

# 镍基单晶高温合金凝固缺陷研究进展

Advance in Research of Casting Defects of Directionally Solidified Nickel-based Single Superalloys

赵新宝<sup>1,2</sup>, 刘 林<sup>2</sup>, 杨初斌<sup>2</sup>, 张 军<sup>2</sup>, 李玉龙<sup>1</sup>, 傅恒志<sup>2</sup>

(1 西北工业大学 航空学院, 西安 710072;

2 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

ZHAO Xin-bao<sup>1,2</sup>, LIU Lin<sup>2</sup>, YANG Chu-bin<sup>2</sup>,

ZHANG Jun<sup>2</sup>, LI Yu-long<sup>1</sup>, FU Heng-zhi<sup>2</sup>

(1 School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an

710072, China; 2 State Key Laboratory of Solidification Processing,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**摘要:** 镍基单晶高温合金的凝固缺陷对其力学性能有很大的影响, 减少和控制凝固缺陷对提高合金性能和降低成本具有重要意义。综述了镍基单晶高温合金定向凝固过程中可能出现的几个重要缺陷, 包括缩松、雀斑、晶体取向的偏离和杂晶, 重点讨论了这些缺陷的特点和产生的机理, 并从合金成分、工艺参数、铸件结构等方面分析了凝固缺陷的影响因素, 指出了减少单晶高温合金凝固缺陷的措施。

**关键词:** 镍基单晶高温合金; 定向凝固; 凝固缺陷; 工艺参数

**中图分类号:** TG132.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2012)01-0093-06

**Abstract:** Casting defects are deleterious to the mechanical properties of nickel-based single superalloys, the decrease of casting defects is benefit for improving mechanical properties and reducing the cost. Some important casting defects formed in the directional solidification process are discussed, including porosity, freckles, misorientation and stray grains. Based on the features and formation mechanisms for the defects, the influence of alloy composition, processing parameters and casting structure on the casting defects is analyzed. Meanwhile, the suggestions for reducing casting defects are pointed out.

**Key words:** nickel-based single superalloy; directional solidification; casting defect; processing parameter

自从 20 世纪 80 年代定向凝固技术应用到高温合金制备中以来, 高性能的镍基单晶高温合金不断获得发展。单晶高温合金的显著特点是消除了可能产生裂纹源的横向和纵向晶界, 因而具有较好的高温蠕变性能和抗疲劳性能, 被广泛应用于制造航空发动机涡轮叶片、导向叶片等, 同时在工业燃气轮机也有重要应用<sup>[1-3]</sup>。在镍基单晶合金的制备中, 为了增强铸件的力学性能和提高成品率, 凝固缺陷的控制是一个非常重要的问题。单晶高温合金的发展围绕着缺陷控制的问题, 在成分设计和定向凝固技术的改进方面开展了大量的研究, 主要体现在难熔元素和微量元素的添加及凝固温度梯度的提高。

在高温合金铸件定向过程中影响组织和性能的因素有很多, 如合金成分的复杂性、工艺条件及参数的合理性等均可造成雀斑、缩松、晶体取向的偏离和杂晶等

凝固缺陷的出现。传统的高速凝固法是目前工业生产定向铸件的常用方法, 但是在制备较大铸件时由于凝固过程温度梯度降低得较多, 容易产生各种缺陷。新型的液态金属冷却法采用液态金属作为冷却介质, 提高了凝固界面前沿的温度梯度, 显著细化了枝晶组织并减少了凝固缺陷(如降低偏析程度, 减少有害相等)<sup>[4,5]</sup>。定向凝固技术的进步已经明显减少了凝固缺陷的出现。为了在定向凝固过程获得优良组织的同时, 尽可能全面减少各种凝固缺陷的出现, 本文介绍了近年来单晶高温合金凝固缺陷的研究情况, 指出了减少缺陷的措施及未来的发展方向。

