

基于信噪比与 TOPSIS 的凸轮轴铸造工艺参数优化

朱彦康^{1, 2}, 徐刚强³, 周康康³, 李孝禄^{1, 2}, 陈源¹, 李运堂¹

(1. 中国计量大学 机电工程学院, 浙江杭州 310018; 2. 中国计量大学 浙江省智能制造质量大数据溯源与应用重点实验室, 浙江杭州 310018; 3. 浙江博星工贸有限公司, 浙江金华 321016)

摘要: 凸轮轴铸件成品的质量既受到多个铸造工艺参数组合的影响, 又极易受到环境中噪声因素所产生误差波动的影响。基于此, 田口方法中的信噪比概念与多目标决策中的TOPSIS被应用于凸轮轴铸造过程工艺参数的优化中, 以实现铸件质量的鲁棒性设计。结合铸造过程计算机数值模拟技术, 从仿真试验方案中得到了具有强抗干扰能力的最优工艺参数组合。试验结果表明: 铸型温度35 ℃, 浇注时间12 s, 浇注温度1 446 ℃的铸造工艺参数组合, 使凸轮轴铸件的质量既可靠又具备鲁棒性, 为实际生产中铸造工艺参数的优化方法提供了思路。

关键词: 凸轮轴铸造; 工艺参数; 信噪比; TOPSIS; 鲁棒性设计

作者简介:

朱彦康(1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为凸轮轴铸造工艺及铸件缺陷研究。电话: 15088675946, E-mail: 2455895548@qq.com

通讯作者:

徐刚强, 男, 高级工程师。电话: 13819989292, E-mail: 283351011@qq.com

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)07-0909-08

基金项目:

浙江省教育厅一般科研项目(Y202147809); 金华经济技术开发区人才项目(2021-01); 浙江省重点研发计划项目(2019C01128)。

收稿日期:

2022-09-14 收到初稿,
2022-10-29 收到修订稿。

凸轮轴作为发动机配气机构的重要组成部分, 其质量直接决定了发动机的质量, 进而影响到汽车的使用性能和市场竞争力^[1]。传统的凸轮轴铸造工艺设计过程, 只能对铸件的形成过程进行基于经验和一般理论基础上的控制, 所进行的“试生产”只是定性分析, 而且需要反复试制才能确定工艺, 在一定程度上实现预期的工艺目标。这就容易造成很大的资源浪费, 也很难分析出铸造缺陷的成因, 无法从机理层面上真正消除缺陷。

铸造过程数值模拟方法的应用可以极大程度地发现凸轮轴生产过程中可能会出现的缺陷形式及区域, 并能可视化地展现出凸轮轴铸造金属液的动态凝固过程, 这对提高铸件的质量大有裨益。

此外, 生产工艺参数决定着产品的最终质量, 如果工艺参数设置不当, 即使采用了最佳的铸造流程设计方案, 也难以获得令人满意的产品。Šabík等^[2]通过数值模拟方法揭示了铸件中缺陷的潜在原因, 并研究了浇注工艺参数的调整对ENGJS-500-7球墨铸铁铸件质量的影响。结果表明, 将浇注时间由3.168 s优化为3.460 s有利于消除铸件的冷隔与浇不足缺陷, 优化后的铸件力学性能也达到了相应的标准。卫东海等^[3]从横梁结构刚度的有限元分析、铸造变形数值模拟等方面研究了高精度保持性QT600-3横梁的铸造技术, 对铸件质量测量的结果表明, 采用较高的碳当量以及复合化的合金成分配比有利于提高铸件抗拉强度和弹性模量以及降低残余应力。因此, 对于凸轮轴铸造过程中多个铸造工艺参数组合的优化设计可以极大程度地提高铸件的力学性能, 提升铸造的品质与效率。

由于必须充分考虑凸轮轴在铸造过程中各种不稳定因素对铸件加工质量的影响, 为获得具有强抗干扰能力的最佳工艺参数设计方案, 需要进行铸造工艺参数的鲁棒性设计^[4]。在实际生产过程中, 往往需要综合考虑铸件多个质量特性指标的优劣来确定当前的工艺参数组合是否合理或最优, 即需要进行凸轮轴铸造工艺参数的多目标鲁棒性设计。

