

单晶空心叶片内腔再结晶研究现状

王珂¹, 骆宇时¹, 牛书鑫¹, 王玥¹, 司远¹,
杨永康², 周婷婷¹, 仲玉龙¹

(1. 中国航发北京航空材料研究院 高温材料所, 北京 100095;

2. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西西安 710061)

摘要: 针对航空发动机用单晶涡轮空心叶片内腔再结晶问题, 结合未来叶片内腔复杂化趋势, 阐述了单晶空心叶片内腔再结晶的机理与原因, 分析了内腔再结晶相对于外表再结晶的特殊性。从减弱甚至消除塑性应变、控制再结晶的生长以及再结晶产生后的处理三个方面, 概括了近年来解决内腔再结晶问题的方法与研究现状, 并对未来内腔再结晶的研究方向提出了展望。

关键词: 熔模铸造; 单晶空心叶片; 内腔再结晶; 塑性应变; 晶界能

航空发动机的研发与应用直接关系到一个国家的军事以及航空事业的发展, 被誉为飞机的“心脏”。随着先进航空发动机性能的持续提高, 如图1所示^[1], 发动机涡轮前温度以及逐渐逼近甚至超过涡轮叶片用高温合金的承温能力极限。为进一步提高涡轮叶片承温能力, 空心气冷技术成为了其中的关键手段, 叶片的冷却结构由传统的对流、撞击孔、气膜冷却等方式发展到高效发散气冷方式, 冷却效果提高到600℃以上。一方面, 随着航空发动机涡轮叶片冷却技术的不断发展, 空心叶片的内腔结构越来越复杂。另一方面, 随着多种型号叶片研制进度的推进, 叶片内腔再结晶的问题逐渐显露。内腔再结晶这一缺陷对现有单晶空心叶片的综合性能, 特别是内腔质量提出了前所未有的挑战^[2]。

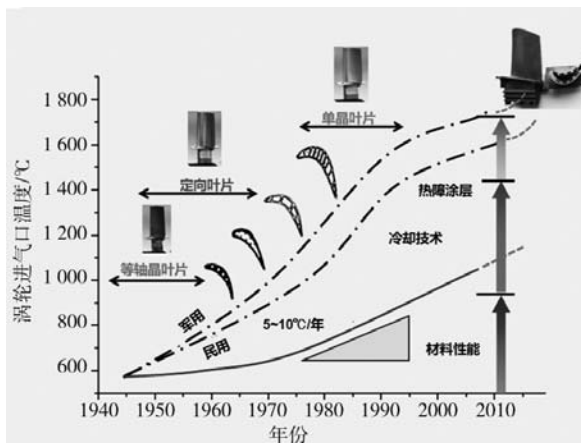


图1 航空发动机涡轮叶片承温能力变化情况

Fig. 1 Variation of temperature bearing capacity of aero-engine turbine blades

由于单晶高温合金中不含有晶界强化元素, 叶片内腔所产生的再结晶晶粒将成为影响单晶高温合金构件性能的重大隐患^[2-6]。单晶镍基高温合金中如果出现再结晶, 裂纹很容易就沿着未强化的晶界进行延伸, 从而直接造成材料的高温持久寿命

作者简介:

王珂(2000-), 男, 硕士生,
主要研究方向为陶瓷型芯
强度性能及服役过程表征。
E-mail: kewang4744@163.
com

通信作者:

牛书鑫, 男, 博士研究生,
高级工程师。E-mail:
m15647441206@163.com

中图分类号: TG113.12

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

04-0409-09

收稿日期:

2024-07-19 收到初稿,

2024-09-14 收到修订稿。

和疲劳稳定性明显降低。当合金表面再结晶层的厚度达到80 μm 时^[7], 试片的中温持久寿命降低到无再结晶合金的10%, 表明再结晶层的厚度对材料的持久性具有显著影响。此外, 这种影响不仅局限于中温环境, 高温下的持久寿命也会受到大幅影响。这一发现为我们提供了关于如何优化合金性能的重要线索。Khan等人的研究进一步指出, 再结晶层的相对厚度直接影响合金的高温持久寿命^[8]。这是因为再结晶过程会导致材料微观结构的变化, 从而影响其抵抗高温和持久应力的能力。叶片内腔再结晶与外表面再结晶相比, 内腔再结晶的检验难度更大, 安全隐患更高, 预防以及消除内腔再结晶的方法也受到内腔复杂结构的制约, 因此, 内腔再结晶问题是解决内腔质量、甚至是提高叶片整体性能的关键技术难点之一。

本文从内腔再结晶的产生机制以及现有解决措施上对研究现状进行了综述, 基于经验公式^[21]对再结晶的原因展开了分析, 其中:

$$P^c = \frac{10^7 \varepsilon_c}{2.2\varepsilon_c + 1.1} \gamma_{\text{lagb}} \quad (1)$$

式中: P^c 为再结晶驱动力, 再结晶是通过形核和晶粒的长大产生的, 其驱动力就是形核以及晶粒长大所需的能量; ε_c 为临界塑性应变; γ_{lagb} 为小角度晶界能。根据经验公式, 发现再结晶的驱动力主要来源为合金局部区域的塑性应变以及该区域的小角度晶界能, 对此, 行文思路如图2所示。并探究了未来的研究方向, 从内腔再结晶的解决方法的角度进行了展望, 对未来从型芯结构、性能以及热处理等角度开展叶片内腔再结晶研究具有指导意义。