## 1 单晶高温合金定向凝固组织缺陷

由于铸件结构的复杂性和尺寸的增加, 合金成分

中难熔元素的增加以及工艺参数的控制问题,单晶高温合金铸件更容易出现缩松、雀斑、取向偏离和杂晶等多种缺陷<sup>[6]</sup>。铸造工厂通过对单晶铸件 6 个月检测的缺陷平均值分析<sup>[7]</sup>,给出了单晶叶片生产中典型缺陷出现的统计概率,发现晶粒取向问题、大角度晶界、杂晶和雀斑链是主要的铸造缺陷,其中大角度晶界的缺陷率达到 5.8%,晶粒取向偏差造成的缺陷率甚至达到 8%,这些缺陷对叶片的合格率具有很大的影响。下面就凝固过程中出现的主要缺陷分别进行阐述。

## 2 缩松

铸件在凝固过程中,由于合金液相和固相的收缩,当残余液体被已凝固部分包围时,气体得不到排出以及得不到有效补缩时,所形成的分散细小的缩洞称为缩松。在定向凝固合金中,枝晶间存在补缩通道,使液体补缩可以持续到凝固结束,因此缩松缺陷明显减少。然而在枝晶根部缩洞经常得不到充分的补充,从而出现缩松<sup>[8]</sup>,同时在低的生长速率条件下形成的缩松还会多一些。缩松容易在叶片的内部产生应力集中,因而降低叶片的力学性能。图 1 是在碳化物附近出现的缩松形貌。



图 1 碳化物附近的缩松形貌<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Porosity morphology around the carbide<sup>[8]</sup>

定向凝固过程中的显微缩松主要是由于凝固收缩在枝晶间形成了显微熔池,显微熔池的产生和发展与枝晶臂间距密切相关。由于凝固参数是影响枝晶尺度的主要因素,因此凝固参数对缩松的影响比较明确。研究发现<sup>[9]</sup>随拉晶速率的增大,试样中缩松量逐渐减少。同时在较低的生长速率下,存在较大的糊状区,缩松就会比较明显;在较高的凝固速率下,铸件倾向于形成集中的缩孔,并已在 MarM247 合金的实验中得到验证<sup>[10]</sup>。

合金元素的含量对缩松的形成有一定影响,J. Lecomte Bekckers<sup>[11]</sup>, Q. Z. Chen<sup>[12]</sup>等研究发现不同

元素对缩松形成的作用是不同的。Lecomte-Beckers 的研究结果认为,Al, Ti, Co 增加了缩松含量,这是由于这些元素大都增加合金的结晶温度间隔,从而加剧缩松;而 Cr 可以减轻缩松。碳对缩松的影响出现了不同的结果。美国佛罗里达大学<sup>[13]</sup>认为单晶高温合金中碳化物的形成阻碍了补缩通道,因而增大了缩松含量。中科院金属研究所<sup>[14]</sup>和英国剑桥大学<sup>[15]</sup>则认为加入碳以后形成的 MC 型碳化物的后期生长可以填补枝晶间的空洞,从而减少了缩松。总体上碳化物可以减少固液相间的密度差,从而减少缩松,只有大量草书状的碳化物可引起缩松的增多。

总的来说在凝固过程中若固液相密度相差较大,就容易形成缩松;对于结晶温度间隔较小的合金不易产生缩松。对于固定的合金,可以通过增加凝固速率减小糊状区宽度,同时形成细小的枝晶来减少缩松。

## 3 雀斑

雀斑链是由杂乱的等轴晶、第二相颗粒、显微疏松等在对流的条件下偏聚在一块形成的,其分布往往在枝晶间区域,富含 Ti, Al, Ta 和 Nb 等正偏析元素,常沿着定向凝固方向分布,如图 2 所示。雀斑链的形成是由于糊状区液体的密度逐渐降低,引起不稳定局部对流所致。由于在腐蚀后宏观表面常呈明显的斑点状,故称为雀斑。

