

文章编号: 1000-8055(2022)04-0684-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210230

基于晶体塑性的涡轮盘短裂纹扩展模拟方法

张 凭¹, 陆 山¹, 景 鑫¹, 杨 茂¹, 罗忠兵², 周荣欣³

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710172;

2. 大连理工大学 无损检测研究所, 辽宁 大连 116024;

3. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 针对低周疲劳载荷下发动机涡轮盘早期短裂纹扩展行为, 提出适用于工程结构的耦合晶体塑性 (CP) 理论和扩展有限元方法 (XFEM) 的多晶短裂纹模拟方法。该方法采用晶体内总累积分解切应变作为裂纹扩展判据并使裂纹沿最活跃滑移系对应的滑移平面传播。框架采用子模型技术/分区域网格细化以及宏-介观本构结合的方法解决真实工程结构和微观模型尺度不匹配的问题, 在可接受的计算代价下预测了涡轮盘危险截面处的短裂纹扩展路径及速率。结果表明该结构内早期裂纹生长路径及速率受到晶体取向的影响而出现较大分散性, 同时验证了基于 CP-XFEM 的框架在预测工程结构短裂纹扩展寿命及分散性上的可行性。

关 键 词: 涡轮盘; 高温镍基合金; 短裂纹; 数值模拟; 晶体塑性 (CP); 扩展有限元法 (XFEM)

中图分类号: V232.3

文献标志码: A

Simulation method of short crack propagation in turbine disks based on crystal plasticity

ZHANG Ping¹, LU Shan¹, JING Xin¹, YANG Mao¹,
LUO Zhongbing², ZHOU Rongxin³

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Nondestructive Testing and Evaluation Laboratory,

Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;

3. College of Civil Engineering,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In view of the early-stage short crack propagation behaviour in turbine disks under low-cycle fatigue, a method coupling crystal plasticity (CP) theory and extended finite element method (XFEM) was proposed to simulate short cracks in engineering structures. The method used the total cumulative shear strain in crystals as the criterion of crack propagation and

收稿日期: 2021-05-11

基金项目: 国家留学基金委 (201806290092)

作者简介: 张凭 (1993—), 男, 博士, 主要从事镍基高温合金裂纹模拟及晶体塑性理论研究。E-mail: pzhang@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 陆山 (1955—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机结构强度、振动及可靠性研究。

E-mail: shanlu@nwpu.edu.cn

引用格式: 张凭, 陆山, 景鑫, 等. 基于晶体塑性的涡轮盘短裂纹扩展模拟方法[J]. 航空动力学报, 2022, 37(4): 684-693. ZHANG Ping, LU Shan, JING Xin, et al. Simulation method of short crack propagation in turbine disks based on crystal plasticity[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(4): 684-693.

made the crack propagate along the slip plane with the most active slip system. By using sub-model technology/regional refinement of grids and a combination of macro-micro constitutive models, the framework overcame the scale mismatch between the real engineering structure and the micro model, and then predicted the short crack propagation path and rate in the dangerous section of a technique turbine disk at an acceptable calculation cost. The results showed that the short crack propagation path and rate in structures was highly affected by crystal orientations, resulting in a large dispersion of fatigue life. At the same time, it verified the feasibility of the CP-XFEM-based framework in predicting the short crack propagation life of engineering structures.

Key words: turbine disk; nickel-based superalloy; short crack; numerical simulation; crystal plasticity (CP); extended finite element method (XFEM)

航空发动机涡轮盘作为安全性关键部件需要承受极端载荷并达到设定服役寿命。在当前的“损伤容限”设计方法下,准确地预测其低周疲劳循环寿命尤为重要。众多实验研究表明,用于制造涡轮盘的高温镍基合金中短裂纹扩展特性与宏观长裂纹存在明显差异且更容易受到微观结构的影响^[1],表现出沿滑移方向扩展的曲折路径以及不规则的传播速率^[2-5]。由于短裂纹的萌生和扩展速率不稳定且不易被检测,因此使用长裂纹的扩展特性来预测部件的短裂纹扩展寿命可能会得到不准确的预估结果。为了更好地开展涡轮盘定寿工作,有必要建立数值模型来研究镍基高温合金中的裂纹早期扩展行为。

由于裂纹结构的几何不连续和尖端奇异性,采用传统的有限元方法(FEM)不能高效地模拟其扩展过程,因而产生了一系列针对传统FEM的改进,例如虚拟裂纹闭合技术(VCCT)或内聚力模型(CZM)等。这些方法可以在预设裂纹路径以及已知能量耗散的前提下得到裂纹扩展速率。重复建模分网技术以及单元删除技术也可以用于不连续结构的模拟,但缺点是裂纹界面需要与网格重合且计算耗时较多。扩展有限元方法(XFEM)^[6]的提出在一定程度上克服了上述缺陷:由于向传统FEM单元形函中引入了额外的自由度和方程,该方法可以生成与网格无关的任意裂纹路径且无需重新分网。因此XFEM被广泛用于各类宏/微观裂纹的计算^[7-13]。

在XFEM的基础上,近年来有研究工作使用晶体塑性(CP)理论来模拟滑移主导的短裂纹扩展。由于从晶体学滑移的角度来描述材料的变形特征,CP为模型引入了微观和介观尺度的参量。

例如Farukh等人^[9]使用剪切塑性变形作为损伤准则模拟了多晶中与第一主应变方向正交的裂纹扩展路径。在此基础上,Zhang等人^[10-11]采用各个滑移系上的独立切应变作为驱动力成功模拟了面心立方(FCC)单晶合金中沿滑移方向的裂纹路径及扩展速率。此外,Wilson等人^[12-13]基于位错构型能研究了多种单晶及寡晶体中的短裂纹,成功模拟了裂纹的滑移系切换及生长速率波动。这些研究为CP-XFEM的发展做出了重要贡献,但是仍然受限于数值稳定性问题尚未应用于实际工程结构。与此同时,也有研究工作使用Tanaka和Mura基于晶界位错堆积的滑移带萌生理论来模拟多晶中的裂纹扩展^[14]并应用于试件及轮盘结构。例如牟园伟和陆山模拟了多晶试样中的小裂纹萌生与融合^[15],并进一步研究了涡轮盘中不同晶粒尺寸及表面状态下的短裂纹扩展规律^[16]。这类模型假设材料仅发生弹性变形并在每一步加载后更新几何模型并重启计算。其计算效率较高但也存在无法考虑塑性变形状态及过程的问题。

