

镍基单晶高温合金晶体取向控制技术研究进展

杨振宇¹ 佟海滨² 胡松松³ 郑素杰¹ 骆宇时¹ 戴圣龙¹

(1. 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. 空军装备部驻北京地区第六军事代表室, 北京 100037; 3. 湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

摘要 镍基单晶高温合金具有显著的各向异性, 精确控制其晶体取向是提高单晶叶片服役性能的重要措施之一。介绍了晶体取向对镍基单晶高温合金力学性能及单晶叶片服役性能的影响, 综述了选晶法和籽晶法制备单晶叶片过程中晶体取向控制的基本原理, 缺陷形成规律和影响因素, 以及工艺优化措施。最后, 总结和展望了单晶叶片晶体取向控制依然存在的问题及发展方向。

关键词 单晶高温合金; 叶片; 晶体取向; 选晶法; 籽晶法

中图分类号 TG113.1

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250472

Progress in Crystal Orientation Control Technology of Ni-based Single Crystal Superalloy

YANG Zhenyu¹, TONG Haibin², HU Songsong³, ZHENG Sujie¹, LUO Yushi¹, DAI Shenglong¹

(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095; 2. The Sixth Military Representative Office of Air Force Armament Department in Beijing, Beijing 100037; 3. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

Abstract: Ni-based single-crystal superalloys exhibit remarkable anisotropy, and it is crucial to precisely control the crystal orientation for enhancing service performance of single-crystal blades. The impact of crystal orientation on mechanical properties of Ni-based single crystal superalloy and the service performance of single crystal blades was introduced. Subsequently, the core principles of controlling crystal orientation, laws of defect formation and influencing factors, as well as key measures for process optimization during preparation process of single-crystal blades by grain selection method and seeding method were comprehensively reviewed. Finally, the current issues on crystal orientation control of single-crystal blades were concluded, and future development trends were prospected.

Key Words: Single Crystal Superalloy, Blades, Crystal Orientation, Grain Selection Method, Seeding Method

镍基单晶高温合金由于具有优异的高温综合性能, 是先进航空发动机和燃气轮机涡轮叶片的首选材料^[1]。由于镍基单晶高温合金具有面心立方结构, 其力学性能呈现显著的各向异性, 晶体取向直接决定叶片的蠕变、疲劳等关键服役性能, 因此在制备过程中必须通过选晶法或籽晶法对晶体取向进行调控。开展单晶叶片晶体取向与服役行为的相关性研究, 优化晶体取向控制工艺, 具有积极的科学意义和显著的工程应用前景。综述了单晶叶片晶体取向对服役性能的影响, 随后对选晶法和籽晶法制备单晶的原理、取向控制存在问题及工艺优化等方面进行了总结, 并对单晶叶片

晶体取向控制研究进行了展望, 以期对航空发动机单晶涡轮叶片的研发与制造提供参考。

1 镍基单晶高温合金各向异性及其对叶片服役性能的影响

镍基单晶高温合金主要由 γ 相基体和方块状 γ' 强化相组成, 不同晶体学方向上 γ' 排序方式及弹性模量存在显著差异, 引起合金性能改变, 如拉伸、蠕变、疲劳、氧化与热腐蚀等性能都与合金的晶体取向密切相关^[1]。其中, 蠕变性能是评价镍基单晶高温合金最基本的强

收稿日期: 2025-12-23; 修订日期: 2026-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52301064)

第一作者: 杨振宇, 男, 1989年出生, 高级工程师, E-mail: xuanshangyiyi@163.com

通信作者: 胡松松, 男, 1990年出生, 副教授, E-mail: songhu@xtu.edu.cn

引用格式: 杨振宇, 佟海滨, 胡松松, 等. 镍基单晶高温合金晶体取向控制技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(5): 650-656.

YANG Z Y, TONG H B, HU S S, et al. Progress in crystal orientation control technology of Ni-based single crystal superalloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 650-656.

