(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2020 年 7 月 16 日 (16.07.2020)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2020/143284 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 17/00 (2019.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/114718

(22) 国际申请日: 2019 年 10 月 31 日 (31.10.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201910026871.3 2019年1月11日 (11.01.2019) CN

(71) 申请人: 华东理工大学(EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。

(72) 发明人: 王润梓 (WANG, Runzi); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。
张显程 (ZHANG, Xiancheng); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。 郭素娟 (GUO, Sujuan); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。 苑光健 (YUAN, Guangjian); 中国上海市徐汇区梅陇路 130 号, Shanghai 200237 (CN)。 朱旭旻 (ZHU, Xumin); 中国上海市徐汇区梅陇路130号, Shanghai 200237 (CN)。 涂善东(TU, Shandong); 中国上海市徐汇区梅陇路130号, Shanghai 200237 (CN)。

(74) 代理人: 上海智信专利代理有限公司等 (SHANGHAI ZHI XIN PATENT AGENT LTD. et al.); 中国上海市徐汇区斜土路 1223 号之俊大厦26楼, Shanghai 200032 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,

(54) **Title:** ABAQUS-BASED MULTIAXIAL CREEP FATIGUE PREDICTION METHOD

(54) 发明名称: 一种基于ABAQUS的多轴蠕变疲劳预测方法

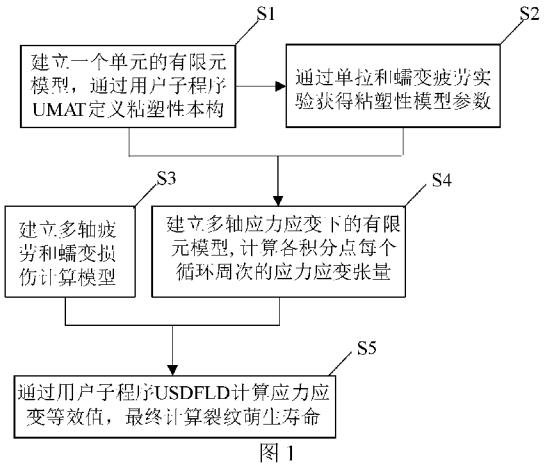


图 1

S1 Establish a finite element model of a unit and define a viscoplastic constitutive equation by means of a user subroutine UMAT

S2 Obtain viscoplastic model parameters by means of uniaxial tension and creep fatigue tests

S3 Establish a multiaxial fatigue and creep damage calculation models

S4 Establish a finite element model in multiaxial stress and strain states, and calculate stress and strain tensors of each cycle of each integration point

S5 Calculate stress and strain equivalent values by means of a user subroutine USDFLD, and finally calculate a crack initiation life

(57) **Abstract:** An ABAQUS-based multiaxial creep fatigue prediction method, comprising the steps of: S1: establishing an ABAQUS finite element model and defining, by means of a user subroutine UMAT, a viscoplastic constitutive equation of a material to be tested (S1); S2: determining model parameters required for the viscoplastic constitutive equation (S2); S3: establishing a fatigue damage calculation model and a creep damage calculation model of the multiaxial stress and strain states of said material (S3); S4: establishing an ABAQUS finite element model in the multiaxial stress and strain states, and calculating stress and strain tensors of each cycle on the basis of the defined viscoplastic constitutive equation and the model parameters (S4); and S5: calculating an equivalent stress and an equivalent plastic strain by means of a user subroutine USDFLD, and on the basis of the fatigue damage calculation model and the creep damage calculation model and in combination with the stress and strain tensors, superimposing the fatigue damage and creep damage of each cycle by means of a linear cumulative damage criterion to obtain a crack initiation life (S5).

WO 2020/143284 A1

[见续页]

CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护)：ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明：

— 关于申请人有权申请并被授予专利(细则4.17(ii))

— 发明人资格(细则4.17(iv))

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：一种基于ABAQUS的多轴蠕变疲劳预测方法，其包括步骤：S1：建立ABAQUS有限元模型，通过用户子程序UMAT定义待测试材料的粘塑性本构方程（S1）；S2：确定粘塑性本构方程所需的模型参数（S2）；S3：建立待测试材料的多轴应力应变状态的疲劳损伤计算模型和蠕变损伤计算模型（S3）；S4：建立多轴应力应变状态下的ABAQUS有限元模型，基于所定义的粘塑性本构方程和模型参数，计算得到每个循环周次的应力应变张量（S4）；S5：通过用户子程序USDFLD计算等效应力和等效塑性应变，基于疲劳损伤计算模型和蠕变损伤计算模型并结合应力应变张量，通过线性累计损伤准则叠加每个循环周次的疲劳损伤和蠕变损伤，得到裂纹萌生寿命（S5）。

一种基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法

技术领域

本发明涉及数值模拟领域，尤其涉及一种多轴蠕变疲劳预测方法。

背景技术

随着高温旋转部件大型化、高性能、长寿命的需求日益提升，包含几何不连续的结构在复杂苛刻环境下的结构完整性评估成为亟需解决的关键技术瓶颈之一。由几何不连续和复杂加载历史导致的多轴应力应变状态不可避免地成为限制了此类部件的使用寿命。近些年，有限元软件的发展可以很好地满足人们对于复杂应力应变行为的理解以及提供了该状态下精确寿命预测的可行性。

现今针对复杂结构的蠕变疲劳分析及寿命预测的主要可以分为三类。第一类是近年基于微观分析方法的晶体塑性有限元理论，其通过累积塑性滑移带和存储的能量耗散等疲劳指示因子表征蠕变疲劳演化过程。第二类是能够描述包含裂纹萌生和扩展阶段的连续损伤力学理论，其通过损伤变量引入统一的蠕变疲劳本构的方式描述材料在循环载荷下损伤累积直至断裂的过程。第三类流行于当前的设计准则，其通过非统一本构模型描述蠕变疲劳行为，并通过分别计算的蠕变损伤和疲劳损伤方程以及唯象的包络线来预测蠕变寿命。但是这三类方法有各自的缺点：第一类方法仅适用于描述微观层面的应力应变行为，对于宏观层面的大型高温部件并不适用；第二类方法侧重于描述裂纹扩展阶段的蠕变疲劳行为，其编程复杂、收敛性差、计算成本高等特点决定了这类方法不具有很强的普适性；第三类方法虽然具有操作性强的特点，但是其多用于分析稳态情况下单轴应力应变行为，对于复杂应力应变状态和复杂加载历史情况下的蠕变疲劳分析和预测并不准确。

基于此，期望获得一种新的蠕变疲劳预测方法，以更好地实现几何不连续结构在多轴应力应变状态下的蠕变疲劳分析，获得更为直观、精确度高的结果，且该蠕变疲劳预测方法实用性强。

发明内容

本发明的目的在于提供一种基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，该多轴蠕变疲劳预测方法可以更好地实现几何不连续结构在多轴应力应变状态下的蠕变疲劳分析，获得更为直观、精确度高的结果，且该蠕变疲劳预测方法实用性强。

根据上述发明目的，本发明提出了一种基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其包括步骤：

S1：建立 ABAQUS 有限元模型，通过用户子程序 UMAT 定义待测试样材料在循环载荷过程中的粘塑性本构方程；

S2：确定所述粘塑性本构方程所需的模型参数；

S3：建立待测试材料的多轴应力应变状态的疲劳损伤计算模型和蠕变损伤计算模型；

S4：建立多轴应力应变状态下的 ABAQUS 有限元模型，基于步骤 S1 中用户子程序 UMAT 所定义的粘塑性本构方程和步骤 S2 中的模型参数，计算得到每个循环周次的应力应变张量；

S5：通过用户子程序 USDFLD 计算等效应力和等效塑性应变，基于步骤 S3 中的疲劳损伤计算模型和蠕变损伤计算模型并结合步骤 S4 中得到的应力应变张量，通过线性累计损伤准则叠加每个循环周次的疲劳损伤和蠕变损伤，得到待测试材料的裂纹萌生寿命。

在本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法中，步骤 S4 中的用户子程序 UMAT 可以计算每个节点的应力应变张量。步骤 S5 中的用户子程序 USDFLD 设置的作用为：（1）提取步骤 S4 的应力应变张量，并进行标量化运算，计算应力应变等效数值；（2）将步骤 S3 的疲劳损伤计算模型和蠕变损伤计算模型输入用户子程序 USDFLD，以获得每个循环周次的疲劳损伤和蠕变损伤，上述损伤的计算可以基于等效应力应变的；(3)对每个循环周次的损伤进行线性累计损伤的叠加，以得到裂纹萌生寿命。

进一步地，在本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法中，在步骤 S2 中，在给定温度下对待测试材料进行单轴拉伸试验以及该给定温度下不同应变幅和保载时间的单轴蠕变疲劳试验，以得到高温拉伸曲线、循环软化曲线、应力松弛曲线和磁滞回线，用以确定所述粘塑性本构方程所需的模型参数。

进一步地，在本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法中，在步骤 S2 中，通过试参法模拟 ABAQUS 有限元模型的高温拉伸曲线、循环软化曲线、应力松弛曲线和磁滞回线，使之与实验结果吻合，也就是说，通过试参法所获得的曲线与实验所获得的曲线具有较好的拟合程度，以获取粘塑性本构方程所需的模型参数。

进一步地，在本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法中，在步骤 S1 中，粘塑性本构方程包括：粘塑性本构的主控方程、粘塑性本构的粘塑性方程、粘塑性本构的背应力张量非弹性随动强化方程和粘塑性本构的各项同性强化方程。

更进一步地，在本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法中，S1 步骤进一步包括步骤：

S11：采用下述公式（1）和公式（2）描述粘塑性本构的主控方程：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_t = \boldsymbol{\varepsilon}_e + \boldsymbol{\varepsilon}_{in} \qquad (1);$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_e = \frac{1+\nu}{E}\boldsymbol{\sigma} - \frac{\nu}{E}(tr\boldsymbol{\sigma})\mathbf{I} \qquad (2);$$

