

选晶器起始段尺寸对高温合金单晶铸件晶向的影响

马德新^{1, 2}, 李 侣³, 孙洪元^{2, 3}, 赵运兴^{2, 3}, 邓阳丕³, 程博文³, 徐福泽³

(1. 深圳市万泽中南研究院有限公司, 广东深圳 518045; 2. 中南大学粉末冶金研究院, 湖南长沙 410083;

3. 深圳市万泽航空科技有限责任公司, 广东深圳 518122)

摘要: 利用数值模拟和铸造试验对高温合金CMSX-4在选晶器中的定向凝固过程进行了研究, 重点考察了起始段尺寸对单晶选晶质量的影响。结果表明, 在起始段高度不变的条件下, 将起始段直径由9 mm增为15 mm时, 单晶试棒的一次晶向偏离有所增加。而在直径相同的条件下将起始段高度由17 mm增加为32 mm时, 选晶结果得到显著改善, 表现在一次晶向的偏离角明显减小, 分布更加集中, 能够获得更高的选晶成功率和更好的单晶质量。

关键词: 高温合金; 单晶铸件; 选晶器; 起始段; 晶体取向

航空发动机中最重要的热端部件之一是高温合金材料制成的涡轮叶片。相对于传统的多晶叶片, 单晶叶片由于消除了晶界, 在高温条件下表现出了优异的综合性能^[1-4]。目前, 世界上最先进航空发动机已普遍安装了单晶涡轮叶片, 因此, 单晶涡轮叶片的质量也成为航空发动机先进程度的重要标志。镍基单晶高温合金的基体为面心立方结构, 其力学性能具有明显的各向异性, 晶体取向的偏差会严重影响单晶叶片的高温性能^[5-7]。在利用精密铸造结合定向凝固工艺制造高温合金单晶叶片的过程中, 除了要消除晶界, 避免各种铸造缺陷, 还要尽量控制晶体生长方向^[8-11], 以获得最佳力学性能。

在工业生产中, 螺旋选晶法由于工艺简单和成本较低, 成为制备单晶叶片的主要方式。选晶法虽然不能控制单晶铸件的二次晶向, 但是能够将一次晶向的偏差控制在一定范围内。选晶器的整体结构可分为下部的柱状起始段和上部的螺旋状选晶段两部分。在起始段内主要实现晶粒在底部的激冷形核和向上的竞争生长, 使得那些[001]晶体取向基本垂直即与叶片轴向基本平行的柱状晶粒得到优先生长并进入螺旋段。在弯曲的螺旋段内, 晶粒受到几何结构的限制不断被淘汰, 最终只剩下一个晶粒进入铸件型腔继续生长, 最终成为单晶铸件^[12-15]。按照一般技术标准, 单晶叶片的一次晶向即[001]晶向与叶片纵轴的偏离角度不应超过15°, 否则作为晶向偏差超标报废。对于某些重要单晶叶片, 对一次晶向的要求更加严格, 要求晶向偏离角小于10°, 甚至更小, 以满足对性能的特殊要求。

对于螺旋选晶器的选晶过程已经进行了大量研究。Seo等人发现激冷板冷却表面的晶粒度和螺旋选晶器几何参数对选晶过程都有显著的影响^[16]。张航等人通过试验及模拟相比较, 从宏观和微观两个角度讨论了定向凝固过程的晶粒竞争演化行为, 还研究了选晶段内水平方向的二次臂竞争和竖直方向的一次臂限制对选晶过程的作用^[17]。许自霖等分析了螺旋通道中的晶粒竞争生长关系, 认为位于螺旋通道内侧和上部的晶粒更具有位置优势, 能够占据螺旋段的扩张生长空间, 有利于形成单晶组织^[18]。Wang等在数值模拟中考虑了液固界面的发展, 提出了空间展开、几何约束和晶粒竞争的组合效应对螺旋晶粒选择的影响, 认为减小选晶段的升角有利于提高选晶效率^[19]。Zhang等研究了施加磁场的作用, 认为这有利于螺旋通道中树枝晶的竞争

作者简介:

马德新(1955-), 男, 教授, 博士, 主要从事高温合金的研究工作。E-mail: madexin@csu.edu.cn

中图分类号: TG132.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

09-1193-06

基金项目:

深圳市科技计划资助项目 (JSGG20220831092800001)。

收稿日期:

2025-03-13 收到初稿,

2025-04-09 收到修订稿。

生长^[20]。

本工作采用数值模拟和铸造试验相结合的方式研究了选晶器起始段的尺寸对选晶结果的影响，目的是通过改进选晶器结构来更好控制高温合金单晶铸件的一次晶向。

1 研究方法

采用第二代镍基单晶高温合金CMSX-4作为合金材料，合金成分如表1所示。

表1 高温合金CMSX-4的合金成分表
Tab. 1 Nominal composition of CMSX-4 superalloy
w_B/%

Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Re	Hf	Ni
6.5	9.0	6.0	0.6	5.6	1.0	6.5	3.0	0.1	余量

本工作主要研究选晶器起始段尺寸对选晶结果的影响。图1(a)、(b)和(c)展示了A、B和C三种不同类型的起始段尺寸(单位mm)，它们的直径与高度的比例分别为15/17、9/17和9/32。其中起始段A与B的高度相同，差别在于直径；而起始段B与C的直径相同，区别在于高度。起始段之上的螺旋段高度都为20mm，螺旋通道直径都为3mm。

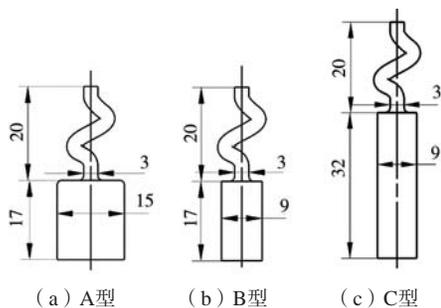


图1 具有不同类型起始段的三种选晶器示意图

Fig. 1 Dimension diagram of three kinds of starter below the grain selector

本工作包括数值模拟和铸造试验两部分。采用铸造模拟软件ProCAST进行凝固过程的温度场计算，用于模拟计算的合金室温密度为7.74 g/cm³，热导率为30.9 W/(m·K)，热焓为6.66 kJ/kg，液相线温度为1381℃，固相线温度为1329℃。通过CAFÉ模块进行选晶过程晶粒演变研究，所采用的三维模型包含水冷底盘、螺旋选晶器、试棒铸件、陶瓷型壳和浇注系统等部分。

在利用ProCAST软件进行数值计算时，CAFÉ模型采用了随机形核算法，这使得每次计算铸件的凝固过程中会出现不同的晶粒分布状态。本工作在同样工艺条件下对三种起始段的螺旋选晶器分别进行了30次计

算模拟，统计每次选出的晶体取向，进行分析和比较。

试验中利用三种选晶器组装了两组试棒蜡模(图2)，每组中有30支蜡棒，其中分别有8支试棒采用A型和B型选晶器，14支采用C型选晶器。采用熔模精密铸造法制备陶瓷型壳。浇注和凝固设备为VIM-IC/DS/SC型真空定向凝固炉。试验中定向凝固炉的加热器保温温度为1550℃，型壳抽拉速度为3 mm/min。凝固完成后除去型壳，切掉浇注系统，对铸件进行宏观腐蚀，检查螺旋选晶器及铸件表面晶粒状况，确认所有试棒都为单晶。最终得到两组共60支单晶试棒，其中分别有16支带有A型和B型选晶器，28支带有C型选晶器。最后使用晶体劳厄衍射仪对所得试棒铸件的晶体取向进行测量，对各种试棒的一次晶向即[001]晶向与试棒轴向的偏离角 β 进行统计和比较。

