

单晶叶片大模组制备技术的研究进展

杨振宇¹, 陈昊², 沈滨¹, 杨功¹, 骆宇时¹, 戴圣龙¹

(1. 中国航发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. 空军驻北京地区第六军事代表室, 北京 101300)

摘要: 单晶叶片被誉为“皇冠上的明珠”，其制造技术是国家航空工业的主要标志之一。随着航空航天装备建设需求的提升，单晶叶片的需求量逐年提升，能够显著提高单晶叶片生产效率的大模组技术日益受到研究者和生产单位的重视。首先总结了大模组技术的实现形式及应用前景，之后重点介绍了高速凝固（HRS）工艺下大模组技术面临的主要问题及其应对策略。最后，对我国单晶叶片大模组制备技术的发展进行了总结和展望。

关键词: 单晶叶片；定向凝固；大模组技术；温度场；晶体取向

中图分类号: TG132.3⁺2; TG249.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 01-0001-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0001

航空发动机被誉为现代工业的“皇冠”，是国家综合实力的重要标志之一；而涡轮叶片被誉为“皇冠上的明珠”，是航空发动机中工作条件最恶劣的部件，其制造水平是一个国家航空工业水平的显著标志。为提高航空发动机的性能，涡轮叶片经历了从等轴晶、定向柱晶到单晶的发展历程，目前复杂单晶空心涡轮叶片已成为高推重比航空发动机的核心部件^[1]。

单晶叶片主要通过定向凝固熔模铸造结合选晶或籽晶技术进行生产^[2]。为了提高生产效率，目前工业生产中多采用模组结构一次生产多个叶片^[3-5]，如图1(a)所示。然而，受限于装备和制备技术的发展，目前工业生产单晶叶片所普遍使用的模组结构为单层单排模组结构，即叶片在圆形模组外缘单层排布，这种模组方式单次生产的单晶叶片数量有限。随着航空航天装备建设需求的提升，单晶叶片的需求量逐年提升，传统的单晶叶片模组制备技术无法满足市场需求。为此，单晶叶片的大模组制备技术逐渐进入研究者的视野^[3, 6-7]，该技术通过增加铸件组合数量的方式，可以大幅度降低高温合金叶片的生产周期，具有广阔的应用前景。

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工作。E-mail: xuanshangyiyi@163.com

基金项目:

国家自然科学基金项目(52301064)。

收稿日期:

2025-11-10 收到初稿,
2025-11-30 收到修订稿。

引用格式:

杨振宇, 陈昊, 沈滨, 等. 单晶叶片大模组制备技术的研究进展[J]. 铸造, 2026, 75(1): 1-7.
YANG Zhenyu, CHEN Hao, SHEN Bin, et al. Research progress in the preparation technology of single crystal blades with large pattern assembly[J]. Foundry, 2026, 75(1): 1-7.

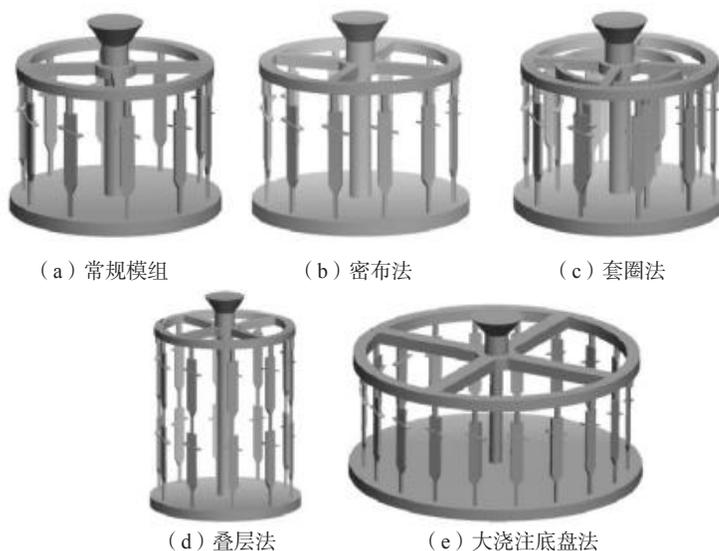


图1 模组结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the pattern assembly structures

1 大模组技术实现形式及应用前景

目前关于大模组制备技术还没有明确的定义或标准,通常是指在现有模组的基础上显著地增加模组中单晶叶片的数量,实现高效制备单晶叶片的技术方法,主要的大模组实现方式有以下几种。

