

一种基于材料延性耗散模型的 疲劳损伤研究方法

程光旭 楼志文 匡震邦

(西安交通大学, 西安 710049)

摘要 本文从疲劳损伤导致材料延性下降这一事实出发, 采用疲劳损伤延展性耗散模型, 对低周疲劳定义了一种新的损伤变量, 并进行了实验测量研究. 结果表明, 新损伤变量具有明确的物理意义, 测定方法简单, 能直接与材料机械性能相联系.

关键词 低周疲劳, 损伤力学, 损伤测量, 材料延性, 研究方法

1. 引言

损伤力学研究中, 建立损伤理论的第一步, 就是要定义一个可以描述物体损伤演变的参量即损伤变量. 作为描述材料损伤状态的损伤变量, 应既能反映材料的损伤机理, 又能对损伤过程的宏观表现比较敏感, 便于实验测定和工程分析使用. 目前常用的损伤测量方法有, 弹性模量法、显微硬度法、循环塑性响应法和电位法等^[1]. 就应用较多的弹性模量(E)下降法而言, E只在循环最初几十周和最终阶段两个极端情况下变化较大, 而在稳定循环阶段变化并不明显^[2]. 我们认为, 在最初循环中, 材料处于不稳定状态, 由于受位错可逆运动和位错增殖相关的微塑性影响, E有所下降, 但这时材料并未发生真正的损伤. 在最后循环阶段, 循环滞回环形状发生了明显的变化, 此时对应着在试样中已形成宏观裂纹. 其次, E是在卸载过程中立即测量的, 而实验发现, 有些材料经时效后E有所恢复^[3], 这与损伤是一个不可逆过程的基本原理相矛盾. 电位法是一种间接测量, 无直接物理意义. 循环塑性响应法, 是在幂强化规律前提下的一种测量方法, 与材料性质有关. 因此, 作者认为, 就疲劳损伤而言, 研究具有明确物理意义, 又便于实验测量的损伤变量仍具有特殊重要意义.

2. 疲劳损伤现象的一种实验观察方法和现象分析

大量的实验研究结果表明, 单调拉伸的实验数据, 在疲劳问题研究中有重要作用, 其中特别是断面收缩率 ψ 和断裂延性 ϵ_f , 且有,

$$\epsilon_f = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right) \quad (1)$$

ψ 和 ϵ_f 与材料的微观属性有很大关系, 在均匀变形阶段, 断面收缩率 ψ_b 主要取决于基体的状态, 它既表示基体相的强化程度, 也表示材料的延性. 颈缩变形阶段的断面收缩

本文于1992年11月2日收到第一稿, 于1993年2月15日收到修改稿.

率 ψ_u 代表金属局部塑性变形能力的大小,它不仅取决于基体金属的极限塑性,同时受第二相的影响,即 $\psi = \psi_b + \psi_u$. 因而, ψ 和 ε_f 能在总体上反映材料的固有延性. 如图 1 所示,循环载荷作用造成材料延性耗散,当材料所具有的延性全部耗尽时,便达到材料临界损伤状态即疲劳损伤寿命,这就是疲劳损伤延性耗散模型.

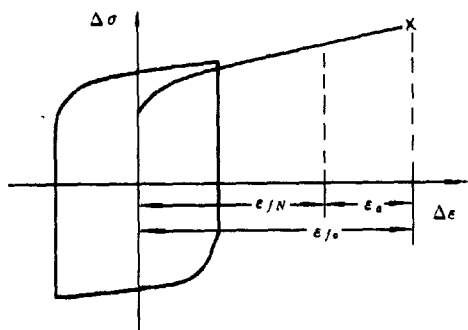
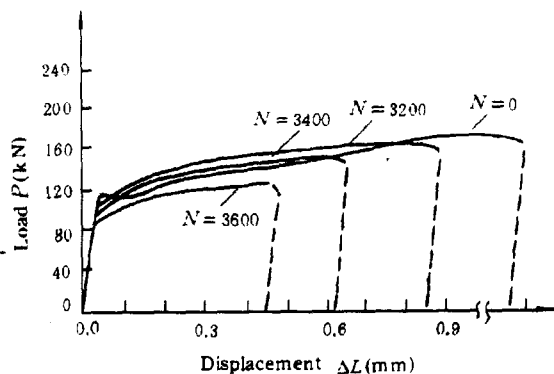


