

阶梯件蜡模注射成形过程数值模拟及工艺参数优化

杨其航¹, 胡晓玉¹, 马聚怀¹, 郗喜望², 张美娟², 南海², 许庆彦¹, 李言祥¹

(1. 清华大学材料学院, 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 大型机匣作为航空航天领域的核心承力部件, 其变壁厚结构导致蜡模注射成形过程中易产生翘曲缺陷, 严重影响产品质量与安全性。本课题以小型阶梯件为研究对象模拟机匣变壁厚几何结构, 以注射压力、注射时间和保压时间为关键工艺参数, 采用 $L_9(3^3)$ 正交试验设计, 结合数值模拟技术, 研究了各参数对变壁厚区域翘曲量的影响规律。通过极差分析与方差分析, 各工艺参数对翘曲影响的主次顺序为: 注射压力>保压时间>注射时间, 并确定最佳工艺参数组合: 注射压力3 MPa、注射时间3 s、保压时间60 s。通过实际注射试验与数值模拟翘曲分布云图对比发现, 在薄壁以及壁厚突变区翘曲趋势高度一致, 验证了数值模拟模型的可靠性及最优参数的有效性。研究结果对具有阶梯件壁厚特征如大型机匣的蜡模注射工艺优化和精密铸件成形质量提升具有重要参考价值。

关键词: 熔模铸造; 蜡模; 注射成形; 翘曲变形; 数值模拟

中图分类号: TG249.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 02-0138-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0020

作者简介:

杨其航 (1998-), 男, 博士生, 主要研究方向为熔模铸造全流程模拟仿真。
E-mail: yang-qh24@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:

许庆彦, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: scjxqy@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期:

2025-10-31 收到初稿,
2025-11-10 收到修订稿。

引用格式:

杨其航, 胡晓玉, 马聚怀, 等. 阶梯件蜡模注射成形过程数值模拟及工艺参数优化 [J]. 铸造, 2026, 75(2): 138-143.
YANG Qihang, HU Xiaoyu, MA Juhuai, et al. Numerical simulation of injection forming process and optimization of technological parameters for stepped wax pattern [J]. Foundry, 2026, 75(2): 138-143.

在航空航天领域, 机匣作为发动机、运载火箭等装备的核心部件, 承担着结构支撑、流体传输及载荷传递等关键功能, 且随着技术发展趋向于大型化、复杂化, 其薄壁面积更大、壁厚差异更显著, 对熔模铸造过程的尺寸精度与表面质量提出了更高要求^[1-2]。这类构件通常具有复杂的变壁厚阶梯结构, 既要满足轻量化设计需求, 又需保证足够的强度与刚度, 其制造精度直接关乎装备的运行安全性与可靠性。在熔模铸造中, 蜡模精度是决定最终铸件尺寸精度的核心环节, 其尺寸偏差会直接传递至陶瓷型壳及后续铸件^[3], 而变壁厚结构会导致蜡料熔体在充型、冷却及保压阶段的流动行为与收缩特性存在显著差异, 极易引发翘曲、缩孔、熔接痕等质量缺陷^[4]。其中, 翘曲作为最常见的变形缺陷, 可能导致构件装配精度不足、密封性能失效甚至结构强度下降, 成为制约航空航天高端部件质量的核心瓶颈^[5]。

针对注射蜡模翘曲缺陷的调控, 国内外学者已开展研究。早期研究多聚焦单一工艺参数对翘曲的影响, Bazhenov等发现注射温度与压力通过改变蜡料粘度 (温度从90 °C降至 60 °C时粘度可提升10倍以上) 影响流体充型均匀性^[6]。Wang等进一步指出, 保压压力对蜡模收缩补偿的效果显著, 但此类研究多忽略了多参数间的协同作用^[7]。正交试验因能以较少的试验量揭示多因素交互规律, 被广泛应用于工艺优化中: 阚精诚等通过正交试验优化 $\Phi 20 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 柱状蜡模工艺, 发现注蜡温度对变形缺陷的影响权重 (极差0.109 4) 显著高于模具温度 (0.012 0) 与保压时间 (0.004 3)^[8]; 崔新鹏等针对环形构件蜡模的研究则指出, 保压时间对厚壁区域翘曲的影响显著高于注射速度, 且注射压力与保压时间的耦合作用是调控变壁厚构件收缩差异的关键^[9]。与此同时, 数值模拟技术的成熟为可视化熔体流动、温度场演变及翘曲形成过程提供了有力工具。古俊同等基于Moldflow软件与Cross-WLF粘度模型, 成功预测了蜡模充型时间与收缩规律, 其模拟结果与试验的结果高度吻合 (高度收缩差约0.1 mm), 有效减少了物理试验成本^[10]; 方清远等通过Moldflow软件对单环

