DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.6022

Pt 丝型芯撑对薄壁单晶涡轮叶片的影响研究

陈浩天[1,2],李　克[3],陈森鸿[2],朱霄龙[1],曾　龙[2],夏明许[1],王晓珊[1]

(1. 宁夏大学 材料与新能源学院,宁夏 银川 750021;2. 上海交通大学 材料科学与工程学院,上海 200240;3. 中国航发南方工业有限公司,湖南 株洲 412000)

摘　要:以薄壁单晶涡轮叶片为研究对象,分析了插入 Pt 丝型芯撑与未插入 Pt 丝型芯撑对叶片基体组织和成分偏析的影响,并评估了 Pt 丝插入导致的结构凸起所引起的局部应力集中及其对叶片后续热处理工艺的潜在不利影响。结果表明,Pt 丝型芯撑中的 Pt 元素在基体中发生溶解扩散,对基体微观组织存在一定影响,使一次枝晶间距从277.6、299.0 μm 左右扩大到 293.4、311.2 μm 左右,γ/γ′共晶相含量从 2.2%、2.3%增加到 2.7%、4.6%左右,但对 γ′强化相的影响不明显。然而成分偏析加剧,尤其加剧了难熔元素 Re、W 的偏析。此外,Pt 丝型芯撑的插入在结构变形和枝晶取向偏转区域引起应力集中,容易在后续热处理中诱发再结晶缺陷,对叶片性能产生不利影响,建议在热处理阶段之前将 Pt 丝型芯撑去除。

关键词:Pt;型芯撑;薄壁单晶涡轮叶片;微观组织;结构凸起;枝晶取向偏转

中图分类号:TG244 +.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2026)10-1149-10

Investigation into the Effects of Pt Wire Core Supports on Thin-walled Single-crystal Turbine Blades

CHEN Haotian[1,2], LI Ke[3], CHEN Senhong[2], ZHU Xiaolong[1], ZENG Long[2], XIA Mingxu[1], WANG Xiaoshan[1]

(1. School of Materials and New Energy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. AECC South Industry Company Limited, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: The effects of Pt wire cores on the microstructure, elemental segregation, and local stress concentration in thin-walled single-crystal turbine blades were investigated. Comparative analysis was conducted between blades with and without Pt wire cores. The results indicate that the Pt from the cores dissolves and diffuses into the matrix, influencing the microstructure. The primary dendrite arm spacing increases from approximately 277.6 and 299.0 μm to 293.4 and 311.2 μm, respectively, while the γ/γ′ eutectic phase content increases from 2.2% and 2.3% to 2.7% and 4.6%, respectively. However, no significant impact on the γ′ strengthening phase is observed. Notably, Pt diffusion exacerbates elemental segregation, particularly for refractory elements such as Re and W. Additionally, the insertion of Pt wire cores induces structural protrusions and localized stress concentrations, accompanied by dendrite orientation deflection. These factors may trigger recrystallization defects during subsequent heat treatments, adversely affecting blade performance. To mitigate these risks, removing the Pt wire cores prior to heat treatment is recommended.

Key words: Pt; core supports; thin-walled single-crystal turbine blade; microstructure; structural protrusion; dendrite orientation deflection

收稿日期:2026-02-25

基金项目:国家重点研发计划(2024YFB3713804);国家自然科学基金(U24A2006);航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究项目(2017-VII-0008-0102)

作者简介:陈浩天,2001 年生,硕士.研究方向为镍基单晶高温合金.Email: 3249135607@qq.com

通信作者:曾　龙,1986 年生,博士,副研究员.研究方向为高温合金单晶叶片定向凝固制备及缺陷检测和修复.Email: recrystal@sjtu.edu.cn

引用格式:陈浩天,李克,陈森鸿,朱霄龙,曾龙,夏明许,王晓珊.Pt 丝型芯撑对薄壁单晶涡轮叶片的影响研究[J].铸造技术,2026,47(10):1149-1158.

CHEN H T, LI K, CHEN S H, ZHU X L, ZENG L, XIA M X, WANG X S. Investigation into the effects of Pt wire core supports on thin-walled single-crystal turbine blades[J]. Foundry Technology, 2026, 47(10): 1149-1158.

中国知网　https://www.cnki.net

镍基高温合金单晶空心涡轮叶片具有优异的高温强度、抗蠕变性能和抗疲劳性能，是航空发动机与燃气轮机的关键热端部件[1]。随着先进航空工业的发展，单晶空心涡轮叶片的内腔结构越来越复杂，这给定向凝固工艺带来巨大的挑战[2-3]。单晶叶片的内腔结构主要靠陶瓷型芯来保障，这是因为陶瓷化学活性低(与金属元素发生界面反应倾向低)，高温硬度与刚度高(抗变形能力高)，以及可在碱性条件脱芯且不损伤金属零件等优势[4-6]。然而，陶瓷型芯不仅要承受液态金属的冲击载荷，还需要承受金属凝固过程中的收缩应力，极易发生偏移、变形或断裂，从而引发内腔尺寸超差、壁厚分布不均，甚至铸件报废[7]。因此，研究者建议采用自由固定端+金属型芯撑的方案对陶瓷型芯进行固定，其中，铂丝(Pt)由于具有优异的抗氧化性和高熔点特性成为单晶叶片的型芯撑的首选材料[8-10]。

虽然金属 Pt 的熔点较高，但是当 Pt 丝长期处于金属熔体中时，Pt 元素不可避免地与高温合金熔体发生扩散，Pt 丝型芯撑中元素扩散对单晶叶片组织及性能的影响成为主要研究热点。南晓斌等[11]采用板状试样型壳研究 Pt 丝型芯撑对 DD5 合金组织与性能的影响，结果表明，尽管 Pt 丝型芯撑处富集的 Pt 元素加剧 DD5 合金试板中部分元素的偏析，但未对凝固组织造成显著负面影响。然而薄壁单晶涡轮叶片复杂的空腔结构导致叶片壁厚大幅下降，薄壁效应[12-15]会加剧枝晶的不对称生长，增加共晶数量，加剧元素偏析，同时有限的扩散范围、扩散速度及时间可能会导致芯撑及对应的叶片表层 Pt 浓度不同，可能放大 Pt 元素引入造成的影响。姜卫国等[16]在真实 DD33 合金单晶空心叶片的研究中发现，Pt 丝型芯撑处的凝固偏析倾向增大，共晶含量增加，还存在环形裂纹，随着高温时效时间的增加，再结晶程度加剧，晶界向叶片表面扩展。

插入 Pt 丝型芯撑会在叶片外表面形成局部的凸起结构，导致该区域在凝固过程中产生应力集中，进而诱发再结晶缺陷[17]，因此，铂丝型芯撑及型撑附近的塑性变形和应力研究成为另外一个研究热点。目前仅有 Wang 等[18]通过设计参照真实叶片长度的实心叶片进行实验以及仿真模拟，结果指出在型芯撑下侧聚集了大量塑性变形，同时位置更高的型芯撑下侧具有更大塑性变形。可见，目前国内外对插入 Pt 丝型芯撑对薄壁单晶叶片组织的影响及其导致的叶片表面应力集中等具体诱因仍缺乏系统研究。

本研究以插入 Pt 丝型芯撑的薄壁单晶涡轮叶片为研究对象，探索 Pt 丝型芯撑对于镍基高温合金组织、成分偏析及其导致的叶片表面应力集中等具体诱因的影响规律，以期为薄壁单晶涡轮叶片的制备工艺优化提供理论依据和数据支撑。

