

几何与动力约束结合的单晶涡轮叶片 结构细节优化

李世峰, 卫 刚, 孙飞龔, 刘强军, 何爱杰, 陈永熙

(中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院 涡轮技术研究室, 成都 610500)

摘 要: 以叶片榫头进气窗口为结构细节优化对象, 基于 DD6 单晶高温合金再结晶临界应力, 通过单晶涡轮叶片铸造残余应力场仿真计算, 建立了最大铸造残余应力与结构参数和温度的关系模型. 在几何约束和动力约束工况条件下, 开展叶片榫头进气窗口结构细节优化研究, 最后与实际叶片榫头进气窗口的进行分析与对比. 结果表明: 优化后叶片榫头进气窗口区域最大铸造残余应力降低 20% 以上, 原有的再结晶现象消除.

关 键 词: 几何约束; 动力约束; 单晶涡轮叶片; 铸造残余应力; 结构细节优化

中图分类号: V258; TG132

文献标志码: A

Detail-structure optimization of single crystal turbine blade under the condition of geometric and dynamic constraints

LI Shi-feng, WEI Gang, SUN Fei-yan, LIU Qiang-jun,
HE Ai-jie, CHEN Yong-xi

(Research Laboratory for Turbine, China Gas Turbine Establishment,
Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: Take the air inlet window of blade tenon as detail-structure optimization object, the relationship model between maximum cast residual stress and structure parameters and temperature were established by the simulation of cast residual stress field of single crystal turbine blade based on the recrystallization critical stress of DD6 single crystal superalloy. The detail-structure optimization of air inlet window of blade tenon was studied under the conditions of geometric and dynamic constraints. Finally, through the analysis and comparison with the actual air window of blade tenon, this method was effectively verified. The results show that the maximum cast residual stress of optimized air inlet window of blade tenon is completely reduced by over 20%, and the recrystallization is effectively eliminated.

Key words: geometric constraints; dynamic constraints; single crystal turbine blade; cast residual stress; detail-structure optimization

目前, 从国内外学术界的研究来看, 单晶涡轮叶片最突出的难题在于制造过程中局部结构出现了较为严重的表层再结晶现象, 这与其结构复杂程度和制造技术难度息息相关. 据统计, 在叶片生产过程中, 因发生表面塑变再结晶 (SPR) 和表面结构再结晶 (SSR) 等非连续性组织而导致叶片失

效的概率达 30% 以上^[1-5].

迄今为止, 国内外学者经过长期不懈的努力, 已基本解决了单晶叶片在高温过程中出现的 SPR 现象. 其中, Cox 等^[6]提出了镍基单晶高温合金 CMSX-4 表面出现再结晶的条件; Salkeld 等^[7]在 1995 年发明了一种化学腐蚀方法可抵抗再结

晶组织的产生;Corrigan 等^[8]对单晶材料进行气体渗碳处理,达到钉扎再结晶晶界的移动;日本的 Okazaki 等^[9]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覆熔在叶片胞状再结晶表面,比较成功地解决了 CMSX-4 单晶叶片的再结晶修复问题.但是,与 SPR 控制技术相比,SSR 控制技术一直是许多研究者回避的难题,已成为制约新一代航空发动机研制的壁垒.

近年来有关叶片结构铸造残余应力的研究表明,单晶涡轮叶片 SSR 现象的形成与其结构应力幅度密切相关,其铸造残余应力是单晶涡轮叶片表面再结晶行为宏微观耦合层次的诱导和基础.但就复杂空心薄壁结构的单晶涡轮叶片而言,要彻底根除单晶涡轮叶片的 SSR 现象,唯一可行的方法就是通过叶片结构细节优化设计,减小或消除叶片局部结构铸造残余应力,使其不超过镍基单晶高温合金(DD6)发生再结晶时的临界应力.为此,本文以单晶涡轮叶片发生再结晶的榫头进气窗口为细节优化对象,基于 DD6 合金再结晶临界应力,通过单晶涡轮叶片铸造残余应力场仿真计算,开展几何和动力约束条件下的单晶涡轮叶片结构细节优化研究,将对消除或抑制单晶涡轮叶片局部 SSR 现象,促进我国单晶涡轮叶片向着延寿、高可靠性的方向不断发展有重要意义.

