

单晶高温合金铸件结构对定向凝固过程中温度场的影响

杨振宇¹, 陈昊², 胡松松³, 卢宇¹, 李勇¹, 骆宇时¹, 戴圣龙¹

(1. 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; 2. 空军装备部驻北京地区第六军事代表室, 北京101300; 3. 湘潭大学材料科学与工程学院, 湖南湘潭 411105)

摘要: 为了提高单晶涡轮叶片的气冷效果, 其冷却通道内部结构越来越复杂, 导致制备过程中凝固缺陷出现频率增高, 凝固缺陷的形成与定向凝固过程中温度场演变密切相关。采用ProCAST数值模拟的方法研究了铸件结构对定向凝固过程中温度场的影响。结果表明, 单晶高温合金铸件尺寸突变和渐变都会导致液固界面位置和温度梯度的变化; 相比渐变截面结构, 突变截面结构容易形成较大的凝固界面曲率, 且边角处形成较大的过冷, 更容易导致凝固缺陷的形成。

关键词: 单晶高温合金; 铸件结构; 突变结构; 渐变结构; 温度场演变

镍基单晶高温合金具有优异的高温综合性能, 是航空发动机和地面燃气轮叶片的首选材料^[1]。为了提高航空发动机性能, 涡轮前进口温度不断增加, 这一方面增加了镍基单晶高温合金中W、Mo、Re、Ta等难熔元素的含量, 提高合金的承温能力^[2]; 另一方面使得涡轮叶片的气冷通道越来越复杂, 以提高气冷效果^[3]。合金中难熔元素含量的增加和叶片结构的复杂化导致定向凝固过程中取向偏离、杂晶、雀斑、小角度晶界等缺陷的形成^[4]。铸件结构对凝固缺陷形成的影响已有大量研究^[5-10]。马德新等发现铸件结构对雀斑缺陷的形成具有强烈的影响, 并总结了铸件结构对雀斑形成的台阶效应、曲率效应、附壁效应等^[5]。张小丽等研究了单晶铸件平台尺寸对杂晶形成倾向性的影响及其机制, 发现平台长度越长, 高度越小时, 杂晶等缺陷越容易在平台内形核并长大^[11]。Huo等发现对接平台内枝晶生长汇聚处形成小角度晶界等缺陷^[8]。Bogdanowicz等发现叶片根部尺寸放大的区域枝晶变形引起小角度晶界的形成^[9]。定向凝固过程中温度场演化过程与凝固缺陷密切相关, Meng等采用ProCAST数值模拟的方法考察了平台内温度场演变过程, 并成功预测了杂晶形成与长大^[7]。Li发现平台处的实际热场呈现波状分布, 引起平台处形成两种类型的杂晶^[10]。Ma等在型壳中引入石墨导热体改变叶片缘板处温度场抑制了杂晶的形成^[12]。凝固缺陷的形成与温度场直接相关。然而, 目前对定向凝固过程中铸件结构对温度场的影响研究还不充分。

本文采用ProCAST数值模拟的方法, 研究圆柱形和变截面铸件的温度场演化过程, 表征突变截面和渐变截面下温度场演化规律, 研究了铸件结构对温度场的影响, 为叶片结构设计及制备提供一定的指导。

1 模拟与试验方法

本文模拟用合金为DD6, 其化学成分(质量分数)为: 4.3%Cr、9.0%Co、2.0%Mo、8.0%W、7.5%Ta、2.0%Re、0.1%Hf、5.6%Al、0.5%Nb、Ni余量。Jmatpro计算合金液相线温度为1 401 ℃, 固相线温度为1 349 ℃。采用ProCAST铸造工艺仿

作者简介:

杨振宇(1989-), 男, 工程师, 主要从事高温合金材料及工艺研究。
E-mail: xuanshangyiyi@163.com

中图分类号: TG132
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2021)03-0334-06