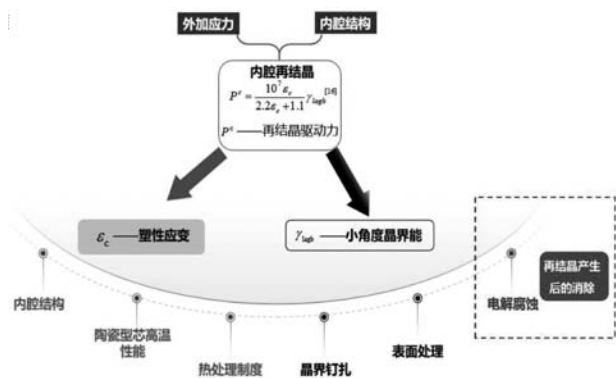


图2 内腔再结晶综述路线图

Fig. 2 Intracavity recrystallization review road map

1 内腔再结晶的产生原因

叶片内腔再结晶产生的原因与叶片外表面产生再结晶的原因本质上具有同一性。叶片在制造过程中可能经历多种工序, 从铸造凝固收缩、浇道切割和壳型

清理等, 复杂的工序极易导致叶片表面产生微小的塑性变形, 因此, 对于内腔而言, 再结晶的根本原因是内腔局部区域发生塑性变形。

塑性变形的局部区域会处于亚稳态, 在合金内部表现为位错的无序排布, 浇注过程中, 温度逐渐降低, 原子扩散能力逐渐减小, 使合金局部区域长时间处于亚稳态。之后在热处理过程中加热使该区域达到一定温度后, 发生回复作用。回复是指在加热温度较低时, 由于金属中的点缺陷及位错近距离迁移而引起的晶内变化, 位错运动使其由冷塑性变形时的无序分布变为有序分布, 形成亚晶界。亚晶形成后, 材料中仍保留有较大的储存能, 亚晶将会进一步长大以减小角度晶界面积来降低储存能, 当亚晶的长大伴随大角度晶界迁移时, 此时为再结晶的形核阶段。形核之后, 晶粒就借着界面的进一步移动面向周围发生塑性应变的区域进行长大, 此时的推动力是无塑性应变的新晶粒与周围存在塑性应变区域之间的应变能差, 直到塑性应变区域完全转化为无塑性应变区域为止^[9-16]。

1.1 外加应力引起的再结晶

外加应力引起的再结晶, 指的是外加应力导致叶片表面局部产生塑性应变, 当塑性应变达到一定值后, 在后续热处理后的表面产生的再结晶现象^[17]。单晶铸件在受到一定应力的作用下, 就会导致单晶铸件表面存在一定的残余应力。残余应力的产生是不均匀的塑性应变引起的, 产生塑性应变的区域, 如图3所示, 喷砂区域以及压力导致的压痕区域, 在后续热处理过程中极易产生表面再结晶组织^[18-19]。

李永顺等人的研究则深入探讨了不同应力和温度下同种合金再结晶层的演变, 如图4所示^[20]。他们发现, 在相同温度下, 再结晶层的厚度随着应力的增加而增加, 其中应力增加会使得合金局部区域塑性应变逐渐增加, 再结晶晶粒在单晶合金表面形核后, 新的晶粒向周围发生塑性应变的区域进行长大, 进而导致再结晶层厚度增加。

但上述机械处理或者外力作用不会对内腔产生影响, 因此内腔局部区域发生塑性变形的原因只能是在铸造过程中, 合金凝固收缩受阻, 导致产生了局部塑性变形。常温条件下, 原子扩散能力较小, 不稳定状态可以长时间维持, 但在高温热处理下, 原子扩散能力提高, 单晶合金将发生再结晶现象^[21]。

1.2 结构引起的再结晶

结构再结晶, 指由于叶片内腔结构复杂, 单晶抽拉过程中截面比较大, 易出现应力集中的现象, 在局部区域会产生较大的铸造残余应力, 在叶片内腔产生

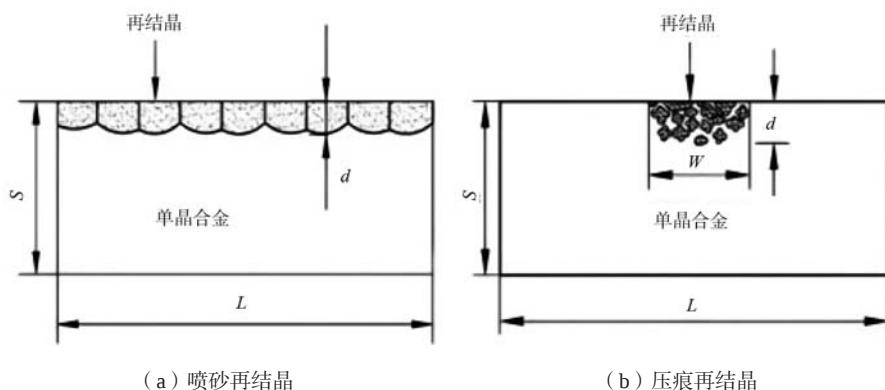


图3 外力作用导致材料表面产生残余应力引起再结晶

Fig. 3 The external force causes residual stress on the surface of the material and causes recrystallization

