

LMC 工艺参数对单晶叶片铸造应力的影响

袁任¹, 张金², 黄亚奇³, 申健³, 卢玉章³, 翟梓融¹

(1. 上海科技大学创意与艺术学院, 上海 201210; 2. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022; 3. 中国科学院金属研究所高温结构材料研究部, 辽宁沈阳 110232)

摘要: 以DD426单晶高温合金涡轮空心叶片为对象, 模拟LMC定向凝固过程中叶片铸造应力分布变化, 研究了工艺参数对单晶涡轮空心叶片铸造应力的影响规律。结果表明: 随着保温炉温度的提高、隔热层厚度的减小及Sn液温度的降低, 单晶叶片的铸造应力逐渐增加。随着型壳厚度的增加, 铸造应力呈现出先增加后降低的趋势。对单晶涡轮叶片应力分布影响最明显的工艺参数是隔热层厚度。当隔热层厚度为50 mm时, 叶片特征点处铸造应力降低至793 MPa。根据数值模拟结果, 提出了优化的工艺参数。工艺优化后的特征点处铸造应力进一步降低至781 MPa, 在实际铸造中消除了由于铸造应力过大导致的叶片断裂现象。

关键词: 液态金属冷却; 单晶涡轮叶片; 工艺参数; 铸造应力

作者简介:

袁任(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为单晶高温合金数值模拟。E-mail: yuanren@shanghaitech.edu.cn

通信作者:

卢玉章, 男, 研究员, 博士生。E-mail: yzlu@imr.ac.cn

中图分类号: TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)05-0624-09

基金项目:

国家重点研发计划项目(2021YFB3702900); 中国科学院金属研究所创新基金(2024-PY04); 辽宁省科学技术计划(2022JH2/101300226); 国家自然科学基金项目(52271042、U2141206和U2241283)。

收稿日期:

2024-04-01 收到初稿,
2024-06-02 收到修订稿。

单晶涡轮叶片是航空发动机中关键构件, 需要在高温、高压的环境下长期稳定工作。目前, 工业生产中制备单晶高温合金叶片的主要工艺有高速冷却法(High Rate Solidification, HRS)与液态金属冷却法(Liquid Metal Cooling, LMC)。HRS工艺发展成熟, 是应用最为广泛的定向凝固技术^[1], 但随着叶片尺寸的增大与结构复杂化, HRS工艺受辐射散热方式的影响, 铸件凝固后期温度梯度不断降低, 导致组织粗大、偏析严重^[2]; 而LMC工艺用低熔点液态冷却介质的对流替代了辐射散热, 因而可以提供更高且稳定的温度梯度, 是单晶叶片的高水平研发平台。由于温度梯度和冷却速率的提高, LMC工艺中单晶铸件也容易产生更大的铸造应力, 导致叶片产生变形, 甚至断裂。因此有必要对LMC工艺下叶片定向凝固工艺参数对铸造应力的影响进行研究。

随着计算机技术的发展, 采用数值模拟的手段对铸造过程中的温度与应力分布进行研究, 已成为优化工艺参数的有效手段^[3]。Yu和Tu等人^[4-7]通过数值模拟的手段, 调整了大量的边界条件与工艺参数, 并将数值模拟结果与试验结合, 归纳总结了各工艺参数和边界条件与铸造缺陷之间的关系。Yan^[8]等人通过数值模拟手段对比了HRS与LMC两种工艺, 研究认为LMC工艺下的糊状区宽度要比HRS工艺下的糊状区宽度更窄且界面更为平直。刘世忠和Li等^[9-10]采用ProCAST软件, 对单晶高温合金试板进行计算, 发现凝固前沿界面形状受到抽拉速率影响显著, 抽拉速率越大, 界面越是下凹。杨振宇^[11-12]等对定向凝固初期的温度场演化及结构对温度场的影响进行了研究, 结果表明固/液界面的迁移速率逐渐增加到抽拉速率附近, 界面由凸界面转变为凹界面, 而突变扩张平台的出现容易导致凝固缺陷的形成。郭如峰与尚伟等^[13-14]模拟了定向凝固过程中的晶粒组织, 研究认为杂晶缺陷集中出现在缘板、平台等几何突变部位, 采用适当的抽拉速率可以有效抑制杂晶的产生。贾志宏与谢道存等^[15-16]利用ProCAST软件对定向凝固过程中温度场的分布特点进行了研究, 分析总结归纳了抽拉速率、叶片摆放位置以及每次进行浇注时的最大叶片数量对温度场的影响规

律。邱飞与李世峰等人^[17-18]通过ProCAST软件,对单晶高温合金叶片的榫头窗口易产生应力集中的现象进行工艺优化,结果表明,提高榫头窗口的圆角半径大小可以有效降低榫头窗口处的残余应力。弓成美琪等人^[19]对涡轮叶片的变形问题进行数值模拟,结果表明,当抽拉速率达到5 mm/min时,叶片的整体变形量最小,最低可达0.9 mm。李忠林等人^[20]的研究表明叶片塑性变形较大的区域主要是在排气边与缘板连接处,并且大部分塑性应变都在糊状区产生。文献[21-22]认为陶瓷型芯与型壳二者之中,型芯对叶片的凝固收缩产生的阻碍作用是产生较大铸造应力的原因,并且型芯对塑性变形的影响更为显著。