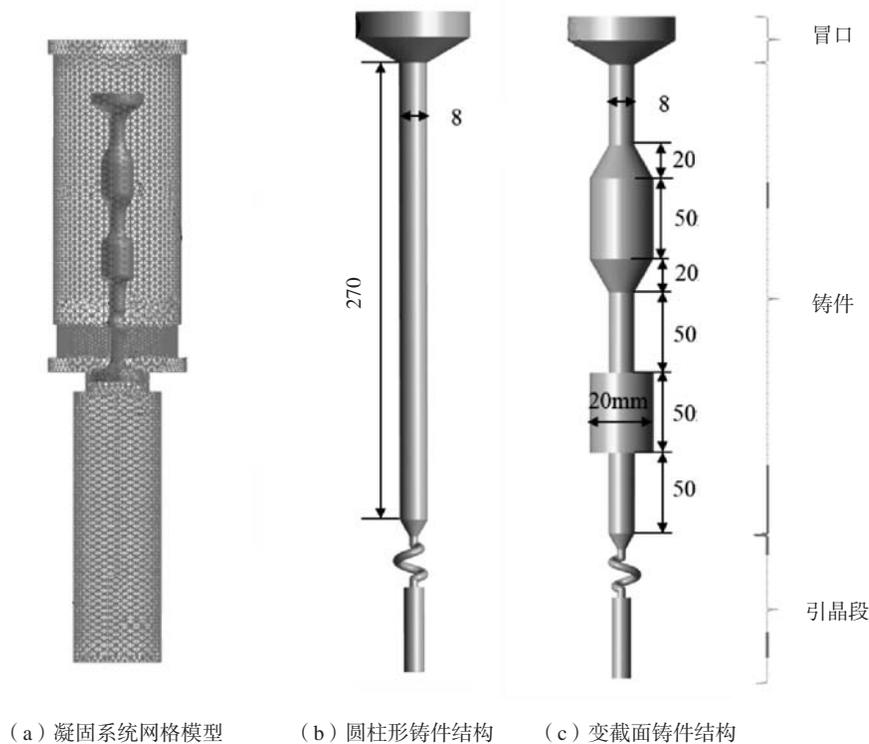
收稿日期:

2020-08-28 收到初稿,
2020-11-18 收到修订稿。

真软件对定向凝固过程中温度场演化过程进行模拟。如图1所示，将定向凝固炉分为加热区、隔热区和冷却区。为了提高计算效率，将炉体处理为二维面网格的封闭真空空间（Enclosure）。铸件（图1）及型壳采用三维网格划分，放置于圆形水冷铜板上。

为了定向凝固初期温度场演化过程，加热区设置为1 520 ℃，隔热区设置为900 ℃，冷却区设置为40 ℃，

型壳和铸件温度设置为1 520 ℃。炉体以100 $\mu\text{m/s}$ 竖直向上运动实现模拟定向凝固过程。根据数值模拟试样结构设计相似的铸件结构，采用工业级定向凝固炉制备DD6变截面试样。之后切取特征界面，采用标准金相处理方法及硝酸、氢氟酸和甘油按照1 : 2 : 4的比例配置的混合液进行化学腐蚀，采用DM-4000M型光学显微镜（OM）观察显微组织。



