

引用格式: 崔加裕, 汪东红, 肖程波, 等. 航空发动机用高温合金复杂薄壁精密铸件尺寸精度控制技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2024, 44(2): 31-44.
CUI Jiayu, WANG Donghong, XIAO Chengbo, et al. Research progress on dimensional accuracy control technologies of complex thin-walled superalloy investment castings for aero-engines[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(2): 31-44.

航空发动机用高温合金复杂薄壁精密铸件尺寸精度控制技术研究进展

崔加裕¹, 汪东红¹, 肖程波², 疏达^{1*}, 孙宝德^{1*}, 官邦¹, 丁正一¹

(1. 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, 上海 200240; 2. 中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095)

摘要: 高温合金主要应用于涡轮后机匣、扩压器、预旋喷嘴等航空关键热端部件, 采用整体精密铸造技术取代“分体铸造+焊接”成形方法, 可减少零件数量和加工工序、提升可靠性、减轻质量, 是航空发动机先进材料加工关键核心技术之一。然而复杂薄壁构件液态精密成型存在尺寸超差难题, 导致发动机气动性能降低, 装配精度下降, 是长期制约我国航空发动机关键构件制造质量的瓶颈问题。本文综述目前国内外在高温合金精密铸造尺寸精度控制方面的研究进展, 并对基于数字化和智能化技术的发展趋势进行了前瞻性分析和探讨, 未来迫切需要构建液态精密成型数字孪生平台, 发展更先进的尺寸变形精准定量智能预测方法以及压蜡模具内腔型面设计理论。

关键词: 航空发动机; 高温合金; 尺寸精度控制; 熔模精密铸造; 复杂薄壁

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2023.000231

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2024)02-0031-14

Research progress on dimensional accuracy control technologies of complex thin-walled superalloy investment castings for aero-engines

CUI Jiayu¹, WANG Donghong¹, XIAO Chengbo², SHU Da^{1*}, SUN Baode^{1*},
GUAN Bang¹, DING Zhengyi¹

(1. Shanghai Key Laboratory of Advanced High-temperature Materials and Precision Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Superalloys are predominantly employed to crucial aviation hot-end components such as turbine rear casings, diffusers, and pre-swirl nozzles. The investment casting technology supersedes “casting + welding” forming approaches, which reduces the number of parts and processing procedures, offers improved reliability and mass reduction. Therefore, investment casting is a pivotal technology for aviation component manufacturing. However, the casting of complex thin-walled components encounters challenges with dimensional accuracy, impacting engine aerodynamic performance and assembly precision, which has become a bottleneck problem restricting the manufacturing quality of key structural components of aero-engines in China for a long time. This article reviews the current advancement in the dimensional accuracy control for superalloy investment castings at home and abroad. A forward-looking analysis and discussion on development trends are conducted, particularly focusing on digital and intelligent technologies. There is an urgent need to build a digital twin platform for investment casting in the future and to develop more advanced accurate, quantitative and intelligent prediction methods for dimensional deformation and die profile design theory.

Key words: aero-engine; superalloy; dimensional accuracy control; investment casting; complex thin-walled

自20世纪40年代熔模铸造技术应用于航空喷气发动机涡轮叶片开始,高温合金液态精密成型已成为航空发动机先进材料加工关键核心技术之一^[1]。采用液态精密成型技术取代“分体铸造+焊接”成形方法,能够有效地减少航空发动机零件数量和加工工序、提升可靠性、减轻质量。发达国家如英国的航空发动机巨头 Rolls-Royce 公司和美国的 Howmet 公司等,突破了与定向柱晶叶片和等轴晶轮盘相匹配的整体叶盘液态精密成型技术,使发动机的服役寿命提升2~3倍,输出功率提升7.3%~9.2%^[2-3];“狂风”多用途战斗机机翼固定端前缘采用液态精密成型技术取代了传统6个机加工件、9个钣金件和164个铆钉连接的制造方法,实现了20%的减重^[4]。从1981年至今,航空发动机构件中,采用液态精密成型技术的关键构件质量比例从20%增至40%以上^[4]。美国矿物、金属与材料学会^[5]将该技术评为最伟大的50项材料事件之一,与集成电路和碳纳米管等技术齐名。

随着航空发动机性能的提升,航空发动机用高温合金关键构件向复杂化和薄壁化方向不断发展,例如,某些涡轮后机匣、扩压器、预旋喷嘴、涡轮叶片等铸件80%的壁厚小于3 mm,呈空心结构,最小壁厚仅1 mm,截面厚度突变高达10倍^[6-7]。然而,液态精密成型过程包括蜡模注射成形、沾浆淋砂到合金浇注等十多道工序,涉及数千参数,铸件型面尺寸变形机制十分复杂,尺寸变形规律难以精准、定量预测,这些因素共同导致了尺寸超差难题,使发动机气动性能降低,装配精度下降^[4]。

发达国家高度重视高温合金复杂薄壁铸件的尺寸精度控制技术,Pratt & Whitney 公司报道实现了对液态精密成型过程4000个参数的监视,确保了每年50000片柱状晶和单晶叶片的成品率和可靠性^[4]。但在液态精密成型尺寸精度控制领域,由于诸多核心技术的敏感性,没有在公开资料中进行披露^[8]。与国外先进液态精密成型技术相比,我国高温合金复杂薄壁铸件尺寸控制能力有差距,甚至导致航空发动机关键构件时常陷入“无件可用”“进度延缓”“让步接收”等困境^[9]。

近十年来,国内外围绕液态精密成型尺寸精度控制技术的研究主要集中在从三种材料单工序精密成型技术到液态成型尺寸精确预先控制两大方面,并取得了显著进展。本文针对航空发动机用高

温合金复杂薄壁铸件的尺寸精度控制技术难题,综述其相关研究与应用现状,并对其数字化、智能化的发展趋势进行总结和展望。

1 三种材料单工序精密成形技术

液态精密成型中,铸件型面尺寸的传递与变形规律是一个涉及多材料、多物理场和多流程的高度复杂机制。美国橡树岭国家实验室^[10]与美国能源部公开发表的“未来铸造工业”的工业技术计划报告中指出,液态精密成型过程中型面尺寸变形主要来源于压型-蜡料、蜡模-陶瓷铸型,以及陶瓷铸型-合金三类变形系统,三类变形系统分别对应型面尺寸在三种材料之间的传递,每类变形系统分别对应诸多液态精密成型子流程。图1为美国橡树岭实验室在该工业技术计划报告中总结的液态精密成型流程型面尺寸变化规律图,图中共标出13个子流程,子流程中产生的复杂物理与化学机制会对型面尺寸的变化造成影响^[10]。尺寸变形预测与抑制的主要技术难点在于决定铸件型面尺寸变化规律的物理机制不清楚、三种材料热物性数据不准确、完善且经过验证的热固耦合模型缺乏三个方面^[10]。

1.1 压型-蜡料系统变形预测与抑制

压型-蜡料系统变形囊括蜡模注射成形、出模、蜡模静置冷却、蜡模组装或组树等诸多子流程中型面尺寸的变化,该系统中,型面尺寸由压蜡模具内腔型面(压型)传递到蜡模的外型面。Sabau 等^[11]指出蜡模注射成形(又名注蜡或压蜡)过程的型面尺寸变化主要与蜡料在金属型内的流动方式、结晶方式、温度场分布状态和蜡料热物性参数有关,而蜡模脱模后蜡模的某些内部区域仍处于半固态,其外型面尺寸变化主要决定于蜡模的出模温度、环境温湿度、蜡液凝固残余应力和蜡料的黏弹性本构模型等。

合理的压蜡方案能够抑制蜡模变形。Kuo 等^[12]通过改变内模(core insert)和外模(cavity insert)的随形冷却通道中冷却液温差,蜡模的平均变形改善率达74.5%,冷却时间减少15.7%。蜡模在取出的数小时内,会继续收缩变形,其变形行为与蜡模的出模温度、力学松弛参数、保存环境和摆放方式有关^[11]。Sabau 等^[11]发现蜡模制备和存放