目前,对于定向凝固过程应力分布的数值模拟研

究工作主要集中在HRS工艺上,关于LMC工艺条件下铸造应力的数值模拟研究较少。本课题针对某型号航空发动机单晶涡轮叶片研究LMC工艺参数对叶片铸造应力的影响,为优化LMC定向凝固工艺参数提供参考。

1 数值模拟方法

1.1 材料性能参数的确定

数值模拟所用单晶高温合金为DD426,为我国自主研发的第一代镍基单晶高温合金,主要热物性参数如表1所示^[23]。其中热导率与比热容随温度的变化如图1、2所示。数值模拟采用的界面换热系数如表2所示。

表1 数值模拟所用材料热物性
Tab. 1 Thermal physical properties of materials used in numerical simulation

项目	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	液相线/ $^{\circ}\text{C}$	固相线/ $^{\circ}\text{C}$
DD426	8 470	随温度变化见图1	随温度变化见图2	1 397	1 317
型壳	2 600			-	-
型芯	3 284			-	-

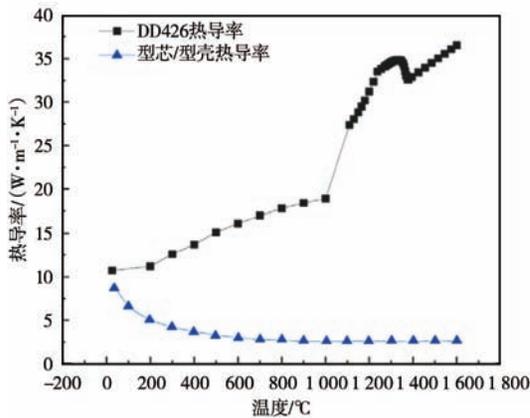


图1 数值模拟所用材料导热系数

Fig. 1 Thermal conductivities of materials used in numerical simulation

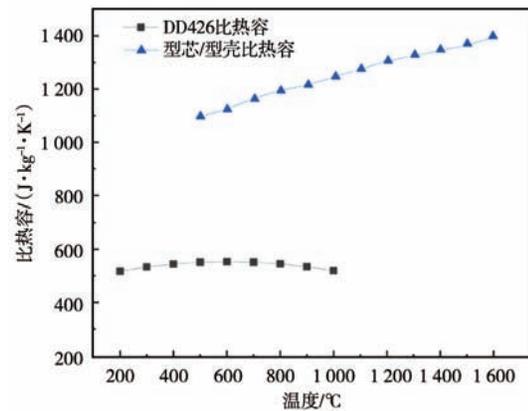


图2 数值模拟所用材料比热容

Fig. 2 Specific heat capacities of materials used in numerical simulation

表2 不同界面换热系数
Tab. 2 Heat transfer coefficients at different interfaces

界面类型	界面换热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
DD426/型壳	随温度变化;最终稳定在150
DD426/型芯	
DD426/结晶器	1 000
液态金属/环境	10
型壳/环境	4 500
型壳/结晶器	500
结晶器/锡液	4 500

数值模拟中所用不同材料的热膨胀系数随温度的变化如图3所示。通过热压缩试验获得单晶合金的屈服强度。使用线切割从直径为16 mm、长度为300 mm的铸态单晶试棒中切割出一系列直径为6 mm、长度为10 mm的圆柱试样。试样的晶体取向控制在 $\langle 001 \rangle$ 附近。在不同温度下(25、650、760、850、980、1 070、1 150、1 200、1 230 $^{\circ}\text{C}$),使用热模拟试验机(Gleeble 3800)以 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率对测试样品进行压缩。为了模拟定向凝固环境,热压缩试验在真空

