

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5027

熔模精密铸造压蜡工艺参数对蜡模质量影响的研究

王云悝¹, 李 飞², 史小宝², 许广涛², 贺卫峰³, 李 强⁴

(1. 云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600; 2. 河南平原光电有限公司, 河南 焦作 454003; 3. 陕西宏远航空锻造有限责任公司, 陕西 咸阳 713801; 4. 曲靖师范学院 化学与材料工程学院, 云南 曲靖 655011)

摘 要: 系统研究了压蜡工艺参数对熔模铸造蜡模质量的耦合影响机制, 通过生产案例分析了蜡液温度(52~65 ℃)、包蜡压力(1.5~2.5 MPa)、流量(80~200 cm³/s)、循环时间等参数对蜡模成形性、尺寸精度及表面缺陷的作用规律。结果表明, 蜡液温度高于 60 ℃时, 蜡模收缩率增大导致缩陷, 低于 55 ℃则充型能力不足引发黏模; 包蜡压力需动态调整以平衡模具形变与蜡模致密度; 流量与注蜡孔径的协同优化可减少冷隔与卷气缺陷。通过缺陷-参数调整模型, 提出“压力流量优先、温度微调”的优化策略。

关键词: 熔模铸造; 压蜡工艺; 蜡模质量; 参数优化; 缺陷控制

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)04-0397-06

Impact of Wax Injection Process Parameters on the Quality of Wax Patterns in Investment Casting

WANG Yunli¹, LI Fei², SHI Xiaobao², XU Guangtao², HE Weifeng³, LI Qiang⁴

(1. Yunnan Phosphorus Chemical Group Co., Ltd., Kunming 650600, China; 2. Henan Pingyuan Optics Electronics Co., Ltd., Jiaozuo 454003, China; 3. AVIC Shaanxi Hongyuan Aviation Forging Co., Ltd., Xianyang 713801, China; 4. College of Chemistry and Materials Engineering, Qujing Normal University, Qujing 655011, China)

Abstract: The coupling effects of wax injection process parameters on the quality of wax patterns in investment casting were systematically investigated. Production experiments were conducted to analyse the influence of key parameters, including wax temperature (52~65 ℃), wrapping pressure (1.5~2.5 MPa), flow rate (80~200 cm³/s) and cycle time, on the formability, dimensional accuracy, and surface defects of wax patterns. The results show that when the wax temperature exceeds 60 ℃, the shrinkage rate increases, leading to depression, whereas temperatures below 55 ℃ result in insufficient filling capacity and mold sticking. The wrapping pressure requires dynamic adjustment to balance mold deformation and wax pattern density. The synergistic optimization of the flow rate and injection hole diameter reduces cold shuts and gas entrapment. By establishing a defect-parameter adjustment model, an optimization strategy of “prioritizing pressure and flow rate, followed by temperature fine-tuning” is proposed.

Key words: investment casting; wax injection process; wax pattern quality; parameter optimization; defect control

熔模铸造作为人类早期掌握的金属热加工技术之一,在中国可追溯到春秋战国时期^[1],古代的云纹铜禁^[2]、青铜罍等杰出作品,均是熔模铸造技术的产物。熔模精密铸造^[3],亦称失蜡铸造,特别适合生产形状复杂、表面光洁度要求高的精密铸件。熔模精密铸造技术因其近净成形能力,广泛应用于航空、医疗

等领域复杂零件的生产^[4]。目前,熔模铸件的最大轮廓尺寸已超过 2 m,而最小壁厚却可小于 2 mm^[5]。同时,熔模铸件的精度越来越高,铸造尺寸公差可达 ±0.13 mm^[6];铸件表面粗糙度也显著降低,通常在 R3.2~R6.3 之间。在航空工业中,超过98%的钛合金构件是通过熔模精密铸造技术制备的^[7]。

收稿日期: 2025-02-18

基金项目: 曲靖师范学院博士创新团队支持计划

作者简介: 王云悝, 1975 年生, 学士, 工程师, 主要从事生产运营管理方面的工作。Email: 592822969@qq.com

通信作者: 李 强, 1979 年生, 博士, 研究员, 研究方向为金属热成形技术。Email: liqiang@mail.qjnu.edu.cn

引用格式: 王云悝, 李飞, 史小宝, 许广涛, 贺卫峰, 李强. 熔模精密铸造压蜡工艺参数对蜡模质量影响的研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(4): 397-402.

