

熔模铸造全流程变形模拟预测 与误差遗传机制

陈宇豪¹, 尹昊¹, 李伟东^{1, 2}, 张祎祺¹, 廖敦明¹, 刘阔¹

(1. 华中科技大学材料科学与工程学院 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 洛阳双瑞精铸钛业有限公司, 河南洛阳 471000)

摘要: 熔模铸造过程中铸件的尺寸精度控制难题一直制约着产品质量的提升, 针对这一问题, 构建了涵盖蜡模充型、型壳烧结及合金凝固全流程的数值模拟模型, 并通过三坐标扫描与工业CT检测技术分别获取蜡模、型壳型腔及最终铸件的几何数据, 利用三维表面配准方法对模拟结果与实测数据进行误差分析。研究结果表明, 蜡模充型、型壳烧结及合金凝固各阶段的表面尺寸平均误差均低于0.8 mm, 各关键工艺阶段的局部特征尺寸相对误差控制在1%以内, 验证了单流程求解模型的可靠性。进一步分析揭示了误差在工艺流程中的非单调遗传机制: 型壳烧结阶段因陶瓷材料烧结收缩; 而在合金凝固阶段, 已收缩的型腔内部发生的凝固收缩使最终铸件偏差回落, 表现出多工序间变形的动态补偿效应。研究结果证实了所提全流程数值模拟方法在预测熔模铸造变形方面的可行性, 为铸件尺寸精度控制提供了理论依据。

关键词: 数值模拟; 熔模铸造; 全流程模拟; 尺寸精度控制; 变形预测; 误差遗传机制; 型壳烧结; 合金凝固

中图分类号: TP391.99; TG249.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0653-10

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0084

Full Process Deformation Simulation Prediction and Error Genetic Mechanism in Investment Casting

CHEN Yu-hao¹, YIN Hao¹, LI Wei-dong^{1, 2}, ZHANG Yi-qi¹, LIAO Dun-ming¹, LIU Kuo¹

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Luoyang Shuangrui Precision Casting Titanium Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: The problem of controlling the dimensional accuracies of castings during the investment casting process has always hindered the improvement of product quality. To address this issue, a numerical simulation model covering the full process from wax pattern mold filling, shell sintering to alloy solidification stages has been constructed; and the actual geometric data of the wax patterns, the shell cavities and the final castings have been obtained, respectively, through three-coordinate scanning and industrial CT detection technologies; the errors between the simulation results and the measured data have been analyzed using the three-dimensional surface registration method. The research results show that the average surface size errors in each stage of the wax pattern mold filling, the shell sintering and the alloy solidification are all less than 0.8 mm, and the relative errors of local feature sizes in each key process stage are controlled within 1%, verifying the reliability of the single-process solution model. Further analysis reveals the non-monotonic genetic mechanism of errors in the process flow: during the shell sintering stage, the shrinkage of ceramic materials occurs; while in the alloy solidification stage, the solidification shrinkage inside the already contracted cavity causes the final casting deviation to decrease, demonstrating the dynamic compensation effect of the deformation among multiple processes. The research results confirm the feasibility of the proposed full-process numerical simulation method in predicting the deformation of investment casting, providing a theoretical basis for the control of casting dimensional accuracy.

Key words: numerical simulation; investment casting; full-process simulation; dimensional accuracy control; deformation prediction; error genetic mechanism; shell sintering; alloy solidification

基金项目: 新材料重大专项项目资助 (2024ZD0601100)。

收稿日期: 2026-04-15 收到初稿, 2026-04-21 收到修订稿。

作者简介: 陈宇豪 (1996-), 男, 博士生, 主要研究方向为铸造数值模拟。E-mail: d201880337@hust.edu.cn

通信作者: 廖敦明, 男, 教授。E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

引用格式: 陈宇豪, 尹昊, 李伟东, 等. 熔模铸造全流程变形模拟预测与误差遗传机制 [J]. 铸造, 2026, 75 (6): 653-662.

CHEN Yuhao, YIN Hao, LI Weidong, et al. Full process deformation simulation prediction and error genetic mechanism in investment casting [J]. Foundry, 2026, 75 (6): 653-662.

熔模精密铸造凭借其在复杂结构零件制造方面的独特优势,已成为航空航天等领域高端装备核心构件近净成形的关键工艺。然而,该工艺流程长且工序繁多,蜡模制备、型壳烧结及合金凝固等环节产生的累积性偏差具有显著的遗传效应,致使最终铸件尺寸精度难以精准控制^[1]。数值模拟技术通过对铸造过程中多物理场行为的定量描述与预测,为深入理解变形机理及优化工艺参数提供了重要途径。当前,该领域研究已由传统单流程分析向多场耦合方向发展,并实现了从单一阶段模拟向涵盖蜡模成型、型壳烧结及合金凝固的全流程集成模拟演进,为提升铸件成形质量提供了有力支撑^[2]。

蜡模制备作为熔模铸造的起始工序,其尺寸精度直接决定了后续组模得到的蜡件尺寸,研究表明蜡模阶段引起的尺寸偏差可占最终铸件尺寸偏差的40%以上,凸显了尺寸传递链源头控制的重要性^[3-5]。蜡模充型过程涉及非牛顿流体流动与瞬态传热,Cross-WLF模型能有效描述蜡料的假塑性流变特性^[6-9],Bonilla^[10]等通过传热计算分析了蜡模收缩,Barati^[11]等则揭示了注射温度和保压时间等工艺参数对蜡模尺寸的影响规律。随后的型壳烧结环节是保证型腔尺寸精度的关键,数值模拟已成为揭示其变形机制的重要手段^[12],闫学伟^[13]通过ABAQUS二次开发分析了焙烧过程中的热-力耦合作用,Olevsky^[14]建立了烧结应力与材料粘度的本构关系,实现了对烧结尺寸变化的定量描述,宋久鹏^[15]则引入非均匀密度参数成功预测了烧结体的非均匀收缩。而在最终决定铸件尺寸精度的凝固变形阶段,多物理场耦合模拟应用广泛,Si^[16]等结合FDM与FEM算法实现了高效计算,徐艳^[17]等通过双向耦合算法提高了温度场与应力场的整体计算精度,Boender^[18]等系统分析了铸造参数对温度、应力及应变分布的影响,孙冰^[19]等则验证了数值模型在预测有效应力与位移量方面的可靠性。综上所述,开展全流程数值模拟与尺寸预测,对于优化工艺设计、减少试错成本及实现精密铸造数字化具有重要意义。

