

定向凝固涡轮叶片高温低周疲劳的破坏特点

孙瑞杰, 闫晓军*, 聂景旭

北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191

摘要: 针对几何形状完全相同但材料不同的两种涡轮叶片, 采用相同的试验方法进行高温低周疲劳试验, 普通铸造 K403 合金叶片和定向凝固 DZ22B 合金叶片却在不同的部位破坏, K403 合金叶片在试验考核的榫齿部位断裂, 而 DZ22B 合金叶片的榫齿在叶身根部断裂前均未出现裂纹。为了解释上述试验结果, 展开了两类叶片试验条件应力场的有限元分析和定向凝固叶片晶粒形貌的数值模拟。研究表明: 相同几何结构的普通铸造叶片和定向凝固叶片, 其应力分布趋势相似, 应力峰值均出现在叶片第一榫齿处; 定向凝固叶片的失效模式与普通铸造叶片不同, 其破坏不仅与应力场分布有关, 而且受叶片各部位的晶粒形貌影响, 叶片的失效不一定发生在应力最大的部位。

关键词: 涡轮叶片; 定向凝固; 低周疲劳; 有限元方法; 晶粒

中图分类号: V252; V231.95 **文献标识码:** A

定向凝固涡轮叶片通过对叶片结晶过程的严格控制, 获得沿 $\langle 001 \rangle$ 方向(即叶片径向)生长的柱状晶组织, 减少了因横向晶界存在而引起的晶间断裂等不利因素, 从而使得叶片径向具有比普通精密铸造叶片更好的高温力学性能, 显著提高了叶片的使用寿命和可靠性。因此, 利用定向凝固技术代替普通精密铸造工艺生产涡轮叶片成为目前航空发动机领域的一个重要发展趋势^[1-2]。

定向凝固涡轮叶片由多个柱状晶组成, 其材料呈横观各向同性特点^[2-3]。目前的研究通常假设整个叶片材料性能一致(温度作为载荷考虑), 在此基础上沿用等轴晶叶片的研究方法, 即通过一定量的标准试件或叶片模拟件的试验数据, 建立材料的宏微观本构模型(基于唯象的宏观连续介质力学本构理论或从晶体滑移理论出发的晶体塑性本构理论), 辅之以现代有限元分析技术, 对定向凝固涡轮叶片进行强度和寿命

设计^[2-5]。

实际上, 这种研究方法关于叶片材料性能一致的假设并不合理。文献研究表明^[6-7], 在定向凝固过程中, 当构件的几何截面出现突变时, 柱状晶生长会偏离理想的 $\langle 001 \rangle$ 方向, 导致该部位显微组织存在差异, 尽管可以通过控制抽拉速度等方法来减小这种差异, 却不能完全消除。而定向凝固构件的宏观力学性能与其显微组织形态密切相关^[8-10]。这表明对于几何形状复杂的涡轮叶片而言, 下缘板、叶冠等几何扩张和收缩的部位, 其定向凝固组织可能会出现差异, 继而导致这些突变部位的宏观力学性能不同于其他部位。因此, 定向凝固叶片各部位材料性能有可能不一致, 上述假设在寿命估算时会造成较大误差。

针对这一问题, 本文对全尺寸定向凝固叶片和等轴晶叶片进行对比研究。采用几何结构相同的普通铸造 K403 合金叶片和定向凝固 DZ22B 合金

收稿日期: 2010-05-12; 退修日期: 2010-08-03; 录用日期: 2010-08-19; 网络出版时间: 2010-11-15 18:34

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101115.1834.001.html

DOI: CNKI: 11-1929/V.20101115.1834.001

基金项目: 国家自然科学基金(10872015); 航空科学基金(2008ZB51017); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-06-0178)

* 通讯作者。Tel.: 010-82316356 E-mail: yanxiaojun@buaa.edu.cn

引用格式: 孙瑞杰, 闫晓军, 聂景旭. 定向凝固涡轮叶片高温低周疲劳的破坏特点[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 337-343. Sun Ruijie, Yan Xiaojun, Nie Jingxu. Failure characteristics of directional solidification turbine blade under high temperature low cycle fatigue load[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 337-343.

