



## 镍基单晶涡轮叶片定向凝固过程温度场数值模拟研究进展

孙佳怡<sup>1</sup>, 董龙沛<sup>2</sup>, 赵云松<sup>2</sup>, 王恩会<sup>1</sup>, 侯新梅<sup>1</sup>

(1 北京科技大学碳中和研究院, 北京 100083; 2 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:** 作为先进航空发动机不可缺少的核心部件之一, 镍基单晶涡轮叶片(简称单晶叶片)的空心结构尺寸精度、合金元素的分布均匀性和表面及内腔冶金质量等要求极为苛刻。研究发现, 定向凝固过程中温度梯度的控制直接影响单晶叶片性能和质量, 能否持续获得稳定热流成为定向凝固技术的关键。随着计算机技术的不断进步, 数值模拟已经成为单晶叶片定向凝固研究的重要手段之一。首先, 对单晶叶片制备技术进行了介绍, 分析了定向凝固过程中的传热方式。其次, 总结了数值模拟界面换热系数边界条件的优化方法, 重点介绍了 Beck 非线性估算法和有限差分法在界面换热系数求解中的应用, 证明了两种方法均可以对铸件/型壳间的界面换热系数进行求解, 有效提升了温度场模拟的准确性。最后, 对定向凝固过程温度场数值模拟的研究进展进行了追踪, 总结归纳出了工艺参数对温度场的影响规律。基于对镍基单晶涡轮叶片定向凝固过程温度场数值模拟研究进展的分析, 提出了定向凝固工艺优化方向以及相关技术后续的发展趋势, 以促进单晶涡轮叶片的高质量研发。

**关键词:** 镍基单晶涡轮叶片; 定向凝固; 数值模拟; 温度场; 界面换热系数

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00058 中图分类号: TG249.5

## Research Progress on Numerical Simulation of Temperature Field during Directional Solidification of Nickel-based Single Crystal Turbine Blades

Sun Jiayi<sup>1</sup>, Dong Longpei<sup>2</sup>, Zhao Yunsong<sup>2</sup>, Wang Enhui<sup>1</sup>, Hou Xinmei<sup>1</sup>

(1 Institute for Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
2 Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory,  
Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** As one of the indispensable core components of advanced aero-engine, nickel-based single crystal turbine blades (hereinafter referred to as single-crystal blades) have extremely demanding requirements in terms of dimensional accuracy of the hollow structure, uniformity of alloying element distribution, and metallurgical quality of the surface and inner cavity. It is found that the control of temperature gradient during directional solidification directly affects the performance and quality of single crystal blades, and whether the continuous acquisition of stable heat flow becomes the key of directional solidification. With the continuous progress of computer technology, numerical simulation has become one of the important methods of single crystal blade directional solidification research. Firstly, introduce the single crystal blade technology is introduced and the heat transfer method in the directional solidification process is then analyzed. Secondly, the optimization methods of boundary conditions of interfacial heat transfer coefficient for numerical simulation are summarized, focusing on the application of Beck's inverse method and finite difference method in the solution of interfacial heat transfer coefficient. The results proves that the two methods can be used to solve the interfacial heat transfer coefficient between castings/shells, where the accuracy of the simulation of the temperature field can be effectively improved. Finally, the research progress of numerical simulation of the temperature field during directional solidification is also traced, and the influence of process parameters on the temperature field is summarized. Based on the analysis of the research progress of numerical simulation of temperature field during directional solidification of nickel-based single crystal turbine blades, the optimization direction of the directional solidification process and the subsequent development trend of the related technology are proposed to promote the research and development process of single crystal turbine blades.

**Key Words:** Nickel-based Single Crystal Turbine Blade; Directional Solidification; Numerical Simulation; Temperature Field; Interfacial Heat Transfer Coefficient

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2022YFB3404500); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(No. 52025041); 国家自然科学基金面上项目(No.52174294)

作者简介: 孙佳怡(1998—), 女, 硕士; E-mail: sunjiayi\_gin@163.com; 收稿日期: 2024-03-14

通信作者: 王恩会(1990—), 男, 博士, 副研究员; E-mail: wangenhui@ustb.edu.cn

航空发动机作为飞行器的“心脏”，不仅是促进航空事业发展的推动力，也是衡量一个国家的科技水平、工业基础以及综合国力的重要标志<sup>[1-3]</sup>。涡轮叶片是先进航空发动机不可或缺的关键部件之一，其质量直接影响航空发动机的气动性能、服役可靠性以及安全性<sup>[4]</sup>。镍基单晶高温合金消除了晶界，减少了合金断裂的机率，提升了合金强度，使其在高温服役过程中的抗氧化能力和损伤容限得到有效改善，成为航空发动机涡轮叶片的主流材料<sup>[5-6]</sup>。随着航空发动机推力需求的不断提高，镍基单晶涡轮叶片（以下简称单晶叶片）的工作温度持续攀升，近年研发出的双层壁冷却结构受到高度关注，叶片形状逐渐复杂化<sup>[7-8]</sup>。因此，为了保证单晶叶片尺寸精确、组织均匀，目前主要采用定向凝固结合熔模铸造直接成型。

