专家视野 803

熔模铸造过程数值模拟研究进展

许庆彦

(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)



许庆彦(1971-),男,工学博士,清 华大学教授、博士生导师。铸造学会常务理 事、国家重点研发计划项目首席科学家。 长期从事先进铸造成形及其多尺度、跨学科 建模与仿真研究。研究领域涵盖铸造成形/ 金属凝固和集成计算材料工程,涉及铸钢/ 铁、高温合金、铝合金、钛合金等铸造合 金,铸造工艺包括砂型铸造和熔模铸造、低 压铸造、离心铸造、定向凝固等特种铸造技 术。曾主持/参与国家重点研发计划、国家 自然科学基金、国家科技重大专项、两机专 项、973、863、国防重点专项等项目。发表 论文150余篇,被国内外引用2000余次。获 授权专利8项、计算机软件著作权13项。参 与撰写专著5部。以第1完成人获2018年北京 市科学技术奖一等奖、2021年中国发明协会 发明创新奖一等奖、2018年中国产学研合作 创新奖、2016年全国铸造行业优秀青年人才 奖等。研发的具有自主知识产权的单晶高 温合金定向凝固多尺度建模与仿真软件已 在铸造企业得到初步工程应用, 指导了实 际生产。为本科生和研究生讲授"材料加工 工艺""航空航天材料及其应用基础""现 代材料工艺学""先进材料加工技术(英 文)"等课程。

中图分类号: TG249.5; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4977 (2022)07-0803-11

基金项目: 国家科技重大专项(2017-VII-0008-0101, 2017-VI-0003-0073)赞助。 收稿日期: 2022-06-01。 **摘要:** 熔模铸造是一项传统的近净成形铸造工艺,在工业制造领域应用广 泛。随着社会的高速发展,船舶、航空等设备制造领域对熔模铸造产品的性 能要求日趋严格。传统基于试错法的熔模铸造工艺优化手段耗时长、资金需 求大,难以满足工业需求。数值模拟技术作为一种低能耗、高效率、短周期 的快速研究方法已经在熔模铸造领域得到了广泛认可。本文介绍了熔模铸造 工艺物理过程,描述了熔模铸造数值模拟常用的数学模型,总结了熔模铸造 蜡模成形、型芯成形和铸件成形过程中数值模拟技术的研究进展,展望了熔 模铸造在数值模拟方面的发展方向。

关键词: 熔模铸造; 数值模拟; 铸件成形; 蜡模成形; 型芯成形

熔模铸造也称失蜡铸造,是一项传统的铸造工艺,相关研究表明,国内最早的熔模铸造工艺制品可以追溯至青铜器时期^[1-2]。时至 今日,熔模铸造仍作为一种精密的成形技术广泛应用于航天航空、船 舶舰艇、车辆工程等多个领域的关键零部件的制备。熔模铸造适用于 大尺寸、薄壁、变截面等传统铸造工艺难以制备的复杂铸件的生产^[3], 属于"精密化""轻量化"和"近无余量"的近净成形工艺^[4]。

熔模铸造铸件质量与凝固工艺之间联系紧密,缺陷控制与工艺 优化是熔模铸造研究关注的重点^[5-9]。当凝固工艺控制不当时,铸件 容易出现冷隔、缩松、缩孔、裂纹等各类缺陷。工业生产中最为常见 的熔模铸造工艺优化方法是传统的试错法。试错法主要通过开展多组 不同工艺参数的熔模铸造实验,从中挑选出合适的工艺范围。试错法 实验周期长,对资金与人力的消耗较大。数值模拟技术作为一种日趋 成熟的辅助工艺设计方法已广泛应用于熔模铸造领域^[10-14]。现有关于 熔模铸造的模拟研究主要针对蜡模^[15-16]、型芯^[16]以及铸件^[18-19]三种对 象,开展温度分布^[20-21]、金属液流动^[22-23]、应力变化^[24-25]以及组织生 长^[26-27]等四个方面的模拟分析,以期望获得组织均一、无缺陷、性能 良好的熔模铸造成品。

本文从熔模铸造的物理过程出发,分别介绍了熔模铸造成形过 程中所涉及的宏微观数值模拟模型,讨论了不同模拟方法的适用范 围。针对熔模铸造过程中蜡模成形、型芯成形、铸件成形中用到的数 值模拟技术分别进行了详细的描述与分析,并重点介绍了数值模拟技 术在熔模铸造成形过程中的具体应用。最后展望了熔模铸造过程数值 模拟技术的发展趋势。