其中，$\boldsymbol{\varepsilon}_t$为总应变张量，$\boldsymbol{\varepsilon}_e$为弹性应变张量，$\boldsymbol{\varepsilon}_{in}$为非弹性应变张量，$E$为弹性模量，$\nu$为泊松比，$\boldsymbol{\sigma}$为应力张量，$tr\boldsymbol{\sigma}$为应力张量的迹，$\mathbf{I}$为二阶单位张量；

S12：采用下述公式（3）、公式（4）和公式（5）描述所述粘塑性本构的粘塑性方程：

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in} = \frac{3}{2}\dot{p}\frac{\mathbf{s}-\mathbf{a}}{J(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha})} \qquad (3);$$

$$\dot{p}=\sqrt{\frac{2}{3}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}:\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}}=\langle\frac{J(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha})-R-\kappa}{K}\rangle^{n} \quad (4);$$

$$J(\boldsymbol{\sigma}-\mathbf{a})=\sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{s}-\mathbf{a}):(\mathbf{s}-\mathbf{a})} \quad (5);$$

其中，$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}$为非弹性应变率张量，$\dot{p}$为累积非弹性应变率，$\mathbf{s}$为应力张量的偏量，$\mathbf{a}$为背应力张量的偏量，$J(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha})$为 Von-Mises 应力空间距离，$\boldsymbol{\alpha}$为背应力张量，$K$和$n$为率相关的材料参数，$R$为各向同性变形抗性，$\kappa$为弹性区域初始尺寸，“：”表示张量的内积运算；

S13：采用下述公式（6）和公式（7）描述所述粘塑性本构的背应力张量非弹性随动强化方程：

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}_i=\zeta_i\left(\frac{2}{3}r_i\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}-\boldsymbol{\alpha}_i\dot{p}\right)-\gamma[J(\boldsymbol{\alpha}_i)]^{m(q)}\boldsymbol{\alpha}_i \quad (6);$$

$$m(q)=\phi_1 e^{-q/\omega}+\phi_2 \quad (7);$$

其中，$\boldsymbol{\alpha}_i$表示若干个背应力张量部分中的每一个部分，ζ_i和r_i为背应力张量每个部分的材料参数，γ为描述静力回复项的材料参数，$m(q)$为描述静力回复项的指数方程，q为塑性应变幅值，ϕ_1，ϕ_2和ω为指数方程中三个材料参数，$J(\boldsymbol{\alpha}_i)$表示背应力第二不变量，e 表示以自然常数为底的指数函数，$\dot{\alpha}_i$表示背应力张量每个部分的应力变化率；

S14：采用下述公式（8）描述所述粘塑性本构的各项同性强化方程：

$$\dot{R}=b(Q-R)\dot{p}+H(1+bp)\dot{p} \quad (8);$$

其中，Q为在第一阶段快速软化的各项同性抗力渐近值，b为接近渐近值的速度参数，H为第二阶段线性软化的斜率相关的参数，p为累积非弹性应变，$\dot{R}$表示各项同性强化率。

进一步地，在本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法中，其中背应力张量分为 8 个部分，即$\boldsymbol{\alpha}=\sum_{i=1}^{8}\boldsymbol{\alpha}_i$。

进一步地，在本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法中，在所述 S3 步骤中，多轴应力应变状态的所述纯疲劳损伤计算模型为：

$$\left(\frac{\tau_{max}}{\tau_f^{'}}\frac{\Delta\gamma}{2}+\frac{\sigma_{n,max}}{\sigma_f^{'}}\frac{\Delta\varepsilon_n}{2}\right)_{max}=\frac{\tau_f^{'}}{G}\left(\frac{2}{d_f}\right)^{2b_0}+\gamma_f^{'}\left(\frac{2}{d_f}\right)^{2c_0} \quad (9);$$

其中，“$(\quad)_{max}$”表示临界平面上的最大疲劳损伤因子，τ_{max}为临界平面上的最大剪切应力，$\tau_f^{'}$为剪切疲劳强度常数，$\Delta\gamma/2$为临界平面上的剪切应变幅，$\sigma_{n,max}$为临界平面上的最大正应力，$\sigma_f^{'}$为疲劳强度常数，$\Delta\varepsilon_n/2$为临界平面上的正应变幅，G为剪切模量，d_f为一个循环周次的疲劳损伤，b_0为疲劳强度指数，$\gamma_f^{'}$为剪切疲劳延性常数，c_0为疲劳延性指数；

多轴应力应变状态的所述蠕变损伤计算模型为：

$$\begin{cases} d_c = \int_0^{t_h} \left\{ \dfrac{\frac{Z\cdot M_1}{Z+t}-\frac{Z\cdot N_1}{Z+t}\cdot\log\left(1+\frac{t}{Z}\right)}{\min\left[\varphi_1\left[\frac{Z\cdot M_1}{Z+t}-\frac{Z\cdot N_1}{Z+t}\cdot\log\left(1+\frac{t}{Z}\right)\right]^{n_1}\cdot MDF, w_{f,trans}\right]} - \dfrac{\frac{Z\cdot M_1}{Z+t}-\frac{Z\cdot N_1}{Z+t}\cdot\log\left(1+\frac{t}{Z}\right)}{w_{f,trans}} \right\} \\ M_1 = \dfrac{\bar{\sigma}_0\cdot\left(A\log\Delta\bar{\varepsilon}_{pp}+B\right)}{\bar{E}\ln 10}\cdot\log\left(1+\dfrac{\bar{\sigma}_m}{\bar{\sigma}_0}\right) \\ N_1 = \dfrac{\left(A\log\Delta\bar{\varepsilon}_{pp}+B\right)^2}{\bar{E}\ln 10} \\ MDF = \exp\left[\frac{2}{3}\left(\frac{n_2-0.5}{n_2+0.5}\right)\right]/\exp\left[2\left(\frac{n_2-0.5}{n_2+0.5}\right)\frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}}\right] \end{cases} \quad (10);$$

其中，d_c为一个循环周次的蠕变损伤，t_h为一个循环周次的保载时间，Z为弹性跟随因子，t表示一个循环周次内从保载开始的时间，φ_1为蠕变损伤第一线性回归参数，MDF为多轴延性因子，n_1为蠕变损伤第二线性回归参数，$w_{f,trans}$为失效应变能密度平台值，$\bar{\sigma}_0$为一个循环周次保载前最大等效应力，A为松弛第一参数，B为松弛第二参数，$\bar{E}$为等效弹性模量，$\Delta\bar{\varepsilon}_{pp}$为一个循环周次由疲劳产生的等效塑性应变范围，$\bar{\sigma}_m$为一个循环周次的等效平均应力，$n_2$为稳态蠕变指数，$\sigma_H$为静水应力，$\bar{\sigma}$表示等效应力。

进一步地，在本发明所述的基于ABAQUS的多轴蠕变疲劳预测方法中，在步骤S4中，建立多轴应力应变状态下的 ABAQUS 有限元模型，施加边界条件和外部载荷，划分模型网格，以得到各个积分点每个循环周次的应力应变张量。

进一步地，在本发明所述的基于ABAQUS的多轴蠕变疲劳预测方法中，步骤S5进一步包括步骤：

S51：通过用户子程序 USDFLD 提取 ABAQUS 模型中每个节点的应力张量和应变张量；

S52：通过用户子程序 USDFLD，并结合所述步骤 S51，通过标量化运算获得每一个时刻的等效应力、等效塑性应变和每一个循环周次保载时间内的弹性跟随因子，最终得到每一个循环周次的疲劳损伤和蠕变损伤；

S53：通过用户子程序USDFLD采用下述公式（11）计算多轴蠕变疲劳条件下的总损伤：

$$D^{(n)} = \sum_{i=1}^{n} d_f^{(i)} + d_c^{(i)} \quad (11);$$

其中，$D^{(n)}$为前n个循环周次的累积总损伤，$d_f^{(i)}$为第i个循环周次产生的疲劳损伤，$d_c^{(i)}$为第i个循环周次产生的蠕变损伤；

其中，当某个节点的总损伤叠加率先到失效数值1时，即可定义为最危险节点并确定裂纹萌生寿命n_i。

需要说明的是，在本发明所述的技术方案中，裂纹萌生寿命采用循环周次n_i进行表征。

本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法具有如下所述的优点和有益效果：

（1）本发明所述的多轴蠕变疲劳预测方法利用基于用户子程序 UMAT 定义待测试材

料的粘塑性本构方程，从而得到多轴应力应变状态下的蠕变疲劳行为；

（2）本发明所述的多轴蠕变疲劳预测方法利用基于用户子程序 USDFLD 计算等效应力和等效塑性应变，从而获得每个循环周次中各个积分点的蠕变损伤、疲劳损伤和总损伤数值；

（3）本发明所述的多轴蠕变疲劳预测方法具有很强的直观性，可以直观地获得几何不连续结构的裂纹萌生位置和该位置的裂纹萌生寿命。

附图说明

图 1 为本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的流程图。

图 2 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的单轴拉伸试验和模拟曲线的拟合结果图。

图 3 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的单轴蠕变疲劳试验循环软化数据和模拟曲线的拟合结果图。

图 4 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的单轴蠕变疲劳试验应力松弛数据和模拟曲线的拟合结果图。

图 5 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的单轴蠕变疲劳试验静力回复项的指数方程拟合结果图。

图 6 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的两个潜在危险点每周次疲劳损伤和每周次蠕变损伤随循环周次的轨迹图。

图 7 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的某一个潜在危险点前 100 个循环周次的磁滞回线。

图 8 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的另一个潜在危险点前 100 个循环周次的磁滞回线。

图 9 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的缺口根部次表面最危险积分点的蠕变疲劳损伤轨迹图和裂纹萌生寿命预测。

图 10 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在另一种实施方式下的两个潜在危险点每周次疲劳损伤和每周次蠕变损伤随循环周次的轨迹图。

图 11 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在另一种实施方式下的某一个潜在危险点前 100 个循环周次的磁滞回线。

图 12 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在另一种实施方式下的另一个潜在危险点前 100 个循环周次的磁滞回线。

图 13 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在另一种实施方式下的缺口根部表面的蠕变疲劳损伤轨迹图和裂纹萌生寿命预测。

