

单晶再结晶临界应力与涡轮叶片结构设计参数间的映射模型

李世峰 卫刚 高杰 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:以单晶涡轮叶片发生再结晶的榫头进气窗口为研究对象,基于镍基单晶合金再结晶临界应力模型,通过单晶叶片铸造热应力场仿真计算,建立了最大残余应力与结构参数和温度的关系模型;并在此基础上,以最大铸造残余应力不大于再结晶临界应力、冷气通道面积不变和满足强度为约束条件,求出了不发生再结晶条件下的临界应力与结构设计参数和热处理温度的映射模型。最后通过对实际叶片榫头进气窗口的优化设计和试验对比分析,验证了本文方法的有效性。结果表明,优化后榫头进气窗口最大铸造残余应力下降 30% 以上,原有的再结晶现象消除。

关键词:涡轮叶片;再结晶临界应力;结构设计参数;铸造残余应力;映射模型

中图分类号:TK14 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)06-0909-06

Relationship Model Between Recrystallization Critical Stress and Structure Designed Parameters on Single Crystal Turbine Blade

Li Shifeng, Wei Gang, Gao Jie, Chen Yongxi

(Research Institute of Turbine Technology in China Gas Turbine Establishment, Aviation Industry Corporation of China, Chengdu, 610500, China)

Abstract: Around the parameter of the blade section shape, the air inlets of blade root are investigated. Firstly, based on the model of recrystallization critical stress for single crystal alloy, the relationship model between residual stress and optimization parameters is established by the simulation method. Secondly, the detail-structure with recrystallization is optimized under the constraint conditions of recrystallization critical stress and strength. Finally, through the analysis and comparison of the actual blade, the proposed model is effectively verified. The results show that the max-residual stress is completely reduced by 30%, and the recrystallization is effectively eliminated.

Key words: turbine blade; recrystallization critical stress; structure designed parameters; cast residual stress; relationship model

目前,单晶叶片生产过程中,因发生表面塑变再结晶(Surface plastic recrystallization, SPR)和表面结构再结晶(Surface structure recrystallization, SSR)等缺陷而导致叶片失效的概率达 30% 以上^[1-4]。迄今为止,国内外学者经过长期的努力,已解决了单晶叶片在高温过程中出现的 SPR 现象^[5-11]。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瓶颈技术。

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 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叶片而言,要彻底根除叶片的 SSR,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

其不超过单晶合金发生再结晶时的临界应力。

因此,本文以单晶叶片生产中榫头进气窗口暴露出的 SSR 问题为研究对象,基于单晶合金再结晶临界应力,通过单晶叶片铸造热应力场仿真计算,建立最大残余应力与结构参数和温度的映射关系模型;并在此基础上,求出不发生再结晶条件下的临界应力与结构设计参数和热处理温度的映射模型,将对消除或抑制叶片局部 SSR,促进单晶涡轮叶片向高可靠性方向发展具有重要意义。

1 基于铸造热应力场的结构优化

1.1 优化方案的确定

以涡轮叶片榫头进气窗口为优化对象,由于榫头通气孔结构存在畸变,且壁厚较大,所以在定向凝固初始形成的铸造残余应变难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,常见的做法就是将棱角做成锐角,突出转角 R 的“可调性”,以降低应力集中^[12-14]。

在单晶叶片的榫头结构优化设计中,由于受到冷气通道面积和强度设计的约束,同时考虑到便于工艺操作,实现叶片内腔结构一体化成形,榫头进气孔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热应力。因此,只能通过优化进气窗口转角半径 R 的大小,实现对进气窗口转角形状、尺寸的调控,使圆角处的最大残余应力低于单晶合金再结晶临界应力,具体优化方案如图 1 所示。

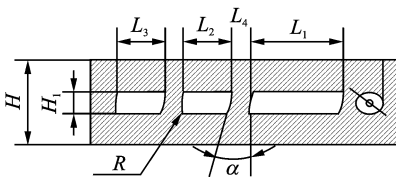


图 1 榫头进气窗口形状、尺寸

Fig. 1 Shape and size of air inlets

图中 H 、 H_1 、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 α 为设计迭代最终值,仅参数 R 为设计变量。