单晶叶片定向凝固过程是一个受型壳组分/结构、合金元素、温度等多种因素耦合影响的过程，具有浇注温度高（1 500 °C）和温度梯度大（20~200 °C/cm）的特点。其中，铸件缺陷的形成与温度场的演化密切相关，温度场的控制水平直接决定单晶叶片的性能和质量。但是，受限于测试装置局限性和定向凝固的复杂性，温度场的实验研究一直存在试错效率低和成本高等突出困难，在很大程度上限制了单晶叶片性能提升和产品迭代的速度<sup>[9-10]</sup>。随着计算机技术的发展，数值模拟逐渐被引入到铸造的相关研究之中，其低成本、高效率的特点在很大程度上解决了实验研究难度大的问题<sup>[11-12]</sup>。目前，已有部分科研人员利用数值模拟技术建立了单晶高温合金定向凝固模型，并针对边界条件优化以及工艺参数调整进行了一系列研究。

文中叙述了定向凝固过程温度场数值模拟的研究进展，重点关注了工艺参数对单晶叶片内部温度场以及温度梯度的影响，通过对定向凝固传热过程进行分析，归纳了界面换热系数的计算方法和与单晶叶片温度场的影响因素和变化规律。在此基础上，对定向凝固温度场控制的研究方向提出了展望，为提升单晶叶片合格率提供新的思路 and 参考。

## 1 单晶叶片制造技术

由于单晶叶片几何形状复杂、组织要求严格，目前主要通过定向凝固技术制备而成<sup>[13-15]</sup>。定向凝固技术是指通过在合金熔体中建立特定温度梯度，使合金液沿热流反方向凝固的工艺<sup>[16-20]</sup>。在定向凝

固过程中，可以认为热传输主要分为五个过程，分别为：随着单晶叶片抽拉，叶片本身存在沿着抽拉方向的热量传输；垂直于抽拉方向，叶片与型壳间的热交换；铸件与水冷盘的换热；型壳内部的传热以及型壳对外部的热辐射，示意图如图1所示。

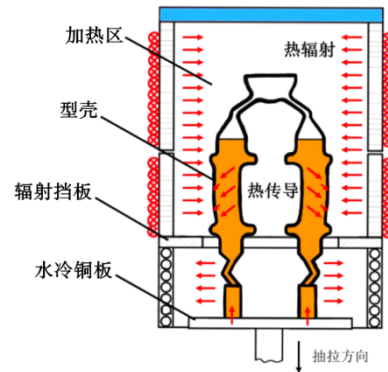


图1 单晶叶片定向凝固过程典型热量传输示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of typical heat transfer during directional solidification of single crystal blade

单晶叶片定向凝固过程需要严格控制温度场以保证铸件内部能够持续获取稳定的单向热流<sup>[21]</sup>。但是在实际生产过程中，金属熔体的热量不仅会沿垂直于固-液界面的方向导出，还会在型壳内部以及型壳与合金液、炉体、水冷盘之间存在一定换热，使铸件中热流方向不再单一，影响铸件单晶组织的生成。因此，保持铸件内部稳定的单向热流，有效控制温度场是成功制备单晶叶片的关键。

## 2 单晶叶片定向凝固过程温度场数值模拟研究现状

近年来，数值模拟作为一种日趋成熟的科研手段，已经在高温合金铸造领域得到了广泛地应用。数值模拟最重要以及最基本的要求就是能够精准地反映出实际情况，选择正确的数学模型以及边界条件能够有效提升模拟结果的准确性，帮助科研人员仅通过模拟软件就可以对温度场进行调控和分析，为提升叶片质量、加速研发进程提供帮助。

### 2.1 数学模型

单晶叶片的制备过程是一个涉及热量、动量以及质量传输和相变等多种复杂现象的过程，出现这些变化的原因就是合金、型壳与环境间发生的不稳定换热<sup>[22]</sup>。同时温度梯度是一个十分重要的物理变量，直接影响高温合金的质量<sup>[23]</sup>。单晶叶片定向凝固过程中，在铸件、型壳以及铸件/型壳边界，热量

主要通过热传导进行传输,在型壳与炉壁、水冷铜之间主要通过热辐射进行传输。通过能量守恒方程可以描述定向凝固过程的热量传输:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} + Q_{net} \quad (1)$$