1 结构细节优化模型

1.1 数学模型

在保证长寿命、高可靠的前提下,尽量降低航空发动机高压涡轮转子的结构应力,是航空发动机叶片设计者一直追求的目标.目前,该高压涡轮转子叶片处于中期设计阶段,所有与高压涡轮转子叶片设计相关的边界条件均已确定,故只能对零件进行精细化改进设计,以达到最优的性能指标^[10-12].为此,结合 DD6 发生再结晶时的临界条件,考虑到榫头进气窗口结构受到较多条件的限制,对高压涡轮转子叶片进行结构细节优化设计.其中,优化目标为铸造残余应力,优化变量为结构布局参数与尺寸参数,优化的数学模型如式(1)和式(2)所述.

目标函数

$$\min \sigma_{r, \max}(R, t) \quad (1)$$

约束条件

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{\sigma_{r, \max}}{\sigma_c} \leq 1 \\ 0.97 \leq \frac{A_0}{A} \leq 1 \\ \sigma_{r, \max} = \phi(R_i, t_i) \\ \sigma_c = f(t); \quad t_l \leq t \leq t_u \\ A = L_i \cdot H_i - R^2 \cdot (4 - \pi); \quad i = 1, \dots, S \\ A_0 = L_i \cdot H_i; \quad \alpha = 17^\circ; \quad i = 1, \dots, S \end{array} \right. \quad (2)$$

式中 k 为比例因子; A 为进气窗口通流面积; H_i 为榫头进气窗口壁厚; α 为进气窗口斜角; S 为进气窗口个数; $\sigma_{r, \max}$ 为最大铸造残余应力; 临界应力 $\sigma_c = f(t)$ 为约束函数, t 为温度; R_i 为设计变量.

1.2 设计变量的选取

以单晶涡轮叶片榫头进气窗口为优化对象,在减缓结构应力的榫头进气窗口几何尺寸设计中,突出进气窗口转角半径 R 的“可调性”.将进气窗口转角曲率半径通过一段圆弧线、直线之间的光滑相切而得,能够在保证其他几何尺寸不变的情况下(即:满足结构强度、叶片冷役设计技术要求),通过改变转角曲率半径值,实现对榫头进气窗口转角形状、尺寸的调控,具体如图 1 和图 2 所示.

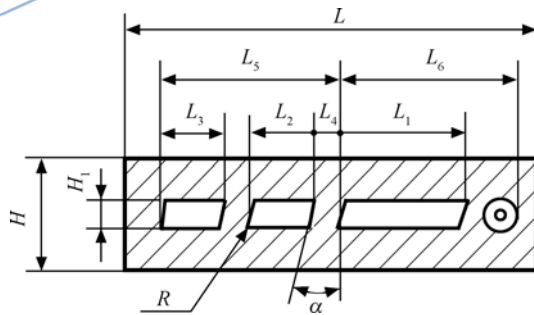


图 1 榫头进气窗口形状、尺寸

Fig. 1 Shape and size of the air inlet window of tenon

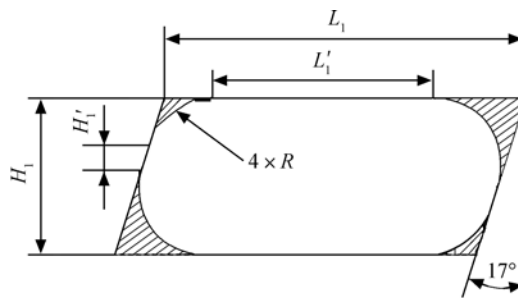


图 2 进气窗口结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of the air inlet window

图1中 $H, H_1, L, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, \alpha$ 为设计迭代最终值;仅进气窗口转角半径 R 为设计变量。

