

# 新型可脱离式隔热板对燃气轮机叶片定向凝固过程的影响

秦 岭<sup>1</sup>, 沈 军<sup>1</sup>, 杨功显<sup>2</sup>, 李秋东<sup>1</sup>, 傅恒志<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000)

**摘 要:** 基于有限元模拟软件, 对实际工艺参数条件下的大型空心燃气轮机叶片凝固全过程中的温度场、温度梯度、凝固界面的演变进行了模拟仿真, 以此为基础研究了雀斑缺陷形成机理及其规律。模拟结果与实验结果取得了良好的吻合。模拟结果表明, 在叶片榫头处温度梯度突然降低是导致此处局部缺陷产生的主要原因。并针对该实验现象设计了一种新型隔热板, 大幅度提高叶片凝固界面前沿的温度梯度, 从而达到避免叶片榫头处产生雀斑缺陷的目的。

**关键词:** 空心燃气轮机叶片; 缺陷; 温度梯度; 隔热板; 凝固界面

中图分类号: V235.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)05-1284-06

燃气轮机叶片是燃气轮机的关键热端部件, 因此对于燃气轮机叶片在高温下的力学性能提出了更高的要求。伴随叶片制造过程中雀斑, 杂晶等缺陷的出现, 叶片的高温力学性能受到严重的影响<sup>[1-10]</sup>。所以对于叶片凝固过程中缺陷形成的机理及其优化工艺的研究具有重要的意义。

空心燃气轮机叶片形状十分复杂且蓄热量大, 所以在定向凝固过程中对叶片温度场的控制十分困难<sup>[11,12]</sup>。在凝固过程中的局部固液界面前沿温度梯度过低而导致密度的反转。这种糊状区内产生的密度反转现象会促使雀斑链在叶片表面形成。解决这些问题的关键在于控制凝固过程中传热并提高局部凝固界面前沿轴向的温度梯度。

隔热板的形状对于凝固过程中的传热有显著的影响<sup>[13,14]</sup>。国内外学者研究发现, 针对铸件形状设置的隔热板对界面前沿的温度梯度有明显的提高<sup>[15,16]</sup>。考虑到实际工况中叶片的复杂几何形状, 本研究组设计了一种可脱离式随型隔热板。本设计的目的在于避免凝固全过程中因为几何形状的变化而导致的定向炉内侧向散热。使得凝固条件偏离理想的单向散热, 进而影响到凝固过程中界面形貌以及固液界面前沿的温度梯度。因此, 为了制备出高质量燃气轮机叶片, 本工作将系统研究定向凝固工艺中随型隔热板对凝固界面形貌和温度梯度的影响。

## 1 物理模型

目前高温合金叶片的制造通常采用 HRS 法。首先将高温合金液融化后缓慢地浇入预热过的模壳内, 静置一段时间, 然后以恒定或者非恒定的抽拉速度将模壳从加热体内拉出来。针对空心燃气轮机叶片的几何形状 (图 1a) 设计的可脱离式随型隔热板如图 1b 所示。

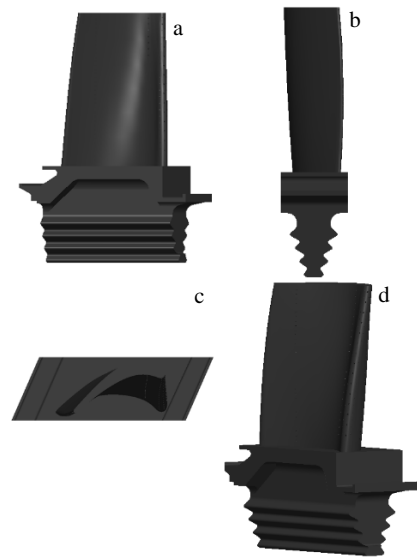


图 1 空心燃气轮机叶片的三维几何模型

Fig.1 3D model of the blade: (a) front view, (b) left view, (c) top view, and (d) three-dimensional model

收稿日期: 2015-05-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) (2013CB035703)

作者简介: 秦 岭, 男, 1984 年生, 博士生, 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88494708, E-mail: ling4542002@hotmail.com

