

单晶空心涡轮叶片凝固过程变形数值模拟研究

弓成美琪¹ 汪东红² 吴文云¹ 祝国梁² 疏 达² 付 超³

(1.上海工程技术大学材料工程学院; 2.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; 3.上海电气集团股份有限公司中央研究院)

摘 要 针对燃气轮机空心涡轮叶片在定向凝固过程中应力、应变复杂,导致铸件尺寸超差的问题,基于 ProCAST 软件,模拟了大尺寸单晶叶片定向凝固的变形过程,研究了不同工艺下的涡轮叶片应力场与位移场,分析了铸造工艺参数对叶片尺寸变形的影响。结果发现,浇注温度为 1 530 ℃和抽拉速率为 5 mm/min 时,选取的叶片截面变形量最小。叶片变形尺寸预测可为尺寸精度控制提供指导。

关键词 空心叶片;定向凝固;尺寸变形;数值模拟

中图分类号 TG249.5; TP311; TG146.1⁺5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Deformation of Single Crystal Hollow Turbine Blade during Solidification Process

Gong Chengmeiqi¹, Wang Donghong², Wu Wenyun¹, Zhu Guoliang², Shu Da², Fu Chao³

(1.School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science; 2.School of Materials Science and Engineering, Shanghai Key Laboratory of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai Jiaotong University; 3.Central Academe, Shanghai Electric Group Co., Ltd.)

Abstract: In view of the complex stress and strain of hollow turbine blade of gas turbine during the directional solidification process, which leads to the casting size out of tolerance, the directional solidification deformation process of large-scale single crystal blade was simulated based on ProCAST software, and the stress field and displacement field of hollow turbine blade under different processes were investigated. The influence of casting process parameters on dimensional deformation was analyzed. The results indicate that with the pouring temperature of 1 530 ℃ and the pulling rate of 5 mm/min, the selected section deformation of blade is the smallest. The prediction of blade deformation size can provide guidance for the control of dimensional accuracy.

Key Words: Hollow Blade, Directional Solidification, Dimensional Deformation, Numerical Simulation

燃气轮机以天然气为清洁能源,具有效率高、排放低、调峰能力强等特点,是 20 世纪以来最具工业市场价值的第三代动力机器。涡轮空心叶片作为燃气轮机涡轮段的主要组成零件,在工作状态下需高速运转,叶片叶身部位通常进行变截面薄壁设计^[1]。作为气-动能量转换的关键部件,涡轮叶片的尺寸精度不仅关系到燃气轮机是否能够顺利装片,还是实现其能量转化效率的关键。涡轮叶身部分为复杂的空间曲面结构且壁厚不均,其无余量熔模精密铸造过程复杂^[2]。从蜡模到叶片成形,铸件不仅会发生体积收缩,而且其几何特征也存在

一定的变化,产生变形而引起铸件尺寸超差。由于叶片结构复杂,对一次成形中尺寸精度和组织性能提出较高要求^[3,4]。

近年来,我国在涡轮叶片精密铸造成形控形技术方面取得了较大进步,对等轴晶精密铸造中形位偏差的变化规律加以分析,建立了基本模型进行监控,有效控制了铸件的尺寸精度。然而,有关定向单晶和柱晶叶片控形基础理论和工程技术研究方面还有不足,大尺寸燃机涡轮叶片制造过程中的应力、应变演变规律尚不清楚,叶片变形难以控制,而且叶片对精密铸造过程中的误差

收稿日期:2021-10-30;修改稿收到日期:2021-12-01
基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(2017-VII-0008-0102,J2019-VI-0004-0117);国家自然科学基金资助项目(51821001,52090042,52074183);国家重点研发计划资助项目(2020YFB1710100);浙江省重点研发计划资助项目(2020C01056,2021C01157);长寿命高温材料国家重点实验室开放基金资助项目(DECSKL202109);材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金资助项目(P2021-006)
第一作者简介:弓成美琪,女,1996 年出生,硕士研究生,上海(201600),E-mail:1769028701@qq.com
通信作者:汪东红,男,1984 年出生,副研究员,上海(200240),E-mail:wangdh2009@sjtu.edu.cn
引用格式: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.
GONG C M Q, WANG D H, WU W Y, et al. Numerical simulation of deformation of single crystal hollow turbine blade during solidification process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):951-955.

