

文章编号: 1000-8055(2023)01-0041-06

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210438

单晶叶片表层组织转变影响因素及其控制方法

李世峰, 马护生

(中国空气动力研究与发展中心 空天技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 针对单晶叶片铸件在高温热处理后, 极易在结构畸变区域发生结构再结晶问题, 本研究提出了一种基于单晶再结晶临界应力特性的叶片结构残余应力控制方法, 旨在通过研究单晶合金再结晶的临界应力特性, 并结合结构细节优化设计方法, 将叶片结构残余应力水平控制在单晶再结晶临界应力的安全区域内。结果表明: 诱发单晶叶片结构再结晶的两大因素是温度和应力集中水平, 再结晶起源于不连续的胞状组织, 且发生单晶再结晶时的临界应力与叶片结构设计参数、热处理温度之间存在一定的函数关系, 经真实叶片试验验证, 证实该方法可实现单晶叶片结构完整性与表层组织连续性的控制, 有效抑制单晶叶片表层组织的转变。

关 键 词: 单晶叶片; 结构再结晶; 临界应力; 结构残余应力; 表层组织连续

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Influencing factors and control methods of surface microstructure transformation of single crystal blade

LI Shifeng, MA Husheng

(Institute of Space Technology,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: The problem of surface recrystallization was found on the structural distortion region of single crystal blade after the high temperature heat treating. To solve this problem, a method was proposed based on critical stress of recrystallization and residual stress of structure. With the help of structural optimization technology, the study showed that the critical stress happened justly under the recrystallization of the single crystal blade, and the residual stress level of structure was no more than the critical stress of recrystallization stress. Results showed that the temperature and stress concentration level were two major factors inducing structural recrystallization, and the recrystallization was originated from discontinuous cellular microstructure of the single crystal blade. Meanwhile, the critical stress of recrystallization was used to establish a relationship with the structure design parameters and the heat treatment temperature, then, the test validation work was completed for the real blade. This method is effective to restrain the structural recrystallization of single crystal blade and control the structural integrity and surface microstructure continuity.

Keywords: single crystal blade; structural recrystallization; critical stress; residual stress of structure; surface microstructure continuity

单晶高温合金具有较高的耐热能力和良好的高温力学性能, 因此被国内外先进航空发动机涡

轮叶片广泛应用, 但由于单晶合金减少了晶界强化元素如 C、B、Zr、Hf、Ce 等, 因而任何含有与

收稿日期: 2021-08-10

作者简介: 李世峰(1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事航空发动机设计方面的研究。

引用格式: 李世峰, 马护生. 单晶叶片表层组织转变影响因素及其控制方法[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 41-46. LI Shifeng, MA Husheng. Influencing factors and control methods of surface microstructure transformation of single crystal blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 41-46.

应力轴垂直的晶界及缺陷,如雀斑和再结晶晶粒等,将成为单晶叶片性能薄弱的区域^[1-2]。目前,从国内外学术界研究和工业界应用情况来看,单晶叶片最突出的难点问题在于研制和服役过程局部出现表层组织转变现象,这与其结构复杂程度和制造技术难度息息相关,也更说明对应设计与制造技术尚未完全掌握。

据统计,世界各国航空发动机发生了多起与单晶叶片再结晶有关的叶身裂纹和断裂故障,导致了飞行事故的发生^[3-5]。与国外相比,国内单晶叶片研制过程因表层产生表面塑变再结晶(surface plastic recrystallization, SPR)和表面结构再结晶(surface structure recrystallization, SSR)等非连续性组织而导致叶片失效的概率达 30% 以上,这成为制约我国新一代航空发动机发展的壁垒。因此,为充分发挥单晶材料的力学性能潜力,同时保障单晶叶片的复杂结构完整性与材料组织连续性,开展单晶叶片表层组织转变机理研究与有效控制技术深化研究,将成为一个亟待解决的核心技术。