图 1 循环延性耗散模型

Fig. 1 Cyclic ductile dissipation model

图 2 损伤对材料 $P-\Delta L$ 曲线的影响Fig. 2 The influence of damage on $P-\Delta L$ curves of the material

疲劳损伤实验选用我国常用的 16MnR 压力容器用钢,它的屈服强度 $\sigma_s = 385\text{MPa}$, 极限强度 $\sigma_b = 588\text{MPa}$. 实验分两组进行,一组是将试样直接单调拉伸,测出断面直径 d_f ; 另一组先将试样经受不同周次循环载荷的作用,然后分别进行单调拉伸. 拉伸过程中记录载荷-位移曲线,并测出断面直径 d_{Df} . 两组实验均采用圆形试棒(直径 $\Phi 6.0\text{mm}$). 疲劳循环加载在 INSTRON1341 液压伺服疲劳试验机上进行,采用轴向加载,恒定总应变幅控制,应变幅为 0.669%,应变速率 0.0161/s. 损伤材料的单调拉伸载荷-位移曲线特征如图 2 所示,可以看出,经一定周次循环后,材料屈服现象消失,延展性下降,相应的断面收缩率 ψ 和断裂延性 ε_f 减小. 文献 [4] 也有类似的实验现象.

为了从损伤微观机理方面分析延性耗散现象,对试样断口进行扫描电子显微镜微观分析. 图版 I 照片 1 是试样经受不同循环周次后,再经拉伸所得断口照片. 对于 $N = 0$ 试样,材料具有良好的延性,断口上出现许多微孔洞和韧窝,它的断裂过程是通过微孔的萌生和随后的长大、聚合而导致的韧性断裂. 对 $N = 3200$ 周次循环作用的试样,韧窝小而且浅,说明材料延性已经降低. 对于 $N = 3400$ 周的试样,微裂纹以小解理平面逐渐过渡到撕裂棱的准解理方式形成,说明基体延性进一步耗散,材料塑性已经较差. 对于循环载荷作用更多的 $N = 3600$ 用试样,由于材料延性已基本耗尽,微观上表现出脆性断裂的特征. 微观分析证实了循环载荷对材料延性耗散的内在原因,为采用延性耗散模型定义损伤变量提供了物理基础.

3. 一种新的损伤变量定义

根据损伤变量的广义概念,任何一种可测的,随循环加载过程的进行呈单调变化趋势的状态量都可以作为疲劳损伤的度量. 作者认为,从疲劳损伤的材料延展性耗散模型出发,

可以采用疲劳延展性 ε_f 来定义损伤变量 D , 即

$$D = \frac{\varepsilon_{f0} - \varepsilon_{fN}}{\varepsilon_{f0}} \quad (2)$$

式中 ε_{f0} 为材料未经循环作用时的断裂延性, ε_{fN} 为经受 N 次循环载荷作用后的断裂延性, 由 (1) 式可以把上式改写成:

$$D = 1 - \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right)}{\ln\left(\frac{1}{1-\psi_0}\right)} \quad (3)$$

其中, ψ_0 为材料未经循环载荷作用时的断面收缩率, $\bar{\psi}$ 为经过 N 次循环载荷作用, 有一定程度损伤后的断面收缩率. 由 (3) 式可知, 材料无损伤时, $\bar{\psi} = \psi_0$, 则 $D = 0$; 材料完全损伤时, 延性耗竭, $\bar{\psi} = 0$, 此时 $D = 1$.

4. 损伤演化规律

本实验测得损伤演化规律如图 3 所示, 采用 Chaboche 的非线性疲劳损伤模型可知^[5],

$$dD^* = [1 - (1 - D^*)^{\beta+1}]^{\alpha(\sigma_m, \bar{\sigma})} \left[\frac{\sigma_m - \bar{\sigma}}{M(\bar{\sigma})(1 - D)} \right]^{\beta} dN$$

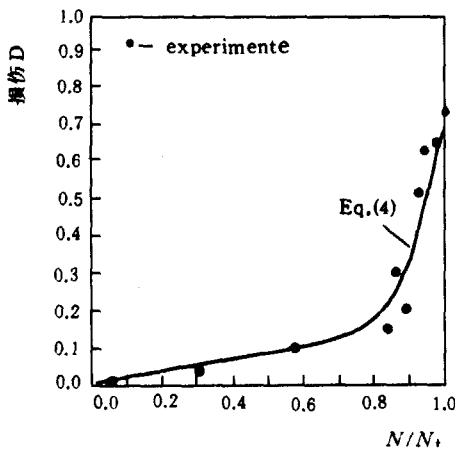


图 3 损伤演化曲线

Fig. 3 Damage evolution curve

式中 σ_m 和 $\bar{\sigma}$ 分别为最大应力和平均应力, α 和 β 为实验常数, 由本实验导出的损伤演化规律为:

$$D = D_c \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \right]^{\frac{1}{1+\beta}} \right\} \\ = 0.707 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_f} \right)^{2.957} \right]^{0.582} \right\} \quad (4)$$