1 优化设计方法

1.1 信噪比

田口玄一博士提出的基于信噪比的质量控制方法可以提高产品在外界干扰下成品质量的稳定性。信噪比因子 (S/N) 大小是衡量产品质量稳健性的指标, 信噪比越大, 则产品质量越稳健。根据产品质量特性的不同, 信噪比函数具有三种不同的静态特性, 即信噪比的望大特性、望小特性和望目特性^[5]。对于铸件的质量指标, 往往考虑其各类缺陷的严重程度, 故此时信噪比函数具有望小特性, 也即希望铸件的缺陷指标值越小越好。其对应的信噪比定义公式为:

$$\eta_j = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

式中: η_j 为第 j 组工艺参数设计方案下的信噪比值; n 为各组试验对应的次数; y_i 为各组第 i 次试验对应的质量特性指标响应值。由信噪比计算公式可知, 信噪比值越大, 铸件的质量平均值也越高。

1.2 正交试验

正交试验设计主要是利用正规的正交试验表, 恰当的试验设计方案, 以确定多个参数间的最佳组合。这些组合具有“均匀分散, 整齐可比”的特点, 这样只需要进行少量的试验就可以满足考察的要求, 极大地提高了设计效率^[6]。

舒服华^[7]利用正交试验, 找到了ZL201铝合金消失模铸造在以充型速度、铸件密度、抗拉强度和伸长率性能为综合优化工艺目标下的最佳工艺参数; 汪先送等^[8]采用正交试验法及定量金相分析, 研究了挤压铸造工艺参数对Al-4.80%Cu-0.44%Mn合金显微组织的影响, 结果表明: 在浇注温度为730℃, 模具温度为200℃, 压力为75MPa, 保压时间30s左右条件下, 挤压铸造可以获得细小、均匀分布的显微组织。因此, 正交试验被广泛应用于对产品进行质量控制的生产领域。

1.3 TOPSIS

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 即逼近理想解排序法, 是以参照系为基础, 通过分析备选方案与参照系的关系衡量方案优劣的评价方法。其中, “正理想解”与“负理想解”是其两个基本的概念。“正理想解”就是设想的最优解方案, 其各个属性值均达到备选方案中的最佳值; “负理想解”就是设想的最劣解方案, 其各个属性值均达到备选方案中的最坏值^[9]。然后比较某一评价方案与正负理想解之间的距离, 从而测算出该评价方案与正负理想解之间的贴合程度, 并以此将各方

案进行排序, 与正理想解距离最近而又与负理想解距离最远的方案即为最优方案。

Papanikolaou等^[10]为了降低铸件中卷入空气的程度和表面缺陷的密度, 利用TOPSIS方法设计出了最合适的铸造浇注系统; 曹飞红等^[11]运用MATLAB和TOPSIS进行综合评价分析, 优化出了齿轮齿条转向器的参数, 为此类优化设计提供重要方法。因此, TOPSIS具有实用性强, 计算简便等优点, 应用广泛。

2 鲁棒性试验

2.1 凸轮轴铸造质量评判

本文研究的对象为某型QT600-3凸轮轴, 其铸件三维图如图1所示。工艺方案为两箱造型, 一型四件, 采用砂型重力铸造工艺, 为了兼顾金属液充型的平稳性和填充率, 采用中间注入式浇注系统。铸型和铸件三维实体图分别如图2和图3所示。

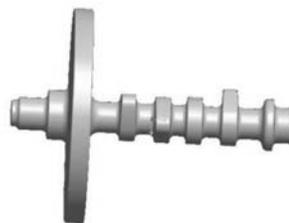


图1 凸轮轴三维图

Fig. 1 3D diagram of camshaft

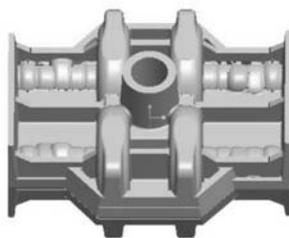


图2 铸型三维图

Fig. 2 3D diagram of casting mold

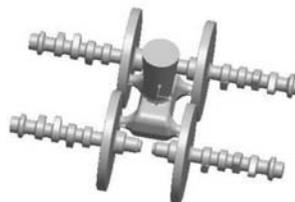


图3 铸件三维图

Fig. 3 3D diagram of casting

将上述铸件与铸型导入铸造仿真软件中, 对模型进行网格划分与生成。依次根据检查时出现的破损、交叉、体重叠等问题对模型进行调整, 最终共划分面

网格数量74 793个，体网格数量459 525个，网格生成如图4所示。铸型的冷却方式选择空冷，砂型材料为树脂砂，铸件与砂型之间的换热系数为500 W/(m²·K)，铸件与冷铁之间的换热系数为2 000 W/(m²·K)。