来源及传递模式缺乏系统的定量分析与有效的控制方法,叶片尺寸超差严重。

定向凝固过程变形尺寸预测能够有效解决叶片尺寸精度预测问题,数值模拟可以对铸件浇注过程中液体凝固过程进行预测^[5]。卜昆等^[6]、窦杨青等^[7]利用 ProCAST 软件对叶片尺寸各工艺参数进行优化,研究了叶片凝固过程收缩变形位移场变化情况。赵代银等^[8]、郭雄等^[9]研究了叶片精密铸造过程全流程尺寸控制方法,对蜡模与铸件叶片壁厚尺寸进行了对比研究。经模拟和实际研究发现,ProCAST 软件在模拟定向凝固过程时效果较好^[10,11]。因此,本课题基于 ProCAST 软件对燃气轮机大尺寸 DD5 涡轮单晶叶片凝固过程进行数值模拟,研究铸造工艺参数对叶片尺寸变形量与应力的影响规律,为叶片尺寸的精确控制提供参考。

1 铸件结构与工艺分析

研究对象为大尺寸定向凝固单晶涡轮叶片,为一级涡轮动叶片,是整个涡轮服役温度最高的转动件,国外均采用定向/单晶合金、配合先进涂层以及先进冷却技术制备。叶片结构包括叶身、缘板和榫头,其中叶身尺寸至关重要,其三维模型及有限元划分见图 1。叶片总长为 118 mm,宽为 100 mm,高为 427 mm,上部榫头高 106 mm。内部设计为中空结构,采用陶瓷型芯减少叶片厚度加快散热。选取具有代表性的截面 A_1 、 A_2 、 A_3 作为变形量分析截面。

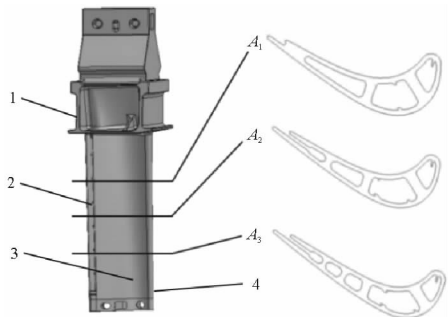


图 1 空心叶片三维模型及截面

Fig.1 3D model and cross section of hollow blade

1. 榫头 2. 边缘 3. 叶身 4. 前缘

铸件材质为 DD5 高温合金,其主要化学成分见表 1,合金的液、固相线温度分别为 1 385、1 235 ℃,数值模拟所用物性参数均由 JmatPro 软件计算所得,材料热物性参数及力学性能分别见图 2 和见图 3^[12]。

表 1 DD5 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of DD5 alloy												%
ω_B												
Cr	Co	Mo	W	Ta	Al	Re	Hf	C	B	Y	Ni	
7	7.5	1.5	5	6.5	6.2	3	0.15	0.05	0.004	0.01	余量	