1 单晶叶片表层组织转变研究现状

围绕镍基单晶复杂叶片表层组织转变及其控制问题,国内外学者经过长期不懈的努力已做了大量研究工作。Porter 等^[6-7]、Takeo 等^[8]研究表明,在较大的冷变形和一定温度下,单晶合金表面会发生再结晶;Bond 等^[9]、Wang 等^[10]和 Jo 等^[11]研究了镍基单晶高温合金再结晶微观结构演变和表面再结晶,得出再结晶是以不连续的胞状结构开始萌生长大的;Cox 等^[5]研究发现了 CMSX-4 镍基单晶高温合金表面出现再结晶的条件;Takeo 等^[8]在 900 °C 和 1 000 °C 下对 Ni-20Cr 单晶高温合金进行低应力蠕变试验时,均发现了动态再结晶组织;Khan 等^[12]研究了再结晶层相对厚度对定向凝固高温合金 MAR-M247 高温持久寿命的影响,研究结果表明再结晶层的相对厚度越大,高温持久寿命下降越多。国内北京航空材料研究院、中国钢铁研究院等对镍基单晶高温合金再结晶的产生条件,以及再结晶层的组织变化进行了大量研究^[13-15];中国科学院金属研究所等^[16-17]通过分析不同碳含量对单晶高温合金在不同应力状态下再结晶倾向的影响研究,指出铸态 γ 相的溶解是再结晶晶粒形成的重要条件。

实际上,镍基单晶叶片表面再结晶主要分两类:一类是 SPR,指外境因素导致叶片表面局部产生一定的应力集中,当应力达到一定值后,在后续热处理后表面产生的再结晶现象,目前该类 SPR 问题已基本解决;另一类是 SSR,指受叶片复杂空腔结构因素的限制,导致叶片铸件局部凝固冷却不均,进而形成较大的局部铸造残余应力,当应力达到一定值后,在后续热处理后表面产生的再结晶现象,但该类问题由于受特定叶片复杂冷却结构的限制,仅在材料、工艺方面上做了优化,起到有限的减缓作用,但本质上没彻底解决。由此看来,国内外针对单晶组织转变的研究主要集中在合金元素、变形程度、热处理温度及时间、变形速率、制备技术等,与 SPR 机理与控制技术相比,SSR 机理与控制技术一直是许多研究者回避的难题,在一定程度上已成为制约新一代新型航空发动机研制的堡垒,因此揭示特定复杂结构单晶叶片的表层组织转变机理及其控制无疑成为一个亟待解决的核心技术。

2 单晶叶片表层组织转变的机理

2.1 技术思路概述

针对复杂薄壁结构的单晶涡轮叶片而言,要揭示叶片表层的组织转变机理和根除叶片表层 SSR 现象,切实有效的方法之一:基于 SSR 临界应力与结构残应力映射关系的结构优化设计。即首先探索镍基单晶发生表层 SSR 时的临界条件,其次建立临界条件与结构残应力映射关系模型,再通过多约束条件下的叶片结构优化设计,改善整体应力的分布和降低结构残余应力,使残余应力不超过再结晶组织萌生所需驱动力,进而达到抑制和消除单晶叶片表层 SSR 组织的目标。

2.2 探索 SSR 临界条件

2.2.1 表层再结晶复现实验

首先采用纯净的 DD6 母合金锭,在 ZGD-1 型真空感应炉中用螺旋选晶法定向凝固单晶试棒,并通过劳埃 X 射线法测定取向以满足晶体生长方向 [001] 与主应力轴的偏角不大于 12°;然后线切割截取试棒 $\phi 10\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 以及端面用 0#~2000# 水磨砂纸抛光;再用压头 $\phi 5\text{ mm}$ 的布氏硬度机按正交试验法制备多组不同载荷下的压痕试样;最后将试样放入箱式真空热处理炉中进行退火处理,为防止试样在热处理过程中的高温氧化,试样必须封入石英管中。

经腐蚀后, 利用光学显微镜和扫描电镜进行再结晶组织形貌观察, 发现不同载荷试样的压痕

区域存在不同程度的组织转变现象, 再经统计与分析, 得出如表 1 所示的结果。

表 1 实验结果对比分析

Table 1 Comparative analysis of experimental results

分类	编号	载荷 F/N	热处理参数		实验结果
			温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h	
I	1	1 000	1 100	2.5	γ 和 γ' 相未见异常。
	2	1 000	1 150	2.5	不连续的胞状组织。
	3	1 000	1 200	2.5	大量胞状组织, 部分枝晶杆区出现不连续分布的晶粒。
	4	1 000	1 250	2.5	晶粒明显长大, 开始聚集。
II	7	750	1 150	2.5	γ 和 γ' 相未见异常。
	8	750	1 200	2.5	不连续的胞状组织。
	9	750	1 250	2.5	大量胞状组织, 部分枝晶杆区域出现不连续分布的再结晶晶粒, 数量少, 分布零星, 晶粒彼此分隔。
III	13	500	1 200	2.5	γ 和 γ' 相未见异常。
	14	500	1 250	2.5	γ' 相溶解, 枝晶杆区域出现少量不连续的胞状结构。

