

基于近场动力学的钛合金 TC4 材料疲劳裂纹扩展建模*

MODELING OF FATIGUE CRACK PROPAGATION IN TITANIUM ALLOY TC4 MATERIAL BASED ON THE PERIDYNAMIC THEORY

刘宗晖**¹ 陈荣***² 米栋¹ 曹凡² 韩俊昭²

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

(2. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018)

LIU ZongHui¹ CHEN Rong² MI Dong¹ CAO Fan² HAN JunZhao²

(1. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

摘要 为了更准确地预测钛合金 TC4 材料在循环载荷下的疲劳裂纹扩展行为,提出了一种基于近场动力学理论的新型预测模型,首先在近场有限半径内构建了物质点损伤模型,用以模拟裂纹的产生及其扩展过程;通过建立“键”的塑性变形损伤模型,深入分析了疲劳裂纹的萌生和扩展机制,为提升模型的预测效率和稳定性,引入了物质点临界损伤因子这一关键参数;并采用了改进的自适应动态松弛方法,该方法在每个加载循环中都能获得静力解,并通过对不同载荷条件下的裂纹扩展结果进行收敛性分析,进一步验证了模型的可靠性。实验结果表明,所提出的基于近场动力学理论的疲劳裂纹扩展预测模型,可以准确地预测裂纹的萌生位置和扩展速率;模型预测的疲劳寿命与实验数据呈现出良好的一致性,该模型在钛合金材料疲劳裂纹扩展预测方面具有有效性和实用性。

关键词 近场动力学模型 钛合金 TC4 疲劳裂纹 裂纹扩展 疲劳寿命

中图分类号 TH142

Abstract In order to more accurately predict the fatigue crack propagation behavior of titanium alloy TC4 under cyclic load, a new prediction model based on peridynamics theory was proposed. Within a finite near-field radius, a material point damage model was constructed to simulate the initiation and propagation of cracks. By establishing the plastic deformation damage model of the "bond", the mechanism of fatigue crack initiation and propagation was deeply analyzed in this study. In order to improve the prediction efficiency and stability of the model, the critical damage factor of material point was introduced, and an improved adaptive dynamic relaxation method is adopted. The static solution can be obtained in each loading cycle, and the reliability of the model was further verified by the convergence analysis of the crack propagation results under different loading conditions. The experimental results show that the fatigue crack growth prediction model based on peridynamics theory can accurately predict the crack initiation location and crack growth rate without relying on additional crack growth criteria. In addition, the fatigue life predicted by the model is in good agreement with the experimental data, which proves the validity and practicability of the model in predicting fatigue crack growth of titanium alloy materials.

Key words Peridynamic model; Domestic titanium alloy TC4; Fatigue cracking; Crack propagation; Fatigue life

Corresponding author: CHEN Rong, E-mail: rchen@zstu.edu.cn

The project supported by the National Science and Technology Major Project of China (No.J2019-VIII-0001-0162).

Manuscript received 20240329, in revised form 20240723.

0 引言

在工程中,70%~80%的结构失效是由疲劳断裂引

起的^[1]。在循环载荷作用下,金属材料的疲劳损伤表现为不可逆且是一个逐步累积的动态平衡过程^[2-3]:

①当材料中原子活性能达到临界值时,该原子随即逃

*20240329收到初稿,20240723收到修改稿。国家科技重大专项项目(J2019-VIII-0001-0162)资助。

**刘宗晖,男,1987年生,湖南怀化人,侗族,中国航发湖南动力机械研究所工程师,硕士,主要研究方向为结构强度设计。

***陈荣(通信作者),男,1985年生,浙江瑞安人,汉族,浙江理工大学高级工程师,博士,主要研究方向为疲劳可靠性设计与试验技术。

离周围原子的约束,重新排列,进入新的动态平衡位置;②随着循环载荷的持续作用,材料中原子排布不断调整以适应新的平衡状态,导致损伤在材料内部累积,最终在宏观层面上呈现裂纹的扩展和演化^[4]。对金属材料在疲劳载荷下的损伤失效进行预测,面临着众多科学和技术挑战^[5]:①空间偏微分方程和有限元方法广泛用于预测材料的疲劳裂纹扩展行为,但应用于裂纹尖端或表面时存在局限,通常需要引入额外的裂纹扩展准则^[6]。薛栋文等^[7]基于最大主应力损失演化准则,通过扩展有限元模拟裂纹扩展差异性行为。②经典理论如线弹性断裂力学,在处理裂纹尖端附近的参数动态关系时存在不足,尤其是在多个相互作用裂纹的情况下,需要依赖特殊的网格重划分技术,这增加了分析的复杂性。为了提高预测的准确性和可靠性,需要发展更为精细的理论模型和分析方法,以更好地理解和描述金属材料在疲劳载荷下的损伤失效过程。

近场动力学理论通过本构模型来描述损伤的量化及其扩展速率,提供了新的思路方法来分析裂纹扩展^[8],且该方法不需要额外的裂纹扩展准则,从而实现了微观与宏观尺度的整合^[9]。近场动力学疲劳损伤预测模型最初由 SILLING S A 等^[10]提出,该键损伤模型将损伤等效为材料内部键的“剩余寿命”,用于模拟疲劳载荷作用下裂纹的成核及其后续扩展行为;ZHANG G F 等^[11]基于常规态基近场动力学理论,研究了孔洞、槽口等结构缺陷区域附近疲劳裂纹萌生、扩展至最终瞬断的过程,引入了共轭梯度能量最小化方法以获得静态解,并在两相复合材料上进行了应用。近场动力学理论应用特征体现在其避免了裂纹尖端奇异性,不再需要基于断裂力学参数准则进行求解裂纹萌生和裂纹扩展问题。但在近场动力学框架下求解应力强度因子等断裂参数仍然存在问题。PANCHADHARA R 等^[12]提出力矢量密度代替非局部应力张量,简化计算了传统断裂力学 J 积分方程,分析了裂纹的 I 型和 II 型动态应力强度因子;ZHU N 等^[13]结合位移外推法的近场动力学求解模型,分析了裂纹在准静态和动态载荷下的应力强度因子。

