

# 型壳温度对 DZ22B 合金叶片枝晶组织的影响

钟文惠<sup>1</sup>, 丁鹏飞<sup>1</sup>, 谢维<sup>1</sup>, 封举宁<sup>2, 3</sup>, 王鑫铭<sup>2, 3</sup>, 吴煜<sup>2, 3</sup>, 刘艳<sup>2, 3</sup>

(1. 中国航发南方工业有限公司, 湖南株洲 412000; 2. 湘潭大学材料设计及制备技术湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411105; 3. 湘潭大学材料科学与工程学院, 湖南湘潭 411105)

**摘要:** 以DZ22B镍基高温合金叶片为研究对象, 采用ProCAST数值模拟及试验相结合的方法对不同型壳保温温度下铸造叶片定向凝固过程中的温度场、热裂倾向及组织进行研究。结果表明: 随着型壳保温温度的增加, 等温线整体呈下凹趋势, 处于1 540 °C温度下的糊状区下凹程度明显大于其他温度, 且叶片HTI结果有所增加, 容易产生热裂的区域集中在叶身上部, 排气边位置容易产生热裂的区域比进气边更大; 相同高度位置下的叶片排气边枝晶间距均小于进气边枝晶间距; 随型壳保温温度升高, 一次枝晶间距和二次枝晶间距均降低, 对比模拟结果与试验统计得出的一次枝晶间距和二次枝晶间距, 得出一致结论, 模拟与试验吻合较好。

**关键词:** DZ22B高温合金; 定向凝固; 枝晶组织; 型壳温度; 数值模拟

## 作者简介:

钟文惠(1994-), 男, 工程师, 从事精密铸造研究。

E-mail: zhongwenhui504@sina.com

## 通讯作者:

王鑫铭, 男, 副教授, 博士。

E-mail: wangxm@xtu.edu.cn

中图分类号: TG244

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

04-0489-09

## 基金项目:

国家自然科学基金面上项目(52171016); 国家自然科学基金青年项目(52201023);

省教育厅项目(21C0090)。

## 收稿日期:

2023-04-25 收到初稿,

2023-12-15 收到修订稿。

叶片是航空燃气涡轮发动机的关键结构件之一, 其服役环境恶劣, 需在高温环境下承受高应力载荷, 且要求保持组织稳定, 因此对材料的组织、性能和制备工艺有着严格的要求, 目前性能优异的镍基高温合金是涡轮叶片的首选材料<sup>[1-4]</sup>。DZ22B镍基高温合金具备良好的铸造性能、高温抗氧化及耐腐蚀性能, 是航空发动机定向柱晶叶片的常用材料<sup>[5-8]</sup>。在涡轮叶片制备过程中, 往往容易产生孔洞、缩松和热裂纹等铸造缺陷, 其中热裂纹缺陷可修复性差, 一旦产生会严重降低叶片毛坯合格率, 在使用过程中会引起发动机性能严重下降, 对安全性能有重大影响。型壳保温温度、浇注温度等浇注参数及后续的热处理参数对铸件显微组织特征和力学性能有非常大的影响, 刘鸣<sup>[9]</sup>、张贺等人<sup>[10]</sup>优化了浇注工艺, 对浇注温度、浇注时间等参数进行了多种组合的浇注试验, 以减少铸件缺陷。史振学等<sup>[11]</sup>的研究表明, 随铸型温度的升高, 高温合金的一次枝晶间距和二次枝晶间距变小, 共晶尺寸和含量稍有减小。薛燕鹏等人<sup>[12]</sup>发现随着型壳温度的增加, DD9叶片截面凝固组织枝晶花样呈细小趋势, 二次枝晶呈发达趋势。本文使用ProCAST有限元软件, 对DZ22B合金叶片的铸造过程进行了数值模拟与分析, 研究了不同型壳保温温度对凝固过程的影响, 并与实际试验结果进行验证。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验方法

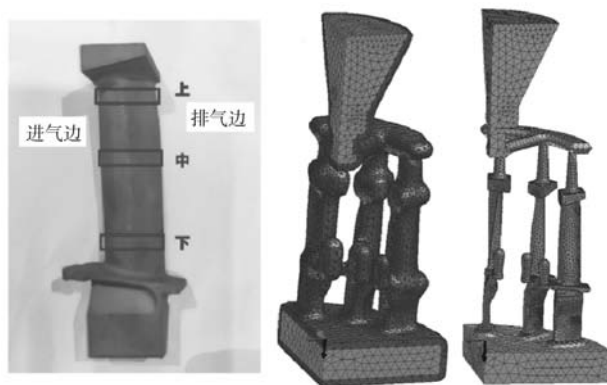
本研究选取的DZ22B镍基高温合金成分如表1所示。定向凝固流程为, 对型壳

表1 DZ22B高温合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of DZ22B superalloy

合金	C	Cr	Co	W	Nb	Ti	Al	Hf	B	Ni
DZ22B	0.14	9.0	9.5	12	0.9	1.9	4.9	1.0	0.015	68.1

加热到预热温度后,将熔化后的合金熔体浇注到型壳中,然后分别在1 460、1 480、1 500、1 540 °C下保温10 min,最后以6 mm/min的速率进行抽拉。

对清理完毕的叶片进行线切割取样,在叶片不同高度分别取其横截面和纵截面观察,利用其横截面观察其一次枝晶间距,利用其纵截面观察其二次枝晶间距。叶片取样示意图如图1a所示。采用光学显微镜(Lwica DM2700M)对叶身上、中、下部处横截面及纵截面进行观察。



(a) 叶片取样示意图 (b) 工艺模型 (c) 工艺模型

图1 叶片取样位置及叶片几何模型

Fig. 1 Blade sampling position and blade geometric model

## 1.2 模拟方法

定向凝固工艺模型主要包括叶片试样、浇注系统、水冷结晶器等部分,采用一模多叶片形式,建立有限元模型如图1b、c所示。其主要参数如下:加热区温度1 500 °C,冷却水温度26 °C,型壳密度 $3\ 970\ (\text{kg} \cdot \text{m}^3)$ ,型壳比热容 $1.28\sim 1.37\ (1\ 000\sim 1\ 500\ ^\circ\text{C})\ (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ ,型壳导热系数 $9.2\sim 5.9\ (600\sim 1\ 500\ ^\circ\text{C})\ \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,根据现场实测的温度场数据,使用ProCAST软件对实测温度数据进行处理,逆向求解得到凝固过程中的界面换热系数<sup>[13]</sup> ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ):合金与激冷板 $2\ 400$ ,型壳与激冷板 $1\ 000$ ,冷却水与激冷板 $2\ 500$ 。通过查询手册<sup>[14]</sup>和ProCAST软件数据库计算得出部分热物性参数(图2)。将所有得到的热物性参数和边界条件应用到本文的数值模拟中。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度场模拟

