

文章编号: 1001-4888(2008)06-0049-05

基于耗散能密度的疲劳裂纹扩展规律研究^{*}

雷冬¹, 赵建华^{1,2}, 蔚夺魁³

(1. 中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230027;

2. 中国科学院 中国科学技术大学材料力学行为和材料设计开放实验室, 合肥 230027;

3. 中国一航沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘要: 在疲劳裂纹扩展过程中, 裂纹尖端的能量耗散决定了裂纹扩展能力。研究基于耗散能密度的裂纹扩展规律更有物理意义。耗散能密度是材料疲劳性能的一种表征参数, 实验测得了镍基高温合金 GH4169 材料室温和 450℃ 高温的耗散能密度与控制应力幅值的关系曲线。参照 Paris 公式的形式提出了基于耗散能密度的裂纹扩展方程, 并通过疲劳裂纹扩展试验测量了 GH4169 材料在室温和 450℃ 高温下的裂纹扩展速率与耗散能密度的关系。试验结果的总体趋势与所提出的扩展方程一致。

关键词: 疲劳裂纹; 耗散能密度; 裂纹扩展方程

中图分类号: O348

文献标识码: A

0 引言

金属材料经过疲劳破坏萌生出裂纹以后就进入了裂纹扩展阶段, 一般以裂纹扩展速率来描述裂纹的扩展规律。Paris^[1]最先提出了以应力强度因子幅作为参数来描述裂纹扩展规律的公式:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (1)$$

Paris 公式是在 Irwin 的线弹性断裂力学的基础上提出的, 在高周疲劳长裂纹扩展方面具有很好的适用性。在低周疲劳过程中, 裂纹尖端往往需要承受超过材料屈服强度的应力, 进入塑性。此时, Paris 公式以应力强度因子幅作为描述裂纹扩展规律的参数, 在理论依据上就存在问题^[2]。

Dowling 等^[3-4]采用弹塑性断裂力学基础上 J 积分来描述疲劳裂纹扩展, 但是在工程应用方面, 比较难运用。而在低周疲劳裂纹的扩展过程中, 裂纹尖端经历循环加载, 将发生弹塑性变形, 表现为能量的耗散。能量耗散越多, 裂纹扩展就越快, 裂纹尖端单位体积耗散能量的密度可以作为裂纹尖端材料损伤程度的表征, 从而也可以作为裂纹扩展能力的表征。因此, 研究基于耗散能密度的裂纹扩展规律更有其物理意义。

1 耗散能密度

Feltner 和 Morrow^[5]将疲劳过程中的能量耗散分成塑性应变能和其他非弹性能, Lin^[6]认为非弹性能为以热能为主的能量之和。一般情况下, 热能相对塑性能来说非常小, 尤其在频率较低的时候, 可以忽略, 即认为耗散能基本等价于塑性应变能。按照 Golos 和 Ellyin 的模型^[7-8], 在单向拉伸循环载荷的疲劳过程中, 塑性应变能可以由迟滞回线的面积来表示。

^{*} 收稿日期: 2008-04-08; 修订日期: 2008-11-03

通讯作者: 雷冬(1978—), 男, 现为中国科学技术大学博士后。E-mail: leidong@ustc.edu.cn

在不同的力学环境下,迟滞回线的形状以及所包含的面积都不一样。定义耗散能密度 w_d 为单个循环能量耗散的密度,可按下列公式计算:

$$w_d = \oint \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

在应力应变坐标系下,公式(2)的耗散能密度 w_d 即为单个循环迟滞回线所包含的面积。在一定条件下,耗散能密度 w_d 是材料疲劳性能的一种表征参数。

耗散能密度可以通过光滑试件进行应力幅控制逐级循环加载试验来测量,实验测得了镍基高温合金 GH4169 材料室温和 450℃ 高温的耗散能密度与控制应力幅的关系曲线分别见图 1 和图 2。