1 实验材料与方法

研究采用的薄壁涡轮叶片型壳通过失蜡法制备，具体流程参照文献[19]。选用直径为 0.5 mm Pt 丝作为型芯撑材料对陶瓷型芯进行定位，型芯撑的固定位置如图 1a_1 所示，在同一叶片上取 A、B 高度各插入 3 组 Pt 丝。Pt 丝在蜡模制备阶段插入，插入后在芯撑根部补蜡起固定作用，补蜡区域修型保证为平滑弧面。为了对比 Pt 的影响，在同一型壳中制备 2片叶片，一组插入 Pt 丝，另一组不插入 Pt 丝以做对比。

薄壁单晶涡轮叶片的取向控制采用基底诱导法[20]，定向凝固制备在定制的高速率凝固炉(共慧冶金设备科技(苏州)有限公司)中进行[21]。定向凝固工艺参数为模壳预热温度为 1 500 ℃，合金浇铸温度为 1 520 ℃，抽拉速率为 2.5 mm/min。定向凝固结束后，采用机械振动法去除模壳，利用碱液腐蚀法[22]去除陶瓷型芯。

试样切割采用电火花切割，切割位置如图 1d 所示。在插入 Pt 丝叶片垂直于 z 轴方向沿 A、B 高度各取 10 mm×10 mm 样品 3 组，按照不同高度设为实验组 A、B。在不插入 Pt 丝叶片的同一高度，同一位置，同一尺寸取对照组 C、D 作为对比基准，取样位置如图 1e 所示。

采用化学腐蚀法显示试样的显微组织，腐蚀剂成分为 10 g $CuSO_4$+50 mL HCl+50 mL H_2O，腐蚀时间为 5~20 s。分别使用 ZEISS Vert.A1 型光学显微镜(OM)和 ZEISS Gemini 360 型扫描电子显微镜(SEM)观察 Pt 丝与薄壁单晶涡轮叶片基体界面结合情况，以及枝晶、γ′强化相和 γ/γ′共晶形貌，实验组 A、B 统计位置均为 Pt 丝型芯撑插入位置下部叶片基体组织。采用 EBSD 技术分析晶体学取向和应力分布，测试电压为 20 kV：先采用 10 μm 步长进行快速扫描以获取整体取向信息，再采用 1 μm 步长对型芯撑关键区域进行精细扫描。所有 EBSD 数据均通过 AZtec 软件进行处理。采用 EDX-720 型能量色散 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定叶片中各合金元素的偏析比，最终结果取 10 次测试的平均值。

采用定量金相方法对组织参数进行统计分析：首先，在叶片横截面上采用面积法统计一次枝晶间距(primary dendrite arm spacing, PDAS)，数据来源于同一高度 3 个取样点，每个取样点至少分析 5 张 50

中国知网 https://www.cnki.net

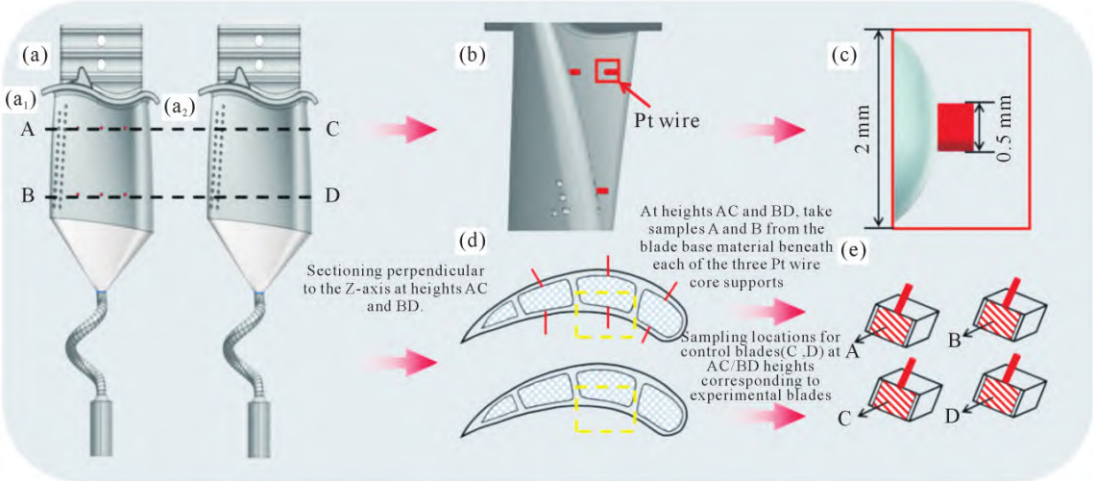


图 1　Pt 丝型芯撑在薄壁涡轮叶片中的位置及取样示意图：(a) 型芯撑在叶片内部的位置；(a_1) 有 Pt 丝型芯撑的叶片；(a_2) 无 Pt 丝型芯撑的叶片；(b) 侧视图；(c) 型芯撑区域放大图；(d) 沿 Z 轴方向的截面示意图；(e) 实验组 A、B 及对比组 C、D 的取样位置示意图

Fig.1　Schematic diagram illustrating the location of the Pt wire core supports and the corresponding sampling sites within a thin-walled turbine blade: (a) location of the core support inside the turbine blade; (a_1) blade with Pt wire core support; (a_2) blade without Pt wire core support; (b) side view; (c) enlarged view of the core support region; (d) schematic cross-sectional view along the Z-axis; (e) schematic of the sampling locations for experimental groups A and B and comparison groups C and D

倍视野的金相照片，结果取平均值。其次，在一次枝晶间距相同采样位置，利用 Image J 图像分析软件，根据相关标准[23]对 γ/γ′ 共晶的面积分数和 γ′ 强化相的体积分数进行统计。

2　实验结果及讨论

2.1　Pt 丝型芯撑对单晶涡轮叶片微观组织的影响

图 2 为单晶涡轮叶片不同部位处的微观组织形貌图，分别比较观察了实验组 A、B 与对比组 C、D 的枝晶形貌、γ/γ′共晶以及枝晶间与枝晶干的 γ′ 相形貌。

如图 $2a_1$、b_1 所示，单晶涡轮叶片的基体呈现出规则排列的花瓣状的一次枝晶组织，这与对比组图 $2c_1$、d_1 的组织基本相同，属于典型单晶叶片横截面组织。型芯撑位置已不再呈现 Pt 的多晶组织，取而代之的是二次枝晶比较发达的树枝晶组织，通过对基体枝晶组织和 Pt 丝位置处的枝晶组织对比可以发现，叶片基体的枝晶组织与型芯撑位置处枝晶组织的二次枝晶方向几乎完全一样，这意味着 Pt 元素在镍基高温合金熔体中完全溶解，叶片中的枝晶组织沿着二次枝晶外延生长直到充满型芯撑的位置。图 3 为 A、B、C、D 位置处单晶叶片基体的一次枝晶间距统计对比图，如图所示，受到 Pt 元素扩散的影响实验组 A、B 的一次枝晶间距分别为 311.2 和 293.4 μm，对比组 C、D 的一次枝晶间距分别为299.0 和 277.6 μm。插入 Pt 丝型芯撑后，对比同一位置高度的 A、C，一次枝晶间距从 299 μm 增加到311.2 μm，对比另一相同位置高度 B、D，一次枝晶间距从 277.6 μm 扩大到 293.4 μm。两组对比结果显示插入 Pt 丝叶片的一次枝晶间距均有所增加。Hunt 一次枝晶间距模型[24-27]：

$$\lambda_1=2.83(k\Delta T_0 D\Gamma)^{1/4}V^{-1/4}G^{-1/2} \tag{1}$$

式中，k 为平衡分配系数；ΔT_0 为结晶温度间隔；D 为液相扩散系数，主要与合金的成分有关；Γ 为 Gibbs-Thomson 系数；V 为晶体的生长速度，抽拉速率在不是很快的状态下，等同于晶体的生长速度；G 为温度梯度。