为了研究定向凝固过程中型壳温度对DZ22B高温合金叶片温度场的影响,在其他模拟参数均不变的前提下,分别将型壳温度设置为1 460、1 480、1 500、1 540 °C进行模拟计算,得到的温度场模拟结果如图3所示。

图3右图显示的是糊状区处于热应力集中的叶身上

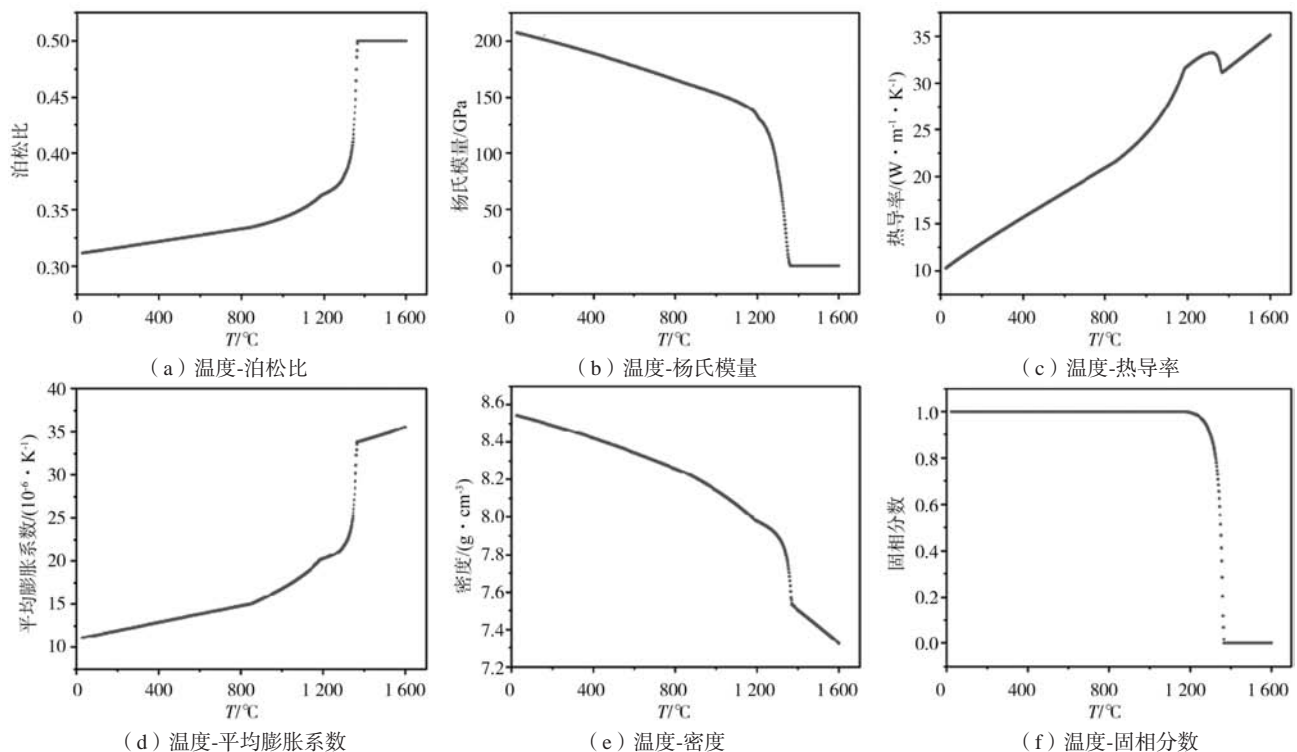
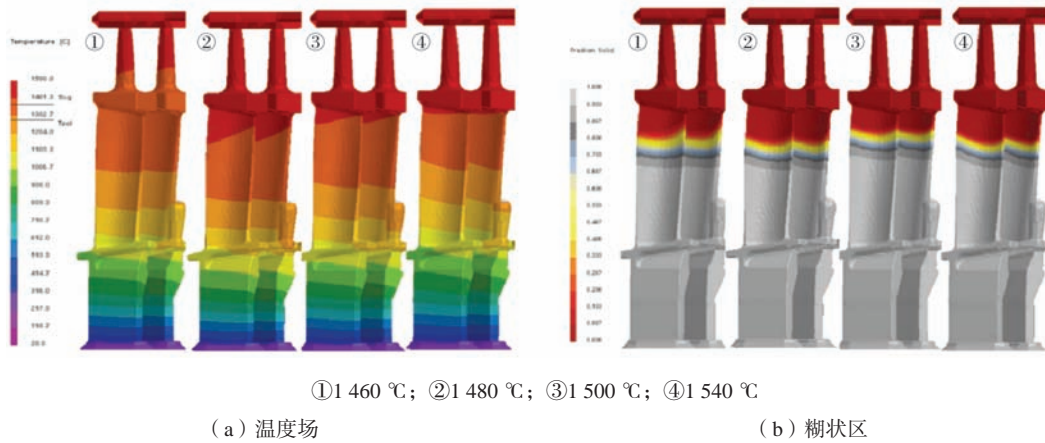


图2 随温度变化的热物性参数

Fig. 2 Thermophysical parameters varying with temperature



①1 460 ℃; ②1 480 ℃; ③1 500 ℃; ④1 540 ℃

(a) 温度场

(b) 糊状区

图3 不同型壳温度下的温度场和糊状区示意图

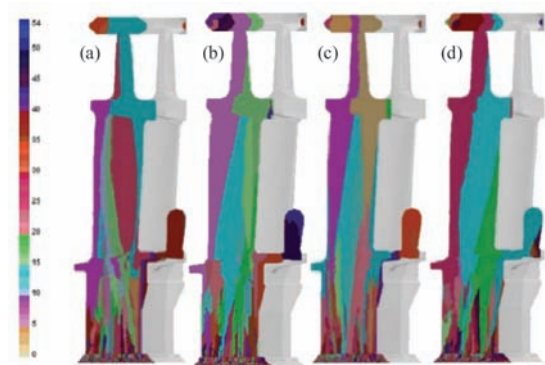
Fig. 3 Temperature field and mushy zone at different shell temperatures