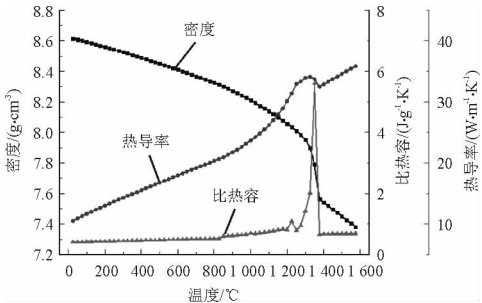


图 2 DD5 合金的物性参数

Fig.2 Thermophysical parameters of DD5 alloy

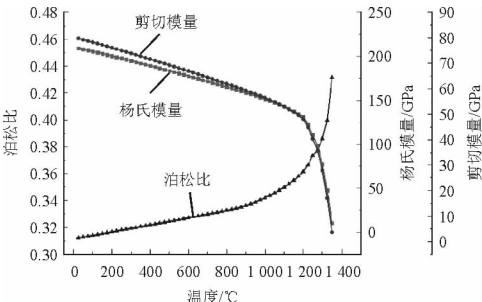


图 3 DD5 合金的材料常数

Fig.3 Mechanical parameters of DD5 alloy

2 定向凝固模拟

2.1 定向凝固方案设计

目前,高温涡轮叶片定向凝固方法主要有高速凝固法(HRS)和液态金属冷却法(LMC)。主要工艺过程:浇注完成的型壳通过抽拉运动由保温区缓慢移动到激冷区,在垂直激冷作用下沿固定取向生长形成单晶或者柱状晶。HRS 过程中合金与定向凝固炉激冷区的传热主要通过辐射进行,而 LMC 过程中合金与激冷区的传热则主要通过对流和热传导进行。两者在保温区都进行辐射传热^[13]。另外,相同抽拉速率下 LMC 过程能够形成更大的温度梯度,提高了单晶或柱状晶的成形率。

本课题采用 LMC 方法进行定向凝固,依据单晶抽拉的相关设计原则,选用螺旋式选晶器加上单晶叶片专用浇注系统的单叶片模型,见图 4。模拟时首先对 LMC

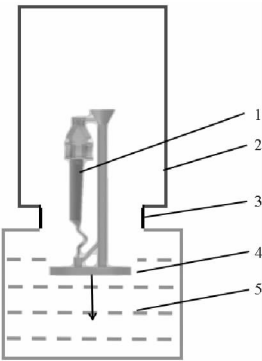


图 4 LMC 定向炉简化示意图

Fig.4 Simplified diagram of LMC directional furnace

1. 叶片 2. 加热带 3. 辐射挡板 4. 激冷铜盘 5. 激冷液

定向凝固过程和条件进行简化与假设:①假设加热炉膛为真空炉膛,其上保温区和下激冷区温度在温控系统控制下恒定不变;②由于过渡区的隔绝挡板起着隔绝上下两区作用,可假设其不进行辐射传热;③假设金属熔体中对流流动不存在或忽略不计;④假设浇注已完成,且忽略放置时间,直接进行定向抽拉凝固过程。

2.2 边界条件设置

空心叶片模拟初始参数:型壳预热温度为 1 500 ℃,型壳材料为刚玉,水冷盘选用铜板,上炉腔和过渡区为辐射传热,辐射系数为 0.8,下炉腔用对流传热模拟激冷过程,界面传热系数设置见表 2^[14]。

表 2 界面传热系数设置

Tab.2 Heat transfer coefficient setting of interface W/(m ² · K)			
型壳-铸件	激冷盘-铸件	型芯-铸件	型壳-激冷盘
随温度变化	5 000	500	1 000

2.3 凝固过程的数值模拟

图 5 为叶片凝固过程模拟结果。可以看出,随着抽拉进行,叶片开始由下到上定向凝固。研究发现,糊状区越小、激冷度越大,越易产生应力导致叶片凝固变形^[15]。图 5a 中叶片糊状区最小,激冷度最大,由于单晶叶片抽拉导致叶身边缘两侧距离炉腔不相等,近炉壁侧糊状区略高于远炉壁侧。图 5b 中叶片中上部糊状区开始变大,激冷度减小,相应的组织就可能出现一次枝晶间距变大,在型芯作用下叶盆边缘开始降温,凝固呈浅灰色。图 5c 中受底部糊状区影响,糊状区向两边弯曲的弧度不断增大,半凝固区域增大,叶片边缘的冷却速度远大于前缘,导致薄壁边缘处弯曲弧度更大,先进行凝固。直到进入大截面凝固过程,先凝固区受横截面积影响起到降温减速作用与后凝固区重合,见图 5d。