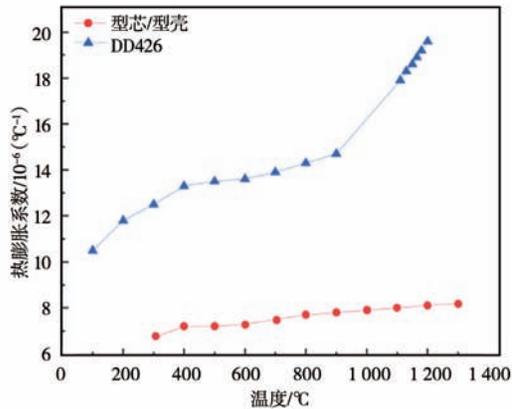


图3 数值模拟所用材料热膨胀系数

Fig. 3 Thermal expansion coefficient of materials used for numerical simulation

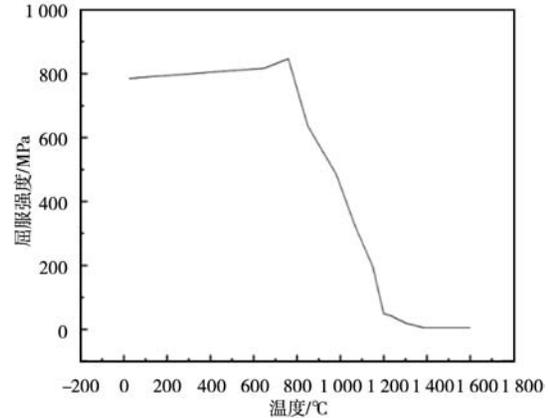


图4 DD426合金屈服强度随温度变化

Fig. 4 Variation of DD426 alloy yield strength with temperature

条件下进行，从压缩测试结果中提取屈服强度数据。最终得到单晶高温合金随温度的屈服强度曲线，如图4所示。

1.2 工艺参数设定

在数值模拟过程中需要对定向凝固工艺参数进行设置，主要包括抽拉速率、上下加热区温度、隔热层厚度、锡液温度与型壳厚度，具体参数设置如表3所示。

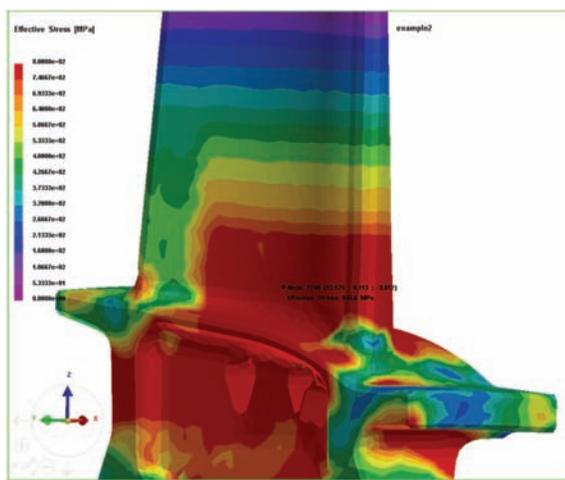
表3 加工工艺参数
Tab. 3 Processing parameters

下加热区温度/°C	上加热区温度/°C	隔热层厚度/mm	Sn液温度/°C	型壳厚度/mm	抽拉速率/(mm·min ⁻¹)
1 520	1 500	40	255	6	6

1.3 模型验证与特征点选取

通过数值模拟与实际测量温度的对比，验证了边界条件的准确性^[24]。在此基础上，通过数值模拟研究了单晶叶片定向凝固过程中的应力分布，结果表明在叶片靠近缘板的部位出现大的应力分布，中温

(650~700 °C)时的铸造应力超过单晶合金对应温度下的断裂强度，容易导致叶片断裂。在实际定向凝固过程中发现，浇注的单晶叶片中确实存在断裂现象，叶片的断裂比例约为30%，且单晶叶片的断裂位置与模拟所示应力集中位置符合较好。



(a) 叶片应力集中位置



(b) 叶片实际断裂位置

图5 数值模拟得到的叶片应力集中位置及叶片实际断裂位置

Fig. 5 Stress concentration location of blade obtained through numerical simulation and actual fracture position of blade

针对上述应力集中导致的叶片断裂问题,数值模拟过程中主要分析铸件凝固温度到700℃左右的铸造应力,为了便于定量比较铸造应力随工艺参数的变化,在距离叶片选晶器底部115 mm处一固定特征点的位置进行比较,如图6所示。

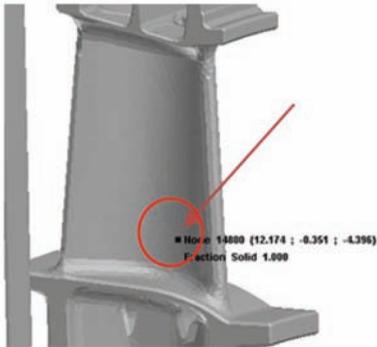


图6 分析数值模拟结果所用的特征点位置
Fig. 6 Characteristic point position used for analyzing numerical simulation results