叶片进行低周疲劳试验,针对试验结果出现的 DZ22B 合金叶片低周疲劳破坏不同于 K403 合金叶片的现象,开展了有限元对比分析,并对 DZ22B 合金叶片的晶粒形貌进行了数值模拟,分析了定向凝固涡轮叶片的低周疲劳破坏特点和影响因素。

1 叶片低周疲劳试验

叶片的寿命是评价叶片材料和结构性能的重要依据,也是制定叶片检修和更换周期的依据。在实验室利用加载设备对涡轮叶片进行寿命试验是目前常用的叶片寿命预测方法之一。由于叶片在实际工作状态下的应力场和温度场沿叶高、弦向都是变化的,在实验室条件下模拟叶片各个部位的真实工作条件非常困难。实际上,叶片的疲劳破坏是一种损伤累积的过程,工作中损伤最大的部位最易出现裂纹并发生断裂,这一部位(叶片的考核部位)的性能决定了叶片的疲劳寿命^[1],因此,在实验室条件下,通常是通过试验装置来模拟考核部位的实际工作应力场和温度场,从而得出叶片的寿命数据,这对于涡轮叶片的定寿研究、排故分析具有重要的指导意义。

1.1 考核部位的确定

叶片的考核部位,可以根据叶片使用中的故障情况统计结果来确定,也可以通过理论计算和分析来确定。本文借助有限元分析方法,对普通铸造 K403 合金叶片和定向凝固 DZ22B 合金叶片工作条件下的应力场进行计算(图 1),依据“高应力处(一般是构件应力集中区的表面^[12])损伤大、易萌生疲劳裂纹”的规律,结合 K403 合金叶

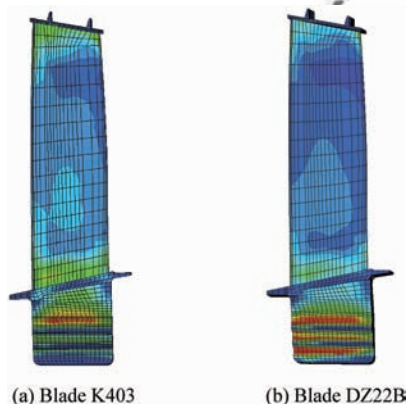


图 1 涡轮叶片工作应力场

Fig. 1 Working stress field of blade

片在外场的实际故障情况,选择第一榫齿部位作为叶片的考核部位。

1.2 试验方案

叶片的考核部位确定后,需要设计合适的试验夹具和设备来实现对叶片的加载,保证叶片考核部位在试验条件下的应力状态与其实际工作状态相似。为此,在近年来笔者所在课题组进行涡轮叶片高温试验工作的基础上,设计了如图 2 所示的试验夹具(材料为不锈钢 1Cr12Ni2WMoVNb)。其中,内夹具为 28.5 mm×35.5 mm×(58~68) mm 的六面体,中部通过靠模加工后包裹在叶身至叶冠部位;外夹具为两块 86 mm×25 mm×135 mm 的六面体,通过 4 根螺栓(∅17 mm)相连并将内夹具压紧;外夹具端部另有一根螺栓将外夹具与上夹具连接;叶片榫齿部分固定在与下夹具连接的真正轮盘榫槽内。试验机通过上夹具向夹具系统传递载荷,借助内夹具与叶身的摩擦作用对叶片进行径向拉伸模拟叶片的离心载荷;在叶片上施加一定的弯矩来模拟气动力的作用。

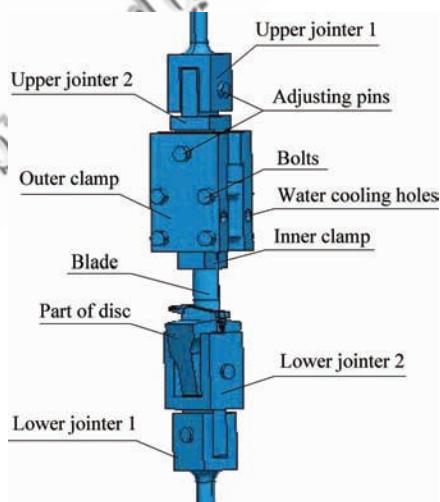


图 2 涡轮叶片低周疲劳试验夹具

Fig. 2 Illustration of loading rig

叶片温度场的模拟借助感应加热实现,由于在叶片稳态工作中,考核部位上温度变化较小,故试验中考核部位温度保持为恒温。低周疲劳载荷谱如图 3 所示,其中拉伸载荷 P 与试验温度 T 均根据叶片的实际工作条件确定。

