分析适用于熔模铸造工艺参数优化, 浇注系统对铸件的质量影响最大, 其次是浇注时间, 最后是型壳焙烧温度和浇注温度, 得到了优化工艺参数: 浇注温度为 1 610 ℃、型壳焙烧温度为 1 050 ℃、浇注时间为 6 s。

关键词 缩孔缩松; 变形量; 数值模拟; 工艺优化; 灰色关联度分析

中图分类号 TG249.5; TP311

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240104

Optimization of Investment Casting Process Based on Grey Correlation Analysis

WANG Wei^{1,2}, WEI Sainan^{1,3}, LIU Ruixue¹, MA Yizhi³, SUN Luning³

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018; 2. Key Laboratory of Materials Near Net Forming Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050018; 3. School of Textile and Clothing, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018)

Abstract: Taking a certain stainless steel three-way valve body as object, in view of large amounts of shrinkage, porosity, and deformation during investment casting production, the process was investigated using ProCAST software and grey correlation analysis, and the reason for defects in the primary scheme was analyzed by optimizing gating system. Orthogonal experiments were designed with shrinkage, porosity, and deformation as quality objectives, and the theoretical optimal process parameters were determined through grey correlation analysis to explore the significance of different factors on castings. The results indicate that grey correlation analysis is suitable for optimizing investment casting process parameters. The gating system has the greatest impact on quality of castings, which is followed by pouring time, shell baking temperature and pouring temperature. The optimal process parameters were obtained as pouring temperature of 1 610 ℃, shell baking temperature of 1 050 ℃ and pouring time of 6 s.

Key Words: Shrinkage and Porosities, Deformation Amount, Numerical Simulation, Process Optimization, Grey Correlation Analysis

阀体广泛应用于航空航天、军工、燃气、水利和新能源等领域, 是管道控制系统中不可或缺的组成部分, 用于调节通路截面大小和控制流体的流动方向^[1]。阀体的工作环境一般为高压, 在整个控制系统中处于关键位置, 故安全性与可靠性成为制造阀体的主要原则, 制造工艺显著影响阀体性能, 受到了高度重视^[2-3]。

三通阀体是阀体中的一种, 其结构分为 T 型和 Y

型^[4]。熔模铸造是近净成形三通阀体的重要制造工艺, 适用于生产复杂结构铸件且工艺出品率高, 但其影响铸件质量的工序繁多^[5-6], 且铸件容易出现缩松、缩孔、夹渣和变形等缺陷, 降低铸件力学性能和可靠性, 优化浇注系统结构和工艺参数是避免上述缺陷的有效措施^[7]。

目前, 铸造工艺优化主要基于仿真和试验相结合。DONG J G 等^[8]利用 ProCAST 软件对 A356 合金轮毂

收稿日期: 2024-03-16; 修订日期: 2024-04-19

基金项目: 石家庄市科技计划资助项目(221190171A)

第一作者简介: 王伟, 男, 1999 年出生, 硕士研究生, E-mail: 15226827295@163.com

通信作者: 魏赛男, 女, 1981 年出生, 教授, E-mail: Wsn1009@sina.com

引用格式: 王伟, 魏赛男, 刘瑞雪, 等. 基于灰色关联度分析的熔模铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(7): 1 104-1 110.

WANG W, WEI S N, LIU R X, et al. Optimization of investment casting process based on grey correlation analysis[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2025, 45(7): 1 104-1 110.