本研究系统性梳理了蜡模充型、型壳烧结及合金凝固三个核心环节的数值模拟现状。现有研究表明,各单一工序的数值模拟方法已趋于成熟,能够实现对工艺过程的较为精准模拟。然而,当前研究多聚焦于独立工序的局部优化,缺乏整体视角,各工艺环节间的数据传递缺失,尚未形成全流程的完备模拟体系,导致难以系统性追溯铸件变形行为的演化规律。因此,深入开展全流程数值模拟研究,构建“蜡模-型壳-合金”全流程模拟平台,打破工艺链数据壁垒,揭示尺寸精度沿工艺链的遗传机制,并建立相应的反变形

补偿模型,对于提升铸件成形质量与尺寸精度具有重要的理论价值与工程应用意义。

1 熔模铸造全流程数值模拟模型

1.1 蜡模注射模拟

本研究借助MoldFlow软件模拟蜡料充型保压过程,选用其内置的Cross-WLF模型表征蜡料的粘度行为。为获取准确的模型参数,基于蜡料流变性能测量试验数据对Cross-WLF模型进行了参数拟合^[20]。

Cross-WLF模型的关系式如下:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (1)$$

式中: η 为熔体粘度, η_0 为零剪切粘度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, τ^* 表示材料向剪切变稀行为转变的临界应力, n 表示高剪切速率下的幂律指数,参数 τ^* 、 n 可由试验数据拟合确定。其中零剪切粘度 η_0 与温度与压力相关。

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[- \frac{A_1 (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \quad (2)$$

式中: T 为温度; T^* 为玻璃化转变温度,由曲线拟合确定;参数 A_2 定义为 $A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p$, p 为压力,玻璃化转变温度 T^* 可表示为 $T^* = D_2 p$,其中, A_1 、 \tilde{A}_2 、 D_1 、 D_2 、 D_3 均为材料拟合系数。

蜡料属于热流变材料,其模量具有时间-温度依赖性,总应力分为偏应力张量和球应力张量,其应力-应变关系采用积分型本构方程描述:

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t G(\xi - \xi') \frac{\partial e_{ij}(t)}{\partial t} dt + \delta_{ij} \int_{-\infty}^t K(\xi - \xi') \frac{\partial (\varepsilon_m(t) - \varepsilon_{th})}{\partial t} dt \quad (3)$$

式中: δ_{ij} 为克罗内符号,当 $i=j$ 时取值1, $i \neq j$ 时取值为0,用于在球应力项中将体积分量与偏分量分离; e_{ij} 偏应变张量,表示材料变形中不改变体积的畸变部分; $\frac{\partial e_{ij}}{\partial t}$ 为偏应变率,即偏应变张量对时间的偏导数; ε_m 为体积应变,表示材料体积的变化率; dt 为积分时间微元; ξ 为当前响应时间,即计算所对应时刻; ξ' 为历史激励时刻,是积分变量,遍历 $[0, t]$ 区间曾发生应变事件的时刻。

应力张量表达式:

$$\delta_{ij} = \int_{-\infty}^t G(\xi - \xi') \frac{\partial e_{ij}(t)}{\partial t} dt \quad (4)$$

球应力张量表达式:

$$\sigma_m = \int_{-\infty}^t K(\xi - \xi') \frac{\partial (\varepsilon_m(t) - \varepsilon_{th})}{\partial t} dt \quad (5)$$

式中: $G(\xi - \xi')$ 为材料的剪切松弛模量; $K(\xi - \xi')$ 为材料的体积松弛模量; ε_{th} 为热膨胀或者收缩引起的应变,

$\varepsilon_m = \alpha \Delta T$, α 为材料的线热膨胀系数, ΔT 为温度变化量。

1.2 型壳烧结模拟

采用自主开发的数值模拟程序模拟型壳烧结过程, 该过程可以看成是一个非稳态的导热过程, 相较于传统温度场多了一个外界热源导致的升温阶段, 其温度场在笛卡尔坐标系下的数学模型为^[21]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q' \quad (6)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; C_p 为材料的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

λ 为热导率, $\text{W}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$; $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ 为蓄热项;

$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$ 为热扩散项; Q' 为潜热项, 主要受金属材料当前温度的影响。

当前广泛应用的SOVS烧结模型^[22], 是一种基于多孔粘塑性流变理论构建的连续介质力学模型, 该模型采用现象学描述而非解析物理机制的方式来捕捉烧结行为, 显著减少了所需的模型参数数量。

该模型定义了剪切粘度 η_s 与体积粘度 η_b :

$$\eta_s = (1 - \theta)^2 \eta \quad (7)$$

$$\eta_b = \frac{4}{3} \frac{(1 - \theta)^3}{\theta} \eta \quad (8)$$

式中: η 为构成致密固体的表观粘度, θ 为孔隙率(孔隙体积与总体积的比值)。

固体表观粘度 η 表征材料抵抗粘性流动的能力, 随着烧结温度升高而降低。其温度依赖性可由Arrhenius粘度模型进行描述:

$$\eta = \eta_0 \exp \left(\frac{Q_v}{RT} \right) \quad (9)$$

式中: Q_v 是表面激活能, R 是气体常数, T 是绝对温度, η_0 是材料常数。

烧结过程中的主要驱动力 σ_s 源于材料空隙的表面张力, 其表达式如下:

$$\sigma_s = \frac{6\gamma_s}{G} (1 - \theta)^2 \quad (10)$$

式中: γ_s 是表面张力, G 是平均晶粒尺寸, 反映了烧结过程中晶界扩散的影响。

1.3 熔模铸造数值模拟

采用自主开发的数值模拟程序模拟熔模铸造过程, 对于热弹塑性模型而言, 总的应变增量包括弹性应变增量、塑性应变增量和热应变增量, 即:

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p + d\varepsilon_T \quad (11)$$

弹性应变增量可表示为:

$$d\varepsilon_e = \frac{1}{2G} d\sigma' + \frac{1-2\nu}{E} d\sigma_m \delta_{ij} \quad (12)$$

式中: G 为切变模量; $d\sigma'$ 为增量应力偏张量; ν 为泊松

比; E 为弹性模量; $d\sigma_m$ 为增量静水压力; δ_{ij} 为克氏符号。

塑性应变增量 $d\varepsilon_p$ 可表示为:

$$d\varepsilon_p = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\varepsilon}_p \sigma'}{2\bar{\sigma}} \quad (13)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_p$ 为等效塑性应变增量; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; σ' 为应力偏张量。

热应变增量 $d\varepsilon_T$ 可表示为:

$$d\varepsilon_T = \alpha dT + (T - T_0) \frac{\partial \alpha}{\partial T} + \frac{\partial D_e^{-1}}{\partial T} \sigma \quad (14)$$