试验时,首先在叶片考核部位表面粘贴多个应变片,对这一部位的应变状态进行常温试验标

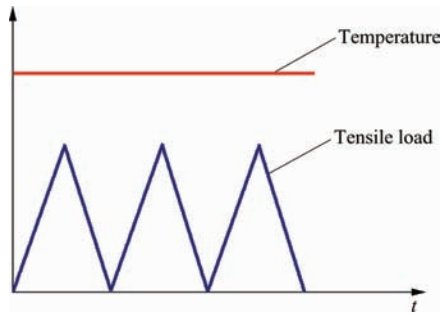


图3 低周疲劳试验载荷谱

Fig. 3 Load spectrum of blade low cycle fatigue (LCF) test

定,并和有限元计算所得的工作状态应变场进行对比,保证试验条件下考核部位的应变状态与其真实工作条件相似。

1.3 试验结果

利用上述试验方法,首先对 K403 合金叶片进行高温疲劳试验。试验中,全部试验叶片均实现了考核部位的起裂和破坏,疲劳源位于第一榫齿叶盆侧表面,断口形貌(图4)与外场故障叶片非常接近,证明所采用的试验方案可以模拟叶片考核部位的实际工作条件。

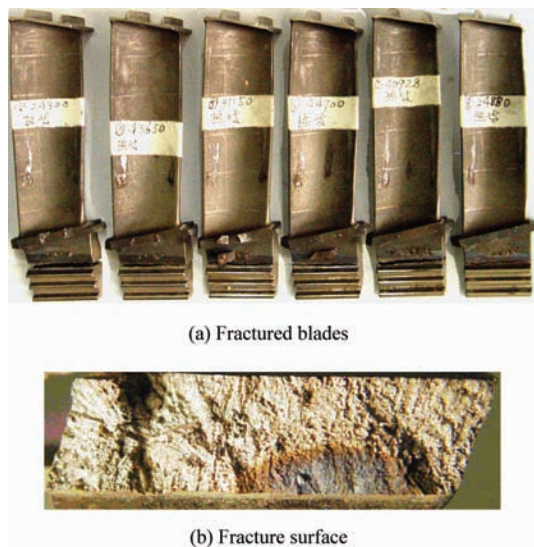


图4 K403合金叶片低周疲劳试验典型断裂特征

Fig. 4 LCF fracture surface of blade K403

基于完全相同的试验方法对 DZ22B 合金叶片进行试验。考虑到两类叶片材料不同,DZ22B 合金弹性模量(116.2 GPa)低于 K403 合金

(183.04 GPa),而夹具对于叶片考核截面的弯矩是通过叶身传递的,叶身刚性降低,势必影响弯矩的传递。因此在试验中,通过调整夹具上轮盘孔的位置、改变内外夹具加持高度两个方面的措施来保证弯矩的传递,使得叶片考核部位的应力分布与工作条件一致。

图5给出了DZ22B合金叶片的低周疲劳试验的典型断裂照片与断口形貌,可以看出,所有叶片均在叶身中下部起裂并破坏,疲劳源位于叶背表面;而其考核部位(第一榫齿)在叶身断裂前均未出现裂纹。图6对DZ22B合金叶片的试验断裂部位进行了统计,在全部DZ22B合金叶片试验中,大多数叶片(约70%)的起裂和破坏发生在叶身根部(下缘板到叶身的过渡部位)。



图5 DZ22B合金叶片低周疲劳试验典型断裂特征

Fig. 5 LCF fracture surface of blade DZ22B

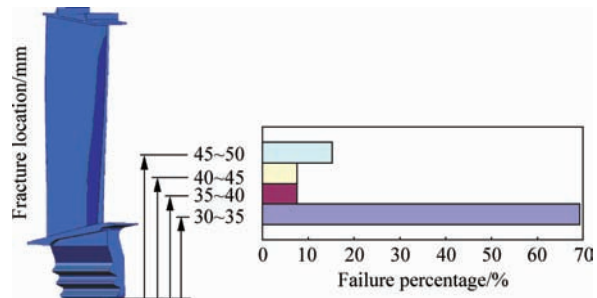


图6 DZ22B合金叶片的断口位置统计

Fig. 6 Fatigue fracture histogram of blades DZ22B

对比两类叶片的试验结果可以看出,在相同的试验方法下,几何形状相同的DZ22B合金叶片

与 K403 合金叶片呈现不同的破坏特点。如前所述,根据叶片工作应力场计算结果,两类叶片工作状态下应力分布趋势接近;而试验标定和 K403 合金叶片试验结果都证明试验条件能够模拟叶片考核部位的工作条件。因此有必要对试验条件下的两类叶片的应力场进行分析,借以研究上述试验现象出现的原因。