实验结果表明: 当压痕载荷为 500 N 时, 经 1 250 $^{\circ}\text{C}$ /2.5 h 热处理后, 压痕区域发生 I 相溶解, 部分表层枝晶杆区域出现少量不连续的胞状结构, 如图 1(a)所示; 当压痕载荷为 750 N 时, 经 1 250 $^{\circ}\text{C}$ /2.5 h 处理后, 压痕区域出现大量胞状组织, 部分枝晶杆区域出现不连续分布的再结晶晶粒, 数量少, 分布零星, 晶粒彼此分隔; 当压痕载荷为 1 000 N 时, 经 1 250 $^{\circ}\text{C}$ /2.5 h 处理后, 再结晶晶粒明显长大并开始聚集, 如图 1(b)示。

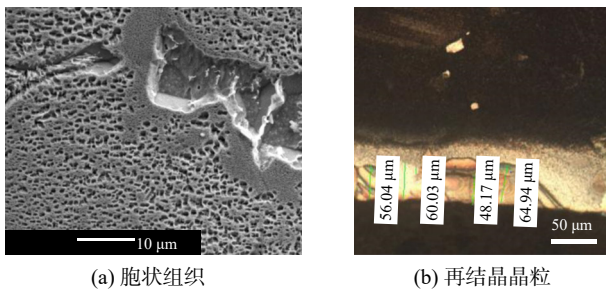


图 1 再结晶组织形貌

Fig. 1 Morphology of recrystallization microstructure

由表 1 同时发现, 当压痕载荷为 500 N 时, 经 1 250 $^{\circ}\text{C}$ 热处理后, 出现少量不连续的胞状组织; 当压痕载荷为 750 N 时, 经 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 热处理后, 出现不连续的胞状组织; 当压痕载荷为 1 000 N 时, 经 1 150 $^{\circ}\text{C}$ 热处理后, 不连续的胞状组织。实验说明, 温度和载荷(应力集中水平)对再结晶的形成有直接的影响, 当变形产生的应力集中水平与热处理温度满足一定的临界函数关系时, 单晶材

料就会萌生再结晶组织, 且再结晶组织起源于不连续的胞状组织; 在载荷不变的条件下, 处理温度越高, 越易生成再结晶晶粒; 在相同热处理温度下, 作用在试样表面的载荷越大, 再结晶晶粒越明显。这是因为当变形越大时, 应力集中水平越高, 局部储存的能量就愈大, 再结晶的驱动力就愈大, 会造成再结晶起始温度下降。

2.2.2 SSR 临界条件函数模型

单晶叶片属于复杂薄壁结构件, 叶身存在明显的尺寸效应。因此, 如何评定薄壁下单晶材料的性能, 对提高单晶叶片安全、可靠性非常重要。P&W(普惠)公司相关人员通过对 PWA1484 单晶不同厚度的持久/蠕变尺寸效应研究, 发现应变控制在 1% 以内时, 单晶材料没有明显的尺寸效应^[18]。

基于以上认识, 本研究基于加工硬化率理论, 首先通过对单晶标准试样、不同孔径薄壁试管、薄板进行拉伸实验, 得到不同温度下的峰值应力实验数据, 其次通过曲线拟合得到 $\ln \theta$ - ε 曲线, 再获得曲线上拐点, 为了确定拐点的的位置, 对图曲线进行多次方拟合得到拟合方程如式(1)所示, 数据拟合精度在 99.98% 以上。然后对拟合方程求导, 得出不同变形参数下 $-\partial(\ln \theta)/\partial \varepsilon$ 方程如式(2)所示, 数据拟合精度在 99.98% 以上, 以及对应 $\ln \theta$ - ε 条件下的 $-\partial(\ln \theta)/\partial \varepsilon$ - ε 关系曲线如图 2 所示(图中 t 表示温度)。由图可以看出, $-\partial(\ln \theta)/\partial \varepsilon$ 曲线均相应地出现最小值, 曲线最小值处对应再