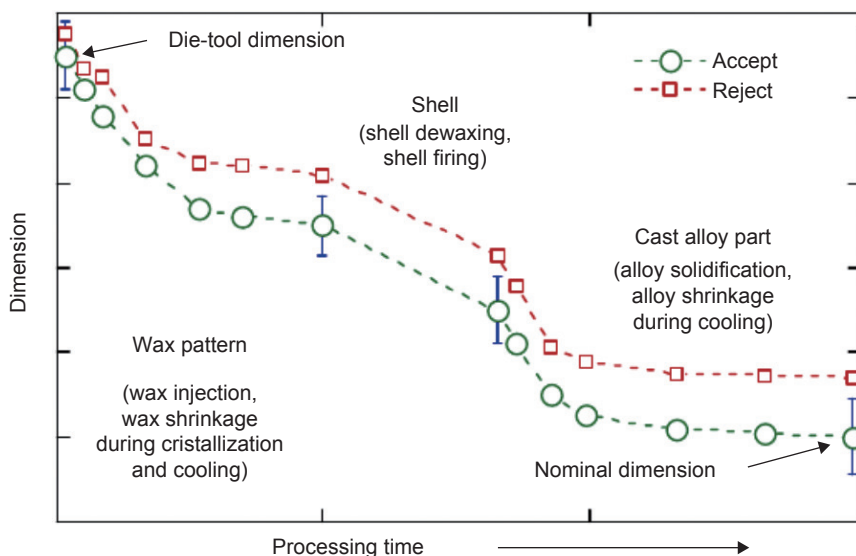


图1 压型-蜡料、蜡模-陶瓷铸型、陶瓷铸型-合金三类变形系统, 以及13个子流程中型面尺寸变化规律^[10]

Fig. 1 Illustration of die-wax, wax pattern-shell, shell-alloy system, and dimensional changes in 13 sub-processes^[10]

的恒温恒湿环境, 以及脱模后在胎模中静置时间的延长对尺寸变形量有明显的抑制作用。Zhang等^[13]提出做防变形拉筋的方法, 发现对板形区域用平板夹住能够实现蜡模纠偏。空心涡轮叶片的壁厚对其性能和使用寿命有很大影响, 而壁厚的精度主要来自其相应的蜡模, 为了解决在注射过程中流动的液态蜡料的压力场不均匀分布而导致的陶瓷型芯的移位问题, Wang等^[14]提出了一个陶瓷型芯移位的监测方法, 通过改进的遗传算法优化夹紧杆 (clamping rods) 布局, 减少了蜡模空心结构尺寸的最大和平均偏差。

蜡料热物性能的准确标定是压型-蜡料系统尺寸变形准确预测和抑制的关键。液态成型技术用的蜡料热物性能参数一般依据石油化工标准进行测试, 在液态精密成型蜡模注射成形过程中的低压 (1~5 MPa)、中低温 (50~80 ℃)、低剪切速率的环境下往往不适用。Wang等^[15]提出采用基于聚合物性能的测试方法, 测量蜡料流变学和可压缩PVT (压力、体积、温度) 特性, 选取蜡料 Cross-WLF 黏度模型和基于 PVT 特性的 Tait 方程描述蜡模变形的本构模型, 预测了蜡料的流动充型、保压与翘曲过程, 揭示了复杂空心薄壁蜡模中型芯偏移源于速度/压力切换瞬间压力陡增与保压压力过大的变形机理, 开发了涡轮后机匣分体旋开式模具, 采用计算优化的保压工艺参数, 空心薄壁厚度 2 mm 偏差从 ± 0.5 mm 降低到 ± 0.06 mm。为了探究蜡模壁厚与工艺参数的变化对腔体压力和尺寸变化的影响, Wang等^[16]通过注蜡过程的数值模拟, 发现保压时间和保压压力对蜡模壁厚稳定性有显著影响,

而注射温度的变化对型腔内压力和收缩率的影响不大。型腔压力对保压压力更敏感, 而当保压时间大于封口时间时, 对蜡模的收缩没有显著影响, 蜡模壁厚的收缩量随着壁厚的增加而增加。

对于高温合金制成的叶片、机匣支板等结构, 由于散热以及轻量化的需求, 往往设计成空心结构, 依靠预置水溶性的型芯成形, 这些型芯的偏移和变形会导致蜡模空心结构尺寸的偏差。特别对于大型薄壁空心铸件, 注蜡过程中型芯偏移在注蜡过程中会导致最终铸件的壁厚超出允许范围。Wang等^[17]发现在保压阶段, 蜡液不对称流动是型芯偏移的直接原因, 保压阶段作用于型芯不同区域的压力差异导致了型芯偏移, 通过降低保压压力能够减少型芯偏转量, 增加型芯固定能减少薄壁蜡模由于型芯偏移造成两侧壁厚的变化。这解释了 MPI 压蜡机操作手册中有保压压力要小的要求, 并证实可以通过工艺优化的方法解决型芯偏移的问题。图 2(a) 是对航空发动机大型薄壁空心后机匣型芯偏移的数值模拟结果, 利用高分子混合蜡料流变学、熔体可压缩模型, 发明了基于位移场仿真蜡模尺寸精度的控制技术, 壁厚偏差由 25% 以上降低至 3% 以下^[17]。

某些大型铸件的蜡模无法实现一次整体注射成形, 需采用分体压制与组装的方法, 不同拼装方案设计会对组装误差的类型和大小产生影响。Liu等^[18]提出组装过程偏差主要来源于定位面、定位点与定位槽的偏差, 针对图 2(b) 所示的大型、复杂、薄壁后承力机匣蜡模的组装方式, 提出拼装误差量化的计算方法, 指出基于极坐标的定位模型可

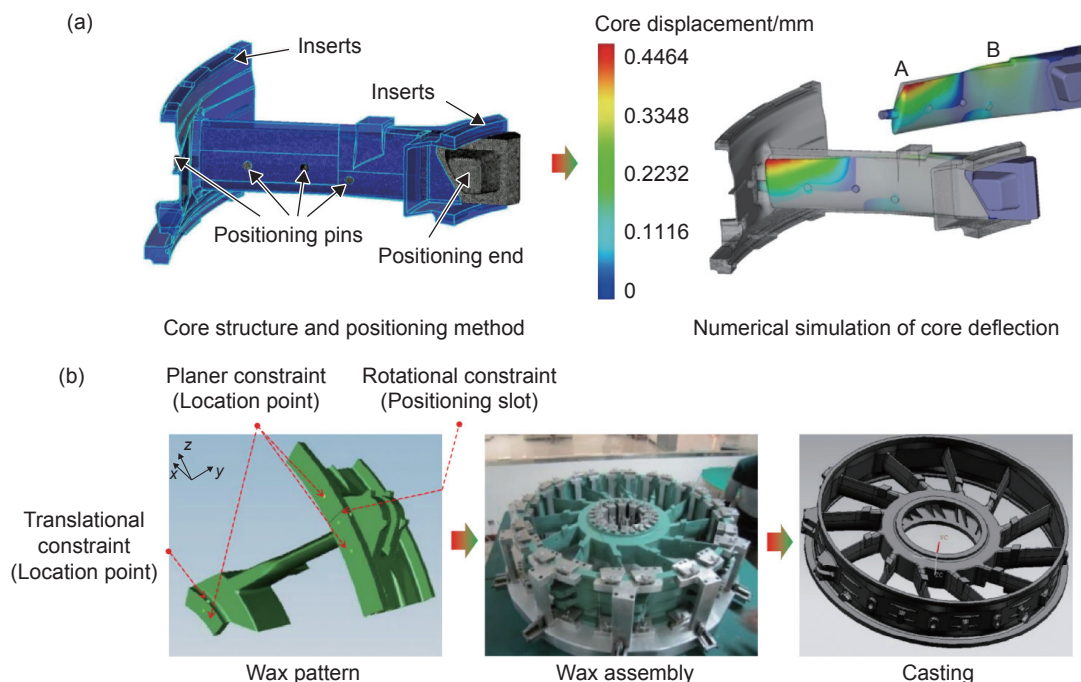


图2 压型-蜡料系统变形示例 (a)涡轮后机匣空心薄壁蜡模示意图与型芯偏移数值模拟结果^[17];
(b)涡轮后机匣蜡模组装示意^[18]

Fig. 2 Dimensional deformation in die-wax system (a) simulation result of core shift in wax pattern of turbine rear casing^[17];
(b) illustration of assembling of wax patterns for turbine rear casing^[18]

以克服由于笛卡尔坐标系与定位位置不匹配关系而导致的变化,简化计算过程并提高计算精度,该承力机匣蜡模装配过程中的计算结果与测量值相符。通过对蜡块定位方式、装配顺序、几何公差等蜡模组装工艺参数进行仿真优化,有效减小了蜡模组装误差。