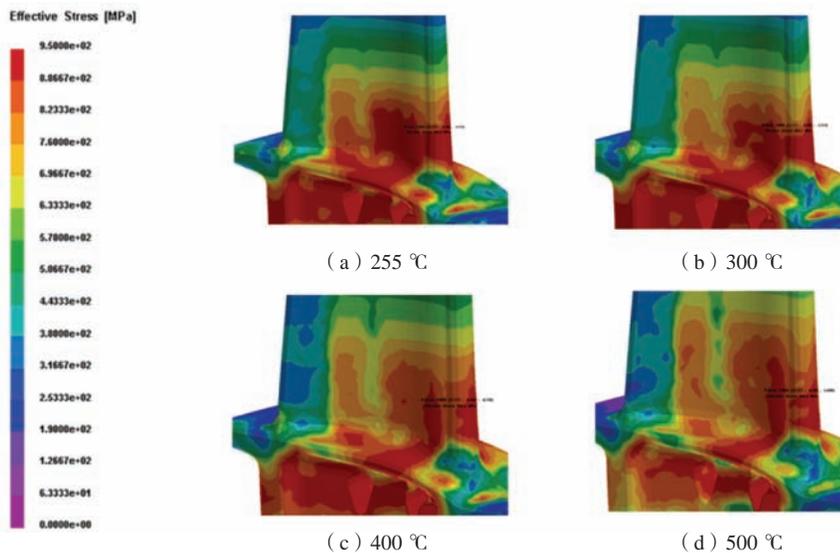


图7 不同Sn液温度条件下铸造应力分布云图
Fig. 7 Cast stress distribution cloud maps under the conditions of different liquid Sn temperatures

间后再进行抽拉。下加热区的温度会直接影响后续的定向凝固过程。研究了下加热区的温度(1 480、1 500、1 520、1 540℃)对定向凝固过程中叶片铸造应力分布的影响,如图8所示。

从图8可以看出,随着下加热区温度的升高,叶片整体应力升高,但是在1 500℃以上的区间,叶片应力增加趋势并不明显,增长范围仅在10 MPa左右变化,反而1 480~1 500℃之间的应力产生了明显的增长,特征点处应力从842 MPa增加到了900 MPa。

2 数值模拟结果与讨论

2.1 Sn液温度对叶片铸造应力分布的影响

LMC定向凝固工艺采用液态金属作为冷却介质,能够获得更大的温度梯度和冷却速率,从而保证定向凝固叶片组织的单晶性和均匀性。Sn液的温度改变会显著影响定向凝固过程,从而引起热应力分布的改变。研究了不同的Sn液温度(255、300、400、500℃)对铸造应力的影响。

从图7可以看出,叶片应力集中部位主要分布在叶身根部的进气边的圆角处位置,随着Sn液温度的升高,叶片整体的应力减小,但排气边与进气边两侧应力减小的幅度差异较大,排气边部位应力的减小幅度要显著大于进气边一侧。

2.2 下加热区温度对叶片应力分布的影响

LMC定向凝固设备的保温炉分为两个区域,即上加热区与下加热区,在叶片母合金液浇注完成后,为了使铸件、型壳和型芯的温度均匀,需要静置一段时

2.3 隔热层厚度对叶片应力分布的影响

LMC定向凝固工艺采用了一定厚度的氧化铝作为隔热层,隔离热区与冷区,从而获得更高的温度梯度。叶片的凝固主要在隔热层内发生,氧化铝层的厚度会影响叶片内部的温度分布,进而影响应力的分布。对于隔热层厚度设置了:20、30、40、50 mm四个参数。研究了隔热层厚度对铸造应力的影响,如图9所示。

通过应力云图可以发现,随着隔热层厚度的升

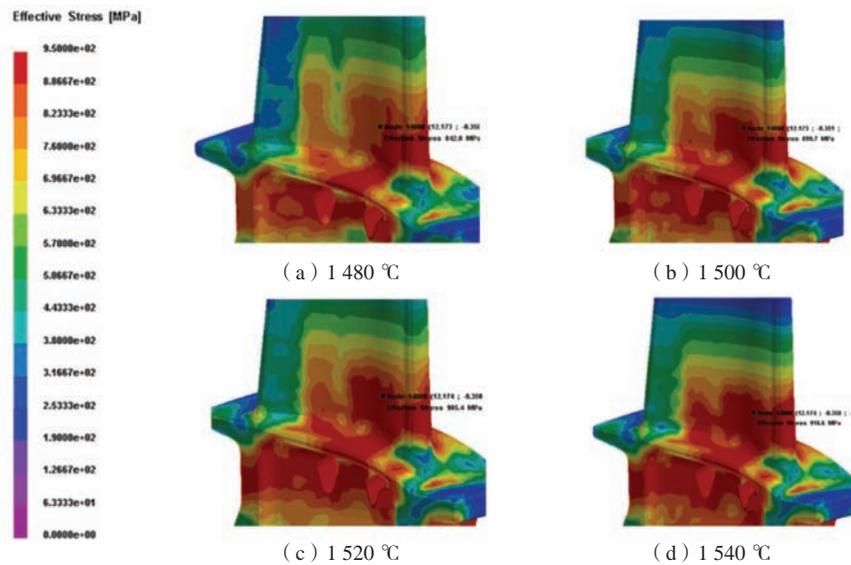


图8 不同下加热区温度条件下铸造应力分布云图

Fig. 8 Cast stress distribution cloud maps under the conditions of different lower heating zone temperatures

