

I 型裂纹尖端塑性应变变化规律的实验研究*

洪宝宁 赵维炳

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 借助扫描电镜 (SEM) 获得加载过程中 I 型裂纹尖端失稳前包含变形信息的形貌图 ; 由数字图像处理技术得到各时刻对应的塑性应变 , 利用统计分析手段拟合出测量区域塑性应变的变化规律, 即 $\bar{\epsilon}_p = A \ln P - 13$.
关键词 实验 ; I 型裂纹 塑性应变
中图号 O346.12

50 年代以来建立并得到迅速发展的断裂力学, 在定量分析和评价工程材料寿命与结构安全使用条件等方面起到了积极作用. 然而, 作为理论研究进一步深入和完善的依据, 裂纹尖端附近应力应变的实验分析仍是一项必不可少的基础性工作. 研究表明^[1,2] 断裂是材料细观结构不断变化的过程, 细观结构的变化将会引起材料力学性质的改变, 从而影响着材料的力学行为 ; 另一方面, 随着载荷增加所伴随的力学状态改变对细观结构的变化率也有影响. 因此, 通过细观实验研究裂尖塑性变形随载荷增加变化的规律, 对了解细观结构变化、材料力学性能改变与载荷增加之间的复杂关系有着积极的作用. 本文提出一种测量 I 型裂纹尖端细观塑性应变变化的实验方法, 并对测量区域塑性应变随载荷增加的变化规律进行了统计分析.

1 实验设备和实验步骤

1.1 试样、加载和记录

试样选用厚为 0.5 mm (牌号 QS_n7—02) 的青铜箔材料, 由线切割制成拉伸试样, 预制穿透 I 型裂纹 (1 mm × 0.05 mm) 由 YAG 激光器完成. 该激光器由计算机控制, 从而保证了试样裂纹几何尺寸的相对一致性 ; 另外, 预制裂纹过程中影响区域较小, 减少了对试样的初始损伤. 试样的几何尺寸和形状如图 1 所示.

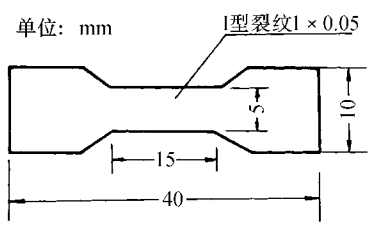


图 1 试样的几何尺寸和形状
Fig.1 Size and shape of specimen

加载在与 SEM 配套的 S—6552 样品拉伸台上实现. S—6552 样品拉伸台通过调节外部旋钮 (移动和转动) 控制试样的位置, 以得到最佳的观测视角. 通过加载旋钮将拉伸载荷加到真空室内的试样上. 为了提高测量精度和稳定性, 通过自制位移传感器确定载荷的大小. 位移传感器由宽 6 mm、厚 0.3 mm 弯成直径 30 mm 半圆形的铍青铜薄片和贴在半圆中部位位置构成惠斯登全桥的 4 片应变片组成, 由千分表标定.

记录设备包括 X—650 扫描电镜 SEM (记录显微图像), S—6552 样品拉伸测角台及其配套设备 AA3004 直流放大器与应变仪 (记录宏观力学量), 计算机数字图像处理系统 (记录细观力学量).

1.2 实验步骤

- a. 对试样进行前处理, 即首先将试样表面用金相砂纸砂平, 再用绒布或电解抛光, 然后用氢氟酸稀释液腐蚀试样表面, 以增加显微图像的细节, 提高显微图像的清晰度.
- b. 前处理完成后, 将试样装置到拉伸台上放入 SEM 样品室内, 通过外部旋钮将试样调整到最佳观测视角位置, 并使所有的外部记录仪器处于待工作状态.
- c. 通过载荷旋钮加载, 并按所需的载荷增量间隔记录受载过程中裂尖指定区域的显微图像序列, 由应变

收稿日期 :1997-10-06
第一作者简介 :洪宝宁,男,博士后,岩土工程专业,主要从事实验力学、岩土工程及数值计算方法研究.
* 江苏省自然科学基金项目 (BK93047112) 的部分研究内容.

仪等记录对应的宏观力学量.为得到准静载下 I 型裂纹尖端区域塑性变形随载荷变化的规律,在裂纹失稳扩展前采样 7 次.

d.由计算机数字图像处理系统,将显微图像序列转化为数字图像序列,而后通过数字图像处理技术计算各时刻对应的相对变形位移,进而得到相应的塑性应变值.

1.3 数据处理

a.为了得到准确的实验数据,采样过程中应尽量减少人为产生的刚体转动,以提高图像的识别率.另外,控制采集时间间隔,使每段时间内产生的相对变形在可识别范围内.时间间隔的选择一般由实验的前期准备性工作完成.

b.运用数字图像处理技术解决测量问题.计算量都比较大.为了提高计算速度,在编制计算程序时采用:(a)变步长搜索法,即在搜索过程中设置多个相关系数阈值,通过改变搜索步长以减少搜索次数;(b)预测定位法,即根据前面点的位移情况预测下一点的估计位置,从而使搜索区域缩小;(c)标定计算中的几何尺寸.笔者采用 GBW—200A 螺旋式高精度(0.2 μm)位移标定器,通过处理图像刚体位移程序来实现.