林惠文等[28-29]的研究指出，Pt 元素扩大了镍基单晶高温合金的结晶温度间隔。根据式(1)一次枝晶间距模型可知一次枝晶间距 $\lambda_1 \propto T_0$，式中 T_0 为结晶温度间隔。因此，在相同凝固条件下插丝叶片的一次枝晶间距相对于未插丝叶片的一次枝晶间距略微扩大是因为 Pt 丝型芯撑中的 Pt 元素在定向凝固过程中扩散进入叶片基体，扩大了叶片基体合金的结晶温度间隔。

随着定向凝固的进行，后凝固的 A、C 高度样品相对于先凝固的 B、D 高度样一次枝晶间距从277.6、293.4 μm 增加到 299.0、311.2 μm。随着凝固距离的增加，一次枝晶间距同样呈现出扩大趋势。在定向凝固过程中，固相不断增加，后凝固的熔体距离底部越来越远，水冷铜盘的效果减弱，散热更加依赖模壳辐射散热，温度梯度随之降低。参考式(1)，一次枝晶间距 $\lambda_1 \propto \frac{1}{G}$，可见随着温度梯度降低，一次枝晶间距增大，所以凝固距离更小的 B、D 高度样品相对于凝固距离更大的 A、C 高度样品温度梯度更低，一次枝

中国知网　https://www.cnki.net

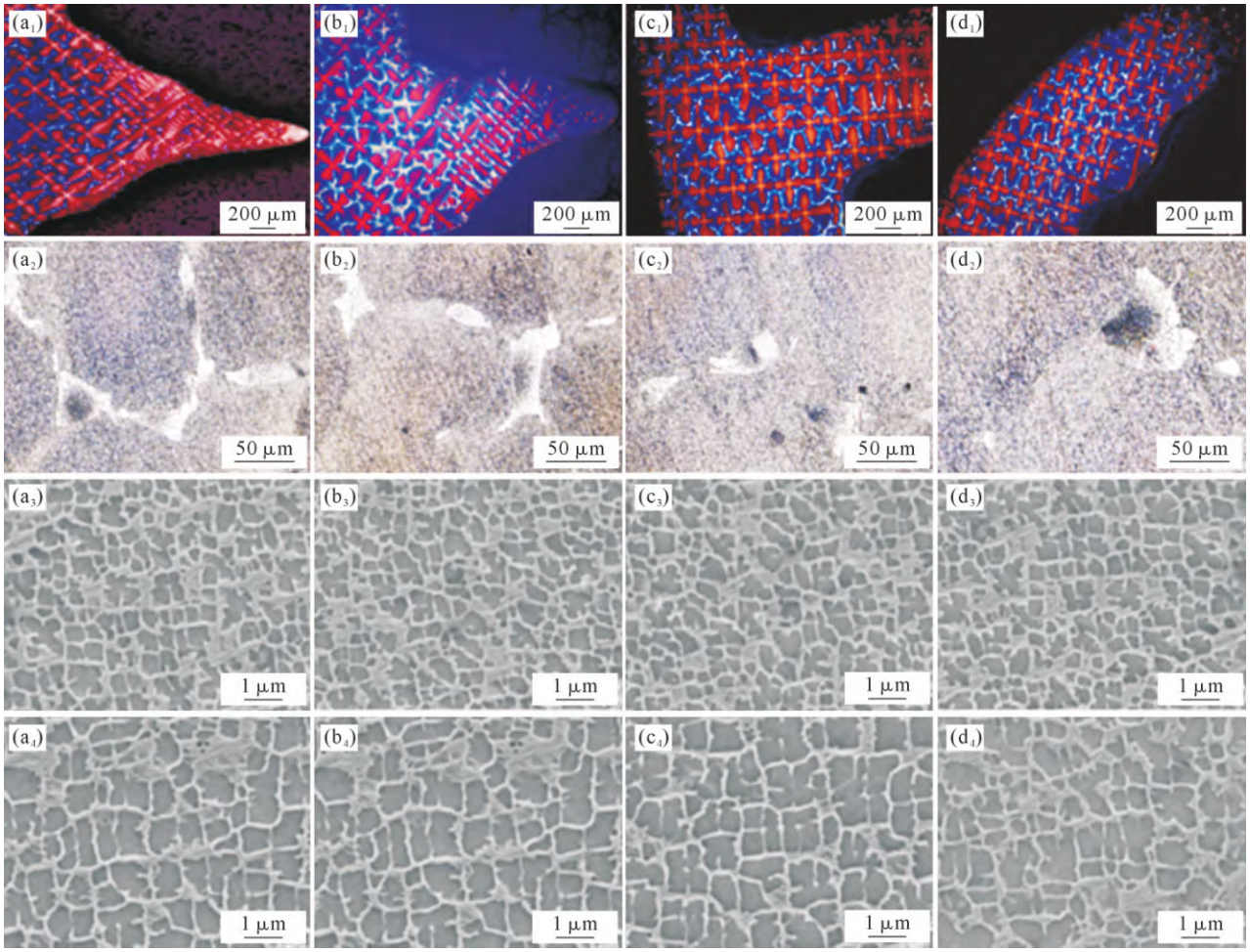


图 2 单晶薄壁叶片不同位置处显微组织：(a_1~a_4) 实验组 A 枝晶形貌、γ/γ′共晶、枝晶干 γ′相及枝晶间 γ′相；(b_1~b_4) 实验组 B 枝晶形貌、γ/γ′共晶、枝晶干 γ′相及枝晶间 γ′相；(c_1~c_4) 对比组 C 枝晶形貌、γ/γ′共晶、枝晶干 γ′相及枝晶间 γ′相；(d_1~d_4) 对比组 D 枝晶形貌、γ/γ′共晶、枝晶干 γ′相及枝晶间 γ′相

Fig.2 Microstructure at different locations of the single-crystal thin-walled blade: (a_1~a_4) dendritic morphology, γ/γ′ eutectic, γ′ phase in the dendritic core and interdendritic region of experimental group A; (b_1~b_4) dendritic morphology, γ/γ′ eutectic, γ′ phase in the dendritic core and interdendritic region of experimental group B; (c_1~c_4) dendritic morphology, γ/γ′ eutectic, γ′ phase in the dendritic core and interdendritic region of control group C; (d_1~d_4) dendritic morphology, γ/γ′ eutectic, γ′ phase in the dendritic core and interdendritic region of control group D