1.1 密布法

该方法的特点是不改变模组的特征结构,而是通过减少常规模组中单晶叶片间的距离,使模组能够容纳更多的叶片,如图1(b)所示。由于现有模组布置叶片时已充分考虑布置空间和散热等,通过密布法增加的叶片数量极为有限,甚至会影响单晶叶片的完整性。因此,这种方法研究和应用的较少。

1.2 套圈法

套圈法是指在模组外缘排布一圈叶片的基础上再安置一圈及以上的叶片,通过内外圈叶片形成的嵌套结构容纳更多的叶片,如图1(c)所示。对于底盘直径较小的模组这种方法增加的叶片数量有限,同时内层叶片凝固过程中的散热条件较差,温度梯度低,难以获得完整的单晶铸件,也会影响外层叶片的散热导致凝固缺陷形成几率增加。中科院金属研究所采用这种模组方法在LMC定向凝固炉上实现了单晶叶片的大模组制备,且单晶叶片的合格率达到60%,仅略低于传统组模的情形下的合格率^[8]。

1.3 叠层法

如图1(d)所示,叠层法在常规模组的叶片上再叠加一层及以上的叶片,通过增加模组的整体高度容纳更多的叶片。该方法能够成倍地增加模组中单晶叶片的数量,同时不需要对炉体进行改造,是一种比较有潜力的大模组形式。目前工业上广泛采用HRS定向凝固炉制备单晶叶片,这种炉体的主要特点是随着凝固高度的增大,固液界面前沿温度梯度降低,横向散热明显^[9]。这样的传热特点可能会导致上层叶片定向凝固过程中缺陷形成几率增加^[10-12]。但是,最近杨文超^[3]等采用ProCAST+CAFE数值模拟的方法研究发现双层叶片模组在高速凝固法定向凝固炉上以100 $\mu\text{m/s}$ 的抽拉速率下也能获得无杂晶缺陷的单晶铸件,显示了此方法在HRS定向凝固炉上也具有较好的应用前景。

1.4 大浇注底盘法

该方法主要是通过增大模组浇注底盘的直径使模组外缘周能够容纳更多的单晶叶片,如图1(e)所示。然而,模组的直径通常是需要与定向凝固炉匹配

的,增大模组直径需要使用更大尺寸的单晶炉,同时也会增加模组上叶片内外侧散热条件的差异,形成严重的横向温度梯度,使“阴影”效应显著,易引起杂晶等凝固缺陷的发生^[3]。中科院金属研究所通过设备创新,在炉体中设置了中心加热和冷却结构以消除大底盘定向凝固及单晶叶片生产过程中的阴影效应,取得了较好的效果^[13]。最近,他们还尝试在大模组中放置大块石墨蓄热的方式解决“阴影”效应,发现能够将叶片内外两侧的冷却速率差异降低,但会引入冷却过程滞后的问题^[14]。西北工业大学采用在大模组中心设置套筒的方式改善了内外侧散热的差异,能够在高抽拉速率下获得具有良好单晶完整性的叶片^[3]。

综合运用以上两种及以上方法实现模组内容纳更多单晶叶片的方法也已在LMC定向凝固工艺中开展研究,如中国科学院金属研究所将套圈法和叠层法结合实现的大模组结构应用于液态金属冷却(LMC)工艺下单晶叶片的制备中,极大地增加模组中叶片的数量,并获得较高的单晶合格率^[8]。

2 HRS大模组定向凝固技术存在的主要问题及应对策略

目前生产单晶叶片的定向凝固技术有高速凝固(HRS)法、液态金属冷却(LMC)法、沸腾床(流态床)法等,而我国生产单晶叶片时以HRS方法为主。为此本文主要介绍HRS工艺下大模组定向凝固技术面临的主要问题及其应对策略。

2.1 长距离定向凝固温度梯度降低

HRS方法在凝固开始的时候,主要通过铸件把热传导到水冷板进行冷却;然而,随着铸件的拉出,其传热效果很快降低,铸件的散热逐渐切换为依靠真空中型壳向水冷炉壳的辐射散热,由此导致凝固前沿的温度梯度随着凝固距离的增加逐渐降低^[15]。Carter等^[16]通过对CMSX-4合金定向凝固过程的实际测试表明,水冷板附近的温度梯度可达200 K/cm以上,而距离25 cm的叶片端部则降为20 K/cm,如图2所示。定向凝固过程中温度梯度降低会导致枝晶组织粗大,显微偏析严重,凝固缺陷形成几率增大,同时增加了高温合金热处理难度及时长^[17-19]。