多支板蜡模成形进行了数值模拟,发现蜡料熔体汇合处的熔接痕位置与实际注射结果完全匹配,进一步验证了数值模拟在缺陷预测中的可靠性^[11];Tian等则采用ProCAST软件对涡轮叶片平台的等效翘曲变形进行了数值模拟,并结合遗传算法对复杂构件的翘曲进行了预测^[12]。

尽管现有研究已证实工艺参数、模具材料及蜡料性能,如流变、热性能和PVT(压力-体积-温度)特性对蜡模质量的重要影响,但针对变壁厚阶梯结构的系统性研究仍存在不足:一是参数范围的确定多依赖经验或单一因素试验,对各参数影响权重的量化分析不足,难以指导多参数协同优化;二是参数作用机理与微观流动、温度场演变的耦合关系尚未完全明晰,未量化其对翘曲的直接贡献。基于此,本文作者以小型阶梯件为研究对象,模拟大型机匣的变壁厚特征,选取注射时间、注射压力和保压时间为关键参数,基于参数-质量曲线确定合理试验范围,通过正交试验与数值模拟结合的方法,揭示各参数对翘曲的影响规律,量化其贡献率,并筛选最优工艺组合。本研究旨在为

变壁厚复杂构件的蜡模注射工艺优化提供理论依据与技术支持,推动航空航天高端部件成形质量的精准调控。

1 试验方法和模型

1.1 蜡模结构设计

针对航空航天用复杂变壁厚钛合金结构件,设计多壁厚阶梯特征件研究粘度对变壁厚结构蜡模注射成形过程的影响,如图1所示。

1.2 阶梯件蜡模几何造型、网格生成和计算任务设置

将构建好的三维模型导入Moldflow软件,进行网格划分。如图2所示,采用适应性较好的三角形网格,保证网格质量与计算精度,利用其中的网格划分模块对模型划分双层面网格,蜡模的网格边长为2 mm,划分完成后,检查网格质量。设置分析序列为冷却+填充+保压+翘曲,模具初始温度25℃、熔体注射温度63℃、蜡模与模具之间的界面换热系数为2 500 W/(m·K)。

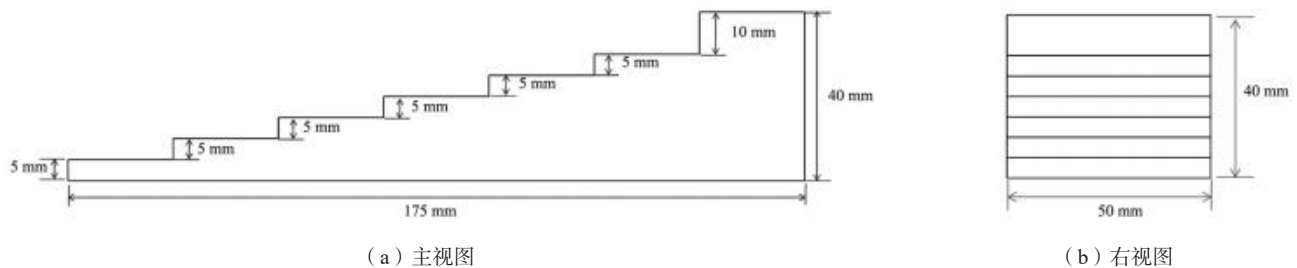


图1 阶梯蜡模示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the stepped wax pattern