部位置时模拟的温度场结果，可以看出在同一时刻，型壳保温温度越高，糊状区的温度梯度越大，固液面温度梯度增加的幅度有所下降，等温线整体呈下凹趋势。处于1 540 ℃温度下的糊状区下凹程度明显大于其他温度，与界界面偏离程度越大，越容易在两侧叶壁上形成偏离取向的杂晶，微观组织性能下降。

### 2.2 叶片微观组织模拟

图4为型壳不同保温温度下的晶粒走向图，开始形核位置自叶片底部与激冷板接触之间，微观组织由一开始的等轴晶向柱状晶转变。图中不同颜色代表不同取向的晶粒，随着型壳保温温度的增加，晶粒取向逐渐偏离抽拉方向，整体呈现出排气边晶粒往进气边扩展的趋势，在叶身上部位置扩展现象比较明显。

取叶片五个位置的横截面，通过ProCAST后处理模块中晶粒数量统计功能计算每个位置的晶粒数量，

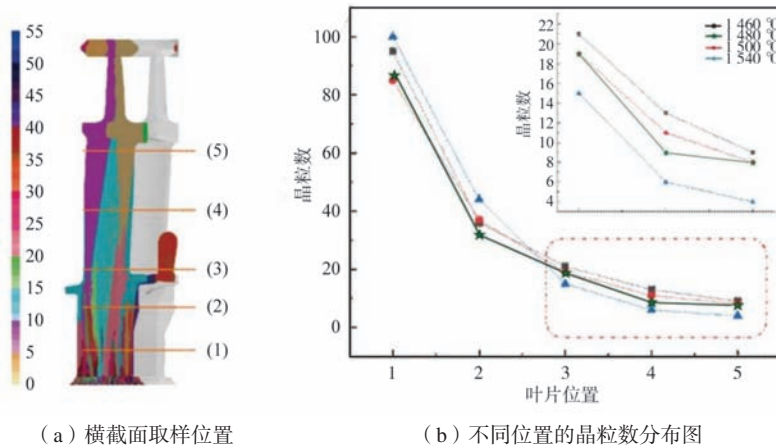


(a) 1 460 ℃; (b) 1 480 ℃; (c) 1 500 ℃; (d) 1 540 ℃

图4 型壳不同保温温度下晶粒微观组织模拟

Fig. 4 Simulation of grain microstructure at different shell holding temperatures

如图5a所示，从图 5b折线图可以看出，沿着定向凝固方向其横截面的晶粒数量逐渐减少，呈现出枝晶的择优生长现象。从1号横截面的等轴晶向3号位置的柱



(a) 横截面取样位置

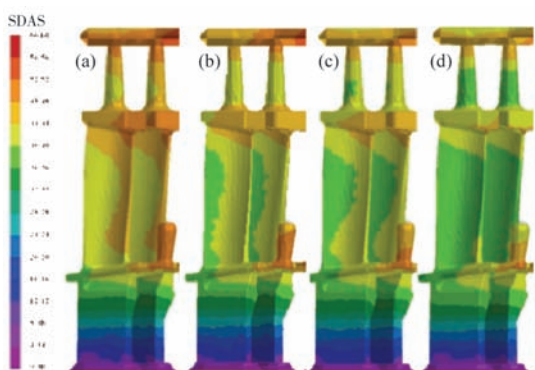
(b) 不同位置的晶粒数分布图

图5 横截面取样位置及不同位置的晶粒数分布图

Fig. 5 Cross-sectional sampling position and grain number distribution at different locations

状晶转变，其晶粒数减少了约80个。局部放大叶身三个位置的晶粒数折线图显示，随着保温外壳温度的升高，晶粒数量逐渐减少。

图6是四个不同型壳保温温度下得到的叶身二次枝晶间距分布图，可以看到随着型壳保温温度提高，叶身二次枝晶间距降低，四种型壳保温温度下排气边的二次枝晶间距都比进气边小，叶片上部的二次枝晶间距要大于叶片下部。



(a) 1460 °C; (b) 1480 °C; (c) 1500 °C; (d) 1540 °C

图6 叶片二次枝晶间距模拟结果图

Fig. 6 Simulation results of secondary dendrite spacing of blade

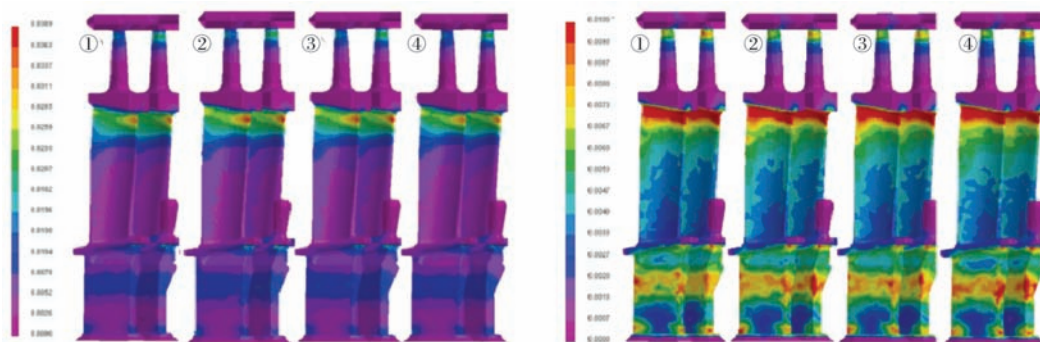
### 2.3 叶片热裂倾向模拟

图7a是不同型壳保温温度下叶片的有效塑性应变图，从图中可以看到，改变型壳保温温度对叶片凝固后的塑性应变结果影响不大，发生塑性应变的区域主要集中在叶身上部靠近叶冠位置，最高塑性应变率在3.8%左右。