式中: α 为热膨胀系数; T 为瞬时温度; T_0 为初始温度; D_e 为弹性模量矩阵。

应力应变的增量关系可以表示为:

$$d\sigma = D_e (d\varepsilon_e + d\varepsilon_p + d\varepsilon_T) \quad (15)$$

2 熔模铸造全流程数值模拟

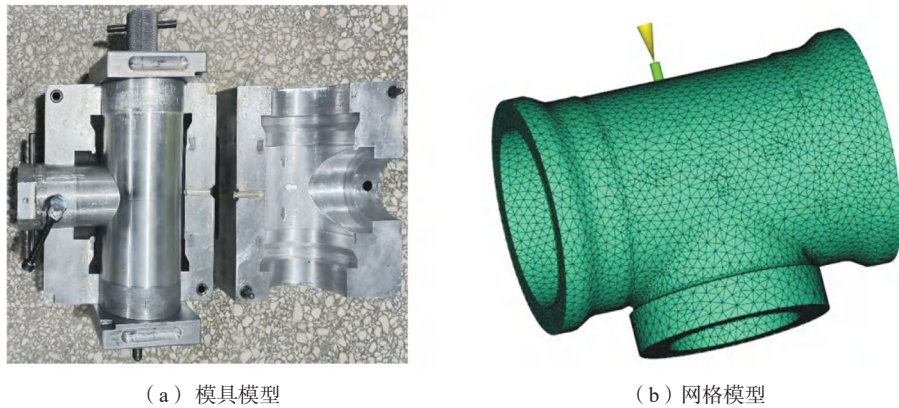
为分析熔模铸造全流程尺寸误差的来源和传递方式, 追踪蜡模制备、型壳烧结和铸件凝固三个阶段, 建立铸件误差传递模型并开展全流程数值模拟。通过耦合多个工艺阶段, 量化蜡模收缩、型壳约束和金属凝固产生的非线性变形, 用于解释尺寸误差沿“蜡模-型壳-铸件”工艺链的遗传规律, 并为后续反变形设计提供输入。本研究目标为钛合金熔模铸造, 合金材料为TA15。

2.1 蜡模注射模拟

蜡模充型模拟用于分析蜡液流动和模具填充过程。根据蜡料物理特性选用非牛顿流体模型, 建立三通管三维充型数值模拟模型。研究对象最长管段为166 mm, 模具设计和模拟网格如图1所示, 其中管最长处为166 mm, 图1(a)为蜡模模具, 图1(b)为模拟实体网格模型, 其中黄色箭头为蜡料充型入口。

注射材料选用K512蜡料, 工艺参数: 射蜡温度55 $^\circ\text{C}$, 射蜡时间6 s, 射蜡压力22 MPa, 同时在其他参数不变的前提下, 改变射蜡时间, 分别采用2~6 s的射蜡时间进行实际射蜡试验, 三通管充型流态对应结果如图2所示。

流态对比如图2所示, 流态模拟结果表明, 蜡料充型顺序与试验观测结果具有良好的一致性, 验证了数值模型的可靠性。模拟结果准确复现了型腔边界处的流动演变, 并有效表征了因浇注系统设计导致的充型偏移现象, 试验验证证实, 该模型在复杂边界条件下具有较高的流动行为预测精度。整体而言, 试验测量数据略高于模拟预测值, 造成该系统性偏差的原因可能在于实际充型在该点中断后蜡料仍然发生流动, 而模拟未考虑中断后的延滞流动效应。结合蜡模表面观



(a) 模具模型

(b) 网格模型

图1 蜡模模具与模拟网格

Fig. 1 The wax pattern mold and the simulation grid

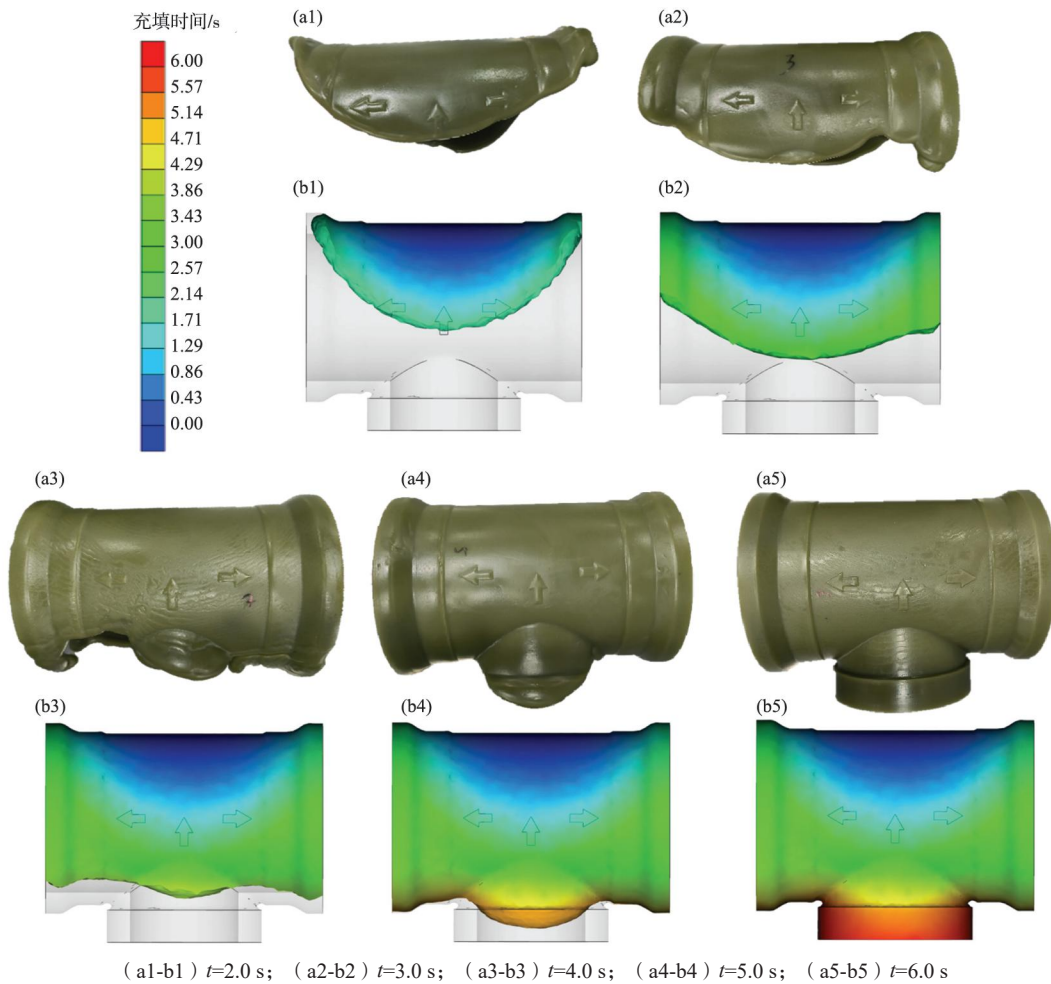
(a1-b1) $t=2.0$ s; (a2-b2) $t=3.0$ s; (a3-b3) $t=4.0$ s; (a4-b4) $t=5.0$ s; (a5-b5) $t=6.0$ s