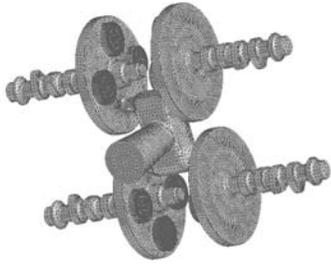


图4 增设冷铁后铸件的网格划分
Fig. 4 Mesh generation of castings after adding chill

凸轮轴铸件内部的缩孔缩松体积大小和铸件成形后的致密度是反映凸轮轴质量较为关键的两个质量特性指标。缩孔缩松体积可以反映铸件缺陷处的具体收缩大小；而致密度则可以反映缺陷处的整体收缩程度。由于前者为望小型数据，而后者为望大型数据，这里为了统一数据类型，将致密度用平均收缩率来表示，本文以此作为凸轮轴铸件质量评判标准。

利用铸造过程数值模拟软件，模拟分析铸件的充型和凝固过程，并根据如图5数值模拟出的收缩缺陷分布情况进行统计，得到各仿真试验方案中铸件的缩孔缩松体积和平均收缩率。

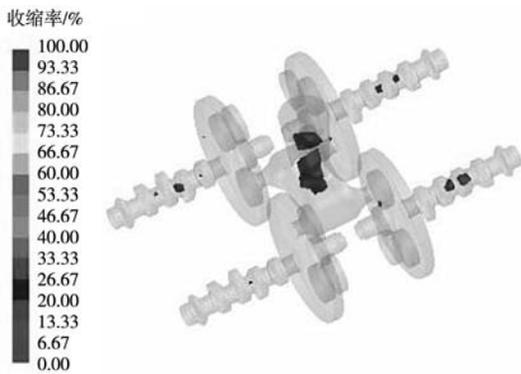


图5 铸件收缩缺陷的分布
Fig. 5 Distribution of shrinkage defects of castings

2.2 构建回归模型

根据凸轮轴铸造工艺的特点，选取的可控工艺参数为铸型温度 T_1 、浇注时间 t 以及浇注温度 T_2 。综合实际铸造生产中各因素的影响，铸型温度被控制在20~40℃，在造型线工作时，通过传感设备对铸型温度进行监测控制；浇注时间范围为6~14 s，由实际浇注工作换算而得；浇注温度为1 434~1 450℃，通过测温枪

对金属液测定控制，如表1所示。图5所示模拟初始工艺所采用的工艺参数方案为20℃的铸型温度，10 s的浇注时间，以及1 440℃的浇注温度。

表1 可控因素及其取值范围
Table 1 Controllable factors and their value range

符号	工艺参数	单位	取值范围
T_1 (A)	铸型温度	℃	20~40
t (B)	浇注时间	s	6~14
T_2 (C)	浇注温度	℃	1 434~1 450

评判指标信噪比的获取通过设计内外试验表实现。内表用于反映铸件在指定的工艺参数组合且无噪声影响下的理想质量情况，即总试验样本组。外表反映铸件在内表各样本点进行试验时因受各种噪声影响而表现出的实际质量情况。表2为本试验内外表的设计形式。

表2 内外试验表设计方法
Table 2 Internal and external experimental table design method

内表组号	噪声影响下的外表组号	评价指标			
		缩孔缩松体积	平均收缩率	缩孔缩松体积信噪比	平均收缩率信噪比
1	1	y_{111}	y_{121}	η_{11}	η_{12}
		
	q	y_{11q}	y_{12q}		
2	1	y_{211}	y_{221}	η_{21}	η_{22}
		
	q	y_{21q}	y_{22q}		
.....
m	1	y_{m11}	y_{m21}	η_{m1}	η_{m2}
		
	q	y_{m1q}	y_{m2q}		

其中， m 为内表试验次数； q 为针对内表每组样本进行的外表试验次数； y_{m1q} 为内表第 m 组，外表第 q 组试验缩孔缩松体积的响应值； y_{m2q} 为内表第 m 组，外表第 q 组试验平均收缩率的响应值； η_{m1} 为第 m 组内表（样本）的缩孔缩松体积信噪比； η_{m2} 为第 m 组内表（样本）的平均收缩率信噪比。