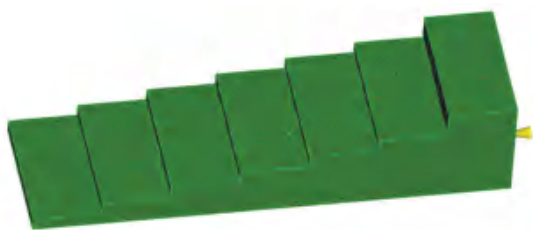


图2 蜡模网格划分图

Fig. 2 Meshing diagram of the wax pattern

1.3 蜡料热物性参数

填充蜡料为CL162型蜡,如图3(a)所示,从比热容曲线看,蜡料比热容随温度呈现三阶段变化特征。初始升温阶段(0~40℃),分子热运动缓慢加剧,比热容呈温和增长趋势;临界相变区间(40~50℃),蜡料发生固-液相变,分子有序排列被打破,需吸收大量热量用于晶格解离,比热容急剧攀升至峰值,此为

蜡料熔融特征温度区;相变完成后(>50℃),液态蜡分子热运动趋于自由,比热容回落并进入平台期,反映体系能量吸收与分子运动达动态平衡。该相变行为直接关联蜡料成形窗口,注射工艺需精准控制此温度区间,确保熔体充分熔融且避免过热降解,为充型均匀性与制件质量奠定基础。

如图3(b)所示,蜡料展现典型非牛顿流体行为,粘度随剪切速率增大呈幂律型下降(剪切变稀效应),且强烈依赖温度。同一温度下,低剪切速率区(0~10⁴ s⁻¹),分子链缠结未充分解缠,粘度随剪切速率急剧降低;高剪切速率区(>10⁴ s⁻¹),分子链解缠达到饱和,粘度趋于稳定。温度升高(60℃→64℃),分子热运动加剧,缠结作用弱化,粘度基准值显著降低,且剪切变稀临界速率前移。在蜡模注射成形中,低剪切速率对应保压阶段,需调控温度维持适度粘度以抑制收缩缺陷;高剪切速率对应充型阶段,可利用

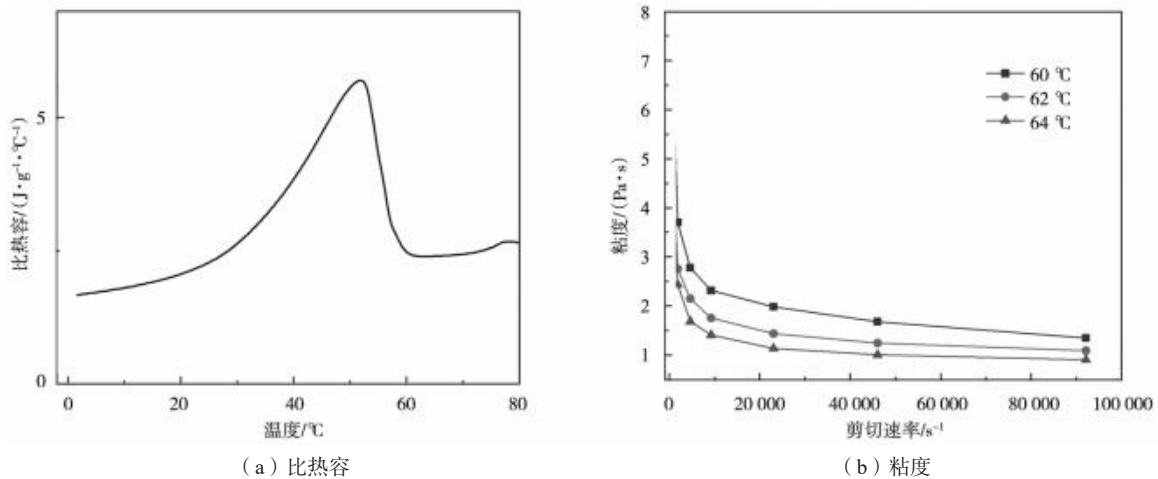


图3 蜡料热物性参数测试结果

Fig. 3 Test results of thermal physical properties of the wax materials

高温与高剪切协同降低粘度，提升复杂型腔填充能力。

1.4 注射试验

压蜡试验在MPI-25t压蜡机上进行，注蜡口直径为8 mm，注蜡参数与模拟参数保持一致，为确保试验结果的准确性，在同一工艺条件下反复进行5次。注射结束后采用蓝光扫描法记录蜡模尺寸变化。