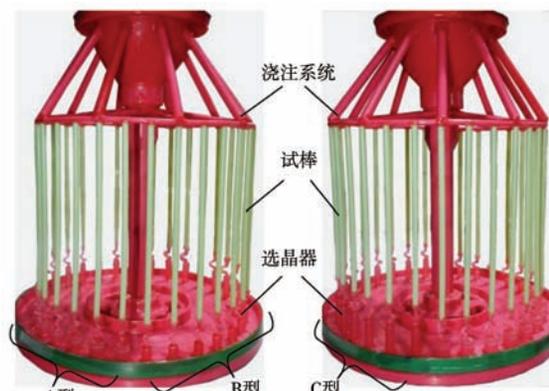


图2 装有不同类型选晶起始段的蜡模组装照片

Fig. 2 The wax assemblies with different selector starters

2 结果与分析

2.1 模拟结果

通过ProCAST软件对每种铸件凝固过程进行温度场计算，再通过CAFÉ模块对晶粒形核和长大过程进行了30次随机模拟，得到30次相似但并不相同的模拟结果。图3(a)、(b)和(c)所示分别为A、B和C型选晶器纵截面上晶粒生长的典型模拟结果。在起始段底部由于水冷铜盘的激冷作用，浇入的高温合金液体迅速形核结晶，产生许多细小的杂乱晶粒。随着凝固过程的向上推进，晶体取向偏离较大的晶粒被逐渐淘汰，只剩下那些晶向垂直度较好的晶粒继续生长到起始段顶部。处于中心部位的那些晶粒继续长入狭细弯曲的螺旋选晶通道(直径3mm)，经过筛选，最后只有一个晶粒(单晶)从螺旋选晶器长出并延伸到整个试棒铸件。这个晶粒的[001]晶向与试棒轴向的夹角即为一次晶向偏离角 β 。

图4展示了各型起始段顶部横截面的晶粒生长状况，中心部位的虚线圆圈标出了螺旋选晶通道(直径

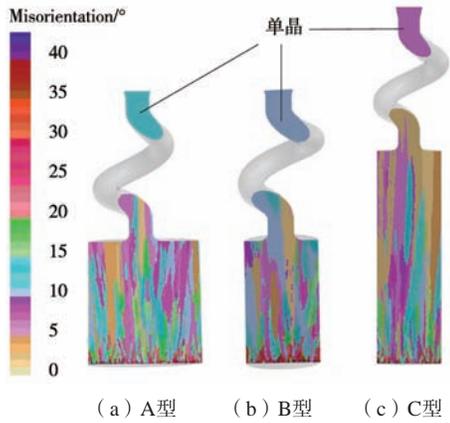


图3 三种起始段中晶粒生长模拟结果(纵截面)
Fig. 3 The simulated grain growth in the different selector starters (longitudinal sections)

3 mm)的起始位置。可见比起A和B型,C型起始段顶部晶粒较粗大。这是因为起始段C的高度比起另外两个几乎高出一倍,晶粒生长过程更长,有更多的偏斜晶粒被淘汰。剩余的晶粒数量更少,尺寸更大,一般都具有较好的晶体取向。

对采用三种类型起始段选晶器的凝固过程分别进行30次模拟,对晶粒生长的模拟结果进行统计整理,记录每次最后所选出单晶晶粒的[001]晶向(即柱状枝晶干的轴向)与试棒轴向(即垂直方向)的偏离角度 β ,即一次晶向偏离角,所得结果列于图5中。

经过数据处理,计算出每种选晶器结构的偏离角 β 的平均值($\bar{\beta}$),并根据公式(1)计算出每种选晶器模拟结果数据的标准差(均方差) σ ,以表征数据的发散度(表2)。

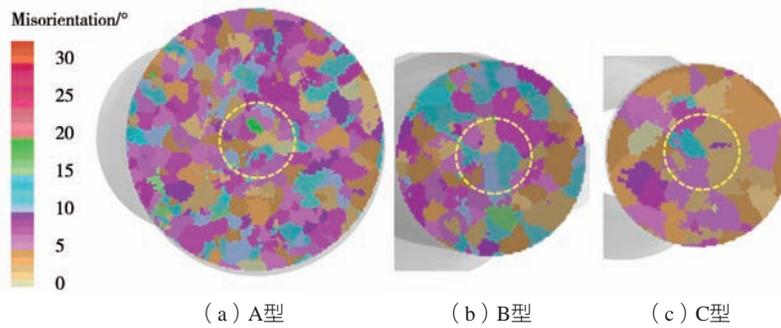


图4 三种起始段晶粒生长模拟结果(顶部横截面)
Fig. 4 The Simulated grain growth in the different selector starters (top cross sections)