综上,目前还鲜有研究使用CP-XFEM成功模拟多晶镍基高温合金的滑移主导短裂纹扩展,同时由于短裂纹与真实结构的尺寸差异,其在轮盘构件上的应用还鲜见报道。因此,本文提出一种适用于工程结构的基于CP-XFEM的多晶短裂纹模拟方法:使用子模型及局部多晶细化完成宏观-介观建模,基于CP本构获得的材料微观参量并使用XFEM在可接受计算量下得到构件动态裂纹扩展过程。该方法被用于预测某镍基涡轮盘设计方案中微观结构相关的裂纹扩展路径与速率并与宏观模型对比。

1 基于 CP-XFEM 的多晶短裂纹扩展模拟方法

1.1 CP 本构

在有限元软件 ABAQUS 中使用自定义材料子程序 UMAT 实现了有限变形框架下基于滑移的率相关 CP 本构^[17-18], 其中各个滑移系统的塑性切应变率可以表示为

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right)^n \text{sign}(\tau^{(\alpha)}) \quad (1)$$

其中 $\dot{\gamma}_0$ 为参考切应变率; $\tau^{(\alpha)}$ 为滑移系 α 上的分解切应力; $g^{(\alpha)}$ 为临界分解切应力, 其初始值设定为 $g_0^{(\alpha)}$; n 为滑移的率相关敏感系数。

各项同性硬化通过临界切应力的演化实现

$$\begin{cases} \dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta} h_{\alpha\beta} \dot{\gamma}^{(\beta)} \\ h_{\alpha\beta} = q_{\alpha\beta} h_{(\gamma)} \\ h_{(\gamma)} = h_0 \text{sech}^2 \left| \frac{h_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right| \end{cases} \quad (2)$$

其中 $h_{\alpha\beta}$ 为滑动硬化模量; $q_{\alpha\beta}$ 为硬化系数, 下标 α 和 β 为滑移系的指标; $h_{(\gamma)}$ 代表自硬化模量, 使用 Asaro、Peirce 等人^[17-18]提出的双曲函数形式与初始硬化模量 h_0 、临界分解切应力 τ_0 和饱和应力 τ_s 关联, 而全部滑移系的总累积切应变 γ 为

$$\gamma = \sum_{\alpha} \int_0^t |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| dt \quad (3)$$

模型围绕各个滑移系的塑性切应变增量 $\Delta\gamma^{(\alpha)}$ 进行初值预估(隐式方程 Taylor 展开构造线性显式方程组)和迭代数值求解(Newton-Raphson 方法), 并进一步更新本构变量和一致切线刚度矩阵。

裂纹尖端的高应变速率会导致 CP 计算的数值不稳定, 因此本文对 UMAT 进行改进, 在高应变率时自动采用缩小步长迭代策略。

1.2 基于内聚力行为的 XFEM

在 ABAQUS 的 XFEM 模块中使用自定义损伤子程序(UDMGINI)规定裂纹扩展准则和裂纹面法向量。考虑到模型的三向应力状态, 使用总累积切应变作为扩展准则, 并使裂纹扩展方向平行于当前最活跃的滑移系的滑动方向(图 1), 即将滑移面法向量指定为裂纹面法向。

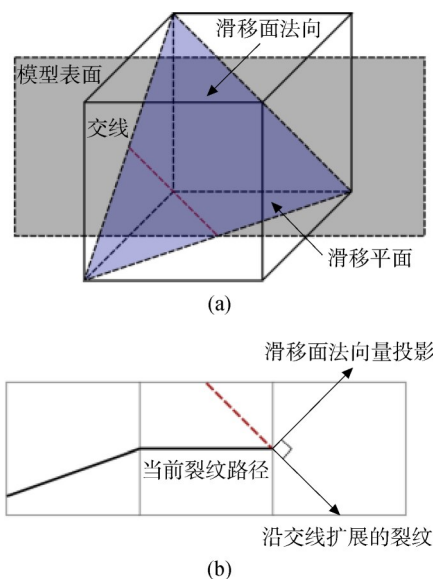


图 1 晶体中的裂纹扩展方向

Fig.1 Crack direction definition in crystal

采用基于牵引-分离内聚行为的动态裂纹扩展模型, 当裂纹前方单元的平均总累积切应变达到临界值(0.04)时, 裂纹生成并引发材料退化, 其损伤演化基于能量耗散并最终导致单元完全开裂。临界总切应变可由实验标定, 考虑到疲劳实验循环数较大, 采用真实值会加大计算成本。根据以往研究^[10], 裂尖总切应变在 1~2 个循环后进入线性增长阶段, 因此选取该阶段某值进行模拟, 使模型在可接受的时间内完成若干循环(50~100)。实际寿命预估中, 模拟寿命和实际寿命由缩放系数关联, 其值可由试件疲劳实验标定。本文仅为验证 CP-XFEM 模拟工程结构短裂纹的可行性, 因此未对循环数进行缩放。

1.3 CP-XFEM 动态裂纹扩展模拟框架

由于采用 XFEM 描述裂纹, 在模拟裂纹动态扩展的过程中无需事先指定裂纹路径或暂停计算并重新建模分网。如图 2 所示, 在每一个增量步中, 求解器调用 UMAT 获取基于 CP 理论的材料响应并基于获得的参数在 UDMGINI 中计算各个积分点的损伤参量和裂纹方向。随后根据单元平均解判断并更新裂纹集合以进入下一步的计算。其中 UMAT 和 UDMGINI 子程序之间的数据共享通过用户自定义变量 STATEV 完成。

