

镍基单晶合金涡轮叶片榫头裂纹尖端 应力场及扩展趋势

郜玉芬¹, 胡卫兵¹, 温志勋², 岳珠峰², 陈 龙¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055;

2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院 工程力学系, 西安 710129)

摘 要: 采用率相关晶体滑移有限元程序, 考虑单晶材料晶体取向的影响, 对镍基单晶合金涡轮叶片榫头裂纹特性进行有限元分析. 分别计算了榫头裂纹在各向同性条件以及 $\{001\}$, $\{011\}$, $\{111\}$ 三种不同晶体取向下的裂纹尖端的 Mises 应力分布, 并判断了裂纹的扩展趋势. 结果表明: 镍基单晶合金涡轮叶片在 $\{001\}$ $[110]$, $\{011\}$ $[110]$, $\{111\}$ $[110]$ 取向下的裂纹尖端均存在着明显的应力集中和较大的应力梯度, 应力的最大值存在于裂纹尖端; $\{001\}$, $\{011\}$, $\{111\}$ 三种不同晶体取向的裂纹尖端的扩展开裂角分别为 45° , 54.7° , 90° , 说明镍基单晶合金涡轮叶片的裂纹扩展趋势受晶体取向的影响较大.

关 键 词: 镍基单晶合金叶片; 裂纹尖端; 有限元法; 应力场; 扩展趋势

中图分类号: V232.4; TG111.91

文献标志码: A

Stress field and propagation trend of crack tip in tenon of nickel-based single crystal superalloys turbine blade

GAO Yu-fen¹, HU Wei-bing¹, WEN Zhi-xun², YUE Zhu-feng², CHEN Long¹

(1. School of Civil Engineering,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Department of Engineering Mechanics, School of Mechanics,

Civil Engineering and Architecture,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: A rate-dependent crystal slip finite element program was used to analyze the crack characteristic in tenon of nickel-based single crystal superalloys turbine blade, while the influence of crystallographic orientations was also taken into account. The Mises stress distributions of crack tip in tenon under isotropic condition combined with $\{001\}$, $\{011\}$, $\{111\}$ crystal orientations were researched. Then the crack propagation trend was examined. The results show that: significant stress concentration and relatively large stress gradient occur in the crack tip with orientations of $\{001\}$ $[110]$, $\{011\}$ $[110]$, $\{111\}$ $[110]$. The maximum stress value appears at the crack tip. Crack propagation trend varies with different crystallographic orientations. Under $\{001\}$ $[110]$, $\{011\}$ $[110]$, $\{111\}$ $[110]$ conditions, the crack propagation angle is 45° , 54.7° , 90° , respectively. It is clear that crystallographic orientation has significant influence on crack propagation trend of nickel-based single crystal superalloys turbine blade.

Key words: nickel-based single crystal superalloys blade; crack tip;
finite element method; stress field; propagation trend

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(50905143, 51175424, 51210008); 西北工业大学基础研究基金(JC201239)

作者简介: 郜玉芬(1988—), 女, 河南新乡人, 硕士生, 主要从事涡轮叶片榫头榫槽接触研究.

镍基单晶合金由于其良好的抗蠕变能力和高温强度而被广泛应用于制造先进航空发动机涡轮叶片^[1-2].叶片通过榫齿与榫槽相连接,榫齿与榫槽在接触表面产生较大的接触压力,工程实际表明20%的发动机结构故障是由榫齿连接结构的失效而引起的^[3-4],故对叶片榫齿断裂特性的研究具有较大的理论和工程意义.

镍基单晶合金的化学成分和组织状态与普通铸造高温合金差异较大,所以镍基单晶合金涡轮叶片的断裂特性不同于常规合金叶片^[5].在对单晶的研究方面,Rice等^[6]提出了FCC(面心立方)单晶紧凑拉伸试样在不同晶体取向下载裂纹尖端的应力场的渐进解;Flouriot等^[7]对平面应变状态下拉伸试样的裂纹尖端的应力应变场进行了系统分析;Tinga^[8]用有限元方法计算了镍基单晶合金试样角裂纹尖端的应力强度因子,发现材料的各向异性对应力强度因子存在较大的影响,定性地解释了镍基单晶合金裂纹尖端的扩展行为;Marchal等^[9]对单晶CT(computed tomography)试样裂纹尖端在蠕变及循环载荷下的应力应变场进行了有限元模拟,指出单晶裂纹尖端扩展是沿着特定的矢量方向的;温志勋等^[10-11]则利用实验与有限元模拟结合的方法考察了镍基单晶合金CT试样在不同晶体取向下的应力分布和裂纹扩展路径.

