

引入应变循环损伤的材料裂纹扩展行为预测模型

陈龙, 蔡力勋, 姚迪

(西南交通大学力学与工程学院, 610031, 成都)

摘要: 根据循环载荷下的裂尖循环弹塑性应力应变场分析, 结合 Manson-Coffin 经验关系, 定义了基于循环塑性区内材料塑性应变幅值的单位平均损伤; 根据 Miner 疲劳线性累积损伤理论, 以裂尖扩展方向的循环塑性区尺寸为裂纹裂尖的单位扩展量, 提出了基于低周疲劳损伤预测 I 型裂纹扩展速率的新预测模型. 新模型中给出的参数均有明确的物理意义, 不需要人为调试. Cr2Ni2MoV 和 X12CrMoWVNbN 10-1-1 两种转子材料的低周疲劳试验结果表明, 新模型对这两种材料裂纹扩展速率的预测结果与试验结果吻合良好. 利用相关文献中提供的 6 种材料的低周疲劳性能数据, 进一步验证了新模型用于裂纹扩展速率预测的良好适用性.

关键词: 低周疲劳; 疲劳裂纹扩展; 塑性应变; 累积损伤

中图分类号: O346.1; TG113.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0114-05

Prediction Model of Fatigue Crack Growth Behavior by Introducing Strain Cycle Damage

CHEN Long, CAI Lixun, YAO Di

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: According to the cyclic elasto-plastic HRR field near the crack tip, the Manson-Coffin theory is applied to define the unit average damage over the plastic strain magnitude of the materials within the cyclic plastic region. Assuming the step size of the crack advancement equals the size of the real cyclic plastic region along the crack growth direction, then following the linear damage accumulation theory—Miner law, a model for predicting the low cycle fatigue crack growth of the opening mode crack is set up. It is noted that every factor in the new model is endowed with clear physical meaning without any human debugging. The prediction results of the low cyclic fatigue crack propagation by the proposed model coincide well with the low cycle fatigue test data of two rotor materials. The good prediction capability of the proposed model is verified by the data of six different materials from literatures.

Keywords: low cycle fatigue; fatigue crack propagation; ductile strain; damage accumulation

工程实践中对材料和结构进行损伤容限分析具有极为重要的实际意义, 而疲劳裂纹扩展速率作为表征材料疲劳断裂性能的重要指标之一, 在结构寿命设计、故障分析、工艺优化等方面的作用也至关重要. 目前, 获得材料疲劳裂纹扩展速率主要依赖试验和数值模拟两种手段. 国内外的学者研究了不同材

料在常幅或变幅下的低周疲劳裂纹扩展性能, 并考虑了不同加载比、服役环境等因素的影响. 众所周知, 材料疲劳裂纹扩展速率 da/dN 是以裂尖应力强度因子幅 ΔK 为自变量的函数, 并且在双对数坐标下, 二者的关系曲线可以分为裂纹萌生区、稳定扩展区和失稳扩展区 3 个区段. Paris 研究团队在试验的

收稿日期: 2012-02-17. 作者简介: 陈龙(1987—), 男, 硕士生; 蔡力勋(通信作者), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072205); 大学生国家创新性实验计划资助项目(101061323).

网络出版时间: 2012-07-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120710.1758.001.html>

基础上给出了以下裂纹稳定扩展段的预测模型^[1]

$$da/dN = C\Delta K^m \quad (1)$$

式中: C 和 m 为材料常数. 随后, Forman^[2] 和 Pridle^[3] 等学者相继给出了整个阶段的经验模型, 并且在模型中引入了加载比 R 的影响.

国内外学者对材料疲劳的大量研究表明, 疲劳裂纹的生长是由于裂纹尖端附近的材料承受往复塑性变形引起的, 因此在某种程度上, 材料低周疲劳裂纹扩展速率和低周疲劳性能是可以互通的. 沈海军等^[4] 对同种材料的疲劳性能数据 $s-N$ 、 $\epsilon-N$ 及 $(da/dN)-\Delta K$ 之间的内在联系进行了研究, 也证实了它们彼此相互预测的可能性. Oh 等^[5] 提出, 裂纹的失效发生在疲劳过程区 D_p 内, 该区内应力场达到材料的疲劳强度值, 且每一个循环裂纹扩展的尺寸为 $da/dN = \epsilon_p D_p$, 其中 ϵ_p 为疲劳过程区内的平均循环塑性应变. 从此, 疲劳损伤及断裂过程同裂纹循环塑性应变之间的内在关系得以建立. Castro 等^[6] 在此基础上, 将裂纹区域内的材料离散为一系列代表性块体 (等价于低周疲劳微小试样), 借助低周疲劳损伤累积概念, 提出了如下全阶段经验预测模型

$$\frac{da}{dN} = A[\Delta K - \Delta K_{th}(R)]^m \frac{K_c}{K_c - [\Delta K/(1-R)]} \quad (2)$$