等式右端三项分别为导热项、潜热项以及辐射换热项。式中, $\rho$ 为密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$ 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $T$ 为温度, $\text{K}$ ;  $t$ 为时间, $\text{s}$ ;  $\lambda$ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $L$ 为结晶潜热, $\text{J}/\text{kg}$ ;  $f_s$ 为凝固时的固相率。 $Q_{net}$ 为与环境间的热流密度,对于定向凝固来说,辐射传热计算公式如式(2)。

$$Q_{net} = \varepsilon \sigma_0 (T_i^4 - T_j^4) \quad (2)$$

式中, $\varepsilon$ 为物体的黑度, $\sigma_0$ 为玻尔兹曼常数, $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

## 2.2 边界条件的确定

在数值模拟研究中,边界条件的设置十分重要,对模拟结果的准确程度起决定性作用<sup>[24]</sup>。材料的导热系数等热物性参数可以通过实验或查阅文献直接获得,热辐射可以在模拟软件中建立封闭区域,通过求解角系数来进行设定。但是在定向凝固过程中,随着合金液浇入型壳,熔融金属与型壳直接接触,铸件冷却收缩,接触方式发生改变。由于界面换热系数是一个用来描述铸件与型壳之间传热强度的参数,无法直接测量。同时受到合金成分、型壳材料以及工艺参数等众多因素的影响,目前,现有多数研究都使用界面换热系数的经验定值作为边界条件,这也是导致模拟结果与实际不相符的主要原因<sup>[25-26]</sup>。因此,快速准确地计算出界面换热系数成为推动温度场数值模拟研究发展的瓶颈问题之一,目前求解界面换热系数的方法主要有 Beck 非线性估算法和有限差分法。

Beck 非线性估算法是一种通过不断调整界面换热系数计算温度场,并利用最小二乘法计算温度差值,从而使计算温度场与实测温度场无限接近一致的方法,其根本原理就是将计算过程转化为一个无约束最优解问题<sup>[27-28]</sup>。Chang、Bazhenov 与马岚波等<sup>[29-31]</sup>采用 Beck 法对几种合金铸造过程中的界面换热系数进行了求解。研究表明,将使用动态热物性参数计算得到的界面换热系数作为边界条件代入数值模拟中可以得到更加贴合实际的结果,对比如图 2 所示<sup>[29]</sup>。图 2 中 T5 为实际测温数据,ST5 为使用动态热物性参数得到温度数据,ST5' 为使用静

态热物性参数得到的温度数据,通过对比最大绝对误差和最大相对误差结果可以发现,使用动态热物性参数反算模型得到的温度场相差较小,结果精确度更高。

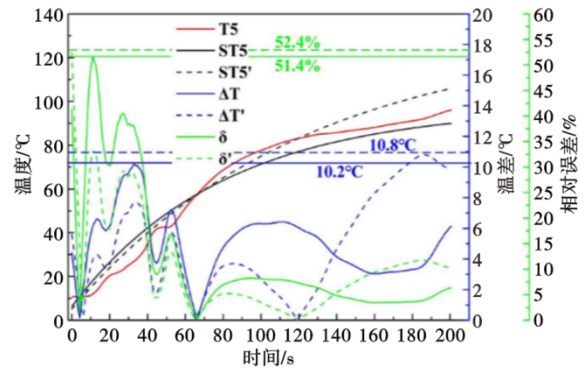


图 2 计算温度变化与实测温度对比

Fig. 2 The comparison between calculated temperature change and measured temperature

Szeliga 与 Rafique 等<sup>[32-33]</sup>在计算高温合金熔模精密铸造过程界面换热系数的基础上研究了界面换热系数的变化规律以及相关原因。实验结果表明,当合金为液态时,合金与型壳表面接触良好,界面换热系数逐渐提升直至最大值;当合金开始凝固时,差热收缩导致铸件与型壳之间形成间隙,界面换热系数随之下降,如图 3 所示<sup>[32]</sup>。同时界面换热系数还会随着铸件形状、型壳成分的改变而发生变化,其中陶瓷型壳的成分和厚度对界面换热系数的影响较大,型壳与高温合金间产生的反应层也会对界面换热系数有一定影响。

有限差分法是求解微分方程的一种重要方法,近年来也被引入传热的相关计算中,其基本原理是将求解域划分为差分网格,并在每个节点上建立代数方程组,最后通过求解方程组计算出传热微分方程数值解,从而得到物体的温度场分布<sup>[34-35]</sup>。Sun 等<sup>[36]</sup>根据挤压铸造过程的测温结果,使用有限差分法计算出了铸型与铸件的表面温度以及热流密度并获得了铸造过程中的界面换热系数随时间变化的曲线,实验装置和温度计算结果如图 4 所示<sup>[36]</sup>。张云光等<sup>[37]</sup>也通过有限差分法成功计算出了合金热成型过程中的界面换热系数随时间和温度的变化规律,并与 Beck 法结果进行对比,发现两种计算方法的结果相近,但有限差分法在计算速度上比较有优势。