WANG Y L, LI F, SHI X B, XU G T, HE W F, LI Q. Impact of wax injection process parameters on the quality of wax patterns in investment casting[J]. Foundry Technology, 2025, 46(4): 397-402.

熔模精密铸造流程复杂,工序众多。以钛合金精密铸件为例,从投料到铸件入库,需经历 70 余道工序。其中,从蜡模到型壳内腔,再到最终铸件,尺寸贯穿整个工艺流程。蜡模的形状和尺寸稳定性直接决定了铸件的精度^[8-11]。

在熔模精密铸造过程中,传统方法通过压蜡机将蜡料注入模具压制成型,这种方式适合批量化和大型化生产。蜡模制备作为整个生产链条的起始环节,对铸件的尺寸精度^[12]和外观质量有着直接影响。

压蜡机作为制蜡的核心设备,通常由温控系统、液压单元及智能注蜡模块组成。常见的压蜡机如图 1 所示。双工位压蜡机,常规合模压力为 12 t;C 型压蜡机,合模压力范围为 20~50 t;四立柱压蜡机,合模压力不小于 50 t。

1 压蜡机工艺参数分类

压蜡机工艺参数包括关键参数和辅助参数^[13-16]。其中关键参数包括:蜡液温度(52~65 ℃)、包蜡压力(3~25 bar)、流量(0~200 cm³/s);辅助参数包括:模具温度(16~40 ℃)、注蜡孔径(φ6~10 mm)、循环时间(≥ 30 s)、保压时间(≥ 10 s)等。

2 压蜡工艺流程

常用压蜡机的生产流程如图 2 所示(结合美国 MPI 公司 25 t 自动压蜡机)。其具体步骤为:①蜡料加入储料桶,设置蜡液温度(温控系统控温精度 ±0.5 ℃);②清洗模具并加热至 16~40 ℃;③喷脱模剂,装配模具并调整压蜡机参数;④压制蜡模,保压后脱模并清理残蜡;⑤外观尺寸检测,对发生变形的进行校正。

3 压蜡工艺参数对蜡模质量的影响

3.1 压蜡参数对蜡模质量的影响

3.1.1 蜡液温度

蜡液温度是影响蜡模成形和尺寸稳定性的关键因素。其直接影响模料的黏弹性行为。根据牛顿流体模型,蜡液黏度 η 与温度 T 的关系可近似表示为:

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

式中, E 为活化能; R 为气体常数。在压力和注蜡孔径一定的情况下,蜡温的变化直接影响模料黏度和充型能力,蜡液温度高时(>60 ℃), η 显著降低,蜡液流动性和成型能力好,蜡模外观棱角清晰,但蜡模

