

空心叶片陶瓷型芯注射成形尺寸精度控制

弓成美琪¹ 汪东红² 吴文云¹ 祝国梁² 疏 达² 付 超³

(1.上海工程技术大学材料工程学院; 2.上海交通大学材料科学与工程学院,
上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室; 3.上海电气集团股份有限公司中央研究院)

摘 要 陶瓷型芯的尺寸精度直接影响空心叶片蜡模的壁厚。应用燃气轮机大尺寸单晶叶片陶瓷型芯注射成型数值模拟方法,预测了陶瓷型芯充填过程、体积收缩率与翘曲变形;基于试验设计,建立了注射参数与平均尺寸收缩率的数据模型。结果显示,各工艺参数对平均体积收缩率的影响顺序为:注射温度>保压压力>注射速率,最优注射工艺参数:保压压力为 3.483 MPa,注射温度为 139.84 °C,注射速率为 258.60 cm³/s,陶瓷型芯尺寸精度达到 CT3 级。

关键词 陶瓷型芯;注射参数;数值模拟;尺寸精度

中图分类号 TG249.5;TG242.7

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dimensional Accuracy Control of Ceramic Core Injection Molding for Hollow Blade

Gong Chengmeiqi¹, Wang Donghong², Wu Wenyun¹, Zhu Guoliang², Shu Da², Fu Chao³

(1.School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science; 2.Shanghai Key Laboratory of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University; 3.Central Academy, Shanghai Electric Group Co., Ltd.)

Abstract: The dimensional accuracy of ceramic core directly affects the wall thickness of hollow blade wax mold. The numerical simulation method of ceramic core injection molding for large-scale single crystal blade of gas turbine was conducted, and the filling process, volume shrinkage and warpage deformation were predicted. The data model of injection parameters and average volume shrinkage was established based on the experimental design. The results indicate that the influence order of each process parameter on the average volume shrinkage presents as follows: injection temperature > holding pressure > injection rate. The optimal wax injection process parameters are holding pressure of 3.483 MPa, injection temperature of 139.84 °C, and injection rate of 258.60 cm³/s, so the dimensional accuracy of ceramic core reaches CT3 level.

Key Words: Ceramic Core, Injection Parameters, Numerical Simulation, Dimensional Accuracy

材料基因工程技术用于加速研发镍基单晶高温合金,能够满足重型燃气轮机涡轮叶片的使用要求^[1]。叶片的铸造工艺目前还存在诸多问题^[2,3]。在定向凝固过程中,燃气轮机叶片的陶瓷型芯需要在 1 773 K 以上的液态金属中浸泡 90 min 以上,并且在随后的凝固过程中,糊状区(固液共存区域)附近的陶瓷型芯局部需要承受 30~80 K/cm 甚至更高的温度梯度(在金属液冷却过程中温度梯度可高达 300 K/cm 以上),容易产生应力和裂纹。这些工艺技术难点和复杂的冷却气道设计给陶瓷型芯的生产与制造提出了严格的尺寸精度及使用性能要求^[4]。叶片内部具有特殊的几何形状,无法

进行锻造或机械加工,只能使用可溃散的材料进行脱芯^[5]。

高温涡轮发动机陶瓷型芯的设计复杂,对内腔尺寸和壁厚要求更高^[6,7]。刘孝福等^[8]对陶瓷材料的性能做了研究。苏景阳等^[9]研究了电熔刚玉陶瓷粉末的性能。伍林等^[10]对陶瓷型芯注射过程进行了数值模拟,验证了模拟的可靠性。目前对铸件尺寸控制集中在蜡模和浇注上^[11],对陶瓷型芯不够重视,导致精铸空心叶片在尺寸上的合格率远低于国际领先水平^[12]。

本课题针对陶瓷型芯尺寸精度控制问题,建立了燃气轮机大尺寸单晶叶片注射成型数值模拟方法,采用中

收稿日期:2021-11-12;修改稿收到日期:2021-12-20

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2017-VII-0008-0102,J2019-VI-0004-0117);国家自然科学基金资助项目(51821001,52090042);国家重点研发计划资助项目(2020YFB1710100);长寿命高温材料国家重点实验室开放课题资助项目(DECSHC202109)

第一作者简介:弓成美琪,女,1996 年出生,硕士研究生,上海(201600),E-mail:1769028701@qq.com

通信作者:汪东红,男,1984 年出生,副研究员,上海(200240),E-mail:wangdh2009@sjtu.edu.cn

引用格式:弓成美琪,汪东红,吴文云,等.空心叶片陶瓷型芯注射成形尺寸精度控制[J].特种铸造及有色合金,2022,42(5):647-651.