以上的研究均是对单晶紧凑拉伸试样的裂纹进行的,缺少对镍基单晶合金涡轮叶片榫齿裂纹的分析.郑旭东等^[12]针对某型航空发动机发生的涡轮转子叶片和轮盘榫齿裂纹故障,对该叶片和轮盘进行了振动特性及低周循环疲劳寿命的计算分析,得出导致该型发动机涡轮叶片和轮盘榫齿发生裂纹故障的原因是低周疲劳和共振引起的高周疲劳的结论;赵萍等^[13]利用软件XactLIFE对某发动机涡轮工作叶片的裂纹进行了蠕变和复合蠕变-疲劳的最低寿命的计算,得出了蠕变载荷是测试单元中裂纹形核的主要驱动力且最低寿命都出现在叶盆尾缘第1个榫齿之上和缘板之下的伸根区域的结论.但是以上文献对于镍基单晶合金涡轮叶片处于接触状态下在榫齿根部出现裂纹的考察较少,而该问题的研究对于研究镍基单晶合金涡轮叶片在实际使用过程中的断裂特征有着重要的意义.

本文以镍基单晶合金涡轮叶片为模型,利用有限元方法分别计算了弹性状态下材料在各向同性,以及 $\{001\}$, $\{011\}$, $\{111\}$ 三种不同晶体取向下载裂纹尖端的应力场,

并预测了裂纹尖端的扩展趋势.

1 理论模型

1.1 有限元模型

试车中发现,叶片易在叶盆侧榫头第1榫齿根部靠近排气边端面出现裂纹.为了模拟裂纹的断裂特性,在此处预置角裂纹,裂纹尺寸为 $3\text{ mm} \times 0.04\text{ mm}$,叶片的模型如图1所示.

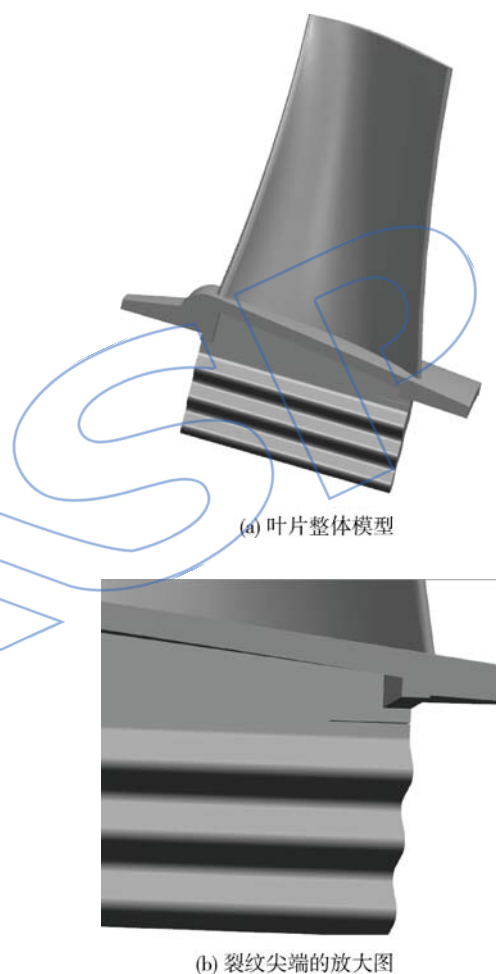


图1 叶片的模型

Fig. 1 Model of blade

涡轮叶片榫头与榫槽接触连接,在接触面上产生较大的接触应力,为了提高计算效率,将榫槽简化为与榫头接触面上的边界条件.为了约束榫头的刚体位移,计算中约束榫齿与榫槽接触表面的法向位移,以及榫头底面与榫槽相距最近的一个节点3个方向的位移.模拟叶片在实际工作时的复杂应力状态,所有单元均施加 2000 r/min 转速下的离心力,并在每个节点施加带有梯度的温度载荷.