5. 结 论

本文从循环载荷会造成材料延性耗散这一实验现象入手, 通过疲劳损伤实验, 定义了一种新的损伤变量. 该损伤变量能直接与材料机械性能相联系, 尤其适用于低周疲劳损伤的研究.

参 考 文 献

- [1] 楼志文. 损伤力学基础. 西安交通大学出版社, 1991
- [2] Lemaitre J. How to use damage Mechanics. Nuclear Engineering and Design, 1984,80(2):233-245
- [3] 俞立刚. 塑性变形中的两种损伤, 华中理工大学学报. 1988,16(2):131-137
- [4] 李细广, 琚定一. 疲劳损伤临界值和疲劳寿命, 疲劳损伤理论研讨会论文集, 洛阳: 1992年5月, 104-108
- [5] Chaboche J L and Lesne P M A non-Linear continuous fatigue damage model. Fatigue Fract. Engnt. Mater. Struct. 1988,11(1):1-17

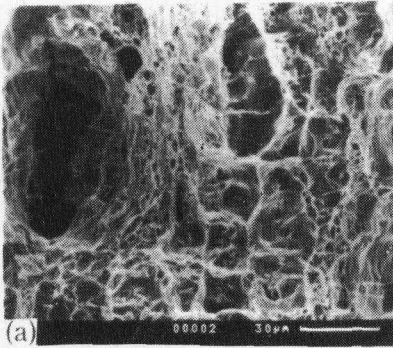
A RESEARCH APPROACH BASED ON THE EXHAUSTION MODEL OF MATERIAL DUCTILITY FOR FATIGUE DAMAGE

Cheng Guangxu, Lou Zhiwen and Kuang Zhenbang

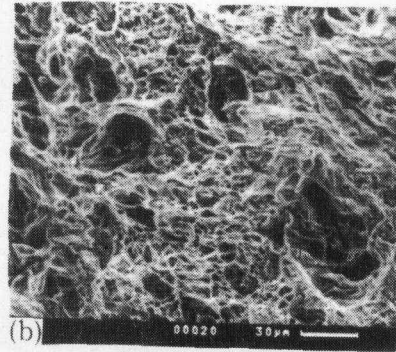
(*Xi'an Jiaotong University, Xian 710049, China*)

Abstract Considering the fact that the material ductility may be decreased in cycle fatigue process, a new damage variable based on the exhaustion model of material ductility is defined for low-cycle fatigue, and measured experimentally. It is shown that this damage variable has a definite physical meaning and can be measured by a simple procedure. The relationship between the damage variable and mechanical property of material is established.

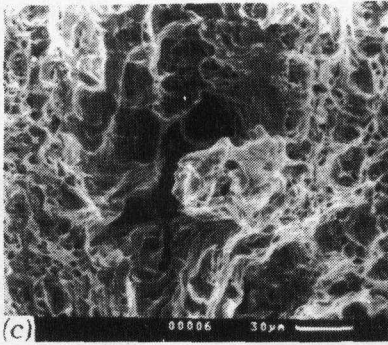
Key words Low-cycle fatigue, Damage mechanics, Damage measurement, Material ductility, Research approach



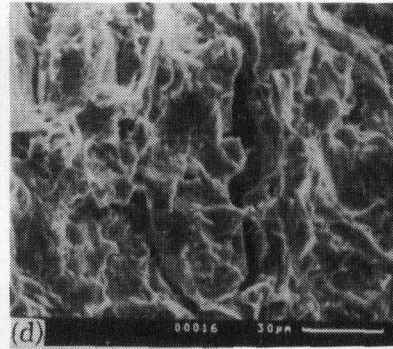
(a) $N=0, D=0.0$



(b) $N=3200, D=0.246$



(c) $N=3400, D=0.566$



(d) $N=3600, D=0.707$

图版 I 照片 1 扫描电镜断口分析照片
Photo 1 Fractographs by SEM