本研究提出了一种基于常规态基的近场动力学疲劳裂纹扩展预测模型,利用国产钛合金 TC4 材料的裂纹扩展数据,对模型参数进行了修正与精度验证,用于描述随机疲劳载荷下钛合金材料特征模拟件的疲劳裂纹萌生、扩展过程。实验结果表明,基于常规态基近场动力学的疲劳裂纹扩展预测模型,在不需要额外裂纹扩展准则下,实现随机载荷下特征模拟件的裂纹萌生和扩展。

1 基于常规态基近场动力学的裂纹演化建模

1.1 近场键断裂演化

根据近场动力学理论,物质结构在某一点与近场范围内所有物质点相互作用,如图 1 所示,变形构造 R 中物质点 $\mathbf{x}_{(k)}$ 的运动方程式为

$$\rho_{(k)} \ddot{\mathbf{u}}[\mathbf{x}_{(k)}, t] = \{ \underline{\mathbf{T}}[\mathbf{x}_{(k)}, t] < \mathbf{x}_{(j)} - \mathbf{x}_{(k)} > - \underline{\mathbf{T}}[\mathbf{x}_{(j)}, t] < \mathbf{x}_{(k)} - \mathbf{x}_{(j)} > \} d\mathcal{H}_{[\mathbf{x}_{(k)}]} + \mathbf{b}[\mathbf{x}_{(k)}, t] \quad (1)$$

式中, $\rho_{(k)}$ 为物质点密度; $\ddot{\mathbf{u}}[\mathbf{x}_{(k)}, t]$ 为 t 时刻的位移向量; $\underline{\mathbf{T}}[\mathbf{x}_{(k)}, t]$ 为力向量状态; $\mathcal{H}_{[\mathbf{x}_{(k)}]}$ 为微近场域范围; $\mathbf{b}[\mathbf{x}_{(k)}, t]$ 为体载荷向量。如图 1 所示,材料物质点 ξ_{ij} 点 $\mathbf{x}_{(k)}$ 与点 $\mathbf{x}_{(j)}$ 之间的键应变表示为

$$s_{(k)(j)} = \frac{(|\mathbf{y}_{(j)} - \mathbf{y}_{(k)}| - |\mathbf{x}_{(j)} - \mathbf{x}_{(k)}|)}{|\mathbf{x}_{(j)} - \mathbf{x}_{(k)}|} \quad (2)$$

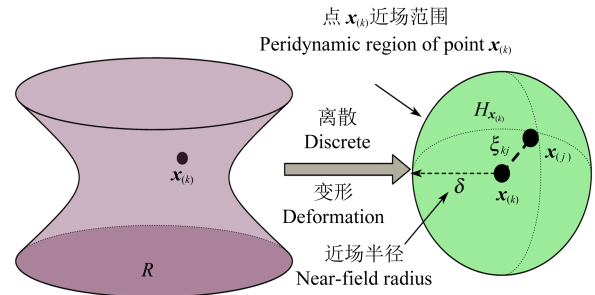


图 1 常规态基近场动力学模型

Fig. 1 Conventional state based peridynamic model

如图 2(a) 所示,点 $\mathbf{x}_{(k)}$ 的近场范围内所有相对位置矢量 $[\mathbf{y}_{(j)} - \mathbf{y}_{(k)}]$ ($j=1, 2, \dots, \infty$) 可表示为

$$\begin{cases} \underline{\mathbf{Y}}(\mathbf{x}_{(k)}, t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{y}_{(1)} - \mathbf{y}_{(k)} \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{(\infty)} - \mathbf{y}_{(k)} \end{Bmatrix} \\ (\mathbf{y}_{(j)} - \mathbf{y}_{(k)}) = \underline{\mathbf{Y}}(\mathbf{x}_{(k)}, t) < \mathbf{x}_{(j)} - \mathbf{x}_{(k)} > \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\underline{\mathbf{Y}}(\mathbf{x}_{(k)}, t)$ 为变形矢量态,表示点 $\mathbf{x}_{(k)}$ 的响应是由与该点相连的所有键的变形共同决定。

如图 2(b) 所示,力矢量态包含无限维阵列力密度矢量的力矢量 $\mathbf{t}_{(k)(j)}$ 状态,可表示为

$$\begin{cases} \{z: |z - \alpha| < r\} \\ \underline{\mathbf{T}}(\mathbf{x}_{(k)}, t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{t}_{(k)(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{t}_{(k)(\infty)} \end{Bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{t}_{(k)(j)}$ 位置处的材料点 $\mathbf{x}_{(j)}$ 对点 $\mathbf{x}_{(k)}$ 施加的力密度向量可以表示为

$$\mathbf{t}_{(k)(j)} [\mathbf{u}_{(j)} - \mathbf{u}_{(k)}, \mathbf{x}_{(j)} - \mathbf{x}_{(k)}, t] = \underline{\mathbf{T}}(\mathbf{x}_{(k)}, t) < \mathbf{x}_{(j)} - \mathbf{x}_{(k)} > \quad (5)$$

基于常规态基近场动力学理论,力密度矢量的标量态表示为

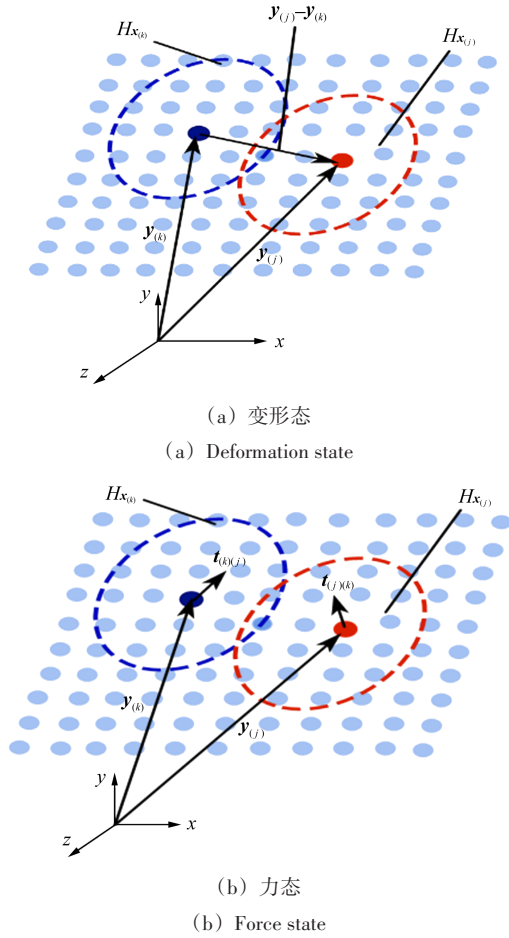


图 2 变形矢量态和力矢量态
Fig. 2 Deformation vector state and force vector state

$$\begin{cases} \underline{t} = 3k\theta \frac{\underline{\omega} \underline{x}}{A} + 15G \frac{\underline{\omega} \underline{e}^d}{A} \\ A = (\underline{\omega} \underline{x}) \underline{x} \\ \underline{e}^d = \underline{e} - \frac{\theta \underline{x}}{3} \\ \theta = 3 \frac{\underline{\omega} \underline{x}}{A} \underline{e} \end{cases} \quad \text{三维} \quad (6)$$