度指标。图1为PWA1480单晶高温合金3个典型方向上的蠕变曲线。可以看出,合金的蠕变性能表现出明显的各向异性和温度相关性^[2-3]。在760℃下,合金在<001>方向具有最好的蠕变性能,<011>方向次之,<111>方向则最差^[2]。在高温下 γ' 相会发生粗化,导致合金的蠕变性能对晶体取向的微小偏离不敏感^[3]。研究发现,不同合金在高温下(982℃)蠕变性能的最佳晶体取向也存在差异^[4]。Re、Ru等元素的添加降低了镍基单晶高温合金的层错能,可促进<011>方向上滑移系的开动,也会对合金蠕变性能的各向异性产生影响^[5]。与蠕变性能类似,镍基单晶高温合金的疲劳性能也表现出显著的取向相关性。DALAL R P等^[6]测试了一种单晶模型合金在982℃下的低周疲劳性能,发现<001>取向的疲劳性能最好,而<111>取向最差。疲劳性能的各向异性与晶体学滑移系的激活有关:面心立方结构的镍基合金主要通过{111}<101>滑移系运动,<001>取向时滑移系激活数量少,裂纹扩展阻力大,而<111>取向时多滑移系同时激活,易形成复杂裂纹网络,导致疲劳寿命下降。CERVELLON A等^[7]发现在高应力下<111>取向具有更高的疲劳寿命,表明合金疲劳性能的各向异性也与加载条件有关。断裂韧性方面,合金<001>取向的断裂韧性显著高于<111>取向,这是由于<001>方向上 γ' 相呈规则立方排列,裂纹扩展过程中需要克服 γ/γ' 相界面结合力,而<111>方向上 γ' 相排列不规则,易形成应力集中,导致裂纹快速扩展^[1]。

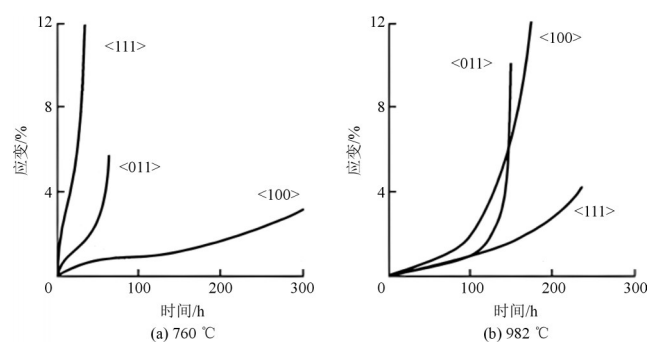


图1 不同温度下PWA1480合金的蠕变性能^[2]

Fig.1 Creep properties of PWA1480 alloy at different temperature^[2]

镍基单晶高温合金的各向异性导致单晶叶片服役能对晶体取向也极为敏感。基于蠕变损伤本构方程,岳珠峰等^[8-9]研究发现,随着一次取向偏离角的增大,单晶涡轮叶片的疲劳寿命分散性变大,15°的一次取向偏差可使疲劳寿命相差6倍,保持叶片轴向为<001>取向时二次取向变化可使蠕变寿命相差则达到了5.5倍。ARAKERE N K等^[10]建立了基于最大剪切应力的疲劳失效准则用来分析晶体取向对单晶叶片高周疲劳寿命

的影响,发现控制单晶叶片一次和二次取向可以显著提高单晶叶片对疲劳裂纹扩展的抗力。高靖云等^[11]采用单晶正交各向异性弹性本构关系研究了不同晶体取向下单晶涡轮叶片的性能,发现优化单晶叶片的晶体取向可以使蠕变寿命提高6倍,低周疲劳寿命提高37倍。因此,精确控制单晶叶片在三维方向上的晶体取向,可以显著提高其服役性能。

2 晶体取向控制方法与优化

2.1 选晶法

2.1.1 选晶法基本原理

选晶法是使用最早的,目前工业生产中最常用的单晶制备方法^[12]。通常在铸件底部设置一个选晶器,熔体首先在选晶器底部大量形核,随后在定向凝固过程中竞争生长,最终在选晶器出口处获得单晶,见图2。根据形状,选晶器可分为螺旋型、倾斜型、转折型和缩颈型等^[13],其中螺旋型选晶器应用最广,研究最充分。

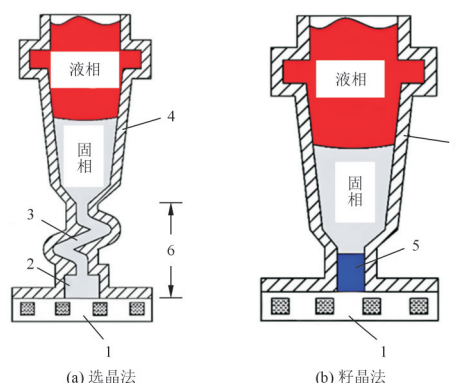


图2 单晶叶片晶体取向控制方法的示意图

Fig.2 Schematic diagram of crystal orientation control for single crystal blades

1. 水冷板 2. 启晶段 3. 选晶段 4. 陶瓷型壳 5. 籽晶 6. 选晶器

螺旋选晶器可以分为启晶段和螺旋选晶段两部分,启晶段的主要作用是优化晶粒取向,获得<001>取向的定向柱晶^[14-15];螺旋选晶段的主要作用是加速晶粒间的竞争淘汰,选出靠近螺旋通道内侧的晶粒进入铸件型腔^[16-17]。研究表明,螺旋选晶段也具有一定的晶体取向优化作用,但最终获得的单晶的晶体取向主要受晶粒在启晶段内的竞争生长过程控制^[18]。由于选晶机理的限制,该方法制备单晶叶片时只能限定一次取向(<001>方向与叶片轴向的夹角)在一定范围内,而二次取向(<010>或<100>方向与叶盆法向的夹角)则随机分布^[19]。