当凝固进行至叶身时, 隔热板形状为椭圆形; 随着凝固的进行, 榫头会与部分隔热板接触导致部分隔热板脱离; 此时, 隔热板形状与榫头处的平行四边形对应。

## 2 数学模型

### 2.1 物性参数

模拟计算中采用第 2 代高温合金 CMSX-4。物性参数随温度变化的相关数据 (图 2) 采用 J Mat Pro 软件进行计算。另外模壳的热导率随时间变化数据是根据高温热导仪测量的结果。

### 2.2 数学模型

连续性方程:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

N-S 方程:

$$\rho(\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\nabla P + \nabla \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \bar{g} \quad (2)$$

能量方程:

$$\nabla \cdot [\rho(c_p T) \bar{u}] = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) \quad (3)$$

式中:  $\bar{u}$  为流速,  $P$  为压力,  $\bar{g}$  为重力,  $T$  为温度,  $\rho$  为密度,  $k$  为热导率。

### 2.3 网格的划分

空心燃气轮机叶片的形状多为变化的曲面, 绝大部分区域使用非结构性网格进行划分, 在模型间隔处进行了局部加密。凝固过程中, 水冷铜板以组件的形式与叶片底部紧密贴合, 并用结构性网格对其进行划

分。外围的定向炉几何尺寸未进行加密。总计网格数 104.5 万 (图 3)。

## 3 模拟结果与讨论

### 3.1 温度场的验证

实验中, 在同一工况下采用类叶片的铸件对模拟的温度场进行实验验证。在铸件上选取 3 个点进行温度的测量, 分别为 TC-1, TC-2, TC-3 如图 4b 所示。模拟和实验中温度随时间的变化曲线如图 4c 所示。由于 TC-1 距离水冷铜板较近, 铜板的激冷效应使得 TC-1 温度下降较其他两点更快。而 TC-2, TC-3 先后达到凝固, 温度分别随时间下降。模拟与实验中的温度变化高度吻合, 选取的边界条件较为合理。

### 3.2 温度场的模拟结果

在 100  $\mu\text{m/s}$  的抽拉速率和热区温度 1500  $^{\circ}\text{C}$  的凝固参数下, 对定向凝固整个过程的温度场进行了模拟 (图 5)。当凝固进行 180 s 时, 所有的等温线都较为平直。而在凝固进行到 1000 s 附近时, 在 1302~1401  $^{\circ}\text{C}$  的等温线开始发生转变, 其等温线的形状由微凸逐渐向凹陷转化。当凝固进行至后期, 在 1302~1401  $^{\circ}\text{C}$  的等温线穿越榫头处的时候, 此种趋势还在加剧。通过以上分析, 发现在靠近榫头的叶身两侧和榫头处的温度场并不均匀。不均匀的温度分布是不利于晶体的正常生长的主要原因。