式中, $\underline{\omega}$ 为影响函数; θ 为体积膨胀; $\underline{e}^d$ 为偏量拉伸态; $\underline{e}$ 为标量拉伸态; k 为体积模量; G 为剪切模量。 k 可以表示为

$$k = \begin{cases} \frac{E}{2(1-\nu)} \\ \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)} \end{cases} \quad (7)$$

式中, E 为弹性模量; ν 为泊松比。

常规态基近场动力学材料物质点模型的应变能密度为

$$W = \frac{1}{2} B \theta^2 + \frac{15G}{2A} (\underline{\omega} \underline{e}) \underline{e} \quad (8)$$

式中, $B = k - 15G/9$ 。

如图 3 所示, 力矢量状态 $\underline{T}[\underline{x}_{(k)}, t]$ 和 $\underline{T}[\underline{x}_{(j)}, t]$ 方向相反, 与它们变形的相对变形位置平行。

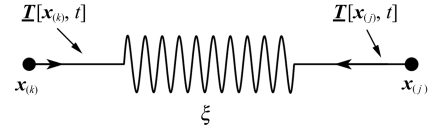


图 3 力矢量态和键
Fig. 3 Force vector state and bond

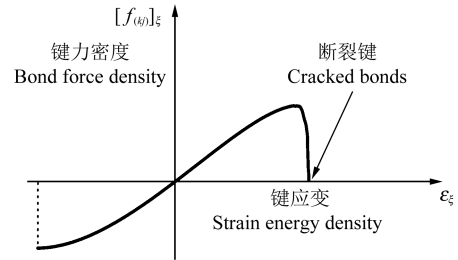
在循环载荷 $f_{(kj)} = (\underline{T}[\underline{x}_{(k)}, t] - \underline{T}[\underline{x}_{(j)}, t])$ [图 4(a)] 作用下, 键力密度呈现非线性变化, 所以键 ξ 中存储的总能量密度可以表示为

$$w_{\xi} = \int_0^{\varepsilon_{\xi}(\Delta t)} [f_{(kj)}]_{\xi} d\varepsilon \quad (9)$$

如图 4(b) 所示, 物质点 P_{down} 和所有物质点 P_{up} 之间的键 ξ 在面 γ 处断裂所需要的能量密度为

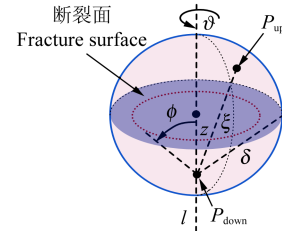
$$w_{\gamma} = \int_0^{\delta} \int_0^{2\pi} \int_z^{\delta} w_c \xi^2 \sin \phi d\phi d\xi dz \quad (10)$$

式中, w_{γ} 为连续损伤力学理论中定义的能量释放率; w_c 为临界能量密度; δ 为近场范围半径。



(a) 键力密度变化

(a) Bond force density variation



(b) 断裂面 γ 与能量释放率

(b) Fracture surface γ and energy release rate

图 4 键应变模型和能量释放率

Fig. 4 Bond strain model and energy release rate

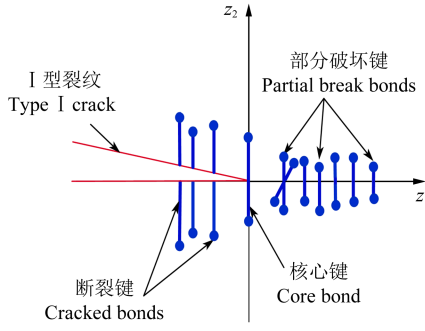
1.2 裂纹尖端键和塑性区域

如图 5(a) 所示, 模型 I 裂纹尖端附近存在三类键: 断裂键、核心键和部分破坏键, 其中核心键的键应变 s_{core}^* 最大。物质点组成的材料表现为弹塑性, 核心键应变表示为

$$s_{\text{core}}^* = \hat{s}_{\text{core}} \frac{K}{E \sqrt{\delta}} \quad (11)$$

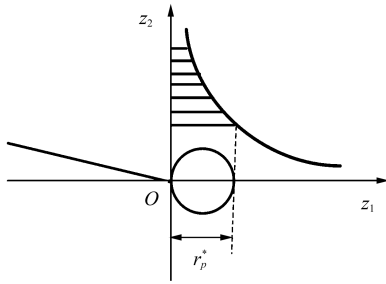
式中, K 为应力强度因子; E 为弹性模量; $\hat{s}_{\text{core}}$ 为一个无量纲参数。

如图 5(b) 所示, 在裂纹尖端附近存在一个塑性区, 塑性区的长度为 r_p^* 。基于线弹性断裂力学理论,



(a) 裂纹尖端附近三类键

(a) Three types of bonds near the crack tip



(b) 裂纹尖端塑性区域

(b) Plastic region of crack tip

图5 裂纹尖端键和塑性区

Fig. 5 Crack tip bond and plastic zone

塑性区的应变为

$$s(z) \sim \frac{K}{E \sqrt{2\pi z}}, 0 \leq z \leq r_p^* \quad (12)$$

结合式(11)和式(12),函数 $\hat{f}$ 可以描述为

$$\hat{f}\left(\frac{z}{\delta}\right) \sim \frac{1}{\hat{s}_{\text{core}} \sqrt{2\pi z/\delta}} \quad (13)$$