近些年出现了诸多蜡模制备新技术,为传统压蜡方案提供了先进的替代选择^[19]。激光选择性烧结(selective laser sintering, SLS)、光固化成形(stereo lithography appearance, SLA)和聚合物喷涂成形等新技术提供了定制化、高效化的蜡模生产能力,但蜡模尺寸变形难以准确、定量预测与抑制的问题有待研究。实现压蜡装备的自动化、数字化运行与实时参数监控,对智能化蜡模尺寸精度和尺寸稳定性的优化与控制至关重要。注蜡成形、人工出模、蜡模组装或组树等过程由于参数波动和人工等因素会使蜡模外型面的尺寸产生波动,当前尚缺乏在尺寸波动反向量化方面的研究,难以精准、定量地构建蜡模尺寸分布的机理与数字模型,尚缺乏对尺寸波动敏感性参数实时控制的相关研究。

1.2 蜡模-陶瓷铸型系统变形预测与抑制

蜡模-陶瓷铸型系统变形包含涂制、干燥、脱蜡等流程中型面尺寸的变化,该系统中,型面尺寸由蜡模外型面传递到陶瓷铸型的内型面。在焙烧前,

陶瓷铸型湿态强度低、发生相变,尺寸变形规律十分复杂。Sabau等^[10]结合数值模拟与实验验证,指出陶瓷铸型的蠕变现象在其干燥、脱蜡、焙烧等过程中的影响不可忽视。

脱蜡过程中,处于陶瓷铸型内部的蜡料受热膨胀,和陶瓷铸型之间发生相互作用使铸型内型面尺寸发生变化。脱蜡参数影响了蜡模-陶瓷铸型系统的尺寸变形规律。脱蜡过程一般在150~200℃下进行,此时陶瓷铸型膨胀量较小而蜡料受热膨胀量较大,蜡料与陶瓷铸型之间的力学相互作用使陶瓷铸型发生“胀壳效应”,甚至导致铸型开裂。虽然陶瓷铸型裂纹的修补容易,但是铸型开裂严重降低了其内型面的尺寸稳定性。Mishra等^[20]提出了一种修改加热路径(modified thermal heating method)的方法和反向固化路径(reversed solidification path dewaxing, RSPD)的脱蜡模式,修改加热路径的方法指通过降温使蜡模和陶瓷铸型界面之间产生间隙,为脱蜡过程蜡模的膨胀提供空间,减少由于蜡料高热膨胀率特性引起铸型内型面尺寸变形和铸型开裂问题;固化路径反转指使蜡模从内部开始融化,确保了蜡模在融化时不会对铸型产生过大的压力,减少铸型内型面尺寸变形问题和铸型开裂的概率。李亚芳等^[21]发现在脱蜡之前,将陶瓷铸型存放在比涂制温度低4℃的环境中,就能够有效地减

少铸型开裂和内型面变形问题。Minami 等^[22]发现在脱蜡过程中, Al_2O_3 陶瓷铸型的裂纹形成机理因黏合剂类型的不同而异。使用聚乙烯醇丁酯 (polyvinyl butyral, PVB) 和硬脂酸 (stearic acid, SA) 的陶瓷铸型在脱蜡过程中出现明显变形和裂纹现象, 而添加石蜡的陶瓷铸型则无裂纹出现, 后者的力学性能更优越, 结构更稳定, 保障了铸型内型面的尺寸稳定性。

新型脱蜡技术能够有效控制蜡模-陶瓷铸型系统的尺寸变形并提高铸型内型面的尺寸稳定性。Brum 等^[23]提出采用微波技术替代传统的高压釜脱蜡, 证明了微波脱蜡技术的可行性, 指出微波脱蜡技术能够避免在高压蒸汽釜中脱蜡时杂质和水的混入现象, 因而在减少胀壳导致的尺寸变形方面表现出优越性。Gill 等^[24]提出利用碳黑作为微波感应体, 在蜡料中创建了热敏感位点, 提高了脱蜡效率, 随着碳黑含量从 0.15%(质量分数)增加到 0.75%, 蜡料的热稳定性提高了 6.86%, 减小了蜡料膨胀对型面尺寸变化的影响; 当碳黑的含量增至 1.5% 时, 蜡料熔化时间减少了 71.9%, 脱蜡过程变得更快、更有效。

尽管制备陶瓷铸型的新材料和新制备工艺层出不穷, 但关于蜡模-陶瓷铸型系统中多流程的变形预测与抑制方面的研究报道较少, 主要研究集中在脱蜡的相关技术。然而, 陶瓷铸型在干燥和脱蜡过程中的蠕变性能及其导致的变形机制尚未得到充分研究; 未烧结状态陶瓷铸型材料的本构模型缺失, 仍然难以实现蜡模-陶瓷铸型系统型面尺寸变形的准确、定量预测。

1.3 陶瓷铸型-合金系统变形预测与抑制

陶瓷铸型-合金系统变形包含型面尺寸在型壳焙烧、合金凝固冷却、去陶瓷铸型、去浇注系统、合金热处理等过程发生的变形。该系统中, 型面尺寸由陶瓷铸型的内型面传递到合金铸件的外型面。Beckermann 等^[25]总结冷却凝固过程铸件型面尺寸发生收缩翘曲变形的物理机制可分为热应变和塑性应变两部分。热应变使铸件发生均匀收缩; 塑性应变使铸件发生翘曲, 决定于陶瓷型壳与合金本构模型的黏塑性行为, 受到不均匀热应力、变截面效应、陶瓷铸型与型芯对合金收缩产生的机械阻碍等因素共同作用。在陶瓷铸型-合金系统中, 合金浇注与冷却凝固过程中的型面变形规律与尺寸变化机制是研究中的难点与热点, 主要受到高温合金的本构模型、陶瓷铸型的本构模型、复杂铸件几何结构冷却凝固成形过程中流动场-温度场-变形场(流

热固)多场耦合的机制作用。

1.3.1 陶瓷铸型的本构方程、变形预测与抑制技术

液态精密成型用陶瓷铸型材料的本构模型决定于其多层、多相、多尺度的特征。由面层、中间层、背层和封浆层构成, 每层是由晶相、玻璃相、空隙和裂纹等组成的非均质多相体系。刘畅辉^[26]发现, 陶瓷铸型焙烧过程中, 温度高于 200 °C 后, 有机黏结剂挥发, 形成孔洞; 在 500~650 °C 间, 石英发生固态相变; 温度高于 650 °C 时, 氧化物如 K_2O 和 Na_2O 转化为玻璃相, 产生烧结收缩, 且玻璃相的黏度随温度升高发生明显下降; 当温度达到 1250 °C 左右时, 熔融石英发生析晶, 转化为方石英相; 降温后, 方石英相在 170~220 °C 时会由高温晶型转化为低温晶型, 体积收缩并影响陶瓷铸型内腔尺寸。Liu 等^[27]利用冻土分析方法(permafrost analysis methodology, PAM), 预测陶瓷铸型焙烧时内型面的尺寸变形规律, 与实验结果符合度达到 86%。指出永久冻土模型中考虑了土壤颗粒和水分的共同作用, 土壤颗粒的本构行为同样能描述陶瓷铸型材料内稳定的固态相本构行为, 永久冻土中水分的本构行为同样能够描述陶瓷铸型材料中玻璃相的本构行为。在低温下, 永久冻土中的水以冰的形态存在, 因而展现出良好的力学性能, 能够模拟低温段陶瓷铸型的本构模型; 当温度上升到相变点时, 冰融化, 黏度降低, 冻土的力学性能急剧降低, 能够模拟发生玻璃相转变后的陶瓷铸型的本构变形模型。

陶瓷铸型内型面的尺寸变形规律受到陶瓷铸型材料、组织与制备工艺的影响。Wei 等^[28]考察了 Na_2O 和 K_2O 等碱性氧化物对高温下陶瓷铸型变形行为的影响, 利用不同浓度的 NaOH 和 KOH 溶液处理了两组陶瓷铸型样本。在 1200~1350 °C 的温度范围内, 使用特制的蠕变测试设备在 2、4 MPa 和 6 MPa 的压力下进行了蠕变实验, 构建了 Norton-Bailey-Arrhenius 本构模型。在从低于 1300 °C 升温到 1350 °C 时, 陶瓷铸型的变形激活能从约 198 kJ/mol 增加至 325 kJ/mol。添加 Na_2O 和 K_2O 会在低温时减少激活能, 在高温时增加激活能, 在温度从 1300 °C 以下升至 1350 °C 时应力指数从约 1.00 增至 1.30~1.60, 表明从界面滑移机制为主向复合蠕变机制发生转变。Venkat 等^[29]开发了铝酸盐-莫来石陶瓷模壳材料, 用于铸造单晶中空高压涡轮叶片, 发现随着铝酸盐的增加, 样品的黏度、拾取质量、密度和强度都有所增加, 优化后, 使用含有 8%(质量分数)聚合物的胶体二氧