由表2可知，采用内外表参数设计法进行鲁棒性设计时，总试验次数为内外表试验的乘积（ $m \cdot q$ ），因此需要进行大量的试验。若对每次试验方案均采用仿真软件进行数值模拟，则在获取各组铸件质量指标的过程中必然涉及大规模的数值计算，且耗时极长。为克

服此不足,可先采用均匀设计表安排足够次数的仿真试验,利用所获得的的样本数据进行逐步回归分析,建立预测给定铸造工艺参数方案下铸件质量指标的二次项回归模型,以避免内外表试验中反复进行数值模拟计算,并能够快速计算信噪比所需的质量指标值^[12]。具体地,可采用5水平10次试验的均匀设计表 $U_{10}(5^3)$ 安排试验,各可控因素的水平值见表3。利用铸造数值模拟仿真软件获得各试验方案下铸件的质量特性指标值如表4所示。

表3 可控因素及其水平
Table 3 Controllable factors and their levels

工艺参数	水平				
	1	2	3	4	5
A	20	25	30	35	40
B	6	8	10	12	14
C	1 434	1 438	1 442	1 446	1 450

表4 均匀试验表
Table 4 Uniform test table

工艺参数	工艺参数			质量特性指标值	
	A	B	C	缩孔缩松体积 V_s/cm^3	平均收缩率 $A_s/\%$
1	5	5	2	0.088 118	0.789 077
2	5	1	4	0.100 745	0.772 399
3	2	2	5	0.079 917	0.850 685
4	1	5	4	0.079 038	0.793 177
5	3	3	3	0.082 630	0.827 705
6	1	1	2	0.114 593	0.785 498
7	4	4	5	0.078 168	0.870 455
8	3	3	3	0.082 630	0.827 705
9	4	2	1	0.084 967	0.842 452
10	2	1	1	0.086 534	0.808 337

根据表4中的仿真试验结果,对质量特性指标进行二项式逐步回归分析,可得缩孔缩松体积 V_s 和平均收缩率 A_s 的回归预测模型分别为:

$$V_s = 0.203 483 + 0.000 936t^2 + 0.000 032T_1 \times T_2 - 0.000 150t \times T_2 - 0.465 077T_1 + 0.195 841t \quad (2)$$

$$A_s = 0.381 616 - 0.000 575T_1^2 + 0.000 247T_1 \times t - 0.000 136T_1 \times T_2 + 0.000 599t \times T_2 + 0.227 999T_1 - 0.870 592t \quad (3)$$

上述回归方程(2)和(3)对应的平均误差分别为4.11%和1.16%,表明回归模型具有较好的预测性能,故可以将其应用到内外表试验中的质量特性指标信噪比的计算,以此可以大大提高鲁棒性设计的效率。

2.3 内外表试验

根据前述分析,该鲁棒性优化设计涉及三个可控

因素,实际铸造过程中的可能会产生的电路波动、环境温度、人工操作等误差因素会引起可控工艺参数的波动,即产生三个对应的噪声因素。结合实际,噪声因素会使铸型温度波动5℃左右,浇注时间波动约1s,浇注温度波动5℃左右。分别取可控因素和噪声因素三个水平,见表5。内外试验表均可采用正交表 $L_9(3^4)$ 来安排,即表2中的 m 与 q 均为9,如表6所示。

表5 可控因素及噪声因素水平
Table 5 Level of controllable factors and noise factors

因素	水平			
	1	2	3	
可控因素	A	25	30	35
	B	8	10	12
	C	1 438	1 442	1 446
噪声因素	A'	0.8A	A	1.2A
	B'	0.9B	B	1.1B
	C'	0.997C	C	1.003C

表6 正交试验表
Table 6 Orthogonal test table

试验组序号	水平		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

根据回归模型(2)和(3),分别统计出各试验组在有噪声因素干扰情况下的质量特性指标值。表7给出了内表第1组试验在噪声干扰下的铸件质量指标值,其他试验组采用相同方法,故不再展示。