结合考虑铸件糊状区后期孔隙的萌生和增长影响，对不同型壳保温温度下的叶片热裂指数进行模拟得到结果如图7b所示，随型壳保温温度的升高，叶片HTI结果有所增加，且容易产生热裂的区域集中在叶身上部，其中排气边位置容易产生热裂的区域比进气边更大，在缘板下部R角位置也有部分区域热裂指数偏高。基于以上模拟结果发现，保温温度在1540 °C时二次枝晶间距会降低，但易形成偏离取向的杂晶，且叶片HTI结果高。

### 2.4 试验结果

图8为1540、1500、1480、1460 °C型壳保温温度下叶身处不同高度进气边横截面显微组织。由图中看出，不同保温温度下都得到了典型定向凝固“十字”的枝晶形貌，枝晶臂均相互垂直，深色区域为凝固过程形成的共晶组织。



①1460 °C; ②1480 °C; ③1500 °C; ④1540 °C

(a) 有效塑性应变图

(b) 热裂指数

图7 叶片有效塑性应变图和热裂指数HTI图

Fig. 7 Blade effective plastic strain diagram and hot tearing index (HTI)

图9为1540、1500、1480、1460 °C型壳保温温度下排气边横截面显微组织。由图可知，叶片排气边与进气边组织类似，随着型壳保温温度降低，枝晶形貌由粗枝状逐渐向细枝状转变，共晶含量增多，在1540 °C时发现叶片上部有裂纹，此处具有较大的温度梯度以及排气边厚度较薄承受较大的拉应力，使得裂纹容易产生<sup>[15]</sup>。

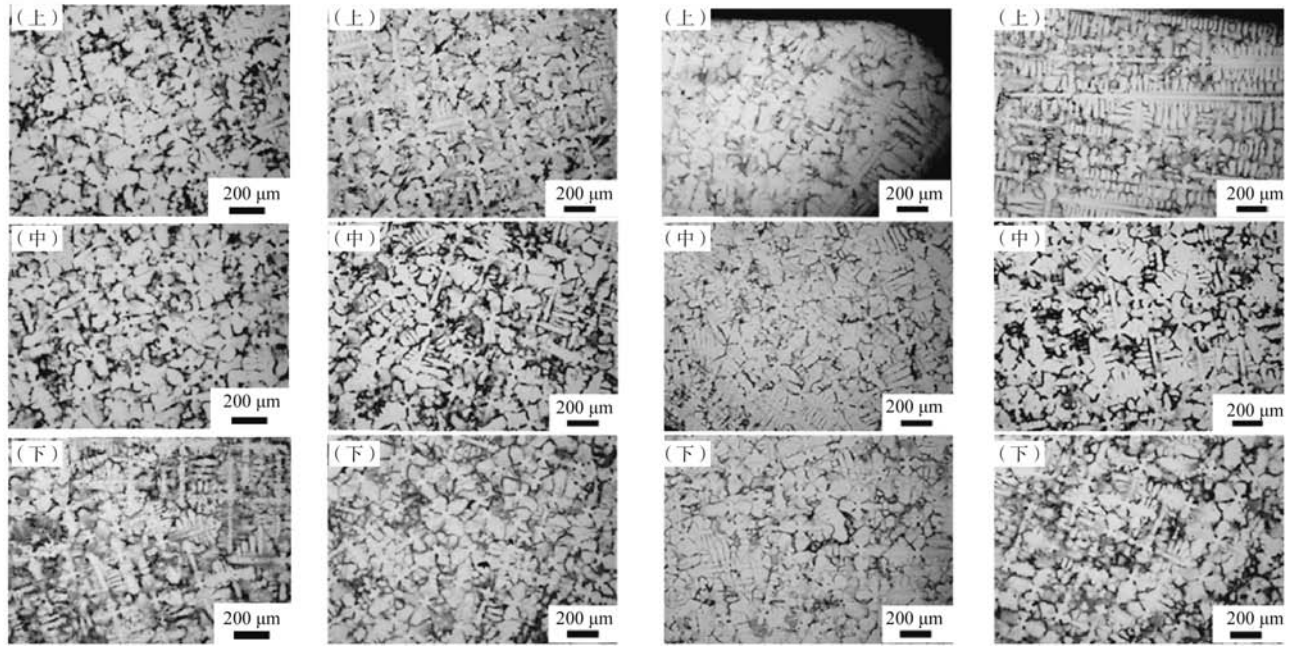
对图8和图9中的各位置按GB/T 14999.7—2010所述测量一次枝晶间距。采用面积法进行估算，一次枝晶

间距的平均值 $\lambda_1$ ，其具体计算公式为<sup>[16]</sup>：

$$\lambda_1 = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{A}{N}} \quad (1)$$