的LPDC(低压铸造)过程进行数值模拟,研究轮毂在不同冷却条件下的成形质量。通过比较不同冷却条件下轮辋的拉伸性能,发现在冷却水流量为400 L/h的条件下冷却140 s的轮毂具有较高的抗拉强度和伸长率,分别为178.9 MPa和6.6%。YUWEN X X等^[9]基于有限元理论,利用Fluent软件对浇注过程中金属液流动情况和温度场进行数值模拟,设置浇注速度、温度和传热系数等边界条件和初始条件,评估用Fluent进行铸造模拟的可行性,观察到金属液体的流动情况,记录浇注结束时温度分布数据,为进一步探究铸件的凝固过程提供了初始条件。

工艺参数是保证铸件质量的关键,数值模拟是降低传统试错成本、缩短试验时间和优化工艺参数的重要手段。KARTHIK A等^[10]利用L9正交试验对挤压铸造中挤压压力、模具和熔体温度等工艺参数进行了优化,确定硬度和密度的信噪比,对挤压铸造的响应进行了田口分析,确定影响硬度和密度的优化工艺参数。发现在优化工艺参数下,合金具有较好的力学性能和金相组织。CHAUDHARI A等^[11]研究了基于马尔可夫链模型的可靠性铸造工艺参数优化,使用概率方法研究了工艺参数与铸造缺陷概率的关系,证明了马尔可夫模型在预测铸造缺陷研究中的有效性。综上,可通过有限元数值模拟改进浇注系统,利用统计学方法优化工艺参数,提高铸件质量^[12]。

已有研究通过数值模拟预测铸件缺陷并优化工艺参数,但灰色关联度分析在熔模铸造工艺参数优化中应用较少,同时其需要样本较少,能减少试验次数进而降低生产成本和提高研发效率。因此,本研究采用有限元模拟和灰色关联度分析,对三通阀体熔模铸造工艺中浇注系统与工艺参数进行优化,探究三通阀体铸件产生缺陷和变形的原因以及灰色关联度分析在熔模铸造工艺参数优化中的应用,旨在为相关生产提供参考。

1 铸件材料、结构及工艺优化

1.1 化学成分

铸件材质为SCS16(日标)不锈钢,其化学成分见表1。采用ProCAST软件自带数据库读取SCS16不锈

表1 SCS16不锈钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of SCS16 stainless steel %								
w_B								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
<0.03	<1.5	<2	<0.04	<0.04	12~16	17~20	2~3	余量