1.3 优化约束条件

在榫头进气窗口设计时,为了保证其最小壁厚和冷却设计要求,同时考虑到便于陶心模具的工艺操作,实现叶片内腔结构一体化成形,榫头进气窗口结构仅能选用平行四边形状。但是,平行四边形榫头进气通道形成小角度窄宽度形状,其在制备过程中,极易产生较大的铸造残余应力。因此,进气窗口面积和进气窗口之间的几何尺寸作为优化设计的约束条件。

动力约束条件即最大铸造残余应力约束。为了使单晶涡轮叶片榫头进气窗口区域最大铸造残余应力 $\sigma_{r, \max}$ 不超过 DD6 单晶材料再结晶时的临界应力 σ_c , 以避免发生再结晶,约束条件如式(3)所述。

$$\begin{cases} |\sigma_{r, \max}| \leq \sigma_c \\ \sigma_c = f(t); t_l \leq t \leq t_u \end{cases} \quad (3)$$

几何约束条件即榫头最大通流面积约束,为了满足叶片冷效设计要求,使榫头进气窗口通流面积 A 最小值不小于 A_0 。另外,为了满足叶片结构强度设计要求,在叶片内、外形形状确定的条件下,决定榫头结构强度的几何参数主要有榫头宽度 H 和榫头进气窗口间加强筋宽度 L_4 ;考虑到叶片除了受极限应力外,还受疲劳应力的作用。为了保证叶片满足抗疲劳设计要求,榫头进气窗口壁厚最小值 $H - H_1$ 是定值,约束条件如式(4)所述。

$$\begin{cases} 0.97 \leq \frac{A_0}{A} \leq 1 \\ A = L_i \cdot H_1 - R^2 \cdot (4 - \pi); i = 1, \dots, S \\ A_0 = L_i \cdot H_1; \quad \alpha = 17^\circ; i = 1, \dots, S \end{cases} \quad (4)$$

式中 π 为圆周率。

2 优化方案设计

由于榫头进气窗口结构存在畸变,且壁厚较大,所以初始形成的铸造残余应变能难以以弹性变形方式释放,进而引起局部残余应力集中。为了避免或减缓这种因结构不连续性导致的应力集中,常见的做法就是将锐角做成圆角,使之具有适当的圆角,以降低应力集中^[13-15]。而在单晶涡轮叶片榫头结构优化设计中,进气窗口转角半径 R 是决定应力集中系数的主要因子,其受到几何约束

和动力约束条件,故只能通过优化进气窗口转角半径 R 的大小,使圆角处的最大铸造残余应力低于 DD6 再结晶临界应力,具体优化方案与优化参数如表1所示。

表1 进气窗口转角半径的优化参数

Table 1 Optimization parameters of the corner radius of air inlet window

方案	R/mm	约束条件	优化目标
I	0.5	$H, H_1,$	$\sigma_{r, \max} \leq \sigma_c$
II	0.8	$L_1, L_2,$	
III	1.0	$L_3, L_4,$	
IV	1.2	$\alpha = \text{定值}$	

选取工程经验值 $R = 0.5 \text{ mm}$ 为初始值,建立合理的结构优化模型,通过商业有限元仿真软件 ProCAST,对榫头进气窗口区域结构细节特征参数进行优化计算,以获得最优的结构应力水平与分布形态,具体优化设计流程如图3所示。