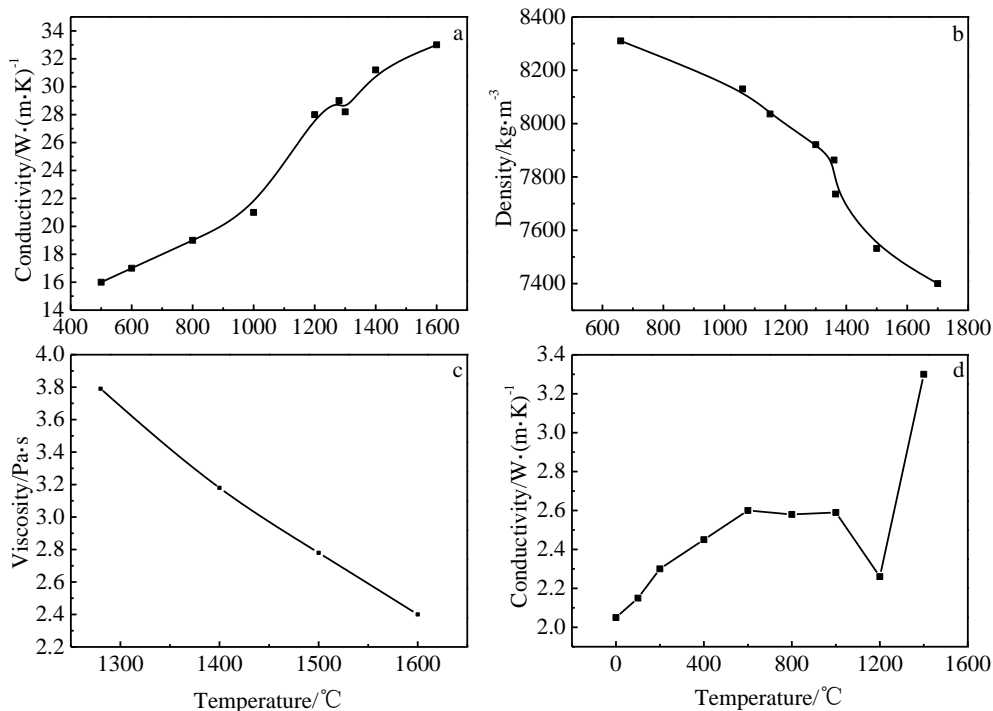


图 2 不同物性参数随温度变化的曲线

Fig.2 Physical properties at different temperatures used in the simulation: (a) thermal conductivity of the alloy; (b) density of the alloy; (c) viscosity of the alloy; (d) thermal conductivity of the mold

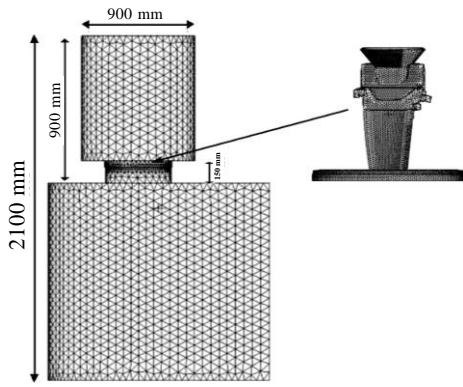


图 3 定向炉内及其叶片的网格划分

Fig.3 Simplified mesh of the enclosure and the casting

以不同时刻温度场为基础，对应的凝固界面的演化过程见图 6。如图 6b 所示，当凝固界面推进至叶身的中部时，两侧开始轻微地上扬。同时，较薄的一侧上扬程度更为显著。如图 6c~6e 所示，当凝固界面推进至榫头处时，在几何尺寸突然增大的情况下，凝固界面出现间断。此区域的间断将会导致榫头边角处的独立形核，形成杂晶等缺陷。如图 6e 所示，当凝固界面完全进入榫头的时候，此时界面已经完全呈现出凹界面，相反的，在中部陶芯周围有局部凸起，这是由于陶芯位于叶片的中心，散热较慢造成的。综合以上凝固全过程的不同时刻的温度场和对应的凝固界面的演化分析，发现在叶身进入榫头处的温度分布不均匀，

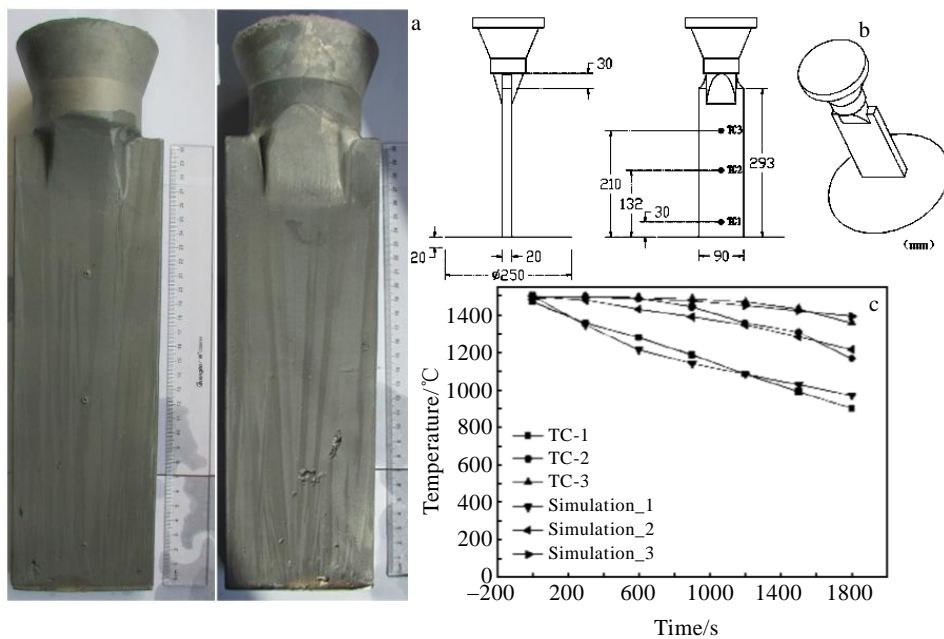


图 4 经过处理后的类叶片铸件宏观组织；类叶片的几何形状及测温点分布；不同测温点的温度随时间的变化曲线

Fig.4 Experimental grain structure observed from the surface of a bladelike (a); the geometry of a bladelike (b); temperature curve at different time (c)