钢和莫来石陶瓷型壳的热物性参数,分别见图1和图2。

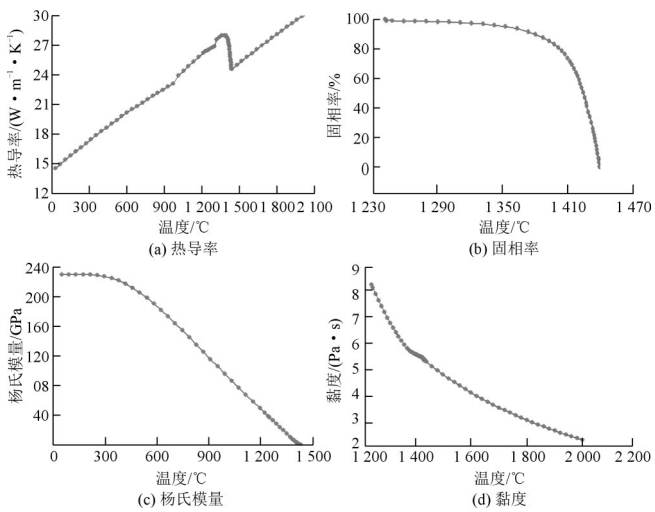


图1 SCS16不锈钢的热物性参数

Fig.1 Thermophysical parameters of SCS16 stainless steel

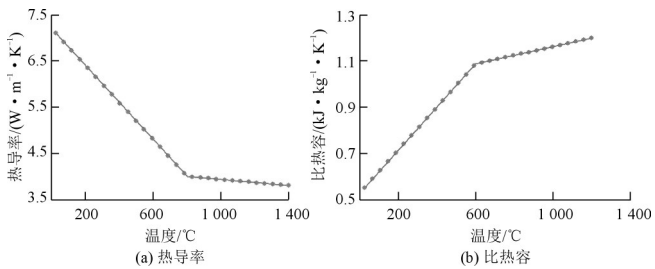


图2 莫来石陶瓷型壳热物性参数

Fig.2 Thermophysical parameters of mullite ceramic shell

1.2 铸件结构分析

铸件质量为2.42 kg,总长为150 mm,连接部位最大外径为78 mm,最大壁厚为24.96 mm,最小壁厚为4 mm。铸件为三通类结构,见图3。铸件薄厚不均,表现为上厚下薄,中间位置厚端面位置薄,内壁薄且结构复杂,内腔要求光滑平整,尺寸严格,原工艺在铸件凝固过程中易出现缩松、缩孔和变形等缺陷,见图4。

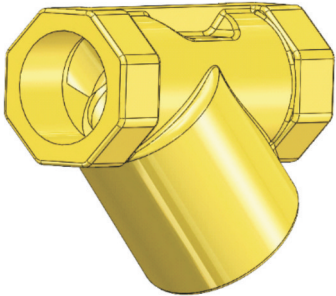


图3 铸件三维模型图

Fig.3 3D model of casting

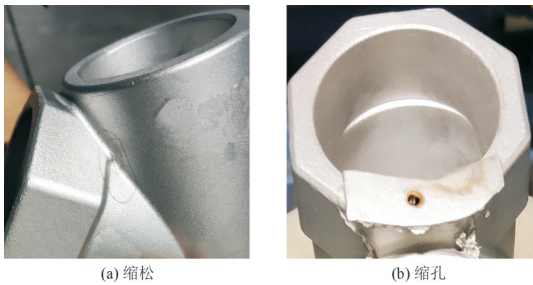


图 4 原工艺铸件缩松、缩孔缺陷图

Fig.4 Schematic diagram of shrinkage and porosities in initial process

1.3 铸件浇注系统模拟

图 5 为带浇注系统的铸件三维图及网格划分图。铸件原浇注系统为顶注式浇注系统,将其三维模型导入 ProCAST 软件 Visual-Mesh 模块中进行网格划分,浇道网格尺寸设为 4 mm,铸件网格单元尺寸设为 2 mm,面网格总数为 195 858 个,体网格总数为 1 459 060 个^[13-14]。