优化炉体结构也是提高定向凝固过程中温度梯度的重要手段。熊继春等^[20]采用加热炉上下分区加热的方式,把固液界面区域加热到更高的温度,进而提高铸件中的温度梯度。乐献刚等^[21]通过优化隔热挡板的结构,使铸件从加热区进入到冷却区时温度变化

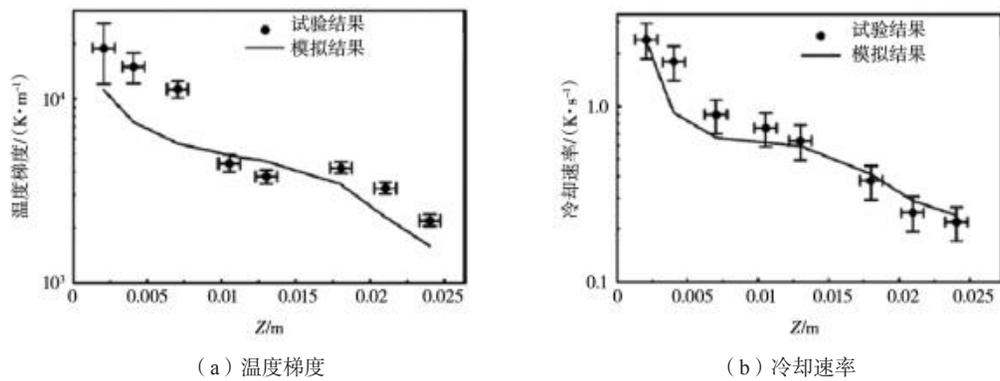


图2 温度梯度和冷却速率随凝固距离的变化

Fig. 2 The functions of temperature gradient and cooling rate depending on the solidification distances

更为剧烈，从而使得定向凝固过程中的温度梯度得到提高。马德新等^[22]通过优化定向凝固炉冷却系统的结构，增大铸件的辐射散热效率，提高了铸件中的温度梯度。赵云松等^[23]将隔热挡板改为柔性纤维板的方式隔绝热区和冷区，通过减少热量损失，达到了提高固液界面前沿温度梯度的效果。赵乃仁等^[24]通过提高型壳保温温度增加了凝固界面前沿的温度梯度，细化了凝固组织。

铸件结构也是影响定向凝固过程中温度梯度的重要因素。杨振宇等^[25]采用ProCAST数值模拟的方法研究了铸件结构对定向凝固温度场的影响，发现简单的圆柱形铸件凝固距离达到一定值后保持稳态，而铸件结构变化前后对等温面形状和温度梯度均具有明显的影响，如图3所示。这提示了通过调整铸件结构可以优化定向凝固过程中的温度场。Szeliga等^[3, 26-27]发现随着抽拉速率的增加稳态区的温度梯度降低，通过在小型模组中设置多组水平放置的内挡板改善型壳结构，可以有效降低固/液相线曲率，提高温度梯度和冷却速率，从而细化组织，降低雀斑和杂晶等缺陷的形成。

2.2 大模组生产面临严重的“阴影”效应问题

HRS定向凝固炉的结构通常是上部为圆筒形的加热室，下部为冷却室，中间用隔热挡板隔开。这种圆筒形加热器向内辐射，对环状方式排列的型壳及里面的金属液体进行加热。这种炉体结构使单晶叶片组模生产过程中叶片面向中柱和炉壁的内外两侧受热及冷却条件严重不对称，导致横向温度场不均匀，越靠近中柱的位置凝固过程中温度下降越快，形成“阴影”效应，促进了杂晶、雀斑等凝固缺陷更易在叶片朝内侧出现^[5, 17]。对比不同底盘直径下模组的凝固过程可以发现小浇注底盘直径模组的等温面斜率明显小于大尺寸模组，表明浇注底盘直径越大，阴影效应越明显^[3]。

抽拉速率是定向凝固过程中最重要的工艺参数之一，对“阴影”效应和凝固缺陷的形成具有显著的影响。D. Szeliga等^[28]发现低抽拉速率下液相线等温面位于隔热挡板以上，等温面为下凹形；随着抽拉速率的提高，液相线等温面逐渐降低，等温面也逐渐转变为上凸形。低抽拉速率下下凹或平的等温面形态有利于