经过粗细网格试算,确定在裂纹尖端采用

0.04 mm×0.04 mm 的网格,即可保证计算结果具有较高的精度.整个涡轮叶片模型均采用六面体网格,叶片整体模型如图 2(a)所示,裂纹尖端的网格如图 2(b)和图 2(c)所示.

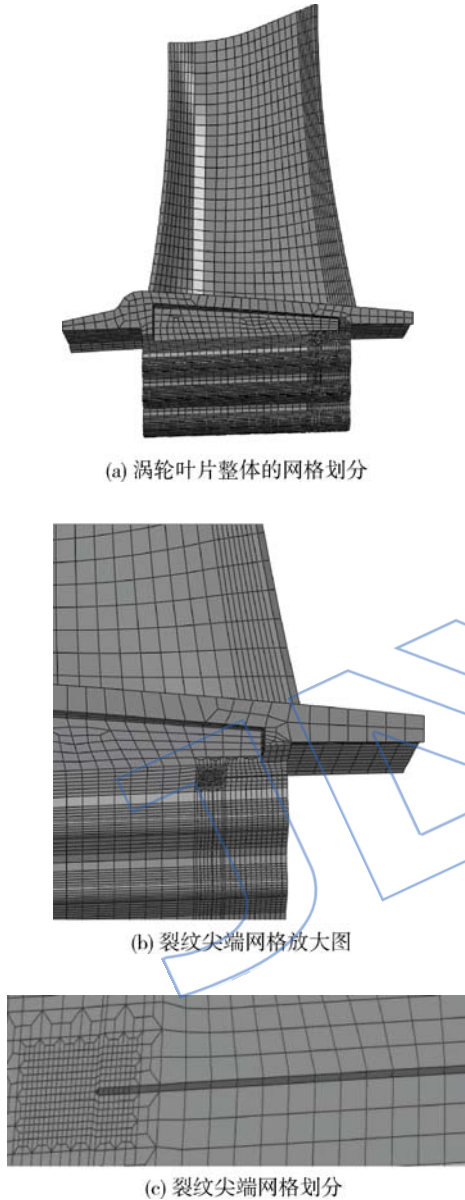


图 2 有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh

为了研究不同晶体取向下角裂纹的断裂,本文选取 3 种晶体取向下的裂纹,分别为 {001} [110] ({001} 为裂纹平面法向, [110] 为裂纹方向), {011} [110], {111} [110] 取向. 裂纹的几何结构如图 3 所示.

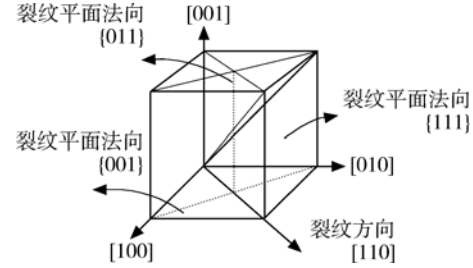


图 3 裂纹的几何结构

Fig. 3 Geometry structure of crack

1.2 材料模型

1.2.1 本构模型

镍基单晶晶粒为面心立方结构,在晶轴坐标系下,晶体主轴 x, y, z 即 {100}, {010}, {001} 取向的弹性应力应变关系满足立方对称,即

$$\sigma = C\varepsilon \quad (1)$$

式中应力矩阵为

$$\sigma = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \sigma_{12} \quad \sigma_{13} \quad \sigma_{23}]$$

应变矩阵为

$$\varepsilon = [\varepsilon_{11} \quad \varepsilon_{22} \quad \varepsilon_{33} \quad \varepsilon_{12} \quad \varepsilon_{13} \quad \varepsilon_{23}]$$