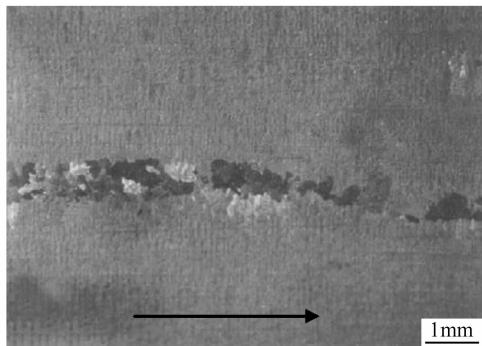


图 2 单晶铸件中的雀斑链<sup>[16]</sup>

Fig. 2 A typical freckle chain in single crystal<sup>[16]</sup>

高温合金中雀斑的形成同样受到合金成分和凝固参数的影响,其形成主要和凝固过程中糊状区的宽度有关,而糊状区的宽度主要取决于合金成分和定向凝固中的温度梯度。近年来随着单晶高温合金的发展,在第二代及新的单晶高温合金中加入了大量的 Re, W, Ru 等难熔元素,在提高高温抗蠕变能力的同时由于增加了元素的偏析,导致合金的密度反转和热对流的形成,最终导致雀斑链呈加剧趋势<sup>[17]</sup>,因此引起了

人们的重视。Tin 和 Pollock 等人<sup>[18]</sup>在 Rene N5 单晶高温合金的基础上,通过调整 C 和合金元素的含量,系统研究了元素对雀斑数量的影响,其结果如表 1 所示。由于 Ti,Ta,Al 为正偏析元素,凝固过程偏析于枝晶间降低了 W,Re 等负偏析元素造成的密度反转,减少了雀斑的形成。C 在凝固过程中形成的碳化物,可以抑制热质对流的形成,因而可以有效地降低高温合金中雀斑链的形成。研究表明汉字状和颗粒状的碳化物能更好地影响到凝固过程的热质对流。另外在单晶高温合金凝固时施加的电磁场可以增强熔体的流动,同时也增加了雀斑的数量<sup>[19]</sup>。

表 1 溶质元素对雀斑数量的影响

Table 1 Influence of additions of elements on the freckles							
Element	Re	W	Mo	Al	Ti	Ta	C
Influence on the formation of freckles	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓

影响雀斑的另一个重要因素就是合金的组织尺度。20 世纪 90 年代初,美国 P&W 公司和 Pollock 研究组<sup>[20]</sup>较系统地研究了单晶铸件中雀斑与合金成分和枝晶组织的关系,提出了合金元素对雀斑形成倾向的影响机制,并选择糊状区无量纲 Rayleigh 数作为雀斑形成判据。根据 Beckermann 等人<sup>[21]</sup>的瑞利数与雀斑的形成关系,只有在瑞利数大于某一临界值时雀斑才会出现,而此时也对应一个相应的  $G^{-1/2}V^{-1/4}$  值(温度梯度  $G$ ,凝固速率  $V$ );根据 Hunt,Kurz<sup>[22,23]</sup>的枝晶模型,一次枝晶间距与  $G^{-1/2}V^{-1/4}$  成正比,即在枝晶间距小于某一特定值时才会避免出现雀斑。Pollock<sup>[20]</sup>发现在试样的枝晶间距小于  $320\mu\text{m}$  时观察不到雀斑,如果枝晶间距大于  $500\mu\text{m}$ ,则雀斑的数量基本恒定;说明提高冷却速率、细化枝晶可以防止雀斑的形成。文献<sup>[24]</sup>则更直接地给出了温度梯度和生长速率与雀斑之间的关系,在冷却速率低于  $0.14\text{K/s}$  时,容易形成雀斑;凝固速率大于此值时,雀斑不易形成。同时雀斑的形成与铸件结构和几何尺寸也密切相关,对于工业燃气轮机,由于其叶片尺寸较大,温度梯度和凝固冷却速率必然很低,导致形成雀斑的危险明显增加。

由以上分析可知热质对流是形成雀斑的直接因素,而合金的成分、凝固参数、铸件的形状和尺寸对雀斑的作用都可转化为对热质对流的影响,因此减少雀斑的形成需要减缓糊状区内熔体密度反转并控制其流动的稳定性,可以从调整合金成分、提高凝固速率减小枝晶间距等方面进行;而对于固定的合金,提高凝固界面前沿的温度梯度是减少雀斑的一个重要途径。