2.1.2 选晶法工艺优化

为了提高对单晶叶片晶体取向的控制水平,研究

者从晶粒竞争生长机制^[20-21]、选晶器结构优化^[19,22]及工艺参数^[22]对选晶效果的影响等多个角度开展了相关研究,采用优化启晶段结构与尺寸^[23-24]、选取合适的浇注温度^[14]和抽拉速率^[25]等措施缩小选晶段入口处柱状晶取向偏离范围,优化选晶法对单晶一次取向的控制。有研究表明,通过调整选晶段结构与尺寸也能够一定程度上优化晶粒取向,获得一次取向偏离角更小的单晶铸件^[18]。

为了进一步改善选晶法对单晶取向的控制效果,杨振宇等^[26]提出采用柱状晶辅助选晶的方法制备镍基单晶高温合金,获得的单晶起源于柱状晶中的某一个晶粒;通过选取取向偏离度较小的柱状晶制备单晶,能够显著优化单晶的晶体取向。为了改善选晶法无法控制二次取向分布的缺点,郑启等^[27]将启晶段设置为矩形或者类矩形的结构,从而在启晶段引入附加的定向横向热场,结合晶体生长择优取向的特征,控制单晶的二次取向。YANG W C等^[28]设计了一种短籽晶辅助选晶的方法制备单晶,其原理是沿籽晶外延生长的晶粒在选晶器内与其他晶粒竞争生长中胜出,进而通过控制短籽晶的晶体取向实现精确调控单晶铸件的二次取向,见图3。

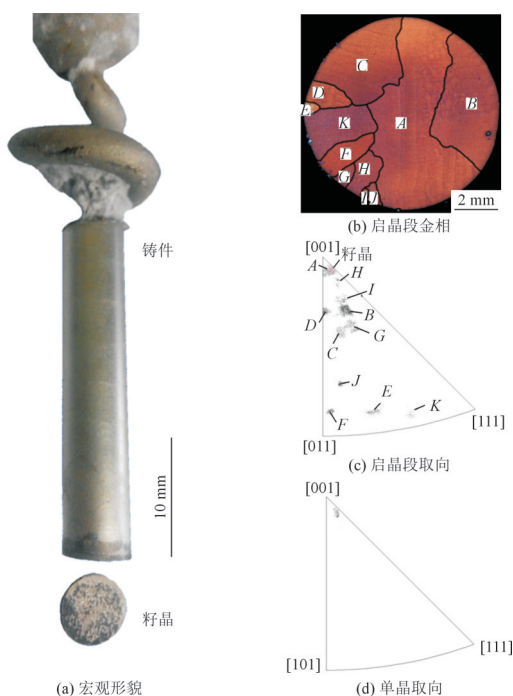


图3 单晶叶片晶体取向控制方法的示意图^[28]

Fig.3 Schematic diagram of crystal orientation control for single crystal blades^[28]

选晶法的核心优势在于工艺成熟、生产成本相对较低,适用于大规模工业生产,且通过结构优化和辅助技术改进,可将一次取向偏离角控制在较小范围。然而,该方法本质上是通过几何竞争实现晶粒筛选,难以

主动控制二次取向,目前虽然提出了一些改进措施,但也增加了该方法的工艺难度,且取向控制精度受选晶器结构、工艺参数等多种因素影响,稳定性有待提升。

2.2 籽晶法

2.2.1 籽晶法基本原理

籽晶法是在型壳底部预先放置一个具有特定取向、与叶片材料相同或相近的单晶作为籽晶,加热保温使籽晶上端熔化,浇注合金液后以一定速率把型壳抽拉出炉体使熔体在未熔籽晶上外延生长获得与籽晶晶体学方向一致的单晶,原理见图2。为了制备出特定取向的单晶铸件,通常是将具有相应一次取向的籽晶竖直放入型壳的底部,并沿籽晶轴向旋转使其二次取向与目标取向一致。李树索等^[29]通过调控铸件与竖直籽晶在型壳内的三维位向关系,使用 $\langle 001 \rangle$ 取向籽晶制备出具有成分分布更均匀、力学性能更优的 $\langle 011 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 取向的单晶铸件,见图4。胡松松等^[30]、杨帅等^[31]和赵金乾等^[32]分别通过调控 $\langle 001 \rangle$ 取向籽晶偏离铸件轴向的角度,制备了任意取向的单晶铸件。