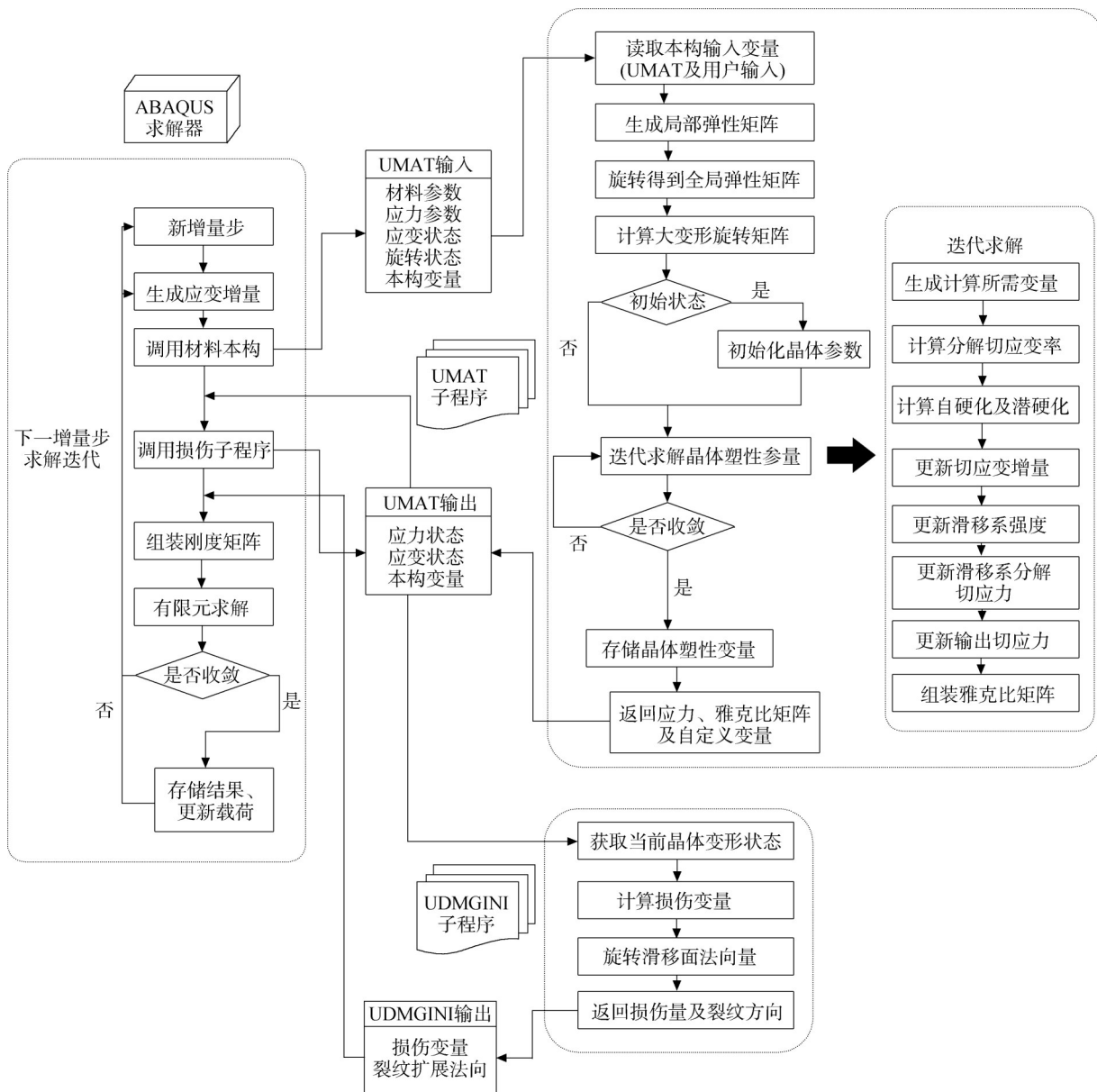


图2 CP-XFEM 动态裂纹模拟流程

Fig.2 Flow chart of the CP-XFEM-based dynamic crack simulation

2 CP-XFEM 轮盘短裂纹扩展模型

2.1 轮盘子午面模型

针对某涡轮盘设计方案建立简化子午面轴对称模型(图 3),并针对应力集中部位进行网格细分,选用二次完全积分轴对称单元(CAX8)以保证后续子模型的边界精度。在轮盘外缘以分布载荷模拟榫槽及叶片的离心作用,以三角波方式施加 14 500 r/min 的峰值转速^[19],谷值转速设定为 2 000 r/min。

考虑到材料数据有限且重点考核喉道处裂纹,在不影响计算结果的前提下做简化处理,采用喉道温度 550 ℃作均温计算。使用双线性弹塑性

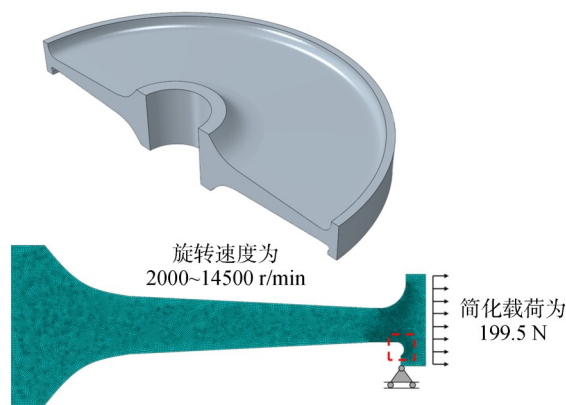


图3 涡轮盘子午面模型

Fig.3 Cross-section model of a turbine disk

本构拟合 FGHXX 材料在 550 °C 下的力学特性 (表 1),并在有限元软件 ABAQUS 中模拟其循环载荷下的应力-应变分布。

表 1 FGHXX 合金 550 °C 下材料参数

Table 1 Material parameters of FGHXX at 550 °C

弹性模量/MPa	泊松比	屈服应力/MPa	密度/(g/cm ³)
195 000	0.336	1 051	8.34

2.2 多晶裂纹扩展子模型

根据子午面分析结果,考虑到轮盘尺寸与短裂纹建模尺寸之间的差距,采用子模型的方法对轮盘喉道 (图 4(a)) 应力集中部分 (5.25 mm × 4.00 mm) 进行裂纹扩展模拟,其边界条件继承于母模型的位移解 (图 4(b))。在子模型的核心区域定义 $R=0.20$ mm 的半圆形多晶裂纹扩展区域 (图 4(c)),在该子域内使用 CP 本构获取材料滑移信息,其他区域使用前述双线性弹塑性本构以降低计算复杂度及计算量。根据轮盘结构实验^[19],部分早期裂纹萌生于大应力区的缺陷因而寿命 (裂纹长度 $a<0.038$ mm) 较短,仅为 27 次循环。为了反映材料缺陷的影响并避免 XFEM 中裂纹萌生过程所带来的不确定性和数值稳定性问题,在模型中心处引入了 0.038 mm 长的预置初始裂纹以部分反映材料缺陷影响。