4 晶体取向的偏离

镍基单晶高温合金具有 $\langle 001 \rangle$ 的择优取向,该方向具有最小的弹性模量,可以减少热循环应力。但在实际铸件制备中由于铸件几何形状的变化,导致凝固时固液界面的波动,因此不太可能在铸件任何部位都保持精确的 $[001]$ 晶体学位向。对于大尺寸单晶叶片,由于降低了定向凝固时的散热效率,致使温度梯度下降,单向热流更加难以保证,致使晶粒生长方向偏离 $\langle 001 \rangle$ ,同时也易于形成雀斑和伪晶粒。晶体取向与轴向偏角增大,铸件的强度和寿命的分散度均会增大<sup>[25,26]</sup>。Sass<sup>[27]</sup>通过对第二代高温合金 CMSX-4 的蠕变强度研究,发现在  $850^{\circ}\text{C}$  时合金具有显著的各向异性,蠕变强度按 $[001]$ , $[011]$ , $[111]$ 次序降低,晶体取向的偏离已经严重影响单晶叶片的力学性能,因此在定向凝固中除了控制相与组织的竞争选择外,还必须精确调节和控制晶体的生长方向,才能使铸件具有最好的力学性能。

选晶法是制备单晶高温合金的一个重要方法,因能获得低弹性模量 $\langle 001 \rangle$ 取向的晶体被广泛应用。由于结晶过程是按晶体学择优生长,偏离 $[001]$ 方向的晶粒在进入型腔前均被淘汰掉,只能生成 $[001]$ 方向的单晶,目前常用的是螺旋形选晶器。但在实际生产中,受选晶器形状结构及其他工艺参数的影响,选晶法制取单晶的一维取向与试样轴向常会出现不一致,通常铸件的纵向与 $[001]$ 方向可以控制在  $15^{\circ}$ 之内,但是不能控制横向和其他的取向<sup>[28]</sup>。在选晶法制备 CMSX-4 合金高压涡轮叶片时,晶粒取向偏离轴向高达  $18^{\circ}$ <sup>[29]</sup>。与选晶法相比,籽晶法获得的单晶的取向精度较高,但籽晶需要从制好的单晶上切取,切取不同取向的籽晶比较麻烦,另外籽晶法制取单晶中常出现杂晶等缺陷。

定向凝固制备单晶中,温度梯度是影响晶体质量的关键因素之一。当温度梯度较低时,热流容易偏离晶体轴向方向,从而导致晶体取向的偏离。Ardakani 等<sup>[30]</sup>进行了单晶高温合金不同温度梯度下晶体生长实验,发现在较高的温度梯度下,热流与择优取向 $\langle 001 \rangle$ 的夹角较小,同时平直的固液界面能生成精确的 $\langle 001 \rangle$ 方向。但是有研究者<sup>[31]</sup>用  $\gamma$  射线对晶体亚晶粒的衍射结果表明,在较低凝固速率下,温度梯度的增加会使亚晶粒的分散度减小;但较高凝固速率下,温度梯度的增加反而使亚晶粒取向分散度增大。凝固界面从平界面偏离越大,在定向单晶结构中取向的偏离越严重;平界面生成集中的 $\langle 001 \rangle$ 取向,弯曲界面生成分散的取向<sup>[29]</sup>。高的温度梯度和较低的凝固速率可以形成平直的凝固界面,因此在定向凝固过程中要保持界

面的平直性。

试样的直径不同,造成凝固界面的曲率不同<sup>[32]</sup>。在试样的直径尺寸较大或者复杂结构叶片的变截面处,都很难保证平直的界面,因此可造成温度梯度的不一致,最后形成叶片的取向不一致。当增大抽拉速率和试样直径时,试样中心的热量不能及时传到表面,固液界面发生下凹,温度梯度的大小和方向发生变化,导致晶体取向分散。对于横截面面积变化的叶片,截面形状的变化导致凝固界面和位置的变化,对温度梯度产生影响,同样容易造成晶体取向的分散;实验表明相同条件下规则柱状试样比不规则叶片有更集中的生长取向<sup>[33]</sup>。在抽拉速率很低的稳定条件下,界面的速率近似等于试样(坩埚)或炉体的移动速率,界面保持平直;抽拉速率增大后界面会出现明显的滞后现象,界面形状与温度梯度发生变化,导致生长方向发生偏离<sup>[4]</sup>。