2 跨尺度近场动力学疲劳裂纹扩展模型

2.1 键和物质点损伤

用键断裂来定义近场动力学材料物质结构内的键损伤,当键应变超过临界值时,点 $\mathbf{x}_{(k)}$ 和 $\mathbf{x}_{(j)}$ 之间的微势能消失。如图5所示,类似弹簧键 ξ 在每次加载循环过程中,其两端受到的键力密度随之变化,因此键疲劳损伤是通过一个相关变量 $d_{kj}(\xi, t)$ 进行标定,即

$$d_{kj}(\xi, t) = \begin{cases} 1 \\ \varphi(\xi, \varepsilon, t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\varphi(\xi, \varepsilon, t)$ 为归一化损伤函数,依赖于当前的键应变 s 和时间 t 。

物质点损伤是一种描述材料在疲劳加载过程中受到损伤程度的参数。根据给定材料物质点,物质点损伤可以定义为消失的键之间的相互作用与其近场范围内相互作用的键总数之比,1个加载周期内某点 $\mathbf{x}_{(k)}$ 的疲劳损伤描述为

$$\phi[\mathbf{x}_{(k)}] = \frac{\int_{H_{x_{(k)}}} \varphi(\xi, \varepsilon, t) dV'}{\int_{H_{x_{(k)}}} dV'} \quad (15)$$

式中,物质点体积微元 dV' 为近场域 $H_{x_{(k)}}$ 内的点 $\mathbf{x}_{(k)}$ 的体积。如图6所示,键 ξ_{kj} 的断裂失效导致 $\mathbf{x}_{(k)}$ 和 $\mathbf{x}_{(j)}$ 键力消失,作用在材料物质点之间的键力密度将被重新分配,导致相邻键渐进破坏,键的渐进损伤破坏形成了裂纹面 P_{crack} 。

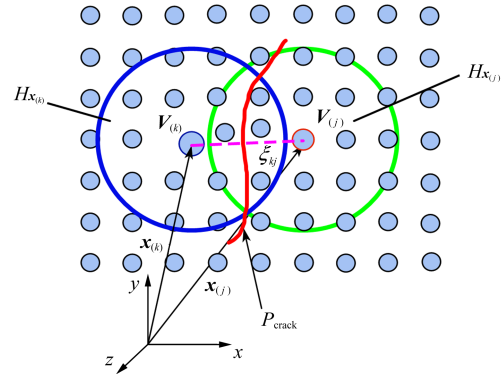


图6 键断裂-裂纹萌生和扩展

Fig. 6 Bond breakage - crack initiation and propagation

2.2 跨尺度疲劳裂纹扩展预测模型

如图7(a)、图7(b)所示,近场动力学在物质结构边界上受到循环载荷的作用。对于给定的点 $\mathbf{x}_{(k)}$ 视域范围内的键 ξ_{kj} ,作用在类弹簧键 ξ_{kj} 上的力密度不规则变化。如图7(d)所示,键应变的谱载荷随作用在结构边界上的每一个载荷循环无规律地变化,当前循环中的最大、最小键应变 s_{max} 和 s_{min} 。

如图8所示,疲劳损伤量可以用虚拟时间 t_f 表示为

$$\begin{cases} \lambda(\mathbf{x}, \xi, t_f) = NC \exp(m\varepsilon) \\ t_f = \frac{N}{N_f} \end{cases} \quad (16)$$

式中, N_f 为失效循环次数; N 为当前循环次数; ε 为当前循环中的键应变, $\varepsilon = |s_{\text{max}} - s_{\text{min}}|$; C, m 为与材料属性相对应的参数,将归一化的疲劳损伤量 $\lambda(\mathbf{x}, \xi, t_f)$ 定义为键的损失寿命,即

$$\begin{cases} \frac{d\lambda}{dN}(N) = C \exp(m\varepsilon) \\ \lambda(0) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

循环次数达到 N 时,键发生断裂,即

$$\lambda(N) \geq 1 \quad (18)$$

对于疲劳裂纹萌生阶段,用 C, m 对曲线 $S-N$ 进行标定,如图9所示。式(19)表示循环 N 是第1次断键, C 和 m 表示为

$$\begin{cases} C = C_1 \\ m = m_1 \end{cases} \quad (19)$$

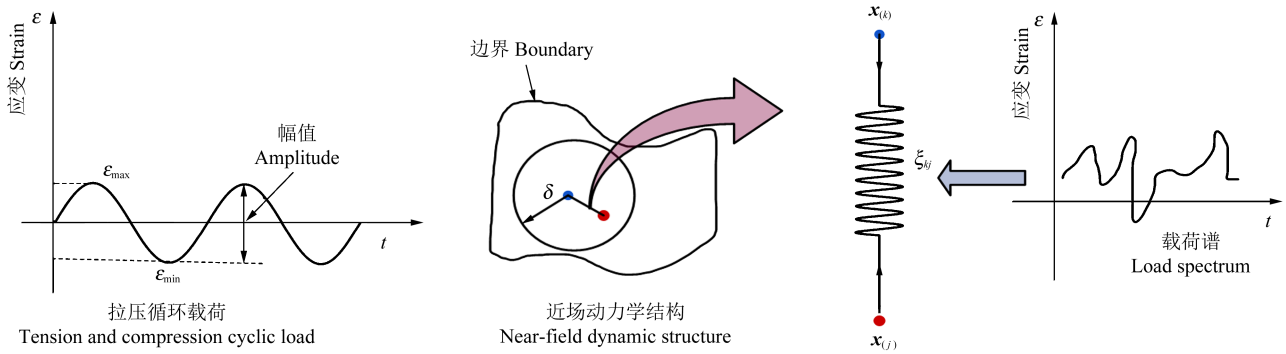


图 7 某键的疲劳断裂模型

Fig. 7 Fatigue fracture model of a bond

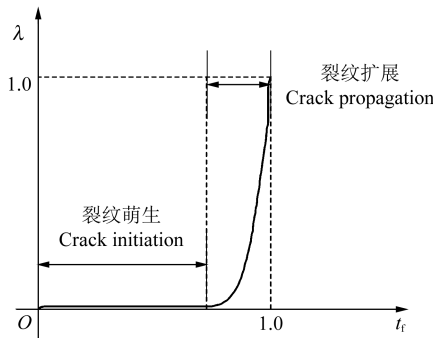


图 8 键的疲劳损伤过程

Fig. 8 Fatigue damage process of the bond

结合式(17)、式(19)和式(20),物质结构中第 1 个键 $\mathcal{R}$ 断裂所伴随的 ε_1 是循环应变范围:

$$N_1 C_1 \exp(m_1 \varepsilon_1) = 1 \quad (20)$$

式中, N_1 表示将要发生键断裂的最小循环次数时, $\lambda(N_1)=1$ 。当疲劳循环次数 N 大于 N_1 时,疲劳裂纹萌生阶段中第 1 个键发生断裂。

$$N_1 > \frac{1}{C_1 \exp(m_1 \varepsilon_1)} \quad (21)$$

当疲劳裂纹萌生时,第 1 个循环键 ε_1 断裂,同时当前循环载荷中计算其它相邻的键是否发生断裂。如果这些键的应变大于 ε_1 ,则键发生断裂并重新计算静态解,直到在同一循环中没有更多的键断裂为止。在近场动力学变形构造中,利用静态解计算下一循环次数的最大键应变。