作者团队采用有限差分法对镍基高温合金定

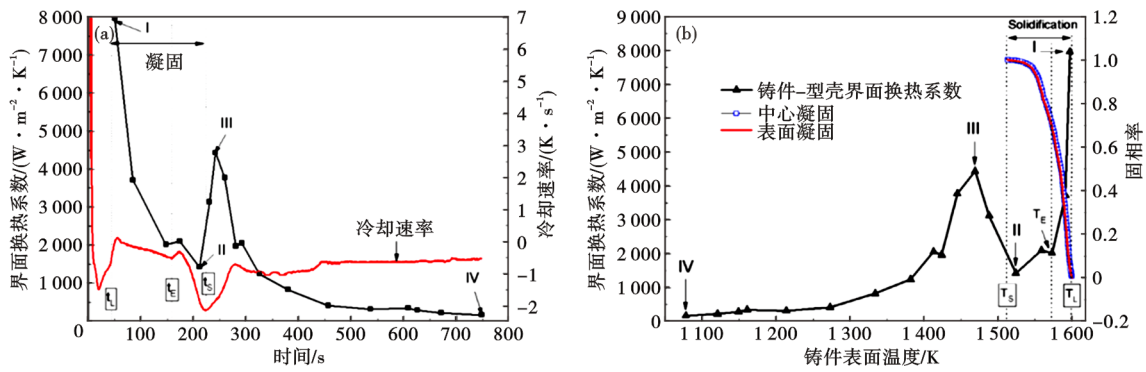


图 3 某镍基高温合金铸件-型壳间的界面换热系数变化: (a)时间, (b)表面温度

Fig. 3 Change of interface heat transfer coefficient of a nickel-based superalloy casting-mold : (a) time, (b) surface temperature

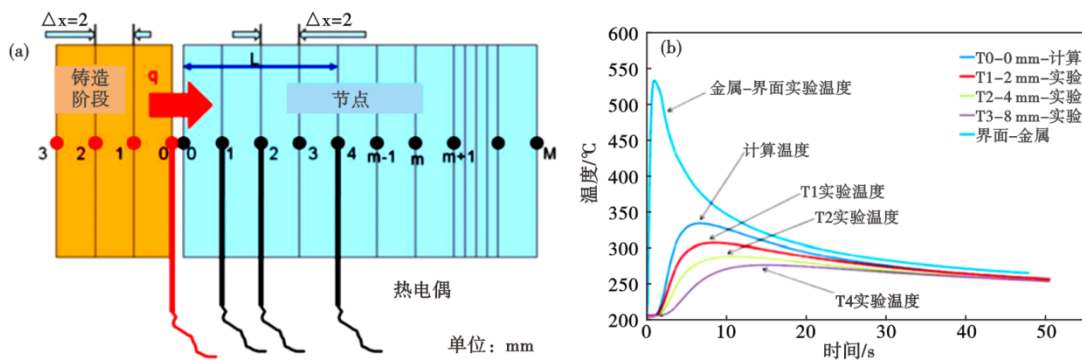


图 4 有限差分法求解界面换热系数: (a)测温装置, (b)测温曲线与计算曲线

Fig. 4 Heat transfer coefficient with finite difference method: (a) temperature measuring device, (b) measurement curve and calculation curve

向凝固过程中铸件/型壳间的界面换热系数进行了求解,发现铸件/型壳间界面换热系数在浇注开始阶段达到峰值,同时随着时间的增加而下降并逐渐趋于平缓,界面换热系数在固相线温度与液相线温度附近变化较为剧烈,这是由于在该阶段铸件与型壳间的接触方式发生了改变,界面传热方式发生转变,导致界面换热系数变化较为明显。将优化后的

界面换热系数作为边界条件带入模拟软件中进行模拟,导出温度场数据可以观察到模拟结果与实际测温结果误差均小于 10%,验证了有限差分法求解定向凝固过程界面换热系数的可能性,界面换热系数计算结果与温度对比如图 5 所示。