GONG C M Q, WANG D H, WU W Y, et al. Dimensional accuracy control of ceramic core injection molding for hollow blade[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):647-651.

心复合设计对注射成形工艺参数的试验数据进行方差分析,使用遗传算法对工艺参数进行迭代优化,经试验压制结合蓝光扫描,对比实物与三维模型验证陶瓷型芯尺寸,验证其是否达到 CT3 等级要求,为其工业应用提供参考。

1 陶瓷型芯结构与性能

1.1 陶瓷型芯结构

试验的陶瓷型芯结构较为复杂,不同于以往的 U 型、S 型迂回曲折的型芯,设计成孔洞和整片式结构,存在变截面和较小的凹槽,其三维模型见图 1。型芯总长为 420 mm,壁厚最厚处为 42 mm,型芯叶身处呈现多角度扭转,叶身规则分布了气孔和连接孔,最宽处达到 114 mm,在芯头与芯身部分用柱子形状进行连接。



(a) 正视图 (b) 后视图

图 1 陶瓷型芯三维结构

Fig.1 Three-dimensional structure of ceramic core

1.2 陶瓷型芯性能和变形

陶瓷型芯外表面要求尺寸合格、充型完整、收缩均匀、冷却均匀等,选用以电熔刚玉为基体的混合陶瓷粉末。为了能够使模拟准确,根据实际注射成形条件设置相关参数,压料机参数:注射压力不超过 50 MPa,注射速率峰值为 $500 \text{ cm}^3/\text{s}$,最大锁模力为 100 kN,模具预热温度为 52°C 。充填冷却过程的性能参数依据图 2 和图 3 确定。

对已经压制的超差陶瓷型芯进行蓝光扫描得到点云数据,与原模型进行比对,见图 4。芯身薄壁处变形最严重的地方超过了 0.5 mm。运用中心复合设计与 Moldflow 软件相结合,得到注射成形工艺参数试验方案与结果,在 ISIGHT 软件中使用遗传算法对注射成形工艺参数进行迭代优化,用优化后工艺参数进行实际注射成形。采用 ATOS Core 200 高分辨率蓝光扫描仪器获得点云数据,结合 Geomagic Control 软件对陶瓷型芯关键截面的尺寸精度进行分析。

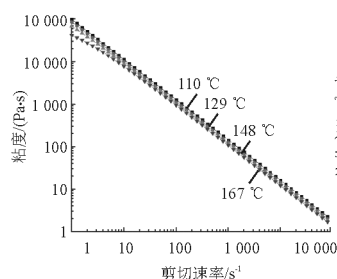


图 2 陶瓷浆料粘度曲线

Fig.2 Viscosity curve of ceramic slurry

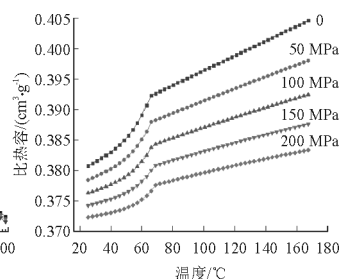


图 3 陶瓷浆料 PVT 曲线

Fig.3 PVT curves of ceramic slurry

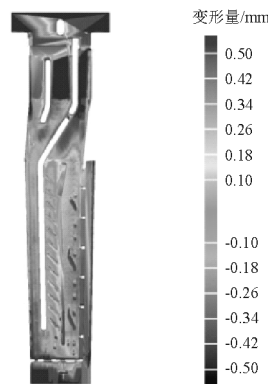


图 4 陶瓷型芯比对结果

Fig.4 Comparison results for ceramic core

2 仿真方法与数值模拟

2.1 陶瓷型芯充型

陶瓷型芯外型结构本身就是自由曲面加上不同的凹槽,是由一定规律的外型截面积叠加生成,其中陶瓷型芯外型截面由叶盆内腔曲线、叶背内腔曲线、规律排列的凹槽及孔洞组成。图 5 为陶瓷型芯注射成形的浇口位置。最佳浇口位置在陶瓷型芯中心,鉴于陶瓷型芯的薄壁结构,可以推断浇口位置在榫头的厚大部位更适合模具设计与加工。