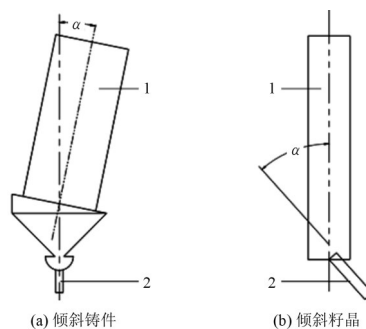


图4 调控铸件与籽晶位向关系控制晶体取向示意图^[29]

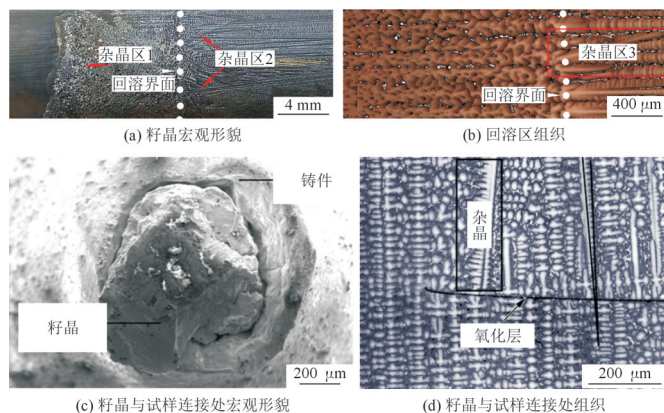
Fig.4 Schematic diagram of controlling crystal orientation by regulating relationship between casting and seeding^[29]

1. 铸件 2. 籽晶

2.2.2 凝固缺陷的形成与影响因素

精确控制单晶铸件的三维晶体取向是籽晶法的显著优势^[33]。然而,杂晶等凝固缺陷极易在定向凝固初期出现,导致单晶制备失败,严重限制了此方法在工业生产中的应用^[34-35]。根据形成位置可以将凝固缺陷分为籽晶回溶界面区缺陷^[36-38]以及籽晶与浇注熔体界面处缺陷^[26,39-40],见图5。后者主要是由于单晶制备过程中籽晶氧化引起的^[40],关于其形成机制与控制技术的研究尚不充分;前者是影响单晶制备成功率的关键因素,受到研究者的广泛关注。根据凝固缺陷形成机制的差异,可将该区域缺陷进一步分为3类。

(1) 激冷形核 受重力或熔体冲刷等因素的影响,熔融合金回流到未熔籽晶与型壳的过冷间隙,在籽晶边缘回溶界面以下形成杂晶等凝固缺陷^[37]。因此,籽

图5 籽晶段凝固缺陷^[40-41]Fig.5 Solidification defects in seeding segment^[40-41]

晶与型壳间隙的大小是影响该类缺陷形成的主要因素。HU S S等^[41]发现该间隙值较大(0.896 mm)时,此类缺陷能够在随后的定向凝固过程中进一步与基体晶粒发生竞争生长;减小间隙值(0.186 mm)可以使此类缺陷被限制在籽晶边缘糊状区以下;进一步减小间隙值则可导致籽晶边缘形成一定厚度的取向偏离层。YANG W C等^[28]发现合金液浇注到未熔短籽晶顶部时,也会受激冷作用的影响,在籽晶顶部快速形核而形成杂晶缺陷。因此,提高籽晶长度也是抑制激冷形核类缺陷的重要措施之一。

(2)枝晶熔断或变形 籽晶回溶过程中,二次枝晶根部首先溶解,导致熔断枝晶的出现^[42]。由于密度差异,熔断枝晶会在重力作用下向糊状区下部沉降,避免进一步的溶解。因此,糊状区未完全溶解的熔断枝晶可在随后的定向凝固过程中作为杂晶生长的核心。有研究表明,由于熔体对流导致糊状区未熔一次枝晶干变形可在籽晶内部回溶界面以下形成小角度晶界、杂晶等凝固缺陷^[35,41]。HALLENSLEBEN P等^[38]采用CMSX-4合金进行无浇注过程的重熔定向凝固时发现籽晶回溶区中该类缺陷出现的几率较低。HU S S等^[41]发现减小籽晶原始一次枝晶间距($<201\text{ }\mu\text{m}$)或对其进行固溶处理可以使糊状区组织转变为复杂网状结构,限制该类凝固缺陷的形成。HU S S等^[43]研究籽晶法制备单晶高温合金时发现提高温度梯度($200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)可以有效抑制糊状区的形成,有利于该类缺陷的形成。

(3)异质形核 STANFORD N等^[36,44]发现籽晶边缘回溶界面以上3 mm以内的区域存在大量杂晶,并通过短时保温淬火试验排除了是由于枝晶熔断引起的。STANFORD N等^[36]和YANG X L等^[45]认为初始抽拉阶段固液界面会由上凸界面迅速转变为下凹界面导致籽晶边缘过冷形核,并逐渐被研究者接受。李双明等^[46]研究籽晶初始凝固区组织演化特征时发现,匀速抽拉过程中显微组织经历了平-胞-枝组织转变过程,认