弹性刚度矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix}$$

式中 C_{11}, C_{12}, C_{44} 为弹性模量和泊松比的函数,若计算所用的坐标系不同于晶轴坐标系,则需要对 C 进行坐标转换,此时的弹性刚度矩阵为

$$C^{XYZ} = TCT^T \quad (2)$$

式中

$$T = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2l_1m_1 & 2l_1n_1 & 2m_1n_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2m_2 & 2l_2n_2 & 2m_2n_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3m_3 & 2l_3n_3 & 2m_3n_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & l_1m_2 + l_2m_1 & l_1n_2 + l_2n_1 & m_1n_2 + m_2n_1 \\ l_1l_3 & m_1m_3 & n_1n_3 & l_1m_3 + l_3m_1 & l_1n_3 + l_3n_1 & m_1n_3 + m_3n_1 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & l_2m_3 + l_3m_2 & l_2n_3 + l_3n_2 & m_2n_3 + m_3n_2 \end{bmatrix}$$

式中 l, m, n 分别是新坐标轴 $O-X-Y-Z$ 在晶体坐标轴 $o-x-y-z$ 中的方向余弦。

本文采用率相关晶体滑移模型^[14], 应力 σ 作用下滑移系 α 的分切应力可以表示为

$$\tau^{(\alpha)} = \sigma : P^{(\alpha)} \quad (3)$$

式中 $P^{(\alpha)}$ 为

$$P^{(\alpha)} = \frac{1}{2} [m^{*(\alpha)} \otimes n^{*(\alpha)} + n^{*(\alpha)} \otimes m^{*(\alpha)}] \quad (4)$$

式中 $m^{*(\alpha)}, n^{*(\alpha)}$ 分别为滑移系 α 的滑移方向和滑移面法线方向的单位矢量。求解的关键是确定晶体滑移系的滑移率 $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$, 它与分切应力相关

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \left[\frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right] \left[\left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right| \right]^{(1/n)-1} \quad (5)$$

式中 n 为应变率敏感指数, $\dot{\gamma}_0$ 称为参考剪切应变率, 是表征晶体当前硬化应变的参数; $g^{(\alpha)}$ 为参考切应力, 在此, 可以认为它仅与滑移量 γ 相关, 可以表示为

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta=1}^N h_{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^{\beta}| \quad (6)$$

式中 $h_{\alpha\beta}$ 称为硬化系数, 它决定了滑移系 β 中的剪切滑移量对滑移系 α 所造成的硬化。 $h_{\alpha\beta}$ 为 γ 的函数, $\gamma = \sum_{\beta=1}^N |\gamma^{\beta}|$ 为累积滑移应变。此本构关系已在有限元软件 Abaqus 用户子程序 umat 中实现。

1.2.2 材料参数

镍基单晶 DD3[001]取向的材料参数^[15]如表1所示, 其他取向下的材料参数参见文献[15]。 n 为 0.02, $\dot{\gamma}_0$ 为 0.003 s^{-1} 。假定晶体材料八面体滑移系 ($\{111\}[\bar{1}10]$) 开动, 其硬化规律为

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta=1}^{12} h_{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^{\beta}| \quad (7)$$

其中 $h_{\alpha\beta} = q_{\alpha\beta} h_{\beta}$ (不对 β 求和), $q_{\alpha\beta}$ 是潜硬化系数, h_{β} 是单硬化率, 表示为

$$h_{\beta} = h_0 \left[1 - \frac{g^{(\alpha)}}{\tau_s} \right] \quad (8)$$

表1 镍基单晶 DD3[001]取向的力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of Nickel-based single crystal in orientation of [001]

温度/°C	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
20	115	0.313
700	89	0.322
800	85	0.326
850	78	0.330
980	64	0.340

材料参数为: $\tau_s = 585 \text{ MPa}$, $h_0 = 600 \text{ MPa}$, $q_{\alpha\beta} = 1.3$, $g_0^{(\alpha)} = 300 \text{ MPa}$ 。

2 计算结果

2.1 各向同性材料条件下的计算结果

将材料假设为各向同性时, 裂纹尖端的 Mises 应力分布云图如图4所示。其应力场关于裂纹面对称, 应力的最大值出现在裂纹尖端, 而且裂纹尖端存在着较大的应力梯度。应力集中区域形成了沿着垂直裂纹面方向的局部带状条纹。