图2 充型过程模拟结果

Fig. 2 Simulation results of the mold filling process

测到的明显褶皱缺陷分析, 界面前沿误差主要归因于流动前沿熔体温度较低及充型中断, 导致熔体流动性下降并产生褶皱缺陷。

将实际铸件实物进行三坐标扫描, 得到的扫描模型如图3(a)所示, 模拟得到的应力变形结果如图3(c)所示, 对比可以得到蜡模表面误差图。

为了直观展示模型的在X、Y和Z三个方向的整体变

形量, 本文统一采用绝对变形量展示模型的宏观变形情况

$$E = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (16)$$

式中: u 、 v 和 w 分别为模型在三个方向的变形量。

对于该三通管蜡模, 其表面平均模拟误差值为0.518 mm, 使用该模拟表征蜡料充填过程是可行的。

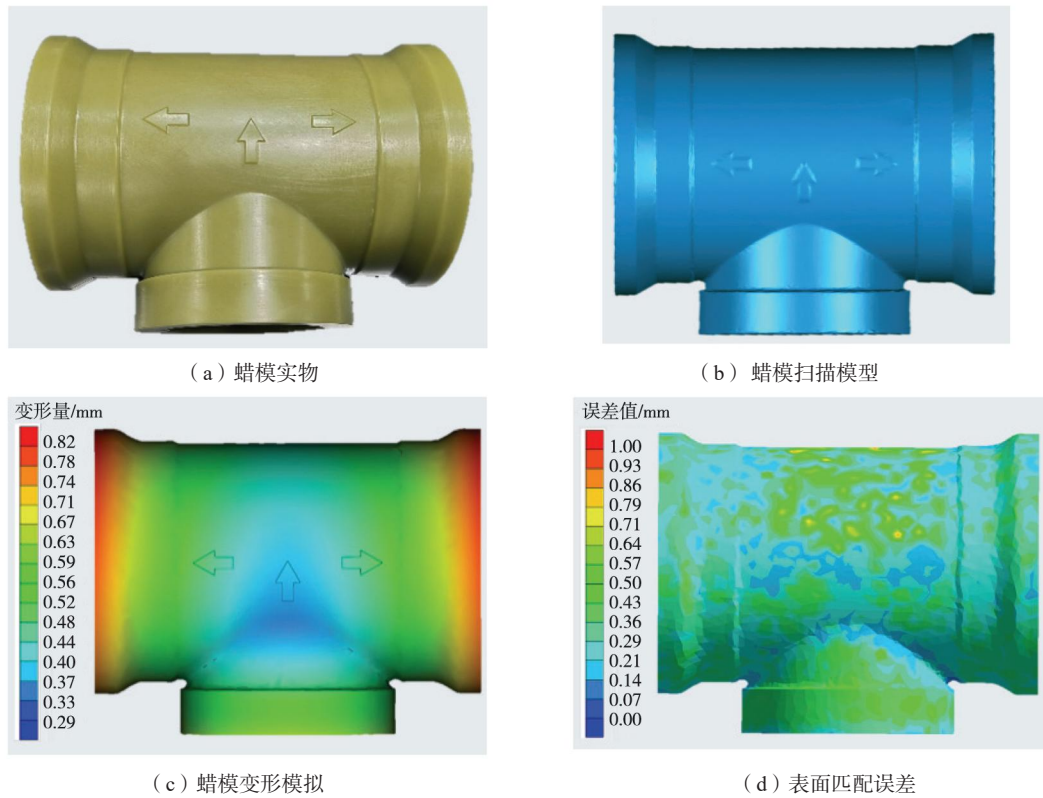


图3 模拟及扫描模型误差分布图

Fig. 3 Error distribution maps of the simulation and scanning models

2.2 型壳烧结数值模拟

基于蜡模充型模拟结果,开展熔模型壳烧结过程的数值模拟研究。首先需构建型壳的几何模型,该模型本质为包裹蜡模组模的多层壳体结构,基于型壳与蜡模的几何关联性,可通过提取图3(d)所示蜡模模型的外表面,生成具有实际工艺尺寸的型壳实体模型,该模型准确表征了陶瓷铸型的空间构型,为后续烧结过程数值模拟提供几何建模基础,实际模型如图4所示。

建立熔模铸造型壳烧结数值模型,对烧结过程的温度场演化规律进行模拟分析。烧结工序的升温曲线直接决定陶瓷层的致密化程度与结构完整性。采用阶梯式升温曲线,通过分段控制升温速率,在确保残余粘结剂充分脱除的同时,有效抑制因温度梯度引起的热应力开裂,从而实现型壳的均匀烧结与性能强化。

采用设定烧结曲线模拟该三通管型壳烧结成型过程,其温度场模拟结果如图5(a)所示。为了进一步展现烧结过程的温度场变化,提取图5(a)中两个参考点A与B的温度曲线如图5(b)所示,其中A点为外侧