设置重力加速度与重力方向,型壳材料类型为模

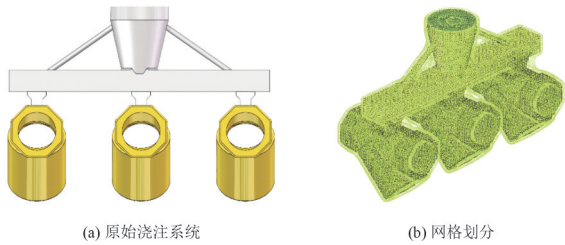


图 5 铸件原浇注系统模型及网格划分

Fig.5 Initial gating system model and grid meshing

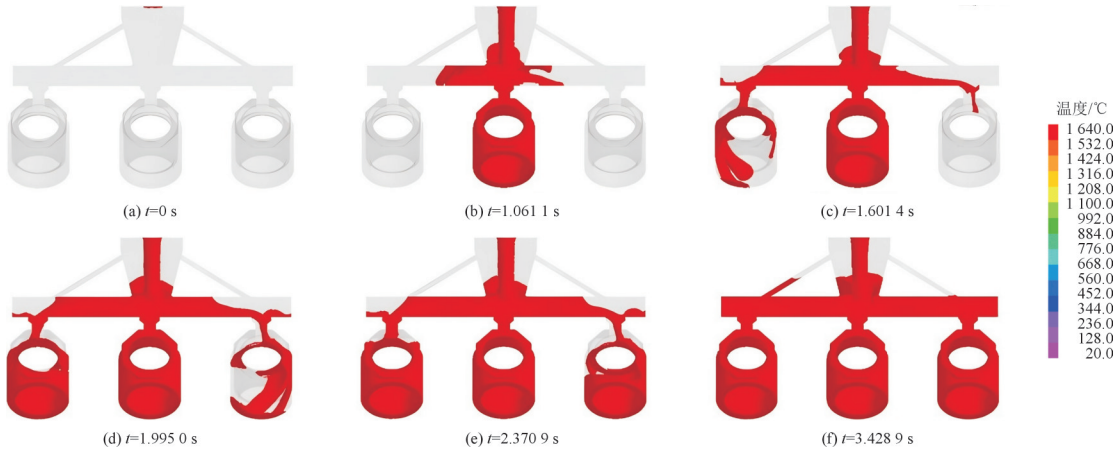


图 7 铸件充型温度场模拟

Fig.7 Filling temperature field simulation of casting

2 工艺方案优化

合适的浇注温度、型壳焙烧温度、浇注时间等工艺参数是铸件质量的保证。浇注温度过高有利于铸件成形,但铸件晶粒粗大,易产生变形和缩孔^[15]。浇注速度先快后慢,可减少铸件缩孔。型壳温度低,容易产生冷

具,材料为耐火莫来石,型壳焙烧温度为 1 050 ℃,铸件浇注温度为 1 640 ℃,铸件与型壳之间的传热系数为 500 W/(m²·K),冷却条件为空冷,空冷状态下型壳与空气传热系数为 10 W/(m²·K),外界环境温度为 20 ℃,浇注时间为 4 s,铸造方式为精密铸造。

1.4 缺陷原因分析

图 6 为铸件凝固后各部位的变形量和缩松、缩孔分布图。可以看出,铸件上出现了较大的缩孔、缩松缺陷,孔隙体积达到了 1.95 cm³。变形量较大,铸件接口部位的平均变形量达到了 0.032 5 cm。

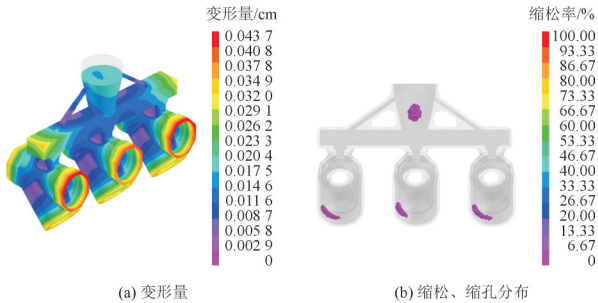


图 6 凝固后铸件各部位变形量和缩松、缩孔分布图

Fig.6 Deformation amounts and shrinkage, porosities of casting at various positions after solidification

铸件充型温度场模拟见图 7。可以看出,缺陷出现的位置均为连接口处的厚实处,该位置热量集中,散热困难,不利于顺序凝固,不能得到金属液的补缩就会产生缩孔、缩松缺陷。

隔和夹杂等缺陷,但温度过高会导致铸件晶粒粗大,力学性能下降^[16]。

根据上述原因制定如下优化方案:首先增加内浇道数量,对铸件厚实部位进行补缩,改进后的浇注系统模型见图 8,其次利用正交试验法和灰色关联度法筛选出优化的工艺参数。

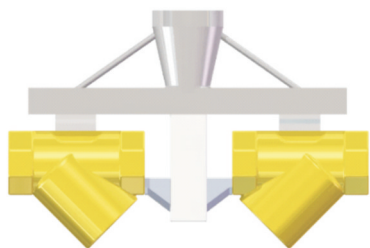


图8 优化后浇注系统模型

Fig.8 Model of optimized gating system

铸件缩松、缩孔体积大小和变形量是评价铸件质量的重要指标^[17],浇注温度(A)、型壳焙烧温度(B)和浇注时间(C)是熔模铸造过程中的重要工艺参数,因此对上述3种因素对缩松、缩孔体积大小和变形量的影响展开研究。设计的正交试验因素水平表和正交试验方案分别见表2和表3。