式中: $m=2$; A 为与材料低周疲劳性能有关的常数. Liu 等^[7] 结合 Miner 线性累积损伤概念和 Manson-Coffin 应变疲劳关系, 同样得到 $m=2$ 的裂纹扩展模型. 但是, 大量试验表明, 指数 m 并非常值, 而是随材料改变的, 因此文献^[6-7] 中提出的裂纹扩展预测模型具有一定的局限性. Majumdar 等^[8] 通过引入微观结构参数 ρ^* 修正了 Liu 的结论, 尽管得到了 m 不为常数的预测结果, 但却忽略了紧挨裂纹尖端的材料的损伤贡献, 因而其预测结果偏于保守. 黄学伟等^[9] 借助有限元分析方法, 实现了基于低周疲劳损伤对裂纹扩展行为的预测.

鉴于以上研究背景, 本文提出一种引入了包含有限应变区在内的裂纹循环塑性区内所有材料低周疲劳塑性累积损伤的疲劳裂纹扩展预测模型.

1 基于低周疲劳损伤预测 I 型裂纹扩展速率的新模型

1.1 裂纹循环应力应变幅的描述

在 Rice、Hutchinson 和 Rosengren 所提出的张开型裂纹单调应力应变场——HRR 场的基础上, Schwable^[10] 以变形前的裂纹节点位置作为坐标系

原点, 将 HRR 场延用到裂纹循环应力应变场 (如图 1 中实线所示), 具体的表达式如下

$$\left. \begin{aligned} \Delta \epsilon_p(r) &= \frac{2\sigma_{yc}}{E} \left(\frac{S_{PZc}}{r} \right)^{1/(1+n)} \\ \Delta \sigma(r) &= 2k \left(\frac{\Delta \epsilon_p(r)}{2} \right)^n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; σ_{yc} 为屈服强度; k 为循环硬化系数; n 为循环硬化指数; r 为裂纹扩展方向上的节点距裂纹尖端的距离; S_{PZc} 为循环塑性区的尺寸, 计算公式为

$$S_{PZc} = \frac{1}{4\pi\kappa^2(1+n)} \left(\frac{\Delta K}{\sigma_{yc}} \right)^2 \quad (4)$$

其中 $\kappa = \begin{cases} 1, & \text{平面应力状态} \\ \frac{1}{1-2\nu}, & \text{平面应变状态} \end{cases}$, ν 为泊松比, ΔK

为应力强度因子幅.

由于式(3)是建立在理想尖裂纹 (裂纹半径 $r_0=0$) 基础上的, 因此存在理论上的数学奇异性, 即当节点位置 r 趋于 0 时, 节点塑性应变幅趋于无穷大. 事实上, 裂纹尖端微观察和有限元分析表明, 裂纹在扩展过程中并不存在曲率为 0 的尖裂纹现象, 即裂纹尖端微小区域的塑性应变幅是一个有限值. 鉴于此, 本文假设一个疲劳钝化常数 x_1 , 即图 1 中所示裂纹坐标原点向左偏移的距离. 此时, 裂纹循环塑性应变幅就不再存在奇异性, 具体的表达式如下

$$\Delta \epsilon_p(r+x_1) = \frac{2\sigma_{yc}}{E} \left(\frac{S_{PZc}}{r+x_1} \right)^{1/(1+n)}, \quad 0 < r \leq S_{PZc} - x_1 \quad (5)$$

对于常数 x_1 的计算, 请见 1.2 节.