如图 10 所示,对于垂直于坐标轴的键 ξ ,裂纹扩展方向与键的方向垂直,即该键所对应的裂纹为 I 型疲劳裂纹。在循环加载过程中,裂纹尖端附近的变形是恒定的,裂纹扩展速率定义为 da/dN 。在每个加载循环中,键与裂纹尖端的相对距离表示为

$$z = x - \frac{da}{dN} N \quad (22)$$

式中, $z=0$ 为裂纹尖端在键 ξ 上, x 为沿裂纹轴线的空间坐标,键的寿命由其相对距离的 1 阶导数积分 $z=0$, 得到:

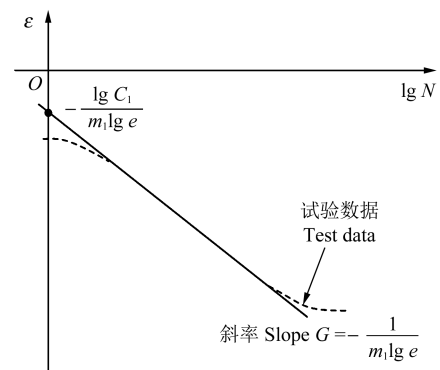


图 9 裂纹萌生阶段参数标定

Fig. 9 Parameter calibration of crack initiation stage

$$\lambda(\delta) = \lambda(0) + \int_0^\delta \frac{d\lambda}{dN} \frac{dN}{dz} dz \quad (23)$$

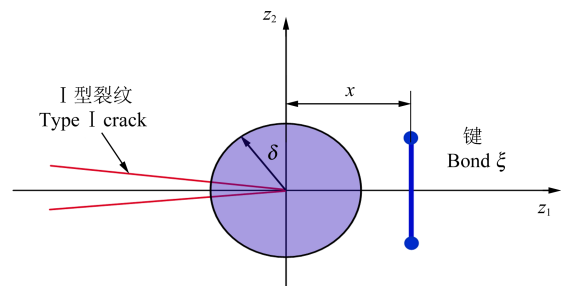
式中, $\lambda(\delta)=0$ 和 $\lambda(0)=1$ 所表示的损伤演化表明在近场范围内有效,得到式(24)和式(25):

$$\frac{da}{dN} = C_2 \int_0^\delta e^{m_2 \varepsilon} dz \quad (24)$$

基于疲劳裂纹扩展 Paris 定律,有

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta k)^M \quad (25)$$

式中, c 、 M 为常数。比较式(24)和式(25),选取两个实验数据点,确定常数 C_2 和 m_2 。

图 10 键 ξ 与 z_1 轴垂直(对应 I 型裂纹)Fig. 10 Bond ξ is perpendicular to the z_1 axis (corresponding to type I crack)

3 数值计算求解

3.1 自适应动态松弛法求解

疲劳裂纹扩展近场动力学演化方程通过积分-微

分控制方程进行描述,在循环载荷的持续作用下,仅考虑载荷峰值条件下的键的损伤演化。当某个加载周期内的部分键断裂时,在同一个周期内计算新的静力解,直到没有键断裂为止。在疲劳裂纹模拟中可以采用自适应动态松弛法,所有物质点的近场动力学运动方程为

$$D\ddot{U}(X,t) + \zeta D\dot{U}(X,t) = F(U,U',X,X') \quad (26)$$

式中, D 为虚拟对角密度矩阵; ζ 为阻尼系数; X 和 U 为近场构型中所有材料点的初始位置和位移向量,即

$$\begin{cases} X^T = \{x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(N)}\} \\ U^T = \{u(x_{(1)}, t), u(x_{(2)}, t), \dots, u(x_{(N)}, t)\} \end{cases} \quad (27)$$

式中, N 为构型体中所有物质点的编号。结合式(5)与式(26),向量 $F_{(k)}$ 可以表示为

$$F_{(k)} = \sum_{j=1}^M [t_{(k)(j)} - t_{(j)(k)}] [v_{cj} V_{(j)}] + b_{(k)} \quad (28)$$

式中, v_{cj} 为该物质点的体积修正系数。下一时间步的速度和位移表示如下:

$$\begin{cases} V^{(n+1)/2} = \frac{[(2 - \zeta^n \Delta t)V^{(n-1)/2} + 2\Delta t D^{-1} F^n]}{2 + \zeta^n \Delta t} \\ U^{n+1} = U^n + V^{(n+1)/2} \Delta t \end{cases} \quad (29)$$

式中, n 为迭代次数。密度矩阵 D 的对角线元素表示为

$$\gamma_{kk} \geq \frac{1}{4} \Delta t^2 \sum_j |\mathcal{J}_{kj}| \quad (30)$$

式中, $\mathcal{J}_{kj}$ 为当前结构的刚度矩阵。基于小位移假设,可得

$$\sum_j |\mathcal{J}_{kj}| = \sum_{j=1}^M \frac{|\xi_{(k)(j)} \cdot e|}{|\xi_{(k)(j)}|} \frac{4\delta}{|\xi_{(k)(j)}|} \left\{ \frac{1}{2} \frac{ad^2\delta}{|\xi_{(k)(j)}|} (v_{ck} V_k + v_{cj} V_j) + b \right\} \quad (31)$$

式中, e 为一个单位向量。

3.2 近场等效应力强度因子

裂纹在扩展过程中所需要的驱动力为应力强度因子,该值控制着疲劳裂纹扩展的路径。对于三维应力强度因子,目前仍然存在一些限制。在常规态基近场动力学理论中,没有明确的驱动力概念,采用了等效 J 积分 J_{equ} ,表示为

$$J_{\text{equ}} = \int_{\Gamma} (W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds) = \frac{2E}{(1 - \nu^2)} \sum_{i=1}^{n_e} \int_i (W_i dy - w_i ds) \quad (32)$$