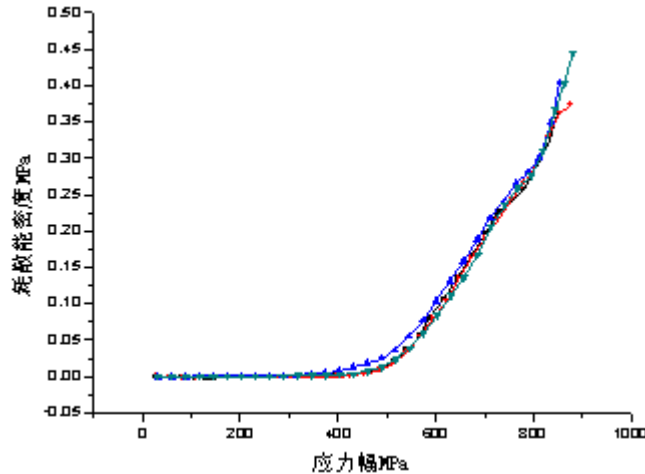


图 1 镍基合金 GH4169 室温耗散能密度与应力幅的关系(应力比 $R=0$, 加载频率 $f=10\text{Hz}$)

Fig. 1 The relation of stress amplitude and dissipated energy density
(GH4169; $R=0$; $f=10\text{Hz}$; Room Temperature)

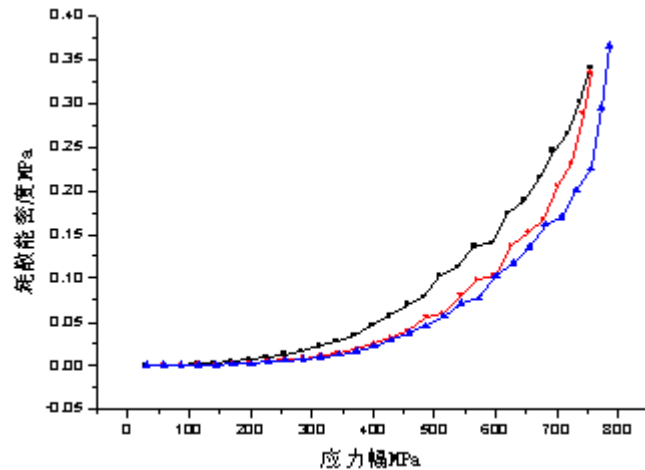


图 2 镍基合金 GH4169 高温耗散能密度与应力幅的关系(应力比 $R=0$, 加载频率 $f=10\text{Hz}$, 温度 $=450^\circ\text{C}$)

Fig. 2 The relation of stress amplitude and dissipated energy density
(GH4169; $R=0$; $f=10\text{Hz}$; 450°C)

从上述试验结果可以看出,耗散能密度 w_d 是应力幅 $\Delta\sigma$ 的非线性函数 $w_d = d(\Delta\sigma)$, 随着应力幅的增加呈非线性增加。

2 基于耗散能密度的裂纹扩展公式

参照裂纹扩展公式的普遍形式,给出基于耗散能密度的裂纹扩展公式为:

$$\frac{da}{dN} = \Lambda(w_d)^m \quad (3)$$

式中, w_d 为裂纹尖端的耗散能密度; A 、 m 为材料常数。

3 疲劳裂纹扩展试验

试验材料为镍基高温合金 GH4169, 试样尺寸为如图 3 所示的含单边半圆孔板条。有效长度 L 为 64mm, 有效宽度 D 为 14mm, 厚度 t 为 2.5mm, 单边半圆孔直径 r 有两种, 分别为 3mm 和 7mm。试验温度分别为室温和 450℃ 高温。

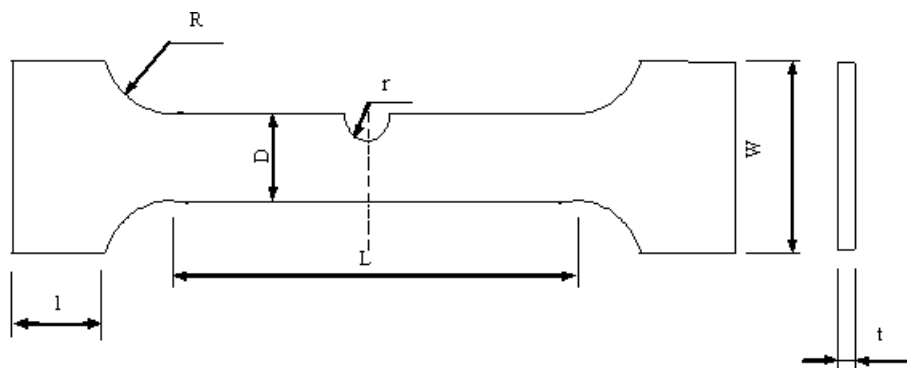


图3 GH4169 试样尺寸示意图

Fig. 3 Specimen geometry

试件在 MTS810 试验系统上进行恒应力幅控制的循环加载疲劳试验。试验应力比为 0, 频率为 10Hz。在疲劳过程中, 用美国 Questar 公司生产的长焦显微镜对孔边微区进行观测和记录。Questar 长焦显微镜较 CCD 具有很高的分辨率, 其分辨率可以达到亚微米量级。同时, 大于 560mm 的焦距更有利于对试件的在位测量。