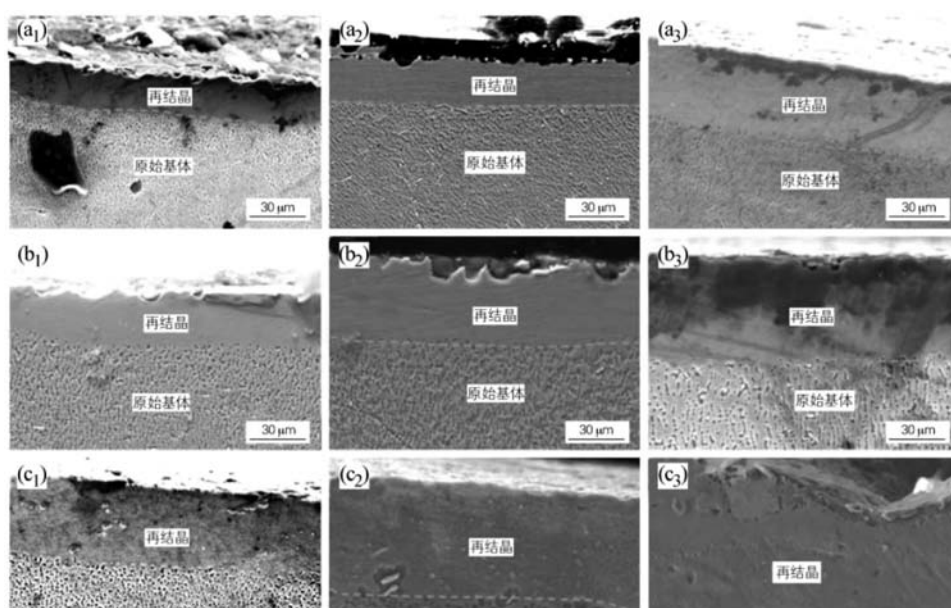
(a) 1200 °C; (b) 1240 °C; (c) 1280 °C; (a₁、b₁、c₁) 49 MPa; (a₂、b₂、c₂) 74 MPa; (a₃、b₃、c₃) 98 MPa

图4 不同应力和温度下合金再结晶层的演变

Fig. 4 Evolution of alloy recrystallization layer under different stresses and temperatures

塑性应变，进而在后续热处理后表面产生再结晶^[17]。近年来，对叶片铸造残余应力的研究表明^[22]，单晶涡轮叶片的再结晶与结构应力的大小有关。因此，在复杂的空心薄壁叶片内腔再结晶问题中，优化作为单晶空心叶片内腔转接件的陶瓷型芯结构，可以减少或消除叶片局部铸造结构残余应力，有效预防再结晶。

在单晶抽拉的过程中，若叶片截面面积发生突变，在该处发生应力集中，会导致表面产生残余应力，其残余应力的集中程度是再结晶发生的诱导和基础。科学研究及生产实践表明^[23-24]，型芯或叶片的尺寸以及结构会对高温合金再结晶过程产生重要影响，Li等发现随着截面比的增加，塑性应变的程度不断提高，如图5所示，为内腔再结晶埋下了隐患^[25]。

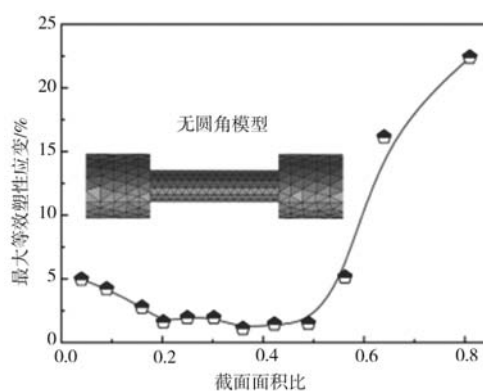


图5 截面比对再结晶的影响

Fig. 5 Effect of section ratio on recrystallization

徐福泽等通过对残余应力的分析与研究发现,经固溶热处理后除最下层平台外,其余每层平台的截面突变处均有再结晶产生,再结晶面积随平台所处高度的增加先增大后减小;铸件外侧平台比内侧平台更容易产生再结晶^[26]。由于截面突变,铸件平台部位会在

凝固及冷却过程中产生较大的塑性变形并积聚大量的变形能,在后续热处理时截面突变处易成为再结晶的起源;同时,因凝固过程中换热条件、冷却速率和变形速率的差异,导致铸件各部位的应力分布不均,在固溶热处理后表现出不同的再结晶行为如图6所示^[26]。

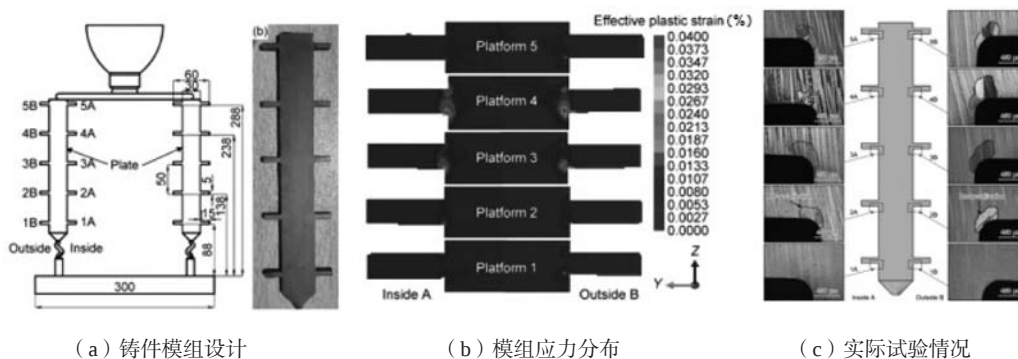


图6 铸件模组应力分布模拟试验与实际试验对比

Fig. 6 Comparison between simulated test and actual test of stress distribution of casting modules