(a) 凝固系统网格模型 (b) 圆柱形铸件结构 (c) 变截面铸件结构

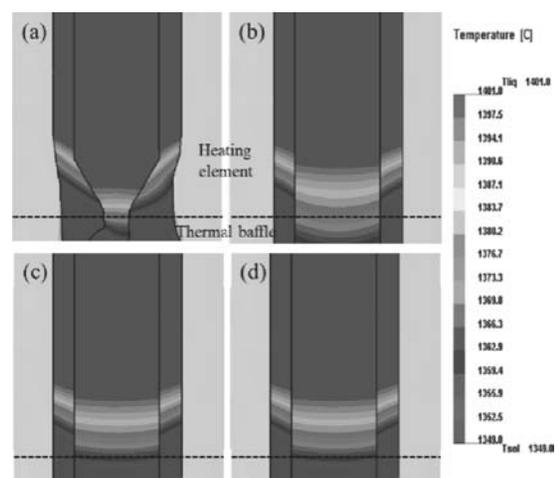
图1 单晶高温合金定向凝固系统及铸件网格模型

Fig. 1 Mesh model for directional solidification of single crystal superalloy

2 模拟结果

2.1 圆柱形铸件凝固过程中温度场演化

图2所示为圆柱形铸件定向凝固过程中纵剖面温度场演化过程，图中虚线代表加热区和隔热区的分界线。定向凝固过程中液固界面不断从试样底端向上迁移，抽拉802 s时凝固进入铸件底部，如图2a所示。可以看到此时液固界面稍高于加热区和隔热区的分界线，且液固界面呈现凸形；随着抽拉时间的推移，凝固界面从凸界面转变为凹界面，如图2b所示，且此时定向凝固过程中温度梯度减小，分界线位于糊状区中间偏下的位置。抽拉1 217 s之后，定向凝固进入稳态阶段，温度场不再变化，如图2c和2d所示，此时分界线稍高于固相线。图3为距圆柱形铸件底部不同高度中心线位置处冷却曲线。可以看到从450 mm位置到253.5 mm位置降温过程完全一致，进一步说明圆柱形铸件凝固过程温度场演化在较长时间内达到了稳态。



(a) $t=802\text{ s}$; (b) $t=1\ 007\text{ s}$; (c) $t=1\ 217\text{ s}$; (d) $t=2\ 042\text{ s}$

图2 圆柱形铸件定向凝固过程中不同抽拉时刻的液固界面形态

Fig. 2 Liquid-solid interface morphology at different withdrawal timing during directional solidification of cylindrical casting

2.2 变截面铸件凝固过程中温度场演化

液固界面推进到突变截面扩张台阶附近时温度场如图4所示。从图4a可以看出，液固界面将要进入扩张台阶时界面为凹界面，糊状区位于分界线以上；当液固界面开始进入扩张台阶时（图4b和4c），液固界面呈现波形，糊状区依然处于分界线以上，同时温度梯度稍有提高。液固界面继续向上推进，完全进入扩张区以后（图4d），液固界面变为近平直型，温度梯度大于液固界面进入扩张台阶前的情况，此时分界线位于糊状区中间部位。

液固界面推进到突变截面收缩台阶附近时温度场如图5所示。从图5a可以看出，液固界面将要进入收缩台阶时界面为明显的下凹界面，分界线位于糊状区中间位置；当液固界面开始进入收缩台阶时（图5b和5c），液固界面逐渐从下凹界面转变为上凸界面，糊状区位置有所下降，分界线相对糊状区位置上移，温度梯度逐渐增加；当糊状区完全离开收缩台阶后，如图5d所示，温度梯度稍有降低，且液固界面位置稍有上移。

图6为突变台阶不同位置处冷却曲线，曲线位置如

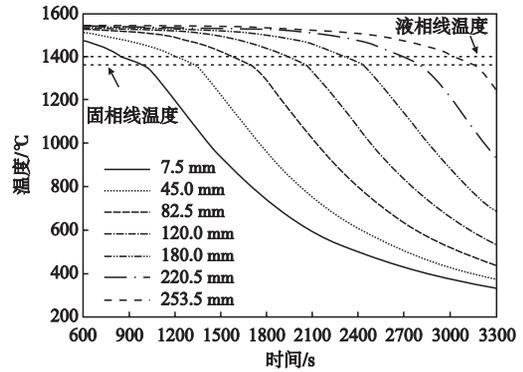


图3 距圆柱形铸件底部不同位置处冷却曲线
Fig. 3 Cooling curves at different positions from the bottom of cylindrical casting