- 1 熔模铸造过程充型与凝固宏微观数理建模
- 1.1 熔模铸造工艺物理过程

相比于传统砂型铸造,熔模铸造工艺能更准确地还原出铸件的



几何尺寸,获得更高的表面精度,其主要的工艺过程 如图1所示^[28]。熔模铸造主要包括蜡模制备、组装蜡 模、制壳、脱蜡、金属液浇注及凝固、去壳等工艺过 程。在某些熔模铸造工艺中,除了制备蜡模外,还需 要制备陶瓷型芯,用于构造铸件中的空腔。 熔模铸造工艺中的蜡模和型芯一般采用注塑的 方式制备。制备过程涉及流体流动、温度变化、应力 应变等复杂物理变化,对铸件的尺寸精度具有重要影 响。对于铸件而言,金属液充型及凝固是决定其是否 产生杂晶、缩孔等缺陷的关键过程。



1.2 熔模铸造过程充型与凝固宏观物理场模型

а

熔模铸造过程中的蜡模、陶瓷型芯和液态金属的 充型、凝固和应力变形过程一直是熔模铸造数值模拟 研究的重点。熔模铸造过程中涉及到的充型过程需要 满足体系的质量守恒和动量守恒。一般采用耦合连续 性方程和N-S方程对充型过程进行求解:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \rho\vec{g} + \vec{F}_{s} \qquad (2)$$

式中:ρ为密度,v为速度矢量,p为压力,g为重力加 速度,F_s表示表面张力。采用传热方程计算体系的温度 分布,模拟蜡模、型芯或液态金属凝固过程中热量交 换:

$$\rho c_{\rm p} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left(\lambda \Delta T \right) + \rho \Delta H \frac{\partial f}{\partial t} Q_{\rm r} \qquad (3)$$

式中: c_p 为比热容,T为热力学温度,t为时间, λ 为导 热系数, ΔH 为结晶潜热,f为固相率。 Q_r 为与环境之间 的热量交换,在熔模铸造中一般主要指型壳与外界的 热辐射换热。

铸件凝固后的应力分布和应变大小也是熔模铸造 关注的重点。晶体弹塑性有限元方法是一类求解应力 场分布的常见数学方法,在熔模铸造铸件应力场模拟 中应用广泛。应力-应变本构模型是准确求解铸件残余 应力应变的关键,一般需要通过实验方法获得。主流 的弹塑性力学模型包括Perzyna 模型、牛顿模型、Strain Hardening Creep 模型。不同的力学模型的求解方式有 所不同,但其单元总变形均可以分为弹性变形和塑性 变形两个部分:

$$F = F^e F^p \tag{4}$$

1.3 液态金属凝固过程组织生长模型

随着对熔模铸造铸件的要求日益增高,传统的宏 观温度场、流场、应力场模拟已不足以满足熔模铸造 研究的需求,熔模铸造数值模拟研究也逐渐朝着组织 模拟的方向发展。熔模铸造组织模拟中相场法和元胞 自动机方法应用最为广泛。

1.3.1 相场法

相场方法是基于金兹堡朗道二级相变理论的组织 生长模拟方法,具有坚实的物理学基础,其自由能泛 函的表达式为:

$$F(\{\boldsymbol{\Phi}_{\alpha}\}, \ \{\vec{c}_{\alpha}\}) = \int_{\Omega} f(\{\boldsymbol{\Phi}_{\alpha}\}, \ \{\vec{c}_{\alpha}\}) \qquad (5)$$

式中: $F(\{\boldsymbol{\Phi}_{a}\}, \{\vec{c}_{a}\})$ 为自由能泛函, $\boldsymbol{\Phi}_{a}$ 为a相的相场变 量, \vec{c}_{a} 为a相的成分浓度, Ω 为计算域。 $f(\{\boldsymbol{\Phi}_{a}\}, \{\vec{c}_{a}\})$ 为自由能密度函数:

$$f = f^{intf}(\{\boldsymbol{\Phi}_{a}\}) + f^{chem}(\{\boldsymbol{\Phi}_{a}\}, \{\boldsymbol{c}_{a}^{k}\}) \qquad (6)$$

$$f^{intf}(\{\boldsymbol{\Phi}_{\alpha}\}) = \sum_{\alpha=1}^{\nu} \sum_{\beta=\alpha+1}^{\nu} \frac{4\sigma_{\alpha\beta}}{\eta_{\alpha\beta}} \left(-\frac{\eta_{\alpha\beta}^2}{\pi^2} \nabla \boldsymbol{\Phi}_{\alpha} \nabla \boldsymbol{\Phi}_{\beta} + \boldsymbol{\Phi}_{\alpha} \boldsymbol{\Phi}_{\beta}\right) \quad (7)$$



$$f^{chem}(\{\boldsymbol{\Phi}_{\alpha}\}, \{\boldsymbol{c}_{\alpha}^{k}\}) = \sum_{\alpha=1}^{n} \boldsymbol{\Phi}_{\alpha} f_{\alpha}(\vec{c}_{\alpha}) \qquad (8)$$