2 结果与讨论

2.1 正交试验工艺参数范围确定

在注射成形工艺优化研究中，正交试验是高效探究多参数交互作用、筛选最优组合的关键手段，而合理确定工艺参数范围则是试验成功的基础。针对注射时间、保压压力和保压时间三类核心参数，通过控制变量法，只改变单一参数，研究其参数-质量（翘曲）响应曲线，确定正交试验的参数范围。

注射时间对翘曲的影响如图4（a）所示，注射时间从1 s递增至5 s时，制件翘曲量呈先上升后趋于稳定的特征。在2~4 s区间内，注射时间延长虽利于熔体填充，却因流动不均与内应力累积，使翘曲和收缩率增大。考虑到蜡模充填完整性与翘曲缺陷的平衡，同时覆盖曲线增长—稳态关键区间，选定注射时间为2、3、4 s，可验证不同填充程度下质量演变机制。

如图4（b）所示，翘曲曲线在1.0 MPa处出现拐点，但此时熔体充型速度较慢，易导致厚壁区域填充不完整；2.5~3 MPa区间，质量无显著变化，继续增大压力，型腔填充程度提升有限，却会增加注射能耗与模具损伤风险。因此，为探索压力对质量的影响，选取注射压力2、2.5、3 MPa，覆盖关键响应区间。

保压时间的作用规律如图4（c）所示，0~20 s内翘曲随补缩充分性快速下降，15~20 s左右进入稳态，说明20 s左右补缩基本完成，40~60 s为完全稳态区间内的选取范围。因此，为平衡生产效率与补缩风险，选

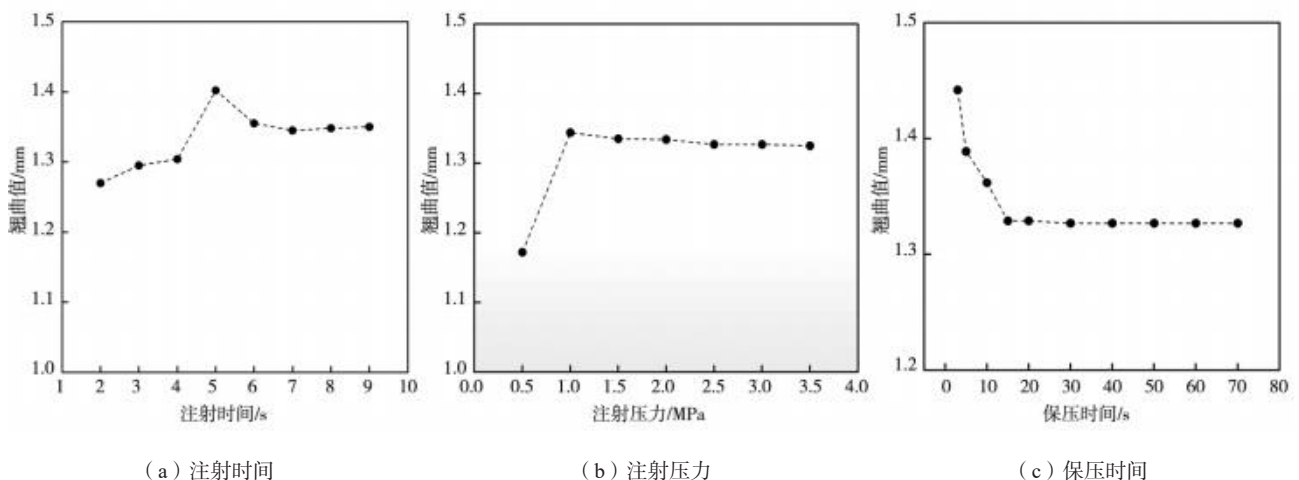


图4 单一参数变量对翘曲值的影响曲线

Fig. 4 Influence curves of individual parameters on warpage

取保压时间40、50、60 s, 该范围处于曲线稳态段, 可验证效率优先下质量稳定性, 同时避免短时间补缩不足问题。

因此, 基于工艺参数对翘曲影响的规律, 选取注射时间2~4 s、注射压力2~3 MPa、保压时间40~60 s作为正交试验参数水平, 探究多参数交互作用, 筛选最优工艺组合。