化硅黏合剂和30%细颗粒状铝酸盐砂,在1550℃下铸造的空心高压涡轮叶片达到了可接受的气动叶片轮廓度($\pm 0.125\text{ mm}$)和表面粗糙度($1.32\text{ }\mu\text{m}$)。

抑制陶瓷铸型内型面的尺寸变形需要能够精准且及时地对其变形与变形原因的监测、追踪和分析方法。然而在小批量生产中,用于变形原因分析的数据是有限且不完整的,传统的统计方法无法给出可信结果。Jin等^[30]引入了一种“系统性”的贝叶斯方法,该方法首先利用基于专家知识的贝叶斯网络映射获得初步的网络结构和参数,通过信息交互的方法对网络结构进行更新,并利用更多的测量数据来更新条件概率,以监测信号作为判断依据确定陶瓷铸型变形的根本原因。

采用型芯型壳一次成形技术,能够解决传统液态精密成型方法中尺寸精度控制的诸多挑战,如由于陶瓷型芯和型壳热膨胀不同引起的型芯变形、偏移和断裂,组装过程中的误差和偏芯问题,以及脱蜡引发的铸型内腔变形等^[31]。Bae等^[32]采用陶瓷立体光刻(stereo lithography appearance, SLA)技术制造了一体化型芯与型壳,烧结收缩率在两个方向上均为 $(10.7\pm 0.2)\%$ 。Chen等^[33]利用激光粉末熔化(laser powder bed fusion, L-PBF)技术制备具有低烧结收缩率的氧化铝基一体化型芯与型壳(ceramic mold with integral core and shell, CMCS),采用真空浸渍方法提高了烧结后氧化铝陶瓷的力学性能,烧结收缩率降低到 $1.51\%\sim 2.03\%$,成功应用于铸造高温涡轮叶片。Wu等^[34]结合立体光刻(stereo lithography, SL)技术和凝胶浇注技术制造空心涡轮叶片用一体化型芯与型壳,采用冻干技术获得近零收缩的湿态铸型,避免了一体化型芯与型壳中干燥应力和裂纹的发生,使烧结收缩率减小到 0.5% 以下。Xu等^[35]采用立体光刻增材制造和凝胶注模技术制备了用于高温合金单晶叶片的一体化型芯与型壳,发现加入堇青石(kyanite)后,合金单晶叶片表现出优异的高温力学性能和尺寸稳定性。堇青石的添加导致莫来石化,焙烧时分解为初生柱状莫来石和二氧化硅,伴随的体积膨胀有助于良好控制烧结收缩,当使用质量分数9%堇青石时,烧结收缩率低至 0.36% 。针对一体化型芯与型壳, Bae等^[36]研究了耐火熔融石英的力学性能和转变动力学,发现烧结二氧化硅的弯曲强度随着密度的提高而持续增加,最高可于 $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达 11.4 MPa ,但上升至 $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,大量的方石英(cristobalite)由 β -方石英到 α -方石英转变期间引起

的急剧收缩而生成微裂纹,强度从 11.3 MPa 降低到 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 4.6 MPa 。在合金凝固过程中与铸造金属相似的强度、尺寸精度的热稳定性以及铸造后易于脱模的一体化型芯与型壳对铸件尺寸精度的抑制至关重要。

随着断层扫描等技术更普遍的应用,陶瓷铸型内型面尺寸能够通过实验精准、定量地获取。然而,目前仍然缺乏在实际液态精密成型流程中,不同陶瓷铸型本构模型在变形预测上定量的验证、比对与机理研究。同时,陶瓷铸型在各变形过程中物理机制不同,如焙烧过程铸型整体发生相变;合金浇注过程铸型内层发生相变,外层提供强度,受液态合金重力与惯性流动冲刷作用;溃散过程铸型裂纹的萌生位置和裂纹扩展规律等。具有差异的变形物理机制需要新型或修正的本构模型进行描述与预测,该方面尚鲜有相关研究报道。

1.3.2 高温合金本构方程与凝固过程变形预测与抑制技术

高温合金的本构模型描述了在合金浇注后,凝固冷却过程中应力与应变的关系。传统文献中的相关本构模型主要集中在塑性加工成形领域,针对的是固相线温度以下的高温与高应变速率条件,而未考虑更高温度(接近甚至高于固相线温度)与更低应变速率下(对应铸件变形)合金的力学行为。研究表明,铸件在凝固末期合金尚处于糊状区时即具有一定的强度,因此能够承受一定的应力并产生相应的变形。针对IN718合金, Lewandowski等^[37]首先尝试在高达 $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下(糊状区)进行压缩实验,发现合金在固态和半固态下具有对应不同微观结构的不同机械响应特性,而合金在糊状区内的压缩变形与枝晶取向等微观组织特性有关。Labergère等^[38]针对镍基高温合金接近糊状区间时的力学性能,研究了高温合金单晶构件凝固冷却时的应力产生机理,引入基于固态体积分数的可压缩的黏塑性屈服函数,开发考虑固-液转变的热-弹性-黏塑性模型,通过不同应变速率和温度条件下的等温恒拉力松弛实验确定该本构模型参数,在Abaqus/Standard中针对棒状简化件的铸造应力比对实验通过数值模拟得到了验证。Yu等^[39]提出了一种数值模拟-实验数据反推的迭代校正方法,能够消除Gleeble压缩过程中由样品温度场不均匀性和应变场不均匀性而带来的偏差,该方法已成功应用于建立钛合金压缩变形的本构方程,预期也能应用于高温合金近糊状区高温区域的黏弹塑性本构方程的校准。

高温合金的本构模型研究比较完善,但在合金凝固冷却过程中缺少定量的实验验证。Beckermann等^[40]针对砂型铸造搭建了原位的应力-应变测试装置,在合金凝固冷却过程的同时实现了力和位移的实时测量,指出传统力学测试方法不能准确、定量地标定合金凝固冷却时的本构模型与参数;但在高温合金液态精密成型方面,由于真空炉设备的封闭性和复杂性、高温合金的高熔点特性、陶瓷铸型的复杂结构特性等挑战,鲜见相关研究。

1.3.3 多场耦合复杂结构尺寸变形预测与抑制技术

复杂结构的型面尺寸在凝固冷却过程中的变形规律主要受到“流热固”三场的耦合作用^[41]。铸型表面与外界的热辐射、与环境介质间的热对流与热传导、铸型与合金之间的界面换热效应,驱动了合金的凝固冷却;合金固态区域发生热收缩,受陶瓷铸型、陶瓷型芯的机械阻碍作用产生黏弹塑性变形;合金液态区域在不均匀温度场的作用下发生流动,形成对流效应,提高了表面散热和界面换热的热通量;合金铸件与陶瓷铸型的线收缩率差异,使铸件-铸型界面间产生微小空间(气隙),陶瓷铸型-合金铸件界面换热系数下降,界面的热流密度下降。铸件降温过程中,固态区的塑性变形部分被部分永久保存,弹性部分则转化为残余应力或者裂纹缺陷释放。Koric等^[42]尝试了用显式方法对铸造热固耦合物理现象进行模拟,采用一个特殊的黏塑性积分方案以处理凝固合金对温度和速率的高度依赖性。进一步地,Koric等^[43-44]采用热固双向耦合-流动单向耦合的隐式方法求解浇注-凝固过程中的热应力、机械应力和尺寸变形问题,指出热固耦合在求解过程的重要性以及液固糊状区处理、液态合金区以及凝壳黏塑性积分方案的相关准则。

多物理场作用于复杂结构,在各类结构特征上表现出不同的尺寸变形规律。Liu等^[45]采用环套环特征件实验,图3(a)为陶瓷铸型内型面通过断层扫描(CT)技术获得的尺寸检测结果以及铸件外型面通过蓝光扫描获得的尺寸检测结果,云图为扫描检测模型与模具内腔型面模型的比对结果,发现局部的收缩变形量受到支板、壁厚等因素影响。图3(b)为该环套环特征件局部收缩率与局部壁厚的关系图,发现型壳焙烧、合金浇注与凝固冷却过程中的变形量与局部结构特征息息相关,随着壁厚的减小,收缩率值越偏离1,证明薄壁处收缩和膨胀的量更高。Sabau^[46]利用有限元数值模拟分析技

