

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.012

ZL114A 合金定向凝固过程的模拟与实验

徐亚军, 何涛, 霍元明, 赖磊捷, 衣晓杰

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为进一步提升 ZL114A 合金铸造件的材料性能,采用 ProCAST 模拟 ZL114A 合金定向凝固过程,研究了抽拉速度对合金铸件凝固过程中的温度场、糊状区和枝晶生长速率的影响规律。利用液态金属冷却(liquid metal cooling, LMC)定向凝固法制备 ZL114A 合金棒料,分析实验结果,对比并验证了模型的准确性。结果表明:在抽拉速度为 150 $\mu\text{m/s}$ 时, LMC 法能够得到较高的峰值温度梯度,获得较为理想的糊状区,从而保证了枝晶生长速率的稳定性。在此工艺条件下制备得到的 ZL114A 合金试棒,其微观凝固组织细化程度较高,显微缺陷较少,因此具备更好的材料性能。

关键词:ZL114A 合金;定向凝固;ProCAST 软件;抽拉速度

中图分类号: TG244.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2018)06-0057-05

Simulation and Experiment of Directional Solidification Process of ZL114A Alloy

XU Yajun, HE Tao, HUO Yuanming, LAI Leijie, YI Xiaojie

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to improve the material properties of ZL114A alloy castings, ProCAST was used to simulate the directional solidification process of ZL114A alloy. The influence of pulling rate on the temperature field, mushy zone, and dendrite growth rate during solidification of alloy castings was studied. The ZL114A alloy bar was prepared by liquid metal cooling (LMC) directional solidification method. The experimental results were analyzed, and the accuracy of the model was verified. The results show that at the pulling rate of 150 $\mu\text{m/s}$, the LMC method can achieve a higher peak temperature gradient and can obtain a more ideal mushy zone, which can guarantee the stability of the dendrite growth rate. The ZL114A alloy test rod prepared under this process condition has a higher degree of fine-grained microstructure and less micro-defects, it has better material properties.

Keywords: ZL114A alloy; directional solidification; ProCAST; pulling rate

ZL114A 合金具有良好的力学性能、铸造性能和抗腐蚀性能等优点,被广泛应用于军工和民用等领域,常用于制造飞行器,导弹上承受高负荷的零部件以及汽车上的高性能结构件等^{[1]565}。关于铝合金,国内外学者的研究主要集中在用各种时效手段调控合金时效析出组织、优化合金成分、净化处理和变质处理等方面。随着形变强化理论的快速发展,以及热处理工艺

的逐渐成熟,已有学者尝试通过定向凝固技术来提高铸造铝合金的性能,更有学者尝试通过定向凝固技术来提高铸造铝合金的性能,并已取得良好的效果。定向凝固技术用于提高铸造铝合金性能的研究逐渐受到关注,但目前还未发现针对 ZL114A 合金的研究和报告^[2-3]。

目前工业生产上主要采用高速凝固 (high speed)

收稿日期:2018-06-20;修回日期:2018-08-28

基金项目:上海市科委地方能力建设重点项目(16030501200);国家自然科学基金项目(51605275);上海工程技术大学研究生科研创新项目(17KY0106)。

第一作者简介:徐亚军(1992),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为定向凝固成形控制与仿真。通信作者:何涛(1979),男,安徽枞阳人,博士,副教授,主要研究方向为机器人、特种成形等。E-mail:hetao_cn@126.com

solidification, HRS) 法来生产合金的定向凝固铸件, HRS 法具有易于操作和控制等优点, 广泛应用于航空涡轮叶片等小尺寸铸件^[4]。HRS 法主要依靠水冷铜板进行散热, 在合金溶液刚开始凝固的时候, 能够获得较大的温度梯度。但是, 随着合金的逐渐下拉, 其离水冷铜板的距离越来越远, 散热能力逐渐下降^[5]¹⁴⁶。相较于 HRS 法, LMC 法则是依靠低熔点液态金属来进行散热, 接触面积和换热系数相比于水冷铜板有很大的提升, 拥有更高的温度梯度和更快的凝固速率。最终, 在铸件成型时, 可以获得较为理想的成型效果和更加细化的晶粒组织^[6]。因此, 采用 LMC 定向凝固技术成型 ZL114A 铸件具有一定的优势。