式中, n_e 表示离散单元数目。结合式(32)和近场能量释放率,得到近场等效应力强度因子^[12]为

$$K_{\text{equ}} = \sqrt{G_a \beta} \quad (33)$$

式中, G_a 为近场动力学能量释放率; β 为板厚度。

3.3 算法实现流程

在对比分析经典疲劳裂纹模拟算法和近场动力学疲劳裂纹模拟算法的基础上,推导出基于近场动力学的疲劳裂纹萌生和扩展的模拟流程,如图11所示。

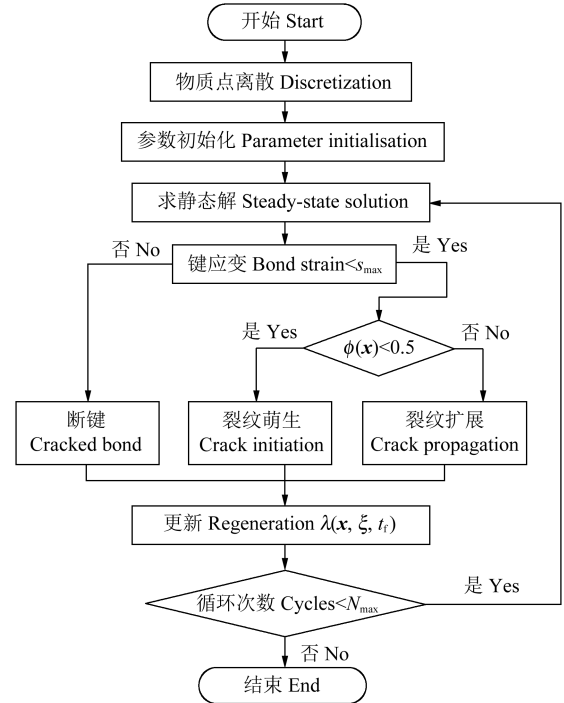


图11 基于常规态基近场动力学的疲劳裂纹扩展模型

Fig. 11 Fatigue crack propagation model based on conventional state based peridynamics

4 实验验证

4.1 实验设备

如图12所示,裂纹扩展速率测试实验在液压疲劳实验平台上进行,该平台配套系统对中套件,对试样夹持前后左右以及角度方向,实现六自由度的任意调整;该平台具有 ± 100 kN的轴向负载能力,轴向执行器行程为150 mm。辅助夹具与液压夹头上下夹紧,定位孔定位特征模拟件,并在实验开始前,通过下夹头的移动提供特征模拟件初始预紧力,裂纹扩展速率测试在测量系统上进行,一种三维、全场、无接触测量任何材料物体轮廓、位移、振动和应变的光学测量系统,适用于破坏力学研究中,包括裂纹尖端应变场测量、裂纹尖端张开位移测量以及高温下裂纹尖端应变场测量等。

4.2 特征模拟件设计及加载参数

如图13所示,特征模拟件疲劳试样,长度为164 mm,宽度为36 mm,厚度为5.8 mm,两端销钉定位孔尺寸为15 mm,特征模拟件中间最薄弱位置厚度为3 mm。因此在不考虑其他因素的情况下,中间位置是特征模拟件的薄弱位置。在中间部位,特别地预留一个椭圆孔使其成为最薄弱部位以确保断裂位置的一

致性,总体是设计一个带椭圆孔和外弧度的特征模拟件。TC4 材料各指定元素的最大百分比如表 1 所示,室温下的基本力学性能如表 2 所示,实验加载载荷谱如图 13 所示。

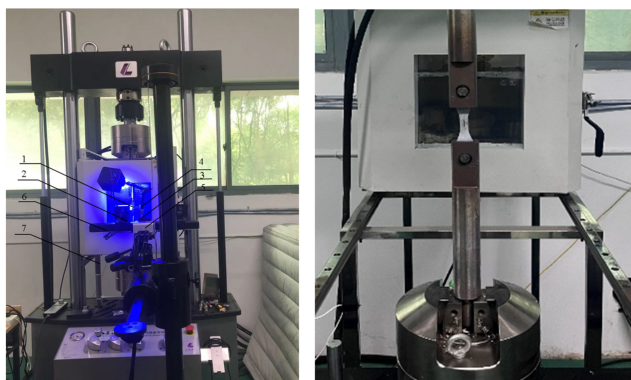


图 12 特征模拟件试样实验和测量系统

Fig. 12 Characteristic simulator sample test and measurement system

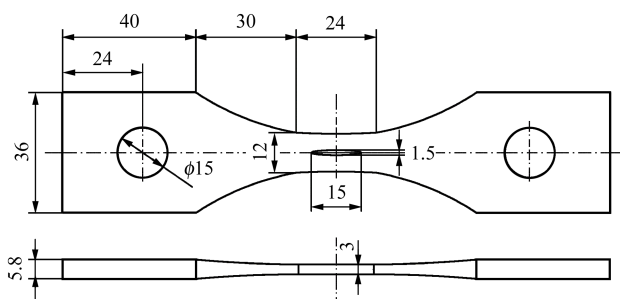


图 13 特征模拟件疲劳试样

Fig. 13 Characteristic simulated fatigue sample

表 1 各种指定元素的最大百分比

Tab. 1 Maximum percentage of each specified element %

C	N	H	Fe	O	Al	V	Y	Ti
0.08	0.05	0.015	0.30	0.20	5.5~6.75	3.5~4.5	0.005	0.16

表 2 TC4 材料室温下的基本性能

Tab. 2 Basic properties of TC4 material at room temperature

弹性模量 Elasticity modulus E / GPa	屈服强度 Yield strength $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 Tensile strength σ_b / MPa	泊松比 Poisson's ratio	断裂韧性 Fracture toughness K_{IC} / ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
125.58	836	905	0.31	69.8