式中: $f^{intf}(\{ \boldsymbol{\Phi}_{a} \}), f^{chem}(\{ \boldsymbol{\Phi}_{a} \}, \{ \boldsymbol{c}_{a}^{k} \})$ 分别为界面自由能 密度函数和化学自由能密度函数。v为相的个数, $\sigma_{a\beta}$ 为 α 相与 β 相之间界面能。 $f_{a}(\vec{c}_{a})$ 为体积自由能密度函数。

1.3.2 元胞自动机方法

元胞自动机是一类数学方法,广泛应用于交通、 通讯领域。Rappaz等^[29]首次将其引入凝固组织生长模 拟。元胞自动机方法通过计算凝固界面的移动速度, 来描述晶体的生长过程:

 $v_n(\Delta T) = \alpha \Delta T^2 + \beta \Delta T^3$ (9) 式中: v_n 为界面法向推进速度, $\alpha \pi \beta$ 是速度动力学系数。

2 铸件成形过程的数值模拟

2.1 宏观物理场(温度场、流场、应力场)

液态金属成形王艺直接决定了铸件是否会产生各 类缺陷。在液态金属成形数值模拟的研究初期,由于 计算机计算能力的限制,相关模拟研究主要集中在凝 固过程中温度场的计算^[30-33]。随着计算能力的增加以及 对数值模拟技术的日趋重视,液态金属成形数值模拟 计算域逐渐由二维拓展至三维,换热方式也由简单的 热传导拓展至对流换热、热辐射换热以及接触换热^[34]。 在潜热问题的处理上逐渐发展出了温度回升法、等价 比热法、热焓法等多种方法。进入20世纪后,单纯的 温度场计算已经无法满足液态金属成形模拟的需求, 为了模拟充型过程中金属液的压力分布和流动状态, 各类流体模拟求解算法和模型得到了迅速的发展^[35-37]。 在温度场和流场模拟技术得到应用后,铸件凝固冷却 过程中的应力应变问题成为了学术界关注的重点,相 关求解算法也得到了快速的发展和广泛的应用^[38]。目前,随计算能力的空前提高,液态金属成形数值模拟 技术正向宏微观组织模拟方面稳步发展。

铸件充型与凝固过程的数值模拟研究早期主要应 用于铸钢材料^[7-8,39],后来逐渐拓展到钛铝合金^[40]和高 温合金^[41-42]。工艺也由最初的重力铸造^[7-8,43-44]延伸至 离心铸造^[45-47]、定向凝固^[9,20]。铸钢件熔模铸造模拟结 果如图2所示^[7]。在铸钢件熔模铸造凝固模拟研究中, 补缩通道的预测是研究的重点之一。模拟研究可以预 测液态金属的补缩通道是否被堵塞,并通过优化冒口 大小和位置、改变浇注系统结构等方式来减少缩孔缺 陷。

为了保证不锈钢铸件的充型完整性,消除铸件浇 不足缺陷,Wang等人^[44]设计了4种不同的浇注系统来 研究封闭叶轮铸造中304不锈钢金属液的流动和凝固行 为。所设计的浇注系统和相应的充型模拟结果如图3所 示。图3a,3c为顶部浇注系统,图3b,3d分别为底部和 侧面浇注系统。模拟结果表明,不同的浇注系统对金 属液的充型有明显的影响。对于带有复杂叶轮的盘梯 结构,底部和侧面浇注系统可能更有利于金属液的充 型。

对于大型薄壁回转体结构,离心铸造是一种常见 的成形方式。离心铸造可以与熔模铸造相结合,适用 于有高精度需求的回转体铸件。邵珩等人^[45-46]建立了基 于非均匀有限差分网格的弱可压缩模型,模拟了钛合 金薄壁件在离心铸造工艺下金属液的凝固过程,结果 如图4所示。模拟结果表明,离心力一方面有助于金属 液的充型以及减小缩孔体积,但在另一方面也会促成 缩孔扩展。陶攀等人^[47]利用该模型对比模拟了大型钛 合金薄壁部件在重力铸造和离心铸造工艺下的充型过 程与温度分布,并预测了铸件的缩孔缺陷情况,模拟 结果如图5所示。研究结果表明,对于所研究的具有复 杂浇注系统的回转体铸件,离心铸造工艺与重力铸造