表2 正交试验因素水平表

Tab.2 Factor level for orthogonal experiment

水平	因素		
	浇注温度(A)/℃	型壳焙烧温度(B)/℃	浇注时间(C)/s
1	1 610	1 000	4
2	1 640	1 050	6
3	1 670	1 100	8

表3 正交试验方案表

Tab.3 Scheme for orthogonal experiment

编号	A/℃	B/℃	C/s
1	1 610	1 000	4
2	1 610	1 050	6
3	1 610	1 100	8
4	1 640	1 000	6
5	1 640	1 050	8
6	1 640	1 100	4
7	1 670	1 000	8
8	1 670	1 050	4
9	1 670	1 100	6

3 试验结果与讨论

3.1 灰色关联度分析

灰色关联分析是一种统计分析的方法,适用于多因素影响的质量目标。灰色关联度分析对数据规律性要求低且样本容量可以少到4个,可以减少试验次数从而降低生产成本。核心思想是首先将原始质量目标无量纲化,然后计算关联系数和关联度,通过关联度的大小分析因素影响是否显著并对其进行排序。

首先利用区间值变换对原始质量目标数据进行无量纲化处理:

$$y_i = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (1)$$

式中, x_i 为第*i*次试验值; y_i 为无量纲化值。

灰色关联系数(δ_i)计算公式为:

$$\delta_i = \frac{\min |y_i^0 - y_i| + \rho \max |y_i^0 - y_i|}{|y_i^0 - y_i| + \rho \max |y_i^0 - y_i|} \quad (2)$$

式中, y_i^0 为参考数列第*i*次无量纲化的理想最优数值; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$,取0.5,为削弱过大数值导致的失真影响。

3.2 熵权法计算权重

熵权法是一种赋权方法。根据各指标数值变化对整体的影响,计算指标的熵值,进而确定权重。在处理多指标赋权的问题时,可以消除主观赋值带来的结果偏差,规避主观因素的影响,提高评价结果的客观性和准确性。目标的变异程度越大,熵值越小,反映的信息量越大,其权重越大。

构造以缩孔、缩松体积和变形量2个目标试验值为元素的决策矩阵。

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, m 为试验次数; n 为目标指标数,取 $m=9, n=2$ 。

对数据进行归一化处理,缩松、缩孔体积和变形量值越小,铸件质量越好,因此采用负向指标公式进行数据处理:

$$\lambda_{ij} = 0.998 \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}} + 0.02 \quad (4)$$

式中, $i=1, 2, \dots, 9; j=1, 2, 3; \max_j y_{ij}$ 表示第*j*个指标下所有方案的最大值; $\min_j y_{ij}$ 表示第*j*个指标下所有方案的最小值。

计算各指标的变异程度,以第*j*项指标在第*i*个方案占第*j*项指标所有试验值之和的权重来衡量为:

$$p_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^m \lambda_{ij}} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

计算第*j*项指标的信息熵值 e_j 为:

$$e_j = -k p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

式中, k 为常数, $k=1/\ln m$ 。

计算信息熵冗余度 g_j 为:

$$g_j = 1 - e_j \quad (7)$$

计算各指标的权重 w_j 为:

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j \quad (8)$$

缩孔、缩松体积和变形量权重计算结果分别为0.287 3和0.712 7。

得到各指标的权重系数后,计算各方案的灰色关联度 G_i 为:

$$G_i = \sum_{j=1}^n w_j \delta_i \quad (9)$$

式中, w_j 为*j*指标权重; δ_i 为灰色关联系数。

3.3 试验结果及分析

试验及灰色关联度计算结果见表4,其中, y 为原始数据值。可以看出,使用改进后的浇注方案后,缩松、缩孔体积和变形量大幅减小,其中第3种方案的缩松、缩孔体积最小,为0.044 6 cm³。第2种方案铸件产生的变形量最小,为0.023 9 cm。在任意参数水平下灰色关联度越大说明其对应的质量目标越好,通过比较灰色关联度对不同参数水平的试验方案进行排序,灰色关联度最大为0.920 8,最小为0.333 3,故最佳因素水平组合为 $A_1B_2C_2$,即浇注温度为1 610 ℃,型壳焙烧温度为1 050 ℃,浇注时间为6 s。