具体实施方式

下面将结合说明书附图和具体的实施例对本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法做进一步的详细说明。

图 1 为本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的流程图。

如图 1 所示，在本实施方式中，基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法包括步骤：

S1：建立 ABAQUS 有限元模型，通过用户子程序 UMAT 定义待测试材料在循环载荷过程中的粘塑性本构方程；

S2：确定所述粘塑性本构方程所需的模型参数；

S3：建立待测试材料的多轴应力应变状态的疲劳损伤计算模型和蠕变损伤计算模型；

S4：建立多轴应力应变状态下的 ABAQUS 有限元模型，基于步骤 S1 中用户子程序 UMAT 所定义的粘塑性本构方程和步骤 S2 中的模型参数，计算得到每个循环周次的应力应变张量；

S5：通过用户子程序 USDFLD 计算等效应力和等效塑性应变，基于步骤 S3 中的疲劳损伤计算模型和蠕变损伤计算模型并结合步骤 S4 中得到的应力应变张量，通过线性累计损伤准则叠加每个循环周次的疲劳损伤和蠕变损伤，得到待测试材料的裂纹萌生寿命。

其中，在步骤 S2 中，在给定温度下对待测试材料进行单轴拉伸试验以及该给定温度下不同应变幅和保载时间的单轴蠕变疲劳试验，以得到高温拉伸曲线、循环软化曲线、应力松弛曲线和磁滞回线，用以确定所述粘塑性本构方程所需的模型参数，并且可以通过试参法模拟 ABAQUS 有限元模型的高温拉伸曲线、循环软化曲线、应力松弛曲线和磁滞回线，以获取粘塑性本构方程所需的模型参数。

其中，在步骤 S1 中，粘塑性本构方程包括：粘塑性本构的主控方程、粘塑性本构的粘塑性方程、粘塑性本构的背应力张量非弹性随动强化方程和粘塑性本构的各项同性强化方程。其可以通过下述步骤获得：

S11：采用下述公式（1）和公式（2）描述所述粘塑性本构的主控方程：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_t = \boldsymbol{\varepsilon}_e + \boldsymbol{\varepsilon}_{in} \qquad (1);$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_e = \frac{1+\nu}{E}\boldsymbol{\sigma} - \frac{\nu}{E}(tr\boldsymbol{\sigma})\mathbf{I} \qquad (2);$$

其中，$\boldsymbol{\varepsilon}_t$为总应变张量，$\boldsymbol{\varepsilon}_e$为弹性应变张量，$\boldsymbol{\varepsilon}_{in}$为非弹性应变张量，$E$为弹性模量，$\nu$为泊松比，$\boldsymbol{\sigma}$为应力张量，$tr\boldsymbol{\sigma}$为应力张量的迹，$\mathbf{I}$为二阶单位张量；

S12：采用下述公式（3）、公式（4）和公式（5）描述所述粘塑性本构的粘塑性方程：

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in} = \frac{3}{2}\dot{p}\frac{\mathbf{s}-\mathbf{a}}{J(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha})} \qquad (3);$$

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}:\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}} = \left\langle\frac{J(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha})-R-\kappa}{K}\right\rangle^n \qquad (4);$$

$$J(\boldsymbol{\sigma}-\mathbf{a}) = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{s}-\mathbf{a}):(\mathbf{s}-\mathbf{a})} \qquad (5);$$

其中，$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}$为非弹性应变率张量，$\dot{p}$为累积非弹性应变率，$\mathbf{s}$为应力张量的偏量，$\mathbf{a}$为背应力张量的偏量，$J(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha})$为 Von-Mises 应力空间距离，$\boldsymbol{\alpha}$为背应力张量，$K$和$n$为率相关的材料参数，$R$为各向同性变形抗性，$\kappa$为弹性区域初始尺寸，“：”表示张量的内积运算；

S13：采用下述公式（6）和公式（7）描述所述粘塑性本构的背应力张量非弹性随动强化方程：

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}_i=\zeta_i\left(\frac{2}{3}r_i\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}-\boldsymbol{\alpha}_i\dot{p}\right)-\gamma[J(\boldsymbol{\alpha}_i)]^{m(q)}\boldsymbol{\alpha}_i \qquad (6);$$

$$m(q)=\phi_1 e^{-q/\omega}+\phi_2 \qquad (7);$$

其中，$\boldsymbol{\alpha}_i$表示若干个背应力张量部分中的每一个部分，ζ_i和r_i为背应力张量每个部分的材料参数，γ为描述静力回复项的材料参数，$m(q)$为描述静力回复项的指数方程，q为塑性应变幅值，ϕ_1，ϕ_2和ω为指数方程中三个材料参数，$J(\boldsymbol{\alpha}_i)$表示背应力第二不变量，e 表示以自然常数为底的指数函数，$\dot{\alpha}_i$表示背应力张量每个部分的应力变化率；

S14：采用下述公式（8）描述所述粘塑性本构的各项同性强化方程：

$$\dot{R}=b(Q-R)\dot{p}+H(1+bp)\dot{p} \qquad (8);$$

其中，Q为在第一阶段快速软化的各项同性抗力渐近值，b为接近渐近值的速度参数，H为第二阶段线性软化的斜率相关的参数，p为累积非弹性应变，$\dot{R}$表示各项同性强化率。

需要说明的是，上述步骤中，背应力张量分为 8 个部分，即$\boldsymbol{\alpha}=\sum_{i=1}^{8}\boldsymbol{\alpha}_i$。

而在 S3 步骤中，多轴应力应变状态的所述纯疲劳损伤计算模型为：

$$\left(\frac{\tau_{max}}{\tau_f'}\frac{\Delta\gamma}{2}+\frac{\sigma_{n,max}}{\sigma_f'}\frac{\Delta\varepsilon_n}{2}\right)_{max}=\frac{\tau_f'}{G}\left(\frac{2}{d_f}\right)^{2b_0}+\gamma_f'\left(\frac{2}{d_f}\right)^{2c_0} \qquad (9);$$

其中，“$(\quad)_{max}$”表示临界平面上的最大疲劳损伤因子，τ_{max}为临界平面上的最大剪切应力，τ_f'为剪切疲劳强度常数，$\Delta\gamma/2$为临界平面上的剪切应变幅，$\sigma_{n,max}$为临界平面上的最大正应力，σ_f'为疲劳强度常数，$\Delta\varepsilon_n/2$为临界平面上的正应变幅，G为剪切模量，d_f为一个循环周次的疲劳损伤，b_0为疲劳强度指数，γ_f'为剪切疲劳延性常数，c_0为疲劳延性指数；

多轴应力应变状态的所述蠕变损伤计算模型为：

$$\begin{cases} d_c=\int_0^{t_h}\left\{\dfrac{\frac{Z\cdot M_1}{Z+t}\frac{Z\cdot N_1}{Z+t}\log\left(1+\frac{t}{Z}\right)}{\min\left[\varphi_1\left[\frac{Z\cdot M_1}{Z+t}\frac{Z\cdot N_1}{Z+t}\log\left(1+\frac{t}{Z}\right)\right]^{n_1}\cdot MDF,w_{f,trans}\right]}-\dfrac{\frac{Z\cdot M_1}{Z+t}\frac{Z\cdot N_1}{Z+t}\log\left(1+\frac{t}{Z}\right)}{w_{f,trans}}\right\} \\ M_1=\dfrac{\bar{\sigma}_0\cdot\left(A\log\Delta\bar{\varepsilon}_{pp}+B\right)}{\bar{E}\ln 10}\cdot\log\left(1+\dfrac{\bar{\sigma}_m}{\bar{\sigma}_0}\right) \\ N_1=\dfrac{\left(A\log\Delta\bar{\varepsilon}_{pp}+B\right)^2}{\bar{E}\ln 10} \\ MDF=\exp\left[\frac{2}{3}\left(\frac{n_2-0.5}{n_2+0.5}\right)\right]/\exp\left[2\left(\frac{n_2-0.5}{n_2+0.5}\right)\frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}}\right] \end{cases} \qquad (10);$$

其中，d_c为一个循环周次的蠕变损伤，t_h为一个循环周次的保载时间，Z为弹性跟随

因子，t表示一个循环周次内从保载开始的时间，φ_1为蠕变损伤第一线性回归参数，MDF为多轴延性因子，n_1为蠕变损伤第二线性回归参数，$w_{f,trans}$为失效应变能密度平台值，$\bar{\sigma}_0$为一个循环周次保载前最大等效应力，A为松弛第一参数，B为松弛第二参数，$\bar{E}$为等效弹性模量，$\Delta\bar{\varepsilon}_{pp}$为一个循环周次由疲劳产生的等效塑性应变范围，$\bar{\sigma}_m$为一个循环周次的等效平均应力，$n_2$为稳态蠕变指数，$\sigma_H$为静水应力，$\bar{\sigma}$表示等效应力。

而在步骤 S4 中，建立多轴应力应变状态下的 ABAQUS 有限元模型，可以施加边界条件和外部载荷，划分模型网格，以得到各个积分点每个循环周次的应力应变张量

在本实施方式中，步骤 S5 可以进一步包括步骤

S51：通过用户子程序 USDFLD 提取 ABAQUS 模型中每个节点的应力张量和应变张量；

S52：通过用户子程序 USDFLD，并结合所述步骤 S51，通过标量化运算获得每一个时刻的等效应力、等效塑性应变和每一个循环周次保载时间内的弹性跟随因子，最终得到每一个循环周次的疲劳损伤和蠕变损伤；

S53：通过用户子程序 USDFLD 采用下述公式（11）计算多轴蠕变疲劳条件下的总损伤：

$$D^{(n)} = \sum_{i=1}^{n} d_f^{(i)} + d_c^{(i)} \qquad (11);$$

其中，$D^{(n)}$为前n个循环周次的累积总损伤，$d_f^{(i)}$为第i个循环周次产生的疲劳损伤，$d_c^{(i)}$为第i个循环周次产生的蠕变损伤；

其中，当某个节点的总损伤叠加率先到失效数值 1 时，即可定义为最危险节点并确定裂纹萌生寿命n_i。

为了更好地阐述本案的基于 AVAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法的预测效果，将采用缺口半径为 8 毫米的单边缺口试样进行验证。