术,发现糊状区区间的温度范围与铸件收缩率的模拟结果直接相关。Liu等^[45]设计了变截面、多维度和有/无约束部件铸件,利用三维扫描和工业计算机断层扫描技术(industrial computed tomography, ICT),分析了不同工艺中尺寸的变化及收缩的变化,最后得出整个液态精密成型过程中收缩与尺寸之间的指数关系,并讨论了尺寸变化的机制,以指导模具的尺寸设计和蜡模的修整,减少试错成本。Wang等^[47]利用蜡模扫描模型作为合金凝固冷却数值模拟的输入,发现壁厚误差主要遗传于蜡模阶段,轮廓误差源于合金凝固收缩变形。图3(c)为大型复杂薄壁后机匣合金浇注与凝固冷却过程尺寸变形的数值模拟结果,针对该大型、复杂、薄壁结构,本团队建立了热弹塑性高温合金凝固冷却-退让性陶瓷铸型变形计算模型,根据位移场云图,发现最大变形量接近15 mm,外环直径收缩量接近30 mm,与实验数据相吻合,实现了航空关键重要构件尺寸变形量由经验估测到数值计算的模式转变。

陶瓷型芯在合金浇注凝固过程中发生位置偏移与形状变化,使铸件壁厚与空腔型面形状发生变化。浇注过程中,型芯偏移受到流动场-变形场的耦合作用,主要驱动力是液态合金对型芯的冲压负荷,受流动场施加于型芯表面的静压与动压影响;发生偏移后,对于薄壁区域,微小的空腔体积变化又会反向影响液态合金的速度场与压力场。Dong等^[48]指出型芯偏移受合金浇注过程中静压力和动压力的影响,而静态压力的影响更大,模拟结果与实验结果相对误差小于18.2%。基于预测结果设计并验证了一种蜡模反向补偿方法,使型芯的最大位移降低了51.6%。Cui等^[49]提出基于数值模拟方法优化的型芯固定端布局的方法,通过使用优化后的固定端布局,有效控制了芯片偏移量,使叶片的最大壁厚误差减少42.02%。

机器学习模型与新型数据驱动方法为复杂结构合金铸件凝固冷却过程尺寸变形预测与抑制提供了新思路。Wang等^[50]探究了液态精密成型模具设计余量和浇注工艺参数对K4169型号高温合金环套环类型铸件型面尺寸变形量的影响,发现陶瓷铸型预热温度的影响最大。通过径向基神经网络模型优化合金浇注温度、陶瓷铸型预热温度与模具设计余量值,优化后的铸件尺寸满足CT6标准。随后提出了一种集成计算(ICME)软件平台AICAST,实现DOE设计并自动运行数值模拟仿真软件的本文件,较传统手动操控图形界面的方式,计算效

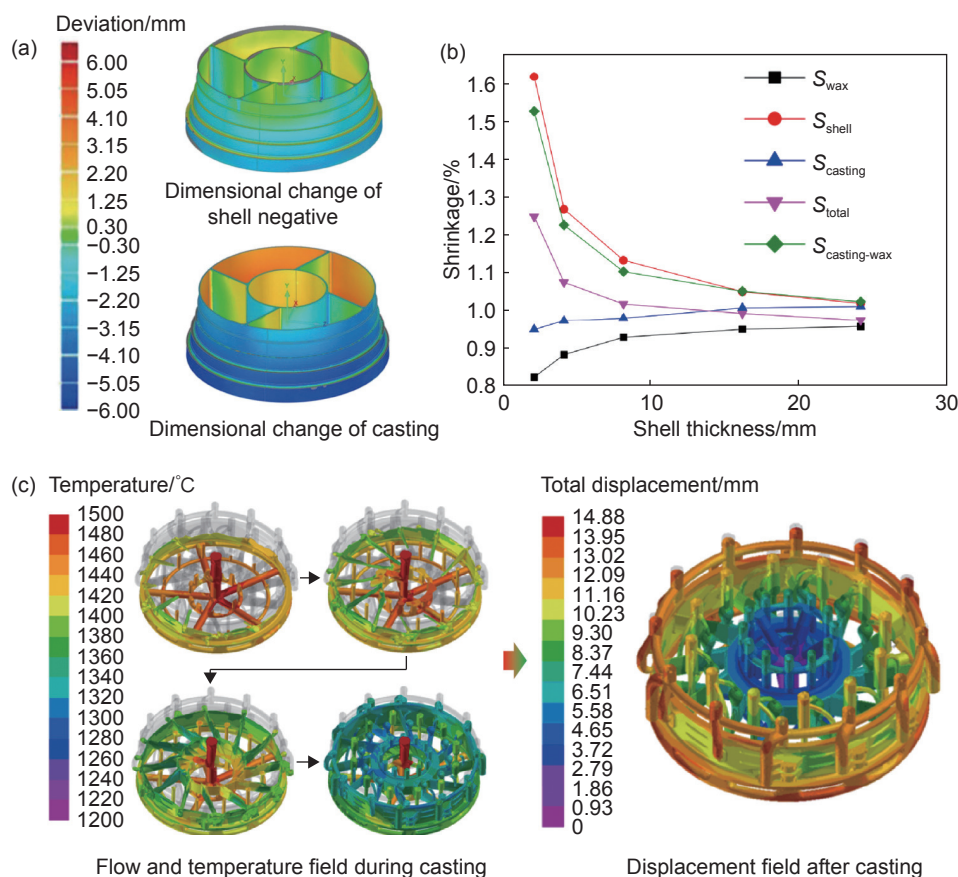


图3 陶瓷铸型-合金系统变形示例 (a)环套环简化特征件铸型-合金系统型面尺寸传递与变形扫描数据^[45]; (b)环套环简化特征件型面尺寸变化量与局部壁厚关系^[45]; (c)涡轮后机匣合金浇注与冷却凝固过程陶瓷铸型与铸件尺寸变形数值模拟结果

Fig. 3 Deformation of shell-alloy system (a)scanning data of dimensional change in shell-alloy system for a ring-to-ring typical casting^[45]; (b)relationship between dimensional change and local wall thickness of a ring-to-ring type casting^[45]; (c)numerical simulation of shell and casting's dimensional deformation during alloy pouring and cooling solidification for turbine rear casing

率进一步提升^[51]。Mou等^[52]针对传统有限元模型难以实现精准、定量预测的难题,提出使用数字孪生模型预测涡轮叶片的残余应力,数字孪生模型以实时传感器数据和有限元模拟数据为输入,对数据模型进行更新和修正,实现较传统有限元模型更精确的预测。

随着计算机性能的不不断提升,出现了诸多具有更复杂、壁厚更薄结构铸件的尺寸变形数值模拟的研究报道。但目前主流研究集中于小型、中型铸件(<600 mm),Campbell^[53]定量验证了不同铸造工艺对铸件变形程度的影响,发现液态精密成型在小尺寸铸件生产过程中有良好的尺寸精度,但在大尺寸情况下,其尺寸精度如同砂型铸造。铸件尺寸变形与铸件尺寸大小之间的关系尚不明确,与小型、中型铸件不同,大型铸件充型流动过程中冷却凝固收缩现象更明显,温度场不均匀性造成的不均匀收缩与黏塑性变形规律更加复杂,其内在机制鲜有报道。

2 液态成型尺寸精确预先控制方法

液态精密成型从蜡模注射成型、蜡模组树、陶瓷铸型制备与焙烧到合金浇注、热处理等,型面尺寸从模具内腔型面开始,在不同材料类型、不同变形系统之间发生传递,变形量累积并最终反映到铸件外型面尺寸。铸件型面尺寸精度控制的相关研究可分为模具内腔型面设计技术与尺寸波动分析与抑制技术两方面。

2.1 压蜡模具内腔型面设计技术

目前,压蜡模具内腔型面设计技术的相关研究集中于以数值模拟结果为参考的模具内腔型面收缩率补偿设计方法,属于尺寸精度的预先控制。

基于网格模型节点的迭代式反变形方法是压蜡模具内腔型面设计方法中报道最多的,指利用铸件尺寸变形的数值模拟结果,比对各网格节点的误差向量,根据各网格节点的误差向量,对模具内腔型面采用反向且等模矢量的逆补偿方法。该方法