插图所示。液固界面进入突变台阶时，距突变台阶不同位置处的冷却曲线明显不同。同一位置处温度从液相线温度到固相线温度所用时间越短，表明此处冷却速率越快，温度梯度越大。截面突变扩张台阶（位置C）和截面收缩台阶（位置G）时冷却速率较大，说明截面突变处的冷却速率和温度梯度较大。

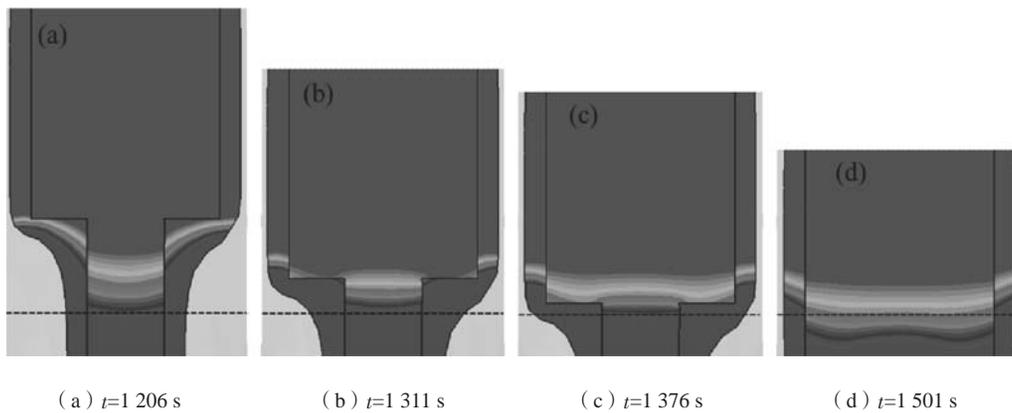


图4 液固界面推进到扩张台阶处的温度场演变
Fig. 4 Evolution of liquid-solid interface at the expansion platform

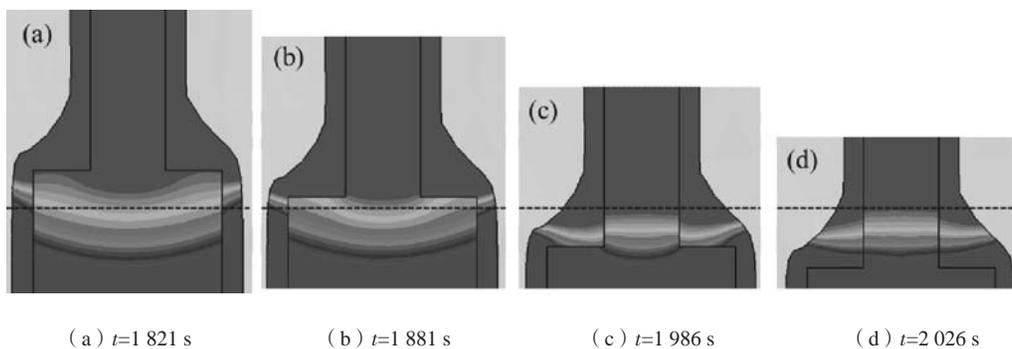


图5 液固界面推进到收缩台阶处的温度场演变
Fig. 5 Evolution of liquid-solid interface at the contraction platform

液固界面推进到渐变截面附近时温度场如图7所示。相比液固界面推进到突变截面的情况，液固界面推进到渐变截面附近时温度场变化情况比较平缓，液固界面形状进入渐变截面扩张区域时基本能够保持平面，温度梯度和液固界面位置相对分界线也没有明显变化；液固界面形状进入渐变截面收缩区域时表现出较明显的下凹，之后转为平界面，温度梯度和液固界面位置相对分界线则没有明显变化。