2.2 正交试验工艺参数分析

9组试验的不同工艺参数下翘曲数值模拟结果最大值如表1所示。从模拟看, 翘曲值随参数水平变化呈现明确趋势, 注射时间为2 s时翘曲均值为1.296 mm, 注射时间3 s时降至1.285 mm, 4 s因熔体温度低削弱补缩能力, 翘曲反弹至1.289 mm; 注射压力2 MPa时, 翘曲均值为1.299 mm, 注射压力为3 MPa时填充完整性与保压补缩效果较好, 翘曲均值降至1.278 mm; 保压时间40 s时因保压不足, 翘曲均值为1.299 mm, 60 s保压充分, 翘曲均值降为1.278 mm。最优参数组合为注射时间3 s, 注射压力3 MPa, 保压时间60 s。

表1 工艺参数变化时蜡模翘曲数值模拟结果
Tab. 1 Warpage numerical simulation results of the orthogonal tests

试验号	注射时间/s	注射压力/MPa	保压时间/s	翘曲值/mm
1	2	2	40	1.306
2	2	2.5	50	1.304
3	2	3	60	1.279
4	3	2	40	1.291
5	3	2.5	50	1.288
6	3	3	60	1.277
7	4	2	40	1.301
8	4	2.5	50	1.289
9	4	3	60	1.278

进一步通过方差分析研究各因素对蜡模翘曲的影响规律, F 值为方差分析中的方差比, 用于检验因素对结果影响的显著性; P 值为显著性水平, $P < 0.05$ 表示因素的影响在统计学上是显著的。方差分析结果如表2所示, 各因素对最大翘曲量的影响顺序为: 注射压力 > 保压时间 > 注射时间。注射压力偏差平方和与贡献率最高, 对翘曲影响最显著, 保压时间与注射时间次之, 且三者 P 值均小于0.05, 因此在统计上均为影响显著, 误差项离散度小, 结果可靠性高。参数通过调控熔体流动、凝固与收缩过程影响翘曲, 低压力+短时间引发流动不均和凝固层厚度差, 高压力+适宜时间优化流动与凝固同步性; 保压时间作为补缩时间窗口, 时长不足或过长会分别因不充分或过度影响翘曲。

表2 参数方差分析
Tab. 2 Variance analysis of the parameters

因素	偏差平方和	自由度	F 值	P 值	贡献率/%
注射时间	0.002 1	2	12.35	<0.05	28.7
注射压力	0.003 2	2	18.35	<0.05	43.5
保压时间	0.002 8	2	16.29	<0.05	37.8
误差	0.000 3	2			4.0

2.3 最优参数模拟与试验验证结果分析

如图5所示, 注射时间以1 s、2 s、3 s三个关键节点, 动态呈现熔体在变壁厚阶梯件型腔中的填充进程。1 s时, 熔体从浇口注入后, 因时间极短, 动能释放集中于近浇口区域, 填充范围呈现明显的局部化特征, 图中色彩分布狭窄且不均匀, 反映出熔体前沿因流速过快, 未能充分铺展便开始与模具壁面接触冷却, 形成初始流动紊乱区。2 s, 熔体获得更充足的流动缓冲期, 填充范围沿阶梯结构逐步拓展, 图中色彩梯度的延伸轨迹, 清晰展现出熔体前沿开始尝试适配阶梯轮廓: 在薄壁段, 熔体因流动阻力小, 推进速度相对更快; 厚壁段则因空间大、需填充体积多, 呈现出滞后填充特征。3 s时, 熔体实现对整个型腔的完整填充, 薄壁段因提前填充形成的凝固层, 对后续熔体流动形成约束导向, 迫使熔体更有序地向厚壁段补充。