式中： $\lambda_1$ 为一次枝晶间距； $M$ 为放大倍数； $A$ 为试样横截面总面积； $N$ 为横截面上枝晶个数。

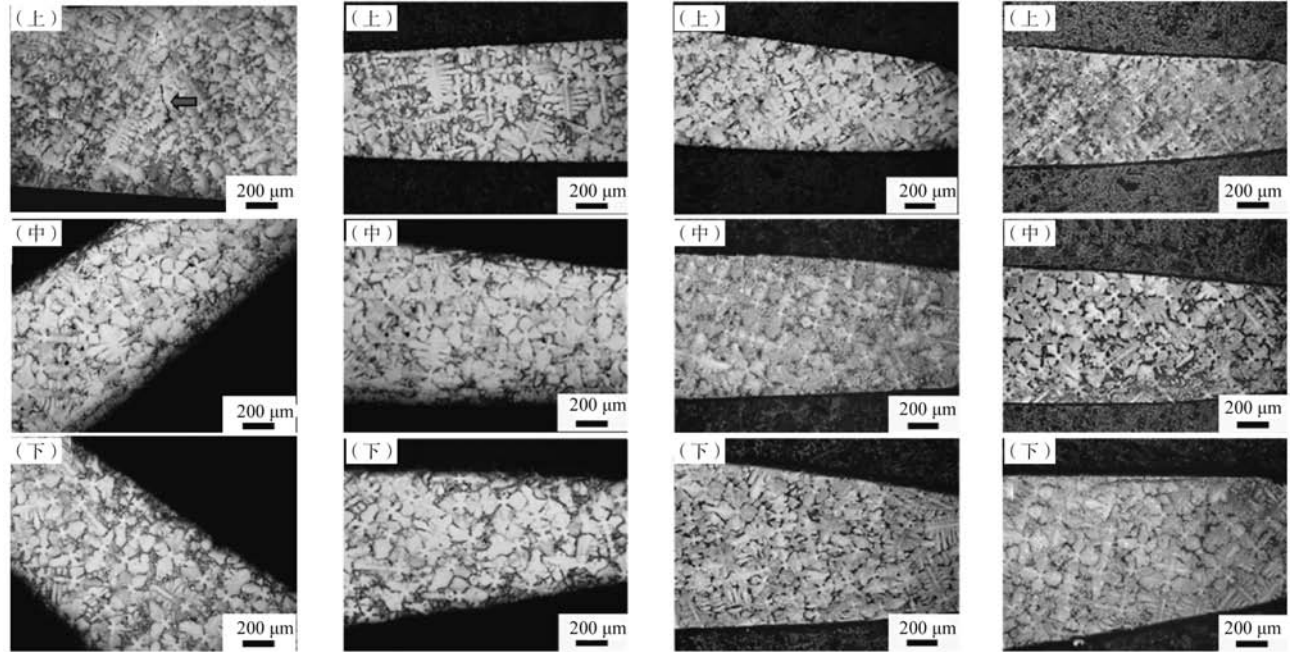
进气边计算结果如图10a所示，随型壳保温温度提高，进气边的一次枝晶间距降低，这是由于保温温度提高，DZ22B合金凝固时纵向固液界面前沿的温度梯度增大，导致凝固时过冷度增大，提高凝固驱动力，



(a) 1 540 °C叶身上中下部 (b) 1 500 °C叶身上中下部 (c) 1 480 °C叶身上中下部 (d) 1 460 °C叶身上中下部

图8 不同保温温度下叶片进气边横截面位置显微组织图

Fig. 8 Microstructure of the cross section of the blade inlet edge at different holding temperatures



(a) 1 540 °C叶身上中下部 (b) 1 500 °C叶身上中下部 (c) 1 480 °C叶身上中下部 (d) 1 460 °C叶身上中下部

图9 不同保温温度下叶片排气边横截面位置显微组织图

Fig. 9 The microstructure diagram of the cross section of the exhaust edge of the blade at different holding temperatures

枝晶更易形核。排气边计算结果如图10b所示。对比图10a、b可以看出，叶片排气边的一次枝晶间距整体小于同一高度的进气边的一次枝晶间距，这是因为随着凝固进行，排气边处的壁厚小于进气边，排气边合金

单位体积的辐射换热量大于进气边，冷却速率较大，枝晶更易形核生长<sup>[17]</sup>；型壳保温温度增加，合金固液界面前沿的温度梯度增大，凝固时的过冷度增加，合金的一次枝晶间距减小<sup>[17-18]</sup>，处于1 540 °C时叶片枝晶

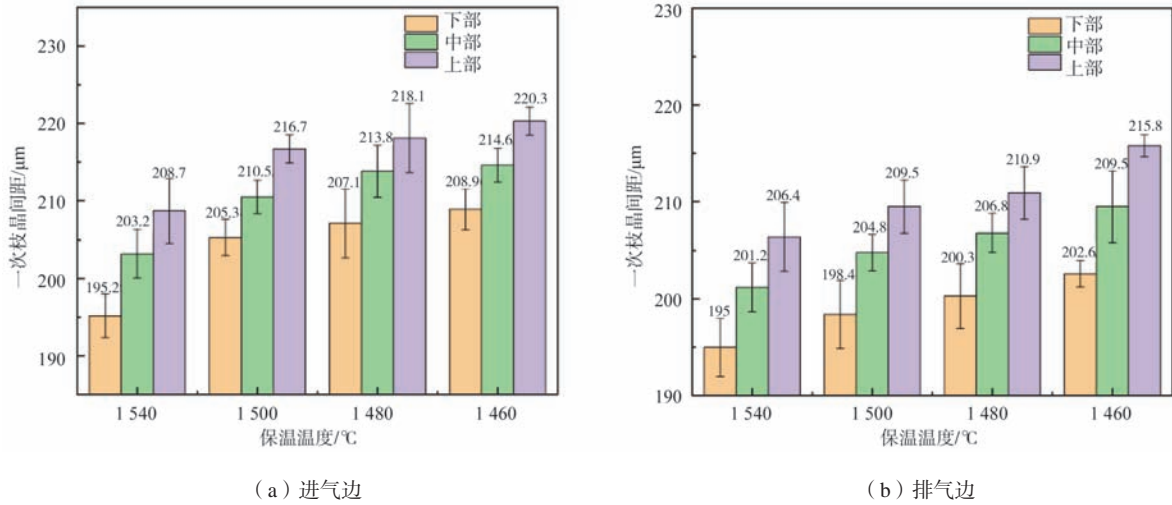


图10 不同保温温度下叶片一次枝晶间距柱状图  
Fig. 10 The columnar diagram of the primary dendrite spacing of the blade at different holding temperatures

间距最小。此外相同保温温度下叶片上部的一次枝晶间距要高于其他部位。

图11为不同保温温度下叶片进气边纵截面的微观组织。由图可知，二次枝晶垂直于一次枝晶排列，随保温温度的降低，二次枝晶间咬合不充分并出现较大间距，并出现十字和类丁字型等枝晶形貌。