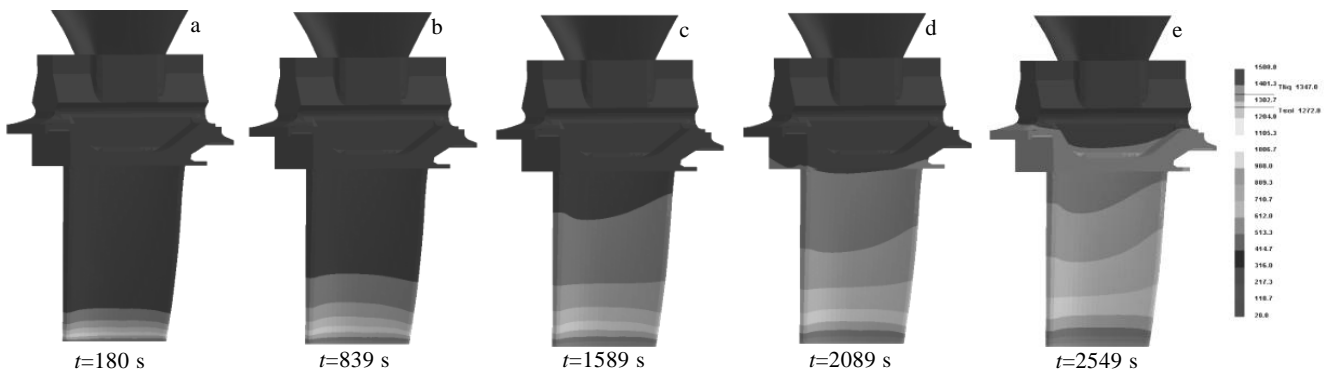


图 5 不同时刻下的温度场分布

Fig.5 Simulation results of the temperature field at different time

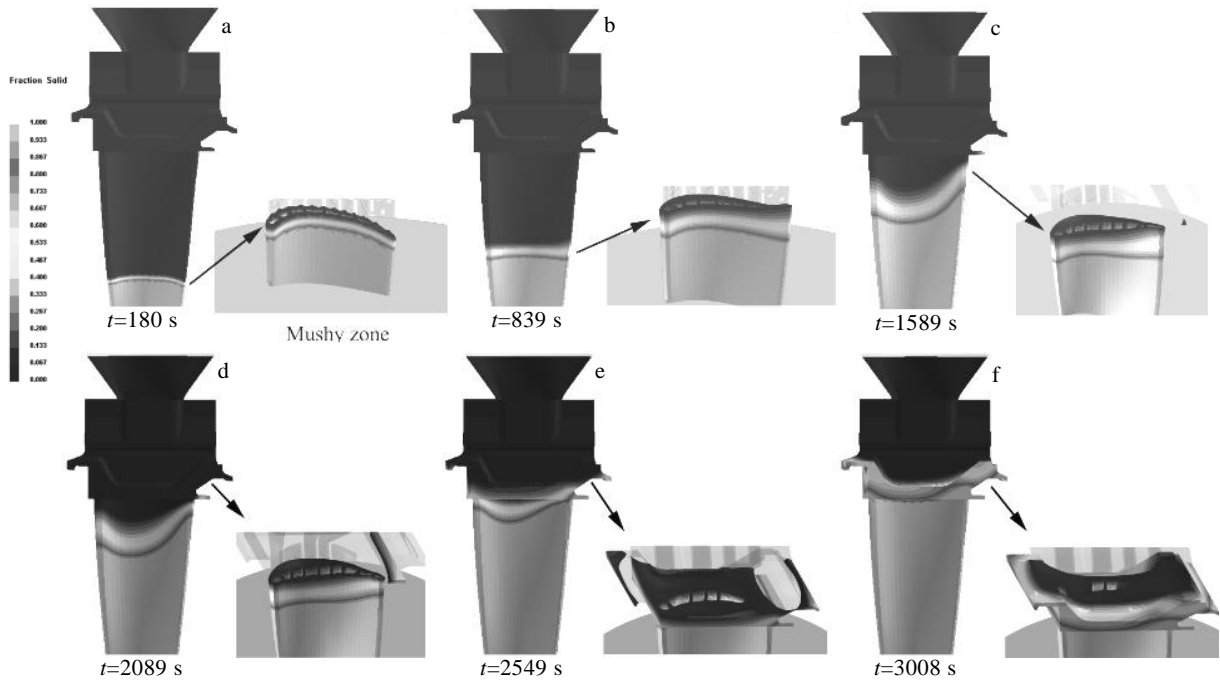


图 6 不同时刻下的凝固界面演化

Fig.6 Simulation results of the morphology of solid-liquid interface at different time

从而导致了凝固界面在此区域的不平整。倾斜的凝固界面不仅容易在叶片榫头处形成杂晶，而且也使得雀斑在此处更易形成。所以控制凝固过程中的温度场是提高叶片质量的关键。

### 3.3 凝固界面前沿温度梯度的模拟结果

以温度场计算为依据，如图 7a 所示，计算了凝固界面前沿的温度梯度分布云图，并在图 7b 中展示了对应实验中叶片局部区域照片。图 7a 中，发现在凝固初期，由于水冷铜板的激冷作用导致温度梯度较高。随着凝固的进行，温度梯度逐渐降低，并维持在 18~22