截面温度时间图6 (a) 3 s、6 (b) 30 s、6 (c) 50 s的展现了蜡模成形过程中温度场的动态演变, 其规律与极差分析揭示的参数贡献一致。3 s时, 整个截

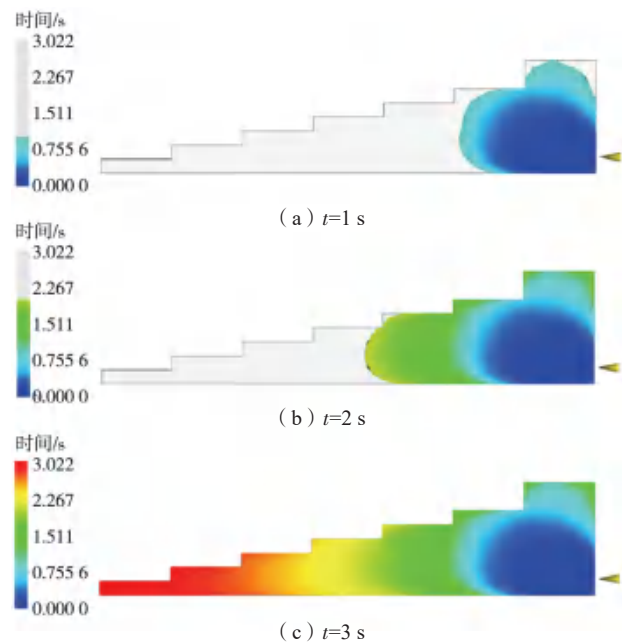


图5 最优参数组合蜡料注射过程数值模拟结果
Fig. 5 Numerical simulation results of the wax injection processes under the optimal parameter combination

面呈现均匀高温，此时熔体刚填充完毕，尚未与模具充分热交换，温度场的一致性为后续保压补缩提供了基础条件。极差分析中保压时间以37.8%的贡献率位居第二，其作用的核心正是在温度场演变阶段调控收缩差异，此阶段若注射压力（43.5%贡献率）未能及时施加，高温熔体的自由收缩会影响后续翘曲。30 s时，截面边缘出现低温区，温度梯度逐渐显现，反映出熔体与模具的热传递作用，边缘先冷却，内部仍保持高温，这种温差正是保压时间发挥作用的关键窗口。保压时间通过持续补压，补偿边缘与内部的收缩差，而注射压力则通过维持压力场，强化补缩效果，二者协同作用对应着较高的贡献率占比。50 s时，低温区范围扩大，厚壁与薄壁区域温差显著，此时保压时间的充分性直接决定收缩不均的程度。

最优参数组合翘曲数值模拟结果如图7所示，从图中能够清晰发现，制件的阶梯结构使得不同壁厚区域的翘曲差异极为显著，薄壁部位因熔体冷却速度快、收缩量大，成为翘曲问题的集中区。在厚壁区域，熔体的流动路径更长、冷却过程更复杂，熔体内部易积聚大量内应力，且在凝固收缩阶段，厚壁与薄壁区域的收缩不同步，进一步放大了内应力差异，最终导致翘曲缺陷的产生。在实际生产中，需充分结合正交试验、数值模拟等手段，深入分析不同壁厚区域的翘曲成因，针对性地调整工艺参数，平衡各区域的收缩行为，从结构与工艺协同的角度，最大程度降低翘曲缺陷对蜡模质量的影响。