为这是由于导热能力的限制使凝固界面的移动滞后于抽拉速率导致的。HU S S等^[41,47]通过数值模拟发现了凝固界面迁移滞后的现象,定向凝固初期凝固界面形态的改变不足以引起过冷度突变导致杂晶形核,认为杂晶缺陷是由于定向凝固初期Al、Ta等 γ' 形成元素偏聚到籽晶边缘后在粗糙的型壳表面异质形核形成的,并通过试验证明降低型壳表面粗糙度可以抑制此区域杂晶的形成。邓阳丕等^[48]还发现籽晶表面因加工变形在预热过程中产生的再结晶晶粒可成为籽晶回溶区杂晶形成与长大的起源,因此减少籽晶表面机械损伤是抑制杂晶的关键。

2.2.3 籽晶法工艺优化

(1)籽晶选晶法 凝固缺陷一旦形成将在抽拉阶段与基体竞争生长,因此有研究者提出采用控制竞争生长过程的方法抑制缺陷的长大,从而提高制备单晶叶片的成功率^[36-37]。主要是在籽晶段和叶片型腔之间设置一个选晶结构,结合籽晶法和选晶法的共同优势制备单晶是最常用的方法。该工艺已在国内外工业生产单晶叶片过程中广泛使用,但凝固缺陷形成问题未得到根本解决,且存在凝固缺陷在选晶过程中胜出进入叶片型腔导致取向控制失败的风险。

(2)设置热阻材料或外加强静磁场 D'SOUZA N等^[49]提出,侧向散热引起的回溶界面形态突变会导致籽晶边缘产生较大过冷,进而促使杂晶形核,是引起回溶区杂晶形成的主要原因。基于此,XUAN W D等^[50]通过在籽晶回溶区附近的型壳上增加热阻材料,使回溶界面由凸形转变为平界面,从而减小了初始抽拉阶段籽晶边缘温度场的变化速率,降低了杂晶形核率。随后,该团队又提出采用外加强静磁场的方法^[51],通过提高回溶区的温度梯度、降低籽晶边缘固液界面的斜率,进一步抑制了杂晶的形成。然而,这两种方法均存在局限:设置热阻材料会削弱型壳的散热性能,导致定向凝固温度梯度下降,而在单晶叶片制备过程中施加外加强静磁场,实际操作也面临较大困难。苏震奇等^[52]发现磁场使得定向凝固籽晶重溶区界面上出现大取向杂晶,且磁场强度增大还会增加杂晶数量。

(3)使用异质籽晶 MA D X等^[53]研究表明,不同成分的高温合金在型壳表面形核时具有不同的临界形核过冷度,这直接影响了杂晶等凝固缺陷的形成倾向。为优化定向凝固初期的组织演化并抑制缺陷, FORD D A等^[54]率先提出采用Ni-W或Ni-Ta合金作为籽晶来制备单晶叶片。郭静等^[55]使用低偏析的Ni-W单晶籽晶制备高温合金,发现在凝固初期回溶界面附近形成了一个无微观偏析的融合区。与传统籽晶法

相比,该方法可以在定向凝固过程中在融合区内形成平界面凝固特征,有效避免枝晶溶断及因成分过冷导致的杂晶形核。QIN J R等^[56]进一步分析了不同凝固条件下回溶界面的组织演化规律与机制,指出提高温度梯度可以抑制回溶界面以上枝晶组织的形成,避免二次枝晶变形或溶断,从而提高单晶制备的成功率,见图6。此外,谢信亮等^[57]发现使用纯Ni作为籽晶时,纯Ni与高温合金的界面处会出现晶体取向的小角度偏转,推测这是由于成分突变引起 γ 相晶格常数变化导致。

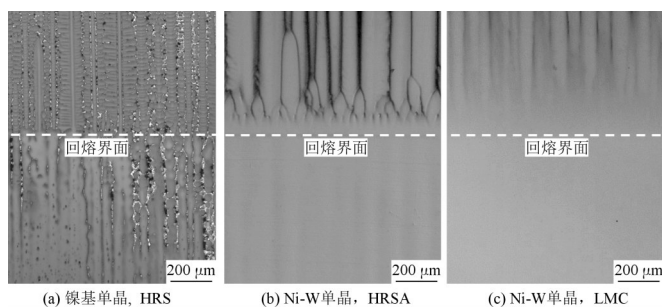


图6 合金类型对籽晶回熔区显微组织的影响^[56]

Fig.6 Effects of alloy type on microstructure of seeding remelting zone^[56]