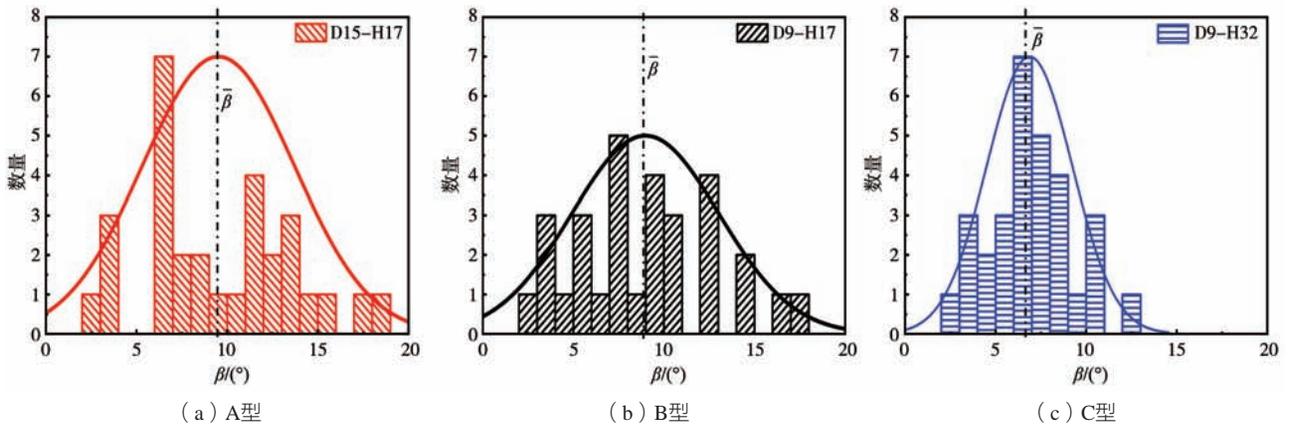


图5 利用各种类型选晶器制取单晶试棒中的晶向偏离角 β 的模拟结果统计
Fig. 5 Simulation results of primary crystal orientation deviation angle β with selector A (a), B (b) and C (c)

表2 图5中模拟结果的几个重要数据
Tab. 2 Some important data in the simulation result shown in Fig. 5

选晶器类型	平均偏离角 $\bar{\beta}/(^{\circ})$	标准差 $\sigma/ (^{\circ})$	废品率($\beta>15^{\circ}$)/%	废品率($\beta>10^{\circ}$)/%
A	8.50	5.49	2/16=12.5	6/16=37.5
B	8.19	5.05	2/16=12.5	3/16=18.8
C	5.71	2.99	0/28=0	2/28=7.14

w_B /%

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\beta_i - \bar{\beta})^2}{N}} \quad (1)$$

式中： β_i 为*i*号选晶器的一次晶向偏离角， $\bar{\beta}$ 为一次晶向偏离角平均值， N 为统计样本量。本工作中对每种选晶器的选晶过程都分别进行了30次模拟，所以每种样本量都为 $N=30$ 。

由图5(a)和表2可知，采用高度较低的选晶器A和B，一次晶向平均偏离值都较大，分别为9.51和8.97。而且偏离角 β 的数据比较分散，标准差 σ 分别为4.12°和4.00°。采用较高的选晶器C，模拟结果的一次晶向偏离角 β 的平均值为6.87°，如图5(b)和表2所示，明显好于选晶器A和B。而且选晶器C的偏离角 β 分布比较收敛，标准差 σ 仅为2.32°。从表2的模拟结果来看，采用选晶器C的各项结果指标，包括平均晶向偏离，偏离角的发散程度以及晶向偏离超标率，都优于选晶器A和B。

根据目前一般的行业技术标准，单晶铸件一次晶向偏离角 β 大于15°则铸件报废。根据模拟结果，选晶器A和B分别有3例和2例的 β 值超过15°，而选晶器C的每次模拟的 β 值都不超过上限值15°。所以根据行业技术标准，采用选晶器A、B和C的模拟结果报废率分别为10%、6.7%和0。对于某些重要的单晶叶片，为了满足对性能的特殊要求，要求一次晶向偏离角 β 小于10°。在这种严格条件下，选晶器A、B和C的报废率分别是46.7%、36.7%和13%。

2.2 试验结果

为验证上述的模拟结果，在真空定向炉中进行了两个型壳的铸造试验，共制备了60支单晶试棒。其中分别有16支试棒采用了A型和B型选晶器，28支试棒采用了C型选晶器(图1)。图6为各种类型选晶器的起始段宏观腐蚀后的表面形貌，显示出典型的定向凝固晶粒组织。图7为三种类型的选晶器起始段的纵截面的金相照片，显示出晶粒在底部激冷形核，并向上竞争生