1.3 内腔再结晶机理

内腔再结晶产生的机理与其他单晶合金再结晶的产生机理相同,如图7所示。受结构或外加应力的作用,浇注后在外表面或内腔部分区域产生微小的塑性应变,经过热处理高温激活后,产生再结晶^[21]。内腔

再结晶与外表面再结晶的区别在于内腔所受的外加应力来源是较为单一的型芯与合金之间的相互作用,表现在合金的热膨胀系数远远大于陶瓷型芯,这使得合金的凝固收缩受到陶瓷型芯的阻碍,导致合金内腔产生部分铸造残余应力,热处理后极易产生再结晶^[23]。

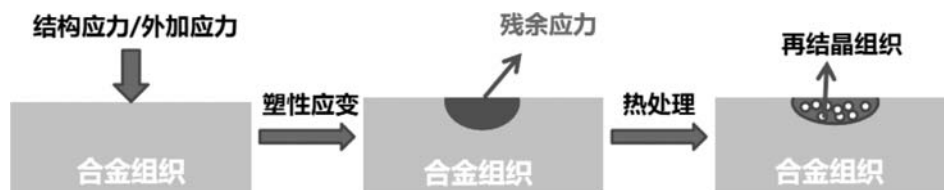


图7 结构应力/外加应力导致再结晶

Fig. 7 Structural stress/applied stress cause recrystallization

2 内腔再结晶的解决措施

为了进一步保障航空叶片的质量,应对叶片内腔复杂化的趋势,提高生产效率,从各个方面探索解决单晶高温合金中的再结晶问题十分迫切。

对于内腔来说,可以排除外界因素对合金的影响而导致的塑性变形,叶片内腔主要残余应力来源于形成叶片内腔结构的陶瓷型芯与金属凝固收缩不均。因此,要解决内腔再结晶,不仅仅需考虑合金成分以及热处理制度,还需考虑陶瓷型芯的高温性能以及结构设计。

2.1 叶片/型芯结构设计

近年来,科研工作者从消除甚至降低残余应力的

角度出发,围绕型芯/叶片结构优化设计,做了大量具有显著成效的工作。黄举等基于热弹塑性理论模拟研究发现单晶高温合金叶身非截面面积突变处但叶身较薄处出现再结晶,并且分析得出叶身较薄处在定向凝固过程中更容易发生应力集中,累积到一定程度后会引引起塑性变形,产生再结晶现象^[27]。此外,就叶身倒角而言,倒角半径的增加使凝固过程中的应力分布更加均匀,可以有效降低再结晶的趋势。目前常用且成熟的设计方法是将叶片截面面积突变处以及具有尖棱结构的位置设计成圆角状,降低截面突变情况,以降低应力集中。

李忠林建立了熔模铸造过程中加工诱发塑性的宏观、基于现象的热弹塑性模型^[29]。该模型虽然为半定

量模型,能够预测单晶高温合金铸件热处理过程中局部塑性诱发再结晶的部位,并发现几何特征比材料取向和材料类型对再结晶的影响更为重要。李世峰等以叶片榫头进气孔为结构优化对象,通过残余应力场的仿真计算,建立了最大铸造残余应力与结构参数和温度的关系模型,通过优化结构,降低了最大铸造残余应力,起到了消除再结晶作用^[28]。

李鑫通过调整铸件R角大小,并同步使用不同硅酸锆含量(HA02:硅酸锆含量为2%、HA06:硅酸锆含量为6%、HA10:硅酸锆含量为10%)的陶瓷型芯,发现R角对于单晶再结晶的影响较为明显,如图8所示^[30];随着R角的增大,即角的弧度越大,空心试管内腔出现再结晶的概率越小^[30]。R角属于陶瓷型芯的外形因素,由对型芯的结构设计决定。当合金液冷却凝固,型芯阻碍合金液的收缩,型芯的R角处出现应力集中,当R角较小时,合金受到应力越大,因此更容易出现再结晶;而R角较大时,尽管型芯的R角仍会受到较大的应力,但是应力在发生方向的转变时可以得到部分缓冲,型芯的受力点更为分散,因此R角受到的合力相对较小,所以出现单晶再结晶的频率相对较低。

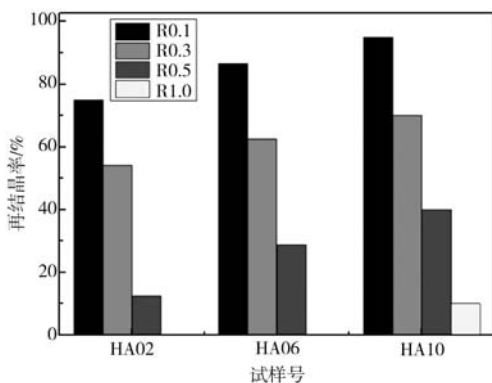


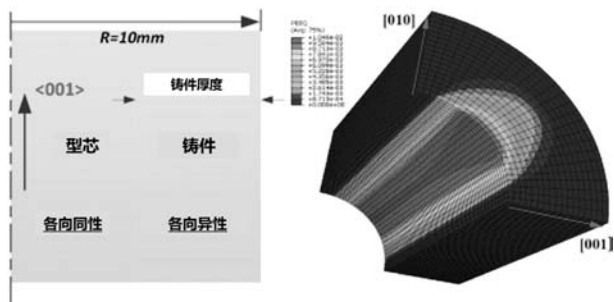
图8 不同型芯材料以及不同R角空心试管出现再结晶的概率
Fig. 8 The probability of recrystallization appeared in different core materials and different R-angle hollow test tubes