图2 ZG310-570铸钢支架熔模铸造凝固过程模拟

Fig. 2 Simulation of the solidification process in the investment casting of the ZG310-570 casting steel support





(a1-d1)浇注系统结构图; (a2-d2)充型结果模拟图
图3 不同浇注系统下304不锈钢金属液在封闭叶轮中充型状态模拟结果
Fig. 3 Simulation results of the filling state of the 304 stainless steel metal liquid in closed impeller under different gating systems







工艺相比在缩松缺陷方面没有明显改善。

大型复杂薄壁高温合金结构件在金属液凝固时容易产生缩松缺陷。为减少缩松缺陷,可以在铸型中增加水冷系统,通过热控凝固工艺控制金属液的凝固顺序,减少孤立过冷区和热节的产生。戚翔^[41]利用ProCAST软件模拟了热控凝固工艺下K4169高温合金机匣铸件的缩孔、缩松情况,模拟结果如图6所示。结果表明,热控工艺可以在铸件内部建立纵向温度梯度,使得金属液具有较好的顺序凝固趋势,从而改善缩松缺陷的产生。

熔模铸造和定向凝固结合起来,可用于制造航空 发动机定向凝固叶片。李忠林^[38]模拟了DD6镍基单晶高 温合金叶片在定向凝固过程中的温度场分布,随后将 叶片温度场分布结果导入有限元力学分析软件Abaqus



Fig. 5 Shrinkage simulation results of the titanium alloy intermediate casing of the aero-engine under gravity casting and centrifugal casting



(a) 缩孔

(b) 缩松

图6 K4169高温合金薄壁铸件热控凝固工艺的数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of the thermal controlled solidification process for the K4169 superalloy thin-walled castings

中,进一步分析叶片的应力应变情况。叶片塑性变形 模拟结果如图7所示,叶片截面突变处和引晶条连接处 出现了明显的塑性变形,而其他部位变形较小,与实 验结果一致。

2.2 组织模拟

金属液充型或凝固过程中宏观模拟研究能模拟铸 件的成形过程,可以预测缩孔、浇不足等宏观缺陷, 但是无法模拟微观偏析等更小尺度的现象和缺陷。随 着计算机的不断发展,液态金属凝固过程组织模拟研 究也经历了从宏观到微观的过程。早期的组织模拟研 究主要集中在利用有限差分或者有限元网格耦合元胞 自动方法对晶粒组织形貌进行模拟。张航^[48]建立了耦 合温度场的元胞自动机有限差分模型,模拟了DD6镍 基单晶叶片熔模铸造定向凝固生长过程的组织形态, 结果如图8所示。叶片不同横截面枝晶组织的模拟结果 与实验结果一致,模型准确性高。由于温度梯度的差 异,叶片不同高度上枝晶的形貌和间距有所不同。



7 語话

专家视野

807

(a) 叶盆一侧(b) 叶背一侧(c) 4个不同位置的截面(800℃) 图7 熔模铸造DD6镍基单晶高温合金空心涡轮叶片塑性变形分布 模拟结果

Fig. 7 Simulation results of the plastic deformation distribution of the DD6 nickel-based single crystal superalloy hollow turbine blades fabricated by the investment casting



(a)叶片整体的晶粒结构;(b1)螺旋选晶器中的枝晶形态模拟结果;(b2)螺旋选晶器中的枝晶形态实验观察结果;(c1)叶片榫部的枝 晶形态模拟结果; (c2)叶片榫部的枝晶形态实验观察结果; (d1)叶片中的枝晶形态模拟结果; (d2)叶片中的枝晶形态实验观察结果 图8 DD6镍基单晶高温合金叶片组织形态

Fig. 8 Microstructures of the DD6 nickel base single crystal superalloy blade



般而言,温度梯度较低的位置一次枝晶臂间距较大, 枝晶形貌相对更为粗壮。

型壳直接能够影响铸件的散热性能,进而影响铸件组织形态。界面换热系数大、导热性高的型壳能够使铸件更快的冷却。邵珩^[45]利用元胞自动机方法模拟 了陶瓷型壳和石墨型壳下熔模铸造铸件的组织生长形貌,结果如图9所示。试验结果与模拟结果基本一致。 采用陶瓷型壳的情况下,铸件散热较慢,铸件内部温 度梯度较低,组织趋于粗大。而在石墨型壳条件下, 由于其优异的散热性能,金属液与石墨接触时,形核 数目大量增加,形成的晶粒组织细小均匀。