2.4 信噪比计算

再根据信噪比计算公式(1),可得在试验组1条件下,铸件缩孔缩松体积和平均收缩率的信噪比分别为 $\eta_{V_s} = 20.743$, $\eta_{A_s} = 1.774$ 。同理,可得所有试验组分别在有、无噪声因素干扰下的铸件质量指标特性信噪比值,如表8所示。

由于缩孔缩松体积和平均收缩率是从不同的层面考察铸件的质量效果,为消除这两个质量特性指标

表7 试验组1在噪声因素下的质量特性
Table 7 Quality characteristics of test group 1 under noise factors

外表 试验号	噪声因素及其水平			质量特性指标值	
	A'	B'	C'	缩孔缩松体积 V_i/cm^3	平均收缩率 $A_i/\%$
1	1	1	1	0.099 9	0.775 0
2	1	2	2	0.093 1	0.778 2
3	1	3	3	0.086 4	0.785 6
4	2	1	2	0.096 2	0.827 1
5	2	2	3	0.089 6	0.830 5
6	2	3	1	0.089 8	0.813 7
7	3	1	3	0.093 9	0.844 7
8	3	2	1	0.090 6	0.838 8
9	3	3	2	0.085 8	0.840 3

表8 内外表的质量特性与信噪比
Table 8 Quality characteristic and signal-to-noise ratio of internal and external table

试验组 序号	可控因素 及其水平			无噪声质量 特性指标值		有噪声质量特性 指标信噪比值	
	A	B	C	V_i/cm^3	$A_i/\%$	η_{Vs}	η_{As}
	1	1	1	1	0.091 3	0.824 5	20.743
2	1	2	2	0.081 4	0.828 2	21.715	1.733
3	1	3	3	0.076 5	0.841 6	22.211	1.592
4	2	1	2	0.088 6	0.844 9	21.005	1.607
5	2	2	3	0.078 1	0.853 2	22.071	1.520
6	2	3	1	0.082 8	0.833 6	21.538	1.724
7	3	1	3	0.087 1	0.831 1	21.145	1.796
8	3	2	1	0.080 6	0.829 0	21.796	1.821
9	3	3	2	0.078 3	0.837 1	21.995	1.735

存在不同量纲和数量级的影响,需对其进行规范化操作。即:

$$\eta'_i = \frac{\eta_i - \min \eta_i}{\max \eta_i - \min \eta_i} \quad (4)$$

式中, η'_i 为第*i*组规范化信噪比。

3 多目标决策

3.1 加权规范信噪比

多目标的决策问题需要综合成单目标决策问题。根据产品质量特性指标数目和种类多寡,可采用层次分析法或专家经验等方法来确定各质量特性指标的权重。变异系数法是直接利用各质量指标所包含的信息确定其权重的客观赋权方法,取值差异越大的指标,能更好地反映指标的差距,被赋予较大的权重^[13]。这里根据表8中无噪音情况的质量指标数据,采用变异系

数法来确定权重。

质量指标的变异系数:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} \quad (5)$$

式中: V_i 为第*i*个质量指标的变异系数; σ_i 为第*i*个质量指标的标准差; \bar{x}_i 为第*i*个质量指标的的平均值。

质量指标的权重:

$$w_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (6)$$

式中, w_i 为第*i*个质量指标的权重。

由式(5)和式(6)并结合表8数据,得到缩孔缩松体积与平均收缩率之间的权重为0.851 2: 0.148 8。加权的规范化信噪比为各质量指标信噪比与权重之积。即

$$q_i = w_i \cdot \eta'_i \quad (7)$$

式中, q_i 为第*i*个质量指标的加权规范信噪比。

根据式(7),各试验组质量特性指标的规范信噪比和加权信噪比结果见表9。

表9 各试验组质量特性的信噪比
Table 9 Signal-to-noise ratio of quality characteristic of each test group

试验组 序号	可控因素及其水平			规范化信噪比		加权规范化信噪比	
	A	B	C	η_{Vs}	η_{As}	q_{Vs}	q_{As}
1	1	1	1	0.000	0.844	0.000	0.126
2	1	2	2	0.662	0.708	0.563	0.105
3	1	3	3	1.000	0.239	0.851	0.036
4	2	1	2	0.178	0.289	0.152	0.043
5	2	2	3	0.905	0.000	0.770	0.000
6	2	3	1	0.542	0.678	0.461	0.101
7	3	1	3	0.274	0.917	0.233	0.136
8	3	2	1	0.717	1.000	0.610	0.149
9	3	3	2	0.853	0.714	0.726	0.106

