第21卷 第4期 武 汉 化 工 学 院 学 报 Vol 21 No. 4
1999年12月 JOURNAL OF WUHAN INSTITUTE OF CHEMICAL TECHNOLOGY Dec 1999

测定临界破坏损伤变量的扭转实验法

黄志强 刘春晖
(武汉化工学院机械工程系, 武汉 430073)

摘 要 在Lemaitre损伤演变规律基础上, 对各向同性硬化材料临界破坏损伤变量进行了研究。利用材料扭转实验的最大扭矩, 结合材料单向拉伸的损伤起始应变门槛值与临界破坏应变的比值, 推得测定该材料临界破坏损伤变量的扭转实验的一般测定公式

关键词 损伤; 损伤变量; 扭转实验
分类号 O 346. 5

0 引 言

材料的损伤通常具有两大类型: 由微裂纹萌生与扩展的脆性损伤和由微孔洞的形核, 长大到聚合的韧性损伤 D. Krajcinovic 建议从几何上把微缺陷分为线缺陷, 面缺陷和体缺陷 线缺陷的发展属微观尺度上材料结构的重排列, 与初始的塑性变形一致 而面缺陷和体缺陷的产生, 发展到聚合将引起原子键的逐渐失效, 往往伴随着非线性的弹性变形, 这是目前损伤分析的重要内容之一[1].

损伤变量较早出现在疲劳和蠕变断裂的研究中, 实验表明: 对于一般的塑性材料弹性模量的变化与原子键的失效相关联, 这种失效机制在宏观上由单轴拉伸实验的应力应变关系曲线的卸载曲线响应反映出来

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \tag{1}$$

式中D 是损伤变量, E 和 $\tilde{E}$ 分别为材料的无损和有效弹性模量 当$D = 0$时, 材料无损伤; 当$D = D_c$时(D_c 为材料的临界破坏损伤变量, 其值在 $0< D_c< 1$, 材料体元破坏[2].

损伤变量的测定通常有以下方法: 质量密度法, 电阻测量法, 弹性模量法, 弹性应变法, 低周疲劳的塑性应变法和粘性蠕变的应变法等 然而在静态加载时用弹性应变法和弹性模量法测量时, 要经过多次卸载来完成, 特别是在临界破坏状态下测量是不方便或是难以实现的 临界破坏损伤变量作为衡量材料强度的重要指标, 采用扭转实验法可方便地决定之

1 损伤演化方程

对于损伤材料的Ramberg-Osgood 硬化律表达式为

$$\frac{\sigma_{eq}}{1 - D} = K P^{\frac{1}{M}} \tag{2}$$

式中, σ_{eq}为等效应力; P 为累积等效塑性应变; K 为材料参数; M 为材料的硬化指数 一般金属材料在损伤过程中变形较大, 硬化指数往往很大 (理想塑性材料$M = \infty$), 由文献[1]的

收稿日期: 1999-03-12
黄志强: 男, 1963年4月生, 硕士, 讲师

研究有

$$D=\begin{cases} D_c\dfrac{P-P_D}{P_R-P_D} & 当\ P\geq P_D\ 时 \\ 0 & 当\ P<P_D\ 时 \end{cases} \tag{3}$$

式中 P_D 和 P_R 分别是累积塑性应变损伤门槛值和断裂累积塑性应变值 若 P_D/P_D 与三轴应力比无关, 则单向拉伸和纯剪切时式(3) 分别为下面的式(4) 和式(5), 即

$$D=\begin{cases} D_c\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_D}{\varepsilon_R-\varepsilon_D} & 当\ \varepsilon\geq\varepsilon_D\ 时 \\ 0 & 当\ \varepsilon<\varepsilon_D\ 时 \end{cases} \tag{4}$$

$$D=\begin{cases} D_c\dfrac{\gamma-\gamma_D}{\gamma_R-\gamma_D} & 当\ \gamma\geq\gamma_D\ 时 \\ 0 & 当\ \gamma<\gamma_D\ 时 \end{cases} \tag{5}$$