2.2 型芯高温性能调控

型芯高温性能包括高温蠕变速率、弹性模量、高温抗弯强度、热膨胀系数等,其与型芯/金属之间的收缩匹配性紧密相关,也直接影响了叶片内腔的再结晶行为。Panwisawas等通过数值模拟与试验验证的方式量化了引起再结晶的塑性应变的等级,结果表明,壳型厚度和硬度增加均会使再结晶程度加重^[31];1 300 ℃以下0.3%的塑性变形不足以导致再结晶产生,类比内腔情况,可以推断型芯的高温性能到一定程度才会通过影响金属的凝固收缩引起再结晶。

Li等通过数值模拟发现,由于型芯/金属的收缩匹

配性较差,金属在靠近型芯的一侧受到较大的应力作用,如图9所示^[25]。在单晶抽拉过程中,金属内侧靠近型芯的一面残余应力较大,这是由于金属的凝固收缩受到阻碍,从而产生残余应力,诱导再结晶的发生。



(a) 型芯合金接触面示意图 (b) 合金凝固收缩后内腔及表面的残余应力分布

图9 金属/型芯界面应力分布图

Fig. 9 Metal/core interface stress distribution diagram

实际浇注过程发现,型芯/金属收缩匹配性与型芯高温下的力学性能息息相关,而型芯的高温性能在很大程度上取决于型芯在高温过程中的相变以及相变所引起的体积效应。特别对于硅基陶瓷型芯而言,其主要成分为石英玻璃,其中铸造中方石英析出对陶瓷型芯的高温性能有重要的影响,有助于提高型芯的高温强度以及高温抗变形能力,也会对型芯的高温尺寸稳定性以及蠕变产生重要影响,并指出陶瓷型芯二次烧结和方石英相变是决定其收缩的主要因素^[32-34]。

在高温浇注过程中,陶瓷型芯需要承受合金熔体的冲击和静压力,对于典型单晶高温合金涡轮叶片型芯,根据HB5353常温抗弯强度(强化后)一般不低于25 MPa,1 550 ℃抗弯强度要求15~30 MPa^[35-36],过低的高温强度会导致型芯无法抵抗合金熔体的冲击和合金熔体的静压力而导致断芯或漏芯。对此,可以通过调整石英玻璃粉粒度级配、矿化剂种类及含量以及高温强化液等方式有效控制陶瓷型芯的高温强度。若型芯高温强度过高,会导致陶瓷型芯与金属间的收缩发生失配。在合金熔体凝固的过程中,由于陶瓷型芯的热膨胀系数小于金属的热膨胀系数,型芯会受到压应力而铸件内腔会受到张应力。在金属液凝固末期,由于铸件凝固收缩受阻而使单晶叶片铸件内部残留铸造应力,热处理后易出现再结晶缺陷,导致叶片报废。围绕此方面,研究人员主要从型芯原料的颗粒级配、矿化剂的种类/添加量、烧结温度/时间等方面展开了系统研究。

为了减少再结晶的发生,研究人员在型芯材料的选择上进行了深入的研究^[37]。试验结果表明,使用细

粉体的型芯收缩大于使用粗颗粒粉料的型芯收缩；但在铸件浇注过程中，使用粗颗粒粉料型芯的二次收缩更大。因此，通过优化型芯材料的选择和配比，可以在一定程度上减少再结晶发生的可能。

2.3 热处理调整

除了从结构以及型芯性能上解决残余应力产生从而解决再结晶的方法外，通过调整热处理工艺可以在一定程度上减轻铸件表面的残余应力。曲彦平等学者在探究热态DD6单晶高温合金再结晶组织时观察到，预处理温度超过 γ' 相溶解温度后将引发再结晶现象，此过程中形成细小的晶界以及粗大 γ' 相构成的再结晶晶粒^[38]。另一方面，王东林团队在分析DZ4合金喷丸样品经历不完全固溶及固溶热处理的再结晶情况时，揭示了DZ4镍基金属高温合金中 γ' 相对再结晶晶粒长大具有抑制效果，并强调再结晶速度及再结晶层的厚度主要受控于热处理的温度，为通过调控热处理温度来指导再结晶进程提供了支撑^[39]。张兵等人在研究热处理温度对镍基高温合金再结晶行为的影响时发现：当热处理温度低于 γ' 相完全固溶温度时，再结晶以不连续的胞状组织形式出现，当热处理温度高于 γ' 相完全固溶温度时，再结晶长大为完整晶粒^[40]。

Bond等利用预回复热处理方法抑制镍基单晶高温合金在固溶处理过程中发生再结晶的可能性^[41]。Gostic研究了叶片在固溶温度以下，进行多次循环回复处理，在一定程度可以削弱再结晶的趋势，防止在 γ' 固溶温度以上热处理时出现再结晶^[42]。

冷变形后的金属在低于再结晶温度下进行加热，从而降低内应力的过程称为去应力退火。研究表明在热处理前增加退火可降低热处理过程中再结晶的形成概率。Wang等人通过对试样进行拉伸处理引入残余应力，对试样进行不同制度的去应力退火处理，发现1 200 °C退火的效果明显优于1 000 °C^[43]。刘丽荣等^[44]研究了去应力退火时间对DZ125合金残余应力的影响，发现随着退火时间增加，再结晶层的厚度逐渐降低，最低能降低至未退火状态的50%。Kortovich等研究者采取了一种预回复热处理策略，旨在减轻PW1480合金经喷丸处理后，在固溶处理阶段再结晶现象的发生^[45]。他们的研究表明，样品表面的变形程度是决定预回复热处理温度的关键因素。需要特别指出的是，定向凝固及单晶高温合金材料的再结晶过程通常从表面开始。这一现象归因于在相同的温度条件下，材料内部形成新晶核所需的临界变形量远超表面成核所需，而且表面成核的优势在于能够限制新晶界的生成，进而减小因晶界增多而引起的能量增加。