随着高温合金的发展,其合金成分也在不断地变化,在第二代和第三代高温合金中分别加入了 3%(质量分数,下同)和 6% 的 Re 来提高高温合金的蠕变强度,与此同时带来了晶体取向的控制困难。合金中高浓度的难熔元素和低的含碳量可以降低晶粒的消熔速率,促使自由晶核的形成和保留。在对高 W 和 Ta 含量及不含 C 的 CMSX-4 合金与低 W, Ta 及 0.07% C 含量的 CM186LC 合金的对比研究中发现<sup>[30,34]</sup>, CM186LC 合金中偏离〈001〉取向 10° 晶粒数多于 CMSX-4 合金;相反, CMSX-4 合金偏离大于 10° 的晶粒数较多。碳的加入可以减小元素的偏析系数, Wanger 对 CM186LC 的研究发现,碳减弱了 W 和 Re 从枝晶中偏析的程度;同时文献<sup>[35,36]</sup>报道了溶质元素在不同的晶体取向偏析不同,溶质元素的偏析受到晶体取向的影响。

由上述可知,要获得择优取向与晶体轴向一致的晶体,对于选晶法首先需要设计合理的选晶器,而籽晶法需要预先切取取向精确的籽晶。在定向凝固过程中,温度梯度、抽拉速率和合金成分等都能很大程度上影响晶体取向。面对以上问题,在以后的晶体取向控制中可重点关注以下方面:在较大的温度梯度范围内,研究不同温度梯度条件下晶体取向的转变规律;研究强对流、变截面等因素对晶体取向的作用;同时可采用计算机模拟与实验相对比实现精确控制取向的目的。

## 5 杂晶

相对于等轴晶和柱晶铸件,单晶的最明显特点是消除了所有沿铸件横向和纵向的晶界,由此消除易裂纹源而提高力学性能。但是在单晶制备中会存在多个晶粒并存的现象。通常铸件截面的突变,可引起凝固

界面温度梯度变化、熔体流动等,如果工艺参数控制不当,便可能出现杂晶等,严重破坏了单晶的完整性,使材料的力学性能严重下降。

选晶法是制备单晶叶片的常用方法,但是如果选晶器的形状不太合适,最终可能会有多个晶粒进入铸件,如图 3(a)所示。为此对选晶器的形状作了大量的研究<sup>[38,39]</sup>,指出了螺旋选晶段的匝数、相邻螺旋段的距离和起晶器的尺寸等均会影响选晶效果。另外发现单晶叶片板缘是杂晶易出现的位置。采用籽晶法制备单晶时,发现在籽晶引晶的回熔区附近,是杂晶容易形成的区域<sup>[40]</sup>。图 3(b)是用籽晶法制备单晶时,在初始的非稳态区形成的杂晶。若籽晶和母合金结合不够好,界面的过热温度太低,很容易生成杂晶。另外籽晶和坩埚(模壳)的间隙过大,在籽晶回熔期间,金属液流进这些间隙中,形成偏离晶。金属液流动明显,可能会冲断已形成的枝晶,这些枝晶碎片有可能成为新的核心形成杂晶。

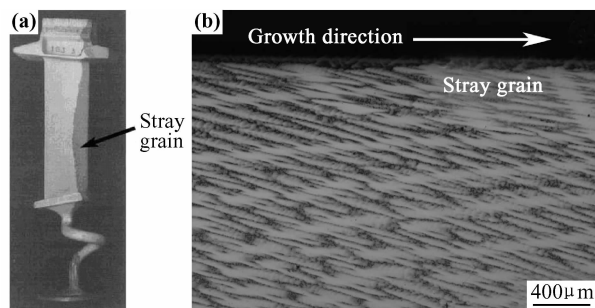


图 3 单晶中杂晶的形貌 (a)选晶法制备单晶叶片中的杂晶<sup>[37]</sup>;(b)籽晶法制备单晶中的杂晶

Fig. 3 Morphologies of stray grains (a) stray grain in turbine blade with grain selector<sup>[37]</sup>; (b) microstructure of stray grain in bar crystal with seeding technology