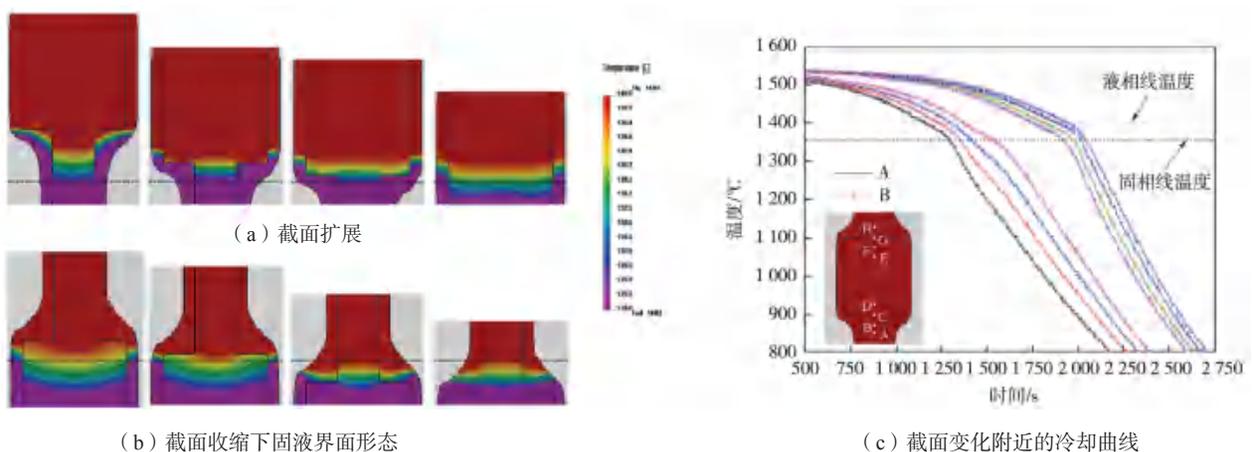


图3 铸件结构对温度场的影响

Fig. 3 The functions of temperature fields depending on the casting structures

降低凝固缺陷的形成，但会严重降低单晶叶片的生产效率。李建国等^[29]通过实时调整定向凝固过程中的温度梯度，改善了定向凝固过程中的温度场，实现了凝固界面平直化，在保证整体抽拉速率的前提下降低了杂晶缺陷的形成。

铸件结构对“阴影”效果的影响同样十分显著。Szeliga等^[26]通过联合使用型壳内挡板与改进的更加与型壳贴合的隔热挡板提高了单晶叶片定向凝固过程中的

温度梯度并削弱了“阴影”效应，如图4所示，细化了定向凝固组织，同时减少了雀斑、小角度晶界的形成倾向。最近，中科院金属研究所通过在模組上安置仿形隔热挡板的方式降低了定向凝固过程热区与冷区的热交换，有效抑制漏热现象，提高了固液界面前沿的温度梯度，并有效抑制了定向凝固过程中温度场不均匀和“阴影”效应^[30]。