式中为 ε 线应变, γ 为剪应变, ε_D 和 ε_R 分别是单向拉伸时损伤应变门槛值和断裂应变值, γ_D 和 γ_R 分别是纯剪切时损伤剪应变门槛值和断裂剪应变值

2 纯剪切应力应变关系

纯剪切情况下, $P=\gamma/\sqrt{3}$, $\sigma_{eq}=\sqrt{3}\tau$, τ 是剪应力, 代入到式(2) 有

$$\frac{\sqrt{3}\tau}{1-D}=K\left(\frac{\gamma}{\sqrt{3}}\right)^{\frac{1}{M}} \tag{6}$$

此式即为受损材料的剪应力剪应变关系

3 圆轴扭转

半径为 R 的圆轴受扭矩 T 作用, 当扭矩达到最大值 T_b 时, 圆轴表面剪应力为极限值 γ_R, 此时由刚性平面假设, 径距为 $\rho(0\leq\rho\leq R)$ 处的剪应变为

$$\gamma=\gamma_R\frac{\rho}{R} \tag{7}$$

且最大扭矩为

$$T_b=\int_0 \tau 2\pi\rho^2 \mathrm{d}\rho \tag{8}$$

当 $\gamma\geq\gamma_D$ 时, 材料才出现损伤, 因此在圆轴中心有一无损核存在 若无损核半径是 R_D, 且在 P_D/P_R 与三轴应力比无关的情况下有

$$\frac{R_D}{R}=\frac{\gamma_D}{\gamma_R}=\frac{P_D}{P_R}=\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_R} \tag{9}$$

把式(5)、(6)、(7) 代入式(8), 同时考虑无损核的影响推得

$$T_b=K\frac{4W_n}{\sqrt{3}}\left(\frac{\gamma_R}{\sqrt{3}}\right)^{\frac{1}{M}}\left[\frac{1}{\frac{1}{M}+3}-\frac{D_c\mu}{\frac{1}{M}+4}\right] \tag{10}$$

式中 μ 是损伤门槛值影响系数, 即

$$\mu=\frac{1}{1-\frac{R_D}{R}}\left[1-\left(\frac{R_D}{R}\right)^{\frac{1}{M}+4}-\frac{R_D}{R}\frac{\frac{1}{M}+4}{\frac{1}{M}+3}\left[1-\left(\frac{R_D}{R}\right)^{\frac{1}{M}+3}\right]\right] \tag{11}$$

参考文献[1], 在三轴应力下的断裂应变为

$$P_R = \varepsilon_R\left[\frac{2}{3}(1+\nu)+3(1-2\nu)\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)^2\right]^{S_0} \tag{12}$$

式中 σ_m 为平均应力, ν 为泊松比, S_0 为材料参数, 则纯剪切情况时 $\sigma_m = 0$, 此时

$$\frac{\gamma_R}{\sqrt{3}} = \varepsilon_R\left[\frac{2}{3}(1+\nu)\right]^{S_0} \tag{13}$$

由于单向拉伸时 $\varepsilon_R = \left[\frac{\sigma_b}{(1-D_c)K}\right]^M$, σ_b 是材料的强度极限 则式 · 为

$$\frac{\gamma_R}{\sqrt{3}} = \left[\frac{\sigma_b}{(1-D_c)K}\right]^M\left[\frac{2}{3}(1+\nu)\right]^{S_0} \tag{14}$$

把式(14)带入式(10)得

$$T_b = \frac{4W_n}{1-D_c}\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}\left[\frac{2}{3}(1+\nu)\right]^{\frac{S_0}{M}}\left[\frac{1}{\frac{1}{M}+3}-\frac{D_c\mu}{\frac{1}{M}+4}\right] \tag{15}$$