K/cm 附近。但当凝固至榫头处时，温度梯度发生急剧的下降。这是由于截面突然变大，导致蓄热量的增加，而散热条件并没有相应的变化。Beckermann 等人<sup>[17,18]</sup>提出的瑞利数模型作为预测雀斑产生几率的工具被广泛应用，其近似表达式为：

$$Ra \sim R^{-1/2}G^{-2} \tag{4}$$

其中， $G$  是固液界面前沿的轴向温度梯度， $R$  是固液界面向前推进的速度。发现当凝固界面前沿处的温度梯度越小时， $Ra$  值越大。当超过  $Ra_{crit}$  时，容易发生密度反转，即较轻的元素上浮，较重的元素下沉，从

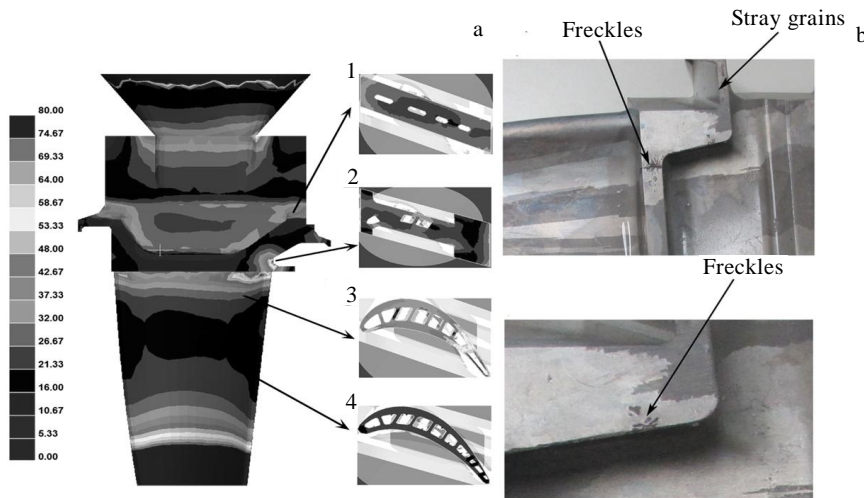


图 7 凝固界面前沿的温度梯度分布；宏观腐蚀后的叶片照片

Fig.7 Temperature gradient distribution of blade (a); photograph of blades after macro-etching (b)

而在叶片的表面形成雀斑链。根据模拟的结果，可以发现，在榫头处  $Ra$  值将会变大，从而导致在此处形成雀斑链的倾向性更大。观察图 7b 中的叶片照片，可以发现在低温度梯度区域叶片榫头处明显出现了杂晶和雀斑等缺陷。这些缺陷强烈地影响着燃气轮机叶片的高温力学性能。因此在定向凝固过程中，提高榫头处的温度梯度对于避免缺陷有着重要的意义。