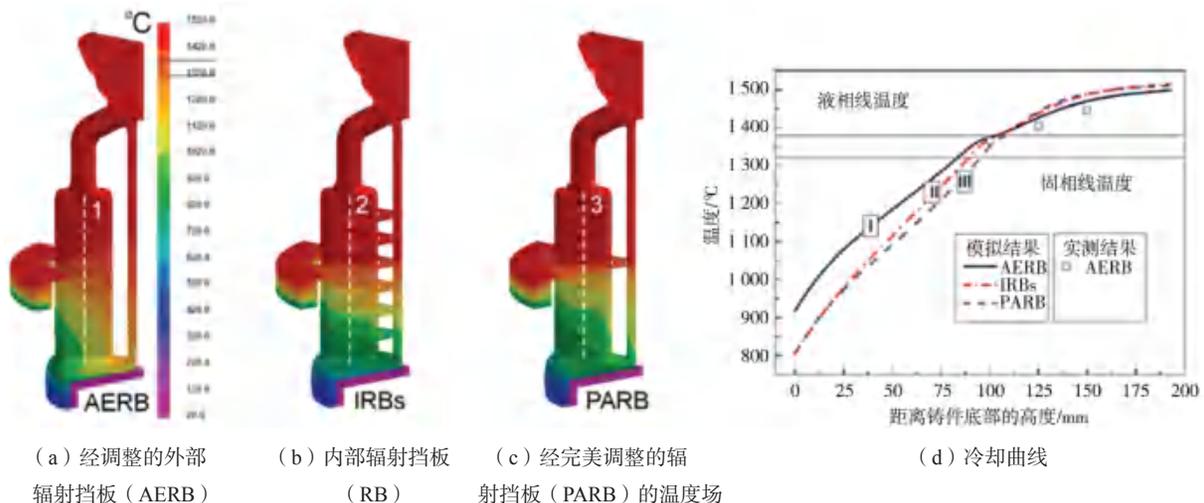


图4 使用改进的内外挡板后温度场和冷却曲线模拟结果

Fig. 4 Simulation results of temperature fields and cooling curves with improved inner/outer baffles

2.3 定向凝固晶体取向偏离问题

定向凝固过程中晶体取向偏差是指枝晶在凝固过程中受到某些因素的影响而发生变形导致偏离原始取向并在固相中保留下来，引起晶体取向改变的现象。Bellet等^[31]使用 γ 射线衍射和白光X射线形貌技术研究凝固界面前沿温度梯度对单晶涡轮叶片组织影响时发现了马赛克组织 (Mosaic structure)，表明定向镍基单晶高温合金定向凝固过程中会发生晶体取向偏离问题，并不是完美的单晶体。Darwin发现^[32]，马赛克组织是由相互之间略有取向偏差的包含一个或多个树枝晶的亚结构结晶区组成，被小角度晶界 (LAGB) 分隔开来^[33-34]。这种马赛克现象表明定向凝固过程中发生了枝晶取向偏差的现象，会严重影响合金的力学性能^[35]。

叠层法增加了单晶叶片制备过程中的凝固距离，会导致晶体生长过程中的取向偏离引起的小角度晶界问题更加严重。Newell^[36]和Xiao^[37]等研究表明枝晶生长过程中晶体取向偏差具有累积效应，随着凝固距离的增加晶体取向偏差逐渐增大。Chen等^[38]发现多平台复杂铸件生长过程中平台处晶体取向持续变化。Hu等^[39]的研究表明高代次镍基单晶高温合金晶体取向累积效应更加的显著。谢光等^[40]发现随叶片凝固高度的增加，

其横截面枝晶排列的规则程度越来越恶化，叶片上出现的小角度晶界的取向差与产生频率随距离初始凝固位置的高度的增加而显著增加。

目前关于定向凝固过程中晶体取向偏离的形成机制，研究者尚未形成统一结论。Bogdanowicz等^[41]通过对CMSX-4涡轮叶片中马赛克结构的研究指出，凝固过程中的溶质偏析造成枝晶间与枝晶干区域晶格不均匀，进而产生内应力；这种应力通过在固液界面形成大量位错得以释放，最终导致枝晶取向发生偏离。Siredey等^[42]提出，枝晶生长刚刚完成，枝晶温度略低于固相线时， γ' 相的析出会产生显著热应力，从而引起枝晶塑性变形，在糊状区形成枝晶间的取向差，且该取向差随凝固距离增加而逐渐扩大。此外，Ai等^[43]的研究表明，与恒定速率相比，变速抽拉过程会引起更显著的枝晶取向偏离。Aveson等^[44]利用原位X射线成像技术观察凝固过程中的取向变化，发现取向偏差可分为弯曲和扭转两个分量，其中弯曲分量在凝固过程中持续累积，他们认为这源于铸件与型壳收缩系数差异所引发的内应力以及重力的共同影响。在后续关于条纹晶形成机制的研究中，他们进一步提出，试样边缘枝晶因型壳收缩应力而产生的变形可传递至试样