每间隔一定循环周次(100 次), 记录一次试件孔边的表面图像。从图像上读取裂纹长度以及相应的循环周次, 即可以得到疲劳裂纹扩展试验的 $a-N$ 曲线, 根据国标 GB/T 6398—2000, 采用递增多项式的方法计算裂纹扩展速率, 得到疲劳裂纹扩展试验的 $\frac{da}{dN}-a$ 曲线。

采用弹塑性有限元方法来计算孔边某一长度裂纹尖端的应力分布。由于板条构件的对称性, 选取如图 4 所示的 1/2 结构通过 ABAQUS 商业软件建立计算模型, 并划分计算单元。

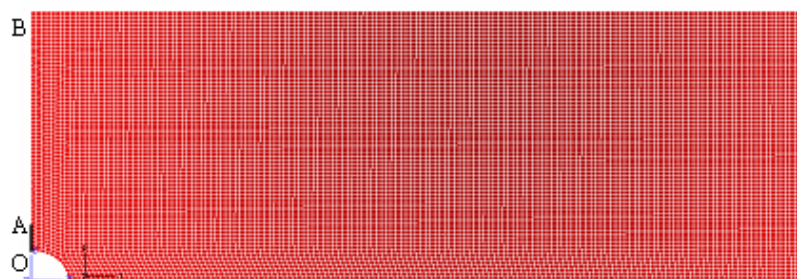


图4 有限元计算模型和网格划分

Fig. 4 The model and meshes of FEM

采用自由型约束的方式来模拟孔边裂纹, 即孔边裂纹 OA 段在计算时设置为无位移约束, 而 AB 段非裂纹处对相应方向的位移进行约束。

对于长度为 a 的裂纹, 通过有限元方法计算得到裂纹尖端的应力幅, 根据控制应力幅与耗散能密度的关系曲线, 得到疲劳过程中该裂纹尖端的耗散能密度 w_d 。再结合疲劳裂纹扩展试验的 $\frac{da}{dN}-a$ 曲线, 就可以得到某耗散能密度控制下的裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 。从而得到疲劳裂纹扩展的 $\frac{da}{dN}-w_d$ 的双对数坐标下的曲线:

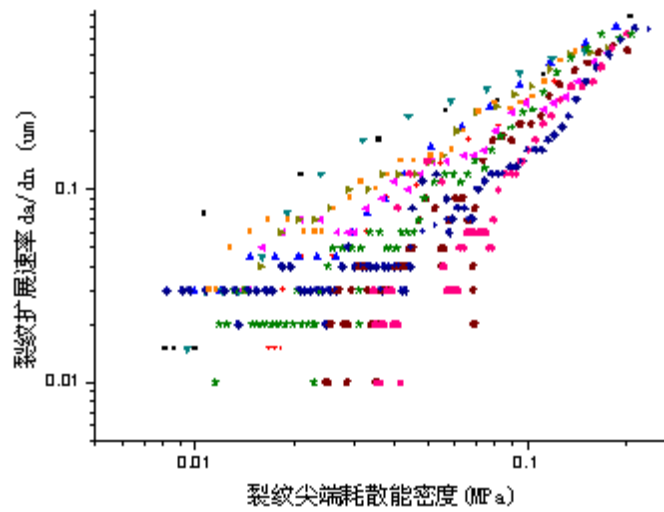


图 5 GH4169 室温疲劳裂纹扩展速率的 $\frac{da}{dN}-w_d$ 曲线

Fig. 5 The curve of $\frac{da}{dN}-w_d$ of GH4169 at room temperature

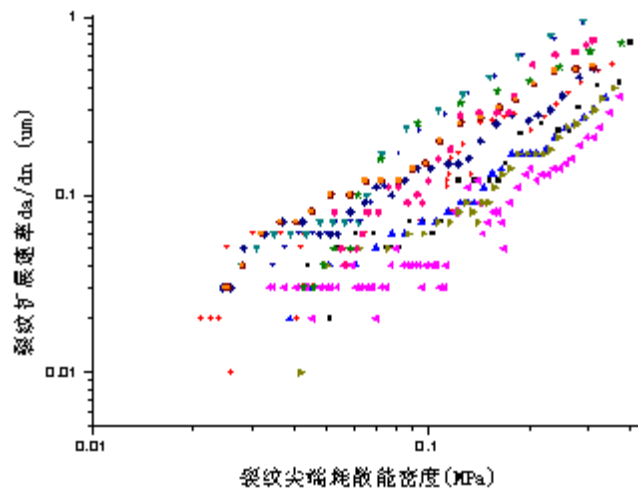


图 6 450°C 下 GH4169 疲劳裂纹扩展速率的 $\frac{da}{dN}-w_d$ 曲线

Fig. 6 The curve of $\frac{da}{dN}-w_d$ of GH4169 at 450°C

按照式(3)对曲线进行拟合,可以得到 GH4169 材料室温和 450°C 的裂纹扩展速率计算公式 $\frac{da}{dN}=A(w_d)^m$ 的参数结果和误差:

表 1 裂纹扩展速率计算公式的拟合结果

Tab. 1 Fitting results of crack propagation formula

温度	A	m
室温	3.956 ± 1.056	1.168 ± 0.132
450°C	4.732 ± 2.754	1.268 ± 0.245

4 结论和讨论

从以上结果可以看出,疲劳裂纹扩展速率与裂纹尖端耗散能密度具有一定的相关性,总体趋势与

式(3)一致。450℃的情况较室温情况有较大的分散性,主要有两个原因:首先因为温度的影响,试件表面的气体流动影响了图像的清晰度,从而使表面裂纹长度的读取存在较大误差;另外,高温环境下耗散能密度的测量结果(见图2)有一定的分散性。这两个原因导致高温下疲劳裂纹扩展速率与裂纹尖端耗散能密度的关系曲线的分散性较大。但是从单个试验样品的数据来看,疲劳裂纹扩展速率与裂纹尖端耗散能密度的关系能比较符合式(3)的趋势。

致谢: 感谢中航一集团对本研究的资助。

参考文献:

- [1] Paris P C, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85: 528—534.
- [2] 洪友士,方彪. 疲劳短裂纹萌生及发展的细观过程和理论[J]. 力学进展,1993,23(4): 468—485 (Hong Youshi, Fang Biao. Microscopic Process And Description For The Initiation And Propagation Of Short Fatigue Cracks[J]. Advances in Mechanics, 1993,23(4): 468—485(in Chinese))
- [3] Dowling N E. Fatigue failure predictions for complicated stress-strain histories[J]. Journal of Materials, 1972, 7: 71—87.
- [4] Dowling N E. Fatigue crack growth during gross plasticity and the J-integral. In Mechanics of Crack Growth[M]. Special Technical Publication, 1976.
- [5] Feltner C E, Morrow J D. Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture[J]. J Basic Engineering ASME, 1961, March:15—22.
- [6] Lin X, Haicheng G. Plastic energy dissipation model for lifetime prediction of zirconium and zircaloy-4 fatigued at RT and 400℃[J]. J Engng Material Technol ASME, 1998,120:114—118.
- [7] Golos' K, Ellyin F. A total strain energy density theory for cumulative fatigue damage[J]. J Pressure Vessel Technology ASME, 1988,110:36—41.
- [8] Kujawski D, Ellyin F. A cumulative damage theory for fatigue crack initiation and propagation[J]. Int J Fatigue, 1984, 6:83—88.

On the Fatigue Crack Propagation Based on Dissipated Energy Density

LEI Dong¹, ZHAO Jian-hua^{1,2}, YU Duo-kui³

(1. Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Hefei 230027, China; 2. Laboratory for Mechanical Behaviour and Design of Materials of University of Science and Technology of China of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230027, China; 3. Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In the fatigue crack propagation process, the dissipated energy on crack tip determines the capability of fatigue crack propagation. Dissipated energy density is a characteristic parameter describing material fatigue performance. The fatigue crack propagation study will have more significance based on dissipated energy density. The curve between dissipated energy density of Ni-based alloy GH4169 and controlling stress amplitude was experimentally measured at room temperature and 450℃ respectively. According to the form of Paris equation, fatigue crack propagation equation was established based on dissipated energy density. Experiments were carried out to verify the relation between fatigue crack propagation rate and dissipated energy density for GH4169 at room temperature and 450℃ respectively. The trend of experimental results agrees with proposed equation in a whole.

Keywords: fatigue crack; dissipated energy density; crack propagation equation