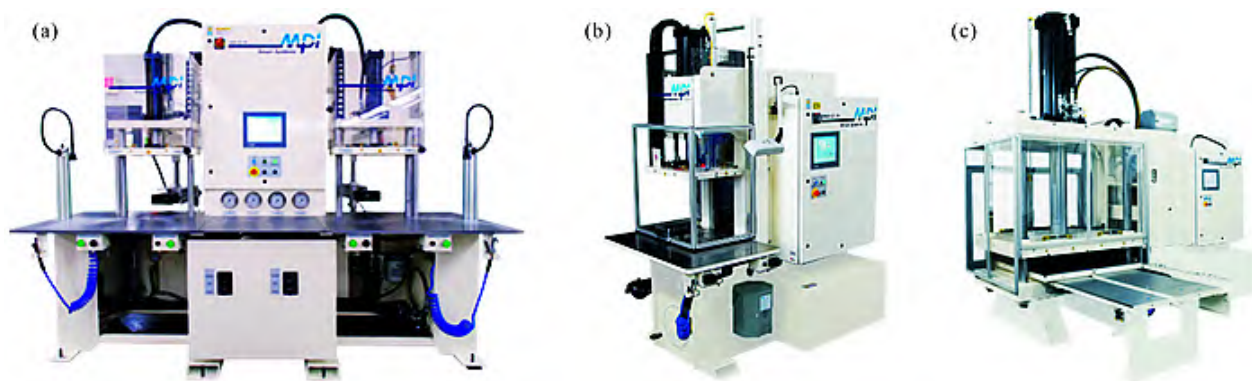


图 1 常规压蜡机:(a) 双工位压蜡机;(b) C 型压蜡机;(c) 四立柱型压蜡机
Fig.1 Wax injection equipment: (a) two-station wax injector; (b) C-frame wax injector; (c) 4 post wax injector

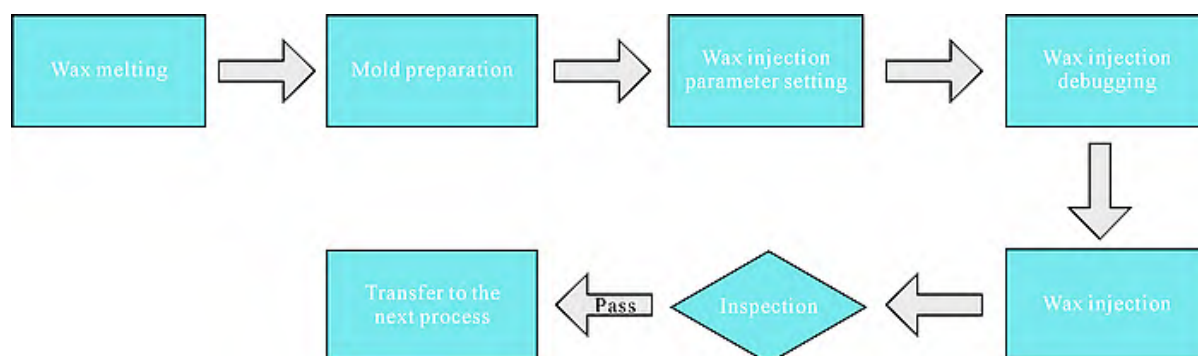


图 2 压制蜡模生产流程
Fig.2 Process flow chart of the wax pattern

整体收缩率偏大,造成大平面容易缩陷;蜡液温度低时(<55℃),蜡模整体收缩稍小,大平面不易缩陷,但由于 η 增大,蜡液流动性差,成型能力差,易造成黏模、缩坑且蜡模外观棱、边角处形状不饱满。以树脂基模料(其中树脂含量40%~80%、石蜡和烃蜡混合物含量20%~60%,质量分数)和石蜡基模料为例,前者的活化能明显大于后者,所以后者对温度更敏感。石蜡基模料的蜡液温度对蜡模的尺寸稳定性很敏感,而树脂基模料则影响较小,生产过程中要针对不同模料对蜡液温度进行调整。

3.1.2 包蜡压力

包蜡压力直接影响蜡模的致密度与尺寸精度,根据胡克定律,模具变形量 ΔL 与包蜡压力 P 的关系为:

$$\Delta L = \frac{P \cdot A}{k} \quad (2)$$

式中, A 为接触面积; k 为模具刚度。包蜡压力大时,蜡液充型能力强,蜡模致密度高、收缩率小且外观棱边角清晰;当压力大于2.5 MPa时,增大压力对收缩率的影响逐渐减弱,反而会引起模具变形,导致蜡模飞边影响尺寸,模具锁紧螺钉易损坏,模具易变形。包蜡压力小时,蜡液充型能力弱,蜡模不易成型,致密度低且收缩大,尺寸不易保证,外观棱边角容易充不满。