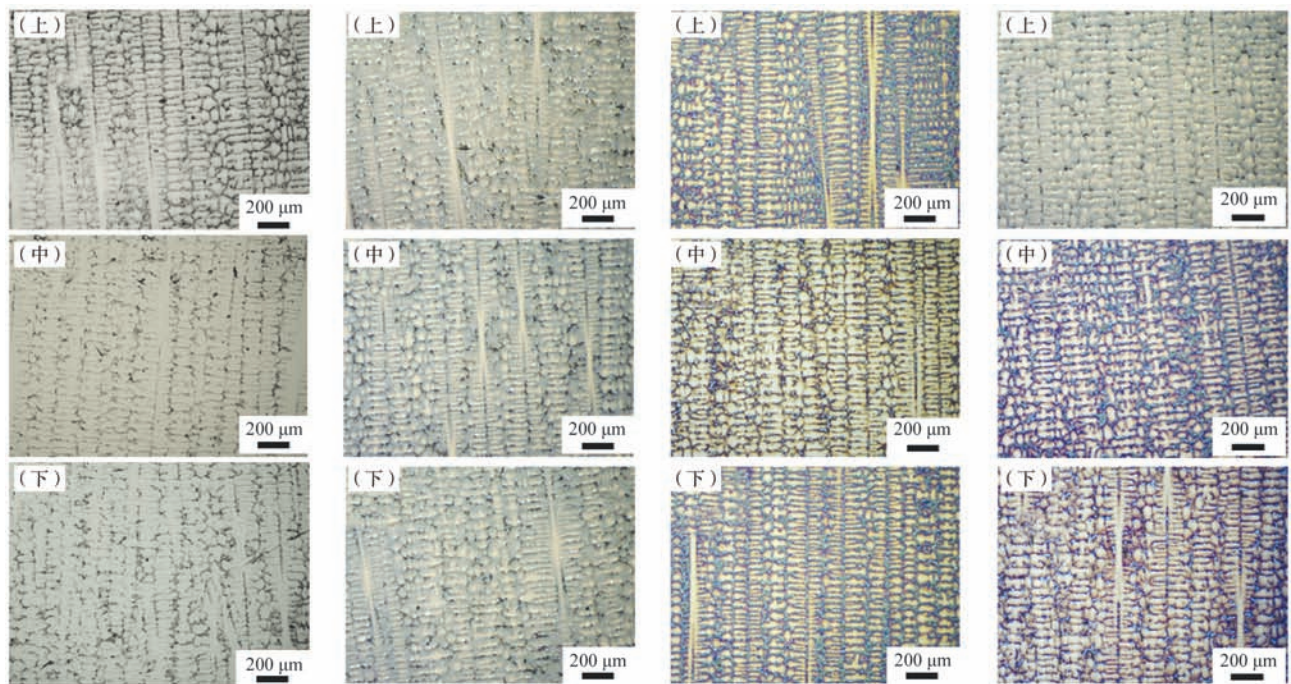
对DZ22B合金样品进气边纵截面显微组织图进行二次枝晶间距的计算，二次枝晶间距 $\lambda_2$ <sup>[16]</sup>的计算公式

为：

$$\lambda_2 = L / (n - 1) \quad (2)$$

式中： $\lambda_2$ 为二次枝晶间距； $L$ 为平行于一次枝晶干穿过 $n$ 个二次枝晶臂的线段长度。

计算结果如图12所示。由图可知，进气边型壳温度在1540 °C下的二次枝晶间距最小，叶身上中下部分的二次枝晶间距由上至下分别为：40.2  $\mu\text{m}$ ，397.1  $\mu\text{m}$ ，35.8  $\mu\text{m}$ 。



(a) 1540 °C叶身上中下部 (b) 1500 °C叶身上中下部 (c) 1480 °C叶身上中下部 (d) 1460 °C叶身上中下部

图11 不同保温温度下叶片进气边纵截面位置显微组织图  
Fig. 11 Microstructure of longitudinal section of blade inlet edge at different holding temperatures

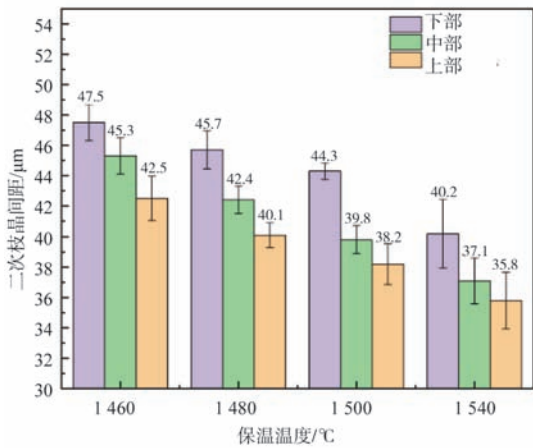
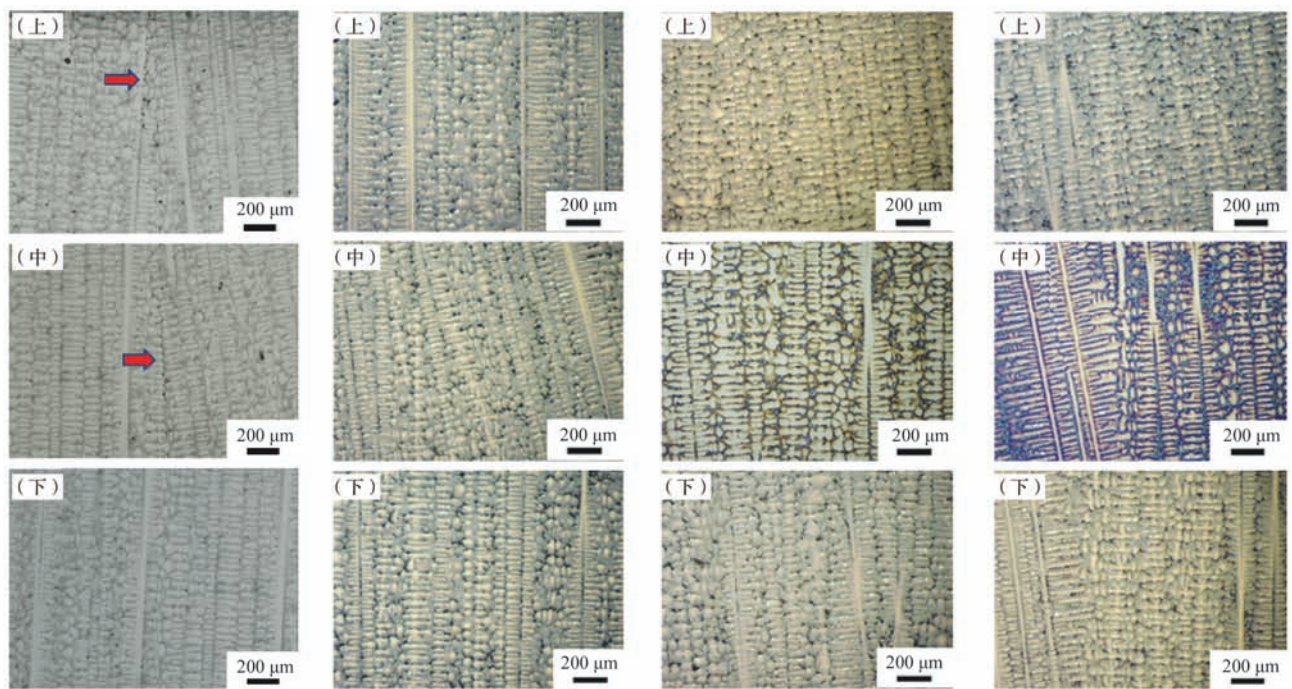