2 试验条件叶片应力场分析

2.1 计算模型

在 ANSYS 软件中对叶片及内外夹具进行有限元建模,如图 7 所示。在内夹具和叶身之间设置面-面接触关系模拟叶片的摩擦加载条件,在叶片榫齿部位施加合理的边界约束模拟试验中该部位的约束和定位关系。利用热-结构耦合分析技术对两类叶片试验条件下的应力场进行弹性计算。其中试验夹具和 K403 合金叶片材料采用各向同性本构模型,DZ22B 合金叶片材料采用正交各向异性本构模型。

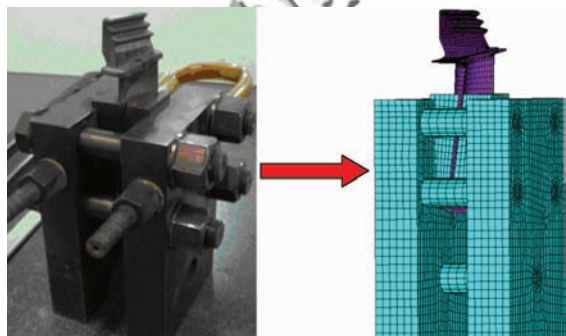


图 7 试验系统的数值建模

Fig. 7 Finite element model of test system

2.2 试验条件叶片局部应力场

图 8 为计算得到的试验条件下的叶片榫头到叶身根部的应力分布云图。由图 8 可以看出:试验条件下,两类叶片的应力分布情况相似,极值应力均出现在第一榫齿部位;两类叶片第一榫齿部位的应力分布趋势与其工作条件下的应力场(图 1)吻合。这说明试验条件能够模拟叶片考核部位的真实工作环境。

将榫齿部位峰值应力所在截面和叶身根部截面上的应力分布情况进行对比,绘制应力-位置曲

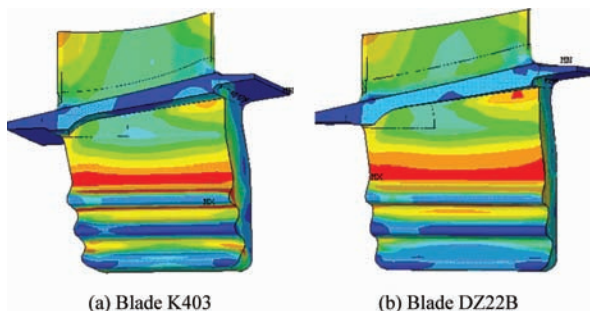


图 8 试验条件下叶片考核部位应力场

Fig. 8 Test stress distribution of key section

线,如图 9 所示,图中横坐标为节点在截面上的相对位置,纵轴表示各节点的应力水平。可以看出,两类叶片榫齿截面叶盆一侧的应力水平均明显高于其叶身根部的应力水平。其中,K403 合金叶片两个部位峰值点的应力幅值差达到 200 MPa,而 DZ22B 合金叶片约为 150 MPa。

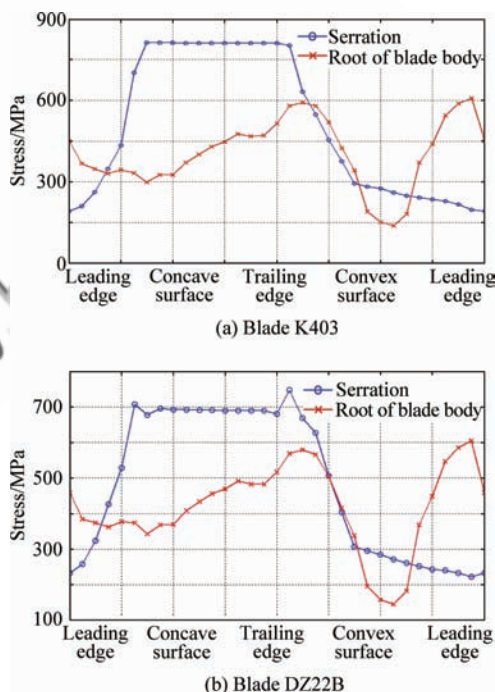


图 9 试验条件下叶片榫齿和叶身根部应力分布对比
Fig. 9 Stress distribution comparison between serration and root of body