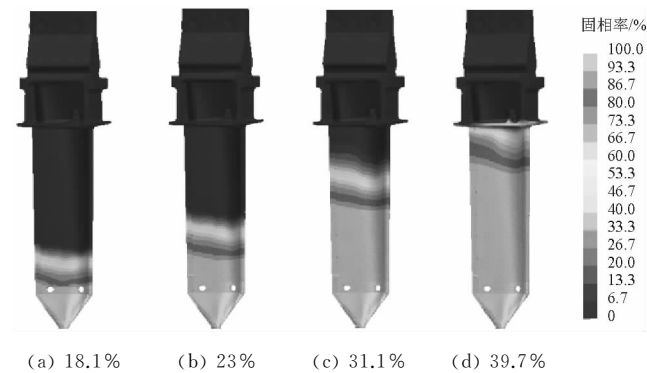


图 5 叶片凝固过程模拟

Fig.5 Simulation of blade during solidification

3 变形敏感因素分析

杨亮等^[16]通过对 DD6 单晶薄壁精铸件的模拟发现,抽拉速率在 3~6 mm/min 之间皆可产生单晶组

织,浇注温度在 1 470~1 530 ℃ 区间可保证单晶组织的稳定。谢道存^[17]通过研究 DD5 单晶组织,证明了抽拉速率在 3~7 mm/min 之间可产生单晶组织,其中 5 mm/min 时产生单晶组织最致密。有研究发现^[16,17],浇注温度为 1 470~1 530 ℃、抽拉速率为 3~7 mm/min 时可以获得稳定的单晶组织。

3.1 浇注温度对变形的影响

考虑到实际生产中浇注温度过高会导致型壳开裂、跑火等问题,最大浇注温度不得超过 1 530 ℃。图 6 是抽拉速率为 5 mm/min、不同浇注温度下凝固结束时的应力模拟结果。可以看出,由于壁厚不均匀导致各部分冷速不一致,型壳约束、相变收缩等产生应力集中,严重时会导致裂纹出现,使叶片报废。随着浇注温度提高,叶片榫头区域 1 的应力先增大后减小,在 1 510 ℃ 时最大,为 266.7 MPa。榫头边缘为薄壁结构,在抽拉时容易导致温度骤然升高,这会使温度梯度增加,在激冷过程中更易产生应力集中。而随着浇注温度继续升高,在激冷作用下也增加了凝固区域,导致应力集中现象缓解。整体叶身部位的应力为 160~320 MPa,整体残余应力分布较为均匀,受内部空心结构的影响,呈现结构突变处薄壁应力增大的现象。2 处为叶片榫头和叶身交接处,由于截面积变大,糊状区先增大后缩小,应力集中有所改善,在 1 490 ℃ 时应力最小,低于 53.3 MPa。3 处为叶根部分,浇注温度对此区域的应力影响不大,整体高于 480 MPa,远高于叶片其他部位,在 3 处旁的孔洞处有严重的应力集中,小区域局部应力超过了 800 MPa。研究叶片整体应力各区域分布为研究叶片变形提供依据。

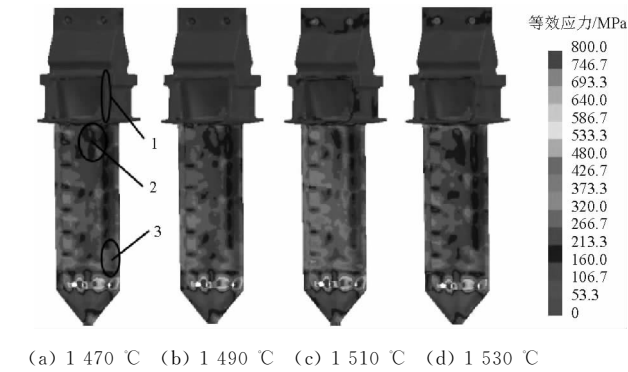


图 6 不同浇注温度下叶片应力模拟

Fig.6 Simulation of blade stress under different pouring temperatures

由于 DD5 合金在 870 ℃ 情况下屈服强度为 1 070 MPa,在低于 924 MPa 下变形量可以忽略不计。当应力超 500 MPa 后,应力场和位移场呈正相关,近似为一次函数。减少冷速差和收缩产生的应力可以最大程度的减少变形量。图 7 是抽拉速率为 5 mm/min、不同浇