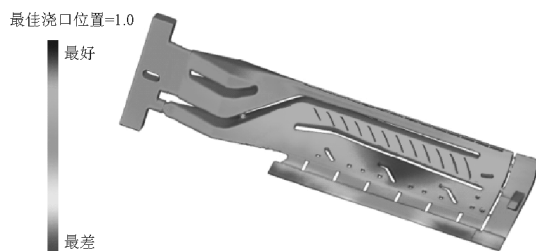


图 5 叶片陶瓷型芯浇口位置

Fig.5 Location of blade ceramic core gate

充型过程及结果是否良好是判断注射成形品质的重要标准之一,在能够进行完整无缺陷的充型情况下才考虑工艺参数的优化,以提高陶瓷型芯注射的尺寸合格率。图 6 为陶瓷型芯充型过程。可以看出,陶瓷浆料首

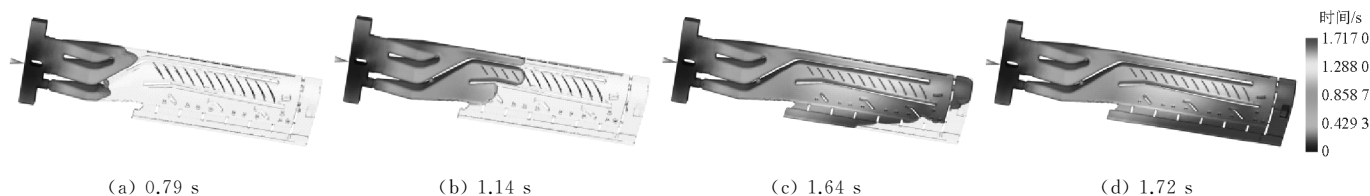


图6 陶瓷型芯充型过程

Fig.6 Filling process of ceramic core

先充满厚大的型芯橡头部分,然后再从型芯橡头往型芯中心推进直至完全充满整个型芯。由于陶瓷型芯模具沿型芯厚度方向分型,受重力影响,陶瓷浆料先充满型芯的下模部分,随着充入型腔陶瓷浆料体积增加,逐步充满上模,充填过程考虑了惯性与重力影响因素。

2.2 缺陷预测

注射成形过程中,由于材料的冷却固化会造成收缩:收缩均匀造成整体尺寸均匀变小,收缩不均匀就会产生内应力导致翘曲变形。由于陶瓷型芯在实际注射成形过程中受模具制约和外部压板固定等因素,会降低翘曲变形量,见图7,最大变形量不超过0.178 mm,影响尺寸精度的主要是收缩。图8为计算模拟得到的平均体积收缩率。可以看出,在厚大橡头位置平均体积收缩率最大,达到3.304%,在陶瓷型芯薄壁排气处最小,为1.946%。

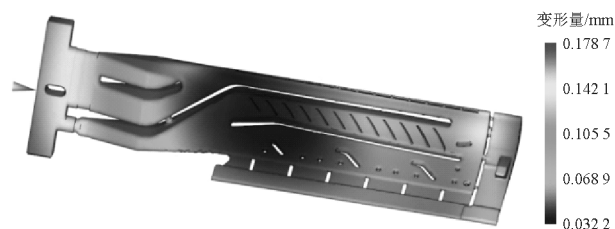


图7 陶瓷型芯充填结束后的翘曲变形

Fig.7 Warping deformation of ceramic core after filling



图8 计算模拟得到的平均体积收缩率

Fig.8 Average volume shrinkage simulated by calculation

熔接线又叫熔接痕,是由于充型过程不同时间段陶瓷浆料前沿优先冷却,在结合处未能完全融合产生的接线,其性能取决于接线角度和材料,因此接线尽量位于不影响尺寸和品质的位置。严格来说,熔接线无法完全消除,陶瓷型芯最主要的是保持表面尺寸完整性,图9为陶瓷型芯在充型时形成的熔接线。可以看出,角度大于135°的熔接线主要在陶瓷型芯的凹槽处,不影响陶

瓷型芯的表面品质和整体强度。



图9 陶瓷型芯在充型时形成的熔接线

Fig.9 Welding connection of ceramic core during filling process

3 试验结果及分析

3.1 试验设计

在研究陶瓷型芯尺寸变形中,选取与注射成形参数相关的保压压力、注射温度和注射速率作为试验因子。利用 Design expert 软件中的 Box-Behnken 设计方法进行试验设计,以平均尺寸变化为试验结果,水平与分析因素见表1,保压压力为2.5~3.5 MPa、注射温度为120~140 °C、注射速率为200~300 cm³/s,并在 Mold-flow 软件中根据试验设计设置参数得出试验结果。