上述计算结果表明:普通铸造 K403 合金叶片在试验中的失效情况符合“应力最大则最危险”的传统破坏理论,而定向凝固 DZ22B 合金叶片在试验中发生断裂的叶身根部并非其应力最大部位。由此可以推断,DZ22B 合金叶片不同部位的

材料力学性能存在差异,叶身根部的疲劳强度比榫齿部位低至少 150 MPa。

3 DZ22B 合金叶片晶粒形貌研究

材料的力学性能依赖于其化学成分和微观组织。利用定向凝固技术生产涡轮叶片,正是基于对晶粒的成核及生长过程的控制以获取理想的材料性能的一个重要手段。因此了解定向凝固叶片各部位的材料性能差异,需对其不同部位的定向凝固组织进行研究。

3.1 研究方法

铸件的凝固组织可通过“弱酸腐蚀”和“数值模拟”两种方法获得。本文采用元胞自动机有限元(CAFE)数值模拟技术对 DZ22B 合金叶片的凝固组织从晶粒尺度展开研究。CAFE 法是一种基于概率模型的宏微观耦合分析技术,它以凝固热力学和形核生长动力学为依据,可以考虑形核位置与取向的随机性,能够模拟柱状晶的择优生长过程和晶粒取向与热梯度之间的关系^[7,13]。

根据前期理论计算与试验对比研究的结果,确定 CAFE 法模拟叶片晶粒形貌的元胞尺寸为 50 μm ,晶粒成核模型和生长模型分别为

$$n(\Delta T) = \frac{n_{\max}}{\Delta T_{\sigma} \sqrt{2\pi}} \int_0^{\Delta T} \exp\left[-\frac{(\Delta T(t) - \Delta T_N)^2}{2\Delta T_{\sigma}^2}\right] d(\Delta T(t)) \quad (1)$$

$$v = \alpha \Delta T^2 + \beta \Delta T^3 \quad (2)$$

式中: n_{\max} 、 ΔT_{σ} 和 ΔT_N 为成核参数; α 和 β 为生长系数。各参数取值如表 1 所示。

表 1 晶粒成核参数及生长系数

Table 1 Nucleation and growth kinetics parameters

Parameter	Value
Maximum grain nucleus density n_{\max}	5.0×10^8
Standard deviation undercooling $\Delta T_{\sigma}/^{\circ}\text{C}$	1.5
Average nucleation undercooling $\Delta T_N/^{\circ}\text{C}$	15
Growth coefficient α	1.0×10^{-6}
Growth coefficient β	1.5×10^{-7}

3.2 数值模拟结果及讨论

基于上述数值模型,对 DZ22B 合金叶片的定向凝固过程进行数值模拟,得到其晶粒形貌如图 10 所示。可以看出在所设定的模拟环境下,靠近柱状晶生长起始端的叶片榫头部位的晶粒密度较大,取向较为杂乱;而叶身以上部位的柱状晶择优生长明显,取向与理想的 $\langle 001 \rangle$ 方向偏差很小 ($0^{\circ} \sim 12^{\circ}$),这符合实际叶片生产中的晶向检验标准,说明数值模拟所设置的边界参数较好地反应了叶片的定向凝固成形环境。