(4)其他方法 韩雅芳等^[58]提出一种将籽晶预埋到型壳内制备单晶叶片的方法,能够消除籽晶与型壳间的间隙,结合籽晶选晶技术,有助于提高单晶制备的成功率。此外,变速抽拉^[59]也被视为一种有效降低回溶区杂晶形核几率的工艺,其特点是在初始阶段逐渐提高抽拉速率直至达到常规水平。HU S S等^[41]通过预置刚玉管、控制型壳与籽晶间隙,并结合调控籽晶原始组织,有效抑制了初始抽拉阶段凝固缺陷的形成,同时实现了籽晶的重复利用。

籽晶法的核心优势是可精确调控三维晶体取向,尤其适用于对取向要求严苛的新型复杂空心叶片,且通过工艺优化可有效抑制凝固缺陷,提高取向控制精度。但籽晶法定向凝固初期缺陷形成机制复杂,受籽晶特性、工艺参数、型壳质量等多种因素影响,工艺稳定性有待进一步提升;异质籽晶等新型技术的成本较高,且部分工艺(如外加强静磁场)难以规模化应用;籽晶的抗氧化处理、精确对中等配套技术仍需完善。

3 总结与展望

镍基单晶高温合金作为航空发动机与燃气轮机涡轮叶片的关键材料,其晶体取向的精确控制是提升叶片服役性能与可靠性的核心环节。先综述了晶体取向对合金力学性能及叶片服役行为的影响,并深入分析了选晶法与籽晶法在单晶制备中的原理、缺陷形成机

制与工艺优化路径。

首先,镍基单晶高温合金的强烈各向异性决定了叶片性能对晶体取向极为敏感。优化取向可显著提升蠕变、疲劳等关键性能,尤其当一次取向接近 $\langle 001 \rangle$ 方向时,叶片寿命可提升数倍至数十倍。因此,实现晶体取向的精准调控不仅是材料科学的理论课题,更是工程应用中的迫切需求。

其次,选晶法作为目前工业主流工艺,具有工艺成熟、成本相对较低的特点,但其本质是通过几何竞争实现晶粒筛选,因而只能在一定范围内约束一次取向,难以主动控制二次取向。近年来通过优化选晶器结构、引入横向热场、结合柱状晶或短籽晶辅助等手段,在一定程度上提升了一次取向的控制精度,并为二次取向的调控提供了新思路,但仍未从根本上解决精确控制晶体取向的问题。

籽晶法则在三维取向精确控制方面具备显著优势,尤其适用于对取向要求极为严苛的新型复杂空心叶片。然而,该方法在实际应用中仍面临一系列挑战:凝固初期易在籽晶回溶界面区域形成杂晶、枝晶溶断、异质形核等缺陷;籽晶氧化、界面热扰动、型壳粗糙度等因素均可能诱发缺陷形成,导致单晶制备失败。目前,通过优化籽晶结构、采用异质籽晶、施加外场、改进抽拉工艺等途径,已在一定程度上抑制了缺陷形成,提升了工艺稳定性,但距大规模工程化应用仍有距离。

随着航空发动机向更高推重比、更高效率发展,涡轮叶片结构更趋复杂、服役环境更加严苛,对晶体取向的控制精度与稳定性提出了更高要求。未来研究可在以下方向深入展开。

(1)选晶法的智能优化与定向设计 结合机器学习与仿真模拟,建立选晶器结构-工艺参数-取向输出的量化关系模型,实现选晶器的智能化设计与工艺窗口的快速优化,进一步缩窄一次取向分散性,并探索具有主动二次取向控制功能的新型选晶构型。

(2)籽晶法缺陷形成机制的跨尺度研究 从原子尺度的界面反应、微观组织的演化动力学,到宏观尺度的传热与流动耦合,开展跨尺度综合研究,彻底厘清各类凝固缺陷的形核与长大机制。重点突破籽晶/型壳界面行为、熔体局部过冷控制,以及初始凝固界面稳定性等关键科学问题。

(3)低成本、高可靠性籽晶技术开发 致力于开发抗氧化、可重复使用、与母合金相容性好的新型籽晶材料。同时,发展籽晶表面处理、精确对中与间隙控制、高效预热等配套技术,简化工艺流程,降低生产成本,推动籽晶法从实验室走向规模化工业应用。

(4)多场耦合下凝固控制技术探索 研究热场、磁

场、电场等多物理场耦合作用对定向凝固过程晶体生长与缺陷抑制的影响规律,探索利用复合外场实现界面形态主动调控、抑制杂晶形核的新方法,为高取向精度单晶的制备提供新途径。