验证所采用的单边缺口试样的材料为高温镍基 GH4169 超合金，蠕变疲劳试验在 650℃空气环境下进行。试验时，试样两端施加的外载和为整体的应变控制，由于单边缺口试样几何不连续性的影响，其缺口根本最薄弱的部位处于多轴应力应变状态。在此之前，需要进行 650℃空气环境下的单轴拉伸试验以及该环境下不同应变幅和保载时间的单轴蠕变疲劳试验，获得的试验结果用于确定公式（1）~（8）粘塑性本构方程所需的材料参数。

通过试参法调整单轴拉伸试验的模拟结果，使之与单轴拉伸试验能够较好地吻合。图 2 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的单轴拉伸试验和模拟曲线的拟合结果图。

如图 2 所示，I 表示单轴拉伸试验数据，II 表示采用试参法模拟得到的单轴拉伸试验曲线，通过试参法调整单轴拉伸试验曲线 II 的模拟结果，使之与单轴蠕变疲劳试验所得的单轴拉伸试验数据能够较好地吻合，其中，弹性模量$E = 177\text{GPa}$, 泊松比$\nu = 0.33$, 弹性

区域初始尺寸$\kappa = 815\text{MPa}$, 各个背应力张量每个部分的随动强化材料参数：$\zeta_1 = 6130$, $\zeta_2 = 1807$，$\zeta_3 = 892$，$\zeta_4 = 352$，$\zeta_5 = 150$，$\zeta_6 = 88.2$，$\zeta_7 = 75.0$，$\zeta_8 = 28.4$，$r_1 = 23.4$, $r_2 = 68.0$, $r_3 = 75.9$, $r_4 = 48.0$, $r_5 = 43.4$, $r_6 = 25.4$, $r_7 = 54.5$, $r_8 = 28.0$, 率相关的粘塑性材料参数： $K = 400$, $n = 2.0$。

图 3 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的单轴蠕变疲劳试验循环软化数据和模拟曲线的拟合结果图。

如图 3 所示，III 表示循环软化试验数据，IV 表示采用试参法模拟得到的循环软化曲线，通过试参法调整循环软化曲线 IV 的模拟结果，使之与单轴蠕变疲劳试验所得的循环软化数据能够较好地吻合，其中，各项同性强化的材料参数：第二阶段线性软化的斜率相关的参数$H = -8.5$，接近渐近值的速度参数$b = 4.1$，第一阶段快速软化的各项同性抗力渐近值$Q = 618\text{MPa}$。

图 4 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的单轴蠕变疲劳试验应力松弛数据和模拟曲线的拟合结果图。

如图 4 所示，V 表示单轴蠕变疲劳试验应力松弛数据，VI 表示采用试参法模拟得到的应力松弛曲线，通过试参法调整第一个循环周次的应力松弛曲线的模拟结果，使之与单轴蠕变疲劳试验所得的应力松弛数据能够较好地吻合，其中，静力回复项中独立材料参数：$\gamma = 4.0 \times 10^{-7}$。

与此同时，拟合公式（7）中的静力回复项的指数方程，拟合结果图如图 5 所示。图 5 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的单轴蠕变疲劳试验静力回复项的指数方程拟合结果图。

如图 5 所示，VII 表示单轴蠕变疲劳试验数据，VIII 表示模拟结果曲线，其中，静力回复项中指数方程的材料参数：$\phi_1 = 0.37$，$\phi_2 = 2.82$，$\omega = 6.6 \times 10^{-4}$。

在本案的一个实施方式中，选取数据为总应变范围为 1.0%，每个循环周次应变最大处的保载时间为 3600s， 650℃空气环境下的单边缺口蠕变疲劳试验。其蠕变疲劳裂纹萌生于缺口根部次表面的位置，裂纹萌生寿命为 76 个循环周次。

图 6 给出了该实施方式下两个典型位置每周次疲劳损伤和蠕变损伤的轨迹图。

如图 6 所示，曲线 IX 表示缺口根部表面每周次疲劳损伤曲线，曲线 X 表示缺口根部次表面每周次疲劳损伤曲线，曲线 XI 表示缺口根部表面每周次蠕变损伤曲线，曲线 XII 表示缺口根部次表面每周次蠕变损伤曲线，其中，选取缺口根部表面的积分点，因其在循环载荷的过程中受到应力集中的影响，疲劳裂纹通常萌生于表面，所以缺口根部表面的积分点通常被认为是疲劳过程中的潜在危险点；而选取缺口根部次表面的积分点，是由于次表面通常具有相比于表面更高的应力三轴度，蠕变裂纹通常萌生于内部，所以缺口根部次表面的积分点通常被认为是蠕变过程中的潜在危险点。而从图 6 中可以看出：此实施方式下由于保载时间较长，循环载荷的过程中蠕变损伤占主导地位，所计算最大总损伤的位置在缺口根部次表面，与实验所观测的现象完全一致。

图 7 和图 8 给出了图 6 所示的缺口根部表面和次表面两个位置前 100 个循环周次的磁滞回线。其中，图 7 表示缺口根部表面积分点处的磁滞回线，图 8 表示缺口根部次表面积分点处的磁滞回线，图 7 和图 8 中的 A1 表示第一个循环周次，A2 表示第一百个循环周次。

结合图 7 和图 8 中可以看出：虽然缺口根部表面积分点具有更大的非弹性应变范围，但是次表面积分点具有更加明显的非弹性应变的累积。这是由于受到多轴应力应变状态的影响，几何不连续处在保载阶段处于应力应变混合控制的模式。结合图 7 和图 8 还可以看出，次表面积分点更加接近应力控制模式，导致其蠕变损伤更加明显，进而解释了蠕变主导的循环载荷其裂纹萌生位置出现在缺口根部次表面。

图 9 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在一种实施方式下的缺口根部次表面最危险积分点的蠕变疲劳损伤轨迹图和裂纹萌生寿命预测。

借助蠕变疲劳损伤交互图，追踪缺口根部附近最危险的次表面积分点，如图 9 所示，可以获得该实施方式下的裂纹萌生寿命为 105 个循环周次，这与实验测得的 76 个循环周次较为接近，在 1.5 倍误差带范围之内证明此数值模拟方法具有较高的可靠性。

需要说明的是，图 9 中的曲线 XIII 表示$\sum_{i=1}^{n} d_f^{(i)} + d_c^{(i)} = 1$。

在本案的另一个实施方式中，选取数据为总应变范围为 1.0%，每个循环周次应变最大处的保载时间为 60s， 650℃空气环境下的单边缺口蠕变疲劳试验。其蠕变疲劳裂纹萌生于缺口根部表面的位置，裂纹萌生寿命为 480 个循环周次。

图 10 给出了该实施方式下两个典型位置每周次疲劳损伤和蠕变损伤的轨迹图。

如图 10 所示，曲线 XIV 表示缺口根部表面每周次疲劳损伤曲线，曲线 XV 表示缺口根部次表面每周次疲劳损伤曲线，曲线 XVI 表示缺口根部表面每周次蠕变损伤曲线，曲线 XVII 表示缺口根部次表面每周次蠕变损伤曲线，其中，选取缺口根部表面的积分点，是因其在循环载荷的过程中受到应力集中的影响，疲劳裂纹通常萌生于表面，所以缺口根部表面的积分点通常被认为是疲劳过程中的潜在危险点；选取缺口根部次表面的积分点，是由于次表面通常具有相比于表面更高的应力三轴度，蠕变裂纹通常萌生于内部，所以缺口根部次表面的积分点通常被认为是蠕变过程中的潜在危险点。而从图 10 中可以看出：在此实施方式下由于保载时间较短，循环载荷的过程中疲劳损伤占主导地位，所计算最大总损伤的位置在缺口根部表面，与实验所观测的现象完全一致。

图 11 和图 12 给出了图 10 所示的缺口根部表面和次表面两个位置前 100 个循环周次的磁滞回线。其中，图 11 表示缺口根部表面积分点处的磁滞回线，图 12 表示缺口根部次表面积分点处的磁滞回线，图 11 和图 12 中的 A1 表示第一个循环周次，A2 表示第一百个循环周次。

结合图 11 和图 12 可以看出，缺口根部表面积分点具有更大的非弹性应变范围，而且缺口根本表面和次表面两个位置的积分点具有几乎没有非弹性应变的累积。结合图 11 和图 12 可以看出，该实施方式下保载时间较短导致的蠕变/松弛的现象几乎可以忽略不计，在

这种情况下，由非弹性应变范围导致的疲劳损伤使得裂纹萌生位置出现在缺口根部表面。

图 13 示意性地显示了本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法在另一种实施方式下的缺口根部表面的蠕变疲劳损伤轨迹图和裂纹萌生寿命预测。

借助蠕变疲劳损伤交互图，追踪缺口根部表面最危险的积分点，如图 13 所示，可以获得该实施方式下的裂纹萌生寿命为 346 个循环周次，这与实验测得的 480 个循环周次较为接近，在 1.5 倍误差带范围之内证明此数值模拟方法具有较高的可靠性。

需要说明的是，图 13 中的曲线 XVIII 表示$\sum_{i=1}^{n} d_f^{(i)} + d_c^{(i)} = 1$。

综上所述可以看出，本发明所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法利用基于用户子程序 UMAT 定义待测试材料的粘塑性本构方程，从而得到多轴应力应变状态下的蠕变疲劳行为。

此外，本发明所述的多轴蠕变疲劳预测方法利用基于用户子程序 USDFLD 计算等效应力和等效塑性应变，从而获得每个循环周次中各个积分点的蠕变损伤、疲劳损伤和总损伤数值；

另外，本发明所述的多轴蠕变疲劳预测方法具有很强的直观性，可以直观地获得几何不连续结构的裂纹萌生位置和该位置的裂纹萌生寿命。

需要说明的是，本发明的保护范围中现有技术部分并不局限于本申请文件所给出的实施例，所有不与本发明的方案相矛盾的现有技术，包括但不局限于在先专利文献、在先公开出版物，在先公开使用等等，都可纳入本发明的保护范围。