3.1.3 流量与注蜡孔径

流量是保证蜡模充型、补缩稳定的基础参数。流量 Q 和注蜡孔径 d 协同作用决定充型速度。根据伯努利方程,充型速度 v 与压力梯度 ∇P 的关系为:

$$v = Q/d = \sqrt{\frac{2\nabla P}{\rho}} \quad (3)$$

式中, ρ 为蜡液密度。若 $d=8\text{ mm}$,当 $Q>150\text{ cm}^3/\text{s}$ 时,蜡液由层流过渡至湍流,湍流易导致飞溅、卷入气体;但是充型速度快,易成形,不易形成冷隔,蜡模外观不易形成花纹、流痕;当 $Q<80\text{ cm}^3/\text{s}$ 时充型平稳,不易发生卷气,但是蜡液充型速度慢,易形成冷隔,蜡模外观易形成花纹、流痕。

3.1.4 其他参数

除以上关键参数外,蜡模成型和收缩也受到循环时间和保压时间的影响。循环时间包括注射时间和保压时间。循环时间过长,会造成蜡模冷却受阻,尺寸变大,生产节拍变长;循环时间过短,则易导致蜡模成型不完整。保压时间过长,蜡模在模具内冷却时间长,造成蜡模尺寸偏大;保压时间过短,无法给蜡模厚大部位提供补缩,导致收缩凹陷,同时,蜡模出模温度高,室温下冷却收缩大,会导致尺寸偏小。

3.2 缺陷-参数调整模型

实际生产中需要根据蜡模出现的浇不足、表面粗糙、流痕、气泡、缩陷、变形等缺陷^[17-18]调整压蜡参数。基于此,提出多参数协同优化,构建缺陷-参数调整模型,其耦合方程为:

$$P = k \cdot \frac{\eta(T) \cdot Q}{d^2} \quad (4)$$

调整方式如表1所示,总体来说,先调整包蜡压力、流量等;最后调整蜡液温度,每次按照1℃进行增减,范围在52~65℃,一般不超过60℃。

表1 蜡模缺陷-参数调整模型

Tab.1 Wax pattern defects-parameter adjustment model

Wax pattern defects	Wrapping pressure	Flow rate	Cycle time	Holding time	Wax temperature
Misrun	↑	↓	↑	-	↑
Rough surface	↑	↑	-	-	↑
Flow mark	↑	↑	-	-	↑
Gross blowhole	-	↓	-	-	↓
Depression	↑	-	↑	↑	↓
Distortion	↑	-	↑	↑	↓

Note: "↑" indicates increasing or raising this parameter, and "↓" indicates decreasing or reducing this parameter

如图3a所示,蜡模出现外观缩陷的缺陷主要因为蜡液温度过高,降低温度后要适当增加循环时间和保压时间。通过调整蜡液温度、循环时间、保压时间后,蜡模(图3b)缺陷消失。图3c所示蜡模在散热条状结构处出现外观缩陷或浇不足等缺陷。其原因是由循环时间和压力造成的没有充满,也可能是蜡液温度过低导致充型能力不足。故先增加包蜡压力和循环时间,如能解决就无需调整蜡液温度;如不能解决,则再增加蜡液温度。通过综合调整蜡液温度、包蜡压力、循环时间,如图3d所示,制备的蜡模外观完整,浇不足缺陷消失。

图4为蜡模流痕缺陷,首先排除模具问题,再根据缺陷-参数调整规则,流痕缺陷需要调整蜡液温度、包蜡压力和流量。如前所述先增大包蜡压力和流量,流痕基本可以消失;调整后效果不明显再提高蜡液温度。

表面粗糙和流痕缺陷类似,可采用相同方法进行调整。其他例如气泡和蜡模变形缺陷不再单独列举,可结合实际工况根据表1进行调整。

4 工程案例:某箱体蜡模参数优化

目标零件为X厂某箱体,如图5所示,该零件包含多组凹凸结构、腔体以及异形区域,如内部大面积凹槽、外部突出定位块体和右侧下方盲孔。其中定位块体为后续机械加工、装配的基础,对尺寸精度要