图6 各种类型选晶器起始段的典型表面形貌

Fig. 6 The etched surface of different selector starters

长的过程。其中在C型选晶器中，由于起始段更高，使得晶粒生长距离更长，晶粒变得更粗大，晶体取向得到更充分的优选。这与计算模拟的结果(图3)基本一致。

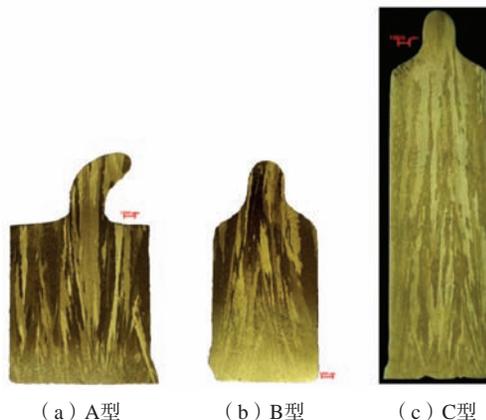


图7 各种类型选晶器起始段的典型纵截面形貌

Fig. 7 The longitudinal sections of different selector starters

为研究选晶器起始段尺寸对单晶铸件最终晶体取向的影响，采用晶体劳厄衍射仪对所有的单晶试棒的一次晶向偏离角(β)进行了检测，统计结果分别列入图8。经过数据处理，得到采用每种选晶器的偏离角 β 的平均值。按照公式(1)计算出表征数据发散度的标准差 σ 。本试验共浇注两组试棒，采用A、B和C型选晶器分别制备了16、16和28支单晶试棒，这些试棒数量就是三种情况下单晶试棒的样本量 N 。表3列出了统计结果的几个特征数据。

由图8和表3可知，对采用起始段较低的A型和B型选晶器制备的单晶试棒，一次晶向偏离都较大，平均值分别为8.50和8.19。而且偏离角 β 的数据比较分散，标准差 σ 分别为5.49°和5.05°。对于采用较高起始段的选晶器C制备的28根单晶试棒，测定的一次晶向偏离角 β 的平均值减小为5.71， β 值的分布比较收敛，标准差 σ 仅为2.99°。

从图8和表3还可看出，采用选晶器A和B的各16个试棒中分别有2例的 β 值超过15°，按照通常的行业标准，相应的晶向报废率都为12.5%。而采用选晶器C制备的28个单晶试棒由于晶向偏离都小于15°，所以报废率为0。若严格要求单晶产品一次晶向偏离角小于10°，则采用选晶器A和B的晶向报废率分别是37.5%和18.8%，而采用选晶器C的报废率仅为7.14%。可见，采用选晶器C的各项结果指标都明显优于选晶器A和B，这与模拟的结果非常相似。

综上所述，关于选晶器起始段的尺寸对选晶质量的影响，数值模拟和试验测量得出的结果相似。在起始段高度不变的条件，采用直径9 mm的B型比起直径15 mm的A型，所制备的单晶试棒的一次晶向质量有