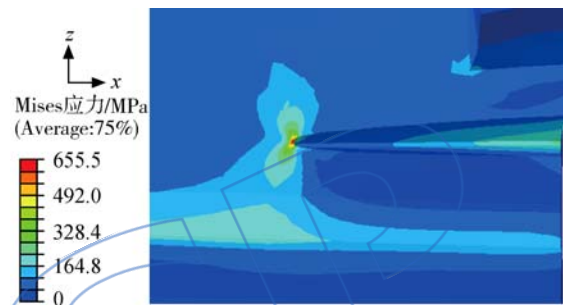


图4 各向同性条件下叶片的 Mises 应力分布

Fig. 4 Mises stress distribution of blade under isotropic condition

2.2 三种晶体取向下载纹尖端应力场的计算结果

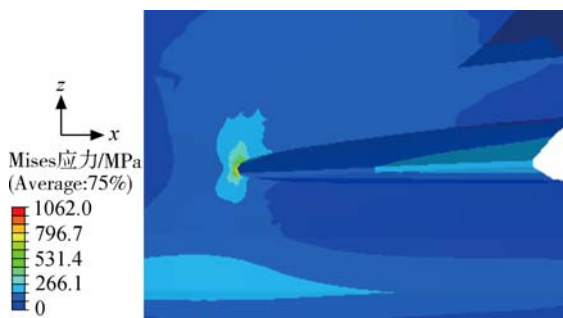
2.2.1 三种晶体取向下载纹尖端的应力场

图5(a), 图5(b), 图5(c)分别是镍基单晶合金涡轮叶片 $\{001\}[\bar{1}10]$ 取向, $\{011\}[\bar{1}10]$ 取向, $\{111\}[\bar{1}10]$ 取向裂纹尖端的 Mises 应力分布云图。

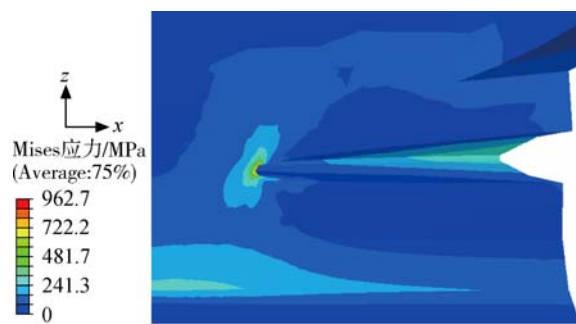
对比3种不同晶体取向下载纹尖端的应力场可见

1) 在相同的载荷水平下, $\{001\}[\bar{1}10]$ 取向下的 Mises 应力最大, 达到 1062.0 MPa ; $\{011\}[\bar{1}10]$ 取向下的次之; 各向同性下的 Mises 应力最小, 为 655.5 MPa 。

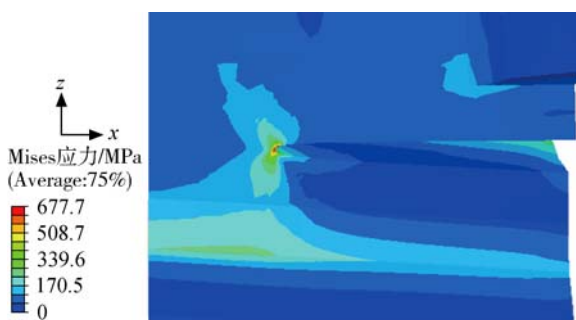
2) $\{001\}[\bar{1}10]$ 取向下载纹尖端的 Mises 应力的最大值



(a) [001][110]取向



(b) {011}[110]取向



(c) {111}[110]取向

图 5 叶片的 Mises 应力分布

Fig. 5 Mises stress distribution of blade

也出现在裂纹尖端处,并且裂纹尖端存在着明显的应力集中现象和较大的应力梯度.与各向同性材料不同的是应力集中区域的局部带状条纹偏于裂纹面方向.

3) $\{111\}[110]$ 取向下的 Mises 应力场关于裂纹面基本对称,与各向同性材料相比,其应力的最大值仍然出现在裂纹尖端处,裂纹尖端也存在明显的应力集中现象和较大的应力梯度;应力集中区域出现了沿着垂直裂纹面方向的局部带状条纹.