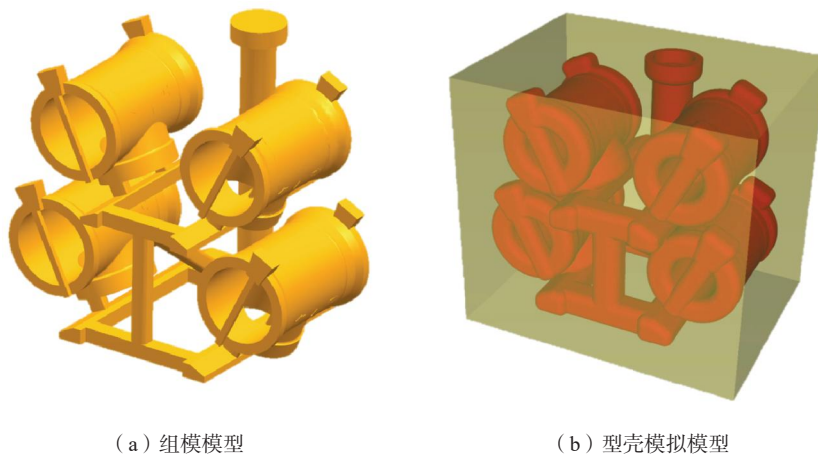


图4 几何模型

Fig. 4 Geometric models

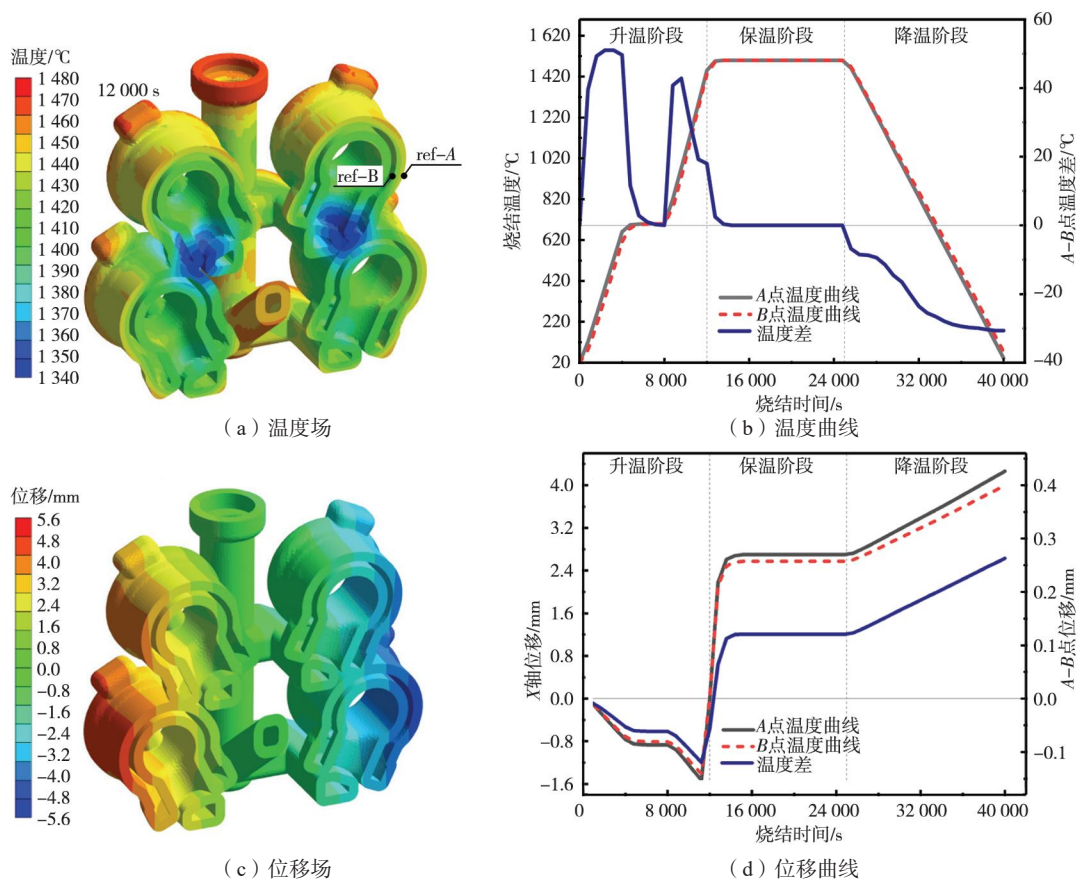


图5 型壳烧结过程模拟结果

Fig. 5 Simulation results of the shell sintering process

表面结点, B点为内侧表面结点。从温度曲线部分可以看出, 两点的烧结温度与预设烧结曲线整体相符, 在升温阶段A点升温速率较快, 降温阶段处外表面的A点更早到达室温, 而保温阶段两点温度差迅速向 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 靠近, 两者的温度差值与升降温过程是一致的。外表面A点与内表面B点出现了明显的温度差, 这是导致该件出现变形的一个重要原因。在温度场基础上进行热应力模拟, 其 x 向位移如图5(c)所示, 同样提取两个参考点的变形量与差值如图5(d)所示。升温阶段前期, 两点向 x 轴负向发生明显膨胀, 之后在 $12\ 000\ \text{s}$ 出现了反转, 因材料中粘结剂发生相变, 整体结构发生明显变化, 整体呈现收缩趋势。这个收缩值在刚到保温阶段达到了最高值。之后的位移主要由一部分高温蠕变与冷却收缩相关。整体而言该模拟结果较好展现了烧结过程的温度场与材料变形情况。

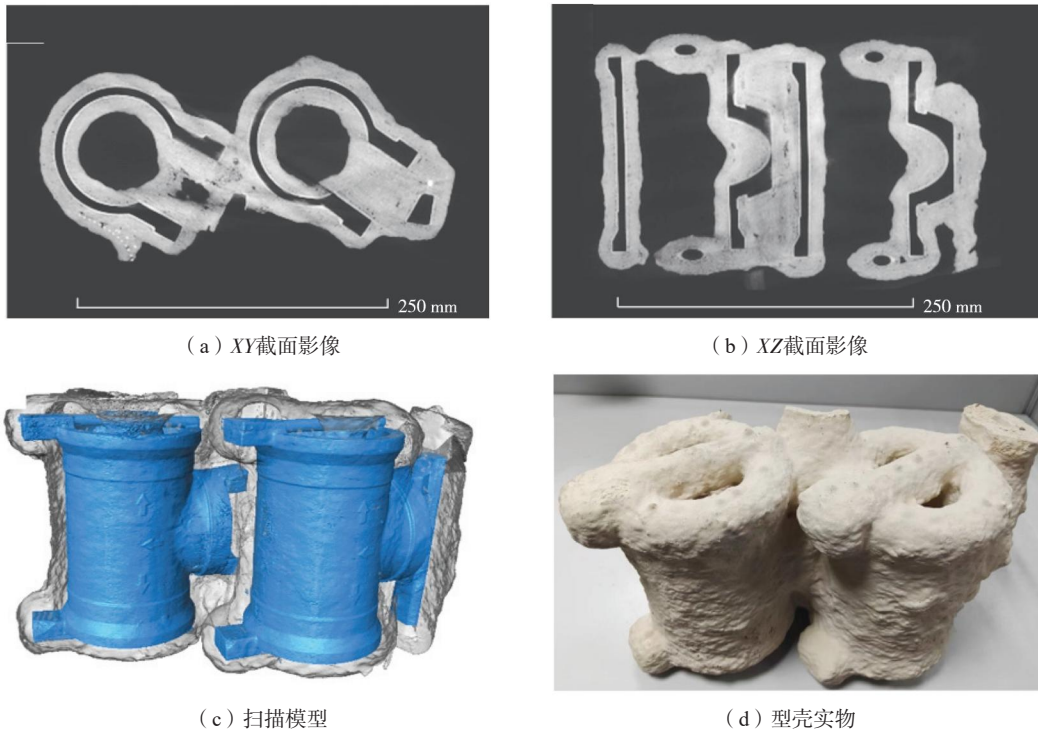
熔模铸造型壳内腔被实体结构完全包覆, 其不可触及性导致传统接触式测量难以获取准确的几何尺寸, 因此本研究采用工业计算机断层扫描(CT)技术实现内腔形貌的无损检测与精确重建。具体而言, 利用Multiscale Voxel工业CT设备对型壳进行全尺度扫描, 设置空间分辨率为 $111\ \mu\text{m}$ 以捕捉细微结构特征, 随后对采集的点云数据进行三维重建与点云配准, 提