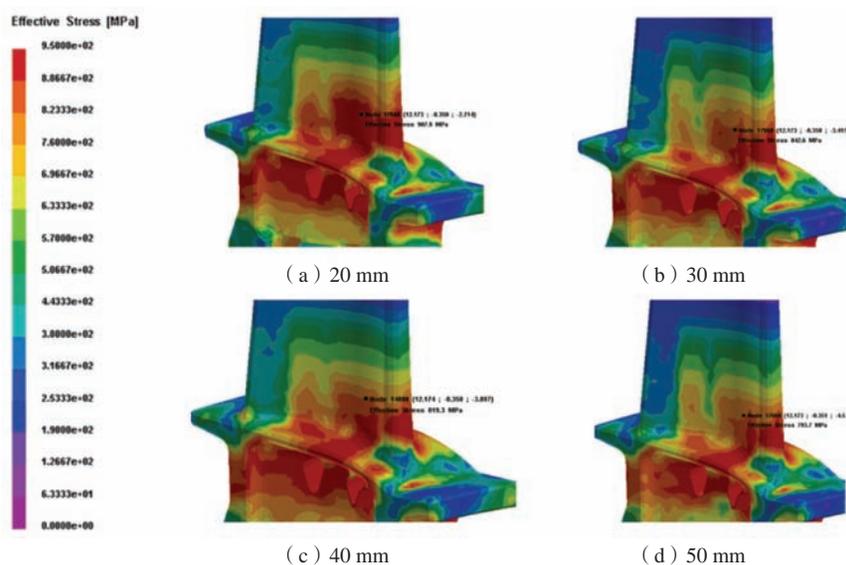


图9 不同隔热层厚度条件下铸造应力分布云图

Fig. 9 Cast stress distribution cloud maps under the conditions of different thicknesses of insulation baffles

高，叶片整体应力下降，在整个工艺参数设置的区间内，应力变化较为明显且变化范围较为平均，在隔热层厚度为50 mm时特征点处应力最低可达793 MPa，说明提高隔热层厚度能够较为稳定地减小应力集中现象的产生。

2.4 型壳厚度对叶片应力分布的影响

定向凝固过程中，型壳的厚度会对叶片与型壳之间的热传递行为产生影响，同时由于型壳的热膨胀系数与单晶叶片的热膨胀系数差异较大，在凝固过程中型壳会对叶片的凝固收缩产生阻碍作用，在截面突变

处型壳对铸造应力的影响尤为显著，研究了型壳厚度（4 mm、6 mm、8 mm）对铸造应力的影响，如图10所示。从图10可以看出，在型壳厚度为6 mm时，叶片整体应力最大，而在型壳厚度为4 mm与8 mm时所得叶片整体应力分布大小均小于壳厚度为6 mm时的应力（图10）。

2.5 分析与讨论

对于上述数值模拟结果所选的特征点，在ProCAST软件内输出不同工艺参数下的应力与温度梯度的大小变化如图11所示。

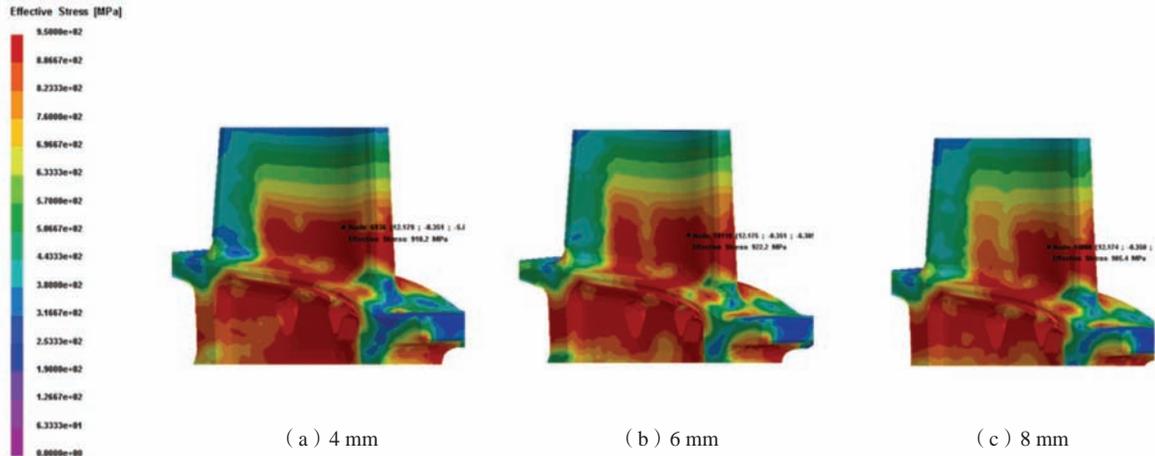


图10 不同型壳厚度条件下叶片铸造应力分布云图

Fig. 10 Cast stress distribution cloud maps of blades under the conditions of different shell thicknesses