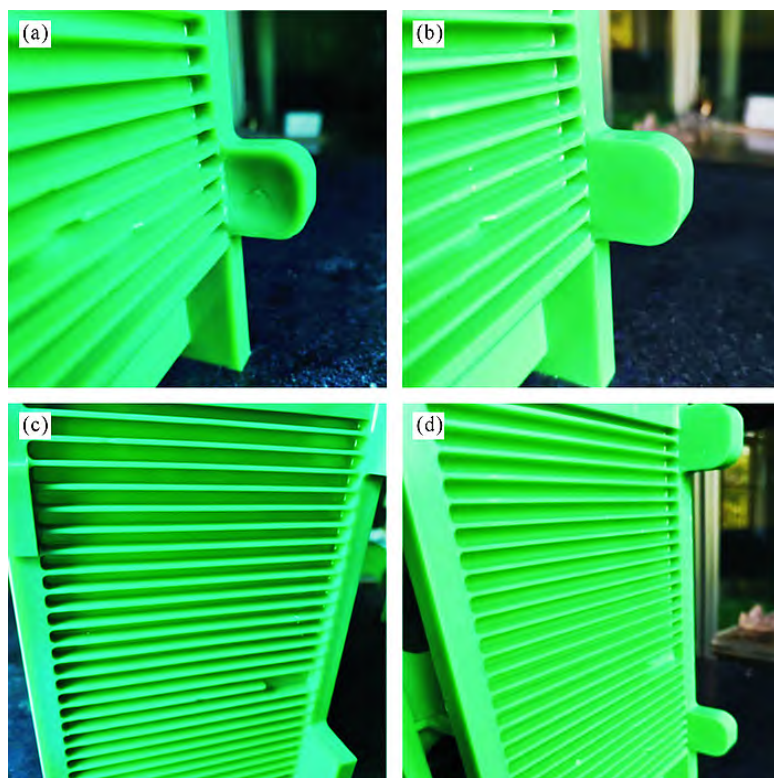


图3 蜡模外观缩陷对比:(a) 缩陷蜡模;(b) 正常蜡模;(c) 浇不足蜡模;(d) 正常蜡模

Fig.3 Comparison photos of the appearance of wax patterns with depression: (a) wax pattern with depression; (b) normal wax pattern; (c) wax pattern with misrun; (d) normal wax pattern

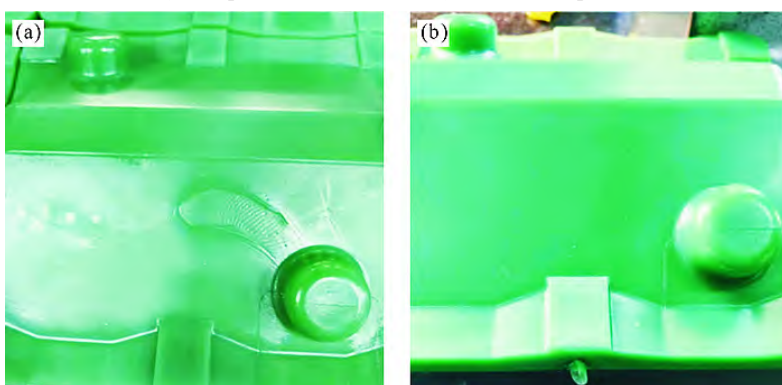


图4 蜡模外观流痕对比:(a) 缺陷蜡模;(b) 正常蜡模

Fig.4 Comparison photos of the appearance of wax patterns with flow marks: (a) wax pattern with defects; (b) normal wax pattern

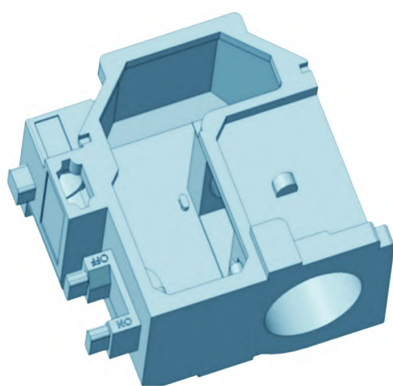


图5 箱体三维示意图

Fig.5 3D model of the box

求较高,要求蜡模无塌陷、变形等。此外,零件壁厚相

差较大,最小壁厚 2.2 mm,最大壁厚 20 mm;带有精细文字“ON”及“OFF”字样线条宽仅 0.5 mm。整体零件三维空间结构复杂,要求蜡模结构完整、尺寸准确,目测无明显缺陷。