2.4 涂覆涂层

单晶高温合金的再结晶一般只在叶片表面形核，这是由于相同温度下，内部形核所需的临界应变变量远大于表面形核所需的临界应变变量，并且在表面形核可以减少新增晶界，从而减少晶界能的增加。而涂覆涂层的方式可以消除单晶合金的自由表面，促使再结晶晶粒在内部形核，增加形核阻力^[46]，从而抑制再结晶晶粒的长大。

Okazaki等人通过向涂层中添加晶界强化元素，运用低压等离子溅射技术将涂层熔覆在叶片胞状再结晶表面^[47]。这一方法显示出对单晶叶片再结晶问题的积极影响。撒世勇等研究了涂层对高温合金表面再结晶的影响，研究表明采用电弧离子镀工艺方法于高温合金喷砂表面涂覆涂层，对喷砂诱发的再结晶有一定程度抑制作用^[48]。Schaeffer和John等的专利中提出了通过采用表面渗碳处理的方法，在合金表面形成渗碳层，渗碳层中的MC型碳化物起到阻碍再结晶晶界扩展的作用^[49-50]。但对于叶片内腔来说，涂覆涂层的难度相比外表面来说大大提高，用涂覆涂层解决内腔再结晶的可行性还需进一步深入探索。

2.5 渗碳

碳化物拥有对再结晶过程的强大抑制能力，故而在控制合金内部再结晶晶界的形成上扮演着关键角色。这一抑制效应不仅与碳含量的高低紧密相关，还深受合金中其他可溶性成分的影响，尤其是Hf、Re和B这类元素，它们与碳化物生成的过程存在着密切的相互作用关系。

Goldschmidt等人探讨了抑制某类镍基金属单晶体高温合金再结晶行为的方法，其间发现合金内部较高碳含量会促进富含Ta、Ti等元素的碳化物形成^[51]。在1 310 °C的热处理工序中，材料表面若干晶粒中的碳化物能够抑制再结晶晶粒晶界的移动，进而有力地抑制了再结晶晶粒的长大。沿此思路，王莉及其团队进一步深化了探究，专注于碳引入诱发的碳化物对DZ125L合金再结晶特性的细致影响，其研究表明，碳化物不仅提供了再结晶的成核位点，还有效阻碍了再结晶晶界的移动^[52]。此外，研究指出定向凝固与单晶高温合金中碳化物对于再结晶作用的差异，或可归因于合金中碳化物的具体种类、热处理的温度与时长以及负载条件等因素。

2.6 电解

除了再结晶的预防外，对已产生再结晶的区域进行打磨、腐蚀也是一种生产上常用的方法，但是对于内腔来说，直接打磨工作难度极大，而Salkeld等提出

在塑性变形程度较小时利用电化学腐蚀去除试样表面的变形层,进而降低试样在固溶过程中发生再结晶的可能,但难点在于在实际生产过程中对塑性变形区域的检测与识别^[53]。

对此,参考电化学腐蚀的方法,喻健等人发明了一种采用电解腐蚀方法去除单晶高温合金涡轮叶片外表面以及内腔的再结晶的方法^[54]。这种方法不仅可以有效去除再结晶晶粒,而且避免了去除再结晶晶粒时带来的应变层问题。这一创新技术为高温合金叶片的再结晶问题提供了全新的解决方案。

3 总结与展望

当前军用航空发动机的需求更倾向于高推重比与大推力,高推重比意味着更高的涡轮前温度,需要内腔结构更复杂、冷却效率更佳的单晶叶片,内腔的质量与叶片承温能力的联系高度紧密,内腔再结晶不仅难以检验,还会直接影响叶片的使用寿命,是单晶叶片质量的重大隐患之一。本文针对以上问题,从再结晶的产生原因及机理出发,阐述了内腔再结晶与外表面再结晶的区别,提出陶瓷型芯高温性能是影响叶片内腔再结晶的关键因素,是叶片内腔产生塑性变形的根本原因。合金材料本身的性能同样影响着合金的再

结晶行为,进一步探索合金性能与再结晶的关联性具有一定的科学意义。一旦发生塑性应变,需要对内腔发生塑性应变的位置进行识别甚至测量,目前在该领域还有很大的探索空间,并且重点对内腔再结晶的解决方案进行了总结。针对单晶叶片内腔再结晶问题,笔者认为,相关研究与发展将呈现以下趋势:

(1) 面对叶片气冷结构复杂化程度加剧的现状,需要进一步开发针对内腔残余应力的检测方式与手段,从机理上量化内腔再结晶的临界塑性应变;

(2) 更新迭代合金材料,在材料中加入微量的晶界强化元素,通过钉扎效应、增加形核阻力的方式,提高再结晶形成并长大的晶界能;

(3) 优化叶片内腔结构,防止沿抽拉方向上出现截面面积突变,造成应力集中;