通过对上述研究进行总结可以发现,使用 Beck 非线性估算法和有限差分法均可以对定向凝固过

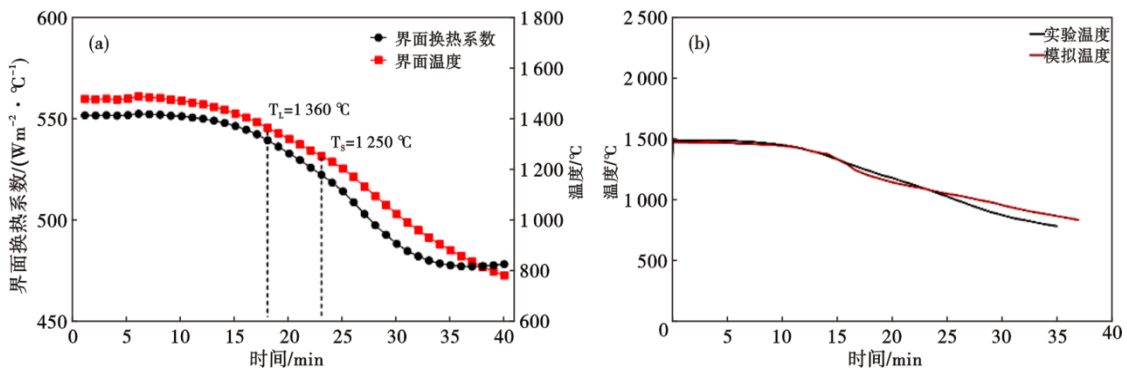


图 5 定向凝固界面换热系数: (a)界面换热系数随时间的变化, (b)测温曲线与模拟曲线对比

Fig. 5 Heat transfer coefficient with directional solidification: (a) casting - mold interface heat transfer coefficient in dependence on time, (b) comparison between measurement curve and simulation curve

程中铸件/型壳间的界面换热系数进行求解,将求解后的界面换热系数代入数值模拟边界条件有助于提高温度场的计算精度。

### 2.3 温度场的模拟结果

在镍基单晶高温合金的定向凝固过程中,温度分布直接影响合金中单晶组织的产生,是调控工艺参数一个重要的参考条件。同时温度场结果还是应力应变等其他模拟研究的基础,是高温合金组织生长以及缺陷形成的重要参照。

浇注温度和抽拉速率是镍基单晶高温合金定向凝固过程中最易调整且效果最直观的工艺参数。贾志宏和杨亮等<sup>[38-39]</sup>分别针对薄壁板、试棒等简单形状试样的定向凝固过程进行了模拟,分析了不同工艺参数对试样的温度场、温度梯度以及糊状区的影响。经过总结发现,抽拉速率、浇注温度以及铸件与炉壁的相对位置都会影响铸件的温度场。某薄板试样在不同浇注温度和抽拉速率下温度场的模拟结果如图 6 所示<sup>[39]</sup>。在抽拉速率相同的情况下,适当提高浇注温度可以增加铸件的温度梯度,得到更窄的糊状区,从而使单晶铸件的化学成分更加均匀。同时,由于铸件与炉壁的相对位置决定了辐射角的大小,直接影响铸件中等温线的变化,所以在浇注温度相同的情况下,温度梯度会随着抽拉速率的增加略微降低,糊状区的面积也会增大并呈下凹趋势。这说明抽拉速率越快,铸件与炉壁间的辐射换热越强烈,温度梯度越小。因此,在镍基单晶高温合金制备的过程中应适当提高浇注温度或降低抽拉速率,使铸件在定向凝固过程能够获得更大的温度梯度和更强的单向热流,从而获得更窄的糊状区,为单晶组织的产生提供有利条件。

Yan<sup>[22]</sup>、Liao、周玉辉以及杨振宇等<sup>[40-42]</sup>进一步针对单晶叶片的温度场、糊状区以及冷却速率进行了模拟,并系统地研究了铸造过程中的传热方式。研究表明,在制备单晶高温合金叶片时,初始阶段系统内的温度场分布不均,铸件由加热区抽拉到冷却区后,温度场逐渐趋于平稳,辐射换热加剧,形成温度梯度,如图 7 所示<sup>[40]</sup>。当铸件抽拉速率与固液界面迁移率接近时,铸件中的温度场达到稳态,糊状区较为平整。但是,随着抽拉速率继续增加,辐射换热更加剧烈,叶片两侧的冷却速度明显快于中部,糊状区会逐渐转变为向下凹陷状态,极易造成晶粒偏转,影响铸件质量。因此,使用较小的抽拉速度可以得到水平分布的糊状区,更有利于晶粒的

定向生长。

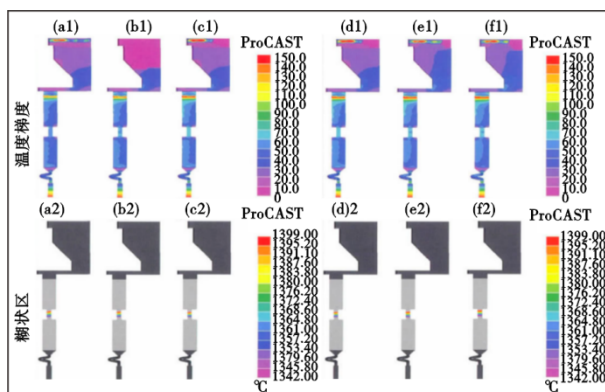


图 6 不同浇注温度和抽拉速率下试样定向凝固过程的温度梯度与糊状区: (a) 1 530 °C, (b) 1 550 °C, (c) 1 570 °C, (d) 3 mm/min, (e) 4.5 mm/min, (f) 6 mm/min  
Fig. 6 Temperature gradients and mushy zones of specimen with different casting temperatures and withdrawal rates during directional solidification: (a) 1 530 °C, (b) 1 550 °C, (c) 1 570 °C, (d) 3 mm/min, (e) 4.5 mm/min, (f) 6 mm/min