参 考 文 献

- [1] 郭建亭. 高温合金材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] REED R C. The Superalloys Fundamentals and Applications[M]. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [3] 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.
- [4] TIEN J K, CAULFIELD T. Superalloy, Supercomposites and Superceramics[M]. Boston: Academic Press, 1989.
- [5] XIA W S, ZHAO X B, YUE L, et al. Microstructural evolution and creep mechanisms in Ni-based single crystal superalloys: A review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 819: 152 954.
- [6] DALAL R P, THOMAS C R, DARDI L E. The Effect of Crystallographic Orientation on the Physical and Mechanical Properties of an Investment Cast Single Crystal Nickel-Base Superalloy [C]// Superalloys, Pennsylvania, 1984.
- [7] CERVELLON A, TORRBET C J, POLLOCK T M. Crack initiation anisotropy of Ni-based SX superalloys in the very high cycle fatigue regime [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A815, 141 920.
- [8] 岳珠峰, 吕震宙, 杨治国, 等. 晶体取向的偏差和随机性对镍基单晶叶片强度与蠕变寿命的影响[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 477-480.
- [9] 岳珠峰, 韩宏宪, 吕震宙. 模拟镍基单晶合金复杂应力状态试样型式分析设计[J]. 航空材料学报, 1997(2): 45-49.
- [10] ARAKERE N K, SWANSON G. Effect of crystal orientation on fatigue failure of single crystal nickel base turbine blade superalloys [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1): 161-176.
- [11] 高靖云, 方磊, 张成成, 等. 单晶涡轮叶片三维晶体取向相关性分析及优化[J]. 航空动力学报, 2016(2): 289-298.
- [12] PEARCEY B J. Single crystal metallic part: US3494709[P]. 1970-02-17.
- [13] HIGGINBOTHAM G J S. From research to cost-effective directional solidification and single-crystal production-An integrated approach [J]. Materials Science and Technology, 1986, 2(5): 442-460.
- [14] GAO S F, LIU L, WANG N, et al. Grain selection during casting Ni-base, single-crystal superalloys with spiral grain selector [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2012, A43: 3 767-3 775.
- [15] ZHU X T, YANG Q, WANG F, et al. Grain orientation optimization of two-dimensional grain selector during directional solidification of ni-based superalloys[J]. Materials, 2020, 13: 1 121.
- [16] DAI H J, GEBELIN J C, D'SOUZA N, et al. Effect of spiral shape on grain selection during casting of single crystal turbine blades [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2009, 22(1-4): 54-57.
- [17] SEO S M, KIM I S, JO C Y, et al. Grain structure prediction of Ni-base superalloy castings using the cellular automaton-finite element method[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A449: 713-716.
- [18] MENG X B, LU Q, LI J G, et al. Modes of grain selection in spiral selector during directional solidification of nickel-base superalloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(3): 214-220.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] ZHANG X L, LIU Z H, LIU G Q, et al. A new mechanism of grain selection in spiral selector: The competitive growth between the entrance grains [J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104 840.
- [22] SADEGHI F, KERMANPUR A, NOROUZI E. Optimizing grain selection design in the single-crystal solidification of Ni-based superalloys [J]. Crystal Research and Technology, 2018, 53(12): 1 800 108.
- [23] ZHANG H, ZHU X T, WANG F, et al. 2D selector simulation studies on grain selection for single crystal superalloy of CM247LC [J]. Materials, 2019, 12: 3 829.
- [24] ZONG X W, WANG L, LIU W J, et al. Effect of withdrawal rate of spiral selector on grain selection behavior and grain orientation evolution[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(7): 2 366-2 374.
- [25] DAI H J, DONG H B, D'SOUZA, et al. Grain selection in spiral selectors during investment casting of single-crystal components: Part II. Numerical modeling[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2011, A42: 3 439-3 446.
- [26] 杨振宇, 陈昊, 曹金华, 等. 一种柱状晶辅助选晶制备镍基单晶高温合金的方法[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(3): 173-176, 196.
- [27] 郑启, 孙晓峰, 侯桂臣, 等. 一种金属单晶横向晶体取向的控制方法: CN021325316[P]. 2002-07-04.
- [28] YANG W C, HU S S, HUO M, et al. Orientation controlling of Ni-based single-crystal superalloy by a novel method: Grain selection assisted by un-melted reused seed [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1): 1 347-1 352.
- [29] 李树索, 胡斌, 裴延玲, 等. 一种制备[011]或[111]取向单晶高温合金的模壳及方法: CN202011457073.5[P]. 2022-01-28.
- [30] 胡松松, 刘海淇, 贺迟, 等. 采用带孔冷却板辅助(001)取向籽晶制备单晶高温合金的方法: CN202210211477.9[P]. 2023-05-12.
- [31] 杨帅, 鲍俊, 杨晰琼, 等. 倾斜籽晶法控制镍基单晶高温合金晶体取向研究[J]. 材料工程, 2025, 53(3): 63-69.
- [32] 赵金乾, 李嘉荣, 史振学. 一种制备单晶高温合金试棒的方法: CN202210244049.6[P]. 2024-02-09.
- [33] 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.
- [34] 张健, 王莉, 谢光, 等. 镍基单晶高温合金的研发进展[J]. 金属学报, 2023, 59(9): 1 109-1 124.