在选定优化策略前提下,建立合理的结构优化模型,通过 ProCAST 有限元仿真技术,对进气窗口区域结构细节特征参数进行优化,以获得最优的结构应力水平与分布,具体优化参数如表 1 所示。

表 1 进气窗口优化设计参数

Tab. 1 Optimization parameters of air inlet

方案	设计参数/mm	约束条件
I	$R=0.5$	H 、 H_1 、
II	$R=1.0$	L_1 、 L_2 、
III	$R=1.2$	L_3 、 L_4 、
		α =定值

该方法的优点是直接从工程经验尺寸赋初始值($R=0.5$ mm),再进行迭代优化设计,从而得到优化后的进气窗口尺寸控制模型,具体流程如图 2 所示。

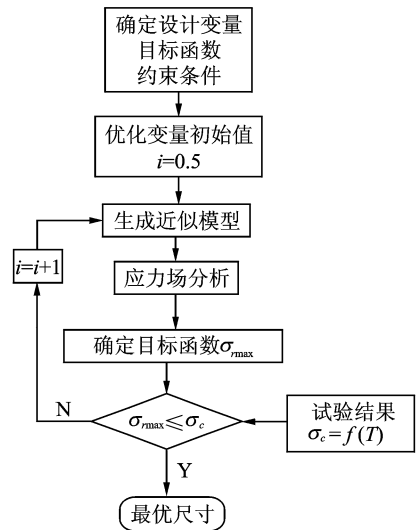


图 2 进气窗口形状、尺寸优化流程

Fig. 2 Optimization flow of air inlet

1.2 边界条件的处理

由于单晶叶片凝固过程边界条件缺乏有效的测量手段,导致仿真结果不够精确。为了使叶片仿真结果尽可能与工程实际逼近,本研究采用热电偶测温度的实验方法,通过测量叶片毛坯若干点在精铸过程中的温度变化曲线,获得叶片精铸凝固过程实测温度场,为叶片铸造残余应力场仿真提供了初始载荷,其热电偶测点布置如图 3 所示。

1.3 优化结果对比分析

基于 ProCAST 软件平台,通过分析铸件上特定位置的温度值变化曲线,反向求出精铸涡轮叶片凝固过程中的界面换热系数,进而对单晶叶片凝固后阶段的应力场进行仿真计算^[15-16]。同时,将榫头四大孔 12 个倒圆作为 R 设计变量、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,得出计算时间为 6 970 s(即对应 1 000 °C),截榫头 H_1 截面,在不同优化参数下的最大热应力分布情况,如表 2 所示。

表 2 不同优化方案最大铸造残余应力结果对比(7 000 step 6 970 s)

Tab. 2 Results of maximal cast stress for different optimization scheme(7 000 step 6 970 s)

截面 1	优化参数	测点	$t/^\circ\text{C}$			
			1 000	1 100	1 200	1 300
$R=0.5$		1	387	223	176	46.8
		2	324	191	154	34.6
		3	-270	-162	-125	-31.8
		4	-240	-137	-70.5	-23.4
$R=1.0$		1	364	197	124	26.4
		2	240	162	99	18.8
		3	-321	-158	-112	-25.3
		4	-206	-115	-52.1	-15.6
$R=1.2$		1	253	143	67	24.1
		2	231	126	46	12.8
		3	-190	-118	-49	-25.6
		4	-142	-96.7	-36.7	-12.8
临界应力 σ_c/MPa			182	95	44	10

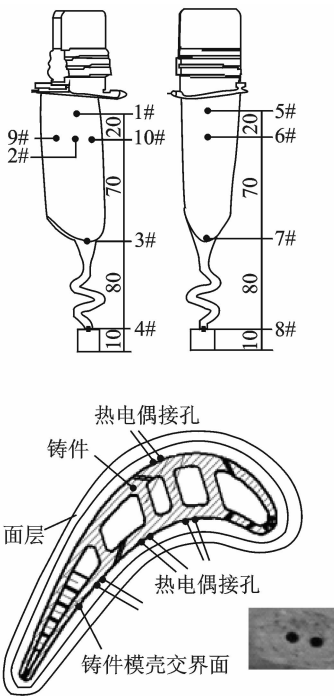
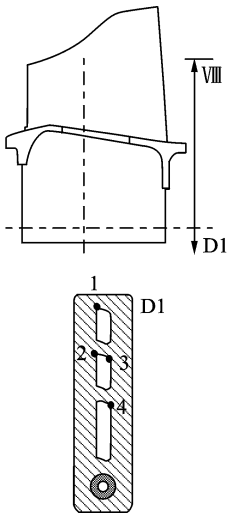