选取子午面分析主要有两个原因:①ABAQUS 三维 XFEM 的计算效率和数值稳定性尚不成熟,目前无法满足 CP 等复杂本构的耦合计算;②三维多晶模型网格数量较大,因而需要更多计算资源,较难应用于工程结构。在结构方案设计寿命评估中,采用轴对称模型对疲劳寿命进行快速预估具有一定的工程应用意义。

子午面模型产生的裂纹在空间中为 2π 分布,即环状裂纹,与实际裂纹形貌存在差异。但短裂纹尺度相对于整体结构较小,其在周向产生的影响相比于结构局部应力集中和晶粒取向带来的影响可忽略,因此子午面模型仍可以代表一定厚度环段的特性。同时,考虑到实际结构中早期短裂纹的多点萌生/联合扩展,不同随机晶粒分布模型产生的环状小裂纹可与实际多源萌生裂纹近似。

随机多晶有限元模型是基于 Voronoi 技术以及 ABAQUS 二次开发完成的,其流程如图 5。Voronoi 多边形结构通过 Scipy 函数包完成并使用文件保存生成的多边形信息。随后调用

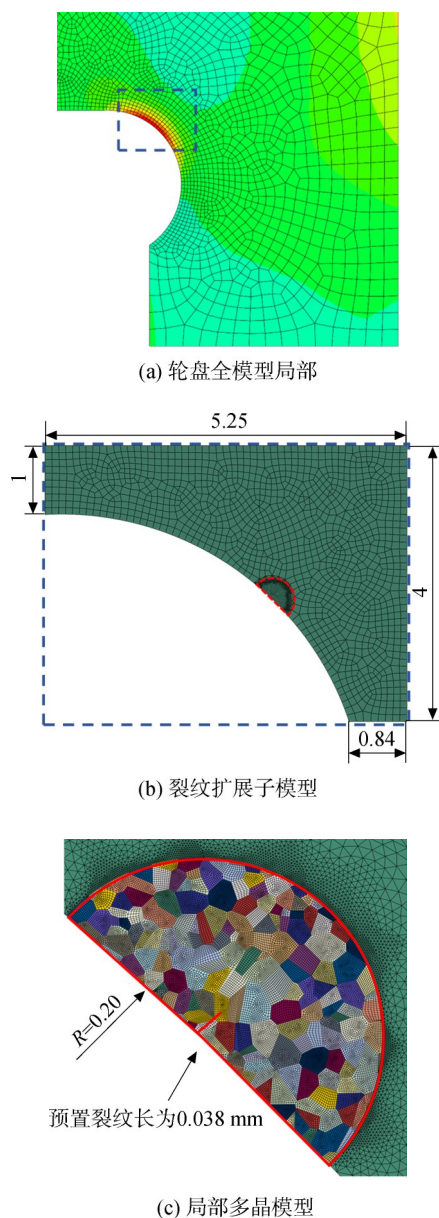


图 4 多晶裂纹扩展子模型几何结构 (单位:mm)

Fig.4 Geometry of the crack propagation model of polycrystal (unit:mm)

ABAQUS 开发接口进行模型生成和分网等前处理操作,同时生成随机的晶粒取向并修改用户子程序的定义变量矩阵,再通过集合编号和材料编号的匹配关系逐个为模型区域指定材料特性。

CP 参数在二维代表体积元素 (RVE) 中进行校准 (图 6(a)),模型预测的应力-应变曲线与实验结果对比如图 6(b) 所示,在 10% 的应变范围内两者吻合良好。根据以往研究^[20],RVE 包含至少 150 个晶粒和 4 000 个元素时,模型即可产生收敛的力学响应。参数拟合过程为^[10]:①根据应力应变曲线弹性段拟合弹性本构模量;②参考材料的

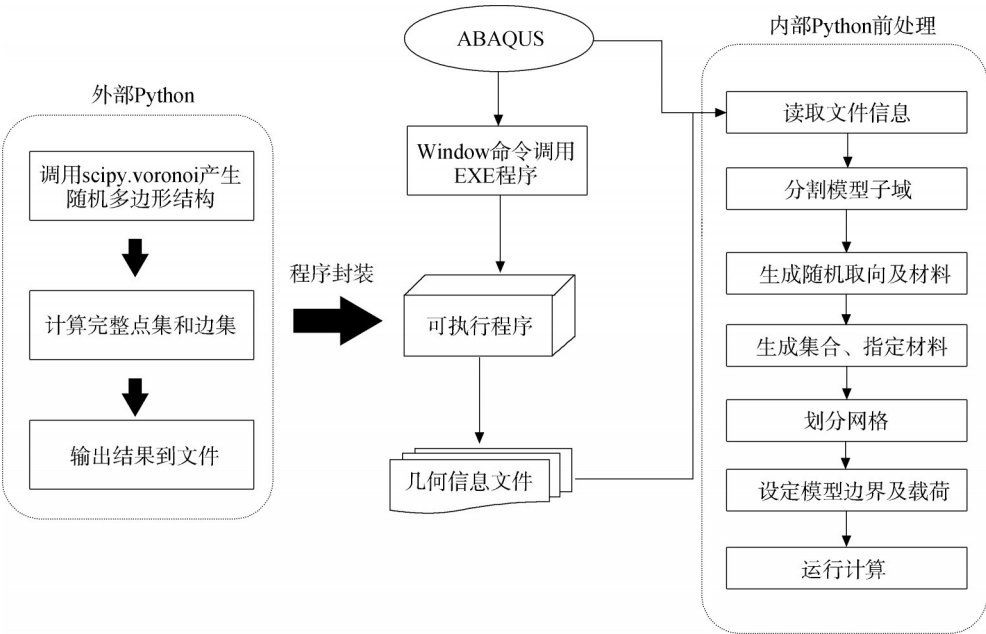


图5 随机多晶有限元模型建立流程
Fig.5 Process of generating random polycrystal FEM model

率相关特性选择数值上稳定的率相关参数;③对屈服及硬化参数进行迭代优化。优化目标参数为实验和数值计算应力的方差。拟合得到的参数见表2,其 C_{11} 、 C_{12} 和 C_{44} 为材料的弹性模量。