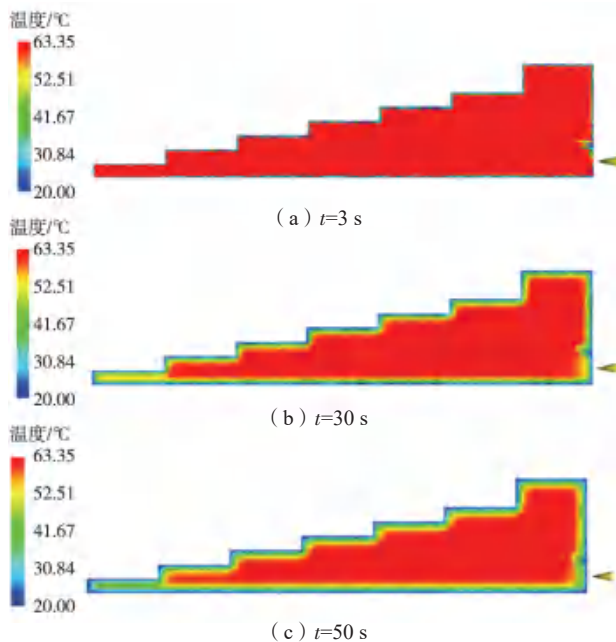


图6 最优参数组合蜡料凝固过程不同时刻的温度场数值模拟结果
Fig. 6 Numerical simulation results of the temperature fields at different moments during the solidification process of the wax material under the optimal parameter combination

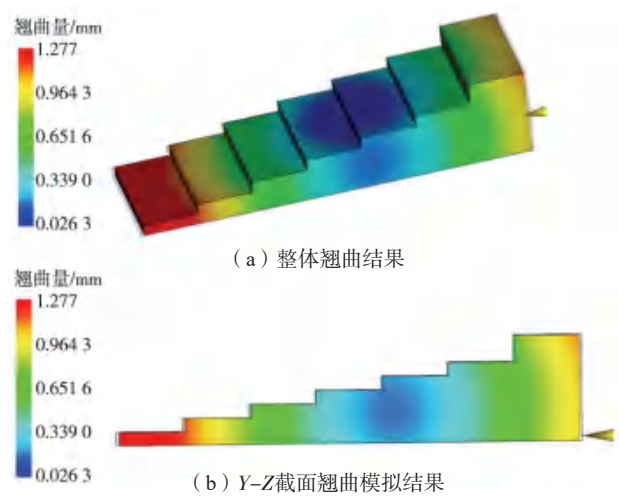


图7 最优参数组合翘曲数值模拟结果
Fig. 7 Warpage numerical simulation results under the optimal parameter combination

2.4 试验验证

按照最优模拟参数进行实际注射成形，并对阶梯件进行蓝光扫描。图8(a)为蜡模实物照片（采用最优工艺参数），图8(b)为其位移蓝光扫描结果。位移蓝光扫描结果与蜡模翘曲数值模拟结果趋势相同，位移由薄壁向厚壁先减小后逐渐增大，证明数值模拟能够有效捕捉实际注射过程中，因变壁厚结构导致的翘曲规律。然而，试验结果中局部区域的翘曲程度差异，也揭示了模拟过程存在的局限性，实际生产中材料均匀性的细微波动、注射设备的压力与温度波动等因素，难以在数值模拟中完全实现，这些因素会导致试验结果与模拟结果出现局部偏差，但整体翘曲趋势高度吻合。

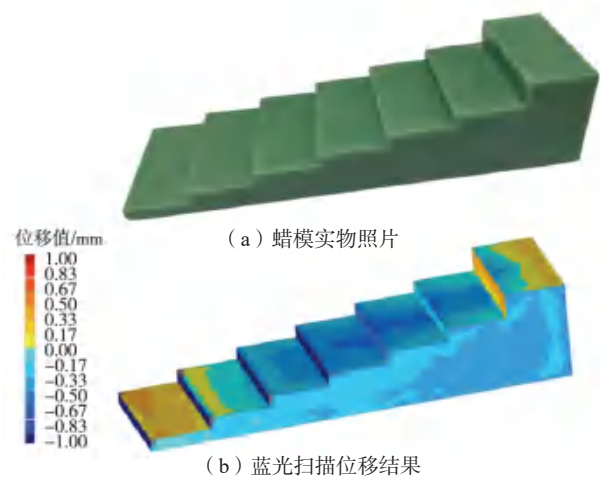


图8 试验结果
Fig. 8 Test result

3 结论

(1) 通过正交试验与方差分析，各工艺参数对最大翘曲量的影响顺序为：注射压力>保压时间>注射时

间。最优工艺参数组合为：注射时间3 s、注射压力3 MPa、保压时间60 s。

(2) 数值模拟结果表明，注射压力是克服流动阻力、确保充分填充和补缩的关键，保压时间提供了补偿收缩所需的时间窗口，而注射时间则通过影响填充均匀性，为后续复杂结构蜡模注射成形奠定参数设计基础。翘曲变形源于厚薄壁区域冷却速率不同导致的