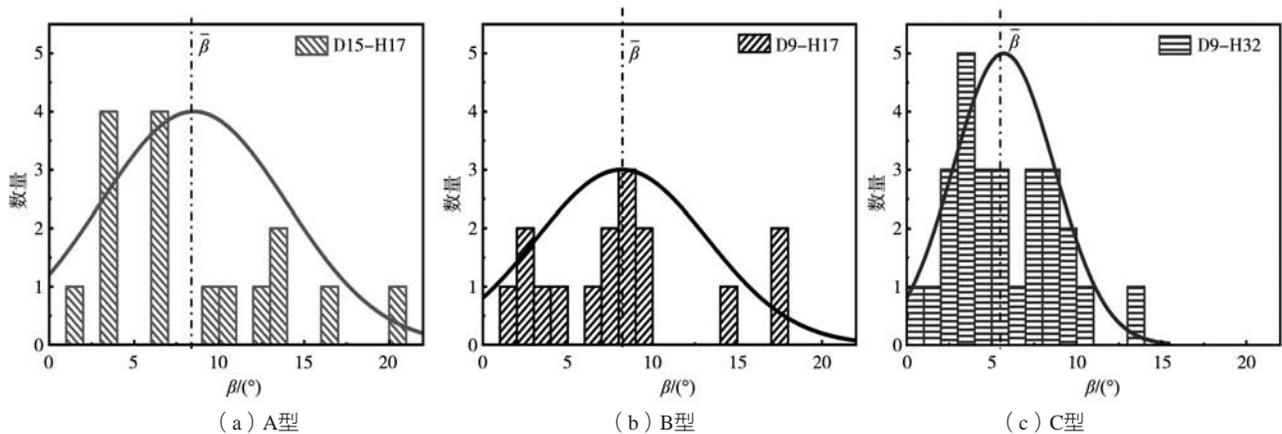


图8 利用各种类型选晶器制得的单晶试棒中晶向偏离角 β 的试验结果统计
Fig. 8 Experimental results of primary crystal orientation deviation angle β with selector A (a), B (b) and C (c)

表3 图8中试验结果的几个重要数据
Tab. 3 Some important data in the experimental result shown in Fig. 8

选晶器类型	平均偏离角 $\bar{\beta}/^\circ$	标准差 $\sigma/^\circ$	废品率 ($\beta > 15^\circ$) /%	废品率 ($\beta > 10^\circ$) /%
A	8.50	5.49	2/16=12.5	6/16=37.5
B	8.19	5.05	2/16=12.5	3/16=18.8
C	5.71	2.99	0/28=0	2/28=7.14

所提高。说明加粗起始段并不会改进选晶结果，反而有可能有所恶化。而在直径相同的条件下，高度32 mm的C型起始段选晶结果比起高度15 mm的B型有着明显的改进。其中一次晶向的平均偏离角明显减小，分布更加集中，由一次晶向偏离超标 ($\beta > 15^\circ$ 或 $\beta > 10^\circ$)造成的废品率也非常低（分别仅为0和7.14%）。

对于上述选晶器起始段尺寸对选晶质量的影响结果，可做如下分析。当过热的高温合金液体浇注进入预热的型壳型腔时，在起始段底部受到水冷铜盘的激冷，迅速形核结晶生成许多细小的杂乱晶粒。由于水冷铜盘强大的吸热能力，在起始段中形成几乎垂直向下的热流，造成底部细小晶粒的向上竞争生长。镍基高温合金材料为立方晶体结构，在通常条件下其凝固过程表现为枝晶形态的晶粒生长。当晶粒的优先生长方向即[001]晶向与热流反向平行时，能够获得较快的生长速度。同时，随着凝固前沿的向上推进，距离激冷铜盘越来越远，凝固前沿的温度梯度逐渐降低，凝固速率逐渐变慢，导致晶粒数量不断减少，那些晶体取向偏离较大的晶粒由于生长缓慢被逐渐淘汰。因此，起始段中凝固过程的发展，是一个温度梯度逐渐

变弱，凝固速率逐渐变慢的过程，也是枝晶晶粒不断粗化，晶体取向不断优化的过程。起始段越高，晶粒生长距离就越长，偏斜晶粒的淘汰就越充分。结果是到达起始段顶部并且进入选晶段的晶粒的晶向偏离就越小，因而最终制备的单晶试棒的晶向质量就越好。另外，本工作中还发现，将起始段直径由9 mm增为15 mm时，单晶试棒的一次晶向质量不仅没有提高反而有所下降，其中原因还有待于进一步研究。

3 结论

利用数值模拟和铸造试验的方法研究了选晶器起始段尺寸对单晶铸件晶向的影响。在起始段高度不变的条件下，将起始段直径由9 mm增为15 mm时，单晶试棒的一次晶向质量有所下降。而在直径相同的条件下将起始段高度由17 mm增加为32 mm时，选晶结果得到显著改善，表现为一次晶向的偏离角明显减小，分布更加集中，由晶向偏离超标造成的废品率大大下降。这是因为定向凝固距离增加后偏斜晶粒的淘汰更加充分，因而最终得到一次晶向更好的单晶产品。

参考文献:

- [1] VERSNYDER F I, SHANK M E. The development of columnar grain and single crystal high temperature materials through directional solidification [J]. Materials Science and Engineering, 1970, 6 (4): 213-247.
- [2] PRATT D C. Industrial casting of superalloys [J]. Materials Science and Technology, 1986, 2 (5): 426-435.
- [3] REED R C. The superalloys: fundamentals and applications [M]. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2008: 1-216.
- [4] 刘林.高温合金精密铸造技术研究进展 [J]. 铸造, 2012, 61 (11): 1273-1285.