3.2 TOPSIS 评价

正理想解为各决策目标属性最优值,负理想解为各决策目标属性最劣值。即:

$$S^+ = (S_1^+, S_2^+, \dots, S_m^+), S^- = (S_1^-, S_2^-, \dots, S_m^-) \quad (8)$$

式中, $S_j^+ = \max(q_{1j}, q_{2j}, \dots, q_{nj})$, $S_j^- = \min(q_{1j}, q_{2j}, \dots, q_{nj})$ 。

根据表9中的加权规范信噪比,得到正、负理想解分别为 $S^+ = (0.851, 0.149)$, $S^- = (0.000, 0.000)$ 。各试验组的正、负理想距离计算公式为:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (q_{ij} - q_j^+)^2}, d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (q_{ij} - q_j^-)^2} \quad (9)$$

式中, d_i^+ 、 d_i^- 分别为第*i*组正、负理想距离。

通过式(9)可以计算出各试验组的正、负理想距离。再由下式(10)可得各试验组方案与正理想解的贴近度,即:

$$F_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (10)$$

式中, F_i 为第*i*组试验方案与正理想解的贴近度。

由于 F_i 是由信噪比转化而来的综合评价指标,故 F_i 也表示了各铸造方案在受噪声因素干扰下铸件质量的鲁棒性程度,其结果如表10所示。

表10 各试验组与正理想解的距离及贴合度
Table 10 Distance and fit between each test group and the rational solution

试验组 序号	可控因素及其水平			正理想 距离 d_i^+	负理想 距离 d_i^-	贴合度 F_i
	A	B	C			
1	1	1	1	0.851	0.126	0.129
2	1	2	2	0.291	0.573	0.663
3	1	3	3	0.113	0.852	0.883
4	2	1	2	0.707	0.158	0.183
5	2	2	3	0.170	0.770	0.819
6	2	3	1	0.393	0.472	0.546
7	3	1	3	0.618	0.270	0.304
8	3	2	1	0.241	0.628	0.723
9	3	3	2	0.132	0.734	0.839

4 结果与分析

4.1 铸造工艺分析

由正交试验的均衡搭配性质可知,各参数在不同工艺水平下平均贴近度的相互比较,与其他参数无关,只反映该参数在不同工艺水平下对多项工艺目标的影响程度^[14]。根据表10计算各工艺参数在不同水平下贴合度的平均值以确定最优工艺参数组合方案,其结果见表11。

表11 不同水平的综合工艺目标平均贴近度
Table 11 Average closeness of comprehensive process objectives at different levels

因素	平均贴近度			极差
	水平1	水平2	水平3	
A	0.558	0.516	0.622	0.106
B	0.205	0.735	0.756	0.551
C	0.466	0.562	0.660	0.194

由表11可知,铸型温度对该型凸轮轴质量鲁棒性影响的排序为:A3>A1>A2;浇注时间对铸件质量鲁棒性影响的排序为:B3>B2>B1;浇注温度对铸件质量鲁

棒性的影响排序为:C3>C2>C1。因此,最优的铸造工艺参数组合方案为A3B3C3,即铸型温度为35℃,浇注时间为12s,浇注温度为1446℃。

从表11各工艺参数不同水平的平均贴合度极差中还可以看出,三个可控因素对该型凸轮轴质量鲁棒性影响由大到小的排序为:浇注时间,浇注温度,铸型温度。

4.2 最优工艺方案

将优化方案(A3B3C3)分别在有无噪声因素干扰下按式(2)和式(3)进行回归预测统计,并计算出其质量特性指标的信噪比值。然后将优化方案与表10中贴合度最高组(3组,贴合度为0.883,工艺参数组合为A1B3C3)进行比较验证分析,其结果如表12所示。

表12 优化组试验结果及对比
Table 12 Experimental results and comparison of optimization group