渐变截面不同位置处冷却曲线如图8所示，曲线位置如插图中所示。截面渐变扩张处冷却速率逐渐减慢，截面渐变收缩处冷却速率则逐渐加快。

3 讨论

单晶涡轮叶片整体结构复杂，其变截面特征可分为突变扩张平台、突变收缩平台、渐变扩张截面和渐变收缩截面四种基本类型。四种基本类型中，突变扩张平台引起定向凝固过程中平台边角处形成较大的过冷，极易导致杂晶缺陷的形成，是导致单晶叶片制备失败的重要原因之一^[7, 10]。由于镍基单晶高温合金导热能力较差，单晶铸件凝固过程中热量主要通过型壳向周围的辐射散热导出，因此定向凝固一定距离后温度场达到稳态，稳态时液固界面为凹界面，如图2所示。突变扩张平台边角处由于辐射散热面积较其他区域更大，因此最早达到合金的液相线温度，此时平台内部温度还较高；进一步冷却过程中平台内部各区域全部达到合金液相线温度时，平台边角处已形成较大程度的过冷。图9所示为圆柱形突变平台底面纵截面组织图。可以看出，杂晶在圆柱形突变截面的边缘形成杂晶，与模拟结果中圆柱形突变截面边缘容易形成较大的过冷促使杂晶形成相吻合。

其他三种类型的变截面特征，定向凝固过程中不会引起过冷，但会导致温度场偏离稳态，如图5和图7所示。图10显示了渐变扩张平台处纵截面显微组织，可以看出没有枝晶生长方向基本一致（图10b），没有杂晶缺陷形成。对比图10a渐变平台左侧和右侧枝晶，可以看到枝晶生长方向存在一定的夹角，说明定向凝固过程中存在一定数量的小角度晶界。这是由于定向凝固过程中温度场的改变会导致枝晶生长过程中应力变化，从而引起枝晶取向发生变化，引起小角度晶界的形成，如Bogdanowicz等也在叶根处（具有渐变扩张截面特征）发现存在小角度晶界等^[9]。

铸件截面尺寸的变化会引起冷却速率和温度梯度的变化，导致单晶不同部位的凝固组织尺度存在差异。现有研究表明，合金的凝固组织尺度对热处理工艺和残余偏析都有显著影响。如图2、图4、图5和图7所示，铸件截面变化处都会引起温度梯度的提高，

有利于细化凝固组织，有利于降低合金热处理工艺难度，降低残余偏析。因此，在叶片结构设计、制备与热处理过程中都需要考虑铸件结构对温度场及其凝固组织的影响。

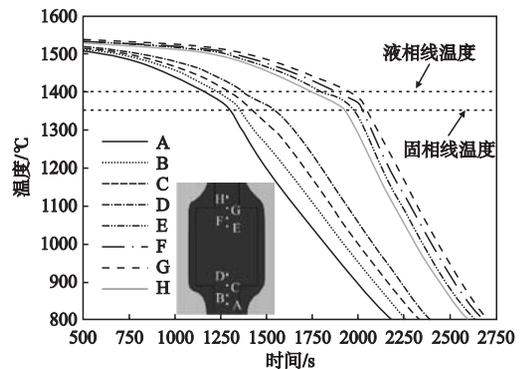
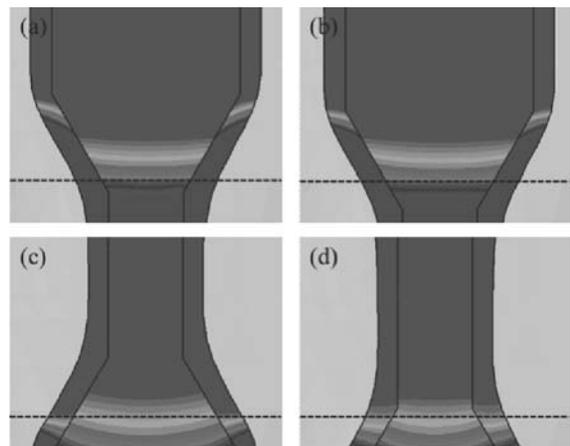