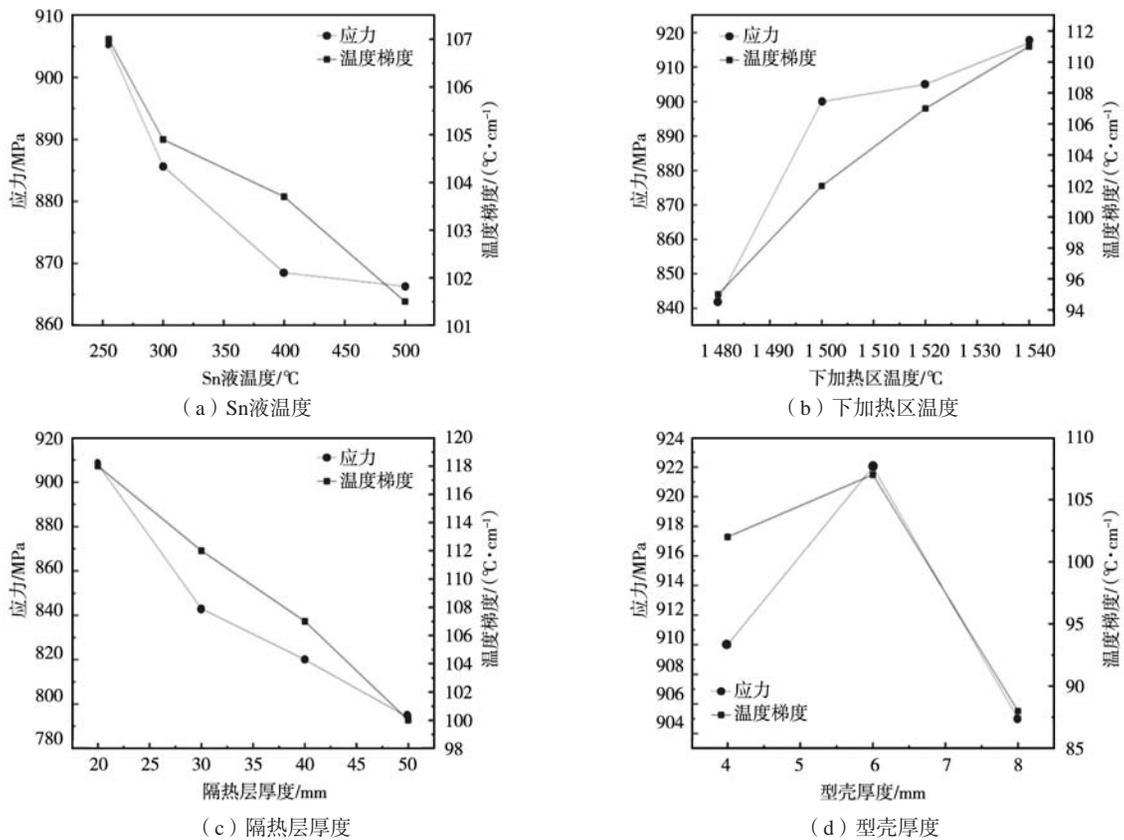


图11 不同工艺参数下特征点的应力与温度梯度变化

Fig. 11 Variations of stresses and temperature gradients at characteristic points under different process parameters

通过上述数值模拟结果可以发现，应力的大小变化与其相应的温度梯度变化相关。总的来说，应力的变化趋势与温度梯度的变化趋势为正相关。Elliott^[25]和Miller^[26]等人分别对不同Sn液温度与不同加热区温度下的温度梯度分布与冷却速率变化进行了研究，所得温度梯度与冷却速率在不同工艺参数下的变化趋势与

本研究相同。随着Sn液温度的不断升高，冷区与加热区的温度差异不断减小，温度梯度下降，冷却速率减小，应力变小。隔热层厚度的增加会使隔热层内的温度梯度分布更宽，叶片在凝固过程的温度梯度减小，冷却速率减小，应力变小。随着下加热区温度的不断升高，金属液与型壳的整体温度随之升高，导致与冷

区的温度差异增加,引起温度梯度上升,冷却速率升高,从而使应力更加集中。从下加热区参数引起的有效应力变化可以发现,在1 500 °C时出现了突变点,不同下加热区温度的糊状区宽度如图12所示,可以发现1 480~1 500 °C的糊状区宽度变化比其他温度区间的糊状区宽度变化更为明显,因此有效应力的大小变化也更为明显。

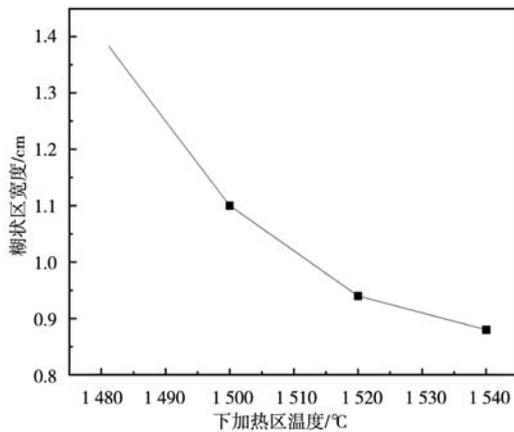


图12 不同下加热区温度的糊状区宽度

Fig. 12 Variations of mushy zone widths with lower heating zone temperatures

Miller^[26]等人对型壳厚度对于界面换热行为的变化做了一系列研究,认为对于LMC工艺,在壳厚度为5 mm时,影响叶片凝固的主要换热方式发生改变。壳

厚度5 mm以上时,型壳表面的散热为主要机制;壳厚度5 mm以下时,型壳/叶片的界面换热为主要机制。因此存在一个型壳厚度,使得铸件可以获得最大的温度梯度。本研究中在壳厚度6 mm处的温度梯度对比4 mm壳厚出现了升高的现象,而后随着壳厚度的进一步增加,导致同等热量积累后散热时间更长,凝固时间变长,因此凝固时间与冷却速率都随之下降,温度梯度与有效应力也变小。