表4 试验及灰色关联度计算结果

Tab.4 Calculation results for experiment and grey correlation degree									
序号	缩孔、缩松/cm ³			变形量/cm			G_i	排序	
	y	y_i	δ_i	y	y_i	δ_i			
1	0.095 4	0.807 1	0.382 5	0.031 3	0.891 2	0.359 4	0.366 0	8	
2	0.056 6	0.190 1	0.724 5	0.023 9	0	1	0.920 8	1	
3	0.044 6	0	1	0.030 4	0.785 9	0.388 8	0.564 4	3	
4	0.074 4	0.521 1	0.489 7	0.032 0	0.975 0	0.339 0	0.382 3	6	
5	0.071 4	0.425 7	0.540 1	0.031 2	0.890 2	0.359 7	0.411 5	4	
6	0.091 8	0.749 1	0.400 3	0.031 3	0.899 1	0.357 4	0.369 7	7	
7	0.071 1	0.420 3	0.543 3	0.024 9	0.123 1	0.321 0	0.384 9	5	
8	0.107 6	1	0.333 3	0.032 2	1	0.333 3	0.333 3	9	
9	0.056 1	0.182 5	0.732 6	0.024 7	0.095 5	0.839 5	0.808 8	2	

3.4 灰色关联度均值极差分析

灰色关联度均值极差分析见表5。可以看出,型壳温度的灰色关联度均值极差最小,为0.203 3,浇注时间的均值极差最大,为0.347 6,浇注温度与型壳焙烧温度的灰色关联度均值极差数值相差不大,因此得到影响铸件质量顺序为 B (型壳焙烧温度) $<A$ (浇注温度) $<C$

表5 灰色关联度均值极差分析

Tab.5 Mean range analysis of grey correlation degree			
因素均值	A	B	C
D_1	0.617 1	0.377 7	0.356 3
D_2	0.387 8	0.555 2	0.703 9
D_3	0.509 0	0.581 0	0.453 6
R	0.229 3	0.203 3	0.347 6

(浇注时间),说明浇注时间对铸件质量影响最为显著,而浇注温度影响最小^[18]。

灰色关联度随因素水平变化趋势见图9,因素 A 从水平1~水平3灰色关联度均值先迅速减小后缓慢增大,表明在水平1~水平2范围内因素 A 越小质量目标越好,为了达到最优质量目标,因素 A 或可取更小;因素 B 灰色关联度均值呈现均匀增大趋势,表明在范围内可进一步增大因素 B 值优化质量目标;因素 C 先迅速增大后迅速减小,表明因素 C 在水平2为最佳因素水平,相较于其他因素水平可大大改善质量目标。