表2 FGHXX合金550℃下CP参数	
Table 2 CP parameters of FGHXX at 550℃	
参数	数值
C_{11}/MPa	187 600
C_{12}/MPa	63 600
C_{44}/MPa	96 600
n	10
$\dot{\gamma}_0/10^{-5} \text{ s}^{-1}$	1
h_0/MPa	465
τ_s/MPa	350
τ_0/MPa	238

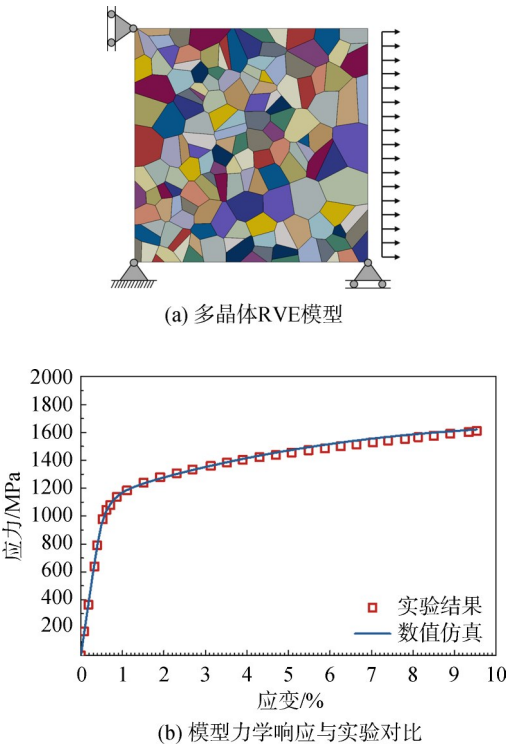


图6 有限元模型及其力学响应
Fig.6 Fnite element model and its mechanical response

3 模拟结果及分析

3.1 轮盘子午面应力应变分布

从峰值转速时的应力场(图7)可以看出该轮盘沿径向和轴向的高应力区域都集中在喉道处,而周向应力在盘心也有高值区域。以Mises等效应力衡量轮盘结构的危险点(图8),轮盘排气边喉道处最大等效应力略高于材料屈服强度因而最有可能萌生裂纹,因此在后续的子模型建立中选取了这一部分作为介观模拟区域。

3.2 多晶子模型短裂纹扩展路径

生成的随机多晶子模型在给定转速下经历了50~100个疲劳循环生成穿越3~10个晶粒的裂

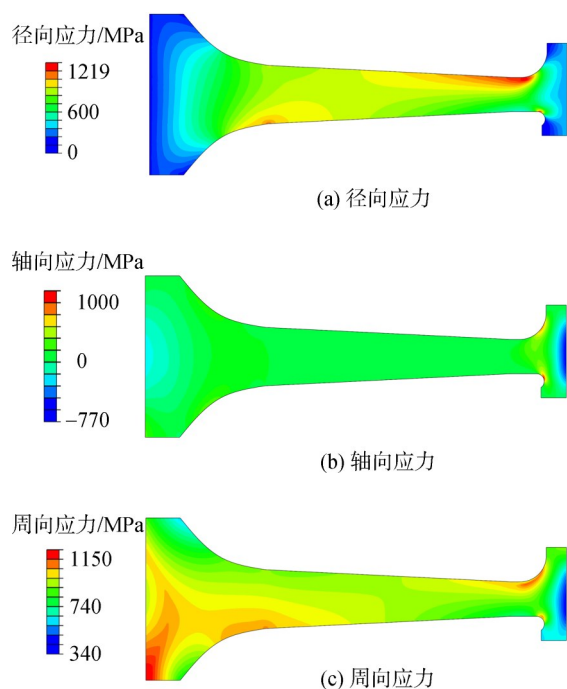


图7 峰值转速下涡轮盘子午面模型内应力分布

Fig.7 Distributions of stresses in the cross-section model of a turbine disk at the peak rotation speed

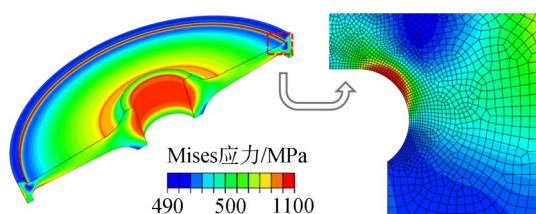


图8 危险点附近 Mises 应力分布

Fig.8 Distributions of Mises stress near the weakest point

纹。图9中展示的是在初始裂纹扩展发生前的峰值载荷下模型中的 Mises 应力、总累积分解切应变和主导滑移平面分布。其中主导滑移平面定义

为当前状态下各个材料点中具有最高累积切应变的滑移系对应的滑移面,决定了该点裂纹的扩展方向。从图9(a)可以看到,使用 XFEM 插入的裂纹可以很好地反映裂纹应力集中现象,同时也观察到宏观均匀应力场中的各个晶粒内部应力不同。这一由取向多样性引起的局部应力-应变差异同样反应在图9(b)中的总累积切应变分布中,表现为各个晶粒中塑性变形程度的显著差异以及由于取向失配导致的晶界处应力/应变上升。同时也观察到裂纹尖端所引起的塑性应变场主要分布在裂纹两侧,呈现出对称的“蝴蝶状”图样,因此裂纹侧方的损伤累积要先于正前方区域发生。从滑移系统的活跃情况分析(图9(c))可以看到,该算例的随机晶粒中四个滑移平面都被激活且在不同区域占据主导地位,而各个晶粒中的滑移面方向也各有不同。