4.1 参数优化方案

蜡料为荷兰百瑞美的 996C 蜡料。在初期压制过程中该零件出现黏模,厚大处缩陷,字迹未充满、不饱满,字体线条缺失的情况。基于此,首先增加包蜡压力,缩陷情况消失,蜡模黏模情况减轻;初始工艺蜡温相对较高,经过上述调整后再对蜡温进行微调,同时根据蜡模冷却后尺寸变化调整循环时间和保压时间。优化后参数如表 2 所示。优化后蜡模制品如图 6,蜡模整体出模顺利,无黏模情况;整体外轮

表 2 优化后的工艺参数
Tab.2 Optimized process parameters

Parameter	Wax temperature/℃	Wrapping pressure/MPa	Flow rate /(cm ³ ·s ⁻¹)	Injection hole diameter/mm	Cycle time/s	Holding time/s	Mode temperature/℃
Value	59	1.8	100	φ8	90	90	20

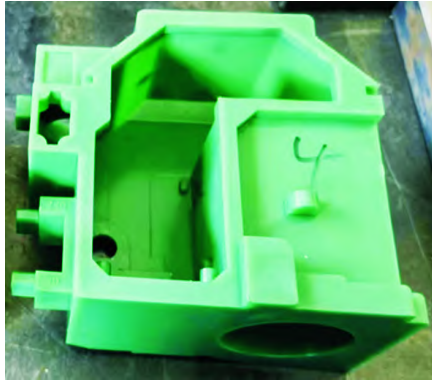


图 6 工艺优化后蜡模外观

Fig.6 Picture of the wax mold after process optimization

廓清晰,圆角饱满,厚大处无缩陷,棱边清晰无飞边,表面一致无夹杂,经检测,尺寸、外观达到工艺要求。

5 结论

(1)先调整包蜡压力。包蜡压力需要根据模料性能调整:黏度小、流动性好的模料宜选用较低的压力,反之需要调高。此外,根据蜡模结构特点,对于结构复杂蜡模,压力在 1.5~2.9 MPa 范围调整。

(2)其次调整流量(注蜡孔径)、模具温度、循环时间、保压时间等参数。对于流量,其建议调节范围为 80~200 cm³/s,注蜡孔径为 φ6~10 mm。模具温度动态调整范围为 16~40 ℃。循环时间和保压时间根据具体设备工况、蜡料和蜡模结构特点逐步调整。

(3)最后调整蜡液温度。蜡液温度范围在 52~65 ℃,每次调整 1 ℃,一般不超过 60 ℃。

记录每次调整后的参数和蜡模质量情况,以供后续生产参考。此外,生产过程中还需关注生产环境温度、模料保温、含水量、新旧料比等因素,保证生产过程的一致性和稳定性。

参考文献:

- [1] 杨欢. 中国青铜时代失蜡法百年研究史略论[J]. 中国科技史杂志, 2021(1): 136-149.
- [2] 秋慈. 云纹铜禁:古代禁酒令的实证[J]. 科学之友, 2022(6): 66-67.
- [3] 凌业勤. 我国传统失蜡铸造法的起源年代[J]. 现代铸造, 1981(3): 43.
- [4] CAMPBELL J. Complete casting handbook: Metal casting processes, techniques and design [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.