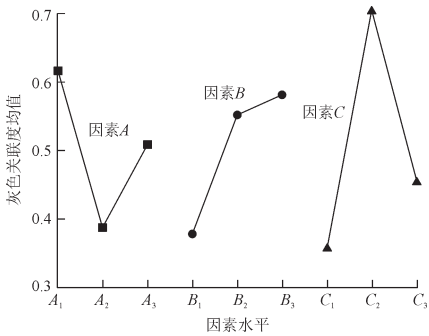


图9 灰色关联度随因素水平变化趋势图

Fig.9 Variation trend of grey correlation degree with factor level

3.5 铸件充型试验结果分析

充型试验采用优化后浇注系统模型方案和最佳工艺参数:浇注温度为1 610 ℃,型壳焙烧温度为1 050 ℃,浇注时间为6 s,充型过程见图10。浇注时,金属液从浇

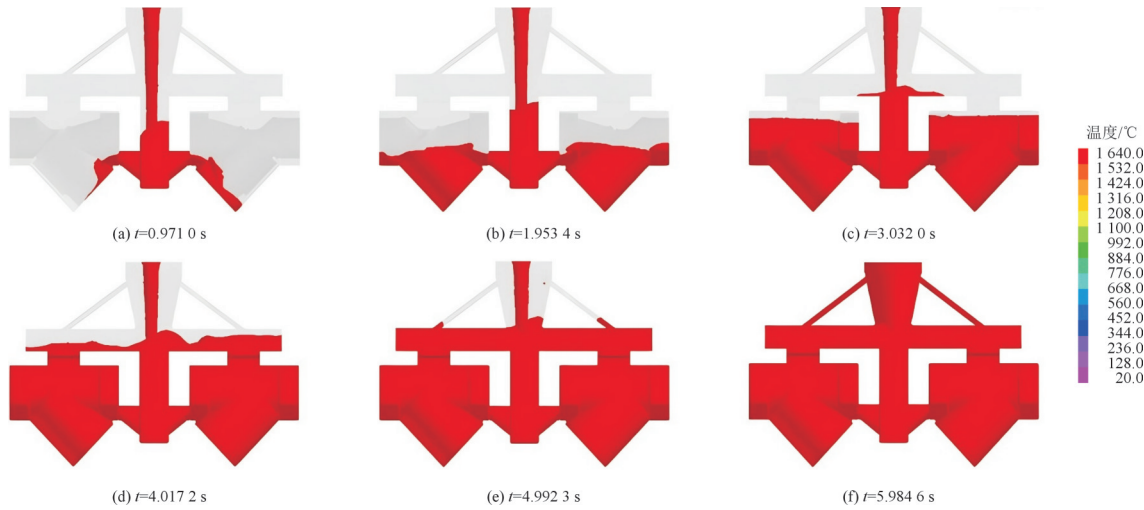


图10 铸件充型过程

Fig.10 Filling process of casting

杯口进入直浇道再进入铸件型腔,最后进入横浇道,金属液自下而上充型,使气体顺利排出,防止卷气发生,填充过程平稳流畅,无紊流和金属液喷溅情况出现^[19]。

3.6 铸件凝固试验过程结果分析

凝固过程见图 11。可以看出,铸件最薄处优先凝

固,然后铸件按由下到上的顺序凝固,再是横浇道与内浇道凝固,最后是浇杯口凝固,浇注系统优化前连接口交叉部位厚壁处出现孤立液相区,优化后直浇道上的内浇口对大范围缩松、缩孔的部位进行了补缩,使缩松、缩孔体积显著减小,实现了顺序凝固^[20]。