4) $\{011\}[110]$ 取向下的 Mises 应力场与各向同性材料不同,关于裂纹面不对称,应力场在裂纹面以下部分向斜下方延伸,而在裂纹面以上部分向斜上方延伸.与前两种裂纹存在相似之处是应力的最大值仍位于裂纹尖端,且存在明显的应力集中现象和较大的应力梯度.

2.2.2 镍基单晶合金涡轮叶片的裂纹扩展趋势

一般用滑移系分切应力来判断滑移系启动与否和度量滑移程度^[8].观察裂纹尖端的应力结构,发现应力集中区域出现了沿着特定矢量前进的局部带状条纹,即滑移带.图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)分别为 $\{001\}[110]$ 、 $\{011\}[110]$ 、 $\{111\}[110]$

取向下的裂纹尖端的自由表面最大分切应力分布,其中 A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 分别表示滑移带沿特定矢量前进的方向.镍基单晶合金涡轮叶片 $\{001\}[110]$ 取向下的裂纹尖端的滑移带有两条,其矢量方向与 x 坐标轴夹角分别在 45° 和 135° 附近; $\{011\}[110]$ 取向下的裂纹尖端的滑移带也有两条,其矢量方向与 x 坐标轴夹角分别在 54.7° 和 123.5° 附近; $\{111\}[110]$ 取向下的裂纹尖端滑移带矢量方向与 x 坐标轴夹角为 90° .

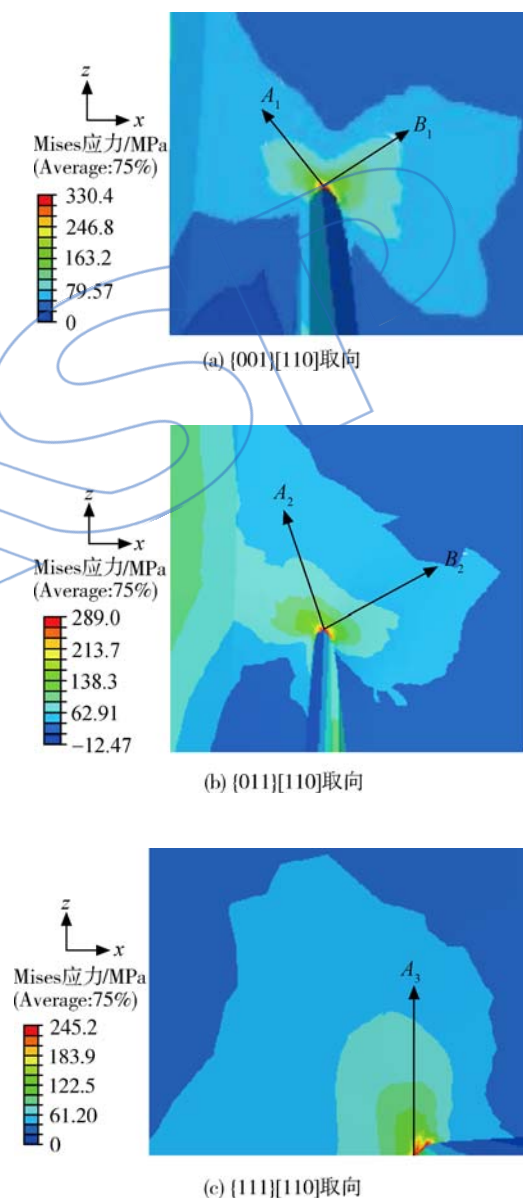


图 6 裂纹尖端自由表面最大分切应力分布

Fig. 6 Distributions of the maximum resolved shear stress in free surface of crack tip

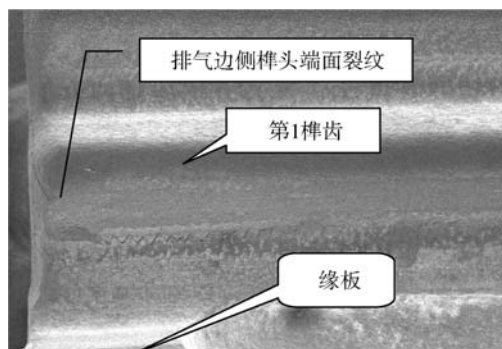
由裂纹尖端滑移带的特点可以判定,镍基单晶合金涡轮叶片的裂纹在 $\{001\}[110]$ 取向下的裂