- [5] 张慧芳,张治民. 钛合金成型新技术[J]. 山西科技, 2008(3): 156, 103.
ZHANG H F, ZHANG Z M. New technology of titanium alloys forming[J]. Shanxi Science and Technology, 2008(3): 156, 103.
- [6] 樊振中,徐秀利,王玉灵,刘建军. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(3): 285-289.
FAN Z Z, XU X L, WANG Y L, LIU J J. Investment casting technology application and development in the aviation industry [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(3): 285-289.
- [7] 赵瑞斌. 大型复杂钛合金薄壁件精铸成形技术研究进展[J]. 钛工业进展, 2015(2): 7-12.
ZHAO R B. Research progress of precision casting of large complex thin-walled titanium alloy [J]. Titanium Industry Progress, 2015(2): 7-12.
- [8] 张美娟,南海,鞠忠强,高富辉,鄢喜望,朱郎平. 航空铸造钛合金及其成型技术发展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 13-19.
ZHANG M J, NAN H, JU Z Q, GAO F H, QIE X W, ZHU L P. Aeronautical cast Ti alloy and forming technology development[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 13-19.
- [9] 罗强,李飞,马鑫,雷四雄,赵彦杰,戚诚康,李治辉,来俊华. 蜡模误差与叶片精度控制技术的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(8): 944-950.
LUO Q, LI F, MA X, LEI S X, ZHAO Y J, QI C K, LI Z H, LAI J H. Research progress in controlling technologies of wax pattern error and blade accuracy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8): 944-950.
- [10] 周乐尧,汪东红,刘淑梅,帅三三,赵代银,疏达. 大尺寸燃气轮机叶片蜡模注射成型与尺寸精度控制[J]. 铸造, 2023, 72(6): 641-647.
ZHOU L Y, WANG D H, LIU S M, SHUAI S S, ZHAO D Y, SHU D. Injection molding and dimensional accuracy control of large size gas turbine blade wax pattern[J]. Foundry, 2023, 72(6): 641-647.
- [11] 王晶,付超,刘畅辉,汪东红,帅三三,任兴孚. 涡轮叶片蜡模成形工艺参数对尺寸偏差的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(1): 135-138.
WANG J, FU C, LIU C H, WANG D H, SHUAI S S, REN X F. Influence of forming process parameters of turbine blade wax patterns on dimensional deviation[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1): 135-138.
- [12] 杨冬丽,高富辉,那玥. 某弧形结构钛合金铸件蜡模尺寸控制[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(4): 521-524.
YANG D L, GAO F H, NA Y. Wax dimension control of the titanium alloy casting with arc structure[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4): 521-524.
- [13] 周李明,王峰,王东,赵而团. 工艺参数对蜡模成形性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(2): 173-175.
ZHOU L M, WANG F, WANG D, ZHAO E T. Influence of pro-

- cessing parameters on the wax filling ability[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2017, 37(2): 173-175.
- [14] 熊学慧,付海军. 熔模铸造用压蜡机研究现状及蜡模质量控制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(11): 1845-1848.
- XIONG X H, FU H J. Current status of wax injection machine and quality control of wax patterns in investment casting[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(11): 1845-1848.
- [15] 阚精诚,刘继广,杨友文,方晓刚,凌嘉琦,陈象青. 熔模铸造柱状蜡模充型工艺参数优化[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(8): 877-880.
- KAN J C, LIU J G, YANG Y W, FANG X G, LING J Q, CHEN X Q. Optimization of process parameters for investment casting cylindrical wax mold [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(8): 877-880.
- [16] 陈冰. 制模工艺参数及计算机控制——国外精铸技术进展述评(3)[J]. *特种铸造及有色合金*, 2005, 25(3): 172-174.
- CHEN B. Review of Progress in investment casting technology at abroad part III: Processing parameters for pattern-making and its computer control [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2005, 25(3): 172-174.
- [17] 潘玉洪. 熔模铸造蜡模缺陷分析[J]. *金属加工(热加工)*, 2014(7): 25-27.
- [18] 陈烈雄,袁军平,陈绍兴,吴海超. 艺术铸造中蜡模常见缺陷成因及解决措施[J]. *特种铸造及有色合金*, 2014, 34(1): 63-65.
- CHEN L X, YUAN J P, CHEN S X, WU H C. Origination and countermeasures of common war pattern defects in art castin [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2014, 34(1): 63-65.
- (责任编辑:杨浩雪)