进入21世纪后,相场模拟在熔模铸造研究中逐渐 受到重视。杨聪等人^[49]通过多元多相场模型模拟分析 了CMSX-4镍基单晶高温合金熔模铸造定向凝固过程组 织的生长状态和元素的分布规律,模拟结果如图10所 示。模拟结果表明,凝固过程中不同的元素在固液相 中的元素分布差异较大,微观偏析现象明显。该模型 通过耦合格子玻尔兹曼方法模拟了金属液的流动,结 果表明,金属液流动能够加速元素的分配过程,对枝 晶组织的生长形态具有明显影响。



(c)石墨型壳铸造组织金相图
(d)石墨型壳铸造组织模拟结果
图9 Ti6Al4V薄壁件熔模铸造晶粒组织
Fig. 9 Microstructures of the Ti6Al4V thin - wall parts by the investment casting



(a-g) Al, Co, Cr, Re, Ta, Ti, W元素分布; (h)液相速度分布

图10 CMSX-4镍基单晶高温合金熔模铸造定向凝固生长枝晶组织相场模拟

Fig. 10 Phase field simulation of the directional solidification of the CMSX-4 nickel-based single crystal superalloy by the investment casting

对于相场等金属液凝固过程微观组织模拟方法而 言,目前最为关键的问题是其计算量较大,模拟时一 般仅选取某个特定的观察微区,难以模拟宏观尺度下 铸件的组织和成分分布情况。

3 蜡模成形模拟

熔模铸造中蜡模的制备是一道关键的工序, 蜡模 的质量直接影响最终铸件的精度。蜡模制造中的充型 过程和冷却过程是研究的重点。充型过程需要优化充 型速度、充型压力来保证蜡料流动的稳定性, 避免产 生卷气等现象。而其冷却过程则需要合理控制保压压 力等工艺参数, 以缩小其冷却后的收缩率, 获得更高 的尺寸精度。早期的熔模铸造数值模拟研究主要关注 铸件成形过程的温度、应力等物理场的变化和分布。 随熔模铸造数值模拟技术的不断发展, 蜡模成形过程 的数值模拟研究也逐渐受到了学术和工业界的重视。

为了探究环状蜡模的尺寸变形,Wang等人^[50]通 过铸造商业软件ProCAST模拟了蜡模冷却后的收缩变 化,最终的位移变化模拟结果如图11所示。蜡模沿某 一方向的最大位移为4.2 mm,最大收缩率为2.41%。模 拟结果表明,环状蜡模的变形并不均匀,零件两侧呈 现相反的变形趋势。

华中科技大学段伟等人^[15]利用华铸CAE/InteCAST 铸造工艺模拟软件,将蜡料的流动视为不可压缩粘性



专家视野

809



流体,采用SOLA-VOF迭代求解有限差分网格下的连续性方程和*N-S*方程,模拟研究了充型速度在3 m/s到20 m/s下机匣件蜡模的充型过程,模拟结果如图12所示。研究结果表明,当充型速度小于5 m/s时,充型过程中的气液界面稳定,液面波动较小。而随着充型速度增大,气液界面逐渐失稳,液面波动幅度增大,并开始出现卷气现象。研究认为,这种现象产生的主要原因在于液体雷诺数随流速的增大而增加,流体铸件从层流转向紊流,最终导致界面失稳。

某些蜡模模具中含有水冷通道,水冷通道的存在 能有效减少蜡模的冷却时间,提高生产效率。Kuo



Fig. 12 Filling conditions of the casing wax at different speeds

等人^[51]研究了模具内水冷通道与蜡模变形量之间的关系。研究分析了无冷却通道、传统直线排列冷却通道以及环状随形冷却通道三种情况下蜡模的变形情况。 冷却管道排列示意和模拟结果如图13和图14所示。结 果表明,冷却管道的设计能明显影响蜡模的变形量。 环形冷却通道下成形的蜡模无论是*x、y、z*方向的变形 量还是总变形量均小于传统直线排布冷却通道和无冷 却通道。



(a) 无冷却通道

专家视野

810

(b)直线式排布 图13 蜡模模具冷却通道结构 Fig. 13 Structures of the cooling channel for the wax pattern