### 3.4 可脱离式隔热板的设计目的和方案

隔热板的形状对于凝固过程中的传热有显著的影响。国内外学者研究发现，针对铸件形状设置的隔热板对界面前沿的温度梯度有明显的提高<sup>[14]</sup>。随型隔热板的开发和设计已见雏形。由于叶片的几何形状非常复杂（叶身横截面为不规则椭圆，榫头横截面为平行四边形），但是随型隔热板的几何形状却是不变的，这就导致这类新型的隔热板也无法起到最佳的作用。本研究设计的这种可脱离式隔热板利用叶片倒立放置时，横截面突然增大的特点，在凝固过程中大截面的铸件向下抽拉的同时挤出可脱离式隔热板，使得在榫头处能形成一个适应此处凝固条件的随型隔热板。本研究以图 1 中燃气轮机叶片的三维几何模型尺寸为例，设计了一种可以提高温度梯度的可脱离式随型隔热板。

如图 8 所示，可脱离式随型隔热板外部应与榫头的外截面大小相适应，同时内部的开孔形状与叶身部位基本一致。

如图 9 所示，在凝固初期，可脱离隔热板与外部隔热板处于同一水平位置。如图 9c 所示，当凝固进行至榫头处，由于几何尺寸的增加导致内部的可脱离式隔热板脱落。而余下的隔热板的横截面的几何形状再次与榫头的几何形状相适应，达到整个凝固过程中始终最大程度地避免侧向散热的的设计目的。

### 3.5 不同隔热板对温度梯度的影响

基于数值模拟的结果，针对设计的可脱离随型隔热板对凝固界面前沿的温度梯度的影响进行定量分析。如图 10 所示，图 10a 是使用改进的隔热板得到的

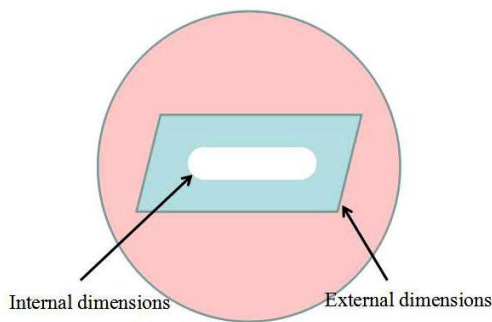


图 8 可脱离式随型隔热板横截面的几何设计  
Fig.8 Design of the new baffle

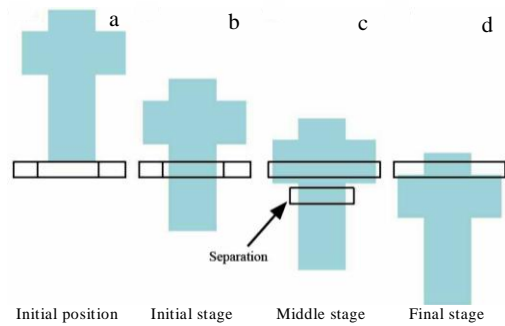


图 9 在凝固过程中可脱离隔热板的运作方式  
Fig.9 Operation of the new baffle

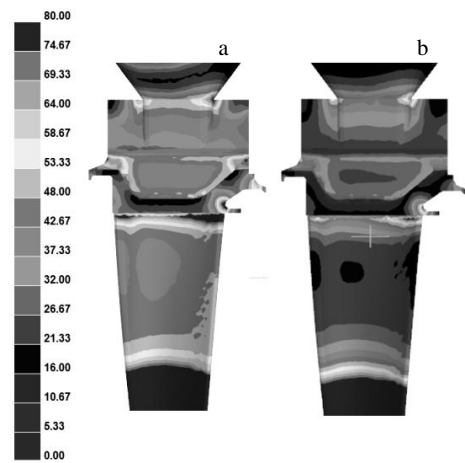


图 10 不同隔热板的温度梯度分布对比  
Fig.10 Temperature gradient distribution of blade at different baffle: (a) new baffle and (b) traditional baffle

凝固界面前沿的温度梯度分布，图 10b 是使用传统隔热板得到的凝固界面前沿的温度梯度分布。综合 2 种情况，发现在使用可脱离随型隔热板的情况下，虽然整体温度梯度都得到了极大的提高，但是温度梯度的分布特点仍与传统隔热板保持一致。