方案	工艺参数组合	无干扰缩	无干扰	缩孔缩	平均收
		孔缩松 体积/cm ³	平均 收缩率/%	松体积 信噪比	缩率信 噪比
3组	A1B3C3	0.076 5	0.841 6	22.211	1.592
优化组	A3B3C3	0.075 6	0.846 9	22.324	1.630
凸轮轴质量及其鲁棒性能增减幅度/%		1.18	-0.63	0.51	2.39

由表12中的验证比较结果可知,优化方案组在无噪声因素干扰下占比权重更大的缩孔缩松体积质量指标较贴合度最高组更优。而且根据信噪比望大数据型的特性,优化方案组在两个质量特性指标上的鲁棒性能也更佳,表明其在铸造生产过程中具备更强的抗干扰能力。以上结果证明了优化方案的有效性,优化方案的凸轮轴质量结果如表13所示。

表13 优化方案铸造结果分析
Table 13 Analysis of casting results of the optimized scheme

质量特性指标	无噪声	平均贴近度		平均贴近度	
		最大值	最小值	上偏差	下偏差
缩孔缩松体积/cm ³	0.075 6	0.081 7	0.072 6	0.006 1	0.003
平均收缩率/%	0.846 9	0.775 8	0.875 6	0.071 1	0.028 7

4.3 验证分析

将最优工艺参数方案进行数值模拟分析,其充型与凝固过程及最终的收缩缺陷分别如图6、7所示。铸件充型平稳,凝固合理,收缩缺陷也较小,该工艺方案具备可行性。

值得注意的是,该优化设计方法考虑了实际铸造

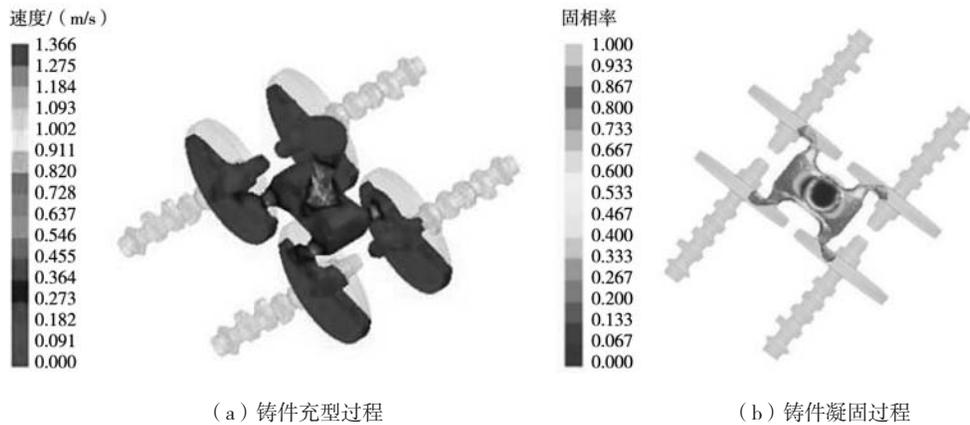


图6 最优工艺方案模拟结果

Fig. 6 Simulation results of optimal process scheme

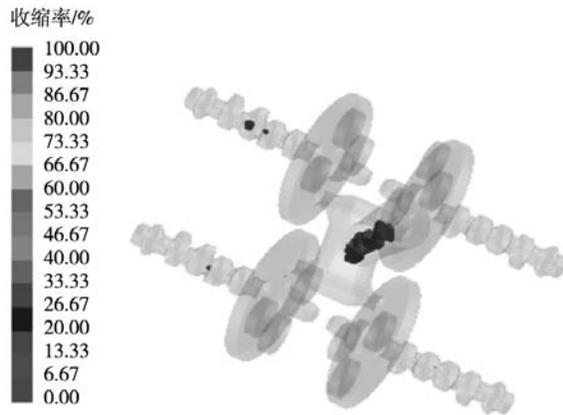


图7 铸件收缩缺陷分布

Fig. 7 Distribution of shrinkage defects of castings

过程中的噪声影响因素, 结果具有得出的是统计学特征, 即表征的是在此优化方案组合下, 铸件具备最强的抗环境干扰能力。因此, 获得的最佳方案是经受噪

声因素考虑的。在该优化方案下指导下呈现的实际铸件成品如图8所示, 铸件质量良好, 基本没有产生收缩缺陷。



图8 优化方案的生产成品

Fig. 8 Finished products of the optimization scheme

5 结论

(1) 该型凸轮轴以铸件缩孔疏松体积和致密度为质量鲁棒性评价指标的最优工艺参数方案为铸型温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 浇注时间为 12 s , 浇注温度为 $1\ 446\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 影响该型凸轮轴铸件质量鲁棒性能的影响因