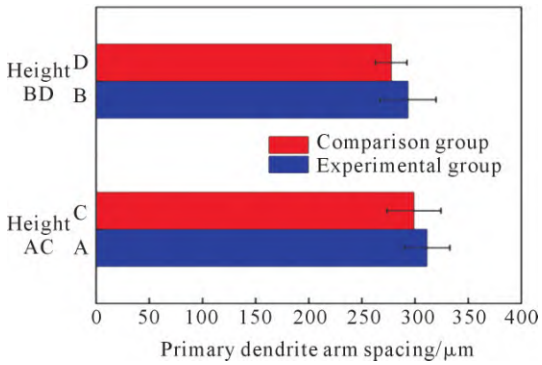


图 3 实验组 A、B 和对比组 C、D 的一次枝晶间距

Fig.3 Primary dendrite arm spacing for experimental groups A and B and control groups C and D

晶间距呈现扩大趋势。同时，由于枝晶间存在竞争生长机制，某些枝晶的生长可能被抑制，这造成后凝固区域枝晶数目减少，枝晶间距增大[30]。

图 $2a_2$~d_2 分别是实验组 A、B 与对比组 C、D 的枝晶间共晶组织。在型芯撑内部可以观察到 γ/γ′共晶组织，芯撑内部的 γ/γ′共晶相尺寸小于下端叶片基体的 γ/γ′共晶相尺寸，但插入 Pt 丝型芯撑的叶片芯撑下端叶片基体的 γ/γ′共晶相尺寸略大于未插丝叶片的 γ/γ′共晶相尺寸。图 4 为 A、B、C、D 位置的枝晶干 γ/γ′共晶相体积分数统计。如图所示，实验组 A、B 的 γ/γ′共晶相含量分别为 2.7%、4.6%，对比组 C、D 的 γ/γ′共晶相含量分别为 2.2%、2.3%。从统计结果分析，对比同一位置的 AC 的 γ/γ′共晶相含量从 2.2%增加到 2.7%，对比另外一组 BD，γ/γ′共晶相含量从 2.3%增加到 4.6%，可见插入 Pt 丝增型芯撑加了 γ/γ′共晶相含量，会增加后续热处理工艺难度[31]。

赵运兴等[32]的研究表明，γ/γ′共晶相含量受铸件局部凝固条件影响。在 Pt 丝型芯撑插入的位置，为了固定型芯撑，通常需要在芯撑与叶片连接处进行补蜡，造成芯撑插入部位的壁厚增加，导致在定向凝固过

中国知网 https://www.cnki.net

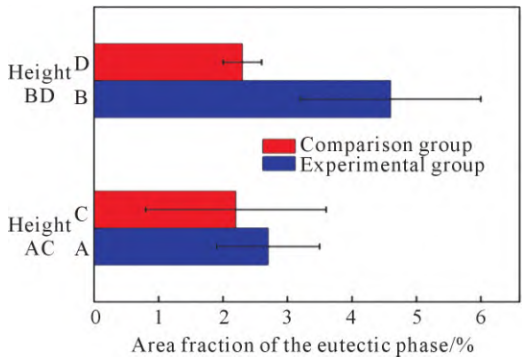


图 4 实验组 A、B 和对比组 C、D 的共晶相含量

Fig.4 Area fraction of the eutectic phase for experimental groups A and B and control groups C and D

程中该位置的散热和凝固速率较慢，会出现较宽的糊状区，元素偏析更为严重，有利于产生大块的共晶团，进而导致在芯撑附近 γ/γ′共晶相的含量提高。同时，合金成分也是 γ/γ′共晶相含量的重要影响因素，Pt 元素扩散对 γ/γ′共晶相含量的影响将在下文详细讨论。

如图 $2a_3$~d_3 和 a_4~d_4 分别展示了实验组 A、B 与对比组 C、D 的枝晶干和枝晶间的 γ′相形貌。枝晶干处 γ′相形状不规则，尺寸相对较小，而枝晶间部位 γ′相相对较大，且形貌更加不规则。插入 Pt 丝型芯撑的叶片芯撑下端叶片基体的枝晶干和枝晶间的 γ′相与未插入 Pt 丝型芯撑叶片枝晶干和枝晶间的 γ′相形貌没有明显差异。图 5 对 A、B、C、D 位置的枝晶干 γ′相体积分数进行了统计。如图所示，实验组 A、B 的 γ′相体积分数分别为 67%、62%，对比组 C、D 的 γ′相体积分数分别为 64%、66%。对比同一位置 A、C 的 γ′相体积分数从 67%减小到 64%，对比另外一组 B、D，γ′相体积分数从 62%扩大到 66%，由结果可见，插入 Pt 丝型芯撑对单晶叶片 γ′相体积分数并没有明显的影响。

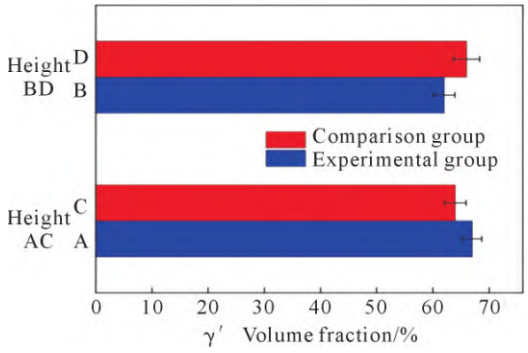


图 5 实验组 A、B 和对比组 C、D 的枝晶干 γ′相体积分数

Fig.5 Volume fraction of the γ′ phase for experimental groups A and B and control groups C and D

2.2 Pt 丝型芯撑对薄壁单晶涡轮叶片元素偏析的影响规律

为探究 Pt 丝型芯撑区域 Pt 元素的扩散是否会对薄壁单晶涡轮叶片的显微组织偏析行为产生影响，本研究通过微区 XRF 对比测试了实验组 A、B 与对比组 C、D 中 Mo、Cr、Al、W、Co、Re、Ta、Pt 的分布情况。图 6 为 XRF 测得的微区元素分布热图，测量区域面积为600 μm×600 μm(图中红色框区域)。需要说明的是，本研究采用微区 XRF 对 Pt 元素进行检测，但由于其含量低于仪器检测限(0.1%，质量分数)，且 Pt 的特征谱线与 Ta 存在部分重叠，未能获得明确的 Pt 信号。因此，本研究中观察到的偏析加剧现象其原因尚无法通过直接成分测量来确认。但插入 Pt 丝型芯撑的叶片与未插入叶片相比，在枝晶间距、共晶含量及元素偏析程度上均表现出系统性差异，这些差异的变化趋势与文献中 Pt 元素对镍基高温合金组织影响的报道一致[28-29]；南晓斌等[11]在板状试样中也通过其他检测手段证实了 Pt 的扩散及其对偏析的影响。综合上述间接证据推断，Pt 丝型芯撑中的 Pt 元素在定向凝固过程中向基体发生扩散，这是造成上述偏析加剧及相应组织变化的重要诱因。

在单晶高温合金的定向凝固过程中，由于引入了大量高熔点的难熔元素如 Re、W 等，而其在高温下的扩散速率较低，难以通过扩散实现有效均匀化，从而导致元素在枝晶干和枝晶间产生偏析。这种偏析行为可以用偏析系数 K′来定量描述，其定义为枝晶干区域元素浓度 Cd 与枝晶间区域元素浓度 Ci 的比值，K'值大于 1 的元素倾向于在枝晶干富集为负偏析，而 K'值小于 1 的元素则富集于枝晶间为正偏析；元素的 K'值越接近 1，代表元素的偏析倾向较弱[33]。图 7 是实验组 A、B 与对比组 C、D 元素偏析比 K'对比图，Mo、Al 和 Ta 的 K'值小于 1，主要偏析于枝晶间区域；Re、W 和 Co 的 K'值大于 1，倾向于偏析在枝晶干区域；而 Cr 的 K′值约等于 1，仅在枝晶间有轻微偏析。对比实验组 A、B 和对比组 C、D 的元素偏析情况表明，插入 Pt 丝型芯撑后，元素的偏析情况均有所加剧。在定向凝固过程中，型芯撑中的 Pt 元素与叶片基体元素发生互扩散，Pt 元素扩散进入叶片基体。有研究指出[28]，Pt 元素会增大合金的固液相线温度差，导致元素的偏析情况加剧。