表1 响应面分析因素与水平

Tab.1 Factors and levels of response surface analysis

水平	因素		
	(A)保压压力/MPa	(B)注射温度/°C	(C)注射速率/(cm ³ ·s ⁻¹)
1	2.5	120	200
2	3.0	130	250
3	3.5	140	300

采用响应面法具有综合试验设计和进行数学建模两种优势^[13,14],对空间内的样本点拟合,初步对方差进行分析,研究各个因数的显著性,得出响应的主要因素。

表2为方差分析结果。可以看出, P 值为0.0007,远远小于0.05,证明模型是显著的,表明用二阶模型拟合响应面方程可行,可以较准确地对不同工艺参数进行组合预测,得出平均尺寸收缩率的响应值。在方差分析结果中,根据 P 值的数值可以直观得到各工艺参数影响平均收缩率的顺序:注射温度(B)>保压压力(C)>注射速率(A)。比较3组参数之间的关系图可知,适当降低注射温度可以降低填充结束后的冷却时间,降低陶瓷浆料的整体收缩,减少冷却和收缩带来的尺寸变化。实际生产中注射温度过低,会增加陶瓷浆料在模具内腔

的粘度,导致注射不充分;适当增加保压压力,配合较低的注射温度,有利于填充保压转换之后增加陶瓷浆料的流动性,以提高陶瓷型芯的充型完整度;适当增加注射速率能够有效减小平均尺寸收缩率。

表 2 方差分析结果

Tab.2 Results of variance analysis						
响应变量	平方和	d_f	均方差	F 值	P 值	误差
模型	6.806×10^{-5}	3	2.269×10^{-5}	10.92	0.000 7	显著
A-注射速率	1.800×10^{-7}	1	1.800×10^{-7}	0.087	0.773 1	
B-注射温度	4.050×10^{-5}	1	4.050×10^{-5}	19.49	0.000 7	
C-保压压力	2.738×10^{-5}	1	2.738×10^{-5}	13.18	0.003 1	

根据残差分析,如果残差的分布是正态分布的,则数学预测模型是准确的。残差正态概率图(见图 10)显示,试验中的点遵循一条直线。此外,作为假设恒定方差的检验工具,残差与逐渐增大的预测响应值之间的关系(见图 10)是随机散布,表明不存在任何异常结构和明显变化趋势,意味着回归模型是足够的,不违反独立性或恒定方差假设。

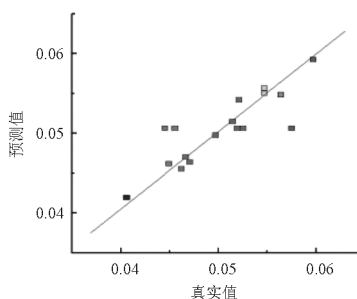


图 10 真实值和预测值比对

Fig.10 Comparison between actual and predicted values

3.2 最优注射成形工艺参数

多岛遗传算法与其他遗传算法基础一样,在基础上增加了许多个独立域,每个独立域上会有一些具有可重复性子集,利用精英主义筛选出具有优秀的个体,在算法的帮助下跳出局部最优点,达到全局最优。每个设计点被视为具有基于目标函数值和约束惩罚的特定适应值个体,添加了精英主义和可重复性^[15]。将试验结果保存为 parameter.txt 在 ISIGHT 中调用,以响应面模型为基础构建遗传算法迭代框架,选择多岛遗传算法(Multi-island GA),搭建算法基本框架。

在遗传算法设置中,因变量设置为 3 个,保压压力为 2.5~3.5 MPa、注射温度为 120~140 ℃、注射速率为 200~300 cm³/s,进行遗传算法分析,迭代过程和优化后结果见图 11。可以看出,平均尺寸收缩率最小结果为 4.613%。采用遗传算法可以最大程度优化目标函数值,求解出最优注射成形工艺参数:保压压力为 3.483 MPa,注射温度为 139.84 ℃,注射速率为 258.60 cm³/s。