注温度下凝固结束时的 $A_1 \sim A_3$ 截面变形模拟结果。可以看出,叶盆的变形量要远低于叶背的变形量。 A_1 截面变形量最大, A_3 截面变形量最小,与应力分布相反。由于定向凝固导致叶片下部优先凝固产生的变形最小,随着抽拉变形逐渐传递。最大变形量在 A_1 处达到 2 mm,随着浇注温度增大, A_1 截面变形量先增大后减小。 A_2 截面在浇注温度为 1 510 ℃ 时,叶片薄壁边

缘变形最大达到 1.3 mm,1 530 ℃ 时整体变形量均匀且小于 1.2 mm。 A_3 截面在浇注温度达到 1 490 ℃ 时整体变形量最大,而 1 470 ℃ 时 A_3 截面前缘变形量最小,为 0.1 mm。可以预测浇注温度的增加会导致应力增大,而应力在壁厚处呈现集中,导致叶背变形量比叶盆大,叶片边缘变形量比前缘大。其中浇注温度为 1 530 ℃ 时变形量最小。

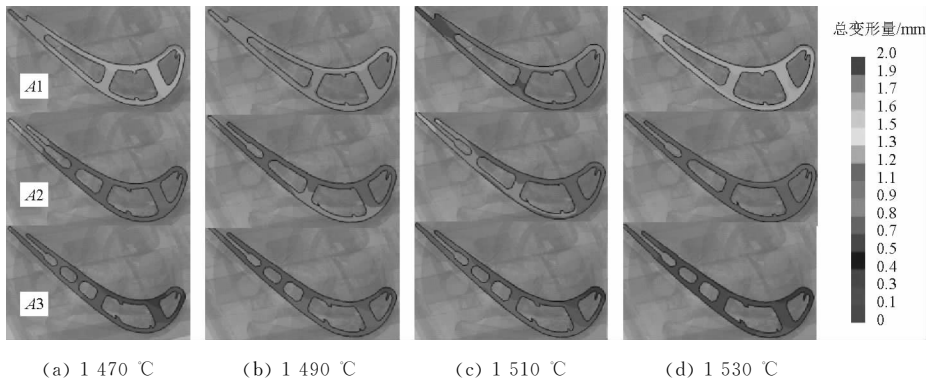


图 7 不同浇注温度下变形模拟结果
Fig.7 Simulation results of deformation at different pouring temperatures

3.2 抽拉速率对变形的影响

考虑到抽拉速率大于生长速率会在叶片表面产生流纹,故最大抽拉速率为 7 mm/min。图 8 是浇注温度为 1 510 ℃ 在不同拉速下叶片完全凝固时的应力模拟结果。可以看出,不同抽拉速率下叶身边缘应力集中更明显,以边缘薄壁下角处应力集中最大,与位移最大值处位置一致。随着抽拉速率增加,图 8 中 1 处的应力区域在 6 mm/min 时达到最大面积,即小应力区域增加,当抽拉速率为 5 mm/min 时 1 处面积减小最明显,之后随着抽拉速率增大,应力逐步增大。2 处的应力随着抽拉速率的变化不大,在抽拉速率为 4~6 mm/min 时略有减少,超过 6 mm/min 逐渐增加,整体波动在 50 MPa 之内,对该区域变形量的影响不大。3 处的应力变化区域随着抽拉速率的增大而增大,在 5 mm/min 时 3 处应力值最小。