值得注意的是，从图 7 中可以发现难熔元素 Re、W 的偏析比 K'的值变化最为明显，尤其是 Re 元素。实验组 A、B 中 Re 元素的偏析比 K'的值分别为 3.34、3.37 左右，对比组 C、D 中 Re 元素的偏析比 K'的值为 2.23、2.66 左右，对比结果显示，插入 Pt 丝型芯撑的叶片中 Re 元素的偏析比 K'的值扩大了超过 1，这表明插入 Pt 丝型芯撑显著加剧难熔元素 Re 元

中国知网 https://www.cnki.net

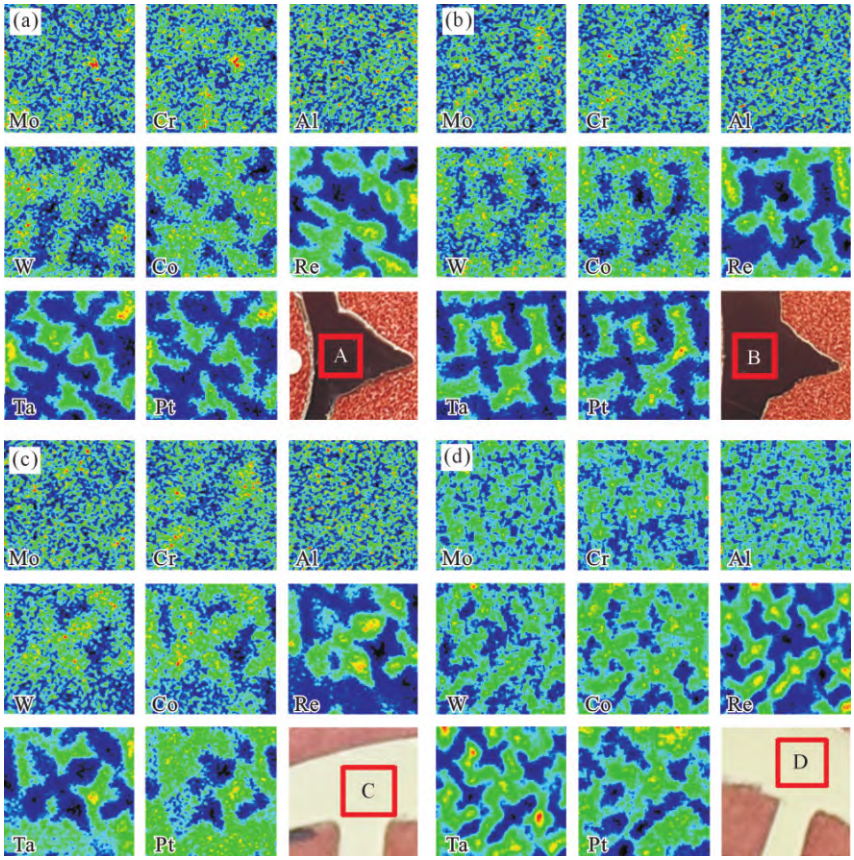


图 6 元素分布热度图:(a) 实验组 A 位置;(b) 实验组 B 位置;(c) 对比组 C 位置;(d) 对比组 D 位置

Fig.6 Element distribution heatmaps: (a) location of experimental group A; (b) location of experimental group B; (c) location of control group C; (d) location of control group D

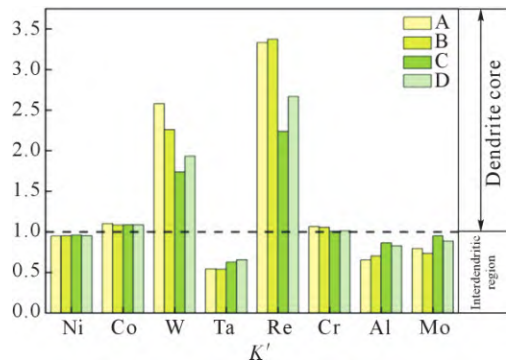


图 7 实验组 A、B 和对比组 C、D 数不同元素的偏析比 K'

Fig.7 Segregation ratio K' of different elements in experimental groups A and B and control groups C and D

素的偏析。偏析程度的加剧对微观组织产生了可观察的影响。Al、Ta 等共晶形成元素的枝晶间偏析加重,直接表现为 γ/γ′共晶相含量的增加(图 4);Re 和 W 偏析比的增大则扩大了枝晶干与枝晶间的成分差异,这会给后续固溶热处理时带来一定困难。此外,Re 和 W 作为 TCP 相的主要形成元素, 其偏析加剧理论上会增加 TCP 相在枝晶干析出的倾向,尽管本研究中未直接观察到 TCP 相,但这一潜在风险值得注意。相比之下,Pt 引起的偏析变化对 γ′强化相的体积分数影响不大(图 5)。

2.3 Pt 丝型芯对薄壁单晶涡轮叶片缺陷的形成机制

Pt 丝型芯撑在蜡模阶段植入,为实现型芯撑的固定,需在芯撑根部进行补蜡处理,该工艺不可避免的会在叶片表面形成结构凸起,进而产生新的应力集中区域,使局部积累大量塑性形变。该类缺陷可能会在后续热处理阶段作为再结晶缺陷形核生长的驱动力,对叶片产生不利影响。为了明确由于插入型芯撑所产生的叶片表面结构变形而产生的叶片缺陷的形成机制,如应力集中等,任意抽取插入型芯撑叶片的实验组 A、B 组与对比组 C、D 进行 EBSD 表征,分析其取向变化情况以及应力集中情况。

表1 GND值统计表

Tab.1 Statistical table of GND values

Group	Mean/(10^{14} m^{-2})
A	0.63
B	0.30
C	0.11
D	0.07

图 8 展示了实验组(A、B)与对比组(C、D)的 EBSD 分析结果。其中,图 $8a_1$~b_1 为实验组 A 和 B 的取向成像图 (IPF 图), 在铂金丝内部的黑色虚线区域内,可观察到显著的枝晶生长方向偏转,通过对比其枝晶取向与理想 <001> 取向的偏离角(β)来表征