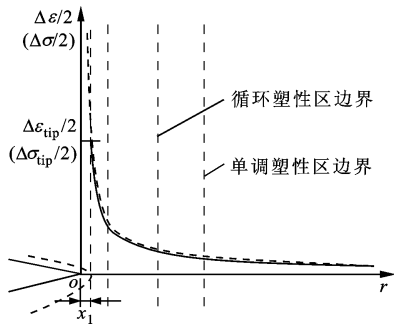


图 1 疲劳裂纹尖端扩展方向上的应力应变幅分布

1.2 疲劳塑性应变损伤机理定义

已有研究发现, 在低周疲劳裂纹扩展过程中, 裂纹尖端附近材料的疲劳可以等效于一系列的疲劳元承受单轴拉伸疲劳来模拟^[10], 这些疲劳元的疲劳失效行为即对应着疲劳裂纹的萌生扩展行为. 由疲劳理论

可知,低周疲劳寿命 N_f 与循环塑性应变幅之间的关系可以描述为

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \tag{6}$$

式中: ϵ'_f 为塑性强化系数; c 为塑性强化指数.

定义节点单位损伤 $D=1/N_f$,则根据式(5)和式(6)可知,张开型裂纹扩展方向上循环塑性区内的节点单位损伤分布可以表示为

$$D(r+x_1) = 2\left(\frac{\sigma_{yc}}{E\epsilon'_f}\right)^{-1/c} \left(\frac{S_{PZc}}{r+x_1}\right)^{-1/[(1+n)c]}, \tag{7}$$
$$0 < r \leq S_{PZc} - x_1$$

假设在低周疲劳裂纹扩展过程中,每次扩展的尺寸等于裂纹扩展方向上循环塑性区的尺寸($S_{PZc}-x_1$). 由于在循环塑性区内塑性应变幅远远大于弹性应变幅,因此可以忽略弹性应变幅对疲劳损伤的贡献,即每一循环周期中扩展区内的节点损伤之和为 $\int_0^{S_{PZc}-x_1} D(r+x_1)dr$. 定义扩展区内节点单位平均损伤 $\bar{D} = \frac{\int_0^{S_{PZc}-x_1} D(r+x_1)dr}{S_{PZc}-x_1}$. 根据 Miner 线性累积损伤理论可知,当 $\bar{D}=1$ 时,裂纹即发生一次扩展. 因此,裂纹向前扩展一次所需要的循环周次 $N_{f,i}$ 和裂纹扩展速率 $(da/dN)_i$ 可以通过下式计算

$$\left. \begin{aligned} N_{f,i} &= \frac{1}{\bar{D}_i} = \frac{S_{PZc,i} - x_1}{\int_0^{S_{PZc,i}-x_1} D_i(r+x_1)dr} \\ \left(\frac{da}{dN}\right)_i &= \frac{S_{PZc,i} - x_1}{N_{f,i}} = \int_0^{S_{PZc,i}-x_1} D_i(r+x_1)dr \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

由式(8)可知,裂纹每次扩展的速率即等于裂尖循环塑性区内的节点损伤和. 联立式(7)和式(8),即可得到如下本文基于裂尖扩展方向上循环塑性区内平均塑性应变临界损伤的张开型疲劳裂纹扩展预测模型

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_i = 2\left(\frac{E\epsilon'_f}{\sigma_{yc}}\right)^{1/c} S_{PZc,i} \frac{c+cn}{1+c+cn} \left[1 - \left(\frac{x_1}{S_{PZc,i}}\right)^{1+1/(c+cn)}\right] \tag{9}$$

低周疲劳裂纹扩展速率曲线主要分为 3 个区域——近门槛区、稳定扩展区和失稳扩展区. 在近门槛区,当应力强度因子幅 $\Delta K=\Delta K_{th}$ 时,裂纹扩展速率近似等于 0,因此,通过式(9)和式(4)可得出疲劳钝化常数的计算公式

$$x_1 = S_{PZc,th} = \frac{1}{4\pi\kappa^2(1+n)} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\sigma_{yc}}\right)^2 \tag{10}$$

由式(10)可见,疲劳钝化常数即为材料疲劳门槛值载荷下裂尖扩展方向上的循环塑性区尺寸. 结合式(7)可知,此时裂尖附近的循环塑性应变损伤范围为 0,即裂尖区域塑性损伤近似为 0,这同时验证了疲劳裂纹扩展门槛值的物理意义.