(4) 建立陶瓷型芯高温性能与内腔塑性应变的关联性,明确陶瓷型芯退让性的测试指标,构建表征方法与手段,从根本上解决内腔再结晶。

因此,综上所述,发展内腔再结晶的预测技术,通过优化陶瓷型芯和合金性能以及结构,从而实现内腔再结晶的控制技术,将成为未来研究突破的主要方向。

参考文献:

- [1] 陶春虎,张卫方,李运菊,等.定向凝固和单晶高温合金的再结晶[J].失效分析与预防,2006,1(4):1-9.
- [2] 颜鸣皋,吴学仁,朱知寿.航空材料技术的发展现状与展望[J].航空制造技术,2003(12):19-25.
- [3] GELL M, DUHL D N, GIAMEI A F. The development of single crystal super Alloy turbine blades [C]// Super alloys 1980. Warrendale, PA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1992: 155-164.
- [4] 王志刚,赵京晨,燕平,等.一种镍基单晶高温合金的再结晶[J].钢铁研究学报,2009,21(2):23-27.
- [5] 熊继春,李嘉荣,刘世忠,等.单晶高温合金DD6表面再结晶组织[J].材料工程,2009,37(S1):110-113.
- [6] SONG X, RETTENMAYR M, MVLLER C, et al. Modeling of recrystallization after inhomogeneous deformation [J]. Materials Transactions A, 2001, 32(9): 2199-2206.
- [7] 郑运荣,阮中慈,王顺才.DZ22合金的表层再结晶及其对持久性能的影响[J].金属学报,1995,31:325-330.
- [8] KHAN T, CARON P, NAKAGAWA Y G. Mechanical behavior and processing of DS and single crystal superalloy [J]. Metals, 1986, 38(7): 16-19.
- [9] LI Z, XIONG J, XU Q, et al. Deformation and recrystallization of single crystal nickel-based superalloys during investment casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 1-12.
- [10] ZHUO L, LIANG S, WANG F, et al. Kinetics and microstructural evolution during recrystallization of a single crystal superalloy [J]. Materials Characterization, 2015, 108: 16-21.
- [11] MENG J, XIAO Feng, ZHUANG Qi. Surface recrystallization of a single crystal nickel-base superalloy [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2011, 18(2): 197-202.
- [12] 张力,赵玉涛,贾志宏,等.镍基单晶合金CMSX-6的再结晶行为及热裂倾向[J].功能材料,2014,45(24):131-135.
- [13] 孟杰,金涛.镍基单晶高温合金的再结晶[J].材料工程,2011(6):92-98.
- [14] 姚志浩,郭会明,董建新,等.单晶高温合金DD6热变形再结晶行为[J].材料热处理学报,2014,35(6):98-103.
- [15] 王志刚,赵京晨,燕平,等.一种镍基单晶高温合金的再结晶[J].钢铁研究学报,2009,21(2):23-27.
- [16] QIN L, PEI Y, LI S, et al. Influence of stress and secondary orientation on the oxidation-induced dynamic recrystallization behavior of a