纹将首先沿着与 x 坐标轴成 45° 的方向开裂,随后沿着与 x 坐标轴成 135° 方向扩展,依次循环直到试样断裂,所以裂纹扩展路径为 Z 字型外观;在 $\{011\}[110]$ 取向,裂纹扩展矢量方向与 x 坐标轴的夹角近似为 54.7° 和 125.3° ;在 $\{111\}[110]$ 取向,裂纹将沿着与 x 坐标轴成 90° 的方向扩展,使得裂纹扩展路径为方波状和阶梯状。

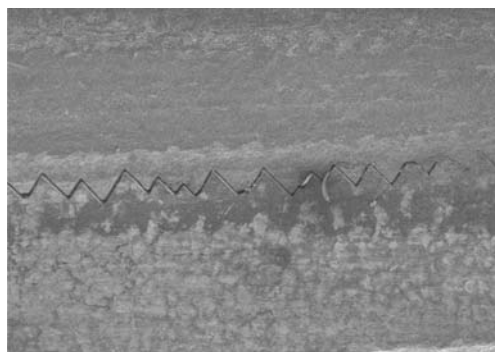
3 讨论

从观察的多片叶片来看,该型镍基单晶合金涡轮叶片无论是在低周循环疲劳试验中,还是在长时和短时试车过程后,其断裂或裂纹均起源于靠近排气边的第 1 榫齿根部;多次发生的涡轮叶片断裂或裂纹故障尽管工作条件和断裂特征有较大的差别,但其裂纹部位都相同,说明该叶片第 1 榫齿根部靠近排气边的位置属于叶片工作时的应力高应力区。同时,从观察到的盘片配合状况来看,叶片第 1 榫齿根部靠近排气边的位置处于工作面边缘部位,在叶片工作中处于自由端和约束端的结合部,确属叶片上的高应力区,最易出现裂纹。

观察故障叶片出现裂纹后的尖端断口可以发现,裂纹断口形态是类似的,均表现为取向不同的光滑平面和相互平行的平直短条,且断裂平面与叶片纵向一般并不垂直,可以断定这些断裂平面为叶片的结晶学平面。叶片的断裂特征反映了叶片断裂是沿着结晶面发生的,结晶面不同,叶片的断裂特征将不同。试车中叶片裂纹处的扩展趋势表现为 Z 字形的锯齿状结构,结合上述的计算结果, $\{001\}[110]$, $\{011\}[110]$, $\{111\}[110]$ 取向裂纹分别沿着 45° , 54.7° , 90° 的开裂角扩展,说明镍基单晶合金涡轮叶片的裂纹扩展趋势受晶体取向的影响较大。图 7 所示是镍基单晶合金涡轮叶片产生的锯齿状裂纹。



(a) 叶片叶盆侧榫头裂纹



(b) 叶片榫齿根部的锯齿状裂纹

图7 榫头锯齿状裂纹

Fig. 7 Serration crack in tenon

4 结论

本文采用有限元法分别计算了弹性状态下镍基单晶合金涡轮叶片靠近排气边的第 1 榫齿根部裂纹在各向同性和 $\{001\}[110]$, $\{011\}[110]$, $\{111\}[110]$ 取向下的裂纹尖端应力场,验证了有限元分析的可行性,得出了以下结论:

1) 该型镍基单晶合金涡轮叶片多次发生的断裂或裂纹故障虽然工作条件和断裂特征有较大的差别,但均在基本相同的部位起源,说明该叶片叶盆侧榫头伸根段第 1 榫齿根部靠近排气边端面的位置属于叶片工作时的应力高应力区,裂纹均在高应力区产生。

2) 镍基单晶合金涡轮叶片在各向同性和 $\{001\}[110]$, $\{011\}[110]$, $\{111\}[110]$ 取向下的裂纹尖端均存在着明显的应力集中和较大的应力梯度,应力的最大值均存在于裂纹尖端且应力集中区域形成了不同的局部带状条纹。