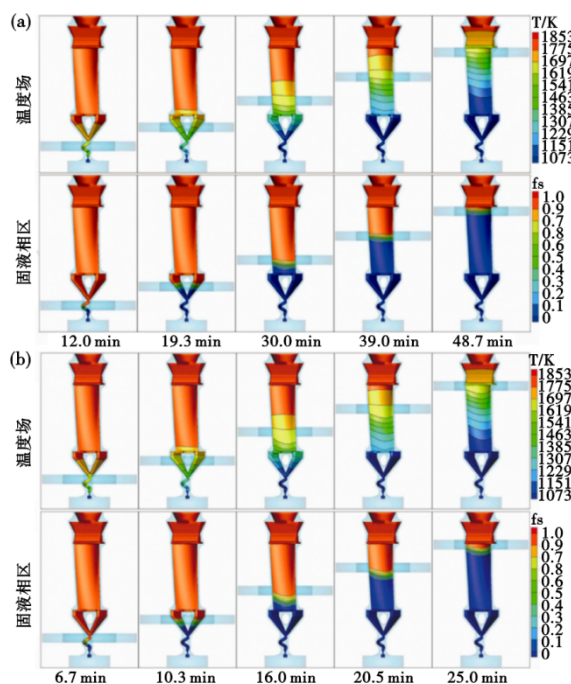


图 7 不同抽拉速率下铸件的温度场与糊状区: (a) 4 mm/min, (b) 8 mm/min  
Fig. 7 Temperature field and mushy zone field of casting with different withdrawal rates: (a) 4 mm/min, (b) 8 mm/min

单晶叶片的几何形状复杂,其组织缺陷主要集中在叶片的缘板处。王润楠等<sup>[43]</sup>分别对不同抽拉速率下涡轮叶片的温度场分布进行了分析,研究发现,在固定拉速下,即使使用合理的速度进行抽拉,叶片缘板部分温度下降的速度依然很快,糊状区表

现为凹状。这是由于缘板处横截面积较大,产生的横向温度梯度会使缘板处降温速率大于其他部分,从而导致杂晶形核、生长。为了在不降低叶片生产效率的同时解决上述问题,研究人员提出可以根据叶片的形状局部调整抽拉速率,当糊状区即将进入横截面积较大的区域时适当降低拉速,为该位置创造更加平稳的凝固条件,当糊状区通过该部位后再适当提升拉速以保证生产效率,优化成果如图8所示<sup>[43]</sup>。Ren等<sup>[44]</sup>也进行了相关研究,证明了变拉速工艺的可行性,首次通过液相等温线高度来描述温度和辐射的分布,估算了铸件中杂晶形成的概率,提出了一种针对复杂几何形状的高温合金单晶叶片实时调整抽拉速率的方法,并通过数值模拟结果验证了该方法可以改善榫头部位的温度分布,有效避免杂晶的产生。

综上所述,经过优化后的定向凝固过程温度场模拟结果与实际情况有着较高的一致性。通过在数值模拟软件中改进工艺参数并对模拟结果进行分析,可以为实际生产提供参考,对定向凝固工艺优化有着重要的参考价值。适当使用较高的浇注温度并根据铸件形状降低抽拉速率可以有效提升铸件温度梯度,在铸件内部产生更高、更稳定的单向热流,更利于单晶组织的定向生长。

### 3 总结与展望

近年来,随着计算机技术以及数学模型的发展,数值模拟技术已经成为优化高温合金铸造工艺必不可少的手段,能够对铸造过程进行准确的模拟和预测。对镍基单晶高温合金定向凝固过程数值模拟与温度场相关的研究进展进行总结,结论如下。

(1)基于Beck法或有限差分法对铸件/型壳间的界面换热系数进行求解可以有效提升模拟结果的准确性。作者所在团队通过有限差分法成功求解了镍基高温合金与陶瓷型壳间的界面换热系数,并提升了定向凝固过程温度场模拟的准确性。