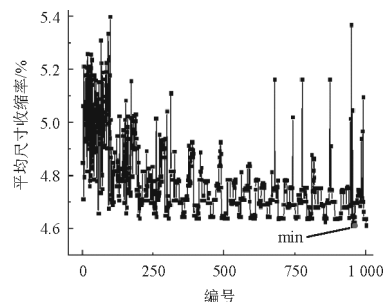


图 11 遗传算法迭代数据目标优化结果

Fig.11 Optimization results of iterative data by genetic algorithm

3.3 型芯注射成形及尺寸检测

用电熔刚玉陶瓷粉末,以不同比例的陶瓷浆料和纤维剂在常温下混合搅拌,检测混合陶瓷浆料流动性。将配制好的陶瓷浆料加入到注射机进料桶中,设定注射温度进行陶瓷浆料预热。同时在模具内表面喷涂一层脱模剂,并对模具内腔进行预热。预热结束,将上下模合模并移至压力机下方,施加适宜压力,使上下模完全闭合同时保证填充时不会产生外溢。将浇注口对准出料口保证进料流畅。设置注射成形参数,将已预热的陶瓷浆料,通过出料口压射到陶瓷型芯模具内,待保温结束,打开模具取出陶瓷型芯,进行脱蜡处理,得到的陶瓷型芯见图 12。用传统的直接测量法测量陶瓷型芯会产生较大误差,特别是孔洞细小处的精确度较低,因此用蓝光扫描仪对优化后的陶瓷型芯进行数据采集,将采集到的数据通过转化器变成点云格式进行储存,点云数据包含了被测物的几何位置信息。

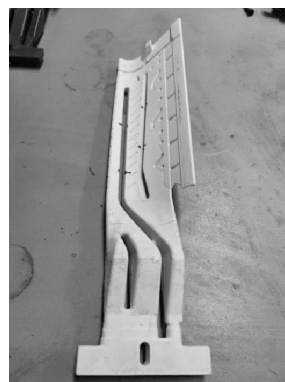


图 12 注射成形陶瓷型芯

Fig.12 Ceramic core by injection molding

采用 Geomagic Control 软件对陶瓷型芯点云和原模型进行高精度拟合,进行 3D 比较,对陶瓷型芯外表面结构点位置变化进行尺寸标注,结果见图 13。可以看出,陶瓷型芯三维比对没有出现深色和浅色部分,说明整体变形量在±0.1 mm 以内。重点对优化工艺参数后注射成形的陶瓷型芯壁厚突变处进行分析,选取各壁厚突变处的尺寸,标注结果均符合要求,尺寸偏差在

-0.032~0.041 8 mm 之间,满足尺寸精度要求。

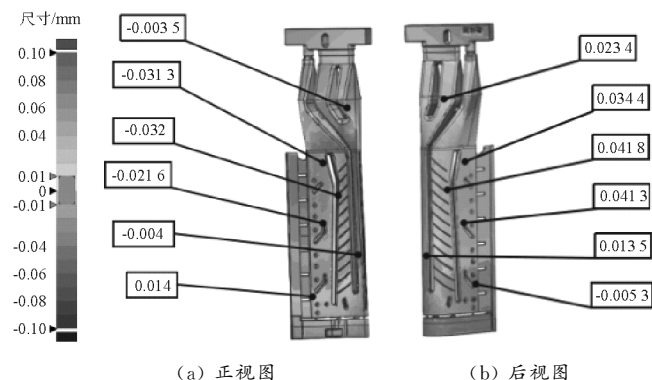


图 13 陶瓷型芯比标准结果

Fig.13 Standard result of ceramic core ratio

陶瓷型芯尺寸决定了叶片内腔尺寸,整体叶片尺寸精度等级要达到 CT4,考虑到熔模铸造过程工序多,会造成尺寸误差累积传递,陶瓷型芯外表面尺寸要达到 CT3 级别。按照 GB6414-86 中规定的生产各种铸造金属及合金铸件尺寸公差,数字越小,尺寸精度越高。为验证陶瓷型芯外表面尺寸精度级别,在 Geomagic control 中选取陶瓷型芯中部有代表性的 3 个截面进行剖面分析,所选取的截面位置见图 14。