4.3 实验数据结果

图 14 所示为实验用载荷谱,该载荷谱包含 23 个波峰值点和 22 个波谷值点,在该载荷谱加载下,通过数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)法,测试特征模拟件裂纹长度与循环数之间的关系数据,得到裂纹扩展速率和应力强度因子的数据测试结果,如图 15 所示。由图 15 可知,3 件试样得到的数据整体趋势较为一致,随着应力强度因子的增加裂纹扩展速率变大,都呈非线性变化,其中编号 A-4 试样的数据点和 A-5 试样的数据点的结果较为接近,两者在相同应力强度因子下的扩展速率略小于编号 A-6 试样的值,考虑是

实验件本身加工尺寸精度的影响。图 14 中实线为 3 件试样结果取均值拟合得到,3 个试样得到的拟合曲线均能较好地显现 3 件试样裂纹扩展速率随应力强度因子的变化趋势,即扩展速率先增大再变缓再增大。

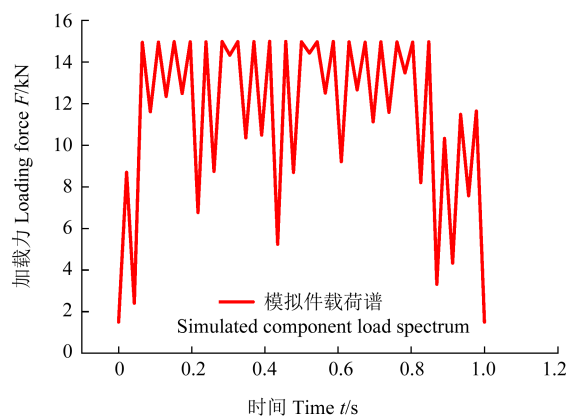


图 14 特征模拟件试样加载载荷谱

Fig. 14 Characteristic simulation sample loading load spectrum

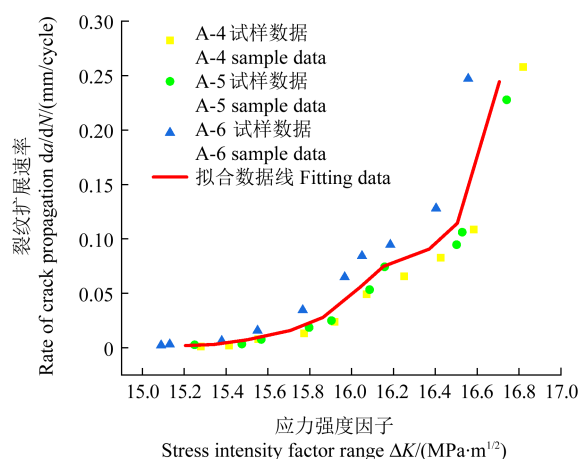
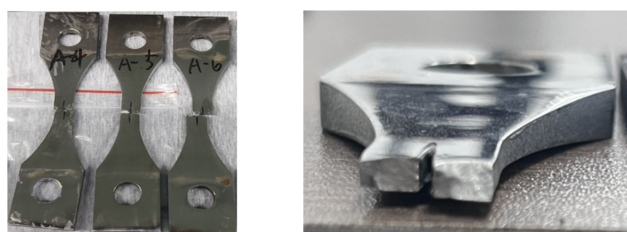


图 15 实验测试结果

Fig. 15 Experimental test result

4.4 疲劳裂纹扩展路径与模型验证

实验测得 3 件特征模拟件平均疲劳循环次数为 8 618,疲劳主长裂纹与特征模拟件中线的平均夹角为 6.2° 。特征模拟件试样如图 16(a)所示,其断口形貌如图 16(b)所示,该试样疲劳主长裂纹路径与中线的夹角约为 4.8° 。



(a) 特征模拟件样件

(b) 特征模拟件断口形貌

(a) Characteristic simulator (b) Feature simulated fracture morphology

图 16 特征模拟件及断口形貌

Fig. 16 Characteristic simulation parts and fracture morphology

基于常规态基近场动力学模型仿真得到的特征模拟件裂纹萌生至裂纹扩展,直至最终的疲劳裂纹断裂过程,如图 17 所示。该模拟结果与测试平均结果具有良好的相关性,裂纹仿真寿命为 9 015,实测平均裂纹扩展寿命为 8 618,误差为 4.6%。随着迭代次数的增加,从第 51 迭代步开始,进入裂纹扩展阶段,随着迭代次数增加,等效应力强度因子 K_{eq} 的值逐渐增大,裂纹扩展速率相应增加,具体变化如表 3 所示。

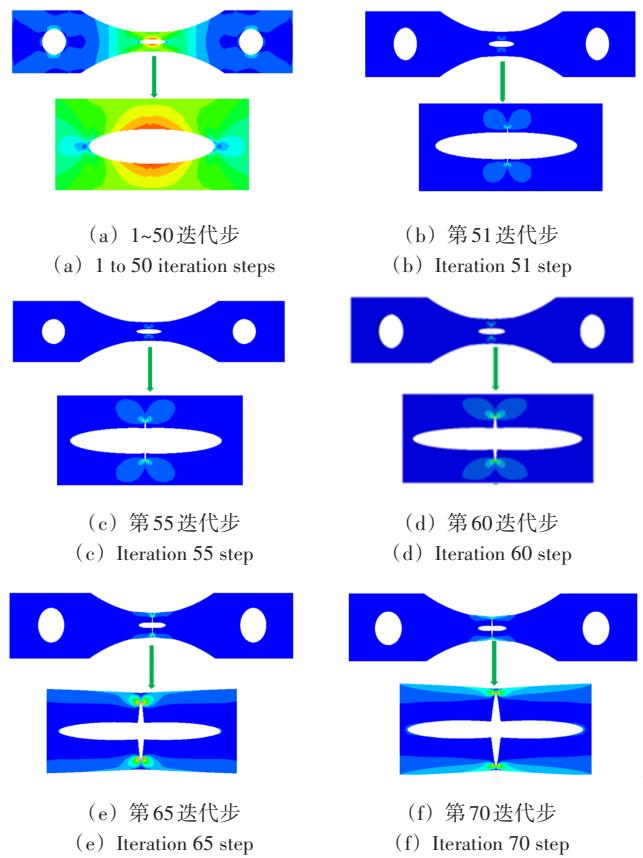


图 17 基于常规态基近场动力学的疲劳裂纹扩展分析
Fig. 17 Fatigue crack propagation analysis based on near-field dynamics of conventional state basis