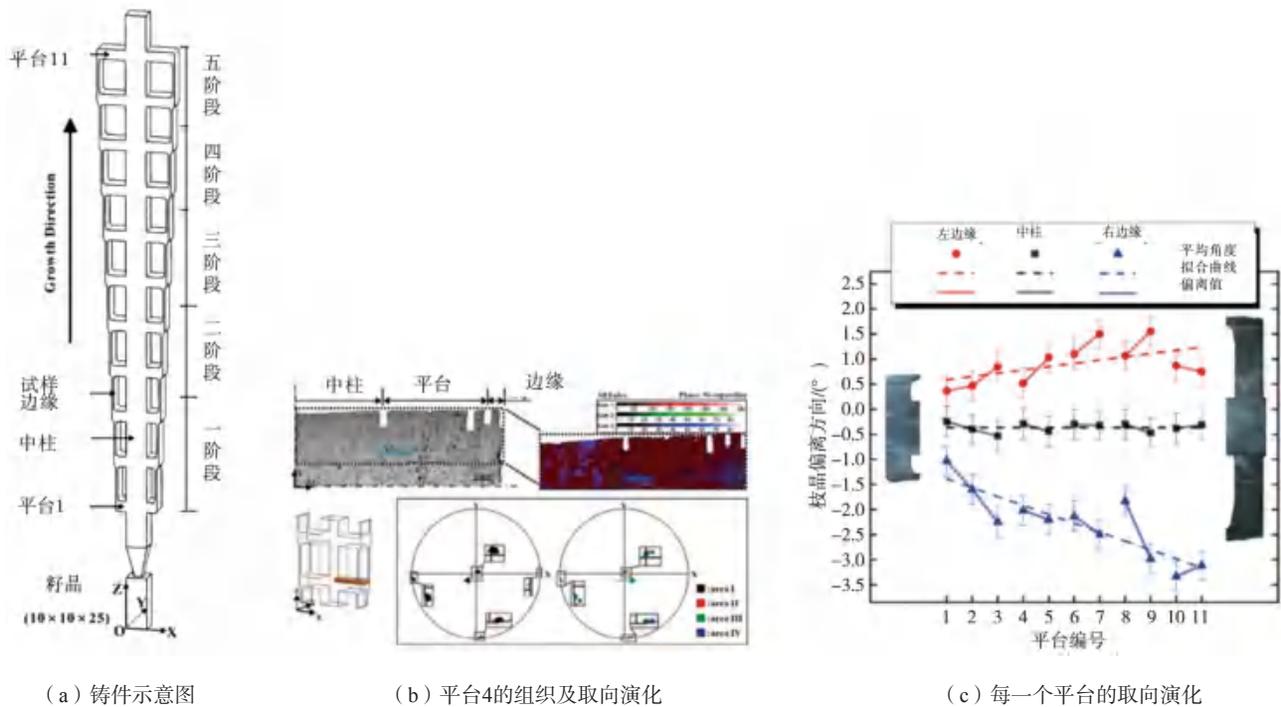


图5 多平台铸件生长过程中取向演化
Fig. 5 Orientation evolution during the growth of a multi-platform casting

内部, 致使内部枝晶也发生变形并产生取向偏差^[45]。Dahle^[46]和Zhang^[47]则发现熔体对流同样会引起枝晶变形, 较强的凝固速率会增强枝晶间的熔体流动, 造成枝晶弯曲甚至破碎; 同时, 枝晶间因熔体流动引起的应力增大, 会促使枝晶干在不对称收缩应力作用下发生扭曲。

3 结语

随着我国航空航天工业的快速发展, 对单晶叶片

的需求也逐年增加, 能够显著提高生产效率的大模组技术日益受到研究者和生产单位的重视。目前, 大模组的实现形式已基本明确, 部分形式已在LMC工艺下得到了验证。然而, 我国目前单晶叶片生产主要是采用HRS工艺, 如何解决此工艺下大模组技术面临的温度梯度、“阴影”效应和取向偏差等问题是最主要的挑战。总结现有的研究成果可以发现通过调控模组结构和工艺参数以优化定向凝固过程中的温度场是解决上述问题的可能途径。

参考文献:

- [1] REED R C. The superalloys: fundamentals and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [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] 杨文超, 撒世鹏, 郝文硕, 等. 不同模组结构高效制备单晶叶片定向凝固过程的温度场及组织模拟 [J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (11): 3847-3856.
- [4] SZELIGA D, GANCARCZYK K, ZIAJA W. The control of solidification of Ni-based superalloy single-crystal blade by mold design modification using inner radiation baffle [J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20 (7): 1700973.
- [5] 马德新. 高温合金叶片单晶凝固技术的新发展 [J]. 金属学报, 2015, 51 (10): 1179-1190.
- [6] 谢君, 周亦青, 李金国, 等. 一种基于数值模拟的大模组单晶叶片杂晶缺陷控制方法: CN202410019656.1 [P]. 2024-05-14.
- [7] 杨金侠, 周亦青, 孙晓峰. 一种低成本的大模组铸造成型方法: CN201711236931.1 [P]. 2019-07-05.
- [8] 申健, 张健, 董加胜, 等. 利用液态金属冷却定向凝固技术进行高效密排单晶叶片的制备方法: CN202011457377.1 [P]. 2024-03-12.
- [9] YANG Z, LIU C, HU S, et al. Influence of platform position on stray grain nucleation in Ni-based single-crystal dummy blade clusters [J]. China Foundry, 2021, 18: 442-449.
- [10] 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.
- [11] 孙德建, 刘林, 黄太文, 等. 镍基单晶高温合金叶片模拟件平台处的枝晶生长和取向演化 [J]. 金属学报, 2019, 55 (5): 619-626.
- [12] 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): 567-573.
- [13] 周亦青, 李金国, 杨彦红, 等. 用于制备单晶高温合金铸件的定向凝固炉及其制备方法: CN202410631639.3 [P]. 2024-08-16.
- [14] 张朝威, 孟祥斌, 李金国, 等. 定向凝固大模组螺旋选晶器温度场演化和晶粒生长 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (1): 7-11.

- [15] 任能, 杨绿伟, 李军, 等. 高温合金定向凝固数值模拟研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (10): 1336–1350.
- [16] CARTER P, COX D, GANDIN C A, et al. Grain selection in single-crystal superalloy castings [M]// Solidification and Casting. CRC Press, 2003.
- [17] 刘林, 张军, 沈军, 等. 高温合金定向凝固技术研究进展 [J]. 中国材料进展, 2010, 29 (7): 1–9+41.
- [18] LI Y, LIU L, HUANG T, et al. Simulation of stray grain formation in Ni-base single crystal turbine blades fabricated by HRS and LMC techniques [J]. China Foundry, 2017, 14 (2): 75–79.
- [19] CLEMENS M L, PRICE A, BELLOWS R S. Advanced solidification processing of an industrial gas turbine engine component [J]. JOM, 2003, 55: 27–31.
- [20] 熊继春, 李嘉荣, 韩梅, 等. 浇注温度对DD6单晶高温合金凝固组织的影响 [J]. 材料工程, 2009 (2): 43–46.
- [21] 乐献刚, 彭志江, 邹建波, 等. 隔热挡板厚度对DD6单晶高温合金凝固组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (3): 309–313.
- [22] 马德新, 赵运兴, 魏剑辉, 等. 定向凝固设备及其冷却环: CN202211421224.0 [P]. 2023-01-31.
- [23] 赵云松, 张迈, 杨振宇, 等. 一种提高单晶凝固温度梯度的柔性隔热挡板: CN202110520517.3 [P]. 2021-08-20.
- [24] 赵乃仁, 李金国, 王志辉, 等. 型壳保温温度对DD98单晶合金组织和性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007 (11): 1967–1970.
- [25] 杨振宇, 陈昊, 胡松松, 等. 单晶高温合金铸件结构对定向凝固过程中温度场的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 334–339.
- [26] SZELIGA D, ZIAJA W, MOTYKA M, et al. Application of inner radiation baffles in the bridgman process for flattening the temperature profile and controlling the columnar grain structure of directionally solidified Ni-Based superalloys [J]. Materials, 2019, 12 (6): 935.
- [27] SZELIGA D. Effect of processing parameters and shape of blade on the solidification of single-crystal CMSX-4 Ni-based superalloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49: 2550–2570.
- [28] SZELIGA D, KUBIAK K, MOTYKA M, et al. Directional solidification of Ni-based superalloy castings: thermal analysis [J]. Vacuum, 2016, 131: 327–342.
- [29] REN N, LI J, WANG B, et al. Design of variable withdrawal rate for superalloy single-crystal blade fabrication [J]. Materials & Design, 2021, 198: 109347.
- [30] 高雪峰, 王亮, 张朝威, 等. 一种用于型壳高效制备单晶叶片的仿形隔热挡板装置: CN202410812005.8 [P]. 2024-10-18.
- [31] BELLET D, BASTIE P, BARUCHEL J. White beam synchrotron topography and gamma-ray diffractometry characterization of the crystalline quality of single-grain superalloys: influence of the solidification conditions [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1993, 26 (4A): A50–A52.
- [32] DARWIN C G. XCI. The reflexion of X-rays from imperfect crystals [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1922, 43 (257): 800–829.
- [33] KLAM H J, BLANK E W. The growth of modern superalloy single crystals [C]// Advanced Materials and Processes--Proceedings of the First European Conference. EUROMAT' 89. 1989: 407–412.
- [34] BRU U, EPISHIN A, LINK T. Local X-ray diffraction analysis of the structure of dendrites in single-crystal nickel-base superalloys [J]. Acta Materialia, 1997, 45 (12): 5223–5231.
- [35] 尹阔, 李龙飞, 赵云松, 等. 小角度晶界对二代镍基单晶高温合金高温蠕变行为的影响 [J]. 航空材料学报, 2025, 45 (5): 112–122.
- [36] NEWELL M, DEVENDRA K, JENNINGS P A, et al. Role of dendrite branching and growth kinetics in the formation of low angle boundaries in Ni-base superalloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 412 (1–2): 307–315.
- [37] XIAO J, JIANG W, HAN D, et al. Evolution of crystallographic orientation and microstructure in the triangular adapter of grain continuator of a 3rd-generation single crystal superalloy casting during directional solidification [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 898: 162782.
- [38] CHEN C, SUN J, DIAO A, et al. On the dendrite deformation and evolution mechanism of Ni-based superalloy during directional solidification [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 891: 161949.
- [39] 胡松松. 第三代镍基单晶高温合金晶体取向及杂晶控制研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- [40] 谢光, 张少华, 郑伟, 等. 大尺寸单晶叶片中小角度晶界的形成与演化 [J]. 金属学报, 2019, 55 (12): 1527–1536.
- [41] BOGDANOWICZ W, ALBRECHT R, SIENIAWSKI J, et al. The subgrain structure in turbine blade roots of CMSX-4 superalloy [J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 401: 418–422.
- [42] SIREDEY N, BOUFOUSSI M B, DENIS S, et al. Dendritic growth and crystalline quality of nickel-base single grains [J]. Journal of Crystal Growth, 1993, 130 (1–2): 132–146.
- [43] AI C, ZHOU J, ZHANG H, et al. Misorientation induced by withdrawal rate transition and its effect on intermediate temperature stress rupture properties of a Ni₃Al based single crystal superalloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 637: 77–83.
- [44] AVESON J W, REINHART G, NGUYEN-THI H, et al. Origins of misorientation defects in single crystal castings: a time resolved in situ