50个循环后的裂纹路径如图10和图11所示。裂纹共途径9个晶粒,其中晶粒2和晶粒6中裂纹扩展较快且仅通过其边角。裂纹总体沿着斜向上方向生长,但在不同晶粒中的角度各有不同,其转折均发生在晶界处。分析其峰值载荷下的 Mises 应力分布(图10(a))可看到明显的裂尖应力集中,同时裂纹转折处也存在高应力区,或可成为潜在次生裂纹萌生点。总累积切应变分布中则可以清晰地观察到围绕裂纹路径的高值区域以及不同晶粒的应变差异(图10(b)),这说明采用该参量作为多晶中裂纹扩展驱动力的合理性。此外对比初始状态(图9(c))与当前状态主导滑移平面分布(图10(c))可发现,裂纹附近的局部区域发生了活跃滑移平面的切换,这说明裂纹对局部滑移活动的动态影响不可忽略,因此采用 XFEM

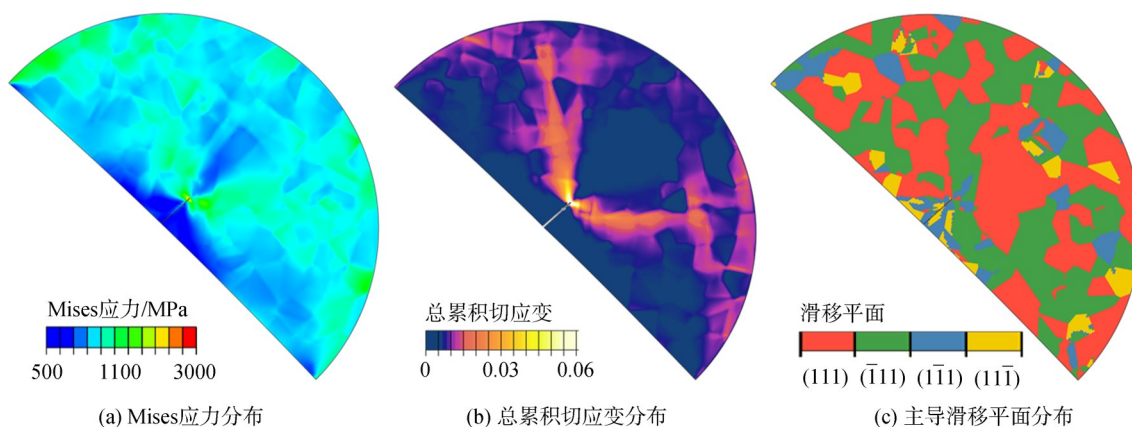


图9 裂纹未扩展前多晶模型中 Mises 应力分布、总累积切应变分布和主导滑移平面分布

Fig.9 Distributions of the Mises stress, total cumulative shear strain and dominating slip plane in the polycrystal model before the first crack propagation

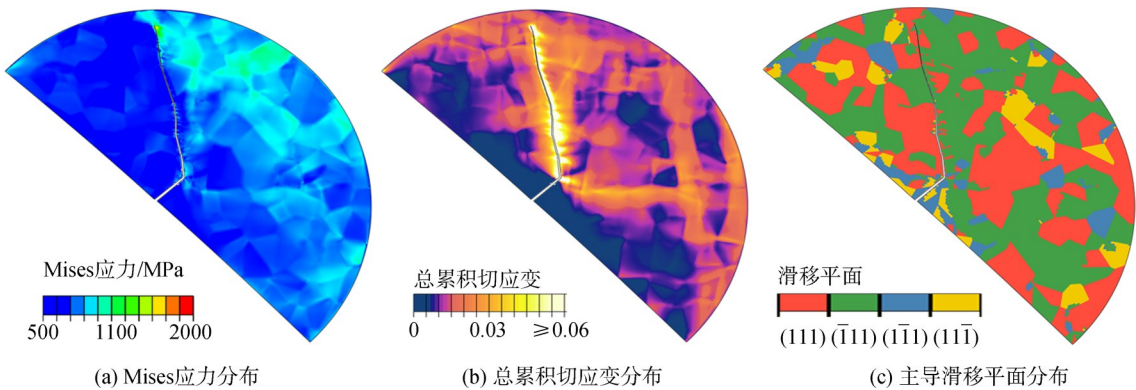


图 10 50 个循环后#0 多晶模型中 Mises 应力、总累积切应变和主导滑移平面分布

Fig.10 Distributions of the Mises stress, total cumulative shear strain and dominating slip plane in the #0 polycrystal model after 50 cycles

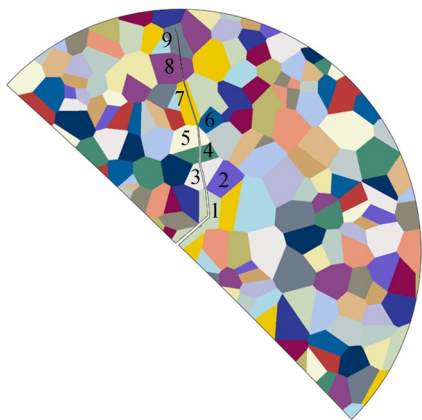


图 11 50 个循环后裂纹路径

Fig.11 Crack path after 50 cycles

实时更新裂纹结构及材料塑性变形过程是具有优势的。

进一步,改变晶粒随机取向以研究其影响。再选取三个模型结果展示在图 12 中。与此前#0 模型结果对比,裂纹扩展趋势基本一致,即沿与初始裂纹呈一定夹角的倾斜方向生长。观察到在有较大晶粒取向差异的模型中产生了实验中观察到的更尖锐的路径偏折。偏折不仅发生在晶粒交界处还同时存在于具有较强滑移系竞争行为的晶粒内部(#1 模型),这说明 CP-XFEM 可以很好地捕捉到更细节的晶粒内裂纹偏转。