杂晶的取向往往和基体晶粒的取向存在一定的差别,在定向凝固过程中要不断地与基体晶粒竞争淘汰。本工作利用生长方向与热流方向存在一定偏离角的籽晶进行单晶的引晶生长,发现在枝晶方向与坩埚壁偏离的地方,所产生的过冷度会非常明显,是杂晶容易获得生长的区域<sup>[41]</sup>。何国<sup>[42,43]</sup>和 Zhou<sup>[44,45]</sup>等对不同取向晶粒间的竞争生长进行了研究,发现了晶体取向在晶粒生长中的作用;作者在考察不同取向晶粒的竞争淘汰机制时,发现晶粒间的竞争淘汰主要取决于晶粒间枝晶的相对位向关系;同时抽拉速率的增大会导致晶粒的淘汰速率加快,其中胞晶界面状态下两晶粒的淘汰速率最慢。晶体取向在晶粒淘汰中有重要作用,但是杂晶在单晶中的形成和生长淘汰是一个复杂的过程,目前大多工作只能通过金相观察其生长过程,对其

淘汰机理还不是很清楚,尚需进一步的研究。

## 6 结束语

从单晶高温合金的出现和应用开始,围绕其缺陷控制开展了不断的研究,对于凝固缺陷出现的机理、控制措施已有了显著成果。随着先进高温合金的高合金化以及叶片结构的复杂化和大型化,凝固缺陷仍是严重影响叶片冶金质量和服役性能的主要因素,因此凝固缺陷的控制还是当前高温合金研究的一个重点。目前采取定向凝固温度梯度的提高,合金成分的优化设计,铸件与模壳结构合理构造等对凝固缺陷控制的强有力措施。但由于单晶高温合金叶片的凝固成形是多物理场作用下的多元多相体系的非平衡相变,目前尚未建立相对完整的理论体系,人们对各种缺陷及其相互间的关系还缺乏系统深入的认识,因此需要对高温合金的设计和制备中的突出问题进行进一步的研究,推动单晶高温合金成分设计的发展,建立单晶高温合金叶片精确凝固成形理论模型和控制方法,以期进一步提高高温合金的性能和制备率。