中国知网 https://www.cnki.net

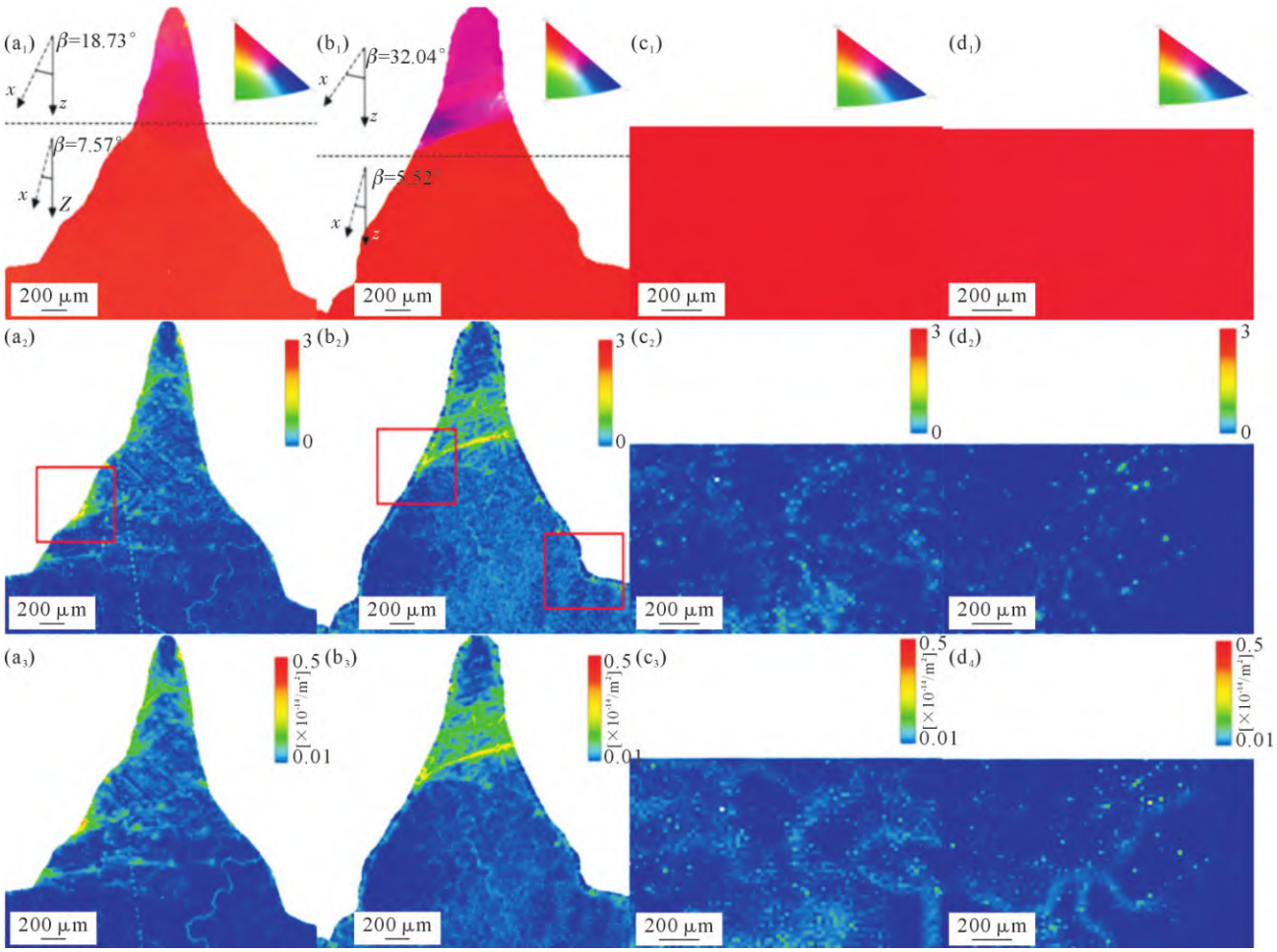


图 8　不同区域 EBSD 图像：(a_1~a_3) 实验组 A 的 IPF、KAM 和 GND 图；(b_1~b_3) 实验组 B 的 IPF、KAM 和 GND 图；(c_1~c_3) 对比组 C 的 IPF、KAM 和 GND 图；(d_1~d_3) 对比组 D 的 IPF、KAM 和 GND 图

Fig.8　EBSD images from different regions: (a_1~a_3) IPF, KAM and GND maps of experimental group A; (b_1~b_3) IPF, KAM and GND maps of experimental group B; (c_1~c_3) IPF, KAM and GND maps of control group C; (d_1~d_3) IPF, KAM and GND maps of control group D

枝晶在芯撑内部的取向偏转程度。定量分析表明，实验组 A 中，叶片基体 β 角为7.57°，而铂金丝内部枝晶的 β 角增大至 18.73°，最大取向差值实验组 B 中，叶片基体 β 角为 5.52°，而铂金丝内部枝晶的 β 角增大至 32.04°。而整体对比图 $8a_1$~d_1 显示，插 Pt 丝的叶片基体与未插 Pt 丝的叶片基体处未发现明显的取向变化，取向变化仅出现在芯撑内部。

核平均取向差 (kernel average misorientation, KAM)是指 EBSD 测试中每个数据点与其周围若干邻近点之间取向差的平均值，常用来表征局部塑性应变或晶格畸变的程度。结合图 $8a_2$~b_2 所示的 KAM 图可以发现，在枝晶发生明显取向偏转的区域，KAM值明显升高，表明该区域存在较大的局部残余应变，即由晶格畸变引起的应力集中。取向偏离角更大的试样 B(β=32.04°)，其对应区域的 KAM 值也更高，说明应力集中程度与枝晶偏转程度呈正相关。同时，在 Pt 丝与叶片连接的结构突变处(图中红色框内)同样观察到类似的应变集中现象。

图 $8a_3$~d_3 是实验组 A、B 和对比组 C、D 的几何必须位错密度(geometrically necessary dislocation, GND)图，结果显示在芯撑内部取向偏转处以及芯撑下部结构突变处，GND 值明显升高。结合表 1 GND 值的统计表，实验组 A、B 的平均 GND 值分别为 $0.63\times10^{14}/m^2$ 和 $0.3\times10^{14}/m^2$，对比组 C、D 的平均 GND 值分别为 $0.11\times10^{14}/m^2$ 和 $0.07\times10^{14}/m^2$，插入 Pt 丝型芯撑的样品的平均 GND 值显著高于未插入 Pt 丝型芯撑的样品，同时枝晶偏转角度更大的样品 A 的几何必须位错密度显著高于样品 B，进一步证明插入型芯撑极易在后续热处理阶段造成再结晶缺陷。

理想定向凝固过程中的固液界面呈“平直”态势，而由于在抽拉过程中存在径向散热，导致铸件边缘温度往往低于中心温度，造成了固液界面区间的等温线下凹，固液界面呈现“下凹”态势[34]，如图 9 中蓝色线条所示，这种下凹的固液界面形态可能会造成枝晶生长不稳定。同时，侧壁的热通量加剧了等温

中国知网　https://www.cnki.net

线的弯曲并增加热应力[35]，随着枝晶生长，横向收缩增大，可能导致枝晶取向偏转和应力集中。有文献指出[10]，Pt 丝型芯撑在凝固过程中迅速溶解，这一过程往往只需要很短的时间，而定向凝固过程相对于 Pt 丝溶解扩散的时间要慢的多，这代表 Pt 丝型芯撑处形成一个空腔，加上 Pt 丝型芯撑与叶片连接处形成几何变形的突变截面，表面横向应力突然减小[36-37]，二次枝晶向芯撑内部空腔快速生长，二次枝晶上生长出新的三次枝晶填满空腔。三次枝晶的生长存在不稳定性，可能会与初始取向存在一定偏转，而这种取向偏转往往伴随着应力集中和更高的几何必须位错密度。