为了与传统的宏观裂纹预测模型对比,在#4

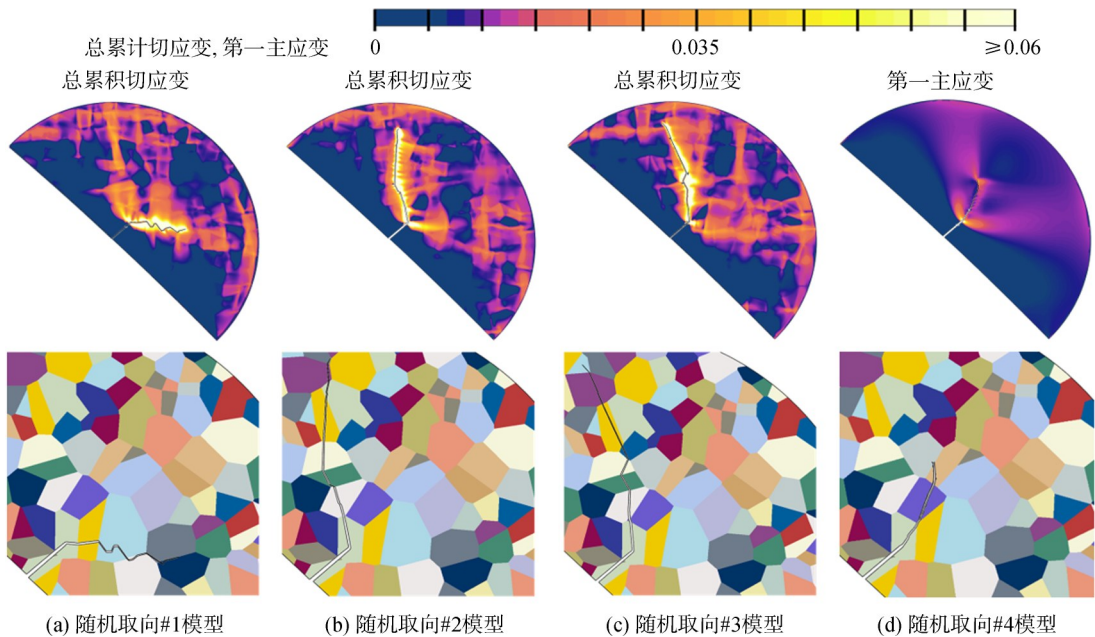


图 12 不同随机取向多晶模型中总累积切应变分布及裂纹路径以及宏观本构模型预测的裂纹

Fig.12 Distributions of total cumulative shear strain and crack paths in polycrystal models with different random crystal orientations and the predicted crack of macroscopic model

模型中使用双线性弹塑性本构替换 CP 本构, 并采用最大主应变准则控制裂纹生长 (选取为 CP-XFEM 模型达到临界时的最大主应变), 得到图 12 (d) 中的裂纹路径及应变分布图。对比 CP-XFEM 模型结果, 采用宏观模拟方法得到的裂纹倾向于沿着裂纹前端以 I 型方式扩展, 其路径不与晶体的滑移方向重合且较为平滑, 这表明宏观模型更适用于长裂纹的预测而非滑移主导的短裂纹。

统计上述所有模型中裂纹扩展长度与循环数的关系并展示在图 13(a) 中。不同于 #4 宏观模型预测的平直曲线, 介观模型成功反映了早期裂纹扩展速率的不规律性, 即与裂纹偏折及晶粒分布相对应的阶梯曲线。裂纹扩展速率与晶粒取向高度相关, 具有较大分散性。同时发现裂纹在较大晶粒中趋于稳定扩展 (曲线中线性部分) 而在边界处由于材料属性不同而出现生长加速或减速的情况。由于保持晶粒形状不变, 这里的扩展寿命分散性仅来源于晶体取向。若充分考虑晶粒形貌、晶界作用、夹杂及试件表面状态等因素, 则可以得到更贴近真实裂纹扩展寿命预测结果。采用五点多项式法^[21]计算裂纹 da/dN 并与裂纹长度关联绘制在双对数坐标系中 (图 13(b)), 可以看到宏观

模型预测的裂纹扩展规律近似于长裂纹 Paris 规律的线性段, 而介观的预测结果则有较大波动。在两种模型准则临界值等效的前提下, 介观模型预测的短裂纹扩展速率普遍高于宏观裂纹 (#4 模型), 这与实验观察基本一致^[4-5, 19, 22]。

4 结论与展望

针对低周疲劳载荷下发动机涡轮盘早期短裂纹扩展行为, 提出适用于轮盘结构的基于 CP 理论和 XFEM 的多晶短裂纹模拟方法。主要结论如下:

1) 采用晶体内总累积分解切应变作为裂纹扩展判据, 并以最活跃滑移系对应的滑移平面作为裂纹方向可以较好地反映镍基高温合金中短裂纹的滑移主导扩展行为, 即沿滑移方向的曲折裂纹路径及波动扩展速率。

2) 本方法采用的子模型技术/分区域网格细化以及宏-介观本构结合的方法可以克服工程结构和微观模型不匹配的问题, 在可接受的计算代价下预测构件裂纹扩展寿命。

3) 针对涡轮盘的短裂纹扩展进行模拟并对比具有不同晶粒取向分布的模型结果, 分析表明该结构内早期裂纹生长路径及速率受到晶体取向的影响而出现较大分散性; 通过对比宏观模型预测结果说明了 CP-XFEM 模型的合理性。

该工作验证了基于 CP-XFEM 的框架在预测轮盘结构短裂纹扩展规律及分散性上的可行性。若进一步考虑晶粒形貌、结构缺陷及表面完整性的影响并进行一定量的抽样模拟计算, 该模型可用于预测涡轮盘构件的短裂纹扩展寿命及分散性。

进一步的工作可以针对 XFEM 进行改进, 使其可以考虑裂纹分支及融合现象, 以更好地反映多晶结构中的裂纹扩展行为。同时可在材料疲劳寿命实验数据的基础上对寿命缩放系数进行标定, 并将数值模拟结果与实验 (原位 SEM) 获取的裂纹扩展数据进行对比。

致谢

本文部分工作在英国 Loughborough 大学的 Zhao L G 教授和 Baxevanakis K P 指导下进行, 并得到了国家留学基金委 (201806290092) 以及英国工程与自然科学研究委员会 EPSRC (EP/M000966/1 和 EP/K026844/1) 的支持。