此外，本案中各技术特征的组合方式并不限本案权利要求中所记载的组合方式或是具体实施例所记载的组合方式，本案记载的所有技术特征可以以任何方式进行自由组合或结合，除非相互之间产生矛盾。

还需要注意的是，以上所列举的实施例仅为本发明的具体实施例。显然本发明不局限于以上实施例，随之做出的类似变化或变形是本领域技术人员能从本发明公开的内容直接得出或者很容易便联想到的，均应属于本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1. 一种基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其特征在于，包括步骤：

S1：建立 ABAQUS 有限元模型，通过用户子程序 UMAT 定义待测试材料在循环载荷过程中的粘塑性本构方程；

S2：确定所述粘塑性本构方程所需的模型参数；

S3：建立待测试材料的多轴应力应变状态的疲劳损伤计算模型和蠕变损伤计算模型；

S4：建立多轴应力应变状态下的 ABAQUS 有限元模型，基于步骤 S1 中用户子程序 UMAT 所定义的粘塑性本构方程和步骤 S2 中的模型参数，计算得到每个循环周次的应力应变张量；

S5：通过用户子程序 USDFLD 计算等效应力和等效塑性应变，基于步骤 S3 中的疲劳损伤计算模型和蠕变损伤计算模型并结合步骤 S4 中得到的应力应变张量，通过线性累计损伤准则叠加每个循环周次的疲劳损伤和蠕变损伤，得到待测试材料的裂纹萌生寿命。

2. 如权利要求 1 所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其特征在于，在所述步骤 S2 中，在给定温度下对待测试材料进行单轴拉伸试验以及该给定温度下不同应变幅和保载时间的单轴蠕变疲劳试验，以得到高温拉伸曲线、循环软化曲线、应力松弛曲线和磁滞回线，用以确定所述粘塑性本构方程所需的模型参数。

3. 如权利要求 2 所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其特征在于，在所述步骤 S2 中，通过试参法模拟 ABAQUS 有限元模型的高温拉伸曲线、循环软化曲线、应力松弛曲线和磁滞回线。

4. 如权利要求 1 所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其特征在于，在步骤 S1 中，所述粘塑性本构方程包括：粘塑性本构的主控方程、粘塑性本构的粘塑性方程、粘塑性本构的背应力张量非弹性随动强化方程和粘塑性本构的各项同性强化方程。

5. 如权利要求 4 所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其特征在于，所述 S1 步骤进一步包括步骤：

S11：采用下述公式（1）和公式（2）描述所述粘塑性本构的主控方程：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_t = \boldsymbol{\varepsilon}_e + \boldsymbol{\varepsilon}_{in} \qquad (1);$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_e = \frac{1+\nu}{E}\boldsymbol{\sigma} - \frac{\nu}{E}(tr\boldsymbol{\sigma})\mathbf{I} \qquad (2);$$

其中，$\boldsymbol{\varepsilon}_t$为总应变张量，$\boldsymbol{\varepsilon}_e$为弹性应变张量，$\boldsymbol{\varepsilon}_{in}$为非弹性应变张量，$E$为弹性模量，$\nu$为泊松比，$\boldsymbol{\sigma}$为应力张量，$tr\boldsymbol{\sigma}$为应力张量的迹，$\mathbf{I}$为二阶单位张量；

S12：采用下述公式（3）、公式（4）和公式（5）描述所述粘塑性本构的粘塑性方程：

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in} = \frac{3}{2}\dot{p}\frac{\mathbf{s}-\mathbf{a}}{J(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha})} \qquad (3);$$

$$\dot{p}=\sqrt{\frac{2}{3}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}:\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}}=\langle\frac{J(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha})-R-\kappa}{K}\rangle^{n} \quad (4);$$

$$J(\boldsymbol{\sigma}-\mathbf{a})=\sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{s}-\mathbf{a}):(\mathbf{s}-\mathbf{a})} \quad (5);$$

其中，$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}$为非弹性应变率张量，$\dot{p}$为累积非弹性应变率，$\mathbf{s}$为应力张量的偏量，$\mathbf{a}$为背应力张量的偏量，$J(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha})$为 Von-Mises 应力空间距离，$\boldsymbol{\alpha}$为背应力张量，$K$和$n$为率相关的材料参数，$R$为各向同性变形抗性，$\kappa$为弹性区域初始尺寸，“：”表示张量的内积运算；

S13：采用下述公式（6）和公式（7）描述所述粘塑性本构的背应力张量非弹性随动强化方程：

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}_i=\zeta_i\left(\frac{2}{3}r_i\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{in}-\boldsymbol{\alpha}_i\dot{p}\right)-\gamma[J(\boldsymbol{\alpha}_i)]^{m(q)}\boldsymbol{\alpha}_i \quad (6);$$

$$m(q)=\phi_1 e^{-q/\omega}+\phi_2 \quad (7);$$

其中，$\boldsymbol{\alpha}_i$表示若干个背应力张量部分中的每一个部分，ζ_i和r_i为背应力张量每个部分的材料参数，γ为描述静力回复项的材料参数，$m(q)$为描述静力回复项的指数方程，q为塑性应变幅值，ϕ_1，ϕ_2和ω为指数方程中三个材料参数，$J(\boldsymbol{\alpha}_i)$表示背应力第二不变量，e 表示以自然常数为底的指数函数，$\dot{\alpha}_i$表示背应力张量每个部分的应力变化率；

S14：采用下述公式（8）描述所述粘塑性本构的各项同性强化方程：

$$\dot{R}=b(Q-R)\dot{p}+H(1+bp)\dot{p} \quad (8);$$

其中，Q为在第一阶段快速软化的各项同性抗力渐近值，b为接近渐近值的速度参数，H为第二阶段线性软化的斜率相关的参数，p为累积非弹性应变，$\dot{R}$表示各项同性强化率。

6. 如权利要求 5 所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其特征在于，其中背应力张量分为 8 个部分，即$\boldsymbol{\alpha}=\sum_{i=1}^{8}\boldsymbol{\alpha}_i$。

7. 如权利要求 1 所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其特征在于，在所述 S3 步骤中，多轴应力应变状态的所述纯疲劳损伤计算模型为：

$$\left(\frac{\tau_{max}}{\tau_f'}\frac{\Delta\gamma}{2}+\frac{\sigma_{n,max}}{\sigma_f'}\frac{\Delta\varepsilon_n}{2}\right)_{max}=\frac{\tau_f'}{G}\left(\frac{2}{d_f}\right)^{2b_0}+\gamma_f'\left(\frac{2}{d_f}\right)^{2c_0} \quad (9);$$

其中，“$(\quad)_{max}$”表示临界平面上的最大疲劳损伤因子，τ_{max}为临界平面上的最大剪切应力，τ_f'为剪切疲劳强度常数，$\Delta\gamma/2$为临界平面上的剪切应变幅，$\sigma_{n,max}$为临界平面上的最大正应力，σ_f'为疲劳强度常数，$\Delta\varepsilon_n/2$为临界平面上的正应变幅，G为剪切模量，d_f为一个循环周次的疲劳损伤，b_0为疲劳强度指数，γ_f'为剪切疲劳延性常数，c_0为疲劳延性指数；

多轴应力应变状态的所述蠕变损伤计算模型为：

$$\begin{cases} d_c = \int_0^{t_h} \left\{ \dfrac{\frac{Z\cdot M_1}{Z+t} - \frac{Z\cdot N_1}{Z+t}\cdot\log\left(1+\frac{t}{Z}\right)}{\min\left[\varphi_1\left[\frac{Z\cdot M_1}{Z+t} - \frac{Z\cdot N_1}{Z+t}\cdot\log\left(1+\frac{t}{Z}\right)\right]^{n_1}\cdot MDF, w_{f,trans}\right]} - \dfrac{\frac{Z\cdot M_1}{Z+t} - \frac{Z\cdot N_1}{Z+t}\cdot\log\left(1+\frac{t}{Z}\right)}{w_{f,trans}} \right\} \\ M_1 = \dfrac{\bar{\sigma}_0\cdot\left(A\log\Delta\bar{\varepsilon}_{pp}+B\right)}{\bar{E}\ln 10}\cdot\log\left(1+\dfrac{\bar{\sigma}_m}{\bar{\sigma}_0}\right) \\ N_1 = \dfrac{\left(A\log\Delta\bar{\varepsilon}_{pp}+B\right)^2}{\bar{E}\ln 10} \\ MDF = \exp\left[\frac{2}{3}\left(\frac{n_2-0.5}{n_2+0.5}\right)\right]/\exp\left[2\left(\frac{n_2-0.5}{n_2+0.5}\right)\frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}}\right] \end{cases} \quad (10);$$

其中，d_c为一个循环周次的蠕变损伤，t_h为一个循环周次的保载时间，Z为弹性跟随因子，t 表示一个循环周次内从保载开始的时间，φ_1为蠕变损伤第一线性回归参数，MDF为多轴延性因子，n_1为蠕变损伤第二线性回归参数，$w_{f,trans}$为失效应变能密度平台值，$\bar{\sigma}_0$为一个循环周次保载前最大等效应力，A为松弛第一参数，B为松弛第二参数，$\bar{E}$为等效弹性模量，$\Delta\bar{\varepsilon}_{pp}$为一个循环周次由疲劳产生的等效塑性应变范围，$\bar{\sigma}_m$为一个循环周次的等效平均应力，$n_2$为稳态蠕变指数，$\sigma_H$为静水应力，$\bar{\sigma}$表示等效应力。

8. 如权利要求 1 所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其特征在于，在所述步骤 S4 中，建立多轴应力应变状态下的 ABAQUS 有限元模型，施加边界条件和外部载荷，划分模型网格，以得到各个积分点每个循环周次的应力应变张量。

9. 如权利要求 1 所述的基于 ABAQUS 的多轴蠕变疲劳预测方法，其特征在于，所述步骤 S5 进一步包括步骤：

S51：通过用户子程序 USDFLD 提取 ABAQUS 模型中每个节点的应力张量和应变张量；

S52：通过用户子程序 USDFLD，并结合所述步骤 S51，通过标量化运算获得每一个时刻的等效应力、等效塑性应变和每一个循环周次保载时间内的弹性跟随因子，最终得到每一个循环周次的疲劳损伤和蠕变损伤；