收缩不均，另外蜡模从模具中取出后，冷却过程中各部位收缩差异产生的内部残余应力释放，进一步加剧翘曲变形。

(3) 采用最优工艺参数组合进行模拟和实体试验验证，结果表明，模拟与试验的翘曲分布云图在趋势上高度一致，薄壁区域为翘曲高风险区，证明了基于数值模拟控制蜡模质量的可靠性。

参考文献：

- [1] 宋浩, 韩冬, 赵军, 等. 钛合金熔模精密铸造技术的发展现状 [J]. 铸造, 2022, 69 (12): 1304-1311.
- [2] 冉兴, 吕志刚, 曹建, 等. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 139-146.
- [3] 许庆彦. 熔模铸造过程数值模拟研究进展 [J]. 铸造, 2022, 71 (7): 803-813.
- [4] KROMA A, BRZEK P. Influence of mould material on the mechanical properties of wax models [J]. Archives of Foundry Engineering, 2021, 21 (3): 48-52.
- [5] WANG Donghong, SUN Jinyu, DONG Anping, et al. Prediction of core deflection in wax injection for investment casting by using SVM and BPNN [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101 (5-8): 2165-2173.
- [6] VIACHESLAV E B, ANDREY V S, ELENA P K, et al. The influence of injection temperature and pressure on pattern wax fluidity [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2023, 7 (4): 141-156.
- [7] WANG Donghong, HE Bo, LI Fei, et al. Numerical simulation of the wax injection process for investment casting [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28 (2): 220-224.
- [8] 阚精诚, 刘继广, 杨友文, 等. 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.
- [9] 崔新鹏, 李峰, 那玥, 等. 熔模铸造注蜡过程的数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (12): 1323-1326.
- [10] 古俊同, 汪东红, 肖旅, 等. 注蜡过程数值模拟蜡料性能的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (4): 394-396.
- [11] 方清远, 焦自翔, 纪艳卿, 等. 单环多支板蜡模注蜡成形工艺优化及表面质量控制 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (4): 635-640.
- [12] TIAN Jiawei, BU Kun, SONG Jinhui, et al. Optimization of investment casting process parameters to reduce warpage of turbine blade platform in DD6 alloy [J]. China Foundry, 2017, 14 (6): 469-477.

Numerical Simulation of Injection Forming Process and Optimization of Technological Parameters for Stepped Wax Pattern

YANG Qi-hang¹, HU Xiao-yu¹, MA Ju-huai¹, QIE Xi-wang², ZHANG Mei-juan², NAN Hai², XU Qing-yan¹, LI Yan-xiang¹
(1. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Beijing 100084, China; 2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract:

The large-sized casing, as a core load-bearing component in the aerospace field, is prone to generate warpage defects during the wax pattern injection forming process due to its variable wall thickness structures, severely affecting product quality and safety. This project uses a small stepped component as a study object to simulate the geometrical structure of a casing with variable wall thicknesses. Taking injection pressure, injection time and pressure holding time as the key parameters, applying an $L_9(3^3)$ orthogonal experimental design, and combining with numerical simulation technology, the influence rules of these parameters on the warpage amounts in the variable wall thickness regions have been investigated. Through range analysis and variance analysis, the primary and secondary orders of influences of the process parameters on the warpages were determined as: injection pressure > pressure holding time > injection time, and the optimal combination of process parameters was confirmed as: injection pressure of 3 MPa, injection time of 3 s and pressure holding time of 60 s. Through comparing actual wax pattern injection experiments with numerical simulation warpage distribution contour maps, it was found that a high consistent warpage trends in the thin-wall areas and the regions with abrupt thickness changes were obtained, verifying the reliability of the numerical simulation model and the effectiveness of the optimal parameters. The results provide valuable insights for the optimization of wax pattern injection processes and the improvement of forming quality in precision castings with the wall thickness features of stepped component such as the large-sized casings.

Key words:

investment casting; wax pattern; injection forming; warpage deformation; numerical simulation