- Ni-based single crystal superalloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 706: 455–460.
- [17] GELL M, DU HL D N, GIAMEIA F. The development of single crystal superalloy turbine blades [R]. Warrendale, US: Pratt and Whitney Aircraft Group, 1980.
- [18] К. Я. 施普恩特. 高强度镍基铸造高温合金 ЖС 6φ [J]. *航空材料学报*, 1991 (S1) : 14–17.
- [19] KHAN T, CARON P, NAKAGAWA Y G. Mechanical behavior and processing of DS and single crystal superalloy [J]. *Metals*, 1986, 38 (7) : 16–19.
- [20] JIAO Benqi, ZHAO Qinyang, ZHAO Yongqing, et al. New insights into the recrystallization behavior of large-size Mo–3Nb single crystal based on multi-scale characterization [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20: 303–319.
- [21] 李永顺, 玄伟东, 段方苗, 等. 应力对单晶高温合金再结晶的影响 [J]. *金属热处理*, 2022, 47 (2) : 48–53.
- [22] 毕中南, 秦海龙, 董志国, 等. 高温合金盘锻件制备过程残余应力的演化规律及机制 [J]. *金属学报*, 2019, 55 (19) : 1160–1174.
- [23] LI Shifeng, CHEN Suling, REN Siyuan. Structural optimization of single crystal turbine blade based on recrystallization critical stress [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2364 (1) : 1–7.
- [24] L. SIERADZKI, L. MADEJ. A perceptive comparison of the cellular automata and monte carlo techniques in application to static recrystallization modeling in polycrystalline materials [J]. *Computational Materials Science*, 2013 (2) : 156–173.
- [25] LI Zhonglin, XIONG Jichun, XU Qingyan, et al. Deformation and recrystallization of single crystal nickel-based superalloys during investment casting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 217 : 1–12.
- [26] 徐福泽, 蔺永诚, 马德新, 等. 单晶高温合金 CMSX-4 铸件再结晶 [J]. *材料工程*, 2023, 51 (10) : 42–50.
- [27] 黄举. 结构尺寸对单晶高温合金再结晶的影响研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [28] 李世峰, 卫刚, 孙飞龑. 几何与动力约束结合的单晶涡轮叶片结构细节优化 [J]. *航空动力学报*, 2015, 30 (1) : 91–95.
- [29] 李忠林. 镍基单晶高温合金静态再结晶实验研究及数值模拟 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [30] 李鑫. 单晶空心叶片用氧化硅基陶瓷型芯材料制备及工艺匹配性研究 [D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2023.
- [31] C Panwisawas, H Mathur, JC Gebelin, et al. Prediction of plastic strain for recrystallisation during investment casting of single crystal superalloys [C]// Pennsylvania: 12th International Symposium on Superalloys, 2012.
- [32] PAN Zhiping, GUO Jianzheng, LI Shuangming, et al. Effect of nonuniform sintering on mechanical and -thermal properties of silica-based ceramic cores [J]. *CHINA FOUNDRY*, 2021, 18 (5) : 457–462.
- [33] 李寒松, 玄伟东, 潘文轩, 等. 电熔莫来石含量对硅基陶瓷型芯性能的影响 [J]. *铸造*, 2020, 69 (8) : 861–865.
- [34] CHEN Xiao, LU Gang, YAN Qingsong, et al. Enhancing creep resistance performance in silica-based ceramic core materials through shell-core structure [J]. 2024, 44 (12) : 116645–116645
- [35] XUAN Weidong, ZHANG Qiang, SONG Haorui, et al. Improved mechanical properties and dimensional accuracy of silica-based ceramic cores by Si₃N₄ addition [J]. *Ceramics International*, 2024, 50 (14) : 25730–25737
- [36] LI Xin, NIU Shuxin, WANG Dongsheng, et al. Microstructure and crystallization kinetics of silica-based ceramic cores with enhanced high-temperature property [J]. *Materials*, 2023, 16 (2) : 606–606
- [37] 李波, 孙长波, 刘艳, 等. 陶瓷型芯粉料粒度对铸件内腔尺寸的影响 [J]. *铸造*, 2015, 64 (10) : 1025–1028.
- [38] 曲彦平, 刘丽荣, 祖国庆, 等. DD6 单晶高温合金热处理过程中的再结晶组织演化 [J]. *材料工程*, 2011 (12) : 14–19.
- [39] 王东林, 李家宝, 金涛, 等. DZ4 镍基高温合金的再结晶 [J]. *金属学报*, 2006, 42 (2) : 167–171.
- [40] ZHANG B, CAO X G, LIU D L, et al. Surface recrystallization of single crystal nickel-based superalloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23 (2) : 1286–1292.
- [41] BOND SD, MARTIN JW. Surface recrystallization in a single crystal nickel-based superalloy [J]. *Journal of materials science*. 1984, 19 (12) : 3867–3872.
- [42] GOSTIC WJ. Cyclic recovery heat treatment: United States patent US 5551999A [P]. 1996–09–03.
- [43] WANG L Y, HON M H. The effect of cristobalite seed on the crystallization of fused silica based ceramic core – a kinetic study [J]. *Ceramics International*, 1995, 21 (3) : 187–193.
- [44] 刘丽荣, 祖国庆, 黄景胜, 等. 单晶高温合金再结晶的影响因素 [J]. *材料热处理学报*, 2013, 34 (3) : 55–59.
- [45] KORTOVICH J R, CHARLES S, BRUCE M. Method of producing a single crystal article: US 4385939 [P]. 1983–05–31
- [46] 李金国, 孟祥斌, 刘纪德, 等. 单晶高温合金涡轮叶片的常见凝固缺陷及控制方法 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41 (11) : 1321–1327.
- [47] OKAZAKI M, OHTERA I, HARADA Y. Advanced materials and processes for gas turbines [C]// Warrendale: The Minerals. Metals & Materials Society, 2003.
- [48] 撒世勇, 谢光. 涂层对定向凝固高温合金表面再结晶的影响研究 [J]. *表面技术*, 2009, 38 (1) : 17–19.
- [49] SCHAEFFER J C, BARTZ A K, FINK P J. Method for preventing recrystallization after cold working a superalloy article: US5598968 [P].

- 1995-11-21.
- [50] JOHN C. Single crystal superalloy articles with reduced grain recrystallization: EP1038982 [P]. 2000-03-20.
- [51] GOLDSCHMIDT D, PAUL U, SAHM P R. Porosity clusters and recrystallization in single-crystal components [J]. Superalloys, 1992, 15 (5): 155-164.
- [52] WANG L, XIE G, ZHANG J, et al. On the role of carbides during the recrystallization of a directionally solidified nickel base superalloy [J]. Scripta Materialia, 2012, 55 (5): 457-460.
- [53] SALKELD R W, FIELD T T, AULT E A. Preparation of single crystal superalloy for post-casting heat treatment: US5413648 [P]. 1995-03-15.
- [54] 喻健, 熊继春, 薛燕鹏, 等. 一种去除单晶高温合金涡轮叶片再结晶的方法: CN105803533B [P]. 2016-05-03.

Research Status of Recrystallization in Single-Crystal Hollow Leaf Cavity

WANG Ke¹, LUO Yu-shi¹, NIU Shu-xin¹, WANG Yue¹, SI Yuan¹, YANG Yong-kang², ZHOU Ting-ting¹, ZHONG Yu-long¹

(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract:

In view of the problem of recrystallization in the inner cavity of single-crystal turbine hollow blades used in aero-engines, combined with the trend of complexity of the inner cavity of future blades, the mechanism and causes of recrystallization in the inner cavity of single-crystal hollow blades are described, and the special characteristics of recrystallization in the inner cavity relative to that on the outer surface are analyzed. From three aspects of attenuating or even eliminating plastic strain, controlling the growth of recrystallization, and treating the recrystallization after it occurs, the methods and research status of solving the problem of recrystallization in the internal cavity in recent years are summarized, and the future research direction of internal cavity recrystallization is proposed.

Key words:

investment casting; single-crystal hollow blades; internal cavity recrystallization; plastic strain; crystal boundary energy