2 本文模型对材料裂纹扩展速率的预测能力

2.1 低周疲劳与疲劳裂纹扩展试验

试验材料选择汽轮机转子材料 Cr2Ni2MoV 和 X12CrMoWVNbN 10-1-1,其常温常规拉伸性能如表 1 所示. 低周疲劳试样采用国家标准推荐的光滑等直试样,直径为 8 mm;裂纹扩展速率试样采用标准紧凑拉伸试样,其构形如图 2 所示. 试验设备采用 MTS809 25 kN 型电液伺服材料试验机及其测试软件 and 控制系统、632. 61C 型应变引伸计以及标距为 4 mm 的 MTS632. 02F-20 型 COD 引伸计.

通过常温单轴低周疲劳试验,获得对应材料的低周疲劳性能参数,如表 1 所示,表中 σ'_f 和 b 分别为延性强化系数和延性强化指数. 疲劳裂纹扩展试验的峰值载荷为 4 kN,加载比为 0. 1. 试验结束后,参考 GB/T 6398—2000 国家规范推荐的割线法对疲劳裂纹扩展试验数据进行处理,最后得到材料各平行试样的疲劳裂纹扩展结果曲线,如图 3 所示.

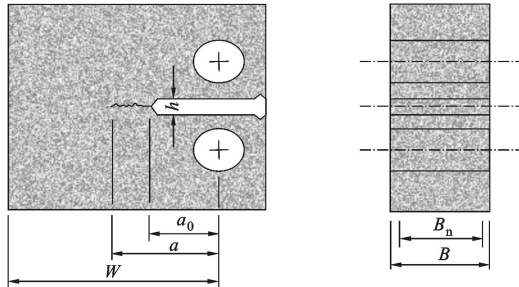


图 2 标准紧凑拉伸试样构形

表 1 转子材料常规力学性能和低周疲劳性能参数

参数	Cr2Ni2MoV	X12CrMoWVNbN
		10-1-1
E/GPa	214	226
σ_{yc}/MPa	853	765
n	0. 059 5	0. 067 6
σ'_f/MPa	903	1 088
b	−0. 040 4	−0. 057 2
ϵ'_f	1. 100 5	2. 398 9
c	−0. 679	−0. 847
$x_1/\mu\text{m}$	0. 168 1	0. 473 9
$\Delta K_{th}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	4. 2	4. 5

2.2 本文模型的预测结果验证

结合表1中由试验获得的转子材料常规力学性能和低周疲劳性能参数,应用本文提出的低周疲劳裂纹扩展速率预测模型式(9),分别对试验所用2种转子材料的常温裂纹扩展行为进行了预测,预测结果与试验结果对比如图3所示。

从图3中可知,试验结果与预测曲线基本重合,分散性很小,说明本文模型的预测结果能够真实反映对应转子材料的本质裂纹扩展行为,本文模型具有一定的可行性和较高的预测精度。

2.3 本文模型的普适性验证

通过查阅文献,获取了6种不同类型材料的力学性能参数,如表2所示(表2中还分别给出了不同材料对应的疲劳钝化常数 x_1 的值)。然后,利用本文疲劳裂纹扩展速率预测新模型式(9),对这6种材料

分别进行了预测,结果如图4所示。通过图4中本文模型预测结果与试验结果的对比发现,理论预测和试验结果基本上保持一致,从而进一步表明本文模型具有很好的适应性。

3 结论与展望

(1)基于循环裂尖应力应变场的分析,引入了疲劳钝化常数 x_1 ,它的值即为门槛值对应的循环塑性区尺寸。然后,结合Miner累积损伤理论,提出了引入裂尖循环塑性区内扩展方向上材料塑性累积损伤的低周疲劳裂纹扩展全阶段预测模型式(9),该模型中的所有参量都具有明确的物理意义。