图6 截面突变台阶附近位置的冷却曲线
Fig. 6 Cooling curves near the expansion platform



(a) $t=2431$ s, (b) $t=2466$ s, (c) $t=3201$ s, (d) $t=3301$ s

图7 液固界面推进到截面渐变处的温度场演变

Fig. 7 Evolution of liquid-solid interface at the gradient platform

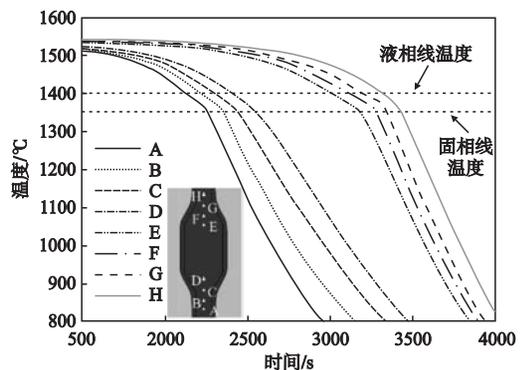


图8 渐变截面附近位置的冷却曲线

Fig. 8 Cooling curves near the gradient platform

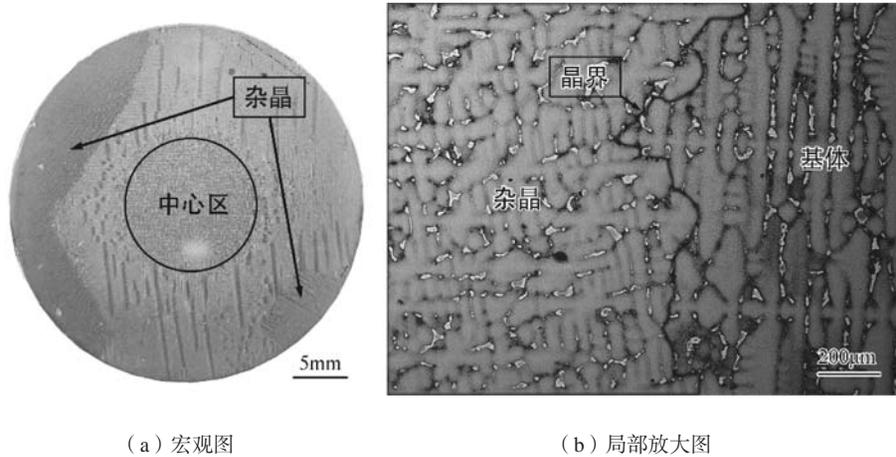


图9 圆柱形突变平台横截面显微组织

Fig. 9 Cross-sectional microstructure of cylindrical expansion platform

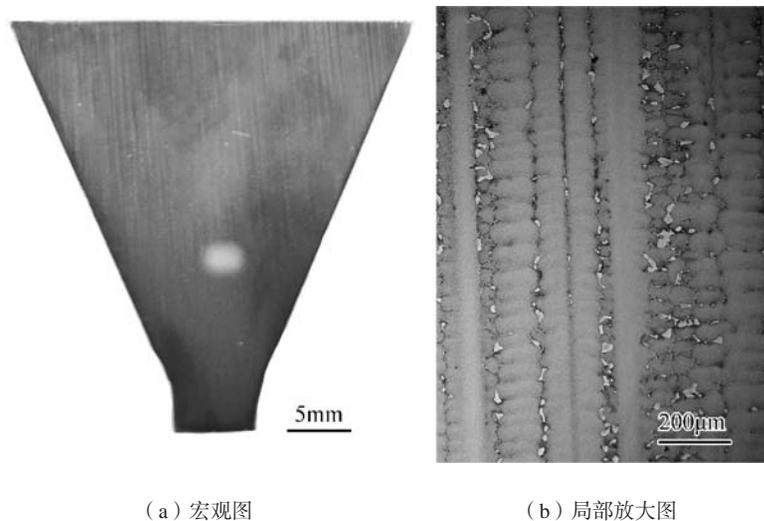


图10 渐变扩张平台纵截面显微组织

Fig. 10 Cross-sectional microstructure of gradient platform

4 结论

采用ProCAST数值模拟的方法研究了单晶高温合金圆柱形和变截面铸件定向凝固过程中温度场的演化规律。圆柱形铸件凝固一定距离后温度场达到稳态；变截面铸件尺寸突变和渐变都会导致液固界面位置变化和温度梯度增加；相比渐变截面结构，突变扩张平台容易形成较大的凝固界面曲率，且边角处形成较大的过冷，容易导致凝固缺陷的形成。