结晶的临界条件对应于 $-\partial\theta/\partial\sigma$ - σ 曲线中的最小值点, 即获得 $\partial(-\partial\ln\theta/\partial\varepsilon)/\partial\varepsilon=0$ 处的应力特征

$$\ln\theta=10.62-104.53\times\varepsilon+25\,823.48\times\varepsilon^2-4.23\times10^6\times\varepsilon^3+5.69\times10^8\times\varepsilon^4-4.82\times10^{10}\times\varepsilon^5+2.30\times10^{12}\times\varepsilon^6-6.11\times10^{13}\times\varepsilon^7+8.49\times10^{14}\times\varepsilon^8-4.82\times10^{15}\times\varepsilon^9 \quad (1)$$

$$\frac{\partial\ln\theta}{\partial\varepsilon}=104.53-5.17\times10^4\times\varepsilon+1.27\times10^7\times\varepsilon^2-2.28\times10^9\times\varepsilon^3+2.41\times10^{11}\times\varepsilon^4-1.38\times10^{13}\times\varepsilon^5+4.27\times10^{14}\times\varepsilon^6-6.79\times10^{15}\times\varepsilon^7+4.34\times10^{16}\times\varepsilon^8 \quad (2)$$

式中 $\theta=\partial\sigma/\partial\varepsilon$, θ 为加工硬化率; σ 为应力, ε 为应变。

再依据 $-\partial(\ln\theta)/\partial\varepsilon$ 曲线获得的再结晶临界应力点 $\partial(-\partial\ln\theta/\partial\varepsilon)/\partial\varepsilon=0$ 所对应的应力/应变值, 以应变速率 0.001 s^{-1} 为例, 得到不同变形温度(如 850 、 900 、 $980\text{ }^\circ\text{C}$)时的再结晶“临界门槛应变”。为了建立再结晶“临界门槛应变”与变形参数之间的关系模型, 将不同变形条件下的峰值应力和临界应力多项式拟合, 数据拟合精度 99.97% 以上, 从而得到单晶再结晶临界应力与温度参数 t 之间的函数关系, 如式(3)所示。

$$\sigma_c=47\,454.8\cdot\exp(-1.02\cdot t/233.5)-48.2 \quad (3)$$

$900\text{ }^\circ\text{C}\leq t\leq 1\,280\text{ }^\circ\text{C}$

式中 σ_c 表示再结晶临界应力, 单位 MPa; t 表示温度, 单位为 $^\circ\text{C}$ 。

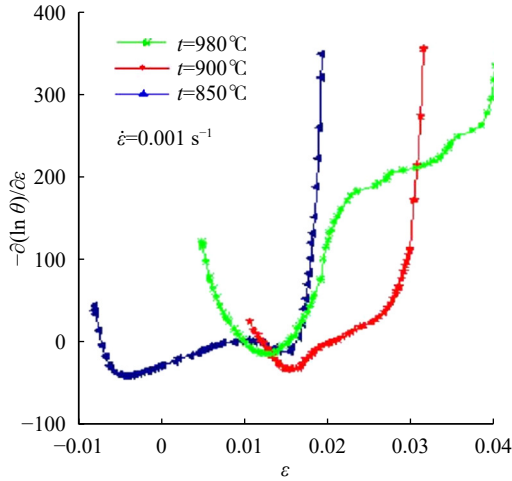


图 2 $-\partial(\ln\theta)/\partial\varepsilon$ 与 ε 之间的关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between $-\partial(\ln\theta)/\partial\varepsilon$ and ε

2.3 SSR 临界条件与结构残余应力关系表征

以某单晶涡轮叶片排气边半劈缝凹槽为例(如图 3 所示), 由于受气动性能、冷却和强度设计要求等多设计因素的制约, 该叶片排气边局部只能设计为半劈缝冷却结构, 因此叶身存在结构畸变区, 尤其在半劈缝凹槽截面畸变区域, 极易引部结构残余应力集中, 导致零件在研制中该区

值, 该特征值就是单晶构件发生再结晶时的临界条件。

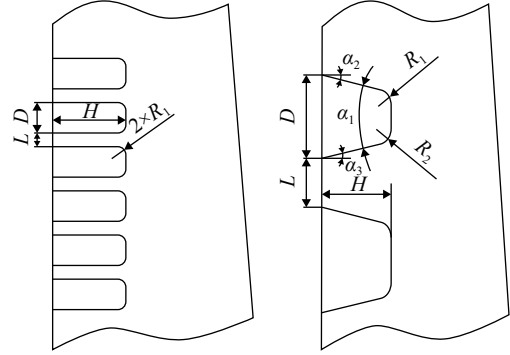


图 3 排气边半劈缝凹槽结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of half split groove on exhaust side