S53：通过用户子程序 USDFLD 采用下述公式（11）计算多轴蠕变疲劳条件下的总损伤：

$$D^{(n)} = \sum_{i=1}^{n} d_f^{(i)} + d_c^{(i)} \quad (11);$$

其中，$D^{(n)}$为前n个循环周次的累积总损伤，$d_f^{(i)}$为第i个循环周次产生的疲劳损伤，$d_c^{(i)}$为第i个循环周次产生的蠕变损伤；

其中，当某个节点的总损伤叠加率先到失效数值 1 时，即可定义为最危险节点，并确定裂纹萌生寿命n_i。

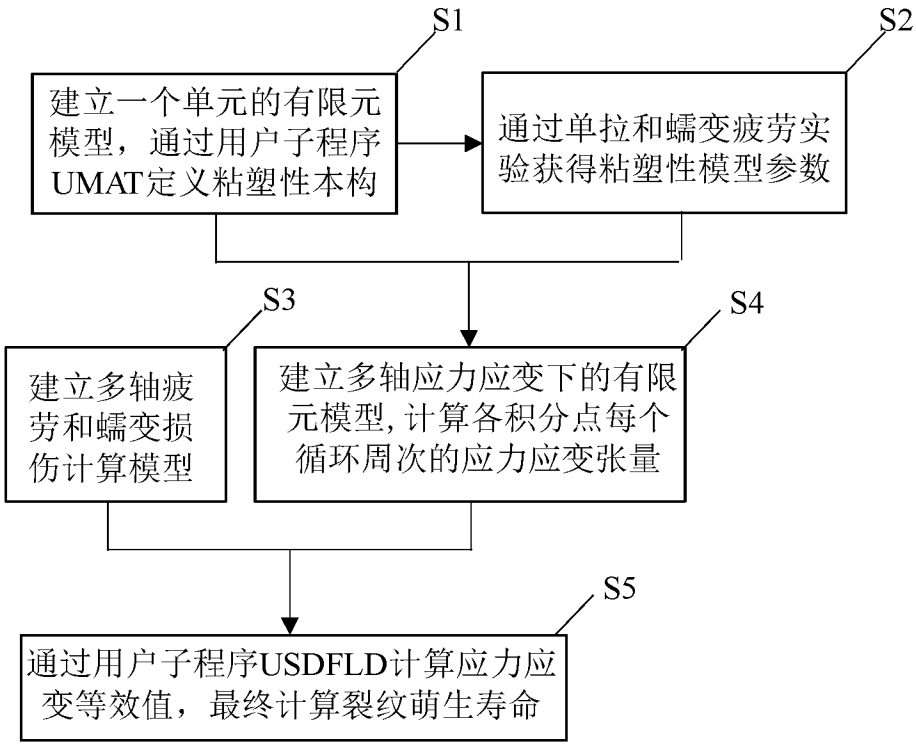

S1
建立一个单元的有限元模型，通过用户子程序UMAT定义粘塑性本构
S2
通过单拉和蠕变疲劳实验获得粘塑性模型参数
S3
建立多轴疲劳和蠕变损伤计算模型
S4
建立多轴应力应变下的有限元模型，计算各积分点每个循环周次的应力应变张量
S5
通过用户子程序USDFLD计算应力应变等效值，最终计算裂纹萌生寿命

图 1

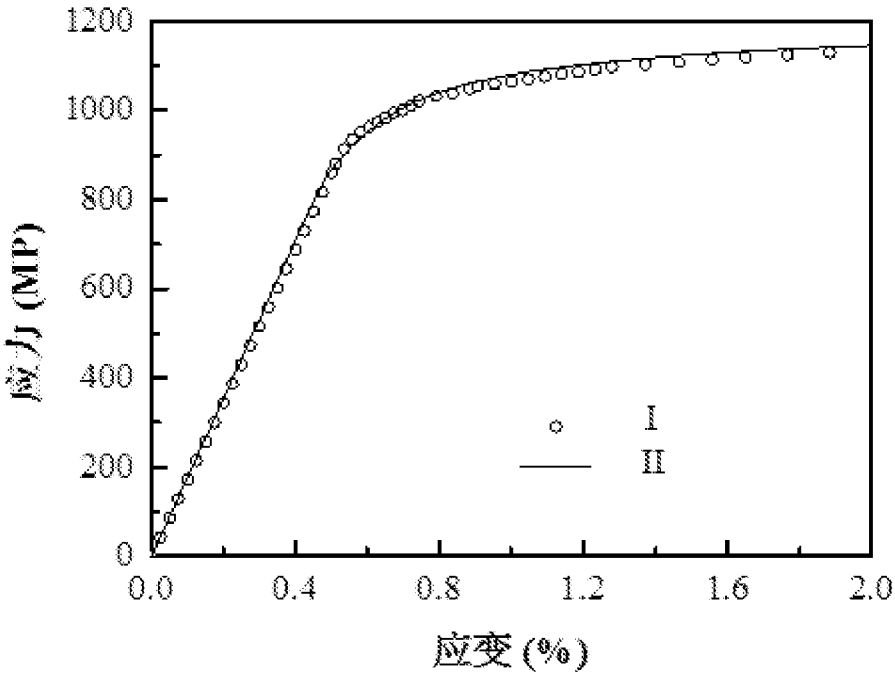

1200
1000
800
600
400
200
0
0.0
0.4
0.8
1.2
1.6
2.0
应变 (%)
I
II

图 2

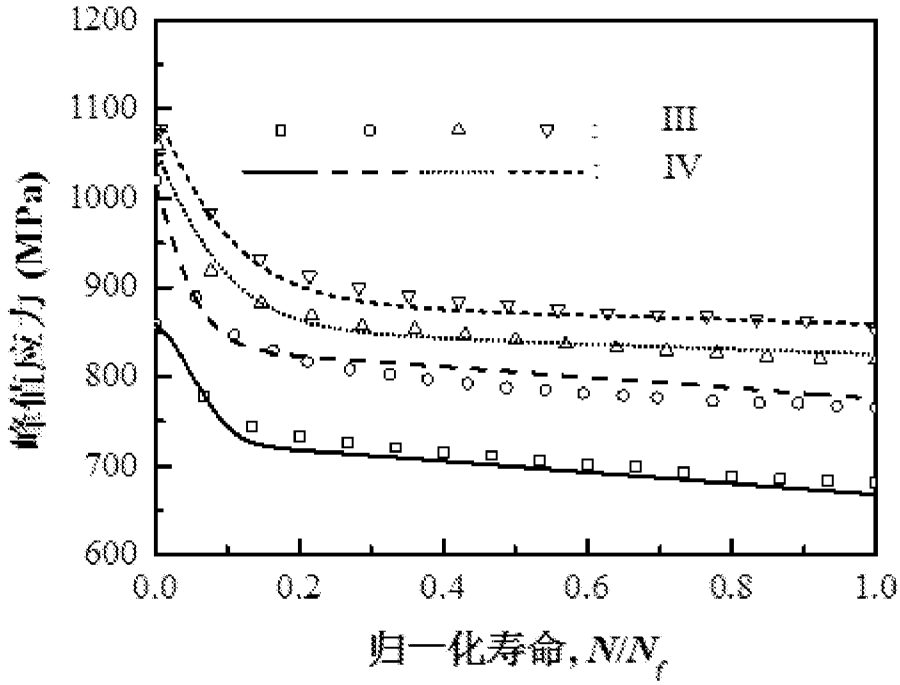

1200
1100
1000
900
800
700
600
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
III
IV
峰值应力 (MPa)
归一化寿命, N/N_f

图 3

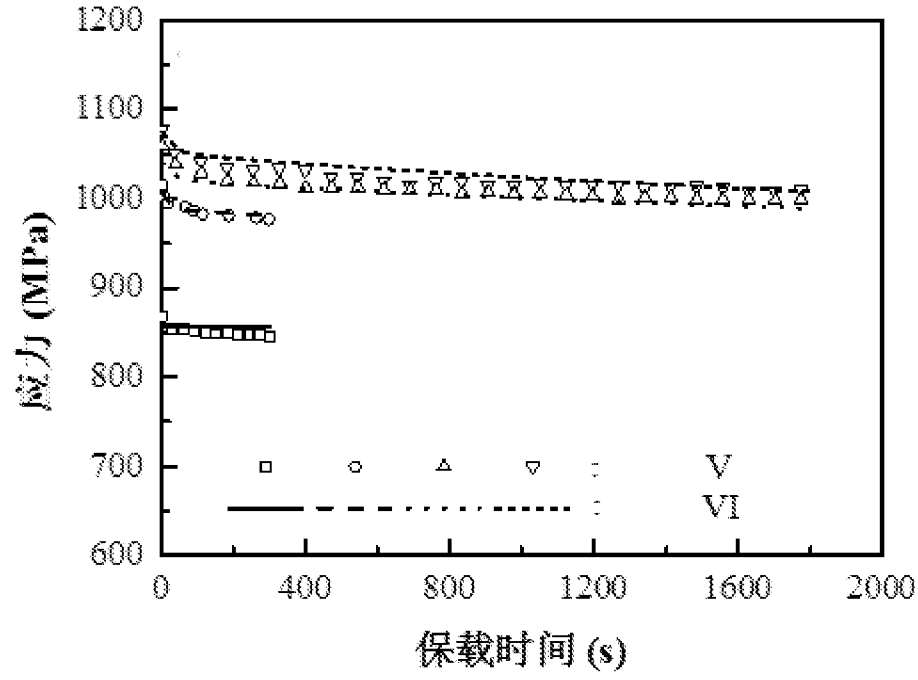

1200
1100
1000
900
800
700
600
0
400
800
1200
1600
2000
V
VI
应力 (MPa)
保载时间 (s)