参考文献:

- [1] 胡壮麒, 刘丽荣, 金涛, 等. 镍基单晶高温合金的发展 [J]. 航空发动机, 2005, 31 (3): 1-7.
- [2] 孙晓峰, 金涛, 周亦霄, 等. 镍基单晶高温合金研究进展 [J]. 中国材料进展, 2012 (12): 1-11.
- [3] REEDR C. The superalloys fundamentals and applications [M]. New York: Cambridge University Press, 2006: 135-139.
- [4] 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.
- [5] 马德新. 定向凝固的复杂形状高温合金铸件中的雀斑形成 [J]. 金属学报, 2016, 52 (4): 426-436.
- [6] LIQ, SHENJ, QINL, et al. Investigation on freckles in directionally solidified CMSX-4 superalloy specimens with abrupt cross section

- variation [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 691: 997–1004.
- [7] MENG X, LIJ, ZHUS, et al. Method of stray grain inhibition in the platforms with different dimensions during directional solidification of a Ni-base superalloy [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2014, 45 (3) : 1230–1237.
- [8] HUOM, LINL, YANGW, et al. Formation of low-angle grain boundaries under different solidification conditions in the rejoined platforms of Ni-based single crystal superalloys [J]. *Journal of Materials Research*, 2019, 34: 251–260.
- [9] BOGDANOWICZW, ALBRECHTR, SIENIAWSKI J, et al. The subgrain structure in turbine blade roots of CMSX-4 superalloy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2014, 401 (sep.1) : 418–422.
- [10] LIY, LIUL, SUN D, et al. Quantitative analysis of withdrawal rate on stray grain formation in the platforms of a Ni-Based single crystal dummy blade [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 773: 432–442.
- [11] 张小丽, 周亦青, 金涛, 等. 镍基单晶高温合金杂晶形成倾向性的研究 [J]. *金属学报*, 2012, 48 (10) : 1229–1236.
- [12] MAD, BÜHRIG-POLACZEKA. Application of a heat conductor technique in the production of single-crystal turbine blades [J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2009, 40: 738–748.

Influence of Casting Structure on Temperature Field During Directional Solidification of Single Crystal Superalloy

YANG Zhen-yu¹, CHEN Hao², HU Song-song³, LU Yu¹, LI Yong¹, LUO Yu-shi¹, DAI Sheng-long¹

(1. National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. No.6 Military Representative Office of Equipment Department of Air Force in Beijing, Beijing 101300, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

Abstract:

In order to improve the air-cooling effect of single crystal turbine blades, the structure of the gas cooling passage in the single crystal turbine blade is becoming complicated, which leads to an increasing frequency of solidification defects occurring during the preparation process. The formation of solidification defects is closely related to the evolution of the temperature field during the directional solidification process. In this study, the ProCAST numerical simulation software was used to study the influence of the casting structure on the temperature field during the directional solidification process. The results show that the abrupt and gradual cross-sectional structure in single crystal superalloy castings will lead to changes in the temperature gradient of the liquid-solid interface and position related with the dividing line between heating zone and insulation zone. Compared with the gradual cross-sectional structure, the abrupt cross-sectional structure is more likely to form a larger solidification interface curvature and large undercooling at corner, which lead to the formation of solidification defects.

Key words:

single crystal superalloys; casting structure; abrupt structure; gradual structure; temperature field evolution