需经过多次“数值模拟+逆补偿”的迭代过程,直到数值模拟变形结果能够反映出变形后有限元网格模型外型面尺寸趋近于名义铸件模型的型面尺寸。Dou等^[54]提出将该方法用于涡轮叶片模具内腔型面的反变形设计,迭代四次后,再次输入修正后的模型型面尺寸进行数值模拟时,ProCAST软件的凝固冷却数值模拟结果仅能反映出0.001978 mm的铸件型面总形状误差。Chen等^[55]利用数值模拟技术,比较了经验性补偿设计和反变形两种模具内腔型面设计方法,与经验性补偿设计相比,反变形的设计更为合理。上述研究考虑了合金凝固冷却过程对型面尺寸变化的影响,官邦等^[56]将该方法进一步拓展到考虑蜡模注射成形与合金凝固冷却双流程对型面尺寸变形影响的控制中,针对STL类型的网格模型文件在导入导出过程中不记录模型网格节点序号以及序号对应性的问题,提出了采用最近邻算法重构网格节点序号对应映射关系,逐网格节点计算节点在多流程中发生的总位移量,并对输入模型采用逆补偿的节点位移方法^[57],迭代数次后得到反变形模具内腔型面的设计模型,以该模型作为输入网格模型做数值模拟计算后,与名义铸件模型相比,仿真计算仅能反映出0.04 mm的网格节点位移偏差。Jiang等^[58]针对反变形方法易受网格误差影响的问题,提出采用泰勒函数的方法,根据离散的、各网格节点上的反变形量值,拟合构建连续的反变形量的函数,用于航空发动机涡轮叶片的反变形模具内腔型面设计。

基于结构特征尺寸的反变形方法指根据结构特征尺寸与规定特征尺寸的差异量,对模具内腔型面或蜡模校形模对应的结构特征尺寸值逆向补偿。Dong等^[7]针对用于高性能航空发动机的空心涡轮叶片,通过变形模拟结果对铸件在不同二维叶型截面上的轮廓尺寸变形进行解耦,分解为收缩部分、扭转部分与弯折部分,基于解耦后各变形特征尺寸的变化量优化模具内腔型面模型对应截面上的特征尺寸值,将优化后的模具内腔型面各二维截

面进行堆叠,重构出完整的、优化后的模具内腔型面设计模型。然而, Ren等^[59]指出这种将二维截面堆叠的方法会引入误差,提出了基于逐个网格节点的收缩率计算与反向补偿方法,优化后的变形在设计要求的0.15 mm以内,叶片的最大变形降低了68.2%。韩伟等^[60]提出针对测量与统计的逆向校正蜡模方法,通过对特征尺寸测量数据值的统计结果,设计反变形蜡模校形模的特征尺寸值,对蜡模外型面尺寸采用机械校形方法,用于大型涡轮叶片的尺寸精度控制中。

与针对正向数值模拟预测误差的逆向补偿的思路不同, Beckermann等^[61]提出利用逆弹性本构模型的反向数值模拟方法,将名义铸件模型作为输入几何形状,利用反向数值模拟分析技术直接输出原始模具内腔型面模型,该方法能够避免反复“数值模拟+逆补偿”的迭代过程。特别对于某些对于大型、复杂、薄壁铸件,能够显著提升设计效率。该方法已成功应用于合金凝固冷却过程的逆向模拟,预期也能应用于蜡模注射成形过程与型壳焙烧过程的逆向数值模拟。

基于有限元模型数值模拟结果的压蜡模具内腔型面设计方法为模具内腔形状的优化提供了模型基础和设计指导。这类压蜡模具内腔型面设计方法的有效性受到数值模拟模型准确程度和对液态精密成型工艺流程的覆盖程度的影响。纳入液态精密成型中更多工艺流程中的尺寸变形数值模型计算,建立更完备、经过验证的机理模型,是准确性提升的关键。图4为多流程节点位移方法示意图。如图4所示,液态精密成型领域目前已经报道过的变形模型包含:蜡模注射成形过程尺寸变形模型、型壳焙烧过程永久冻土分析模型、合金浇注与凝固冷却过程尺寸变形模型等,运用节点位移等方法能够实现更多流程集成的变形模拟与模具内腔型面设计。此外,随着数字化和机器学习算法的不断发展,探索基于数据驱动方法的压蜡模具内腔型面设计算法和模型,或是真正实现精准、定量的尺

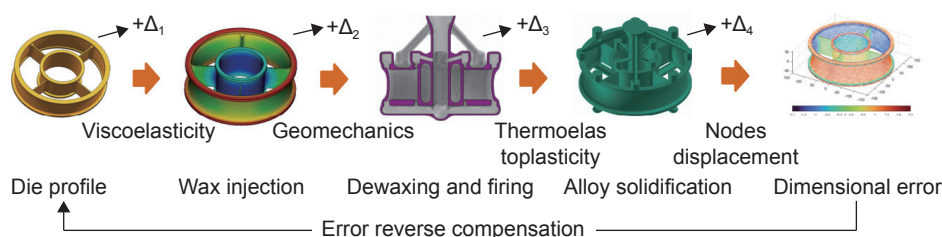


图4 多流程节点位移方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of multi-processes reverse deformation method based on displacement of mesh nodes

寸精度控制的必经之路。

2.2 尺寸波动分析与抑制技术

液态精密成型中,不同工艺流程中环境参数与工艺参数的随机波动与时变扰动使铸件型面的尺寸以特定分布的形式呈现。美国橡树岭实验室^[10]通过实验与模拟数据,指出时间依赖过程是波动性的主要来源,如蜡的黏弹性变形、陶瓷铸型和合金的黏塑性变形和蠕变等。

铸件尺寸波动的控制要求针对液态精密成型各流程的尺寸波动进行预测与抑制。Liu等^[62]引入了尺寸变化流(dimensional variation stream)的概念以及液态精密成型多流程过程中尺寸变化率、状态向量和工艺参数变化向量概念,构建了描述液态精密成型过程中尺寸变化流的状态空间模型,以及液态精密成型各工艺流程中利用误差流传递(stream of variation)分析方法。不同于装配、车工等系统,液态精密成型过程中型面尺寸不具有标准的定位特征,而且定位平面在各流程中也会产生位置或几何误差,使相对于定位平面变化的尺寸误差的计算带来不准确性。刘畅辉^[26]提出利用“几何中心”当作尺寸中心的方式、对于复杂曲面则采用最大内切圆圆心作为尺寸中心的方式进行尺寸定位,这种方式可以定量描述在不同工艺参数下、不同形状截面上,尺寸特征点的位移情况;利用拉丁超立方的实验设计(DOE)方法,将不同参数下、各工艺阶段的误差流设为状态变量进行建模分析,实现了离散化的误差流传递模型;采用基于满意度函数的极差对液态精密成型过程中的尺寸误差进行稳健优化,并采用遗传算法找到全局最优解。Jiang等^[63]通过选择一个阶梯金字塔状的构件研究结构特征的尺寸、位置和方向对该结构特征尺寸变形量、波动幅值与波动规律的影响,发现垂直于金字塔底部方向的尺寸变化与尺寸波动比与金字塔底部平行的方向更为明显。

液态精密成型各子流程中,压型-蜡料系统对尺寸波动的影响较大,是型面尺寸发生传递与变形的第一个变形系统,因而是铸件尺寸波动控制与预防铸件尺寸超差问题的关键。Peters^[64]对29种精铸件跟踪测量后发现,蜡模的尺寸波动在铸件的尺寸波动中占10%~70%。Wang等^[65]针对液态精密成型开发了一个结合随机森林回归器和 dung beetle 优化的机器学习框架混合预测模型,从蜡模和相应铸件的生产线上收集数据作为输入,通过特征工程技术选取最重要的特性,利用拒绝率分析和混合预测模型进行预测,能够准确预测空心涡轮叶片的关键

尺寸合格情况,相比传统模型,关键尺寸合格/不合格预测误差减少了22.4%,通过在蜡模阶段提早筛选出尺寸不合格的零件,减少了尺寸偏差波动造成的成本损失。

液态精密成型尺寸波动的研究需要运用统计相关的方法,在实测数据较为有限时难以对波动分布实现准确估计。在该领域,目前尚无以大数据为依托的相关研究报道。以实测工厂数据为依托,通过大数据的统计的方法,结合不确定性反向量化理论,实现各类铸件在不同生产设备、生产工艺、生产环境中的尺寸波动、误差与敏感性分析,或是实现波动机理建模、波动量化控制的关键。

3 未来发展趋势

当代航空发动机设计技术取得了飞速进步,对关键构件尺寸精度的要求更加严格,整体尺寸精度的平均要求从CT7变化到CT5。为了制造这些构件,近十年间,从三种材料单工序的液态精密成型技术到尺寸精确预先控制方法,已成为国内外液态精密成型研究的核心课题。当前,尺寸精度控制领域仍有如下三大挑战亟需解决。展望未来,为了应对挑战,不断发展的大数据和人工智能模型和方法将提供新的解决方案。

挑战(1):采用数值模型“驱动”压蜡模具内腔型面的设计方法中,液态成型数值模拟多流程机理模型不全、单工艺模型简化且不完备、参数设置无法反映实际工况,为压蜡模具内腔型面尺寸收缩补偿率计算带来不准确性。传递到铸件型面后,直接反映为尺寸超差。