图12 不同型壳保温温度下叶片进气边二次枝晶间距图  
Fig. 12 Secondary dendrite spacing diagram of blade inlet edge at different shell holding temperature

采用同样的方法，获取合金样品排气边的纵截面组织图，如图13所示。枝晶形貌与进气边类似，同时发现在1540℃，上、中部出现裂纹，与模拟位置易产生裂纹相符合。计算合金样品排气边二次枝晶间距，计算结果如图14所示。

由图14中的测量结果可以得出，排气边处的二次枝晶间距随型壳保温温度的增加而逐渐减小，这是由于较大的温度梯度，促进二次枝晶的形核与生长。对比进气边和排气边二次枝晶间距结果，可以看出同高度位置叶片进气边二次枝晶间距均大于排气边，由于排气边处的叶片厚度小于进气边，凝固时固液界面逐渐由一平面变为边缘上凸的曲面，使得同高度位置排气边温度梯度更高，固液界面前沿过冷度更大，二次枝晶更易形核，二次枝晶间距也因此更小。综上，可以发现，随着型壳保温温度的升高，会使叶片一次枝



(a) 1540℃叶身上中下部 (b) 1500℃叶身上中下部 (c) 1480℃叶身上中下部 (d) 1460℃叶身上中下部

图13 不同保温温度下叶片排气边纵截面位置显微组织图

Fig. 13 Microstructure of the longitudinal section of the blade exhaust edge at different holding temperatures

晶间距、二次枝晶间距减小，但保温温度越高出现裂纹的几率越大。

根据得到温度场模拟结果，按照Kurz和Fisher<sup>[19]</sup>提出的模型计算模拟中的一次枝晶间距 $\lambda_1$ ：

$$\lambda_1 = A \cdot V^{\frac{1}{4}} \cdot G^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中： $A$ 是与材料有关的常数， $G$ 为纵向温度梯度， $V$ 为凝固速率。计算得出的叶身上部进气边一次枝晶间距，并与试验统计得出的一次枝晶间距进行比较，如

图15a所示，由图15a可知，模拟结果与试验结果一致，即随着型壳温度的升高，一次枝晶间距降低，试验与模拟相差4%以内，两者吻合较好。图15b为图6模拟得出的叶身上部进气边二次枝晶间距与试验的对比结果，可以看出，试验与模拟结果得出的二次枝晶间距相差3%以内，模型可以较准确地反映工厂实际定向凝固过程。

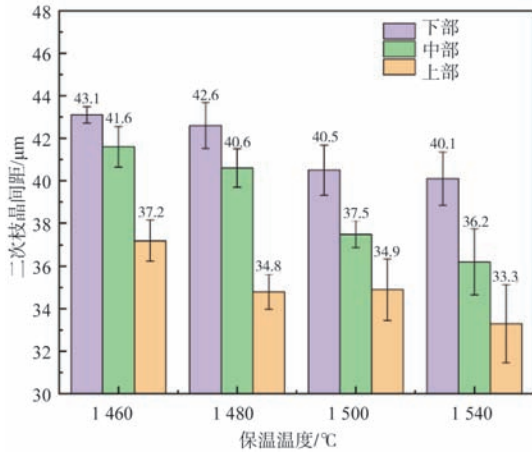


图14 不同型壳保温温度下叶片排气边二次枝晶间距图

Fig. 14 The secondary dendrite spacing diagram of the blade exhaust edge at different shell insulation temperatures

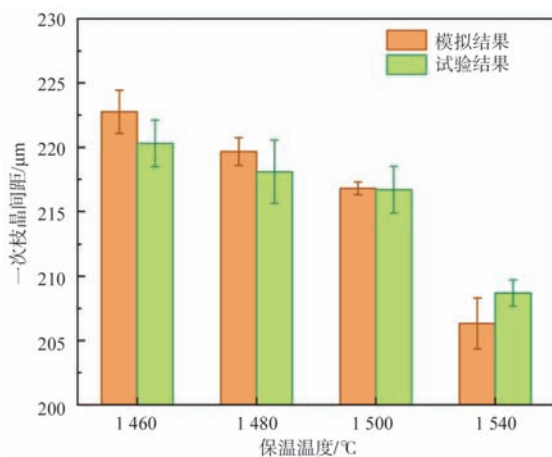
### 3 结论

(1) 定向凝固过程中随着型壳保温温度的增加, 等温线整体呈下凹趋势, 处于1 540 °C温度下的糊状区下凹程度明显大于其他温度。

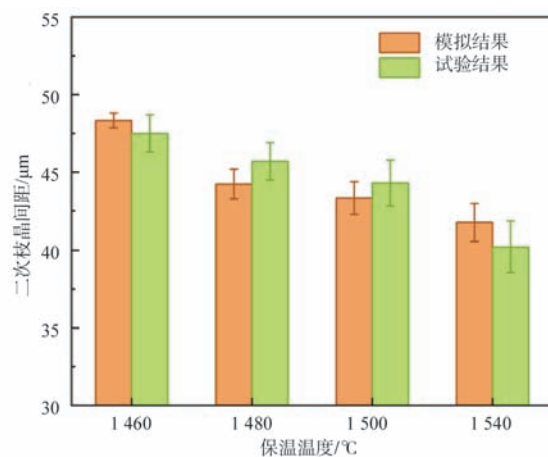
(2) 随型壳保温温度升高, 叶片HTI结果有所增加, 容易产生热裂的区域集中在叶身上部, 且排气边位置容易产生热裂的区域比进气边更大。