图 4

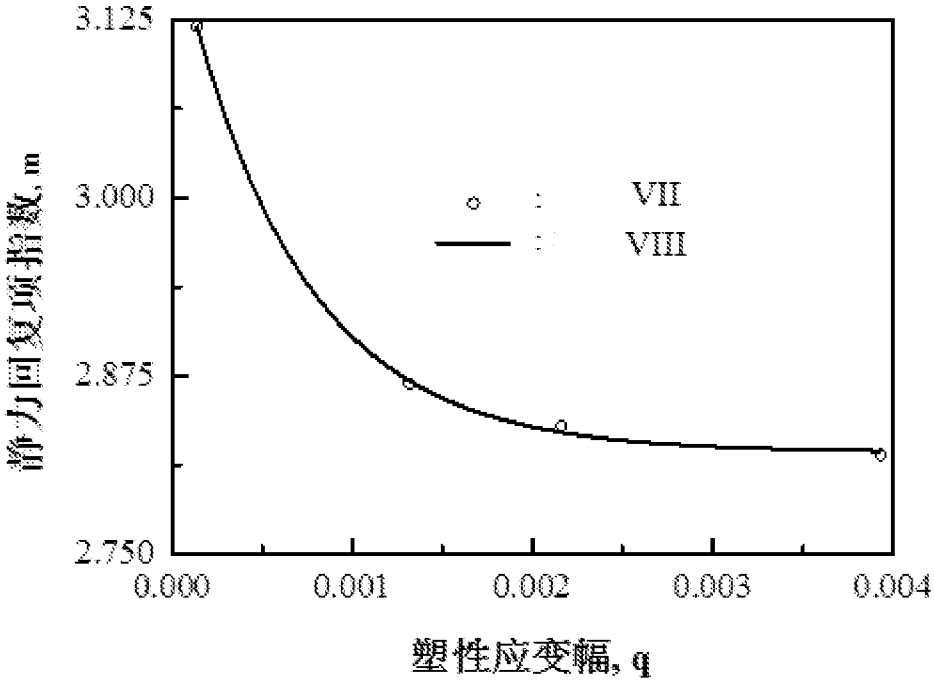

3.125
3.000
2.875
2.750
0.000
0.001
0.002
0.003
0.004
静力回复项指数, m
塑性应变幅, q
VII
VIII

图 5

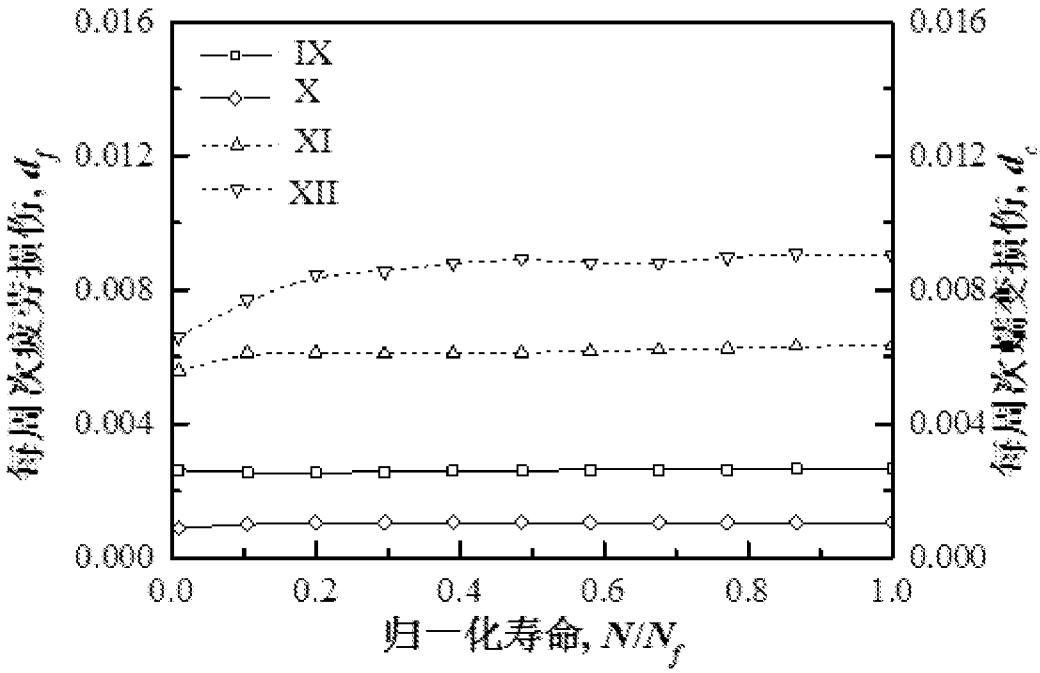

0.016
0.012
0.008
0.004
0.000
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
每周次疲劳损伤, d_f
每周次蠕变损伤, d_c
归一化寿命, N/N_f
IX
X
XI
XII

图 6

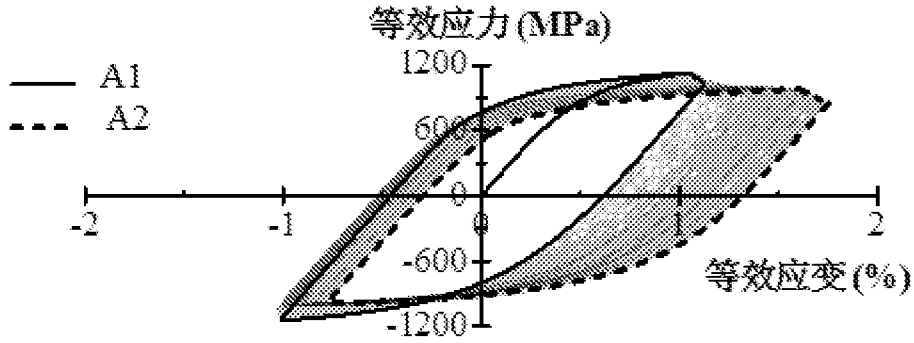

等效应力 (MPa)
A1
A2
1200
600
0
-600
-1200
-2
-1
0
1
2
等效应变 (%)

图 7

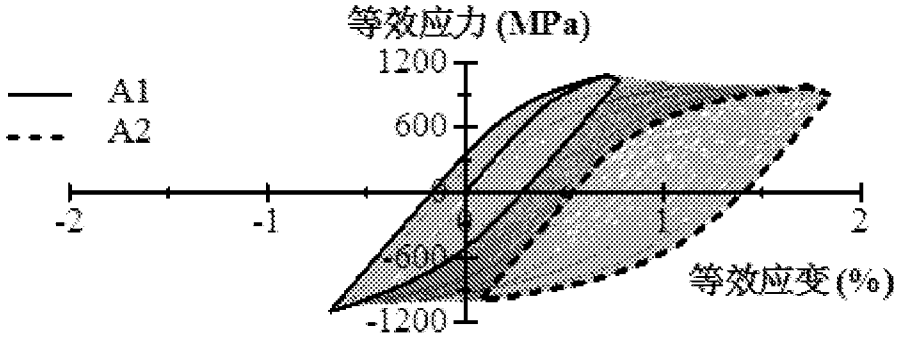

等效应力 (MPa)
A1
A2
1200
600
0
-600
-1200
-2
-1
0
1
2
等效应变 (%)

图 8

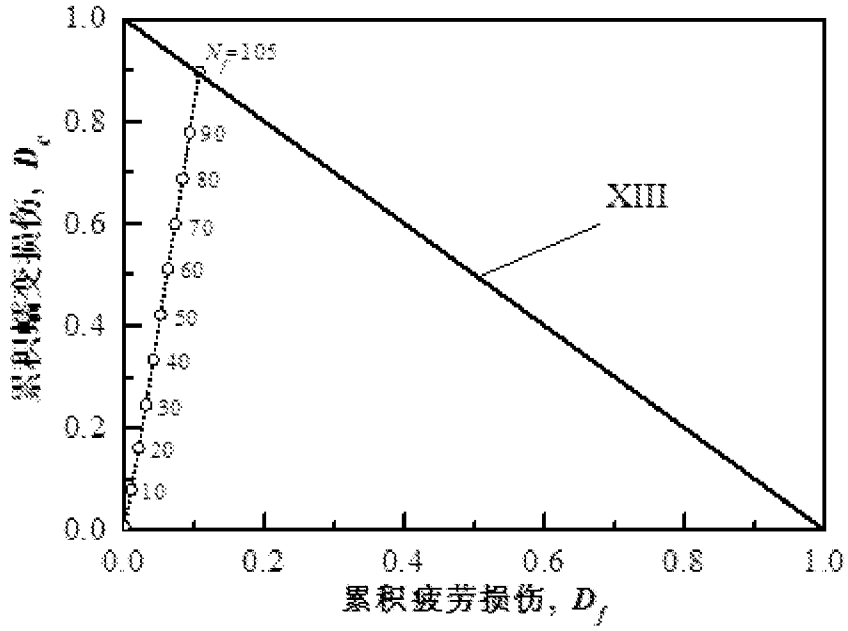

1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
累积蠕变损伤, D_c
累积疲劳损伤, D_f
N_f=105
90
80
70
60
50
40
30
20
10
XIII