### 参考文献

- [1] 胡壮麒,刘丽荣,金涛. 镍基单晶高温合金的发展[J]. 航空发动机,2005,31(3):1-7.
- [2] 傅恒志,郭景杰,刘林,等. 先进材料定向凝固[M]. 北京: 科学出版社,2008.
- [3] 黄乾尧,李汉康. 高温合金[M]. 北京:冶金工业出版社,2000.
- [4] ELLIOTT A J, TIN S, KING W T, et al. Directional solidification of large superalloy castings with radiation and liquid metal cooling: a comparative assessment[J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 2004, 35 (10): 3221-3231.
- [5] ZHANG J, LOU L H. Directional solidification assisted by liquid metal cooling[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2007, 23(3): 289-300.
- [6] TIEN J K, CAULFIELD T. Superalloys, Supercomposites and Superceramics[M]. Boston: Academic Press, 1989.
- [7] REED R C. The Superalloys: Fundamental and Application[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [8] WHITESELL H S, OVERFELD R A. Influence of solidification variables on the microstructure, macrosegregation, and porosity of directionally solidified Mar-M247[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 318(1-2): 264-276.
- [9] 冯广召,沈军,邹敏佳,等. 抽拉速率对高温合金 DZ125 定向凝固中缩松的影响[J]. 铸造,2009, 58(5):427-430.
- [10] WHITESELL H S. Influence of solidification variables on the cast microstructure and porosity in directionally solidified Mar-M247[D]. Auburn: Auburn University, 2002.
- [11] LECOMTE-BECKERS J. Study of microporosity formation in nickel-base superalloys[J]. Metallurgical Transitions A, 1988, 19: 2341-2348.
- [12] CHEN Q Z, KONG Y H, JONES C N, et al. Porosity reduction by minor addition in RR2086 superalloy[J]. Scripta Materialia, 2004, 51(2): 155-160.
- [13] AL-JARBA K A, FUCHS G E. Effect of carbon additions on the as-cast microstructure and defect formation of a single crystal Ni-based superalloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 373(1-2): 255-267.
- [14] LIU L R, JIN T, ZHAO N R, et al. Effect of carbon additions on the microstructure in a Ni-base single crystal superalloy[J]. Materials Letters, 2004, 58(17-18): 2290-2294.
- [15] CHEN Q Z, KNOWLES D M. Microporosity reduction in modified RR2072 single crystal superalloys[J]. Materials Science and Technology, 2003, 19(4): 447-455.
- [16] POLLOCK T M, MURPHY W H. The breakdown of single-crystal solidification in high refractory nickel-base alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(4): 1081-1094.
- [17] GENEREUX P D, BORG C A. Characterization of freckles in a high strength wrought nickel superalloy[A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000 [C]. Warrendale, PA: TMS, 2000. 19-27.
- [18] TIN S, POLLOCK T M, KING W T. Carbon additions and grain defect formation in high refractory nickel-based single crystal superalloys[A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000[C]. Warrendale, PA: TMS, 2000. 201-210.
- [19] MORIMOTO S, YOSHINARI A, ARAMAKI A. High speed single crystal casting technique[A]. REICHMAN S, DUHL D N, MAURER G, et al. Superalloys 1988 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1988. 325-334.
- [20] POLLOCK T M, MURPHY W H, GOLDMAN E H, et al. Grain defect formation during directional solidification of nickel base single crystals[A]. ANTOLOVICH S D, STUSRUD R W, MACKAY R A, et al. Superalloys 1992[C]. Warrendale, PA: TMS, 1992. 125-134.
- [21] BECJERMANN C, GU J P, BOETTINGER W J. Development of a freckle predictor via Rayleigh number method for single crystal nickel-base superalloy casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31(10): 2545-2557.
- [22] HUNT J D. Cellular and primary dendrite spacings[A]. ARGENT B B. International Conference on Solidification and Casting of Metals [C]. London: The Metals Society, 1979. 3-9.
- [23] KURZ W, FISHER J D. Dendrite growth at the limit of stability: tip radius and spacing[J]. Acta Materialia, 1981, 29(1): 11-20.
- [24] SCHADT R, WAGNER I, PREUHS J, et al. New aspects of freckle formation during single crystal solidification of CMSX-4 [A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000[C]. Warrendale, PA: TMS, 2000. 211-218.
- [25] MATAN N, COX D C, CARTER P, et al. Creep of CMSX4 superalloys single crystal: effects of misorientation and tempera-