#### 参考文献

- [1] 向巧,黄劲东,胡晓煜,等.航空动力强国发展战略研究[J].中国工程科学,2022,24(2):106-112.
- [2] 刘巧沐,李园春.航空发动机材料及工艺发展浅析[J].航空动力,2021(6):9-12.
- [3] 杨浩,王方军,李采,等.镍基高温合金的熔炼工艺研究进展[J].特殊钢,2023,44(3):1-9.
- [4] 秦墨周,赵广迪,武金江,等.镍基高温合金U720Li在750℃

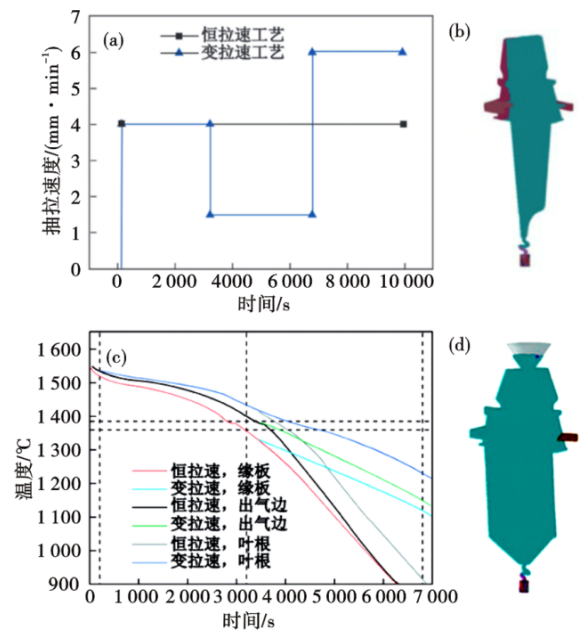


图8 抽拉速率优化前后温度与晶粒组织变化:(a)抽拉速率随时间的变化,(b)恒拉速晶粒形貌,(c)两种工艺温度变化曲线,(d)变拉速晶粒形貌

Fig. 8 Changes of temperature and grain structure before and after the optimization of withdrawal rates : (a) withdrawal rate with time, (b) the grain morphology at constant withdrawal rate, (c) the temperature change curve of the two processes, (d) the grain morphology at variable withdrawal rate

(2)采用较高的浇注温度和较低的抽拉速率可以为铸件提供更高的温度梯度,产生更强的单向热流,从而在铸件中创造更有利于单晶组织形成的环境。根据铸件的几何形状改变抽拉速率还可以在减少缺陷的同时保证产品的生产效率。

(3)为了提高计算效率,科研人员通常会将模型进行简化,但是定向凝固过程中的温度场是一个耦合且多变的过程,经过简化后模型难免与实际存在差异。如何建立准确并兼顾计算效率的模型仍然是未来的重点和难点。机器学习是一门可以对数据进行分析 and 预测的学科,能够在机制未知的情况下在大量数据中寻找规律,将其与数值模拟结合将是未来进一步指导单晶叶片定向凝固的有效手段。

不同氧化阶段的恒温氧化行为[J].特殊钢,2024,45(1):12-17.

- [5] Wang B X, Xia Y, Liu G H, et al. Numerical simulation of grain growth of directionally solidified DZ4125 alloy under varied blade orientations[J]. MATERIALS TRANSACTIONS, 2020, 61(8):1663-1670.
- [6] 罗小雨,郭靖,郭汉杰,等. IN718镍基高温合金熔体脱氮和