素由大到小的排序为: 浇注时间, 浇注温度, 铸型温度。

(3) 信噪比与TOPSIS的结合应用可以作为一种提高铸件平均质量及抗干扰能力的工艺参数优化方法, 为凸轮轴铸造理论研究与实际生产提供了思路。

参考文献:

- [1] 陈忠士, 邹泽昌, 程艳, 等. 铸态QT600-10合成球墨铸铁凸轮轴组织及力学性能 [J]. 铸造, 2015, 64 (11): 1138-1141.
- [2] ŠABÍK V, FUTÁŠ P, PRIBULOVÁ A. Failure analysis of a clutch wheel for wind turbines with the use of casting process simulation [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135: 106159.
- [3] 卫东海, 李克锐, 张怀香, 等. 高精度保持性QT600-3横梁的铸造技术 [J]. 现代铸铁, 2018, 38 (3): 1-7.
- [4] JOSHUA J J, ANDREWS A A E. Design of experiments to optimize casting process of aluminum alloy 7075 in addition of TiO₂ using Taguchi method [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 30 (7): 3353-3358.
- [5] 陈克鹏, 岳玉梅, 韩松, 等. 基于田口法的Al/Cu搅拌摩擦点焊工艺参数的优化 [J]. 化学工程与装备, 2021 (3): 188-190.
- [6] 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.
- [7] 舒服华. Vague集在ZL201消失模铸造工艺参数优化中的应用 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 161-164.
- [8] 汪先送, 程佩, 林波, 等. 工艺参数对挤压铸造Al-4.80%Cu-0.44%Mn合金显微组织的影响 [J]. 铸造, 2012, 61 (9): 998-1002.
- [9] TEWARI P C, PRAKASH U, KHANDUJA D, et al. Ranking of sintered material for high loaded automobile application by applying entropy-TOPSIS Method [J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2 (4-5): 2375-2379.
- [10] PAPANIKOLAOU M, PAGONE E, SALONITIS K, et al. Sustainability-based evaluation of casting gating systems: a multi-criteria decision-making approach [J]. Procedia Manufacturing, 2020 (43): 704-711.
- [11] 曹飞红, 赵海军, 朱威冲. 基于MATLAB和TOPSIS法的齿轮齿条转向器的参数优化 [J]. 汽车实用技术, 2021, 46 (5): 100-103.
- [12] 谭建荣, 刘振宇. 智能制造: 关键技术与企业应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 146.
- [13] 田会方, 舒服华. 基于改进TOPSIS的AZ31镁合金热挤压工艺参数优化 [J]. 轻金属, 2018 (8): 54-58.
- [14] 张晓帆, 舒服华. 基于TOPSIS的铜合金表面铸渗Al₂O₃工艺参数优化 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (22): 195-198.

Optimization of Camshaft Casting Process Parameters Based on Signal-To-Noise Ratio and TOPSIS

ZHU Yan-kang^{1,2}, XU Gang-qiang³, ZHOU Kang-kang³, LI Xiao-lu^{1,2}, CHEN Yuan¹, LI Yun-tang¹
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Quality Big Data Tracing and Analysis of Zhejiang Province, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Boxing Industry and Trade Co., Ltd., Jinhua 321016, Zhejiang, China)

Abstract:

The quality of camshaft castings is affected not only by the combination of multiple casting process parameters, but also by the error fluctuation caused by noise factors in the environment. Based on this, the concept of signal-to-noise ratio in Taguchi method and TOPSIS in multi-objective decision-making were applied to the optimization of process parameters in camshaft casting process, so as to realize the robust design of casting quality. Combined with the computer numerical simulation technology of the casting process, the optimal combination of process parameters with strong anti-interference ability was obtained from the simulation test scheme. The test results show that the casting process parameters of casting mould temperature 35 °C, pouring time 12 s and pouring temperature 1446 °C make the performance of camshaft casting reliable and robust, which provides an idea for the optimization method of casting process parameters in actual production.

Key words:

camshaft casting; process parameters; signal-to-noise ratio; TOPSIS; robust design