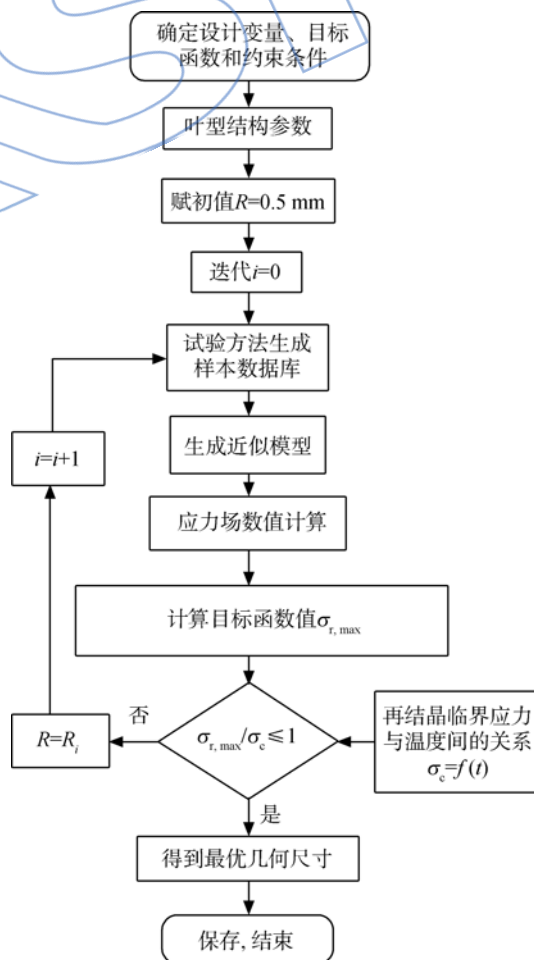


图3 优化设计流程

Fig. 3 Optimization design process

3 优化结果分析

采用尺寸优化与计算仿真相结合的方法,将榫头 4 个大窗口 12 个倒圆作为 R 设计变量和 7 个优化约束条件综合起来,对设计变量进行同步优化处理,得出计算步数为 7 000 步,计算时间为 6 970 s(即对应 1 000 $^{\circ}\text{C}$). 截取榫头不同截面(H_1 和 H_2),如图 4 所示. 在不同优化参数、不同榫头截面下,分析进气窗口区域的铸造残余应力(σ)分布情况,如图 5 所示.