(2)通过试验获得了Cr2Ni2MoV和X12CrMoWVNbN 10-1-1两种汽轮机转子材料的低周疲劳性能参数和裂纹扩展数据,然后利用本文模型对2种材

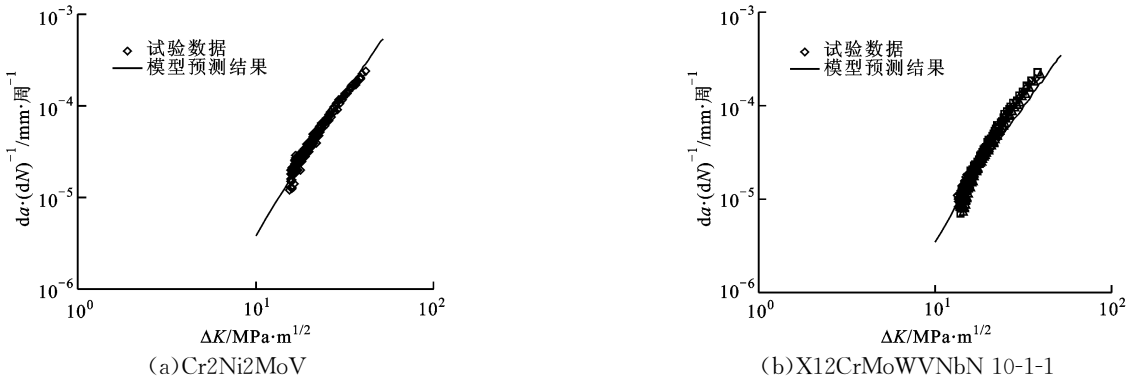


图3 2种材料的常温低周疲劳裂纹扩展速率预测曲线与试验结果对比

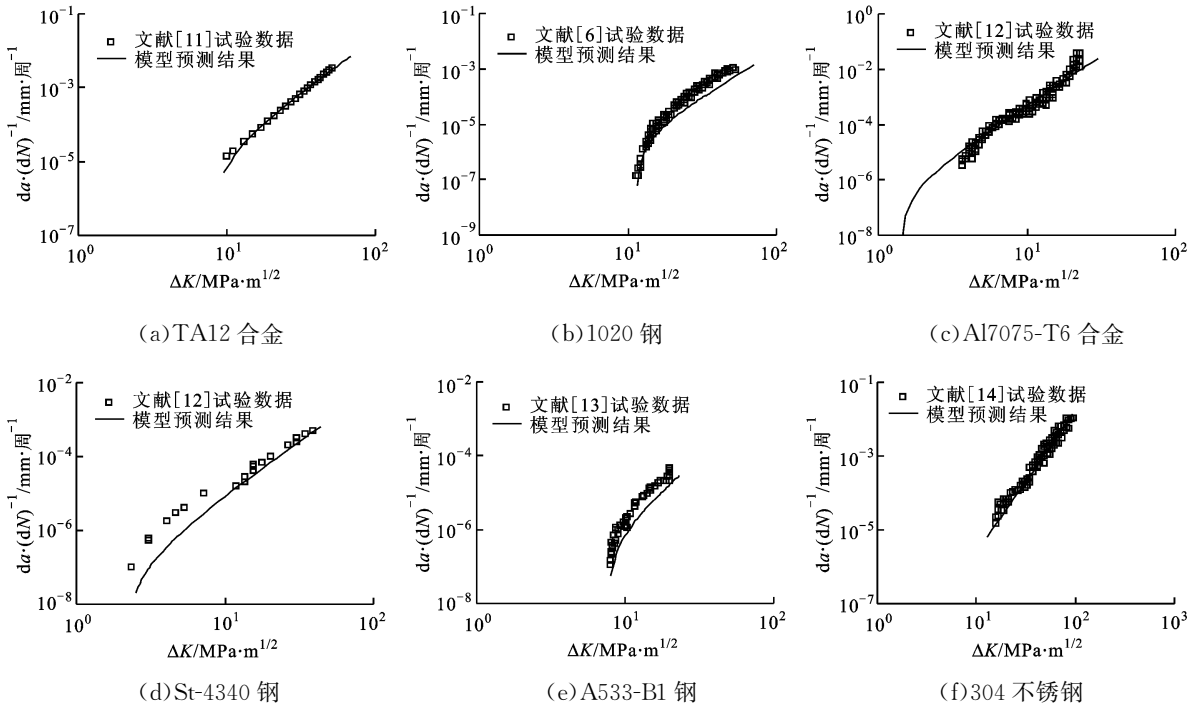


图4 6种材料的常温低周疲劳裂纹扩展预测结果与试验数据对比

表 2 相关文献中 6 种材料的力学性能参数

材料	E/GPa	σ_{yc}/MPa	n	σ'_f/MPa	b	ϵ'_f	c	R	$\Delta K_{th}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	$x_1/\mu\text{m}$
TA12 ^[11]	113	903	0.122 4	160 9	-0.081	0.29	-0.662	0.1	8.0	1.122
1020 ^[6]	205	270	0.211 1	815	-0.114	0.25	-0.54	0.1	11.6	27.92
Al7075-T6 ^[12]	71	469	0.086 5	781	-0.045	0.19	-0.52	0.5	1.45	0.132 8
St-4340 ^[12]	200	889	0.140 7	187 9	-0.089 5	0.64	-0.636	0.7	2.26	0.093 6
A533-B1 ^[13]	200	345	0.163 5	869	-0.085	0.32	-0.52	0.1	7.7	7.310
304 ^[14]	197	285	0.400 0	109 8	-0.149 2	0.106	-0.373	0.1	4.0	3.192