- [5] MATAN N, COX D C, CARTER P, et al. Creep of CMSX-4 superalloy single crystals: effects of misorientation and temperature [J]. *Acta Materialia*, 1999, 47 (5) : 1549–1563.
- [6] WANG L N, LIU Y, YU J J, et al. Orientation and temperature dependence of yielding and deformation behavior of a nickel-base single crystal superalloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 505 (1–2) : 144–150.
- [7] ZHOU Y Z. Formation of stray grains during directional solidification of a nickel-based superalloy [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65 (4) : 281–284.
- [8] 马德新, 王富, 孙洪元, 等. 高温合金单晶铸件中杂晶缺陷的试验研究 [J]. *铸造*, 2019, 68 (6) : 558–566.
- [9] 高斯峰, 刘林, 王柠, 等. 镍基单晶高温合金DD3制备过程中晶粒演化和选晶行为的EBSD研究 [J]. *金属学报*, 2011, 47 (10) : 1251–1256.
- [10] XU M, GENG X Q, ZHANG X L, et al. Effect of competitive crystal growth on microstructural characteristics of directionally solidified nickel-based single crystal superalloy [J]. *China Foundry*, 2022, 19: 109–116.
- [11] XIAO J H, JIANG W G, HAN D Y, et al. Evolution mechanism of crystallographic orientation in grain continuator bars of a Ni-based single-crystal superalloy prepared by Bridgman technology during directional solidification [J]. *China Foundry*, 2022, 19 (1) : 35–45.
- [12] GAO S F, ZHAO X B. EBSD studies of grain evolution and grain selection behavior during the preparation of Ni-based single crystal superalloy DD3 [J]. *Acta Metall Sin*, 2011, 47 (10) : 1251–1256.
- [13] DAI H J, DONG H B, D'SOUZA N, et al. Grain selection in spiral selectors during investment casting of single-crystal components: part II. numerical modeling [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42: 3439–3446.
- [14] WANG N, LIU L, GAO S F, et al. Simulation of grain selection during single crystal casting of a Ni-base superalloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 586: 220–229.
- [15] 马德新, 赵运兴, 徐维台, 等. 单晶高温合金异形铸件中的雀斑研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41 (11) : 1345–1349.
- [16] SEO S M, KIM I S, LEE J H, et al. Grain structure and texture evolutions during single crystal casting of the Ni-base superalloy CMSX-4 [J]. *Metals and Materials International*, 2009, 15: 391–398.
- [17] 张航, 许庆彦, 孙长波, 等. 单晶高温合金螺旋选晶过程的数值模拟与实验研究 I. 引晶段 [J]. *金属学报*, 2013, 49 (12) : 1508–1520.
- [18] 许自霖, 李忠林, 张航, 等. DD6 合金选晶器定向凝固的数值模拟与实验 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46 (7) : 1856–1861.
- [19] WANG B Q, ZENG L, REN N, et al. A comprehensive understanding of grain selection in spiral grain selector during directional solidification [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 102: 204–212.
- [20] ZHANG C J, HU X J, YUAN X T, et al. Optimization of grain-selection behavior in the spiral selector during Cusp-magnetic-field-assisted directional solidification of single-crystal superalloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 1025–1039.

Effects of Selector Starter Dimension on the Crystal Orientation of Single Crystal Superalloy Castings

MA De-xin^{1,2}, LI Lü³, SUN Hong-yuan^{2,3}, ZHAO Yun-xing^{2,3}, DENG Yang-pi³, CHENG Bo-wen³, XU Fu-ze³

(1. Shenzhen Wedge Central South Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518045, Guangdong, China; 2. Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Shenzhen Wedge Aviation Technology Co., Ltd., Shenzhen 518122, Guangdong, China)

Abstract:

The directional solidification process of superalloy CMSX-4 in a single crystal selector was conducted and the impact of the starter dimensions on the quality of single crystal selection was investigated. The results from numerical simulations and experimental measurements were similar. With the increase in the starter diameter from 9 mm to 15 mm the quality of the primary crystal orientation was slightly reduced. By increasing the starter height from 17 mm to 32 mm, however, the selection quality of primary orientation was significantly improved. As a result, the single crystal castings with smaller deviation of the primary crystal orientation could be produced and the reject rate of the product was noticeably reduced.

Key words:

superalloy; single crystal castings; selector; starter; crystal orientation