- ture[J]. *Acta Materialia*, 1999, 147(5): 1549—1563.
- [26] 李嘉荣, 史振学, 袁海龙, 等. 单晶高温合金 DD6 拉伸性能各向异性[J]. *材料工程*, 2008, (12): 6—10.
- [27] SASS V, GLATZEL U, FELLER-KNIEPEMIER M. Anisotropic creep properties of the nickel-based superalloys CMSX4[J]. *Acta Materialia*, 1996, 44(5): 1967—1977.
- [28] 刘金来. 一种镍基单晶高温合金的拉伸、持久性能及组织演变[D]. 沈阳: 中国科学院金属所, 2002.
- [29] D'SOUZA N, ARDAKANI M G, MCLEAN M, et al. Directional and single-crystal solidification of Ni-base superalloys: Part I. The role of curved isotherms on grain selection[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31(11): 2877—2886.
- [30] ARDAKANI M G, D'SOUZA N, WANGER A. Competitive grain growth and texture evolution during directional solidification of superalloys[A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. *Superalloys 2000*[C]. Warrendale, PA: TMS, 2000. 219—228.
- [31] DURAND-CHARRE M. *The Microstructure of Superalloys* [M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [32] D'SOUZA N, JENNINGS P A, YANG X L, et al. Seeding of single-crystal superalloys-role of constitutional undercooling and primary dendrite orientation on stray-grain nucleation and growth[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2005, 36(5): 657—666.
- [33] CLEMENTS M L, PRICE A R, BELLOWS R. Advanced solidification processing of an industrial gas turbine engine component[J]. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2003, 55(3): 27—33.
- [34] D'SOUZA N, ARDAKANI M G, WAGNER A, et al. Morphological aspects of competitive grain growth during directional solidification of a nickel superalloy, CMSX4[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(3): 481—487.
- [35] MA D, GRAFE U. Microsegregation in directionally solidified dendritic-cellular structure of superalloy CMSX-4[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 270(2): 339—342.
- [36] ZHAO X B, LIU L, ZHANG W G, et al. Segregation behavior of alloying elements in different oriented single crystal nickel based superalloys[J]. *Materials Letters*, 2009, 63(30): 2635—2638.
- [37] RAPPAZ M, GANDIN C A, DESBIOLLES J L, et al. Prediction of grain structure in various solidification processes[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, 27(3): 695—705.
- [38] ESAKA H, SHIONZUKA K, TAMURA M. Analysis of single crystal casting process taking into account the shape of pigtail[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 413—414: 151—155.
- [39] SEO S M, JIM I S, LEE J H, et al. Grain structure and texture evolutions during single crystal casting of the Ni-base superalloys CMSX-4[J]. *Metals and Materials International*, 2009, 15(3): 391—398.
- [40] STANFORD N, DJAKOVIC A, SHOLLOCK BA, et al. Seeding of single crystal superalloys-role of melt-back on casting defects[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(1): 159—163.
- [41] 赵新宝. 高梯度定向凝固单晶高温合金晶体取向研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
- [42] 何国, 李建国, 毛协民, 等. 定向凝固晶粒宏观竞争生长机制的实验研究[J]. *人工晶体学报*, 1995, 24(4): 278—283.
- [43] 傅恒志, 何国, 李建国. 单晶高温合金定向凝固中晶体竞争生长观察[J]. *金属学报*, 1997, 33(12): 1233—1238.
- [44] ZHOU Y Z, VOLEK A, GREEN N R. Mechanism of competitive grain growth in directional solidification of a nickel-base superalloy[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(1): 2631—2637.
- [45] ZHOU Y Z, GREEN N R. Competitive grain growth in directional solidification of a nickel-base superalloy[A]. REED R C, GREEN K A, CARON P, et al. *Superalloys 2008*[C]. Warrendale, PA: TMS, 2008. 317—324.

**基金项目:**国家自然科学基金(50931004, 51101120); 国家 973 项目(2010CB631202, 2011CB610406); 中国博士后科学基金(20100481361, 201104680); 凝固技术国家重点实验室(西北工业大学)博士后基金(09-BZ-2010)

**收稿日期:**2010-11-18; **修订日期:**2011-10-31

**作者简介:**赵新宝(1982—), 男, 博士后, 主要从事高温合金和定向凝固的研究工作, 联系地址: 西北工业大学凝固技术国家重点实验室(710072), E-mail: zhxb001@163.com

## 国内首台中型高精度三辊螺旋轧机试制成功并通过验收

由北京航空材料研究院与国内有关单位联合研制的国内首台中型高精度三辊螺旋轧机试制成功, 并顺利通过验收。

三辊螺旋轧机具有轧制精度高、变形均匀、可无级调辊、设备体积小、生产效率高等优点, 非常适合优质钛合金棒材和其他金属材料棒材的制备。北京航空材料研究院投产使用的中型高精度三辊螺旋轧机(GZ-25-50), 可实现  $\phi 50 \sim \phi 25 \text{ mm}$  金属棒材的精密轧制。与国外设备相比, 该设备采用了多项新技术, 用三台同步电机取代了异步电机, 增加了轧制扭矩实时测量系统和过载保护系统。利用该设备, 已经试制出了不同牌号和不同规格的钛合金棒材。

目前, 北京航空材料研究院正在研发大型三辊螺旋轧机, 进料直径可达  $\phi 120 \text{ mm}$ 。大型三辊螺旋轧机研制成功后, 北京航空材料研究院将建立起一条完整的优质钛合金棒丝材生产线。

(李臻熙 郝孟一)