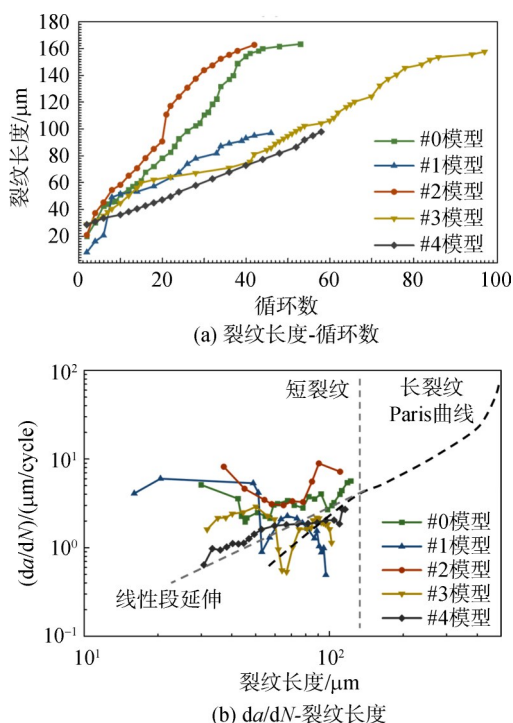


图 13 不同模型中的裂纹长度-循环数、 da/dN -裂纹长度曲线对比

Fig.13 Comparisons of relations between crack length-cycle number and da/dN -crack length of different models

参考文献:

- [1] CONNOLLEY T, REED P A S, STARINK M J. Short crack initiation and growth at 600 °C in notched specimens of Inconel718[J]. Materials Science and Engineering A, 2003 340(1/2):139-154.
- [2] TOH S F, RAINFORTH W M. Fatigue of a nickel base superalloy with bimodal grain size[J]. Metal Science Journal, 2016, 12(12):1007-1014.
- [3] MA X, SHI H J. In situ SEM studies of the low cycle fatigue behavior of DZ4 superalloy at elevated temperature: effect of partial recrystallization[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 61(2):255-263.
- [4] 朱磊, 吴志荣, 胡绪腾, 等. 镍基合金 GH4169 疲劳小裂纹的扩展行为[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8):1984-1991.
ZHU Lei, WU Zhirong, HU Xuteng, et al. Small fatigue crack growth behavior of nickel-based alloy GH4169[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(8):1984-1991. (in Chinese)
- [5] 张丽, 黄新跃, 吴学仁, 等. 镍基高温合金 GH4169 小裂纹早期扩展的原位疲劳试验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4):901-906.
ZHANG Li, HUANG Xinyue, WU Xueren, et al. In-situ experiment on early growth of small fatigue crack of nickel-based superalloy GH4169[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4):901-906. (in Chinese)
- [6] MOËS N, DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46:131-150.
- [7] RANNOU J, LIMODIN N, RÉTHORÉ J, et al. Three dimensional experimental and numerical multiscale analysis of a fatigue crack[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199:1307-1325.
- [8] CUADRA J, BAXEVANAKIS K P, LOGHIN A, et al. Validation of a cyclic plasticity computational method using fatigue full-field deformation measurements[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2016, 39(6):722-736.
- [9] FARUKH F, ZHAO L G, JIANG R, et al. Realistic microstructure-based modelling of cyclic deformation and crack growth using crystal plasticity[J]. Computational Materials Science, 2016, 111:395-405.
- [10] ZHANG P, ZHANG L, BAXEVANAKIS K P, et al. Modelling short crack propagation in a single crystal nickel-based superalloy using crystal plasticity and XFEM[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 136:105594.1-105594.11.
- [11] ZHANG P, BAXEVANAKIS K P, ZHAO L G. An investigation of short crack propagation in a single crystal Ni-based superalloy using crystal plasticity and the extended finite element method[J]. Procedia Structural Integrity, 2020, 28:1176-1183.
- [12] WILSON D, DUNNE F P E. A mechanistic modelling methodology for microstructure-sensitive fatigue crack growth[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2019, 124:827-848.
- [13] WILSON D, WAN W, DUNNE F P E. Microstructurally-sensitive fatigue crack growth in HCP BCC and FCC polycrystals[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2019, 126:204-225.
- [14] LIU X T, LU Shan. A micro-crack initiation life simulation method by improving the Tanaka-Mura's model of slip behavior[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 145:106108.1-106108.11.
- [15] 牟园伟, 陆山. 基于宏-介观模型的疲劳裂纹萌生数值模拟[J]. 机械强度, 2012, 34(3):379-383.
MU Yuanwei, LU Shan. Numerical simulation of fatigue crack initiation based on macro-micro models[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(3):379-383. (in Chinese)
- [16] 牟园伟, 陆山. 基于材料微观特性的涡轮盘疲劳裂纹萌生寿命数值仿真[J]. 航空学报, 2013, 34(2):282-290.
MU Yuanwei, LU Shan. Numerical simulation of fatigue crack-initiation life for turbine disk based on material micro-cosmic characteristics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2):282-290. (in Chinese)
- [17] ASARO R J, RICE J R. Strain localization in ductile single crystals[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1977, 25(5):309-338.
- [18] PEIRCE D, ASARO R J, NEEDLEMAN A. An analysis of nonuniform and localized deformation in ductile single crystals[J]. Acta Metallurgica, 1982, 30(6):1087-1119.
- [19] 冯引利, 吴长波, 郜伟强, 等. FGH96 涡轮盘低循环疲劳寿命分析技术与试验[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3):628-634.
FENG Yinli, WU Changbo, GAO Weiqiang, et al. Analysis technology and experiment for FGH96 disc's LCF life[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3):628-634. (in Chinese)
- [20] LIN B, ZHAO L G, TONG J. A crystal plasticity study of cyclic constitutive behaviour crack-tip deformation and crack-growth path for a polycrystalline nickel-based superalloy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(10):2174-2192.
- [21] 北京航空材料研究院. 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法: GB/T 6398-2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 450-455.
- [22] 刘文琰, 郑旻仲, 费斌军, 等. 概率断裂力学与概率损伤容限/耐久性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.

(编辑: 陈 越)