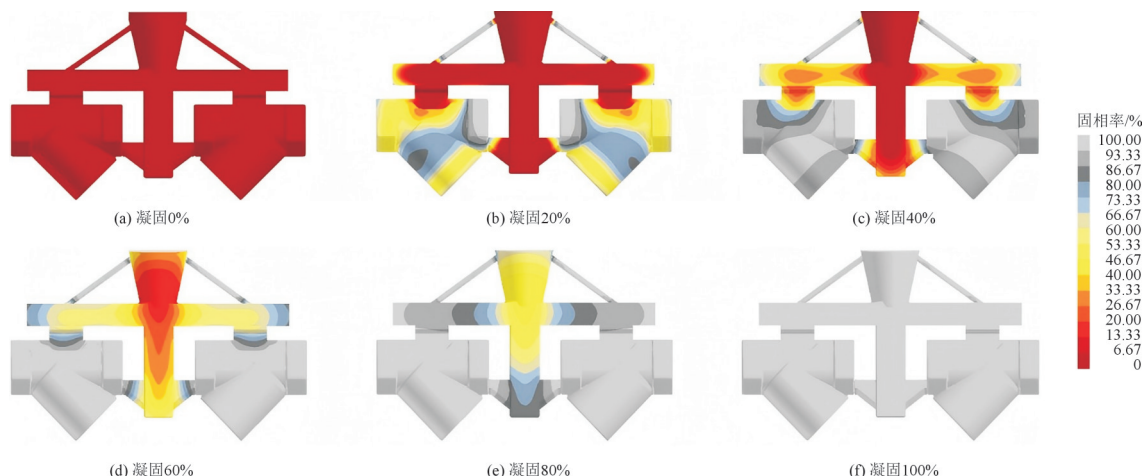


图 11 铸件浇注系统优化后最佳工艺参数下的凝固过程

Fig.11 Solidification process of gating system after optimization under optimal process parameters

3.7 优化后铸件质量参数实际验证

图 12 为优化工艺参数下铸件的缩松、缩孔及变形量预测。可以看出,优化工艺下铸件的缩松、缩孔体积为 0.056 6 cm³,较原方案减少了 97.13%,变形量为 0.024 0 cm,较原方案减小了 26.15%。并进行了生产验证见图 13,铸件整体质量良好,在易出现缩孔、缩松处无缺陷生成,经检验,尺寸合格。

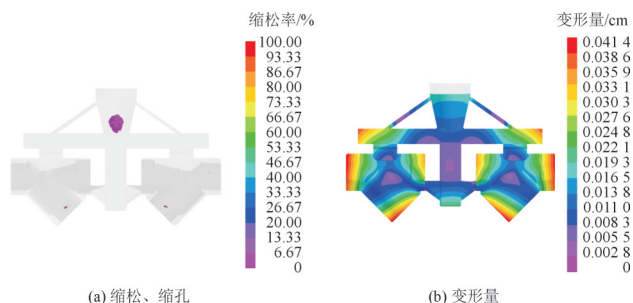


图 12 优化工艺参数下铸件缩松、缩孔及变形量预测

Fig.12 Prediction of shrinkage and porosities and deformation amounts of castings under optimal process parameters



图 13 优化工艺参数下生产的铸件

Fig.13 Produced castings under optimal process parameters

4 结 论

(1)通过进行正交试验和灰色关联度分析,发现浇注系统结构、浇注时间、型壳焙烧温度和浇注温度对某不锈钢三通铸件质量均有影响,验证了灰色关联度分析在探究熔模铸造工艺参数中的可行性。

(2)确定了某不锈钢三通铸件熔模铸造优化工艺参数,浇注温度为 1 610 ℃,型壳焙烧温度为 1 050 ℃,浇注时间为 6 s。较原方案,缩孔、缩松体积减小了 97.13%,变形量减小了 26.15%。

(3)由灰色关联度均值极差分析得出浇注系统结构对某不锈钢三通铸件的质量影响最大,其次是浇注时间,最后是浇注温度和型壳焙烧温度。

参 考 文 献

- [1] 鞠富,徐贵强,郝素斌,等.某阀体浇注系统工艺设计[J].特种铸造及有色合金,2017, 37(7):729-731.
- [2] 熊举化,黄力.异形三通阀体砂型铸造工艺[J].铸造,2017, 66(10):1 115-1 118.
- [3] 谭宇函,丁旭,黄启贵,等.球墨铸铁三通阀铸造工艺分析及优化[J].铸造,2019, 68(10):1 168-1 171.
- [4] 邵啊新,周东子.一种大口径闸阀阀体复合精密铸造工艺[J].铸造技术,2021, 42(11):964-948.
- [5] 王辉,蔡宗院,姜森.一款复杂窄流道不锈钢导叶的精铸工艺研究[J].铸造技术,2021, 42(8):715-718.
- [6] 林波,陈云祥.熔模精密铸造型壳制备工艺研究进展[J].铸造技术,2021, 42(10):925-927.
- [7] 李新雷,李世新,尹承泽.熔模精铸薄壁铸件真空吸铸工艺研究[J].铸造,2020, 69(12):1 312-1 318.