取内腔边界轮廓并生成高精度的数字化模型。该方法不仅克服了封闭腔体测量可达性的物理限制, 而且为后续与理论模型进行几何误差对比分析提供了可靠的数据基础。

图5(c)所示的整体结构变形云图仅反映宏观位移场, 而实际铸造过程中熔模铸件的几何精度直接取决于型腔内腔的尺寸稳定性。因此, 本研究基于前期蜡模初始模型与型壳烧结模拟结果, 采用数值插值方法提取型腔边界的位移信息, 重构获得铸件空腔的变形预测结果如图7(a)所示。通过将该模拟结果与图6(c)所示的工业CT实测扫描数据进行三维表面配准与误差分析, 计算得到表面平均模拟误差为 $0.705\ \text{mm}$, 使用该模拟表征型壳烧结过程是可行的。

2.3 铸件凝固数值模拟

在前期型壳烧结变形模拟的基础上, 为进一步开展熔模铸造铸件凝固过程的数值模拟研究, 需首先建立准确几何模型。为此, 采用与图7(a)相同的型腔内腔变形数据提取方法, 图8(a)为提取得到的型壳内腔变形模拟结果, 从烧结变形结果中重构获得型壳内腔几何模型。以此作为凝固数值模拟的初始边界条件, 从而构建铸件凝固数值模拟模型, 如图8(b)所示。



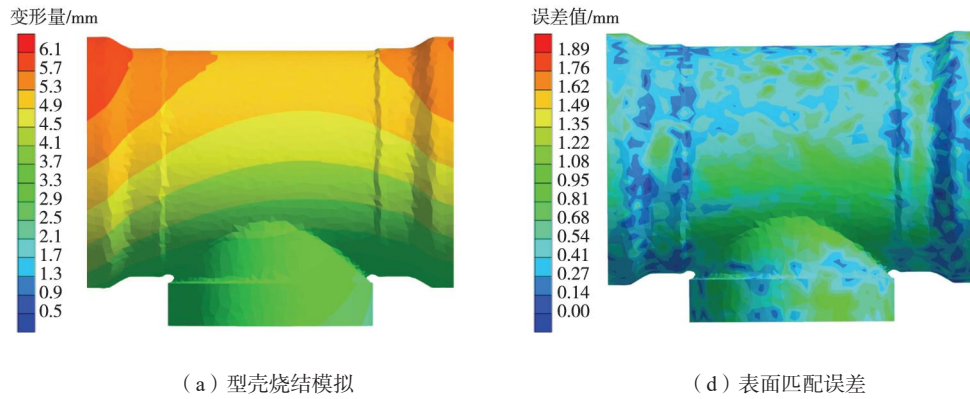
(a) XY截面影像

(b) XZ截面影像

(c) 扫描模型

(d) 型壳实物

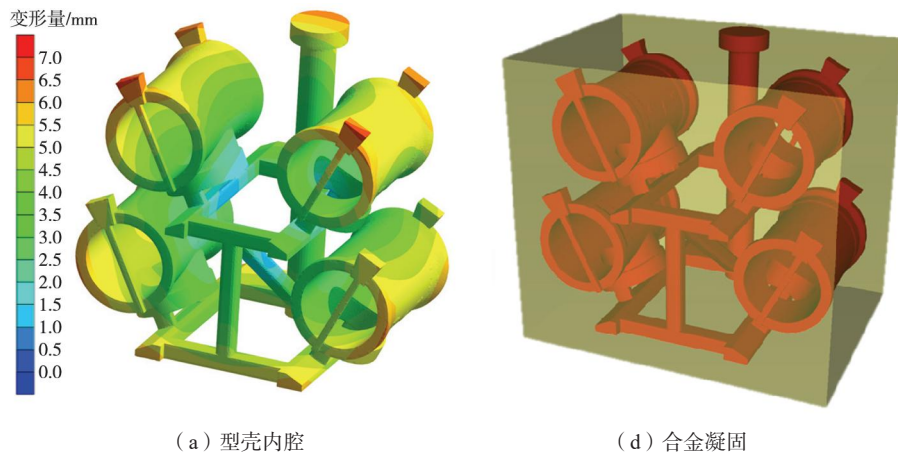
图6 实物模型
Fig. 6 Physical models



(a) 型壳烧结模拟

(d) 表面匹配误差

图7 型壳烧结模拟结果与误差对比图
Fig. 7 Simulation results of the shell sintering and error comparison chart



(a) 型壳内腔

(d) 合金凝固

图8 铸件凝固过程模拟模型
Fig. 8 Simulation models of the casting solidification process

在前文基础上进行铸件凝固过程数值模拟, 浇注温度设置为1 700 ℃, 该模拟条件下铸件整体温度场分布如图9 (a) 所示。鉴于该模型为一模多腔结构, 需对模拟结果进行处理, 剔除浇注系统及相邻铸件干扰, 单独提取目标铸件的位移场分布如图9 (b) 所示。为验证模拟可靠性, 采用三坐标测量仪对铸件实

物进行扫描并基于点云数据完成三维数模重建, 其结果如图9 (c) 所示。通过将模拟预测变形与实测数据进行配准对比, 获得表面误差分布云图如图9 (d) 所示。定量评估表明, 表面平均模拟误差为0.760 mm, 证实了该数值方法在表征铸件凝固变形预测方面的可行性。