Brundidge 等^[7]的实验中采用了锡冷和浮动陶瓷挡板, 分析并总结出铸件组织的细化程度与抽拉速率之间的影响规律。Kermanpur A 等^[8]在 LMC 定向凝固工艺的温度场模拟做出相应的改进。Elliott A J 等^[9]的研究表明, 采用了新型锡液冷却技术, 温度梯度、冷却速率和枝晶细化程度相比于传统工艺提高了很多。

课题组建立了 ZL114A 合金试棒的三维实体模型, 采用 ProCAST 模拟仿真了其 LMC 定向凝固过程, 分析了抽拉速度对试棒的温度梯度场、糊状区和枝晶生长速率的影响规律。最后依据模拟结果完成 LMC 定向凝固试验, 并将模拟结果与实际结果作比较。

1 数值模拟

1.1 有限元模型

图 1 所示为 LMC 定向凝固原理示意图。设备主要包括: 加热炉、固定挡板、激冷盘、抽拉装置和冷区。实验开始前, 先将棒料和模壳固定在激冷盘上置于加热炉(真空状态下)中加热, 待棒料完全融化, 静置保温一段时间后, 按已设定好的抽拉速度将棒料及模壳抽拉到冷区(真空状态下), 直至铸件完全凝固。

图 2 所示为实验用 LMC 定向凝固炉网格模型, 其中虚拟冷区中所用的液态金属为镓铟成分比为 3.72:1.00 的镓铟合金液, 固定挡板为陶瓷板, 激冷盘为钼制托盘, ZL114A 合金的铸件为长 188 mm, 直径 10 mm 的圆柱形试棒, 铸件的模壳(即型壳)是厚度为 2 mm 的无盖圆筒形刚玉管。

1.2 材料

试验合金为 ZL114A 合金, 成分如表 1 所示^{[1]565}。将其化学成分输入 ProCAST 材料数据库, 计算可得合金的固相线温度为 553 °C, 液相线温度为 615 °C。

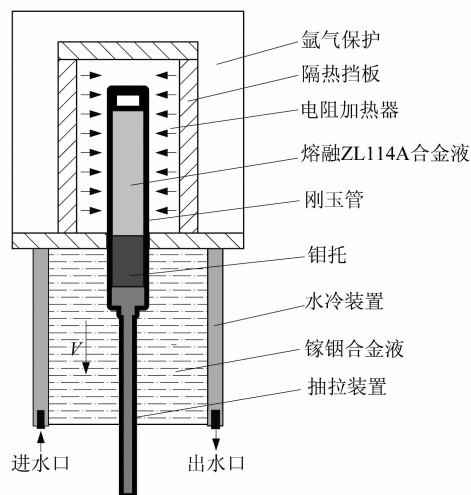


图 1 LMC 定向凝固原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of LMC directional solidification

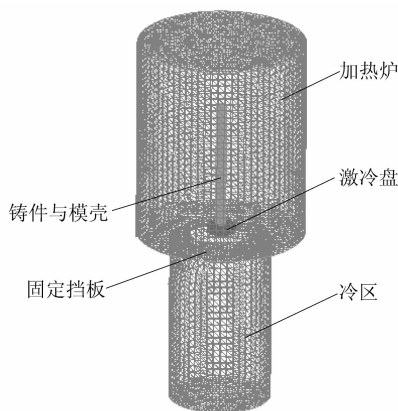


图 2 LMC 定向凝固炉网格模型

Figure 2 Mesh model of LMC directional solidification furnace

表 1 ZL114A 合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of ZL114A alloy %

Mg	Si	Cu	Ti	Be	Zn	Al
0.70	6.25	0.15	0.18	0.07	0.08	余

1.3 边界条件

1.3.1 界面换热参数

设定模壳与浮动挡板之间的界面换热系数为 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ^[10]; 模壳与铸件之间的界面换热系数为 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$; 铸件与浮动挡板之间界面换热系数为 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ^[11]。在抽拉过程中, 模壳与浮动挡板在未进入冷区之前, 与炉体内壁的换热模式为热辐射, 设定辐射率为 0.3, 与冷区的镓铟合

金液的对流换热系数为 0;在进入冷区之后,与镓铟合金液的换热模式为热对流,设定辐射率为 0,对流换热系数 h 为 $4\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{℃}^{-1}$ [5]147。