(3) 不同型壳保温温度下叶片排气边与进气边组织相似, 相同高度位置叶片排气边的枝晶间距均小于进气边的枝晶间距, 随型壳保温温度升高, 在1 540 °C排气边上、中部出现裂纹, 与模拟结果相符合。

(4) 随型壳保温温度升高, 一次枝晶间距和二次枝晶间距均降低, 对比模拟结果与试验统计得出的一次枝晶间距和二次枝晶间距, 得出一致结论, 模拟与试验吻合较好。



(a) 一次枝晶间距



(b) 二次枝晶间距

图15 不同型壳保温温度下叶身上部进气边模拟与试验结果对比

Fig. 15 Comparison of simulated and experimental results for the upper inlet side of the blade at different shell insulation temperatures

#### 参考文献:

- [1] ZHANG S H, ZHANG J, LOU L H. Anisotropic creep rupture properties of a nickel-base single crystal superalloy at high temperature [J]. Journal of Materials Science&Technology, 2011, 27 (2): 107-112.
- [2] ALABORT E, BARBA D, SULZER S, et al. Grain boundary properties of a nickel-based superalloy: Characterisation and modelling [J]. Acta Materialia, 2018, 151: 377-394
- [3] 姜华, 暴云飞, 李青, 等. 定向凝固工艺对DZ466高温合金显微组织的影响 [J]. 航空材料学报, 2018, 38 (3): 52-57.
- [4] 许庆彦, 夏鹤翔. 镍基高温合金叶片定向凝固过程宏观数值模拟研究进展 [J]. 航空发动机, 2021, 47 (4): 141-148.
- [5] 李振锋, 胡兵, 钟文惠, 等. DZ22B高温合金定向凝固叶片铸造缺陷的形成机理研究 [J]. 航空制造技术, 2020, 63 (16): 45-49, 58.
- [6] YIN Bin, XIE Guang, JIANG Xiangwei, et al. Microstructural instability of an experimental nickel-based single-crystal superalloy [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020, 33 (10): 1433-1441.
- [7] YU H, LI J, XIN L, et al. Anomalous overgrowth of converging dendrites during directional solidification [J]. Journal of Crystal Growth,



- 2014, 402 ( sep.15 ) : 210-214.
- [8] CHANG B, YANG S, LIU G, et al. Influences of cooling conditions on the liquation cracking in laser metal deposition of a directionally solidified superalloy [J]. *Metals-Open Access Metallurgy Journal*, 2020, 10 ( 4 ) : 466.
- [9] 刘鸣, 张继聪, 郭文刚, 等. 重型燃气轮机空心导向叶片精密铸造工艺 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37 ( 1 ) : 49-52.
- [10] 张贺, 韩大平, 张向明, 等. 浇注系统对高温合金薄壁熔模铸件质量的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2014, 34 ( 4 ) : 389-391.
- [11] 史振学, 刘世忠, 韩梅, 等. 铸型温度对单晶高温合金叶片凝固组织的影响 [J]. *钢铁研究学报*, 2014, 26 ( 9 ) : 48-52.
- [12] 薛燕鹏, 王效光, 赵金乾, 等. 两种型壳温度对DD9单晶涡轮叶片凝固组织的影响 [J]. *材料工程*, 2022, 50 ( 7 ) : 80-87.
- [13] 孟晓东, 张荣强, 冀晓磊, 等. 熔模铸造ZM5合金界面换热系数研究 [J]. *铸造*, 2022, 71 ( 9 ) : 1154-1157.
- [14] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第2卷: 变形高温合金/铸造高温合金 [M]. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2002: 751-757
- [15] 郭雄, 陶飞, 史卫杰, 等. 燃机透平叶片热裂缺陷的形成机理研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41 ( 11 ) : 1365-1369.
- [16] GÜNDÜZ M, ÇADIRLI E. Directional solidification of aluminium copper alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, 327 ( 2 ) : 167-185.
- [17] 邹纲, 李青, 谷怀鹏, 等. 凝固参数对DZ466合金组织及持久寿命的影响 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2022, 45 ( 4 ) : 35-41.
- [18] 薛燕鹏, 王效光, 赵金乾, 等. 两种型壳温度对DD9单晶涡轮叶片凝固组织的影响 [J]. *材料工程*, 2022, 50 ( 7 ) : 80-87.
- [19] KURZ W, FISHER D J. Dendrite growth at the limit of stability: tip radius and spacing [J]. *Acta Metallurgica*, 1981, 29 ( 1 ) : 11-20.

---

## Effect of Shell Temperature on the Dendrite Structure of DZ22B Alloy Blade

ZHONG Wen-hui<sup>1</sup>, DING Peng-fei<sup>1</sup>, XIE Wei<sup>1</sup>, FENG Ju-ning<sup>2,3</sup>, WANG Xin-ming<sup>2,3</sup>, WU Yu<sup>2,3</sup>, LIU Yan<sup>2,3</sup>

(1. Aecc South Industry Company Limited, Zhuzhou 412000, Hunan, China; 2. Key Laboratory of Materials Design and Preparation Technology of Hunan Province, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

### Abstract:

Taking DZ22B nickel-based superalloy blade as the object, the temperature field, hot tearing tendency and microstructure of the casting blade during directional solidification at different shell holding temperatures were studied by ProCAST numerical simulation and experiment. The results show that: with the increase of the holding temperature of the shell, the isotherm is concave as a whole. The concave degree of the mushy zone at 1 540 °C is significantly greater than that at other temperatures, and the HTI results of the blade increase. The area prone to hot tearing is concentrated on the upper part of the blade, and the area prone to hot tearing at the exhaust edge is larger than that at the inlet edge. The dendrite spacing of the exhaust side of the blade at the same height is less than that of the inlet side. With the increase of the holding temperature of the shell, the primary dendrite spacing and the secondary dendrite spacing decrease. Comparing the simulation results with the experimental statistics of the primary dendrite spacing and the secondary dendrite spacing, the consistent conclusion is drawn, and the simulation is in good agreement with the experiment.

### Key words:

DZ22B high temperature alloy; directional solidification; dendritic structure; shell temperature; numerical simulation