- [35] 霍苗, 赵惠. 籽晶法制备高温合金单晶叶片的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(17): 219-224.
- [36] STANFORD N, DJAKOVIC A, SHOLLOCK B, et al. Defect grains in the melt-back region of CMSX-4 single crystal seeds[C]// Superalloys, Pennsylvania, 2004.
- [37] LI Y F, LIU L, HUANG T W, et al. The process analysis of seeding-grain selection and its effect on stray grain and orientation control[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 657: 341-347.
- [38] HALLENSLEBEN P, SCHAAR H, THOME P, et al. On the evolution of cast microstructures during processing of single crystal Ni-base superalloys using a Bridgman seed technique[J]. Materials & Design, 2017, 128: 98-111.
- [39] 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): 5 162-5 171.
- [40] 杨帅, 郑素杰, 陈昊. 镍基单晶高温合金籽晶氧化对凝固过程的影响[J]. 铸造, 2021, 70(7): 819-822.
- [41] HU S S, YANG W C, LI Z R, et al. Formation mechanisms and control method for stray grains at melt-back region of Ni-based single crystal seed[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2021, 31(4): 624-632.
- [42] POLLOCK T M, MURPHY W H. The breakdown of single-crystal solidification in high refractory nickel-base alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, A27: 1 081-1 094.
- [43] 胡松松, 刘晓功, 张辉, 等. 温度梯度对籽晶法制备镍基单晶高温合金 DD6 凝固组织的影响[J]. 铸造, 2022, 71(4): 415-419.
- [44] STANFORD N, DJAKOVIC A, SHOLLOCK B A, et al. Seeding of single crystal superalloys—Role of seed melt-back on casting defects[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(1): 159-163.
- [45] YANG X L, NESS D, LEE P D, et al. Simulation of stray grain formation during single crystal seed melt-back and initial withdrawal in the Ni-base superalloy CMSX4[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A413: 571-577.
- [46] 李双明, 杜炜, 张军, 等. CMSX-2 单晶高温合金高梯度定向凝固下过渡区的组织演化特征[J]. 金属学报, 2002(11): 1 195-1 198.
- [47] HU S S, ZHAO Y S, BAI W M, et al. Temperature field evolution of seeding during directional solidification of single-crystal Ni-based superalloy castings[J]. Metals, 2022, 12(5): 817.
- [48] 邓阳丕, 马德新, 赵运兴, 等. 单晶高温合金 DD419 籽晶引晶过程中杂晶形成机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(7): 2 042-2 048.
- [49] 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, 2005, B36: 657-666.
- [50] XUAN W D, LAN J, LIU H, et al. A method of stray grain suppression for single-crystal superalloy during seed melt-back[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2016, A47: 5 691-5 697.
- [51] XUAN W D, LIU H, LI C J, et al. Effect of a high magnetic field on microstructures of Ni-Based single crystal superalloy during seed melt-back[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2016, B47: 828-833.
- [52] 苏震奇, 张丛江, 袁笑坦, 等. 纵向静磁场下单晶高温合金定向凝固籽晶回溶界面杂晶的形成与演化[J]. 金属学报, 2023, 59(12): 1 568-1 580.
- [53] MA D X, ZHAO Y X, XU W T, et al. Comparative investigation of the undercooling capacity and single-crystal castability of some Ni-based superalloys[J]. Crystals, 2022, 13(1): 57.
- [54] FORD D A, HILL A D. Single crystal seed alloy: US. 6740176 [P]. 2004-05-25.
- [55] 郭静, 李金国, 刘纪德, 等. 低偏析异质籽晶制备单晶高温合金的籽晶熔合区形成机制研究[J]. 金属学报, 2018, 54(3): 419-427.
- [56] QIN J R, YANG W C, QU P F, et al. Microstructure on remelting interface of Ni-W heterogeneous seed in preparing Ni-based single crystal superalloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 264-270.
- [57] 谢信亮, 余建波, 玄伟东, 等. 籽晶成分对单晶高温合金定向凝固起始界面形态和取向的影响[J]. 上海金属, 2016, 38(6): 49-53.
- [58] 韩雅芳, 李树索, 蒋立武. 一种 Ni 基单晶高温合金采用籽晶制备的方法: CN200710179683.1 [P]. 2010-02-03.
- [59] 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.

(编辑: 彭瑾)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵, 文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家最新研究成果)



特种铸造及有色合金杂志
(文章动态时刻关注)