图 3 测温点分布示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of port for measuring temperature

在不同温度下, $R=1.2$ 优化模型榫头截面的最大铸造应力, 比其他优化方案低 20%~45%。

为了进一步研究优化参数对最大铸造热应力的影响规律, 以及与单晶高温合金再结晶临界应力的对比分析, 绘制出了不同温度下优化参数 R 与其相应铸造热应力最大值的关系曲线, 具体曲线关系如图 4 所示。

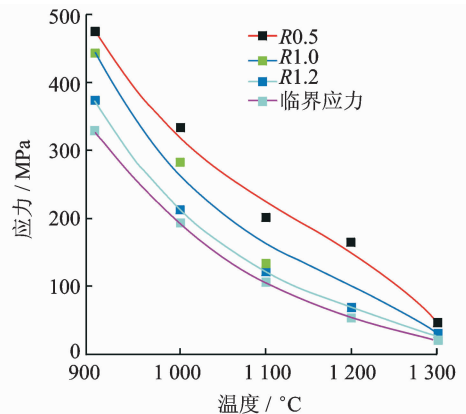


图 4 优化参数 R 对铸造热应力的影响

Fig. 4 Effect of optimization parameter R on cast stress

由表 2 可以看出, 铸造热应力集中点均位于进气窗口结构突变区域, 榫头进气窗口两边分别受正/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。同时, 发现

由此看来, 当采用优化参数 $R1.2$ mm 时, 榫头进气窗口区域的最大铸造热应力最小, 且沿 Z 方向有明显减小, 主要原因是窗口沿径向向内腔转角曲率较大, 从而引起该区域散热均匀, 导致同步冷却、同步收缩。同时, 可看出在该优化参数下, 进气窗口区域的最大铸造热应力与临界应力非常接近。

2 映射模型的建立

2.1 单晶再结晶临界应力模型

从材料非线性角度,以镍基单晶标准试棒、薄壁圆管与薄板模拟试样的拉伸应力-应变(σ - ϵ)曲线为依据,根据加工硬化率理论,基于建立的 DD6 单晶材料 Hill 本构模型,求出了镍基单晶材料的应力-应变曲线和硬化率(θ)与应变之间的关系($\ln\theta$ - ϵ)曲线;在此基础上,给出了发生再结晶时的临界特征点及其所对应的温度和临界应力^[17-21]。最后对临界应力与温度方程曲线进行拟合,得到镍基单晶高温合金发生再结晶时的临界应力(σ_c)与温度(T)之间的关系模型,如式(1)所示,其与温度的关系曲线如图 5 所示。

$$\sigma_c = 47\,454.7 \cdot \exp\left(\frac{-T}{233.5}\right) - 44.1 \quad (1)$$

$1\,300\text{ K} \leq T \leq 1\,600\text{ K}$

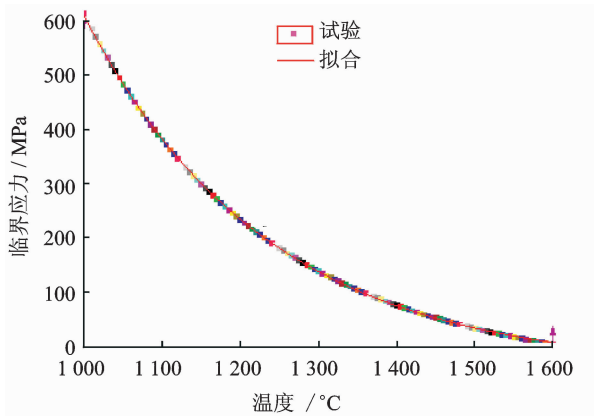


图 5 临界应力与温度之间的关系曲线

Fig. 5 Relation curve between critical stress and temperature

2.2 最大残余应力与优化参数间的关系模型

再对表 2 数据进行曲面拟合,从而得到铸造最大热应力(σ_{rmax})与优化参数间的关系模型为

$$\sigma_{rmax} = 9\,552.6 \cdot \exp\left(-\frac{R}{3.07} - \frac{T}{352.2}\right) - 154.3 \quad (2)$$