域极易产生结构再结晶(SSR)组织, 导致该单晶叶片不合格。

基于以上认识, 本研究以某叶片排气边半劈缝凹槽为研究对象, 采用结构优化设计方法, 在给定冷气通道面积不变和强度储备系数不变的条件下, 通过数值仿真手段, 以最大残余应力 $\sigma_{\max}$ 不大于单晶再结晶临界应力 σ_c 为优化目标, 优化出最大残余应力 $\sigma_{\max}$ 与结构设计参数(D 、 H 、 R 、 α)、温度(t)之间的关系。具体约束条件和目标函数如下, 对应的结构参数如图 3 所示:

$$\begin{cases} \sigma_{\max}\leq\sigma_c \\ \sigma_{\max}=f(R,D,H,L,\alpha) \\ A_1=D\cdot H(1-H\cdot\tan\alpha_2)-0.667R_1^2\cdot\sin\alpha_2\cdot\cos\alpha_2 \\ A_0=D\cdot H-2R_1^2(1-0.25\pi) \\ k=\sigma_{\max}/[\sigma]\geq 1.25 \\ A_0/A_1\leq 0.333 \\ \alpha_2=\alpha_3=0.5\alpha_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $[\sigma]$ 表示许用应力, 单位为 MPa; D 表示槽宽度, 单位为 mm; H 表示深度, 单位为 mm; R 表示倒圆半径, 单位为 mm; α_1 、 α_2 、 α_3 表示夹角, 单位为 $^\circ$; D 表示筋条宽度, 单位为 mm。

优化后的叶片排气边半劈缝如图 4 所示, 截面强度储备如图 5 所示, 得出最大残余应力 $\sigma_{\max}$ 与优化参数间的关系模型见式(5)所示。

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = 20(R^2 + D^2) - 1.36t^2 + 0.5t(R + D) - 152.5(R + D) - 48t + 1344 \\ \sigma_c = 47454.8 \exp\left(\frac{-1.02t}{233.5}\right) - 48.2 \\ \sigma_{\max} \leq \sigma_c \\ 900\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 1280\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

取式(5)中再结晶临界应力 σ_c 极小值,从而得到单晶再结晶临界应力 σ_c 与结构优化参数 R 、 D 和温度 T 之间的关系准则见式(6)。

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = 23727.4 \exp\left(\frac{-1.02t}{233.5}\right) + 10(R^2 + D^2 - 0.068t^2) + 0.25t(R + D) - 76.25(R + D - 0.315t) + 647.9 \\ 900\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 1280\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (6)$$



图 4 半劈缝凹槽优化后结构

Fig. 4 Optimized structure of half split groove

等效应力/MPa
75.367 179.026 282.684 386.342 490.000

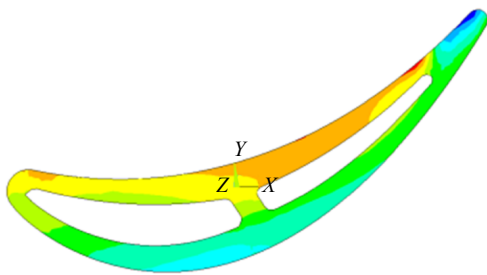


图 5 截面等效应力

Fig. 5 Section equivalent stress

同时,为验证本研究方法的有效性,对某叶片排气边半劈缝凹槽的优化结果进行工程化验证,单晶叶片铸件经固溶热处理后,进行腐蚀再结晶检查。检查结果显示:排气边半劈缝凹槽区域无再结晶组织;与优化前结构相比,半劈缝凹槽结构细节优化效果显著,原结构区域大量的再结晶

晶粒彻底消除,如图 6 所示。

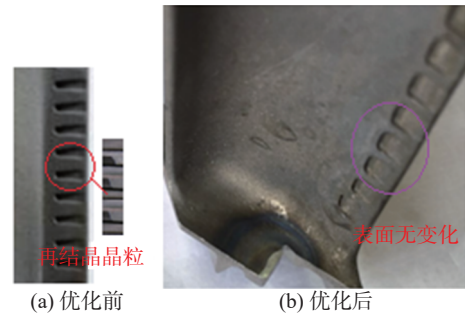


图 6 排气边半劈缝凹槽优化前后验证对比

Fig. 6 Verification and comparison before and after optimization of half split groove on exhaust side