(a) x方向变形量; (b) y方向变形量; (c) z方向变形量; (d) 总变形量
图14 蜡模冷却后变形量
Fig. 14 Deformation of the wax pattern after cooling

4 陶瓷型芯成形模拟

熔模铸造过程中,型芯质量是影响铸件最终尺寸 精度的重要因素之一,为减少报废率,提高型芯尺寸 精度,学者们逐渐开始了对熔模铸造型芯成形的数值 模拟研究。目前,针对陶瓷型芯成形过程的模拟研究 主要考量在充型及凝固过程中的尺寸变形。

型芯产生的偏移会导致最终铸件精度降低甚至 铸件报废,在空心复杂零件的注蜡过程中,蜡熔体可 能沿型芯两侧不对称流动,从而导致型芯移动,致使 蜡模的壁厚不均匀。Wang等人^[52]采用支持向量回归 (SVR, support vector regression)方法预测了泵体型 芯的位移变形量,结果如图15所示。研究分别探索了 充型压力、注射温度和注射速度对型芯变形的影响。 模拟结果表明,在较低的注射温度下,蜡料黏度高, 作用在蜡模型芯上的应力分布范围大,型芯变形明 显,而在较高注射温度下,型芯变形较小。

Chauhan等^[53]人利用Moldex3D注塑流动软件研究 了注射压力和保压时间等注射成形参数对透平叶片型 芯成形过程的应力分布的影响情况,模拟结果如图16 所示。其研究结果表明,相比于充型流速,保温时间



Vol.71 No.7 2022

(c)环状随形排布

Fig. 15 Simulation result of the displacement deformation of the mold core of the pump

对型芯的收缩、翘曲变形具有更大的影响。随着保压 压力和保压时间的增加,收缩值趋于减小。

伍林等人^[54]采用Moldflow注塑商业模拟软件,模 拟了空心透平叶片陶瓷型芯的注射成形过程与气穴缺 陷产生位置,模拟结果分别如图17和图18所示。通过 对比图18中气穴的模拟结果和实验结果,验证了当前 模拟型芯成形气穴缺陷具有较高准确性。

5 总结与展望

本文简单回顾了熔模铸造成形过程数值模拟研究





(a)填充阶段的熔体前沿温度

(b)填料阶段的压力分布 (c)注射阶段应力分布 图16 透平叶片型芯充型阶段应力分布





图17 透平叶片陶瓷型芯充型过程模拟 Fig. 17 Simulation results of the filling process of the turbine blade ceramic core





进展情况。经过多年的发展,数值模拟技术已经成为 熔模铸造工艺优化中必不可少的关键手段。未来,熔 模铸造数值模拟技术还有望从如下几个方面进行进一 步加强和突破。

(1)构建熔模铸造工艺多物理场模拟模型和全流 程模拟体系,将蜡模成形、陶瓷成形以及铸件成形过 程有机结合,模拟熔模铸造全周期生产过程。

(2)建立大数据分析模型,通过大数据分析减少 实验和模拟次数,加速工艺优化。构建人工智能分析 手段,建立工艺参数响应机制,实现智能工艺寻优与 自动优化工艺。

(3)耦合宏观物理场与微观组织场,开发跨尺度 组织模拟模型,研究熔模铸造工艺多尺度耦合下的组 织生长过程。开发模拟加速程序,减少组织模拟时间 消耗,实现宏观尺度铸件相场组织模拟。

致谢:清华大学材料学院先进成形制造教育部重 点实验室的博士生夏鹄翔,硕士生冯秋水参与了本文 的撰写工作。



参考文献:

- [1] 华觉明,郭德维.曾侯乙墓青铜器群的铸焊技术和失蜡法 [J]. 文物, 1979(7): 46-48, 45, 100.
- [2] 华觉明, 贾云福. 曾侯乙尊、盘和失蜡法的起源 [J]. 自然科学史研究, 1983 (4): 352-359.
- [3] 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.
- [4] 周志杰,孔佑顺,李飞,等.复杂薄壁ZL101A壳体的近净成形技术研究[J]. 热加工工艺,2021,50(21):58-61,57.
- [5] SABAUAS, VISWANATHANS. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 362 (1-2) : 125–134.
- [6] REZAVAND S, BEHRAVESH A H. An experimental investigation on dimensional stability of injected wax patterns of gas turbine blades [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182 (1-3): 580–587.
- [7] 于靖,张新平,许庆彦,等.基于熔模铸造模拟软件的铸钢件工艺优化 [J].特种铸造及有色合金,2004(5):36-37.
- [8] 于靖,许庆彦,柳百成.铸钢件熔模精密铸造凝固过程数值模拟[J].铸造,2006(5):473-476.
- [9] 唐宁,许庆彦,柳百成.重型燃气轮机叶片熔模铸造凝固过程数值模拟 [J].铸造技术,2012,33 (5):558-561.
- [10] LEWIS R W, RAVINDRAN K. Finite element simulation of metal casting [J]. International journal for numerical methods in engineering, 2000, 47 (1-3): 29-59.
- [11] SABAUAS. Numerical simulation of the investment casting process [J]. Transactions of American Foundry Society, 2005, 113: 407-417.
- [12] RAFIQUE M M A, IQBAL J. Modeling and simulation of heat transfer phenomena during investment casting [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52 (7–8) : 2132–2139.
- [13] DONG Y, BU K, DOU Y, et al. Determination of interfacial heat-transfer coefficient during investment-casting process of single-crystal blades [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (12) : 2123–2131.
- [14] ANGLADA E, MELéNDEZ A, MAESTRO L, et al. Adjustment of numerical simulation model to the investment casting process [J]. Proceedia Engineering, 2013, 63: 75–83.
- [15] 段伟,殷亚军,沈旭,等.基于华铸CAE/InteCAST的蜡模充型过程数值模拟与分析 [J]. 热加工工艺, 2021, 50(23): 86-89.
- [16] 崔馨检,练健,张新平.基于有限元的熔模铸造蜡模熔融沉积成形过程研究 [J].铸造,2020,69(11):1203-1206.
- [17] 郭雄,杨啊涛,赵代银,等.基于悬臂结构型芯的燃机叶片铸造过程位移、壁厚演化研究[J].动力工程学报,2021,41(6):452-459.
- [18] RAHIMIAN M, MILENKOVIC S, MAESTRO L, et al. Physical simulation of investment casting of complex shape parts [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46 (5): 2227–2237.
- [19] ANGLADA E, MELéNDEZ A, MAESTRO L, et al. Finite element model correlation of an investment casting process [C]//Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2014, 797: 105–110.
- [20] 唐宁,许庆彦,柳百成. 重型燃气轮机叶片熔模铸造过程数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (11): 1028-1031.
- [21] 邵珩,李岩,南海,等. 熔模铸造条件下Ti6Al4V合金铸件与陶瓷型壳间界面换热系数研究 [J]. 金属学报,2015,51 (8):976-984.
- [22] JIE Z, DONGQI Z, PENGWEI W, et al. Numerical simulation research of investment casting for TiB2/A356 aluminum base composite [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43 (1): 47–51.
- [23] GRANDE MA, PORTAL, TIBERTO D. Computer simulation of the investment casting process: widening of the filling step [C]//Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2007: 1–16.
- [24] 许盛发,张守银,刘敬伟,等. 熔模铸造泵壳类铸铁铸件热裂问题分析及解决方案 [J]. 铸造技术, 2021, 42(12): 1051-1054.
- [25] 洪耀武,王铁军,韩大平,等.调节片熔模铸造过程的应力数值模拟 [J].中国有色金属学报,2012,22(7):1897-1903.
- [26] 夏鹄翔,杨聪,许庆彦.镍基单晶高温合金定向凝固微观组织模拟及试验验证 [J].特种铸造及有色合金,2021,41(11):134-1338.
- [27] 许庆彦,夏鹄翔.镍基高温合金叶片定向凝固过程宏微观数值模拟研究进展 [J]. 航空发动机,2021,47(4):141-148.
- [28] VECCHIO C D, FENU G, PELLEGRINO FA, et al. Support vector representation machine for superalloy investment casting optimization [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 72 (AUG.): 324–336.
- [29] RAPPAZ M, GANDIN C A. Probabilistic modelling of microstructure formation in solidification processes [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41 (2): 345-360.
- [30] CHAN Y W. Finite element simulation of heat flow in continuous casting [J]. Advances in Engineering Software (1978), 1989, 11 (3): 128–135.
- [31] CORBETT C F, PICARD M. Benefits of solidification simulation for steel castings [J]. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1990, 98: 311-318.
- [32] DEWHURST F, DALE B. A microcomputer simulation of an automated non ferrous sand casting foundry [J]. Omega, 1983, 11 (6): 599–606.
- [33] BERRY J T, PEHLKE R D, DESAI P V. The place of computer simulation of solidification in casting production [J]. Interdisciplinary Issues in Materials Processing and Manufacturing, ASME, 1987: 233–250.
- [34] DAS S K. Thermal modelling of DC continuous casting including submould boiling heat transfer [J]. Applied Thermal Engineering, 1999, 19 (8): 897–916.