- synchrotron X-ray radiography study [C]// MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2014, 14: 05003.
- [45] AVESON J W, TENNANT P A, FOSS B J, et al. On the origin of sliver defects in single crystal investment castings [J]. Acta Materialia, 2013, 61 (14) : 5162-5171.
- [46] DAHLE A K, ST. JOHN D H, THEVIK H J, et al. Modeling the fluid-flow-induced stress and collapse in a dendritic network [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1999, 30: 287-293.
- [47] ZHANG X, ZHOU Y, HAN Y, et al. Dendritic growth pattern and dendritic network distortion in the platform of a Ni-based superalloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30 (3) : 223-228.

Research Progress in the Preparation Technology of Single Crystal Blades with Large Pattern Assembly

YANG Zhen-yu¹, CHEN Hao², SHEN Bin¹, YANG Gong¹, LUO Yu-shi¹, DAI Sheng-long¹

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing 100095, China; 2. The Sixth Military Representative Office of Air Force Armament Department in Beijing, Beijing 101300, China)

Abstract:

The single crystal blade is praised as the "crown jewel", and its manufacturing technology is a key indicator of a nation's aviation industry. As the demand for aerospace equipment construction continues to rise, the need for single crystal blades has correspondingly increased each year. Consequently, large pattern assembly technology, which has the potential to significantly enhance the production efficiency of single crystal blades, has garnered increasing attention from both researchers and manufacturing entities. In this article, firstly, various forms of implementation and prospective applications of the large pattern assembly technologies are summarized, and then, the primary problems the large pattern assembly technology faced with under the condition of high-speed solidification (HRS) process, as well as coping strategies are emphatically introduced, finally, a summary and a prospect are made for the development of the preparation technology of large pattern assembly applied in the single crystal blades manufacturing in China.

Key words:

single crystal blade; directional solidification; large pattern assembly; temperature field; crystal orientation