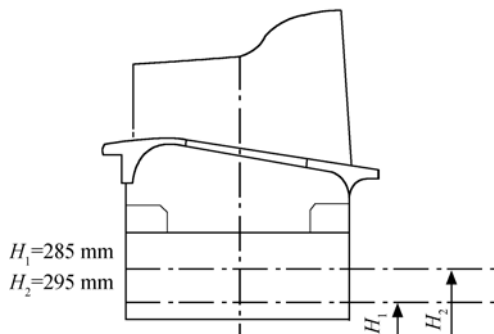


图 4 榫头进气窗口区域 XY 截面示意图

Fig. 4 Diagram of XY section in the air inlet window of tenon

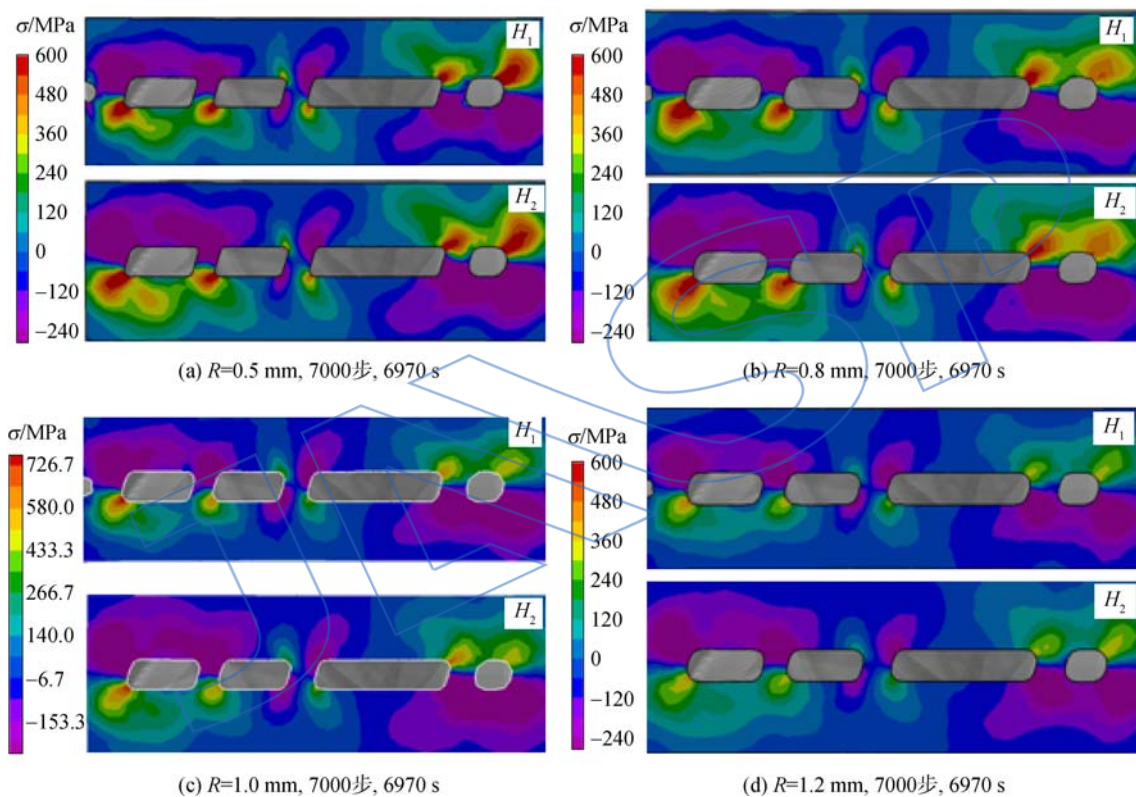


图 5 不同优化参数下的铸造残余应力分布

Fig. 5 Distribution of cast residual stress under different optimization parameters

从图 5 可以看出,铸造残余应力集中点均位于进气窗口结构突变区域,且在不同截面上,随着优化参数的增大,铸造残余应力集中程度明显减弱,最大铸造残余应力值明显降低,应力分布更均匀.同时,发现榫头进气窗口两边分别受压/拉应力作用,应力分布呈非对称.主要是因为进气窗口区域属平行四边形结构,其在凝固冷却过程中,同截面承受温度梯度的影响不同,进而导致非同步凝固,先凝固区域形成压应力,后凝固区域受到先凝固区域的约束而形成拉应力,最终呈现压/拉应力特征.其不同优化参数下进气窗口区域的最大

铸造残余应力如表 2 所示.

表 2 不同优化参数下最大铸造残余应力

Table 2 Maximum cast residual stress under different optimization parameters

R/mm	t/ $^{\circ}\text{C}$				
	900	1 000	1 100	1 200	1 300
0.5	463	324	191	154	34.6
0.8	427	292	164	102	21.4
1.0	398	272	124	109	16.1
1.2	363	202	112	58	15.0

由表2可以看出,在不同温度下, $R=1.2\text{ mm}$ 优化模型榫头截面的最大铸造残余应力比其他优化方案降低20%以上. 而对于优化后的进气窗口结构, 由于进气窗口区域结构尺寸重新排布, 以及进口窗口转角半径的增大, 使得该区域应力分布更为均匀, 同时冷却通道受入口段的影响有所降低, 从而叶片径向温度梯度减小, 铸造残余应力相应降低.

再对表2数据进行曲面拟合, 结果如图6所示. 从而得到最大铸造残余应力 $\sigma_{r, \max}$ 与优化参数 R, t 间的关系模型, 如式(5)所述.

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{r, \max} &= 9552.6 \cdot \exp\left[-\frac{R}{3.07} - \frac{t}{352.2}\right] - 154.3 \\ 1050\text{ }^{\circ}\text{C} &\leq t \leq 1300\text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

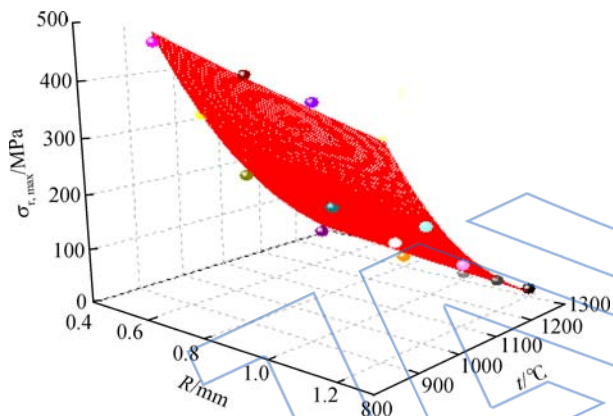


图6 最大铸造残余应力与优化参数 R, t 的关系模型
Fig. 6 Relationship model of the maximum cast residual stress and the optimized parameters R, t