- TiN析出热力学研究[J]. 特殊钢, 2024, 45(1): 33-41.
- [7] 沈 昀, 郑 功, 冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 54-62.
- [8] Li Q, Song J X, Wang D G, et al. Effect of Cr, Hf and temperature on interface reaction between nickel melt and silicon oxide core [J]. *Rare Metals*, 2011, 30(1): 405-409.
- [9] 张 健, 王 莉, 王 栋, 等. 镍基单晶高温合金的研发进展 [J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1077-1094.
- [10] 何 波, 周泓江, 李建辉, 等. 镍基高温合金叶轮熔模铸造过程的数值模拟[J]. 稀有金属, 2016, 40(3): 227-235.
- [11] 夏 琨, 徐向阳, 段士伟. 基于ProCAST的转子盘熔模铸造数值模拟研究[J]. 铸造技术, 2022, 43(5): 375-381.
- [12] 冀晓磊, 孟晓东, 张荣强, 等. 熔模铸造ZL114A铝合金凝固过程界面换热系数研究[J]. 铸造技术: 1-6.
- [13] 李智锋, 汪东红, 吴文云, 等. 熔模铸造镍基高温合金件热应力场的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(7): 63-67.
- [14] 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.
- [15] 郑博远, 吴一栋, 陈晶阳, 等. K439B高温合金薄壁机匣试验件熔模精铸缺陷预测与工艺优化研究[J]. 铸造技术, 2023, 44(2): 147-152.
- [16] 王 妍, 崔春娟, 张 凯, 等. 定向凝固金属间化合物的研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(24): 135-142.
- [17] Miller J D, Pollock T M. The effect of processing conditions on heat transfer during directional solidification via the bridgman and liquid metal cooling processes [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, 45(1): 411-425.
- [18] 王建明, 杨舒宇. 镍基铸造高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 150.
- [19] 马德新. 高温合金叶片单晶凝固技术的新发展[J]. 金属学报, 2015, 51(10): 1179-1190.
- [20] 刘 红. 工程材料[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019: 393.
- [21] 问亚岗, 崔春娟, 田露露, 等. 定向凝固技术的研究进展与应用[J]. 材料导报, 2016, 30(3): 116-120.
- [22] Yan X W, Xu Q Y, Tian G Q, et al. Multi-scale modeling of liquid-metal cooling directional solidification and solidification behavior of nickel-based superalloy casting[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 67: 36-49.
- [23] 许庆彦, 夏鹤翔. 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.
- [24] Yang H M, Pu Z M, Guo Z P, et al. A study of metal/die interfacial heat transfer behavior of vacuum die cast pure copper [J]. *China Foundry*, 2020, 17(3): 206-211.
- [25] Dhodare A, Ravanan P M, Dodiya N. A review on interfacial heat transfer coefficient during solidification in casting[J]. *International Journal of Engineering Research and*, 2017, V6(2): 464-467.
- [26] Yang H Q, Shan Z D, Wang Y F, et al. Simulation of temperature field of A356 aluminum alloy in freeze casting[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1600(1): 012045.
- [27] 刘志文, 李落星, 易 杰, 等. 6061铝合金与H13模具钢固体界面接触换热系数的反分析求解[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(4): 700-708.
- [28] 邓同生, 李东升, 李小强, 等. 基于有限元反求的热拉弯成形界面接触换热系数研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 235-241.
- [29] Chang T, Zou C M, Wang H W, et al. Optimization of the interface heat transfer coefficient model based on the dynamic thermo-physical parameters in the pressure-temperature coupled field [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 110: 104435.
- [30] Bazhenov V E, Tselovalnik Y V, Kolytgin A V, et al. Investigation of the interfacial heat transfer coefficient at the metal - mold interface during casting of an A356 aluminum alloy and AZ81 magnesium alloy into steel and graphite molds [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2021, 15(2): 625-637.
- [31] 马岚波, 税国彦, 关 洋, 等. K4169合金-陶瓷型壳间界面传热系数研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 1048-1052.
- [32] Szeliga D, Kubiak K, Ziaja W, et al. Investigation of casting - ceramic shell mold interface thermal resistance during solidification process of nickel based superalloy [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 87: 149-160.
- [33] Ali Rafique M M, Shah U. Modeling and simulation of heat transfer phenomenon related to mold heating during investment casting [J]. *Engineering*, 2020, 12(5): 291-314.
- [34] 周建新, 殷亚军, 沈 旭, 等. 铸造充型凝固过程数值模拟系统及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 424.
- [35] 严 平. 战斗部及其毁伤原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 386.
- [36] Sun Z Z, Hu H, Niu X P. Determination of heat transfer coefficients by extrapolation and numerical inverse methods in squeeze casting of magnesium alloy AM60 [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(8): 1432-1440.
- [37] 张云光, 李志强, 王耀奇, 等. 2060铝锂合金冷模热成形界面换热系数确定的实验与算法[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 423805.
- [38] 贾志宏, 谢道存, 张 弛, 等. 基于辐射散热的高温合金定向凝固温度场模拟[J]. 铸造技术, 2016, 37(10): 2149-2153.
- [39] 杨 亮, 李嘉荣, 金海鹏, 等. DD6单晶精铸薄壁试样定向凝固过程数值模拟[J]. 材料工程, 2014, 42(11): 15-22.
- [40] Liao D M, Cao L, Chen T, et al. Radiation heat transfer model for complex superalloy turbine blade in directional solidification process based on finite element method [J]. *China Foundry*, 2016, 13(2): 123-132.
- [41] 周玉辉, 黄清民, 林荣川. 单晶高温合金叶片定向凝固过程数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1361-1365.
- [42] 杨振宇, 陈 昊, 胡松松, 等. 镍基单晶高温合金定向凝固初期温度场演化过程[J]. 铸造, 2020, 69(11): 1180-1184.
- [43] 王润楠, 许庆彦, 柳百成. 计算机模拟技术在航空发动机涡轮叶片制造中的应用[J]. 自然杂志, 2017, 39(2): 79-86.
- [44] Ren N, Li J, Wang B Q, et al. Design of variable withdrawal rate for superalloy single-crystal blade fabrication [J]. *Materials & Design*, 2021, 198: 109347.