图 9

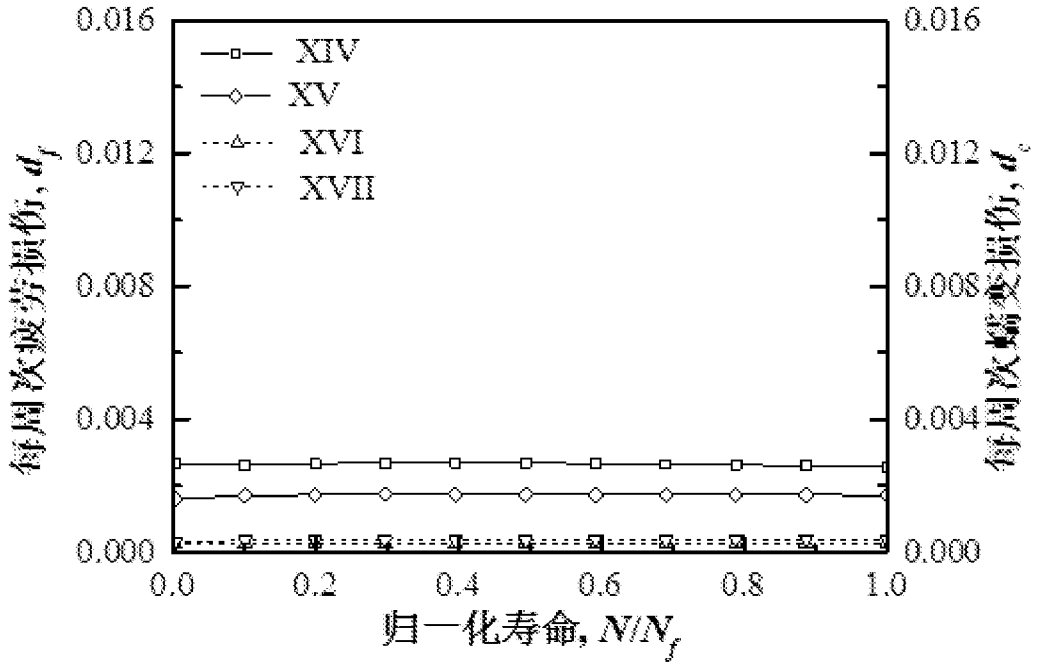

0.016
0.012
0.008
0.004
0.000
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
每周次疲劳损伤, d_f
每周次蠕变损伤, d_c
归一化寿命, N/N_f
XIV
XV
XVI
XVII

图 10

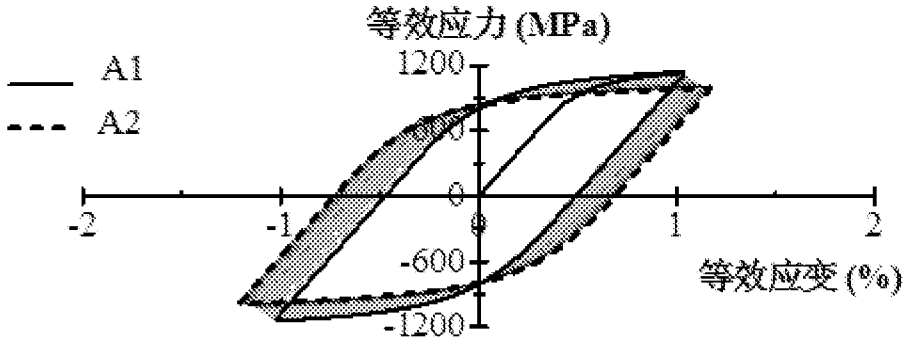

等效应力 (MPa)
A1
A2
1200
600
0
-600
-1200
-2
-1
0
1
2
等效应变 (%)

图 11

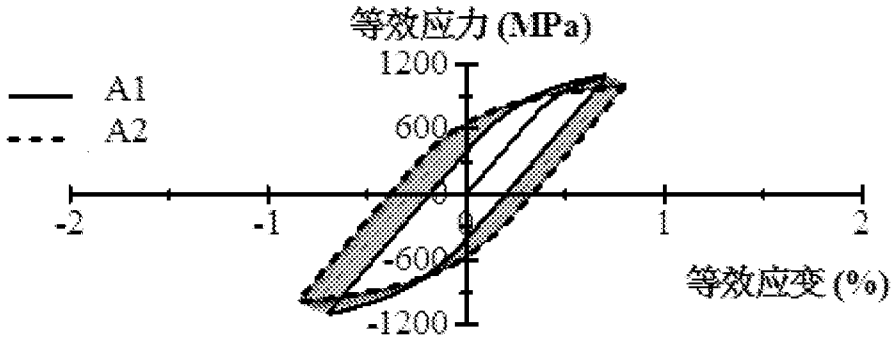

等效应力 (MPa)
A1
A2
1200
600
0
-600
-1200
-2
-1
0
1
2
等效应变 (%)

图 12

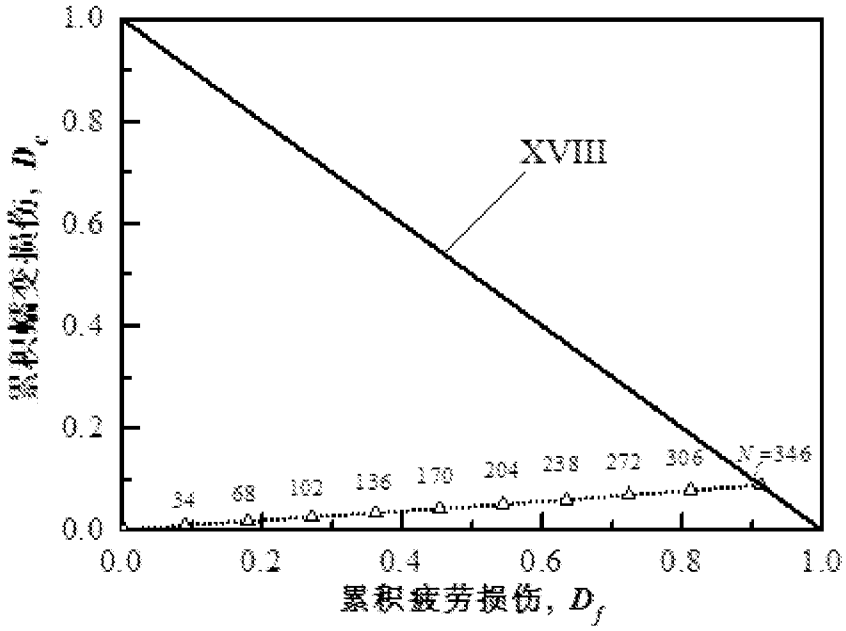

1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
累积蠕变损伤，D_c
累积疲劳损伤，D_f
XVIII
34
68
102
136
170
204
238
272
306
N=346

图 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2019/114718

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/00(2019.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, EPODOC, WPI, CNKI, IEEE: 有限元, 多轴, 蠕变, 疲劳, 寿命, 变形, 损伤, 粘塑性, 本构, 应力, 应变; ABAQUS, UMAT, USDFLD, creep, fatigue, viscoplastic, constitutive, model, anisotropic, multiaxial, cyclic

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109885874 A (EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 14 June 2019 (2019-06-14) claims 1-9	1-9
PX	王润梓 (WANG, Runzi). "“基于能量密度耗散准则的蠕变—疲劳寿命预测模型及应用” (A Creep-Fatigue Life Prediction Model Based on Strain Energy Density Exhaustion Criterion and Its Application on Aero-Engine Turbine Discs)" *中国博士学位论文全文数据库 工程科技II辑(China Doctoral Dissertations Full-Text Database, Engineering Science and Technology II),* No. 2019, no. 08, 15 August 2019 (2019-08-15), ISSN: 1674-022X, chapter 6	1-9
A	CN 106202913 A (EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY et al.) 07 December 2016 (2016-12-07) description, paragraphs [0054]-[0095]	1-9
A	CN 106934168 A (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM (EAST CHINA)) 07 July 2017 (2017-07-07) entire document	1-9

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
17 January 2020	**23 January 2020**
Name and mailing address of the ISA/CN **China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)** **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088** **China** Facsimile No. **(86-10)62019451**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2019/114718

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2015168262 A1 (SOLAR TURBINES INCORPORATED) 18 June 2015 (2015-06-18) entire document	1-9
A	WANG, P. et al. "“Multiaxial Thermomechanical Creep-fatigue Analysis of Heat-resistant Steels with Varying Chromium Contents”" *International Journal of Fatigue,* No. 67, 31 December 2014 (2014-12-31), entire document	1-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2019/114718

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109885874	A	14 June 2019	None			
CN	106202913	A	07 December 2016	CN	106202913	B	06 March 2018
CN	106934168	A	07 July 2017	CN	106934168	B	28 August 2018
				WO	2018171315	A1	27 September 2018
US	2015168262	A1	18 June 2015	CN	105658911	B	09 January 2018
				CN	105658911	A	08 June 2016
				DE	112014004693	T5	21 July 2016
				WO	2015053949	A1	16 April 2015
				IN	201617013279	A	31 August 2016

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2019/114718

A. 主题的分类

G06F 17/00(2019.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNPAT,EPODOC,WPI,CNKI,IEEE: 有限元，多轴，蠕变，疲劳，寿命，变形，损伤，粘塑性，本构，应力，应变；ABAQUS, UMAT, USDFLD, creep, fatigue, viscoplastic, constitutive, model, anisotropic, multiaxial, cyclic

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 109885874 A (华东理工大学) 2019年 6月 14日 (2019-06-14) 权利要求1-9	1-9
PX	王润梓. ″“基于能量密度耗散准则的蠕变—疲劳寿命预测模型及应用”″ 中国博士学位论文全文数据库 工程科技Ⅱ辑, 第2019年第08期，2019年 8月 15日 (2019-08-15), ISSN：1674-022X, 第六章	1-9
A	CN 106202913 A (华东理工大学 等) 2016年 12月 7日 (2016-12-07) 说明书第[0054]-[0095]段	1-9
A	CN 106934168 A (中国石油大学华东) 2017年 7月 7日 (2017-07-07) 全文	1-9
A	US 2015168262 A1 (SOLAR TURBINES INCORPORATED) 2015年 6月 18日 (2015-06-18) 全文	1-9

☑ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2020年 1月 17日	2020年 1月 23日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 董洪梅 电话号码 86-(10)-53961528

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	WANG, P. et al. ″“Multiaxial thermomechanical creep-fatigue analysis of heat-resistant steels with varying chromium contents”″ International Journal of Fatigue, 第67期, 2014年 12月 31日 (2014-12-31), 全文	1-9

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2019/114718

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	109885874	A	2019年 6月 14日	无			
CN	106202913	A	2016年 12月 7日	CN	106202913	B	2018年 3月 6日
CN	106934168	A	2017年 7月 7日	CN	106934168	B	2018年 8月 28日
				WO	2018171315	A1	2018年 9月 27日
US	2015168262	A1	2015年 6月 18日	CN	105658911	B	2018年 1月 9日
				CN	105658911	A	2016年 6月 8日
				DE	112014004693	T5	2016年 7月 21日
				WO	2015053949	A1	2015年 4月 16日
				IN	201617013279	A	2016年 8月 31日