为了进一步研究优化参数对最大铸造残余应力的影响规律, 以及与 DD6 再结晶临界应力的对比分析, 绘制了不同温度 t 下 R 与其相应最大铸造残余应力 $\sigma_{r, \max}$ 的关系曲线, 具体曲线关系如图7所示.

由此看来, 当采用优化参数 $R=1.2\text{ mm}$ 时, 榫头进气窗口区域的最大铸造残余应力最小, 主要原因是沿径向通孔内腔转角曲率较大, 从而引起该区域散热均匀, 导致同步冷却、同步收缩. 同时, 发现该优化参数下进气窗口区域的最大铸造残余应力与 DD6 再结晶临界应力非常接近(偏差不超过 25 MPa), 并考虑到榫头进气窗口区域面积的约束 ($R \leq 1.2\text{ mm}$), 故最终优化结果新参数 $R=1.2\text{ mm}$.

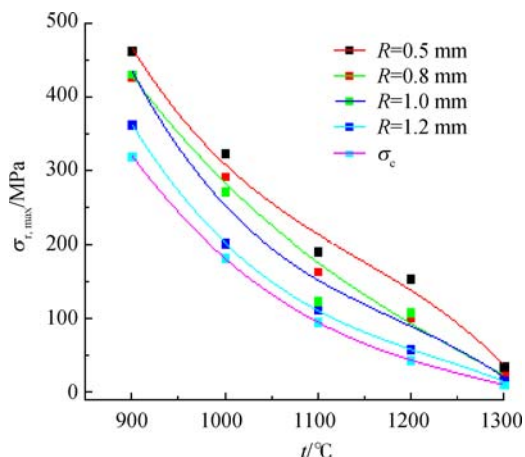
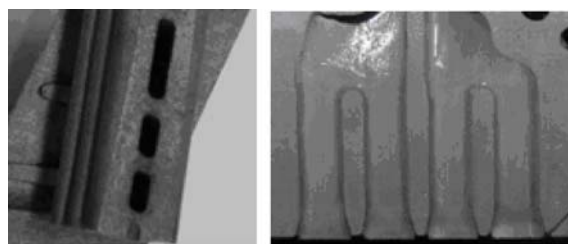


图7 最大铸造残余应力与优化参数 R, t 的关系曲线
Fig. 7 Relationship curves of the maximum cast residual stress and the optimized parameters R, t

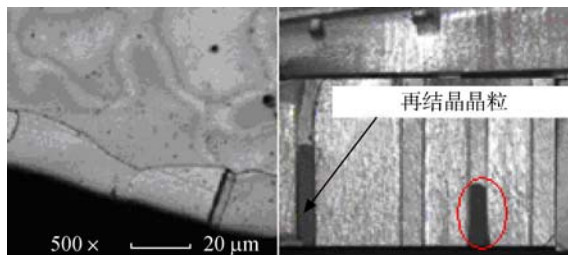
4 试验验证

根据优化结果对设计变量值进行优化, 然后依据实际工艺浇注出叶片铸件, 待定向凝固冷却切去浇注系统后, 经固溶时效热处理, 完成单晶涡轮叶片的制备, 再通过水浸法进行有无再结晶检查.

检查结果显示, 榫头进气窗口结构细节优化后, 叶片铸件经固溶处理后, 在进气窗口区域没有发生再结晶组织, 如图8(a)所示; 与之相比, 榫头进气窗口结构细节优化前, 叶片铸件经固溶处理后, 在进气窗口区域发生大量再结晶现象, 其金相组织图片中可清楚地看到再结晶晶粒, 如图8(b)所示.