此外，在单晶涡轮叶片的定向凝固过程中，Pt 丝型芯撑与叶片主体之间存在显著的尺寸差异，导致二者凝固并不同步。当模壳被向下抽拉越过型芯撑位置时，尺寸较小的型芯撑会先凝固定型，而同一水平高度上截面尺寸较大的叶片部分后凝固，后凝固的叶片部分会产生收缩。由于芯撑的一端固定在模壳中，另一端在叶片上，叶片凝固收缩以及模壳从高温到低温收缩所产生的应力都将作用在尺寸细小的芯撑上，芯撑会受到拉应力[16]。同时，在定向凝固结束后，从铸件上清除模壳的机械振动能也可能导致芯撑处受到额外的外力，以上过程都有可能造成芯撑处引入新的应力从而在后续热处理过程中导致再结晶缺陷。

综上所述，Pt 丝型芯撑在定向凝固过程中固溶，芯撑内部的 Pt 元素与叶片基体发生互扩散，一方面 Pt 丝型芯撑的插入在叶片基体中引入 Pt 元素，导致一次枝晶间距增大、元素偏析情况加剧、γ/γ′共晶含量增加，进而影响合金的力学性能。但由于在实际薄壁单晶涡轮叶片制备过程中，往往采用体积极小的芯撑，这代表 Pt 元素含量极低，且标准热处理后，γ/γ′共晶大部分可有效消除且元素偏析程度减轻，故在本研究中 Pt 丝型芯撑对薄壁单晶涡轮叶片组织以及偏析情况的存在一定影响但可以通过热处理等工艺手段有效降低。另一方面，Pt 丝型芯撑的引入不可避免地造成了应力集中，增大了后续热处理工序发生再结晶的可能，同时芯撑内部取向发生偏转，取向偏转区同样形成了新的应力集中区域。为了避免再结晶晶粒侵入薄壁叶片基体，建议在热处理阶段之前采用表面化学腐蚀[38-39]的方法将 Pt 丝型芯撑的端点去除而不引入新的应变区。

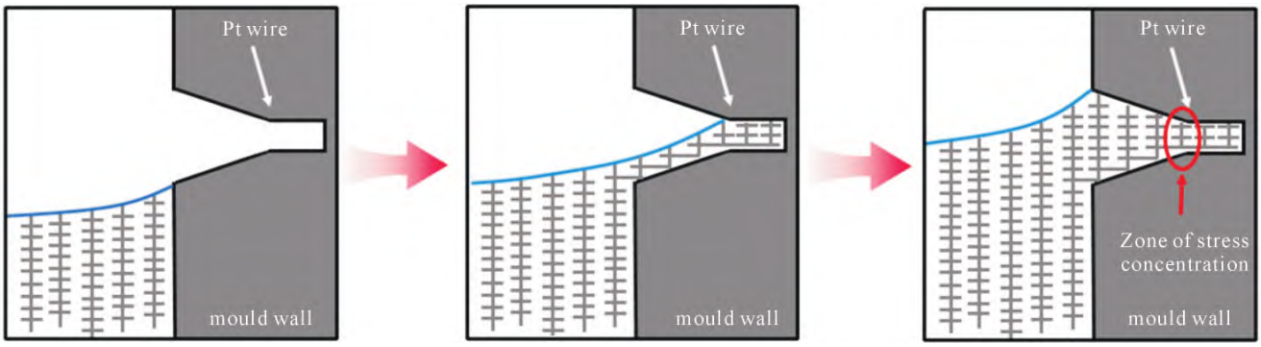


图 9 Pt 丝型芯撑位置枝晶生长示意图

Fig.9 Illustration of dendritic growth around the Pt wire core pin

3 结论

(1)Pt 元素在薄壁单晶涡轮叶片定向凝固制备过程中发生充分的扩散，但并未出现异质界面，对一次枝晶间距、γ/γ′共晶相均有略微影响，一次枝晶间距从 277.6、299.0 μm 左右略微扩大到 293.4、311.2 μm 左右，γ/γ′共晶相含量从 2.2%、2.3%增加到 2.7%、4.6%左右，对 γ′强化相的影响不明显。

(2)Pt 元素加剧了元素偏析，显著增加了难熔元素 Re、W 的偏析，这会给叶片的固溶过程带来困难，后续叶片固溶工艺需要充分评估型叶片基体处相应位置元素均匀性与叶片其他部位成分均匀性对后续时效和叶片力学性能的影响。

(3)Pt 丝型芯撑的插入在叶片表面造成了凸起结构，造成了新的应力集中区域，同时芯撑内部枝晶取向发生偏转，积累了大量的形变能，极易导致其作为驱动力促进再结晶在该区域形核生长，因此建议在热处理前将 Pt 丝型芯撑去除避免后续再结晶风险。

参考文献：

[1] REED R C. The superalloys: Fundamentals and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

[2] HARRIS K, ERICKSON G L, SCHWER R E. Directionally solidified and single-crystal superalloys[M]//ASM Handbook Committee. Properties and selection: Irons, steels, and high-performance alloys. Materials park: ASM International, 1990: 995-1006.

[3] Rolls Royce. The jet engine[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

[4] GROMADA M, ŚWIECA A, KOSTECKI M, OLSZYNA A, CY-

中国知网 https://www.cnki.net

GAN R. Ceramic cores for turbine blades via injection moulding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 107-112.

[5] 王权威，王程冬，鲁中良，苗恺，艾子超，李涤尘. 面向单晶涡轮叶片的氧化硅基陶瓷型芯快速成形性能[J]. 材料工程，2022, 50 (7): 51-58.
WANG Q W, WANG C D, LU Z L, MIAO K, AI Z C, LI D C. Performance of silicon oxide-based ceramic cores made by rapid prototyping for single crystal turbind blades[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(7): 51-58.

[6] 卢佳浩，蔡基利，蔡超，史玉升. 陶瓷型芯在热等静压技术中的应用前景与展望[J]. 稀有金属材料与工程，2025, 54(4): 1072-1086.
LU J H, CAI J L, CAI C, SHI Y S. Prospect and outlook of ceramic cores in hot isostatic pressing process [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2025, 54(4): 1072-1086.

[7] 单广铭. 高温合金芯撑在熔模精铸空心叶片上的应用[J]. 航空工艺技术，1987(5): 25-28.

[8] JAGO M J. Investment casting: US, 505250[P]. 1996-04-09.

[9] 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司. 一种用金属芯撑增加单晶叶片型芯强度的方法：CN201310001000.9[P]. 2013-04-24.
AECC Shenyang Liming Aero-Engine(Group) Co., Ltd. A method to enhance the strength of single-crystal blade cores with metal cores: CN201310001000.9[P]. 2013-04-24.

[10] POWER D C. Palladium alloy pinning wires for gas turbine blade investment casting[J]. Platinum Metals Review, 1995, 39(3): 117-126.

[11] 南晓斌，袁晓飞，吴剑涛，郭小童，曹晓卿. Pt 丝型芯撑对 DD5 单晶高温合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2023, 52(3): 1007-1014.
NAN X B, YUAN X F, WU J T, GUO X T, CAO X Q. Effect of core support made of Pt on the microstructure and property of DD5 single crystal superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(3): 1007-1014.

[12] SEETHARAMAN V, CETEL A D. Thickness debit in creep properties of PWA 1484[A]. Superalloys 2004[C]. Warrendale: TMS, 2004. 207-214.

[13] WU J J, MENG J, ZOU M K, YAO L N, WANG X G, YANG Y H, ZHOU Y Z, SUN X F. Effect of wall thickness on micropores and stress-rupture properties of a single-crystal nickel-based superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 872: 144941.