综合分析各因素引起的有效应力大小变化可以发现,隔热层厚度的变化对应力大小的改变最为明显,而下加热区在1 500 °C以上时,提高下加热区温度对应力的大小变化并不明显。

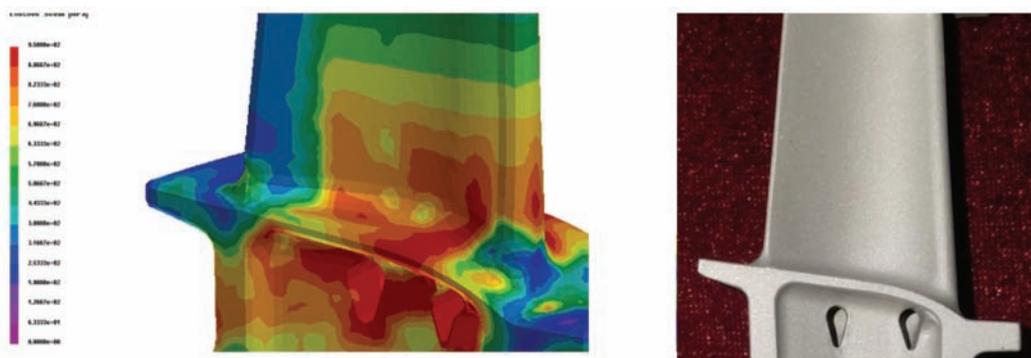
提高Sn液温度、降低下加热区温度,增加隔热层厚度都会缓解单晶涡轮叶片的应力集中问题,适当的降低型壳厚度可以在降低应力的同时,尽量小地影响温度梯度的变化。综合考虑各工艺参数对应力变化的影响以及对陶瓷型芯/型壳强度等的影响,在保证较高的温度梯度同时满足应力较小、使叶片不发生断裂的情况下,对工艺进行优化,采用的工艺参数如表4所示。

工艺参数优化后,该单晶叶片定向凝固过程中的应力分布如图13所示,可以看出,在叶片叶身靠近缘板的根部位置,铸造应力显著降低(从944 MPa降低到781 MPa)。通过计算得出,温度梯度降低(从119 °C/cm降低到90 °C/cm),枝晶间距增加(从236 μm增加到279 μm)。利用该参数进行单晶叶片的实际浇注试

表4 优化前后的加工工艺参数

Tab. 4 Processing technological parameters before and after optimization

项目	下加热区温度/°C	上加热区温度/°C	隔热层厚度/mm	Sn温度/°C	型壳厚度/mm	抽拉速率/(mm·min ⁻¹)
优化前	1 520	1 500	40	255	6	6
优化后	1 480	1 500	50	500	4	6



(a) 铸造应力分布数值模拟结果

(b) 实际叶片铸件

图13 工艺优化后铸造应力分布数值模拟结果及实际叶片铸件

Fig. 13 Numerical simulation result of cast stress distribution and actual blade casting after process optimization

验, 叶片均未产生断裂, 通过宏观腐蚀观察发现, 没有杂晶与雀斑等铸造缺陷, 显著提升了单晶叶片的合格率。

3 结论

(1) 数值模拟结果表明中温 (650~700 °C) 下所研究涡轮单晶叶片的叶根部位应力集中超过其屈服强度, 容易导致叶片的断裂。

(2) 随着保温炉温度的提高、隔热层厚度的减小、Sn液温度的降低, 单晶叶片的铸造应力逐渐增

加。随着型壳厚度的增加, 铸造应力呈现出先增加后降低的趋势。

(3) 在所研究的工艺参数中, 隔热层厚度对叶片的铸造应力分布影响最为明显, 在50 mm时, 可使叶片特征点处铸造应力降低至793 MPa。而其他工艺参数对应力分布的大小影响并不明显。

(4) 通过数值模拟对LMC工艺进行优化, 优化后的叶片特征点处铸造应力进一步降至781 MPa, 采用优化后的参数制备出的单晶叶片未发现断裂问题, 显著提高了叶片的合格率。

参考文献:

- [1] 刘林, 孙德建, 黄太文, 等. 高梯度定向凝固技术及其在高温合金制备中的应用 [J]. 金属学报, 2018, 54: 614-626.
- [2] FRANKE M M, HILBINGER R M, LOHMULLER A, et al. The effect of liquid metal cooling on thermal gradients in directional solidification of superalloys: thermal analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213 (12): 2081-2088.
- [3] 柳百成. 铸件凝固过程的宏观及微观模拟仿真研究进展 [J]. 中国工程科学, 2000 (9): 29-37.
- [4] YU K O, NICHOLS J J, ROBINSON M. Finite-element thermal modeling of casting microstructures and defects [J]. JOM, 1992, 44 (6): 21-25.
- [5] TU J S, KELLY F R. The application of defect maps in the process modeling of single-crystal investment casting [J]. JOM, 1992, 44 (6): 26-28.
- [6] TU J S, OLINGER D M, HINES A M. Computer-aided development of an investment casting process [J]. JOM, 1993, 45 (10): 29-32.
- [7] TU J S, KELLY F R, HINES A M, et al. An Integrated procedure for modeling investment castings [J]. JOM, 1995, 47 (10): 64-68.
- [8] YAN X, WANG R, XU Q, et al. Numerical simulation and experimental casting of nickel-based single-crystal Superalloys by HRS and LMC directional solidification processes [J]. High Temperature Materials and Processes, 2017, 36 (4): 327-337.
- [9] 刘世忠, 李嘉荣, 唐定忠, 等. 单晶高温合金定向凝固过程数值模拟 [J]. 材料工程, 1999 (7): 41-43.
- [10] LI J, LIU S, YUAN H. Solidification simulation of investment castings of single crystal hollow turbine blade [J]. Journal of Materials Sciences and Technology, 2003, 19 (6): 532.
- [11] 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.
- [12] 杨振宇, 陈昊, 胡松松, 等. 单晶高温合金铸件结构对定向凝固过程中温度场的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 334-339.
- [13] 郭如峰, 刘林, 李亚峰, 等. 液态金属冷却法制备DD403合金过程温度场和晶粒组织的数值模拟 [J]. 铸造, 2014, 63 (2): 145-151.
- [14] 尚伟, 孙长波, 刘艳, 等. 单晶导向叶片凝固过程组织模拟 [J]. 铸造, 2013, 62 (5): 415-419.
- [15] 谢道存. DD5合金单晶定向凝固温度场及杂晶控制的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [16] 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 (10): 2149-2153.
- [17] 邱飞, 卜昆, 李世锋, 等. 基于残余应力的单晶叶片榫头进气窗结构优化 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38 (2): 235-240.
- [18] 李世峰, 何爱杰, 邱飞. 单晶涡轮叶片定向凝固过程应力场数值模拟 [J]. 航空材料学报, 2018, 38 (1): 33-39.
- [19] 弓成美琪, 汪东红, 吴文云, 等. 单晶空心涡轮叶片凝固过程变形数值模拟研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (8): 951-955.
- [20] 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.
- [21] LI Z, XIONG J, XU Q, et al. Deformation and recrystallization of single crystal nickel-based superalloys during investment casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 1-12.
- [22] 洪耀武, 孙长波, 康进武, 等. 定向凝固简化空心叶片热应力数值模拟 [J]. 铸造, 2011, 60 (8): 759-764.
- [23] 中国科学院金属研究所. DD426镍基单晶高温合金技术资料 [R]. 2011.

- [24] 卢玉章, 王大伟, 张健, 等. 液态金属冷却法制备单晶铸件凝固过程的实验与模拟 [J]. 铸造, 2009, 58 (3): 245-248.
- [25] ELLIOTT A J, POLLOCK T M. Thermal analysis of the Bridgman and liquid-metal-cooled directional solidification investment casting processes [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38: 871-882.
- [26] 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: 411-425.

Effect of LMC Process Parameters on the Casting Stress of Single Crystal Blades

YUAN Ren¹, ZHANG Jin², HUANG Ya-qi³, SHEN Jian³, LU Yu-zhang³, ZHAI Zi-rong¹

(1. College of Creative Arts, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110232, Liaoning, China)

Abstract:

Taking DD426 superalloy turbine hollow blade as research object, the stress field distribution variations of the blades during liquid metal cooling (LMC) directionally solidifying processes were simulated, and the effects of process parameters on the cast stresses of single crystal turbine hollow blades were investigated. The results show that as the temperature of the holding furnace increases, the thickness of the insulation baffle decreases, and the molten Sn temperature decreases, the cast stresses of the single crystal blades increase gradually. As the thickness of the mold shell increases, the cast stress shows a trend of increasing at first and then decreasing. The most significant process parameter that affects the stress distribution of single crystal turbine blade is the thickness of the insulation baffle. When the thickness of the insulation baffle is 50 mm, the cast stress value of the blade characteristic point can be reduced to 793 MPa. Based on the numerical simulation results, optimized process parameters were proposed. The casting stress at the characteristic point after process optimization was further reduced to 781 MPa and the phenomenon of blade fracture caused by excessive cast stress was eliminated in actual casting.

Key words:

liquid metal cooling; single-crystal turbine blade; process parameter; cast stress