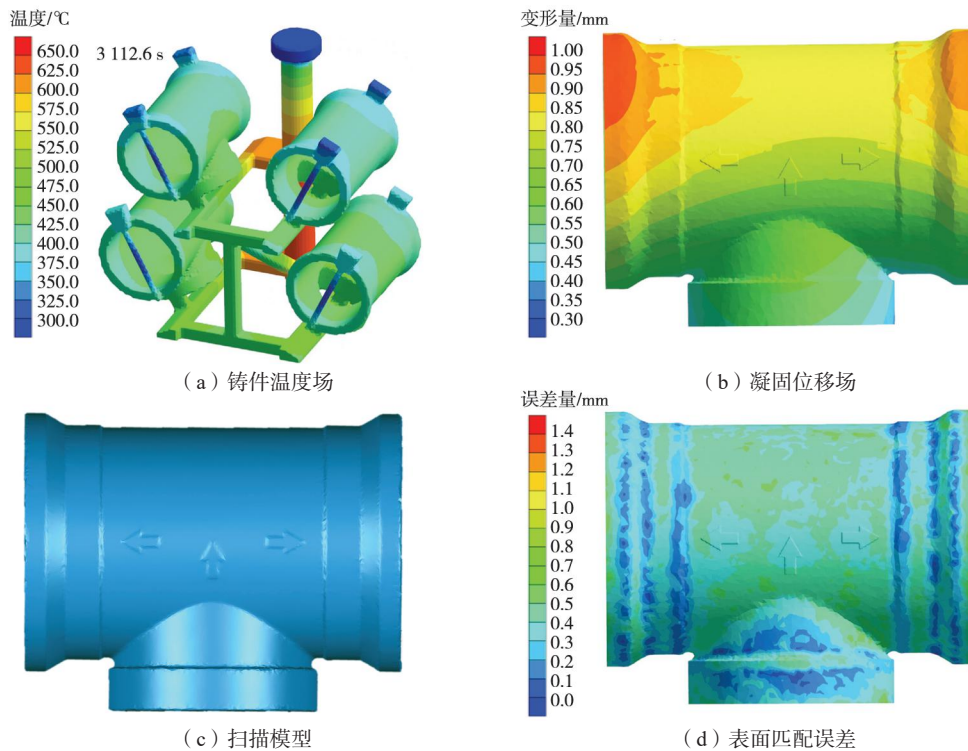


图9 合金凝固阶段模拟结果

Fig. 9 Simulation results during the casting solidification stage

2.4 全流程变形遗传

以初始蜡模模具内腔为几何基准实施跨工序数据校准, 基于图3 (c) 的蜡模变形模拟结果, 将型壳烧结与铸件凝固模拟中实际铸件部分的变形量提取如图10 (a) 和 (b) 所示。其中, 图10 (a) 为在蜡模变形基础上叠加型壳烧结收缩后得到的型壳内腔变形分布, 图10 (b) 为在图10 (a) 的型壳内腔变形基础上进一步叠加合金凝固收缩后得到的最终铸件整体变形分布, 直观展示了熔模铸造“蜡模—型壳—铸件”多工序间几何变形的逐级传递与累积效应。

为定量表征该变形遗传规律, 选取图10 (c) 所示的圆形目标截面作为研究对象, 该截面处的实际铸件设计值为103.0 mm, 蜡模型腔的设计直径为105.5 mm。提取模拟计算结果与蜡模型腔的实际坐标数据如图10 (d) 所示。经数据处理获得各工艺阶段特征直径的模拟值与实测值对比结果如下: 在蜡模充型阶段, 模拟与实测直径分别为104.72 mm和104.71 mm; 在型壳烧结阶段, 模拟与实测直径分别为102.72 mm和

103.33 mm; 在合金凝固阶段, 模拟与实测直径分别为103.19 mm和104.01 mm。对比分析表明, 各关键工艺阶段的尺寸模拟结果与实测数据吻合良好, 相对误差均控制在1%以内, 验证了数值模拟模型的预测精度, 为后续变形遗传规律的定量分析提供了可靠依据。此外相比于铸件设计尺寸103.0 mm, 该工艺方案在合理保留加工余量的前提下有效保证了尺寸精度, 能够满足后续机械加工要求。上述截面尺寸演化表明, 相对于初始模具型腔, 蜡模充型阶段产生收缩, 型壳烧结阶段因陶瓷材料烧结使内腔直径进一步减小, 而合金凝固成形阶段铸件直径回升, 反映了金属液冷却相变与凝固收缩的耦合作用, 证实了模拟结果对实际工序变形的准确捕捉。

为了进一步揭示该误差遗传机制, 分别提取模拟结果相对于初始蜡模模具型腔及实际产品的表面误差如图11所示。图11 (a) 表明, 各阶段独立模拟验证误差均低于0.8 mm, 证实了蜡模充型、型壳烧结及合金凝固单场求解模型与全流程变形遗传模拟的可靠性。