$1\,300\text{ K} \leq T \leq 1\,600\text{ K}$

2.3 再结晶临界应力与优化参数间的映射模型

结合单晶再结晶临界应力模型(式(1)),联合铸造最大热应力 σ_{rmax} 与优化参数间的关系模型(式(2)),进而建立临界应力与优化参数模型为

$$\sigma_{rmax} = 9\,552.6 \cdot \exp\left(-\frac{R}{3.07} - \frac{(T+273)}{352.2}\right) - 154.3$$

$$\sigma_c = 47\,454.7 \cdot \exp\left(\frac{-T}{233.5}\right) - 44.1$$

$$\sigma_{rmax} \leq \sigma_c$$

$1\,300\text{ K} \leq T \leq 1\,600\text{ K}$

推导式(3)可得

$$\sigma_c \leq \frac{110.2}{10.8 \cdot \exp\left(-\frac{T}{692.8} + \frac{R}{3.07}\right) - 1} - 154.3 \quad (4)$$

$$1\,200\text{ K} \leq T \leq 1\,600\text{ K}$$

$$1.15 \leq R \leq 1.25$$

取式(4)的临界应力极小值,从而得到单晶再结晶临界应力(σ_c)与优化参数(R)和温度(T)之间的映射模型

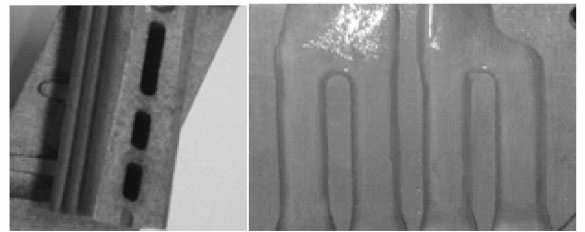
$$\sigma_c = \frac{110.2}{10.8 \cdot \exp\left(-\frac{T}{692.8} + \frac{R}{3.07}\right) - 1} - 154.3 \quad (5)$$

$$T \geq 1\,300\text{ K}$$

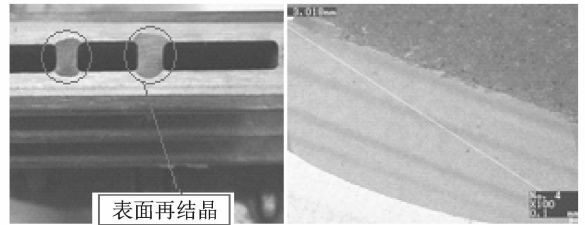
3 试验验证

根据优化结果对设计变量值进行优化设计,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 6(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的看到再结晶晶粒,如图 6(b)所示。



(a) 优化后($R=1.2\text{ mm}$)



(b) 优化前($R=0.5\text{ mm}$)

图 6 优化前后榫头进气窗口区域组织形貌

Fig. 6 Organization pattern of air inlet before and after optimization

该验证结果表明,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

实现榫头通气孔区域铸造热应力的调控,彻底解决单晶涡轮转子叶片研发过程中出现的结构再结晶。

4 结束语

本文以单晶叶片发生再结晶的榫头进气窗口为研究对象,基于镍基单晶合金再结晶临界应力模型,通过单晶叶片铸造热应力场仿真计算,建立了最大残余应力与结构参数和温度的关系模型。通过结构尺寸、形状优化,求出了不发生再结晶条件下的临界应力与结构设计参数和热处理温度的映射模型,并通过试验对比分析,验证了本文方法的有效性。结果表明,优化后榫头进气窗口最大铸造残余应力下降30%以上,原有的再结晶现象消除。

参考文献:

- [1] 陈章荣. 铸造涡轮叶片制造和使用中的一个问题——表面再结晶[J]. 航空制造工程, 1990(4): 22-23.
Chen Zhangrong. Surface recrystallization of the turbine blade in manufacture[J]. Aviation Engineering Maintenance, 1990(4): 22-23.
- [2] 郑运荣. 单晶涡轮叶片合金的薄截面尺寸效应[J]. 材料工程, 2007(7): 74-77.
Zheng Yunrong. Size effect of thin section for single crystal turbine blade superalloys[J]. Material Engineering, 2007(7): 74-77.
- [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.
- [4] 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(10): 5-8.
Wei Ping, Li Jiarong, Zhong Zhengang. Study on surface recrystallization of nickel base single crystal superalloy[J]. Material Engineering, 2001(10): 5-8.
- [5] Bond S D, Martin J W. Surface recrystallization in a single crystal Ni base superalloy[J]. Journal Mater Science, 1984(19): 3864-3872.
- [6] Cox D C, Roebuck B. Recrystallization of single crystal super alloy CMSX24 [J]. Materials Science and Technology, 2003(19): 440-446.
- [7] Zhang Bing, Liu Changkui, Lu Xin. Effect of surface recrystallization on the creep rupture property of a single crystal superalloy [J]. Rare Metals, 2010, 29(4): 29-34.
- [8] Porter A, Ralph B. The recrystallization of nickel-base superalloys [J]. Journal of Materials Science, 1981(16): 7027-7031.
- [9] Goldschmidt D, Paul U, Sahn P R. Porosity clusters and recrystallization in single crystal components [C]// Superalloys 1992. Warrendale: TMS, 1992: 155-164.
- [10] 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.
- [11] Seo D, Au P, Huang X. Investigation of recrystallization phenomenon of single crystal superalloys for gas turbine applications [J]. Aerospace Materials and Manufacturing: Emerging Materials, Processes, and Repair Techniques, 2006(20): 687-699.
- [12] 马兆敏. 铸造凝固过程三维温度场及热应力场有限元技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2002: 6-30.
Ma Zhaomin. Study on temperature field and thermal stress field of casting solidification process [D]. Nanjing: Guangxi University, 2002: 6-30.
- [13] 王秋成. 航空铝合金残余应力消除及评估技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2003: 30-70.
Wang Qiucheng. Residual stress measurement and prediction in aircraft aluminum parts [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003: 30-70.
- [14] 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 tile continue structure for multiple loading conditions with stress constraints [J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(1): 55-57.
- [15] Dong Yiwei, Pu Kun, Dou Yangqing. Determination of interfacial heat-transfer coefficient during investment-casting process of single-crystal blades [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011(211): 2123-2131.
- [16] 袁帅. 基于实验的单晶叶片精铸仿真边界条件求解研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.
Yuan Shuai. Study on the single crystal blade boundary conditions based on simulation experiment [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012.

- [17] 赵阳. 定向凝固钴基高温合金 DZ40M 的再结晶行为 [D]. 沈阳: 东北大学, 2005: 32-56.
Zhao Yang. Recrystallization behavior of a directionally solidified co-base superalloy DZ40M [D]. Shenyang: Northeastern University, 2005: 32-56.
- [18] 刘鹏飞, 刘东, 罗子健, 等. GH761 合金的热变形行为与动态再结晶模型 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 275-278.
Liu Pengfei, Liu Dong, Luo Zijian, et al. Flow behavior and dynamic recrystallization model for GH761 superalloy during hot deformation [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2): 275-278.
- [19] 欧阳德来, 鲁世强. 应用加工硬化率研 TA15 钛合金 β 区变形的动态再结晶临界条件 [J]. 航空材料学报, 2010, 30(2): 17-23.
Ouyang Delai, Lu Shiqiang. Study on critical strains of dynamic recrystallization during β process in TA15 titanium alloy using working hardening rate [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(2): 17-23.
- [20] 黄光杰, 钱宝华, 汪凌云, 等. AZ31 镁合金初始动态再结晶的临界条件研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(12): 1080-1084.
Huang Guangjie, Qian Baohua, Wang Lingyun, et al. Study on the critical conditions for initial dynamic recrystallization of AZ31 magnesium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(12): 1080-1084.
- [21] 丁汉林. AZ91 镁合金高温变形行为的实验研究与数值模拟 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 34-56.
Ding Hanlin. Experimental study and numerical simulation of hot deformation behaviors of AZ91 alloy [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007: 34-56.