该验证表明,通过该方法可实现复杂结构残余应力的合理调控与重新分配,达到单晶叶片结构完整性与表层组织连续性控制的目的。

3 结 论

单晶空心涡轮叶片在经受高温热载荷中,其结构畸变区域极易发生结构再结晶(SSR),这与结构残余应力幅度密切相关,其应力极限水平是单晶空心叶片组织突变的诱导因素。本研究提出的解决单晶叶片结构再结晶(SSR)的途径科学有效:将结构残余应力控制在单晶再结晶临界应力安全区域,并通过真实叶片级的理论研究与试验验证。验证结果表明,基于再结晶临界应力与结构残余应力的 SSR 控制机理研究方法是科学有效的,通过该方法可将结构残余应力控制在再结晶临界应力的安全区域内,实现结构残余应力的合理调控,达到对单晶空心叶片表层 SSR 组织的控制,将对单晶空心叶片的可制造性设计和安全可靠工作提供量化的科学依据。

参考文献:

- [1] 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.
ZHAO Xinbao. Crystal orientation of single crystal superalloys under high thermal gradient directional solidification[D]. Xi'an: Northwest Polytechnic University, 2010. (in Chinese)
- [2] 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): 1-7.
TAO Chunhu, ZHANG Weifang, LI Yunju, et al. Recrystallization of directionally solidified and single crystal superalloy[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2006, 1(4): 1-7. (in Chinese)
- [3] GELL M, DU HL D N, GIAMEI A F. The development of single crystal superalloy turbine blades[R]. Warrendale, US: Pratt and Whitney Aircraft Group, 1980.
- [4] CORRIGAN J, VOGT R G, MIHALISIN J R, et al. Single crystal superalloy articles with reduced grain recrystallization: EP10/38982A1[P]. 2000-09-27.
- [5] COX D, ROEBUCK B. Recrystallization of single crystal super alloy CMSX24[J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 19: 440-446.
- [6] PORTER A, RALPH B. Recrystallization of a nickel-base superalloy: kinetics and microstructural development[J]. *Material Science Engine*, 1983, 59: 69-78.
- [7] PORTER A, RALPH B. The recrystallization of nickel-base superalloys[J]. *Journal of Materials Science*, 1981, 16: 7072-7131.
- [8] TAKEO T, YOSHIHIRO T, TAKASHI M. Low stress creep of single crystals with [011] orientation[J]. *Material Science Forum*, 2003, 31: 803-808.
- [9] BOND S D, MARTIN J W. Surface recrystallization in a single crystal nickel based superalloy[J]. *Journal of Materials Science*, 1984, 19: 3867-3872.
- [10] WANG D L, JIN T, YANG S Q, et al. Surface recrystallization and its effect on rupture life of SRR99 single crystal superalloy[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 546/547/548/549: 1229-1234.
- [11] JO C Y, CHO H Y, KIM H M. Effect of recrystallization on microstructural evolution and mechanical properties of single crystal nickel base superalloy CMSX22[J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 19: 1665-1670.
- [12] KHAN T, CARON P, NAKAGAWA Y G. Mechanical behavior and processing of DS and single crystal superalloy[J]. *Journal of Metals Science*, 1986, 38(7): 16-19.
- [13] 陈素玲, 蒋文娟, 杜娟. 镍基单晶高温合金表面再结晶控制技术的进展[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(8): 74-78.
CHEN Suling, JIANG Wenjuan, DU Juan. Research progress of surface-recrystallization control technology of Ni-based single-crystal super alloy[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(8): 74-78. (in Chinese)
- [14] 卜昆, 邱飞, 王志红. 镍基单晶叶片制造技术及再结晶研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016, 21(8): 34-40.
BU Kun, QIU Fei, WANG Zhihong. Development of manufacture technology and recrystallization study for nickel based single crystal hollow turbine blade[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 21(8): 34-40. (in Chinese)
- [15] 卫平, 李嘉荣, 钟振纲. 一种镍基单晶高温合金的表面再结晶研究[J]. *材料工程*, 2001, 26(10): 5-8.
WEI Ping, LI Jiarong, ZHONG Zhengang. Study on the surface recrystallization of a Ni-based single crystal superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2001, 26(10): 5-8. (in Chinese)
- [16] 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.
MENG Jie, JIN Tao. Recrystallization of single crystal nickel-based superalloys[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011(6): 92-98. (in Chinese)
- [17] 马健, 李世峰, 何爱杰. DD6单晶涡轮叶片缘板裂纹与再结晶研究[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(5): 1069-1073.
MA Jian, LI Shifeng, HE Aijie. Platform crack and recrystallization of DD6 single crystal turbine blade[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(5): 1069-1073. (in Chinese)
- [18] FEDELICH B. A microstructure model for the monotonic and the cyclic mechanical behavior of single crystals of super alloys at high temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18: 1-4.

(编辑: 王碧琚)