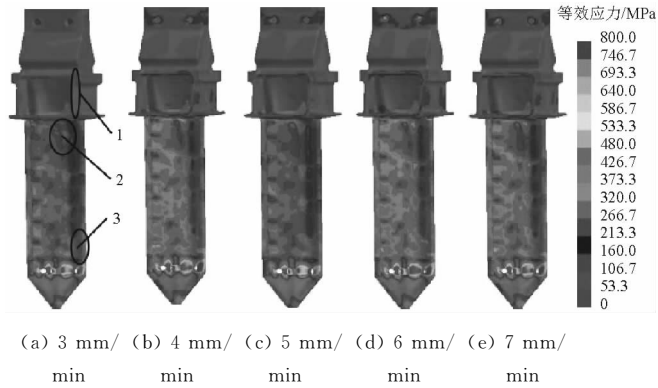


图 8 不同抽拉速率下应力模拟结果
Fig.8 Simulation results of stress under different drawing rates

图 9 是浇注温度为 1 510 ℃ 时在不同拉速下金属液完全凝固时的变形量。可以看出,3 个截面中 A_1 截面的变形量最大,且在抽拉速率为 5 mm/min 时变形量最小,不超过 1.5 mm。 A_2 截面变形量随抽拉速度的

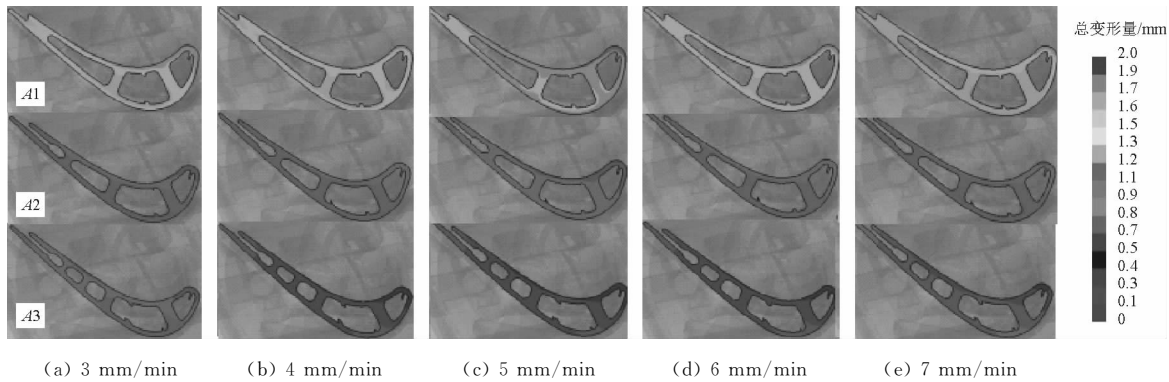


图 9 不同抽拉速率下变形模拟结果
Fig.9 Simulation results of deformation under different drawing rates

提高变化不大,在凝固中段变形对抽拉速率变化不敏感,叶盆和叶背之间变形梯度不明显。在抽拉速率为 5 mm/min 时,截面变形量最小,不超过 0.9 mm。 A_3 截面为最大应力所在区,结合图 8 可知,抽拉速率为 5 mm/min 时,最大应力不超过 480 MPa,抽拉速率大于或小于 5 mm/min 时,最大应力区均超过 480 MPa,受定向凝固的影响变形量反而最小。

3.3 试验验证

根据已有的模拟结果,选取位移量最小的一组进行浇注。使用 DD5 高温镍基合金,将原材料加入到熔炼炉中,设定熔炼温度进行熔炼。在合金熔炼期间,把经过脱蜡处理好的型壳放入特定的仪器内焙烧,焙烧完成后将型壳放置在激冷盘上进行固定,关闭炉门开始进行浇注前预热。预热到指定温度后等待加热炉温度稳定,随后进行浇注,浇注温度为 1 530 ℃,金属液完全充满型壳,关闭熔炼炉,将型壳静置一段时间。设置抽拉速率为 5 mm/min,等仪器启动开始抽拉,抽拉结束关闭加热部分。等叶片冷却到室温取出叶片,得到浇注好的单晶叶片,见图 10。将实际浇注叶片的 3 个同等截面与模拟结果对比,见表 3,发现误差均小于 15%,证明了模拟的可靠性,同时浇注叶片符合尺寸要求。