1.3.2 材料热参数

使用 ProCAST 的材料数据库计算得到 ZL114A 合金在不同温度下的热物性参数,如表 2 所示。

表 2 ZL114A 合金的热物性参数

Table 2 Thermophysical parameters of ZL114A alloy

温度/℃	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{℃}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	焓/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
20	154.2	2 675.0	2.1
300	170.9	2 621.0	260.0
400	172.1	2 599.0	366.4
500	174.5	2 576.0	477.4
553	175.0	2 565.0	527.9
570	125.0	2 545.7	681.8
615	80.0	2 481.2	1 033.8
750	80.0	2 445.0	1 204.3

注:553 ℃为固相线温度,615 ℃为液相线温度。

1.3.3 其他参数设置

液态金属的初始温度设定为 25 ℃,ZL114A 合金铸件和模壳初始温度设定为 750 ℃。在模拟开始时,

合金试件和模壳先在加热区静置一会,再分别以不同的抽拉速度将其拉至冷区。抽拉速度分别为 50,100,150 和 200 $\mu\text{m/s}$ 。在抽拉过程中,每抽拉 5 mm,辐射角系数就更新一次,保证对辐射计算精度能反映 Stefan-Boltzmann 常数 σ 的变化和影响 [12]。

2 模拟结果及分析

2.1 不同抽拉速度温度场的变化

为了提高 ZL114A 合金铸件的成型质量以及改善合金微观组织生长情况,可以通过调节下拉过程中的抽拉速度来实现对 LMC 定向凝固工艺参数的优化。图 3 所示为 ZL114A 合金铸件在 750 ℃的初始温度,以 4 种不同抽拉速度,经过固定挡板进入镓铟合金液中的温度场模拟结果。模拟结果显示,合金等温线在抽拉速度为 50 $\mu\text{m/s}$ 时最为稀疏,即温度梯度相对较低;随着抽拉速度的提升,等温线逐渐变得密集,在抽拉速度为 150 $\mu\text{m/s}$ 时等温线的密度达到最高,此时,温度梯度也达到峰值;之后随着抽拉速度的继续增大,温度梯度也随之下降。由此,可知 LMC 法的温度梯度与铸件的抽拉速度有关,且在达到一定速度时能够达到峰值温度梯度,这有利于抑制杂晶形核。

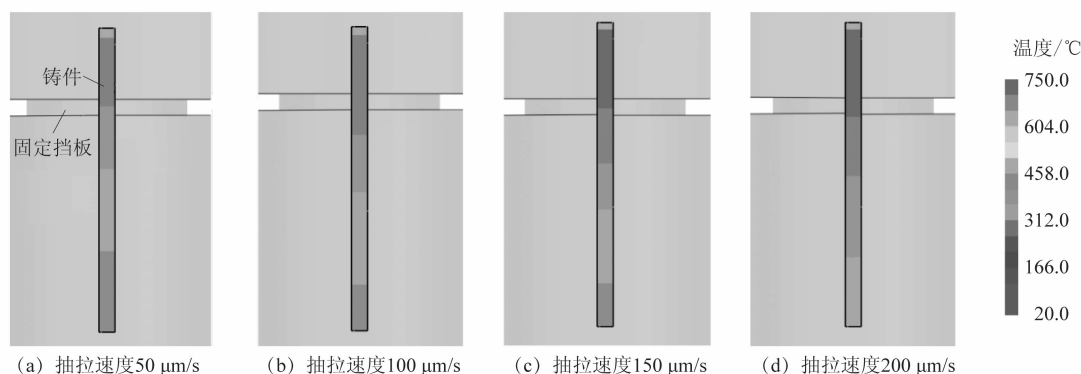


图 3 LMC 法不同抽拉速度时的温度场

Figure 3 LMC temperature field at different pulling rates

图 4 所示为 ZL114A 合金在不同抽拉速度的下拉过程的降温曲线,其中各曲线终点为试棒完全凝固时候的温度。由于合金试棒铸件底部离冷区的合金液有一定的距离,所以图 4 中当试棒经过固定挡板的时候,试棒的温度会出现短暂的稳态,这与实际情况相符;在温度下降到 500 ℃以下时,由于试棒大部分进入常温合金液,散热面积增大,总体冷却速率下降。不难看出随着抽拉速度的提升,合金试棒的温度梯度也就越来越大。因此,在其他条件不变的情况下,以较大的抽拉速度来制备 LMC 定向凝固铸件,可以获得较高的温度梯度,显著提升合金定向凝固组织过程中的冷却速率