(a) 优化后 ($R=1.2\text{ mm}$)



(b) 优化前 ($R=0.5\text{ mm}$)

图8 优化前后榫头进气窗口区域组织形貌
Fig. 8 Morphology of the air inlet window of tenon before and after optimization

该验证结果表明,基于 DD6 再结晶临界应力的结构细节优化设计方法是有效可信的,通过该方法可实现榫头进气窗口区域铸造残余应力的调控,彻底解决 DD6 单晶涡轮叶片研发过程中出现的 SSR.

5 结 论

1) 以叶片发生再结晶的榫头进气窗口为细节优化对象,基于 DD6 再结晶临界应力,通过单晶涡轮叶片铸造残余应力场仿真计算,获得了不同优化参数 R 条件下的铸造残余应力分布与温度 t 的关系,建立了铸造最大铸造残余应力 $\sigma_{r, \max}$ 与 R 和 t 的关系模型.

2) 试验验证表明,基于再结晶临界应力的结构细节优化设计方法是有效可信的,通过该方法可实现榫头进气窗口区域铸造残余应力的调控,可解决 DD6 单晶涡轮叶片研发过程中出现的结构再结晶.

参考文献:

- [1] 马健,李世峰,何爱杰.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)
- [2] Bürgel R, Portella P D, Preuhs J. Recrystallization in single crystals of nickel base superalloys[R]. Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society, 2000.
- [3] 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.
WANG Zhigang, ZHAO Jingchen, YAN Ping, et al. Recrystallization of nickel base single crystal superalloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(2): 23-27. (in Chinese)
- [4] Bond S D, Martin J W. Surface recrystallization in a single crystal Ni base superalloy[J]. Journal Materials Science, 1984, 19(2): 3864-3872.
- [5] 熊继春,李嘉荣,刘世忠.单晶高温合金 DD6 表面再结晶组织[J].材料工程,2009(增刊1):110-113.
XIONG Jichun, LI Jiarong, LIU Shizhong. Microstructure of surface recrystallization of single crystal superalloy DD6 [J]. Materials Engineering, 2009(suppl. 1): 110-113. (in Chinese)
- [6] Cox D C, Roebuckb. Recrystallization of single crystal superalloy CMSX24[J]. Materials Science and Technology, 2003, 19: 440-446.
- [7] Salkeld R W, Windsor S, Field T T, et al. Preparation of single crystal superalloy for post-casting heat treatment: United States Patent, 5413648[P]. 1995-03-27.
- [8] Corrigan J, Vogt R G, Mihalisin J R, et al. Single crystal superalloy articles with reduced grain recrystallization: European Patent, EP1038982 A1[P]. 2000-09-27.
- [9] Okazaki M, Ohera I, Harada Y. Prevention of fatigue life reduction relating to cellular microstructure in single crystal Ni-base superalloy CMSX-4[R]. Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society, 2003.
- [10] 曹志廷,郭文,潘炳华.涡轮叶片冷却设计优化方法研究[J].燃气涡轮试验与研究,2012,25(4):19-22.
CAO Zhiting, GUO Wen, PAN Binghua. Study on the method of design optimization of turbine blade cooling[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2012, 25(4): 19-22. (in Chinese)
- [11] Dobbs M, Felton I. Optimization of truss geometry[J]. Journal Stric, 1969, 8(10): 2105-2118.
- [12] Sheu C, Schmit L. Minimum weight design of elastic redundant trusses under multiple static loading conditions [J]. AIAA Journal, 1972, 10(2): 155-162.
- [13] Reinserts U T. A branch and bound algorithm for topology optimization of truss structures[J]. Engineering Optimization, 1986, 10(2): 111-124.
- [14] Kirsch U. Optimal topologies of truss structures[J]. Application Mechanical Engine, 1989, 72(1): 15-28.
- [15] 王健,程耿东.多工况应力约束下连续体结构拓扑优化设计[J].机械强度,2003,25(1):55-57.
WANG Jian, CHENG Gengdong. Topology optimization design of the continuum structure for multiple loading conditions with stress constraints[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(1): 55-57. (in Chinese)