料进行低周疲劳裂纹扩展预测,预测结果与试验结果吻合良好,表明本文模型具有较好的预测性.同时,采用本文模型对相关文献中 6 种不同材料的低周疲劳裂纹扩展行为进行了预测,结果均与相应的试验结果保持一致,表明本文模型具有广泛的适用性.

(3)考虑到本文模型限于反映材料疲劳裂纹扩展过程中塑性应变累积损伤的贡献,为了获得更真实的疲劳裂纹扩展预测结果,可以考虑引入弹性应力损伤的贡献,以进一步提高模型预测的精度.若将本文模型拓展到三维空间,则需要考虑裂尖场在试样厚度方向的分布影响,此时等效疲劳元所承受应力应变幅的计算将变得更为复杂.

参考文献:

[1] PARIS P C, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-534.

[2] FORMAN A G, KEARNEY V E, ENGLE R M. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures [J]. Journal of Basic Engineering, 1967, 89(3): 459-469.

[3] PRIDDLE E K. The threshold stress intensity factor for fatigue crack growth in mild steel plate and weld metal: some effects of temperature and environment [M]// Fatigue Threshold: Fundamentals and Engineering Applications. London, UK: Engineering Materials Advisory Services Ltd., 1982: 581-600.

[4] 沈海军,郭万林,冯谦.材料 $S-N$ 、 $\epsilon-N$ 及 $da/dN-\Delta K$ 疲劳性能数据之间的内在联系[J]. 机械强度, 2003, 25(5): 556-560.

SHEN Haijun, GUO Wanlin, FENG Qian. The internal relationship between $S-N$ 、 $\epsilon-N$ and $da/dN-\Delta K$ data of the same material [J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(5): 556-560.

[5] OH Y J, NAM S W. Low-cycle fatigue crack advance and life prediction [J]. J Materials Science, 1992, 27(8): 2019-2025.

[6] DE CASTRO J T P, MEGGIOLARO M A, DE OLIVEIRA MIRANDA A C. Singular and non-singular approaches for predicting fatigue crack growth behavior [J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(10/11/12): 1366-1388.

[7] LIU Haowen, IINO N. A mechanical model for fatigue crack propagation [C]// Proceedings of 2nd International Conference on Fracture. London, UK: Chapman and Hall, 1969: 812-823.

[8] MAJUMDAR S, MORROW J. Correlation between fatigue crack propagation and low cycle fatigue properties [M]// ASTM STP: 559 Fracture Toughness and Slow-Stable Cracking. West Conshohocken, PA, USA: ASTM, 1974: 159-182.

[9] 黄学伟,蔡力勋,包成,等. 基于低周疲劳损伤的裂纹扩展行为数值模拟新方法[J]. 工程力学, 2011, 28(10): 202-208.

HUANG Xuewei, CAI Lixun, BAO Cheng, et al. A new method of numerical simulation for behavior of fatigue crack propagation based on low cycle fatigue damage [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 28(10): 202-208.

[10] SCHWABLE K H. Comparison of several fatigue crack propagation laws with experimental results [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1974, 6(2): 325-341.

[11] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册: 钛合金、铜合金[M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2001: 115-124.

[12] NOROOZI A H, GLINKA G, LAMBERT S. A two parameter driving force for fatigue crack growth analysis [J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(10/11/12): 1277-1296.

[13] LI D M, NAM W J, LEE C S. An improvement on prediction of fatigue crack growth from low cycle fatigue properties [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 60(4): 397-406.

[14] RAMSAMOOJ D V. Analytical prediction of fatigue crack propagation in metals [J]. Journal of Engineering Propagation Mechanics, 2003, 129(6): 672-682.

(编辑 葛赵青)