和晶体生长速度,细化微观组织结构,促使铸件的材料性能大幅提升。

2.2 不同抽拉速度糊状区的变化

图 5 所示为 LMC 定向凝固在不同抽拉速度下,ZL114A 合金试棒铸件的中身经过固定挡板并且开始凝固时的糊状区模拟结果。结果显示,在抽拉速度较低时,合金铸件开始凝固的糊状区相对较宽且下凹程度较为明显;随着抽拉速度的提升,糊状区的宽度逐渐减小,其下凹程度也逐渐缓和,在抽拉速度达到 150 $\mu\text{m/s}$ 时达到最佳的状态;之后,随着抽拉速度的继续增大,糊状区的再次粗化。可知,随着抽拉速度的增

大,糊状区逐渐变窄,这样不仅能够减少雀斑偏析的程度,避免杂晶形核,还能减少枝晶熔断造成的缺陷;随着下凹程度的减小,糊状区以下的部分散热速度比较快;最后,糊状区的宽度随着抽拉速度的继续提升而变窄,有利于合金铸件各类金属成分的均匀分布,从而细化一次枝晶臂间距。

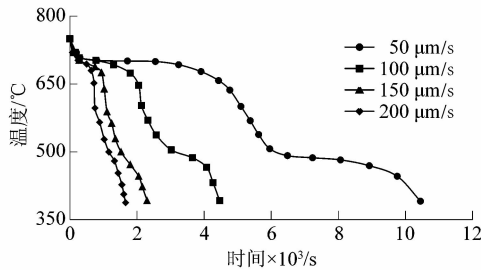


图4 不同抽拉速度的ZL114A合金的温降曲线

Figure 4 Temperature drop curve at different pulling rates of ZL114A alloy

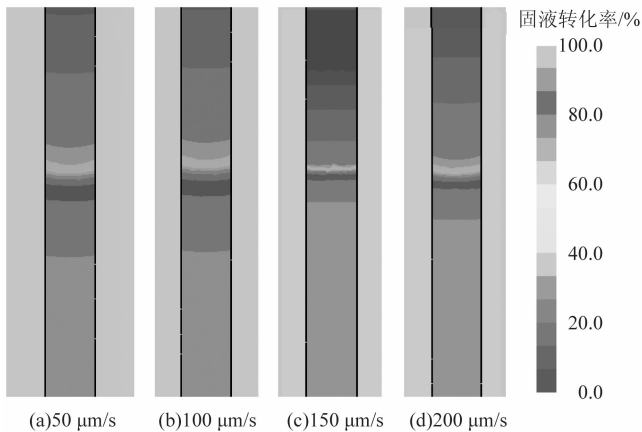


图5 LMC不同抽拉速度下开始凝固时的糊状区

Figure 5 LMC mushy zone at beginning of solidification at different pulling rates

2.3 不同抽拉速度对枝晶生长速率的影响

在ZL114A合金的定向凝固过程中,合金的枝晶是凝固组织主要结构之一,其在凝固过程中的生长速率很大程度上决定了合金凝固组织的形貌,进而影响合金铸件的特征和性能。图6所示为不同抽拉速度下ZL114A合金的枝晶生长速率的变化情况。可以看出,在较低的抽拉速度时,枝晶生长速率缓慢且不平稳,这是由于抽拉速度相对较慢,枝晶没有足够的生长时间,其合金的微观凝固组织会产生树状晶,导致合金的定向凝固特征不明显;随着抽拉速度的不断提升,合金所有部位的枝晶生长速率能够保持不变,这表明LMC定向凝固能允许ZL114A合金铸件拥有更高的抽拉速

度,且能保持较好的定向凝固组织。因此,在一定的抽拉速度范围内,枝晶的生长速率随着抽拉速度的提升(温度梯度也随着提升)而提高,可以得到更加细密的枝晶组织,改善微观组织结构,避免其他杂晶的产生,进而提升合金铸件的物理性能。