表 3 各截面数据对比

Tab.3 Data comparison of each section

截面	试验/mm	仿真/mm	误差/%
A_1	1.228	1.346	9.61
A_2	0.727	0.809	11.28
A_3	0.407	0.463	13.76



图 10 试验浇注叶片

Fig.10 Produced blade for testing

4 结 论

- (1)大尺寸单晶叶片在相同抽拉速率下,整体变形量随着浇注温度的升高逐渐减小,通过截面对比发现,浇注温度为 1 530 ℃时,整体变形量最小为 1.2 mm。
- (2)在相同浇注温度下不同抽拉速率通过影响应力

分布产生不同变形量,抽拉速率升高,变形量先减小后增大。通过截面对比发现,抽拉速率为 5 mm/min 时变形量最小,不超过 0.9 mm。

(3)实际浇注验证浇注温度为 1 530 ℃,抽拉速率为 5 mm/min 的变形与模拟结果一致,尺寸精度满足生产设计要求。

参 考 文 献

[1] LIU X F, LOU Y C, YU B, et al. Directional solidification casting technology of heavy-duty gas turbine blade with liquid metal cooling (LMC) process[J]. China Foundry, 2019, 16(1): 23-30.

[2] ZHANG H, XU Q Y, LIU B C. Numerical simulation and optimization of directional solidification process of single crystal superalloy casting[J]. Materials, 2014, 7(3): 1 625-1 639.

[3] 陈品阳,胡聘聘,冯强,等. Ru 对镍基单晶热暴露组织演变及持久性能的影响[J].稀有金属材料与工程, 2011, 40(12): 2 111-2 116.

[4] 范永升,黄渭清,杨晓光,等. 某型航空发动机涡轮叶片服役微损伤研究[J].机械工程学报, 2019, 55(13): 136-142.

[5] CAO L, LIAO D, LU Y D, et al. Heat transfer model of directional solidification by LMC process for superalloy casting based on finite element method[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2016, A47(9): 4 640-4 647.

[6] 卜昆,傅将威,董一巍,等. 基于仿真的单晶涡轮叶片精铸工艺参数优化[J].特种铸造及有色合金, 2013, 33(4): 353-357.

[7] 窦杨青,卜昆,董一巍,等. 涡轮叶片位移场模型变形特征解耦方法研究[J].机械设计与制造, 2010(1): 104-106.

[8] 赵代银,杨照宏,杨功显,等. 某型重型燃机实心动叶片的精密铸造过程尺寸控制[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1 265-1 268.

[9] 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.

[10] YAN X, HANG Z, NING T, et al. Multi-scale simulation of single crystal hollow turbine blade manufactured by liquid metal cooling process[J]. Progress in Natural Science, 2018, 28(1): 78-84.

[11] 李海松,杨啊涛,张琼元,等. 重型燃机大尺寸叶片定向凝固组织模拟[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(9): 980-984.

[12] 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): 2 149-2 153.

[13] 卢玉章,席会杰,申健,等. 液态金属冷却法制备重型燃机定向结晶空心叶片凝固过程的实验与模拟[J].金属学报, 2015, 51(5): 603-611.

[14] 章璐,黄兴民,杨树龙,等. 基于 ProCAST 软件的镍基中空叶片定向凝固过程模拟[J].铸造技术, 2014, 35(1): 81-85.

[15] 史振学,韩梅,刘世忠,等. 试样尺寸对一种单晶高温合金组织的影响[J].钢铁研究学报, 2012, 24(4): 28-33.

[16] 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(11): 15-22.

[17] 谢道存. DD5 合金单晶定向凝固温度场及杂晶控制的研究[D]. 江苏镇江:江苏大学, 2016.

(编辑:刘晨辉)