精准、定量的数据驱动尺寸变形精准预测模型,以及建立在该模型之上的压蜡模具内腔型面设计方法或是解决思路。当前报道中出现的液态成型尺寸精度控制方法依然依托于“单工序尺寸变形预测+压蜡模具内腔型面收缩补偿率计算”的预先控制方法,尺寸设计的准确性易受到多流程模型不全、单流程物理模型不完备、热物性参数不准确、参数波动与时变扰动等因素的干扰。经实际开模后进行试生产,收集到的型面尺寸、环境与工艺参数等数据反映了液态成型过程实际的型面尺寸传递与变形状况、工厂实际的工况,是真正实现精准、定量的前提。然而,工厂内部虽然有大量生产数据,目前鲜有基于实际生产数据的尺寸变形智能学习模型和算法研究,导致实际生产仍然依靠不准确的事前设计与事后反复经验试错、修模的方法。

以实际生产数据为依托,建立精准且定量的尺寸变形预测模型,发明以数据驱动精准定量预测模型为核心的压蜡模具内腔型面设计方法,是解决我国航空发动机关键构件液态精密成型尺寸超差问题的必经之路。

挑战(2):采用机器学习模型与算法“驱动”压蜡模具内腔型面的设计方法中,铸件三维尺寸数据的高维度、稀疏、无标识特性阻碍了该领域通用的智能模型与算法的发展。此外,传统机器学习回归模型自由度较高,在以高维稀疏数据作为输入时,易导致过拟合现象。

构建新型机器学习模型或在已有机器学习模型上引入适用于液态精密成型尺寸数据的修正方法或是解决思路。传统方法,如线性回归,可能在处理高维、稀疏的输入数据时表现不佳。另一方面,深度学习方法,特别是卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和循环神经网络(recurrent neural network, RNN),虽然能够捕捉数据中的局部与整体特征和时间依赖性,在图像或者音频大数据处理中展现了其独特优势,但针对三维模型尺寸数据时,针对其稀疏性与高维特性的处理往往捉襟见肘。高维数据技术如支持向量回归模型(support vector regression, SVR)的核技巧,允许在隐式高维空间中进行非线性映射,通过构建具备液态精密成型变形规律“捕捉能力”的核函数,将高维点云数据降维映射到能够定量描述变形规律或特征的隐式空间,从而更好地处理数据稀疏性。此外, Lasso 回归、岭回归、ElasticNet 回归等,作为一种线性模型,类似于 L1 或 L2 等正则化,一种适用于铸件尺寸变形行为约束的正则化项,能够实现适用于液态精密成型变形特征的稀疏选择。

挑战(3):液态精密成型大数据的构建仍具有挑战,难以在数据中实现模式与模型的提取、构建与应用。无论基于数值模拟还是机器学习模型,液态精密成型理论的发展依然依托于人脑知识推理与定义,无法实现大数据驱动的技术发展模式。

搭建集成的、符合特定标准的微型全自动化实验室与数据智能分析系统的液态成型数字孪生平台或是解决思路。自动化液态成型微型实验室作为孪生体中的物理实体部分,源源不断地模拟并提取真实生产过程中的数据;数据智能分析系统作为孪生体中的虚拟实体部分,将是一个集成数据标准-数据存储-数据挖掘的大数据平台,降维并提取数据规律,构建工艺模型,规划新的实验方案,建立尺寸精度数字模型并校准多流程机理模型参数。

借助微型液态精密成型实验室不断地产出数据,构建液态成型三类变形系统多流程中的多物理场数字孪生体。该数字孪生系统将连接并整合工厂内不同类别构件的生产数据,构建统一的数据标准,保证数据的互通性和互操作性,构建新型数据融合算法,维护数据的一致性和对等性,摆脱数据孤岛,实现从传统经验驱动、数值模拟驱动到大数据驱动的转变。

参考文献:

- [1] LIU L. The progress of investment casting of nickel-based superalloys[J]. Foundry, 2012, 61: 1273-1285.
- [2] 陈荣章, 王罗宝, 李建华. 铸造高温合金发展的回顾与展望[J]. 航空材料学报, 2000, 20(1): 55-61.
CHEN R Z, WANG L B, LI J H. Review and prospects of the development of cast superalloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(1): 55-61.
- [3] 丁立铭. 21 世纪航空制造技术将发生质的飞跃——谈高推重比发动机的关键制造技术(上)[J]. 国际航空, 2002(1): 53-55.
DING L M. Aviation manufacturing technology will undergo a qualitative leap in the 21st century — discussing the key manufacturing technologies of high thrust-to-weight ratio engines (Part 1) [J]. International Aviation, 2002(1): 53-55.
- [4] 张立同. 近净形熔模精密铸造理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
ZHANG L T. Theory and practice of near net-shape investment casting [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [5] ROBINSON J J. Introducing the nominees for the greatest materials moments in history[J]. JOM, 2006, 58(11): 51-55.
- [6] 孙宝德, 王俊, 康茂东, 等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势[J]. 金属学报, 2022, 58(4): 412-427.
SUN B D, WANG J, KANG M D, et al. Precision casting technology and development trends of high-temperature alloy over-limit components[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(4): 412-427.
- [7] DONG Y W, LI X L, ZHAO Q, et al. Modeling of shrinkage during investment casting of thin-walled hollow turbine blades[J]. J Mater Process Tech, 2017, 244: 190-203.
- [8] 汪东红, 孙锋, 疏达, 等. 数据驱动镍基铸造高温合金设计及复杂铸件精确成形[J]. 金属学报, 2022, 58(1): 89-102.
WANG D H, SUN F, SHU D, et al. Data-driven design of nickel-based casting superalloys and precise forming of

- complex castings[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2022, 58(1): 89-102.
- [9] 金海鹏, 叶雷, 刘世英, 等. 民机材料适航符合性验证方法和技术发展 [J]. *航空材料学报*, 2022, 42(3): 1-11.
JIN H P, YE L, LIU S Y, et al. Research progress in airworthiness conformity verification method and technology of civil aircraft materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022, 42(3): 1-11.
- [10] SABA U A S, CORNELL N. Predicting pattern tooling and casting dimensions for investment casting, Phase III [R/OL]. United States: US Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 2007, DOI: 10.2172/923051.
- [11] SABA U A S, VISWANATHAN S. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 362(1): 125-134.
- [12] KUO C C, XU Y X. A simple method of improving warpage and cooling time of injection molded parts simultaneously[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 122(2): 619-637.
- [13] ZHANG Z Y, LIANG B N. The factors influencing the casting's dimension precision of molten mould during the process of making mould[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2002, 15(2): 15.
- [14] WANG N, WANG W H, JIANG R S, et al. Ceramic core shifting monitoring through clamping rods optimization for wax pattern of turbine blade[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5): 2193-2204.
- [15] WANG D H, HE B, LI F, et al. Numerical simulation of the wax injection process for investment casting[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28(2): 220-224.
- [16] WANG D H, HE B, LI F, et al. Cavity pressure and dimensional accuracy analysis of wax patterns for investment casting[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28(6): 637-642.
- [17] WANG D H, HE B, LI F, et al. Experimental and numerical analysis on core deflection during wax injection[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28(11): 1209-1214.
- [18] LIU C H, SUN J, LAI X M, et al. The assembly variation modeling for the rear casing wax part based on polar coordinate [C]//Proceedings of the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2015.
- [19] 张国栋, 许乔郅, 郑涛, 等. 航空装备电子束增材制造技术发展及路线图 [J]. *航空材料学报*, 2023, 43(1): 28-38.
- ZHANG G D, XU Q Z, ZHENG T, et al. Technology development and roadmap of electron beam additive manufacturing for aviation equipments[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(1): 28-38.
- [20] MISHRA S, RANJANA R. Reverse solidification path methodology for dewaxing ceramic shells in investment casting process[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, 25(12): 1385-1388.
- [21] 李亚芳, 孔小青, 刘俊朋, 等. 基于脱蜡前存放温度调控的型壳脱蜡裂纹防治 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43(9): 1282-1286.
LI Y F, KONG X Q, LIU J P, et al. Prevention and treatment of dewaxing cracks in mold shells based on storage temperature control before dewaxing [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2023, 43(9): 1282-1286.
- [22] MINAMI M, TATAMI J, IJIMA M, et al. In-situ investigation on crack-initiation and deformation of Al_2O_3 green bodies during dewaxing process by combined OCT-TG-FTIR and TMA[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(10): 15387-15394.
- [23] BRUM F J B, AMICO S C, VEDANA I, et al. Microwave dewaxing applied to the investment casting process[J]. *J Mater Process Tech*, 2009, 209(7): 3166-3171.
- [24] GILL Y Q, SAEED F, SHOUKAT M H, et al. A study on the dewaxing behavior of carbon-black-modified LDPE-paraffin wax composites for investment casting applications[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(7): 6715-6725.
- [25] GALLES D, MONROE C A, BECKERMANN C. Measurement and simulation of deformation and stresses in steel casting [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2012: 012049
- [26] 刘畅辉. 复杂薄壁件熔模铸造误差流建模与稳健控制方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
LIU C H. Research on error flow modeling and robust control method for investment casting of complex thin-walled parts [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [27] LIU C H, WANG F, JIN S, et al. Permafrost analysis methodology (PAM) for ceramic shell deformation in the firing process[J]. *International Journal of Metal Casting*, 2019, 13(4): 953-968.
- [28] WEI Y M, LU Z G, GUO X. Influence of alkaline oxide on the deformation of ceramic shell mould at high temperatures during investment casting[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(17): 21197-21204.
- [29] VENKAT Y, CHOUDARY K R, CHATTERJEE D, et al. Development of mullite-alumina ceramic shells for precision investment casting of single-crystal high-pres-