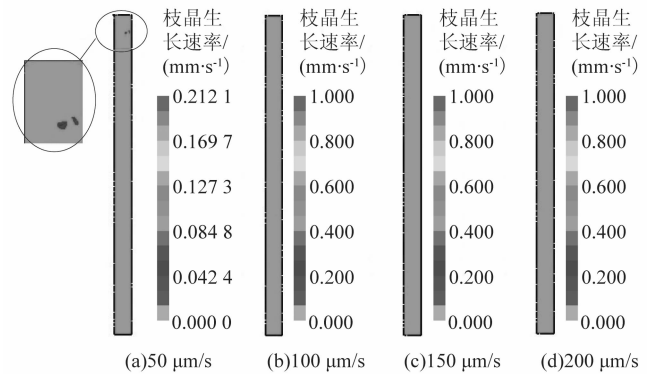


图6 不同抽拉速度的枝晶生长速率的变化

Figure 6 Variation of dendrite growth rate at different pulling rates

3 实验验证及分析

图7所示为在抽拉速度为50、100、150和200 μm/s定向凝固成形的ZL114A合金微观组织的变化情况。对比图7中(a)~(c),可以明显的看出,抽拉速度相对较低的情况下,ZL114A合金的横截面出现沉淀析出物以及显微裂纹,随着抽拉速度的提高,树枝晶细化程度变高,枝晶间距变小,相同倍数下的枝晶数量明显增多。当抽拉速度较低时,合金试棒进入镓铟合金液的速度较慢,由于熔融ZL114A合金的潜热释放,在极短时间内造成固液界面的温度梯度失稳和骤降,合金溶液其他部分的溶质原子来不及弥补固液界面前沿溶质浓度的降低,从而形成较大的过冷度。当抽拉速度提升到200 μm/s时,合金的微观组织变得粗糙,树状晶几乎消失,同时也出现了大量的沉淀析出物、微观缩孔和显微裂纹。这是因为当抽拉速度过快时,熔融ZL114A金属液快速进入冷区,由于镓铟合金液和冷却循环水的激冷作用,造成熔融合金液的热量散失方向紊乱,无法保证热量沿着铸件高度方向定向流动,大大削弱靠轴向单一辐射热量的热流强度^[13]。因此,作为先析出的α-Al处于过冷液体的包围中,阻碍其热量的传出,枝晶长大时所释放的潜热提高了枝晶连接处的温度,造成枝晶的局部融化,导致了共晶化合物以及其他夹渣的形成,一定程度上影响了合金的材料性能。