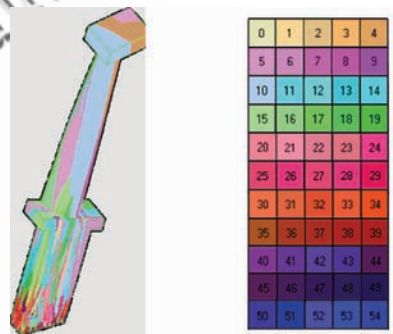


图 10 DZ22B 合金叶片凝固组织模拟结果

Fig. 10 Grain structure of blade DZ22B calculated with CAFE model

针对试验所考核的叶片第一榫齿部位和发生断裂的叶身根部,进行晶向分布情况的对比研究,绘制其(001)散点极图(描述晶向分布)如图 11 所示。可以看出,在 DZ22B 合金叶片榫齿部位(图 11(a))和叶身根部(图 11(b))的极图上,极点均集中分布在其中心和边缘区域,这说明 DZ22B 合金叶片榫齿部位和叶身根部的晶粒存在明显的“径向择优生长”和“各向异性”特点;另一方面,叶身根部不仅晶粒数量远少于榫齿部位,晶粒的相

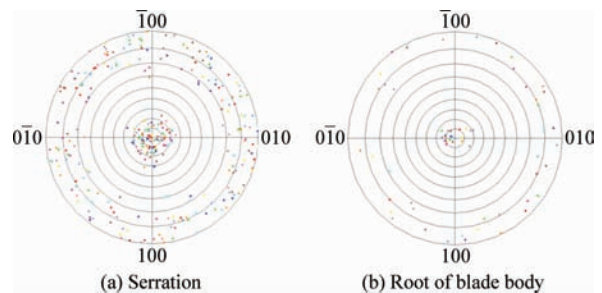


图 11 DZ22B 合金叶片榫齿和叶身根部(001)散点极图

Fig. 11 Pole figure of plane (001) of blade DZ22B

对密度也小于榫齿部位。因此,在 DZ22B 合金叶片榫齿部位和叶身根部,这种高度的各向异性微观结构和差异较大的晶粒密度,势必导致其力学性能的不同。

图 12 给出了 DZ22B 合金叶片叶身根部的局部晶粒形貌。由于下缘板处几何突变的存在,致使在叶身根部出现了不平行于 $\langle 001 \rangle$ 方向的横向晶界;此外,由于下缘板处几何形状的突然扩张和收缩,促使晶粒生长的竞争更加激烈(原理类似于单晶叶片成形中的选晶器),在叶身根部一些取向较差的晶粒被淘汰而终止生长。这两种情况都会弱化叶身根部的径向承载能力,致使该处材料的疲劳强度低于叶片榫齿部位,更易出现裂纹。这与 2.2 节中对试验结果的分析结论吻合。

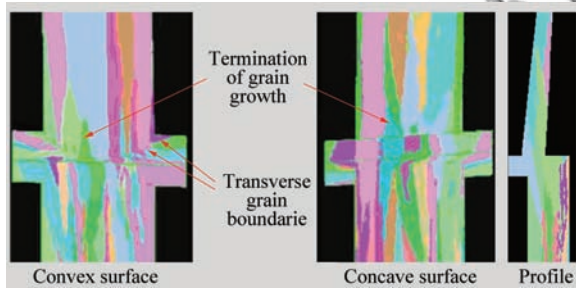


图 12 DZ22B 合金叶片叶身根部晶粒形貌分析

Fig. 12 Grain structure in root of blade DZ22B

因此,对于定向凝固涡轮叶片,不能用传统的处理等轴晶叶片的方法进行强度设计和寿命预测。一方面在叶片设计过程中应综合考虑叶片的几何结构特点和工作环境,优化结构和成形方案,严格控制主要承载方向和部位的晶粒形态。另一方面在定向凝固叶片的使用过程中,应考虑各部位的材料强度差异,不能假设整个叶片材料性能均匀,依据标准试件(圆棒或平板)材料数据预测其使用寿命。

4 结论

在定向凝固涡轮叶片和普通铸造等轴晶叶片低周疲劳试验的基础上,借助有限元技术对两类叶片的应力场进行了对比分析,并研究了定向凝固叶片典型部位的晶粒形貌特征,据此给出影响定向凝固涡轮叶片破坏的主要因素,研究结论如下:

(1) 定向凝固涡轮叶片各部位的材料强度是不同的。对于此次研究的 DZ22B 合金涡轮叶片,其叶身根部的疲劳强度低于榫齿部位。

(2) 定向凝固涡轮叶片的疲劳破坏模式与普通铸造叶片不同,其破坏不仅与应力场分布有关,而且受叶片各部位显微组织形态影响,叶片的失效不一定发生在应力最大的部位,有可能发生在材料强度薄弱部位。