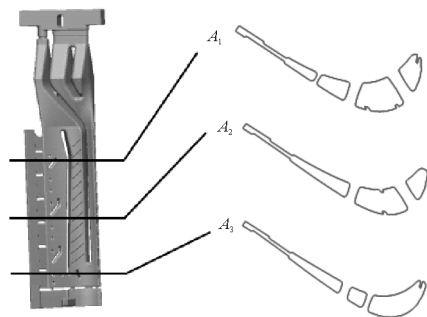


图 14 陶瓷型芯选取截面位置

Fig.14 Location of selected section of ceramic core

由于陶瓷型芯各截面不是规则的形状,无法进行具体尺寸比较,利用 Geomagic control 中自带的截面尺寸将原 CAD 模型三个截面与测量后截面尺寸作差取平均值、最大偏差值、最小偏差值,结果见表 3。可以看出,陶瓷型芯尺寸精度已达到 CT3 要求。

表 3 陶瓷型芯截面尺寸偏差统计

Tab.3 Variation statistics of ceramic core section size

截面名称	平均尺寸收缩率/%	最大偏差值/mm	最小偏差值/mm	偏差范围/mm	是否满足 CT3
A ₁	-0.47	0.122 9	-0.174 8	±0.34	是
A ₂	-1	0.209	-0.349 4	±0.34	是
A ₃	0.51	0.189	-0.196 8	±0.34	是

4 结 论

(1)采用 Moldflow 软件对燃气轮机大尺寸单晶叶

片陶瓷型芯进行注射成形数值模拟仿真,研究了陶瓷浆料的粘度曲线和 PVT 曲线,得出对尺寸精度影响的主要因素是陶瓷浆料的体积收缩,最大达 3.304%。

(2)基于中心复合设计建立了注射参数与平均尺寸收缩率的数据模型,研究各工艺参数对平均尺寸收缩率的影响,其影响顺序为:注射温度>保压压力>注射速率。平均尺寸收缩率最小值为 4.613%,在此平均尺寸收缩率下的保压压力为 3.483 MPa,注射温度为 139.84℃,注射速率为 258.60 cm³/s。

(3)采用以电熔刚玉陶瓷粉末为基底的混合陶瓷浆料进行注射成形试验,采用最优工艺参数生产出陶瓷型芯,经过蓝光扫描比对后整体尺寸符合 CT3 精度要求。

参 考 文 献

- [1] 陈晶阳. 利用材料基因工程技术加速研发镍基单晶高温合金[A]. 2019 中国铸造活动周论文集[C].武汉, 2019.
- [2] 陈晶阳, 李青, 肖程波, 等. 第二代耐蚀镍基单晶高温合金 DD489 及其典型性能[J]. 金属热处理, 2019, 44(6): 65-68.
- [3] 罗亮, 肖程波, 陈晶阳, 等. 工业燃气轮机涡轮叶片用铸造高温合金研究及应用进展[J]. 材料工程, 2019, 47(6): 34-41.
- [4] 于波. 定向凝固叶片用氧化铝基陶瓷型芯研究进展[A]. 2019 中国铸造活动周论文集[C].武汉, 2019.
- [5] 赵代银, 何建, 伍林, 等. 陶瓷型芯在高温合金熔模铸造中的应用技术[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(9): 999-1 003.
- [6] 梁启如. 氧化铝基陶瓷型芯材料制备及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [7] 王飞, 李飞, 余建波, 等. 空心叶片用陶瓷型芯脱芯工艺研究现状[J]. 中国材料进展, 2019, 38(3): 264-270.
- [8] 刘孝福, 郭新力, 李彪, 等. 氧化铝基陶瓷型芯性能研究[A]. 2020 中国铸造活动周[C]. 合肥, 2020.
- [9] 苏景阳, 陈啸. 燃气轮机叶片用氧化铝陶瓷型芯性能的研究[J]. 机械工程师, 2010(4): 154-155.
- [10] 伍林, 曾洪, 赵代银, 等. 陶瓷型芯注射成型过程的计算机模拟研究[J]. 东方汽轮机, 2021(2): 45-49.
- [11] 曾洪, 赵代银, 何建, 等. 燃机透平叶片熔模精密铸造用陶瓷型芯研究进展[J]. 东方汽轮机, 2019(2): 69-72.
- [12] 梁启如, 吴玉胜, 刘孝福, 等. 航空发动机涡轮叶片铸造用陶瓷型芯研究进展[J]. 铸造, 2018, 67(9): 790-793.
- [13] 王彦凤, 杨正, 邱常明, 等. 基于响应面法的 A357 铝合金金属型铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(10): 1 137-1 142.
- [14] 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.
- [15] 孙锦玉, 汪东红, 刘淑梅, 等. 基于数据模型与决策优化的高温合金铸件冒口设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 23-27.

(编辑:刘卫)