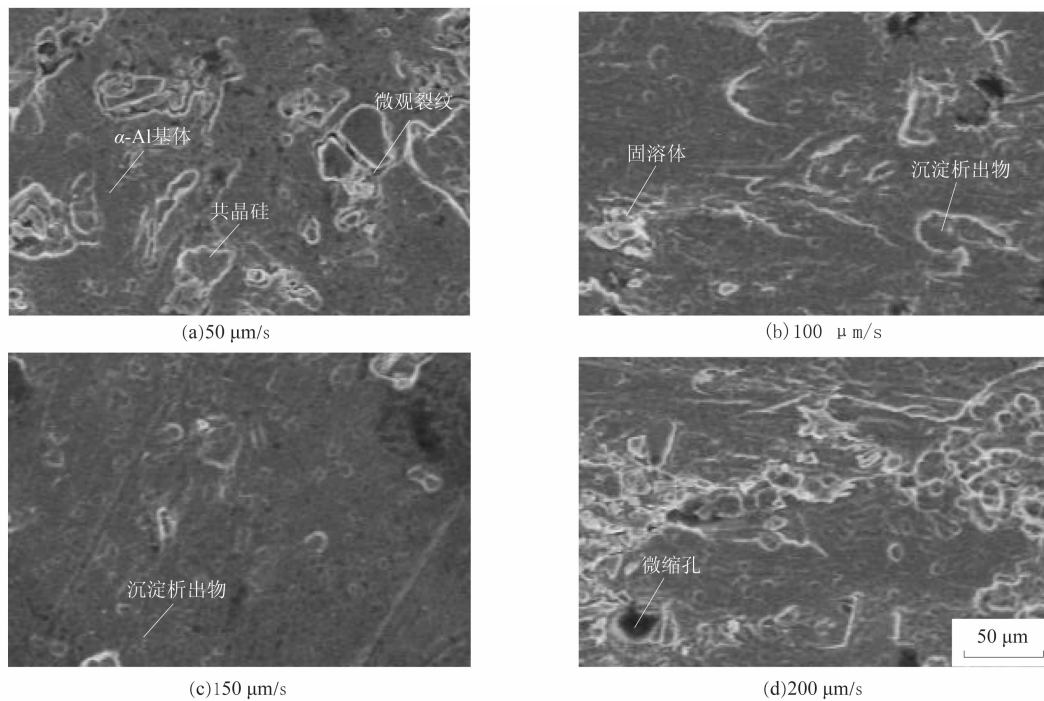


图7 不同抽拉速度的ZL114A合金定向凝固组织

Figure 7 Microstructure of ZL114A alloy directional solidification at different pulling rates

4 结语

1) 课题组利用 ProCAST 软件对不同抽拉速度下的 ZL114A 合金试棒 LMC 定向凝固过程中的温度场、糊状区以及显微缩松缺陷进行了仿真模拟。

2) 在较高的抽拉速度下, LMC 的温度梯度的峰值得到了提高, 枝晶的生长速率的稳定性得到保证, 且可以获得较为理想的糊状区, 不仅能够减少雀斑偏析的程度, 避免杂晶形核, 还能减少枝晶熔断造成的缺陷以及获得较快的散热能力。

3) 随着抽拉速度的提升, ZL114A 合金的晶粒成核数增加, 凝固组织渐渐细化, 强化相逐渐增多, 显微缺陷越来越少。在抽拉速度为 150 $\mu\text{m/s}$ 的时候, 其微观组织结构形态明显优于其他抽拉速度下的合金, 合金的材料性能也比较优异。

参考文献:

- [1] 李卫超, 邹勇志, 曾建民, 等. 固溶工艺对 ZL114A 合金组织和性能的影响[J]. 铸造, 2008, 57(6): 565-568.
- [2] 王东成. ZL114A 合金组织与力学性能的综合优化[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2010: 1-6.
- [3] 张继敏. ZL114A 合金热变形及热处理特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017: 1-2.
- [4] ZHANG Hang, XU Qingyan, PAN Dong, et al. Numerical simulation of microstructure evolution during directional solidification process in directional solidified (DS) turbine blades [J]. Science China (technological sciences), 2011, 54(12): 3191-3202.

- [5] 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.
- [6] 葛丙明, 刘林, 黄太文, 等. 液态金属冷却法在高温合金定向凝固中的应用[J]. 铸造, 2009, 58(9): 910-917.
- [7] BRUNDIDGE C L, MILLER J D, POLLOCK T M. Development of dendritic structure in the liquid-metal-cooled, directional-solidification process[J]. Metallurgical & materials transactions A, 2011, 42(9): 2723.
- [8] KERMANPUR A, RAPPAPAZ M, VARAHRAM N, et al. Thermal and grain-structure simulation in a land-based turbine blade directionally solidified with the liquid metal cooling process[J]. Metallurgical & materials transactions B, 2000, 31(6): 1293.
- [9] ELLIOTT A J, POLLOCK T M, TIN S, et al. Directional solidification of large superalloy castings with radiation and liquid-metal cooling: A comparative assessment[J]. Metallurgical & materials transactions A, 2004, 35(10): 3221.
- [10] CARTER P, COX D C, GANDIN C A, et al. Process modelling of grain selection during the solidification of single crystal superalloy castings[J]. Materials science & engineering A, 2017, 280(2): 233-246.
- [11] ELLIOTT A J, POLLOCK T M. Thermal analysis of the bridgman and liquid-metal-cooled directional solidification investment casting processes[J]. Metallurgical & materials transactions A, 2007, 38(4): 871-882.
- [12] 唐宁, 闫学伟, 许庆彦, 等. 基于 ProCAST 二次开发的叶片 LMC 凝固特征模拟[J]. 铸造, 2014, 63(4): 349.
- [13] 吴强, 司乃潮, 郭毅, 等. 定向凝固 Al-4.5% Cu 合金枝晶组织与抽拉速率的关系[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1101-1106.