经过对比两种情况定量分析，在叶身中部使用可脱离式隔热板，温度梯度可以由 20 K/cm 增加至 40 K/cm，而极易形成雀斑区域的榫头处的温度梯度也大致能提高 6 K/cm。因此，此种可脱离式随型隔热板极大地提高了固液界面前沿的温度梯度。而较高的温度梯度能够避免雀斑类凝固缺陷的形成，从而达到提高柱状晶叶片质量的目的。此外，这项技术还能推广至单晶叶片的生产加工。

## 4 结 论

1) 通过实验证明对凝固全过程中的温度场、凝固界面的演化进行的模拟计算准确可靠。

2) 凝固界面在榫头处(截面变化的区域)会有较大程度的下凹, 同时在固液界面前沿的温度梯度会有大幅度降低, 将会导致雀斑和杂晶等缺陷的出现。

3) 设计的一种可脱离式隔热板, 在凝固进行到中期时, 部分隔热板随榫头向下运动而脱离, 起到多次随型隔热的作用。

4) 采用可脱离式隔热板, 不仅可以大幅度提高凝固界面前沿的温度梯度, 而且降低设备费用, 同时可避免缺陷的产生。

#### 参考文献 References

- [1] Liang Zuojian(梁作俭), Xu Qingyan(许庆彦), Li Juntao(李俊涛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(3): 164
- [2] Tang Ning(唐宁), Sun Changbo(孙长波), Zhang Hang(张航) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(11): 2298
- [3] Jin Haipeng(金海鹏), Li Jiarong(李嘉荣), Yu Jing(于静) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(5): 767
- [4] Karagaddea S, Yuan L, Shevchenko N *et al. Acta Materialia*[J], 2014, 79: 168
- [5] Amouyal Y, Seidman D N. *Acta Materialia*[J], 2011, 59: 6729
- [6] Yuan L, Lee P D. *Acta Materialia*[J], 2012, 60: 4917
- [7] Wang F, Ma D X, Zhang J *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(12): 3112
- [8] Zhou Y Z. *Scripta Materialia*[J], 2011, 65(4): 281
- [9] Shih Y, Tu S, Chiu C. *Applied Thermal Engineering*[J], 2013, 50(1): 1055
- [10] Hong J P, Ma D X, Wang J *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 648(5): 1076
- [11] Ye Xicong(叶喜葱), Su Yanqing(苏彦庆), Guo Jingjie(郭景杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(2): 247
- [12] Pan Dong(潘冬), Xu Qingyan(许庆彦), Liu Baicheng(柳百成). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2010, 46(3): 294
- [13] Auburtin P, Wang T, Cockcroft S L *et al. Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2000, 31(4): 801
- [14] Franke M M, Hilbingerb R M, Lohmüllerb A *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2013, 213(12): 2081
- [15] Bussac A D, Gandin C A. *Materials Science and Engineering A*[J], 1997, 237: 35
- [16] Konrad C H, Brunner M, Kyrgyzbaev K. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 181
- [17] Beckermann C, Gu J P, Boettinger W J. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2000, 31(10): 2545
- [18] Schneider M C, Beckermann C. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 1995, 38(18): 3455

## Using New Baffle to Control Defects in a Vacuum Investment-Cast Ni-Based Turbine Blade

Qin Ling<sup>1</sup>, Shen Jun<sup>1</sup>, Yang Gongxian<sup>2</sup>, Li Qiudong<sup>1</sup>, Fu Hengzhi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Dongfang Turbine Co. Ltd, Deyang 618000, China)

**Abstract:** Based on finite element simulation, temperature field, temperature gradient and the evolution of solidification interface of the large hollow turbine blade in the process of directional solidification were simulated. The results demonstrate that defects are observed at the expanding cross section of casting in directionally solidified nickel-based superalloys. Numerical results indicate that the phenomenon should be attributed to the lower thermal gradient in this zone. Based on these results, a new baffle was proposed. Calculated results reveal that the reasonable design of the new baffle could improve the thermal gradient in the local area. Therefore, this new baffle could more effectively avoid the freckle formation and enhance the mechanical performances of casting.

**Key words:** hollow DS blade; defect; temperature gradient; baffle; solidification interface

Corresponding author: Shen Jun, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88494708, E-mail: shenjun@nwpu.edu.cn