[14] 吴佳慧，曹铁山，许巍，陈家万，曹腊梅，张悦，程从前，赵杰. DD10 单晶合金高温持久断裂损伤特征及薄壁效应[J]. 航空材料学报，2025, 45(5): 102-111.
WU J H, CAO T S, XU W, CHN J W, CAO L M, ZHANG Y, CHENG C Q ZHAO J. High-temperature stress rupture damage characteristics andthin-wall effect of DD10 single crystal alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(5): 102-111.

[15] 许瀚元，黄太文，艾诚，苗琳琨，张军，刘林. 镍基单晶高温合金涡轮叶片薄壁效应研究进展[J]. 稀有金属材料与工程，2024, 53 (5): 1486-1492.
XU H Y, HUANG T W, AI C, MIAO L K, ZHANG J, LIU L. Research progress on thin-wall effect of nickel-based single crystal superalloy turbine blades[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(5): 1486-1492.

[16] 姜卫国，董琳，李凯文，胡玉昆，张珊珊. Pt 丝对单晶高温合金叶片表层时效组织的影响[J]. 材料热处理学报，2024, 45(8): 108-117.
JIANG W G, DONG L, LI K W, HU Y K, ZHANG S S. Effect of Pt pinning wires on aging microstructure of surface layer of single crystal superalloy turbine blade [J] Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(8): 108-117.

[17] HU X, XU F Z, GAO M L, XIA S J, LIANG S H, HUANG C F, MA D X, LI Q L. An annealing strategy for inhibiting recrystallization in nickel-based single-crystal superalloys[J]. Materials, 2025, 18(14): 3341.

[18] WANG R N, XU Q Y, SU X L, LI Z L, LIU B C. Influence of gibbosity on recrystallization behavior of single crystal blade casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 259: 169-179.

[19] WANG B Q, ZENG L, REN N, XIA M X, LI J G. A comprehensive understanding of grain selection in spiral grain selector during directional solidification[J]. Journal of Materials Science & Technology,2022,102(7): 204-212.

[20] WANG B Q, ZENG L, REN N, XIA M X, REN N, LI J G. Substrate stimulating technique for Ni-based single crystal superalloy preparation during direction solidification [J]. Materials & Design, 2022, 224: 111334.

[21] 朱霄龙，俞泽丰，李克，黄晓鸣，陈森鸿，陈浩天，王晓珊，曾龙，夏明许，李建国. 定向凝固工艺参数对三代镍基单晶高温合金铸态组织影响研究[J]. 精密成形工程，2025, 17(11): 37-46.
ZHU X L, YU Z F, LI K, HUANG X M, CHEN S H, CHEN H T, WANG X S, ZENG L, XIA M X, LI J G. Influence of directional solidification process parameters on casting structure of third-generation nickel-based single-crystal superalloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(11): 37-46.

[22] 张金，张巍，金磊，宋照伟，刘鸿羽，李彪，姜宜忠. 熔模铸造用陶瓷型芯材料的研究应用现状及展望[J]. 特种铸造及有色合金，2024, 44(12): 1687-1696.
ZHANG J, ZHANG W, JIN L, SONG Z W, LIU H Y, LI B, JIANG Y Z. Research status and prospects on ceramic core materials for investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(12): 1687-1696.

[23] 任能. 镍基单晶高温合金定向凝固中杂晶和雀斑缺陷的预测与控制[D]. 上海：上海交通大学，2022.
REN N. Prediction and control of stray grain and freckle in the directional solidification of nickel-based single-crystal superalloys [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022

[24] STRICKLAND J, NENCHEV B, DONG H B. On directional dendritic growth and primary spacing—A review [J]. Crystals, 2020, 10(7): 627.

[25] HUNT J D. Solidification and casting of metals[M]. London: Metals Society, 1979.

[26] KURZ W , FISHER D J. Dendrite growth at the limit of stability: Tip radius and spacing[J]. Acta Metallurgica, 1981, 29(1): 11-20.

[27] TRIVEDI R. Interdendritic spacing: Part II. A comparison of theory and experiment[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,

中国知网　https://www.cnki.net

1984, 15(6): 977-982.

[28] 林惠文，周亦胄，张炫，金涛，孙晓峰. 一种含 Pt 镍基单晶高温合金的凝固行为[J]. 金属学报，2013, 49(12): 1567-1572.
LIN H W, ZHOU Y Z, ZHANG X, JIN T, SUN X F. Solidification behavior of a Pt-containing Ni-based single crystal superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(12): 1567-1572.

[29] 林惠文，刘纪德，周亦胄，金涛，孙晓峰. Pt 对镍基单晶高温合金持久性能的影响[J]. 金属学报，2015, 51(1): 77-84.
LIN H W, LIU J D, ZHOU Y Z, JIN T, SUN X F. Influence of Pt on the creep rupture properties of Ni-based single crystal superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(1): 77-84.

[30] 高斯峰. 镍基单晶高温合金微观组织的研究[J]. 热加工工艺，2015, 44(21): 79-81
GAO S F. Study on microstructures of nickel based single crystal superalloys[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(21): 79-81.

[31] 赵玉涛，朱霄旭，梁向锋. 一种镍基单晶涡轮叶片的微观组织研究[J]. 热加工工艺，2019, 48(4): 48-51.
ZHAO Y T, ZHU X X, LIANG X F. Study on microstructure of a nickel-based single crystal turbine blade[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(4): 48-51.

[32] 赵运兴，员莹莹，马德新，徐维台，徐福泽，魏冰. 高温合金 CMSX-4 和 DD419 单晶铸件中共晶含量的试验研究[J]. 航空制造技术，2022, 65(17): 74-80.
ZHAO Y X, YUAN Y Y, MA D X, XU W T, XU F Z, WEI B. Experimental investigation on eutectic fraction in single crystal castings of superalloy CMSX-4 and DD419[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 74-80.

[33] ZHAO Y S, ZHANG M, YANG L Y, GUO Y Y, ZHANG J, LU H, CHEN Y H, TANG D Z. Effect of the withdrawal rate on the microstructure and thermal durability of a third-generation single crystal superalloy[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2021, 31(3): 493-500.

[34] 玄伟东. 高温合金定向凝固杂晶形成规律及其控制研究[D]. 上海：上海大学，2013.
XUAN W D. Investigation on formation and control of stray grains in directionally solidified Ni-based superalloy[J]. Shanghai: Shanghai University, 2013.

[35] YANG L W, REN N, XIA M X LI J, LI J G. Multiphysics modeling of dendritic thermomechanical deformation during the directional solidification of nickel-based single-crystal superalloys[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2025, 32(10): 2510-2522.

[36] HUANG Y Q, SHEN J, WANG D, XIE G, LU Y Z, LOU L H, ZHANG J. Evolution of sliver defect in Ni-based single crystal superalloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(12): 6364-6372.

[37] YANG L W, REN N, LI J, PANWISAWAS C, ZHANG Y C XIA M X, DON H B, LI J G. Thermal-solutal convection-induced low-angle grain boundaries in single-crystal nickel-based superalloy solidification[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 208: 214-229.

[38] SALKELD R W, FIELD T T, AULT E A. Preparation of single crystal superalloys for post-casting heat treatment: US, 5413648 [P]. 1995-05-09.

[39] MATHUR H N, PANWISAWAS C, JONES C N, REED R C, RAE M F. Nucleation of recrystallisation in castings of single crystal Ni-based superalloys[J]. Acta Materialia, 2017, 129: 112-123.

(责任编辑：宫文婧)

中国知网 https://www.cnki.net