表 3 等效应力强度因子和裂纹扩展速率仿真结果

Tab. 3 Simulation results of equivalent stress intensity factor and crack growth rate		
迭代步/循环次数 Iterative step/Cycles	裂纹扩展速率 Rate of crack propagation $da/dN/(mm/cycle)$	等效应力强度因子 Equivalent stress intensity factor $\Delta K/(MPa \cdot m^{1/2})$
(1~50)/(1~8200)	—	—
51/8 280	0.002 291	15.105 75
53/8 350	0.002 716	15.339 62
55/8 420	0.008 238	15.600 0
57/8 490	0.016 880	15.806 31
59/8 560	0.055 743	15.926 24
61/8 630	0.072 150	16.116 13
63/8 700	0.080 969	16.252 11
65/8 770	0.092 688	16.370 24
67/8 820	0.152 759	16.604 99
70/9 015	0.228 020	16.819 82

如图 18 所示,常规态基模型得到的裂纹扩展速率和等效应力强度因子,与实测数据(图 15 中实线)一致性较好,误差计算如下

$$\text{误差} = \frac{|\text{实测数据} - \text{仿真数据}|}{\text{实测数据}} \quad (33)$$

对比图 15 和图 18 中拟合数据线,可以看出,常规态基模型得到的裂纹扩展速率与实测所得裂纹扩展速率趋势一致,且最大误差在应力强度因子为 $15.926\ 24\ MPa \cdot m^{1/2}$ 时刻,为 6.27%。

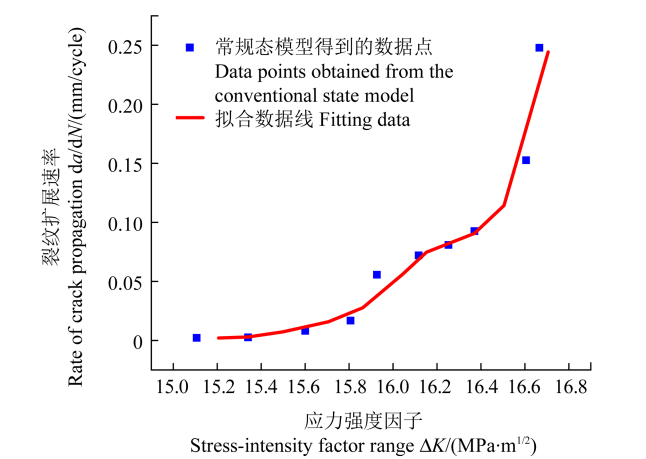


图 18 仿真数据点与拟合数据之间的对比图
Fig. 18 Comparison plot between simulated data points and fitted data

5 结论

通过对国产钛合金 TC4 材料特征模拟件疲劳裂纹机理、扩展模型、数值仿真及实验验证工作,得出如下结论:

- 1)为评估特征模拟件裂纹萌生、扩展及瞬断整个全寿命周期,提出疲劳裂纹的萌生和扩展统一的常规态基近场动力学疲劳寿命预测。
- 2)常规态基近场动力学模型能够较好地预测特征模拟件的疲劳断裂寿命全过程,且模型精度误差保持在 7% 以内。
- 3)该常规态基近场动力学疲劳裂纹扩展模型不需要额外的裂纹扩展准则即可实现裂纹的自适应扩展。

参考文献 (References)

[1] 徐礼达,张瑞金,赵 硕. 基于弹塑性力学的疲劳裂纹扩展速率的研究[J]. 机械强度,2023,45(3):607-612.
XU LiDa, ZHANG RuiJin, ZHAO Shuo. Study on fatigue crack growth rate based on elastic-plastic mechanics [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(3): 607-612 (In Chinese).
[2] 黄土地,彭兆春,柏 松,等. 概率双线性累积损伤模型与机械结

- 构时变可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(16): 117-127.
- HUANG TuDi, PENG ZhaoChun, BAI Song, et al. Probabilistic double linear damage accumulation model and time-dependent reliability analysis of mechanical structure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(16): 117-127 (In Chinese).
- [3] 李 威. 考虑强度退化的非线性累积损伤模型分析[J]. 机械强度, 2020, 42(3): 723-727.
- LI Wei. Analysis of nonlinear cumulative damage model considering strength degradation [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(3): 723-727 (In Chinese).
- [4] LÉPINOUX J, MAZIÈRE D, PONTIKIS V, et al. Multiscale phenomena in plasticity: from experiments to phenomenology, modeling and materials engineering [M]. Springer Science & Business Media, 2012: 57-66.
- [5] 乔丕忠, 张 勇, 张 恒, 等. 近场动力学研究进展[J]. 力学季刊, 2017, 38(1): 1-13.
- QIAO PiZhong, ZHANG Yong, ZHANG Heng, et al. A review on advances in peridynamics [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2017, 38(1): 1-13 (In Chinese).
- [6] SCHNEIDER M. A review of nonlinear FFT-based computational homogenization methods [J]. Acta Mechanica, 2021, 232(6): 2051-2100.
- [7] 薛栋文, 徐 洋, 解国升, 等. 基于XFEM的谐波减速器柔轮裂纹扩展行为研究[J]. 机械传动, 2022, 46(10): 37-41.
- XUE DongWen, XU Yang, XIE GuoSheng, et al. Research on crack propagation behavior of flexspline in harmonic reducer based on XFEM [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(10): 37-41 (In Chinese).
- [8] CZICHOS H, SAITO T, SMITH L R. Springer handbook of materials measurement methods [M]. New York: Springer, 2006: 431-529.
- [9] 谷新保, 周小平. 裂纹扩展和连接过程近场动力学数值模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 610-616.
- GU XinBao, ZHOU XiaoPing. Numerical simulation of propagation and coalescence of cracks using peridynamic theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 610-616 (In Chinese).
- [10] SILLING S A, ASKARI A. Peridynamic model for fatigue cracking [R]. Albuquerque: Sandia Report, SAND2014-18590, 2014: 7-22.
- [11] ZHANG G F, LE Q A, LOGHIN A, et al. Validation of a peridynamic model for fatigue cracking [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 162: 76-94.
- [12] PANCHADHARA R, GORDON P A. Application of peridynamic stress intensity factors to dynamic fracture initiation and propagation [J]. International Journal of Fracture, 2016, 201(1): 81-96.
- [13] ZHU N, OTERKUS E. Calculation of stress intensity factor using displacement extrapolation method in peridynamic framework [J]. Journal of Mechanics, 2020, 36(2): 235-243.