[35] SAKAKI K, KATSUMOTO R, KAJIWARA T, et al. Three-dimensional flow simulation of a film-casting process [J]. Polymer Engineering & Science, 1996, 36 (13): 1821–1831.

专家视野

813

- [36] OKAMOTO K, MADARAME H. Fluid dynamics of a free surface in liquid metal fast breeder reactors [J]. Progress in Nuclear Energy, 1998, 32 (1-2): 195-207.
- [37] MIRBAGHERI S M H, ESMAEILEIAN H, SERAJZADEH S, et al. Simulation of melt flow in coated mould cavity in the casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142 (2): 493–507.
- [38] 李忠林. 镍基单晶高温合金静态再结晶实验研究及数值模拟 [D]. 北京:清华大学,2016.
- [39] 于靖. 熔模精密铸造凝固过程数值模拟的工程应用及改进 [D]. 北京:清华大学, 2005.
- [40] 梁作俭,许庆彦,李俊涛,等.γ-TiAl增压涡轮熔模铸造过程数值模拟研究 [J]. 稀有金属材料与工程,2003 (3):164-169.
- [41] 戚翔. 高温合金机匣热控凝固过程数值模拟及工艺优化 [D]. 北京:清华大学,2015.
- [42] 戚翔,张勇,谷怀鹏,等.K4169高温合金机匣热控凝固工艺的数值模拟及优化 [J].铸造,2015,64 (9):851-855,860.
- [43] 孙长波,唐宁,史凤岭,等.机匣件真空熔模铸造的数值模拟[J].铸造,2010,59(2):169-173.
- [44] WANG D, DONG A, ZHU G, et al. Rapid casting of complex impeller based on 3D printing wax pattern and simulation optimization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100 (9): 2629–2635.
- [45] 邵珩. 大型复杂薄壁Ti-6Al-4V铸件离心熔模铸造过程数值模拟 [D]. 北京:清华大学, 2017.
- [46] SHAO H, LI Y, ZHAO P, et al. Numerical simulation of centrifugal casting process of large thin-wall Ti alloy casting[C]//Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2016, 850: 469–481.
- [47] TAO P, SHAO H, JI Z, et al. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28 (4): 520–528.
- [48] 张航. 单晶高温合金叶片定向凝固多尺度数值模拟及工艺优化 [D]. 北京:清华大学, 2014.
- [49] 杨聪. 镍基单晶高温合金定向凝固微观组织相场模拟 [D]. 北京. 清华大学, 2020.
- [50] WANG D, HE B, LIU S, et al. Dimensional shrinkage prediction based on displacement field in investment casting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85 (1-4): 201–208.
- [51] KUO C C, NGUYEN T D, ZHU Y J, et al. Rapid development of an injection mold with high cooling performance using molding simulation and rapid tooling technology [J]. Micromachines, 2021, 12 (3): 311.
- [52] WANG D, SUN J, DONG A, et al. Prediction of core deflection in wax injection for investment casting by using SVM and BPNN [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101 (5): 2165–2173.
- [53] CHAUHANAS, ANIRUDHB, SATYANARAYANAA, et al. FEA optimization of injection parameters in ceramic core development for investment casting of a gas turbine blade [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 2190–2199.
- [54] 伍林,曾洪,赵代银,等.陶瓷型芯注射成形过程的计算机模拟研究[J].东方汽轮机,2021(2):45-49.

Research on Numerical Modeling of Investment Casting Process

XU Qing-yan

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology (Ministry of Education), School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract:

Being a traditional and precise near net shape casting process, investment casting has been widely applied in the field of industrial manufacturing. The process optimization of the investment casting process only based on the traditional trial and error method cannot meet the requirements of high-precision casting and rapid manufacturing. As a developing research method with low energy consumption, high efficiency, numerical simulation technology has been widely used in the field of the investment casting. This paper introduced the physical process and mathematical models of the investment casting process. The simulations of temperature field, flow field, stress field and microstructure field in the investment casting process were presented. Then the research progress of the numerical simulation technology in the fabrication of wax pattern, ceramic core was summarized further. Finally, the future development of the modeling and simulation technology for the investment casting process was proposed.

Key words:

investment casting; modeling and simulation; mold filling and solidification of liquid metal; wax pattern forming; ceramic core forming