4　损伤门槛值影响系数分析

式(15)中对于材料系数$\left[\frac{2}{3}(1+\nu)\right]^{\frac{S_0}{M}}$, 在金属大变形时, S_0 是 1 的量级, 由于M 较大, $\frac{S_0}{M}$ 接近于 0, 因而$\left[\frac{2}{3}(1+\nu)\right]^{\frac{S_0}{M}}$与 1 非常接近(例如$\left[\frac{2}{3}(1+0.33)\right]^{0.2} = 0.98$). 下面对影响系数 μ 进行分析

由于 $R_D/R = \varepsilon_D/\varepsilon_R$, 参考文献[1], 在表 1 中, 除钢 E24 外, 大多数材料有

$$\left(\frac{R_D}{R}\right)^{\frac{1}{M}+4},\left(\frac{R_D}{R}\right)^{\frac{1}{M}+3} < 1$$

则式(11)简化为

$$\mu = 1-\frac{1}{\frac{1}{M}+3}\frac{R_D/R}{1-\frac{R_D}{R}} = 1-\frac{1}{\frac{1}{M}+3}\frac{\varepsilon_D/\varepsilon_R}{1-\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_R}} \tag{16}$$

由于$M > 1$, 因此 $1 \geq K \geq K_1$, 其中

$$K_1 = 1-\frac{1}{3}\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_R}\Bigg/\left(1-\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_R}\right)$$

如表 1 所示, 大多数材料的 $K \approx 1$.

5　临界损伤变量的确定

在式(15)中, 令 $\Omega = \frac{3}{4}\frac{T_b}{W_n}\frac{\sqrt{3}}{\sigma_b}$, 由于$\left[\frac{2}{3}(1+\nu)\right]^{\frac{S_0}{M}} \approx 1$, 则有

$$D_c = \frac{\left(\frac{1}{4M}+1\right)\left[\left(\frac{1}{3M}+1\right)\Omega-1\right]}{\left(\frac{1}{3M}+1\right)\left[\left(\frac{1}{4M}+1\right)\Omega-\frac{3}{4}K\right]} \tag{17}$$

当M 较大时, $\frac{1}{4M}+1$, $\frac{1}{3M}+1 \approx 1$, 因此

$$D_c = \frac{\Omega-1}{\Omega-\frac{3}{4}K} \tag{18}$$

表 1 中除铜 99.9% 外, 其他金属的 D_c 在 0.22～0.35 之间. 笔者对低碳钢圆柱试样进行测试, 其中 D_c 在 0.27～0.32 之间.

表 1　几种金属材料的 ε_D, ε_R, K_1, D_c 值

材　　料	ε_D	ε_R	$\varepsilon_D/\varepsilon_R$	K_1	D_c
铜 99.9%	0.35	1.04	0.34	0.83	0.85
合金 INCO718	0.02	0.29	0.07	0.97	0.24
钢 E24	0.5	0.88	0.57	/	0.34
铝 XC38	0	0.56	0	1	0.22
钢 30CD4	0.02	0.37	0.05	0.98	0.24
铝合金 AU4G1	0.02	0.25	0.08	0.97	0.23
合金 2024	0.03	0.25	0.12	0.95	0.23
低碳钢	0.02	0.43	0.05	0.98	0.27～0.32

参　考　文　献

1　沈　为. 损伤力学. 武汉: 华中理式大学出版社, 1995. 135～145

2　Lematre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. J Eng mat and Tech. 1985, (107): 83～89

The tortion experiment for determining critical rupture damage variable

Huang Zhiqiang　Liu Chunhui

(Department of Mechanical Engineering, Wuhan Institute of Chemical Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract　The critical rupture damage variable for isotropic harden material is studied on basis of the Lemaitre law of damage evolution. The general determination formula of tortion experiment for the critical rupture damage variable is obtained with the maximal torque of torsion experiment and the rate of the damage threshold of strain with the critical rupture strain under uniaxial tensile.

Key words　damage; damage variable; torsion experiment

本文编辑: 陈小平