3) 镍基单晶合金涡轮叶片处于工作应力状态下时,在 $\{001\}$, $\{011\}$, $\{111\}$ 三种不同晶体取向的裂纹尖端的扩展开裂角分别为 45° , 54.7° , 90° ,证明镍基单晶合金涡轮叶片的裂纹扩展趋势是沿着特定的滑移带矢量方向的。

参考文献:

- [1] Pollock T M, Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure, and properties [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 361-374.
- [2] Daniel L, Johan M, Kjell S, et al. A combined critical plane and critical distance approach for predicting fatigue crack initiation in notched single-crystal superalloy components [J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(10): 1351-1359.

- [3] 张丽辉,唐定忠,曹雪刚.单晶高温合金损伤与断裂特征研究[J].失效分析与预防,2012,7(3):148-152.
ZHANG Lihui, TANG Dingzhong, CAO Xuegang. Damage and fracture characteristics of single crystal superalloy[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(3): 148-152. (in Chinese)
- [4] 古远兴,温卫东,崔海涛.高低周载荷作用下燕尾榫结构的微动疲劳寿命预测[J].推进技术,2008,29(2):240-243.
GU Yuanxing, WEN Weidong, CUI Haitao. Prediction of fretting fatigue life of dovetail joint under high-cycle and low-cycle load [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(2): 240-243. (in Chinese)
- [5] 陶春虎.航空发动机转动部件的失效与预防[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [6] Rice J R. Tensile crack tip fields in elastic-ideally plastic crystals[J]. Mechanics of Materials, 1987, 6(4): 317-335.
- [7] Flouriot S, Forest S, Cailletaud G, et al. Strain localization at the crack tip in single crystal CT specimens under monotonous loading: 3D finite element analysis and application to nickel-base superalloys[J]. International Journal of Fracture, 2003, 124(1/2): 43-77.
- [8] Tinga T. Stress intensity factors and crack propagation in a single crystal nickel-based superalloy [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(12): 1679-1692.
- [9] Marchal N, Flouriot S, Forest S, et al. Crack-tip stress-strain fields in single crystal nickel-base superalloys at high temperature under cyclic loading[J]. Computational Materials Science, 2006, 37(1/2): 42-50.
- [10] 温志勋,苟文选,岳珠峰.镍基单晶裂纹扩展路径研究[J].稀有金属材料与工程,2007,36(9):1549-1553.
WEN Zhixun, GOU Wenxuan, YUE Zhufeng. Crack propagation paths and fracture of Ni-based single crystal[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(9): 1549-1553. (in Chinese)
- [11] 温志勋,岳珠峰,于庆民,等.镍基单晶合金 CT 试样裂纹尖端应力结构及晶体滑移特性[J].航空学报,2007,28(4):964-970.
WEN Zhixun, YUE Zhufeng, YU Qingmin, et al. Characteristics of crack-tip stress structure and crystal slipping in nickel-base single superalloys CT specimens [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 964-970. (in Chinese)
- [12] 郑旭东,蔚夺魁,王兆丰,等.某型航空发动机涡轮叶片和轮盘榫齿裂纹故障力学分析[J].航空发动机,2005,31(3):35-38.
ZHENG Xudong, YU Duokui, WANG Zhaofeng, et al. Mechanical analysis of crack failures in turbine blade and disk serration of an aeroengine [J]. Aeroengine, 2005, 31(3): 35-38. (in Chinese)
- [13] 赵萍,何清华,李维.某燃气涡轮工作叶片裂纹分析[J].航空动力学报,2009,24(9):2033-2039.
ZHAO Ping, HE Qinghua, LI Wei. Crack analysis of the first stage blade on a gas turbine [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 2033-2039. (in Chinese)
- [14] WAN Jiansong, YUE Zhufeng. Stress distribution near grain boundary in anisotropic bicrystals and tricrystals[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(1): 39-46.
- [15] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册:第2卷 变形高温合金 铸造高温合金[M].北京:中国标准出版社,2002:792-806.