- sure turbine blades[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(19): 28199-28206.
- [30] JIN S, LIU C H, LAI X M, et al. Bayesian network approach for ceramic shell deformation fault diagnosis in the investment casting process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1): 663-674.
- [31] 刘岩松, 李文博, 刘永胜, 等. 3D 打印陶瓷铸型研究与应用进展 [J]. *材料工程*, 2022, 50(7): 18-29.
- LIU Y S, LI W B, LIU Y S, et al. Research and application progress of 3D printing ceramic casting mould[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(7): 18-29.
- [32] BAE C J, HALLORAN J W. Integrally cored ceramic investment casting mold fabricated by ceramic stereolithography[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8(6): 1255-1262.
- [33] CHEN S, SUN D, WANG C S, et al. Alumina-based ceramic mold with integral core and shell for hollow turbine blades fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 58: 103046.
- [34] WU H H, LI D C, TANG Y P. Fabrication of integral core/shell ceramic casting mould for hollow turbine blade[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 248: 231-236.
- [35] XU W L, LU Z L, TIAN G Q, et al. Fabrication of single-crystal superalloy hollow blade based on integral ceramic mold[J]. *J Mater Process Tech*, 2019, 271: 615-622.
- [36] BAE C J, KIM D, HALLORAN J W. Mechanical and kinetic studies on the refractory fused silica of integrally cored ceramic mold fabricated by additive manufacturing[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(2): 618-623.
- [37] LEWANDOWSKI M S, OVERFELT R A. High temperature deformation behavior of solid and semi-solid alloy 718[J]. *Acta Mater*, 1999, 47(18): 4695-4710.
- [38] LABERGÈRE C, LONG M, BADREDDINE H, et al. Thermomechanical model for solidification and cooling simulation of Ni-based superalloy components[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2021, 212: 202-219.
- [39] YU D J, XU D S, WANG H, et al. Refining constitutive relation by integration of finite element simulations and Gleeble experiments[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(6): 1039-1043.
- [40] GALLES D, MONROE C A, BECKERMAN C. Measurement and simulation of deformation and stresses in steel casting[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2012, 33(1): 012049.
- [41] 肖久寒, 姜卫国, 李凯文, 等. 利用引晶技术制备大尺寸镍基单晶涡轮导向叶片 [J]. *航空材料学报*, 2023, 43(3): 22-31.
- XIAO J H, JIANG W G, LI K W, et al. Manufacturing of large size nickel-based single crystal turbine guide vanes by grain continuator technology[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2023, 43(3): 22-31.
- [42] KORIC S, HIBBELER L C, THOMAS B G. Explicit coupled thermo-mechanical finite element model of steel solidification[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2009, 78(1): 1-31.
- [43] KORIC S, HIBBELER L C, LIU R, et al. Multiphysics model of metal solidification on the continuum level[J]. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 2010, 58(6): 371-392.
- [44] KORIC S, THOMAS B G. Efficient thermo-mechanical model for solidification processes[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 66(12): 1955-1989.
- [45] LIU C H, JIN S, LAI X M, et al. Influence of complex structure on the shrinkage of part in investment casting process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(5): 1191-1203.
- [46] SABAU A S. Alloy shrinkage factors for the investment casting process[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2006, 37(1): 131-140.
- [47] WANG D H, HE B, LIU S M, et al. Dimensional shrinkage prediction based on displacement field in investment casting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(1): 201-208.
- [48] DONG R Z, WANG W H, CUI K, et al. Core shifting prediction in filling process of hollow turbine blade investment casting[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 86: 253-265.
- [49] CUI K, JING L, JIANG R S, et al. Core shift limitation in investment casting process of hollow turbine blade [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, DOI: 10.1016/j.cja.2023.12.001. (in press)
- [50] WANG D H, YU J P, YANG C L, et al. Dimensional control of ring-to-ring casting with a data-driven approach during investment casting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(1): 691-704.
- [51] ZHAO D Y, ZHOU L Y, WANG D H, et al. Integrated computational framework for controlling dimensional accuracy of thin-walled turbine blades during investment casting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 129(3): 1315-1328.
- [52] MOU S, BU K, LIU J, et al. A digital twin based residual stress prediction method for turbine blades[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2569: 012067.
- [53] CAMPBELL J. The concept of net shape for castings[J]. *Mater Design*, 2000, 21(4): 373-380.

- [54] DOU Y L, BU K, DOU Y Q, et al. Reversing design methodology of investment casting die profile based on ProCAST[J]. *China Foundry*, 2010, 7: 132-137.
- [55] CHEN Y H, LIAO D M, LI W D, et al. Iterative reverse deformation optimization design of castings based on numerical simulation of solidification thermal stress[J]. *China Foundry*, 2022, 19(4): 342-350.
- [56] 官邦, 汪东红, 马洪波, 等. 熔模铸件尺寸控制的数字孪生建模关键技术与应用 [J]. 金属学报. DOI: 10.11900/0412.1961.2022.00263. (in press)
- GUAN B, WANG D H, MA H B, et al. Key technologies and applications of digital twin modeling for dimensional control of investment castings [J]. *Acta Metallurgica Sinica*. DOI: 10.11900/0412.1961.2022.00263. (in press)
- [57] 汪东红, 官邦, 陈晶阳, 等. 一种基于节点位移传递的熔模精密铸件反变形设计方法: CN202111530476.2 [P]. 2022-12-20.
- [58] JIANG R S, ZHANG D H, BU K, et al. A deformation compensation method for wax pattern die of turbine blade[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(9): 3195-3203.
- [59] REN S J, BU K, MOU S, et al. Control of dimensional accuracy of hollow turbine blades during investment casting[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 99: 548-562.
- [60] 韩伟, 于望生, 孔胜国, 等. 大型涡轮叶片精密铸造尺寸精度控制研究——反变形技术 [J]. 铸造, 2009, 58(11): 1108-1111.
- HAN W, YU W S, KONG S G, et al. Research on dimensional accuracy control of precision casting of large turbine blades - anti-deformation technology[J]. *Casting*, 2009, 58(11): 1108-1111.
- [61] GALLES D, LU J, BECKERMANN C. Determination of pattern allowances for steel castings using the finite element inverse deformation analysis[J]. *Int J Cast Metal Res*, 2019, 32(3): 123-134.
- [62] LIU C H, JIN S, LAI X M, et al. Dimensional variation stream modeling of investment casting process based on state space method [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, 229(3): 463-474.
- [63] JIANG J R, LIU X Y. Dimensional variations of castings and moulds in the ceramic mould casting process[J]. *J Mater Process Tech*, 2007, 189(1): 247-55.
- [64] PETERS F. Dimensional repeatability of investment castings[J]. *Incast*, 1997, 7: 7-12.
- [65] WANG W H, WANG Y B, JIANG R S, et al. Machine learning-enabled early prediction of dimensional accuracy for complex products of investment casting [DB/OL]. [2024-02-21]. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2825016/v1.

收稿日期: 2023-12-29; 修订日期: 2024-01-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB3706800); 国家自然科学基金重大课题 (52090042); 国家自然科学基金创新研究群体项目 (51821001)

通讯作者: 疏达 (1974—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为智能铸造, 联系地址: 上海市闵行区东川路 800 号上海交通大学 (200240), E-mail: dshu@sjtu.edu.cn; 孙宝德 (1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为高温合金液态精密成型, 联系地址: 上海市闵行区东川路 800 号上海交通大学 (200240), E-mail: bdsun@sjtu.edu.cn

(责任编辑: 徐永祥)