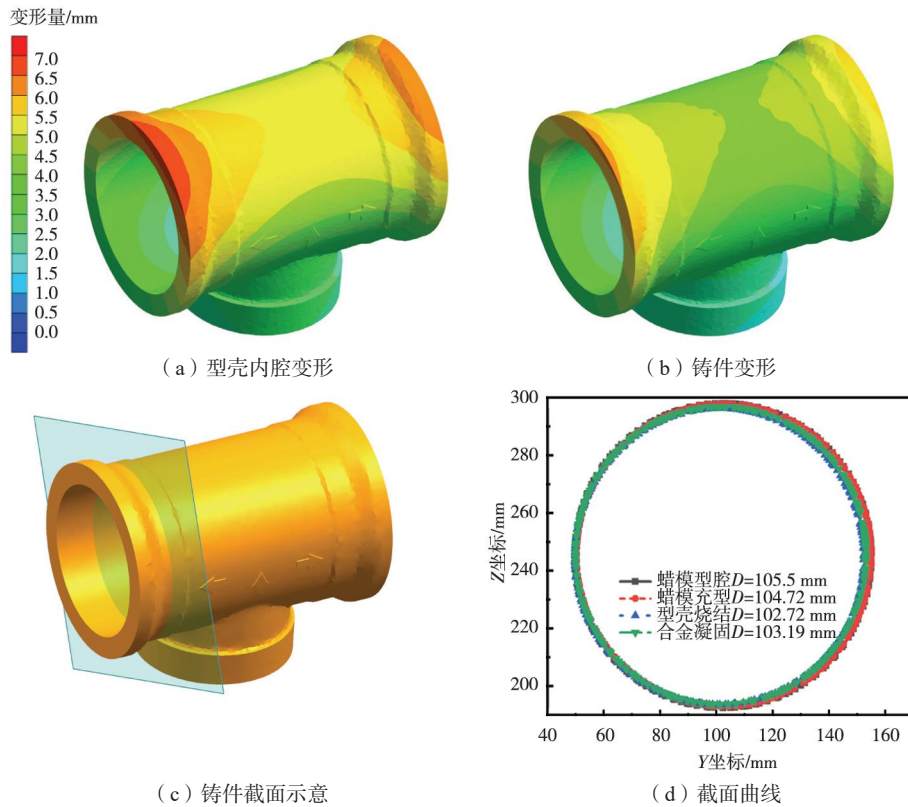


图10 铸件变形云图

Fig. 10 Deformation cloud map of the casting

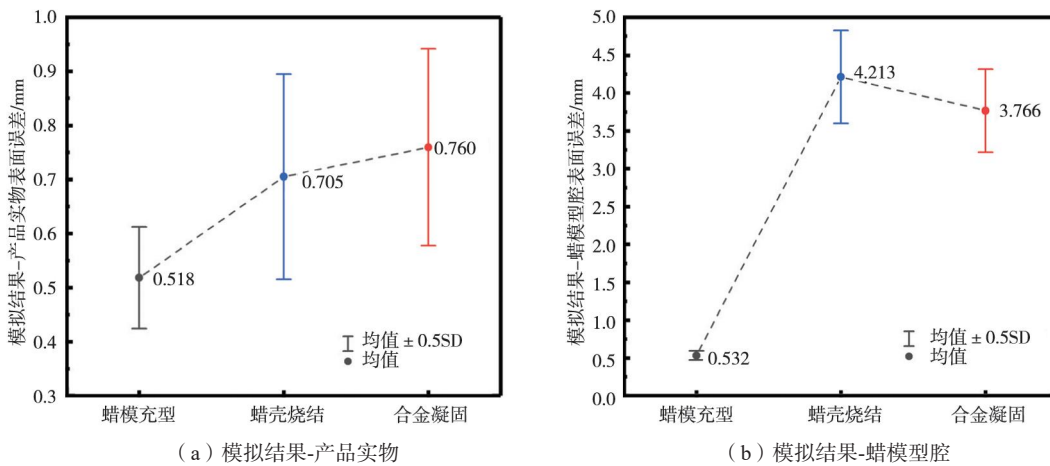


图11 铸件误差置信区间

Fig. 11 Error confidence intervals of the castings

而从图11 (b) 可以得出, 相对于初始模具尺寸, 全流程累积变形呈现非单调传递特征: 型壳烧结阶段因陶瓷材料高温收缩使累积偏差由0.532 mm急剧增至4.213 mm, 而合金凝固阶段在型壳型腔基础上发生的凝固收缩则使最终铸件偏差回落至3.766 mm, 体现了“蜡模充型-型壳烧结-合金凝固”多工序间的变形遗传, 验证了误差沿工艺流程的遗传增强现象。

上述非线性变形传递规律对熔模铸造尺寸精度控制具有重要工程价值。首先, 型壳烧结阶段是型腔几何变形的关键环节, 其收缩变形占全流程总变形的87%

以上, 应作为尺寸精度控制的首要对象, 可通过优化陶瓷浆料粒度级配和调整升温曲线等工艺参数抑制过度变形。其次, 应充分利用“充型-烧结-凝固”多工序间变形的动态补偿机制, 在蜡模模具设计阶段建立基于全流程变形遗传的反向补偿模型, 将预测的型壳收缩量与合金凝固收缩量进行综合计算, 以确定最优的蜡模模具修正量。综上所述, 本研究基于全流程数值模拟平台, 以初始蜡模模具内腔为几何基准实施跨工序数据校准, 系统追踪了“蜡模-型壳-铸件”工艺流程中的变形遗传行为, 实现了熔模铸造全流程尺寸精度

的量化预测,从动态演变视角证实了顺序耦合模拟对复杂铸件尺寸精度预测的有效性与可靠性。

3 结论

基于熔模铸造全流程数值模拟与试验验证,系统研究了蜡模充型、型壳烧结及合金凝固阶段的变形规律及其误差传递机制,主要结论如下。

(1)建立了涵盖蜡模充型、型壳烧结及合金凝固的熔模铸造全流程变形数值模拟方法。通过三坐标测量与工业CT扫描分别对各阶段实物进行检测,获得的表面平均模拟误差分别为0.518 mm、0.705 mm和0.760 mm,均小于0.8 mm,验证了单场求解模型与全流程变形遗传模拟的可靠性。

(2)揭示了熔模铸造多工序间变形的动态补偿机制与误差遗传特征。研究表明,型壳烧结阶段因陶瓷材料高温收缩导致累积偏差显著增大,而后续合金凝固收缩在型腔内产生反向补偿,促使最终铸件偏差回落,证实了误差沿工艺流程的遗传增强现象。

(3)提出了一种基于数值插值与三维表面配准的多尺度验证方法。该方法通过融合三坐标测量与CT扫描数据重建实物模型,实现了熔模铸造全流程宏观位移场与几何精度的关联分析,在提升模拟结果可信度的同时,为模具型腔设计补偿与工艺参数优化提供了有效手段,对实现铸件尺寸精确控制具有重要工程价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] CANNELL N, SABAU A S. Predicting pattern tooling and casting dimensions for investment casting, phase II [R]. Edison Materials Technology Center (EMTEC), 2005.
- [3] WANG D. Dimensional deviation and defect prediction of wax pattern [M]. Springer: Precision Forming Technology of Large Superalloy Castings for Aircraft Engines, 2021: 67-100.
- [4] ZHANG Z Y, LIANG B N. Factors affecting casting dimension accuracy in die making process [J]. Mech. Res. Appl., 2002, 15: 15-16.
- [5] TAN S, HAO X, WANG D, et al. Numerical simulation and intelligent optimization of wax injection in investment casting [C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1653: 012016.
- [6] SABAU A S, VISWANATHAN S. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 362 (1-2): 125-134.
- [7] 杨铭. 基于Projection VOF方法的熔模铸造蜡模充型过程数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [8] 冒文娟. 基于Moldflow的Cross-WLF黏度模型研究 [J]. 塑料工业, 2020, 48 (7): 47-50.
- [9] 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.
- [10] BONILLA W, MASOOD S H, IOVENITTI P. An investigation of wax patterns for accuracy improvement in investment cast parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18 (5): 348-356.
- [11] BARATI E, AKBARI J. The effect of injection parameters on dimensional accuracy of wax patterns for investment casting [J]. Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering, 2020, 9 (2): 313-322.
- [12] 王玉莲. 熔模铸造型壳焙烧变形仿真与工艺优化方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [13] 闫学伟, 毛爽, 杨其航, 等. 钛合金熔模铸造陶瓷型壳焙烧过程温度与变形数值模拟 [J]. 航空材料学报, 2025, 45 (5): 161-170.
- [14] OLEVSKY E A, TIKARE V, GARINO T. Multi-scale study of sintering: a review [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89 (6): 1914-1922.
- [15] 宋久鹏. 金属和陶瓷粉末烧结工艺的试验、建模和数值模拟 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [16] MUN S H, CHONGDU C, YOUNG K S. A hybrid method for casting process simulation by combining FDM and FEM with an efficient data conversion algorithm [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2002, 133 (3): 311-321.
- [17] 徐艳, 康进武, 黄天佑. 铸造过程温度场/应力场双向耦合的数值模拟 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008 (5): 769-772.
- [18] BOENDER W, BURGHARDT A, VAN KLAVEREN E P, et al. Numerical simulation of DC casting; interpreting the results of a thermo-mechanical model [M]. Springer: Essential Readings in Light Metals: Volume 3 Cast Shop for Aluminum Production, 2016, 933-938.
- [19] 孙冰, 杨光, 李渤渤, 等. 薄壁框型钛合金铸件熔模铸造数值模拟及验证 [J]. 铸造技术, 2024, 45 (10): 925-931.
- [20] 刘阔. 熔模铸造蜡模注射成形全流程应力变形数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [21] 余一帆. 粘结剂喷射成形氧化铝陶瓷型芯烧结过程的数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [22] SKOROHOD V V, OLEVSKY E. Continuum theory for sintering of the porous bodies: model and application [J]. Science of Sintering, 1991, 23 (2): 79-91.