参 考 文 献

- [1] 苏彦庆,郭景哲,刘畅,等. 定向凝固技术与理论研究的进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(1): 25-30.
Su Yanqing, Guo Jingzhe, Liu Chang, et al. Development of processing technique and theoretical research of directional solidification[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(1): 25-30. (in Chinese)
- [2] Shenoy M M, McDowell D L, Neu R W. Transversely isotropic viscoplasticity model for a directionally solidified Ni-base superalloy[J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22(12): 2301-2326.
- [3] 李海燕. 正交各向异性粘塑性损伤统一本构模型的研究与应用[D]. 北京:北京航空航天大学, 2002.
Li Haiyan. Research and application of anisotropic viscoplastic damage uniform constitutive model [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)
- [4] Yin Z Y, Cheng X M, Yang Z G, et al. Study on strength and life of anisotropic single crystal blade—Part I: crystallographic constitutive models and applications[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14(1): 18-23.
- [5] Yin Z Y, Cheng X M, Yang Z G, et al. Study on strength and life of anisotropic single crystal blade—Part II: experimental research [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14(1): 24-29.
- [6] Yang X L, Dong H B, Wang W, et al. Microscale simulation of stray grain formation in investment cast turbine blades[J]. Materials Science and Engineering, 2004, 386(1-2): 129-139.
- [7] Sun R J, Yan X J, Deng Y, et al. Microstructure simulation of blade-like specimens during directional solidification [C]//Proceedings of 2nd ISJPPE. 2008: 280-284.
- [8] Raabe D. Computational materials science[M]. Berlin: Wiley-VCH Press, 1998.
- [9] Arakere N K, Swanson G. Effect of crystal orientation on fatigue failure of single crystal nickel base turbine blade superalloys[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1): 161-176.
- [10] Hou N X, Gou W X, Wen Z X, et al. The influence of

crystal orientations on fatigue life of single crystal cooled turbine blade[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 492(1-2): 413-418.

- [11] Yan X J, Nie J X. Creep-fatigue tests on full scale directionally solidified turbine blades[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(4): 044501.
- [12] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 7-14.
- Chen Chuanyao. *Fatigue and fracture* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002: 7-14. (in Chinese)
- [13] Gandin C A, Desbiolse J L, Rappaz M. A three-dimensional cellular automaton—finite element model for the prediction of solidification grain structures[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30(12): 3153-3165.

作者简介:

孙瑞杰(1983—) 女, 博士研究生。主要研究方向: 高温结构力学。

Tel: 010-82316356

E-mail: srj_0515@163.com

闫晓军(1973—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 高温结构力学、智能材料结构等。

Tel: 010-82316356

E-mail: yanxiaojun@buaa.edu.cn

聂景旭(1930—) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 断裂力学和损伤力学理论及其在燃气轮机上的应用, 智能材料的设计方法和工程应用等。

Tel: 010-82316356

Failure Characteristics of Directional Solidification Turbine Blade Under High Temperature Low Cycle Fatigue Load

SUN Ruijie, YAN Xiaojun^{*}, NIE Jingxu

School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

Abstract: Under high temperature low cycle fatigue (LCF) loads, directional solidification (DS) turbine blades present quite different failure features as compared with equiaxed (EQ) turbine blades with identical geometry and similar stress distribution. All the EQ blade specimens fractured in the key section located at the serration part of the blade. However, this part of the DS blade specimens exhibited no microcrack before the fracture in the root of the blade body. Obviously, the damage characteristic of the DS blade is different from that of the conventional EQ blade, which fractures at the highest stress point. Further theoretical investigation indicates that grain structure of the DS blade has a significant impact on both the properties of the material and its subsequent load capacity. For the DS blade, the LCF damage is not only related to its stress field, but also affected by the microstructure of various parts.

Key words: turbine blade; directional solidification; low cycle fatigue; finite element method; grain

Received: 2010-05-12; **Revised:** 2010-08-03; **Accepted:** 2010-08-19; **Published online:** 2010-11-15 18:34

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101115.1834.001.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20101115.1834.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China(10872015); Aeronautical Science Foundation of China(2008ZB51017); New Century Program for Excellent Talents of Ministry of Education of China(NCET-06-0178)

*** Corresponding author.** Tel.: 010-82316356 E-mail: yanxiaojun@buaa.edu.cn