2 计算公式和实验结果

设试样上有 A,B,C 三点,在两次采样间隔中,位移分量分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_A &= \Delta x_{Ad} + \Delta x_{Ag} & \Delta y_A &= \Delta y_{Ad} + \Delta y_{Ag} \\ \Delta x_B &= \Delta x_{Bd} + \Delta x_{Bg} & \Delta y_B &= \Delta y_{Bd} + \Delta y_{Bg} \\ \Delta x_C &= \Delta x_{Cd} + \Delta x_{Cg} & \Delta y_C &= \Delta y_{Cd} + \Delta y_{Cg} \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

式中 第 1 项表示变形位移 第 2 项表示刚体位移.若垂直于试样表面方向采样,则 AB 线段的相对变形位移为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{AB} &= \Delta x_{Bd} - \Delta x_{Ad} = \Delta x_B - \Delta x_A \\ \Delta y_{AB} &= \Delta y_{Bd} - \Delta y_{Ad} = \Delta y_B - \Delta y_A \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

AC 线段的相对变形位移为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{AC} &= \Delta x_{Cd} - \Delta x_{Ad} = \Delta x_C - \Delta x_A \\ \Delta y_{AC} &= \Delta y_{Cd} - \Delta y_{Ad} = \Delta y_C - \Delta y_A \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

若 AB 垂直于 AC,则 CAB 的相对变形转角为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta x_{Cd} - \Delta x_{Ad}}{AC}\right) + \arctan\left(\frac{\Delta y_{Bd} - \Delta y_{Ad}}{AB}\right) = \arctan\left(\frac{\Delta x_C - \Delta x_A}{AC}\right) + \arctan\left(\frac{\Delta y_B - \Delta y_A}{AB}\right) \tag{4}$$

利用上述公式可计算各采样载荷下对应的相对变形位移.表 1 是一试样距 I 型裂纹尖端 0.05 mm 区域,在宏观应变 $\epsilon = 4.0 \times 10^{-3}$ 、放大倍数 500 情况下,测量区域内(0.2 mm×0.2 mm)100 点(各点相距 30 个像素)相对变形位移的计算结果.该时刻试样的显微图如图 2 所示.

表 1 I 型裂纹尖端相对变形位移的计算结果

Table 1 Calculated result of relative displacement of crack tip I

7.0×10⁻⁴mm

x	y																			
	106		136		166		196		226		256		286		316		346		376	
	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy
106	0.7	-0.4	0.8	-0.3	0.6	-0.3	0.8	-0.4	0.9	-0.4	0.8	-0.3	1.0	-0.2	0.8	-0.4	0.5	-0.5	0.6	-0.3
136	0.7	-0.4	0.8	-0.5	0.8	-0.4	0.6	-0.3	0.8	-0.3	0.9	-0.4	1.1	-0.5	0.9	-0.2	0.7	-0.2	0.6	-0.4
166	0.5	-0.2	0.6	-0.4	0.7	-0.4	0.7	-0.3	0.8	-0.5	0.7	-0.2	0.9	-0.3	0.9	-0.3	0.8	-0.3	0.7	-0.2
196	0.6	-0.2	0.5	-0.2	0.9	-0.3	0.8	-0.2	0.9	-0.4	0.8	-0.5	0.8	-0.3	0.8	-0.2	0.7	-0.3	0.5	-0.4
226	0.5	-0.1	0.7	-0.3	0.9	-0.3	0.9	-0.3	0.9	-0.3	1.0	-0.4	0.8	-0.3	0.9	-0.3	0.9	-0.4	0.6	-0.3
256	0.3	-0.1	0.5	-0.3	0.7	-0.2	0.7	-0.4	0.7	-0.2	0.8	-0.3	1.0	-0.4	0.9	-0.3	1.0	-0.4	0.8	-0.3
286	0.4	-0.3	0.4	-0.2	0.6	-0.2	0.7	-0.3	0.9	-0.3	0.9	-0.2	0.9	-0.3	1.0	-0.2	0.9	-0.1	0.5	-0.1
316	0.3	-0.2	0.5	-0.3	0.8	-0.2	0.9	-0.1	0.7	-0.3	0.8	-0.2	1.2	-0.4	0.8	-0.3	0.9	-0.2	0.7	-0.1
346	0.5	-0.2	0.6	-0.2	0.9	-0.4	0.9	-0.3	0.6	-0.2	0.9	-0.3	1.0	-0.2	0.8	-0.2	0.8	-0.3	0.7	-0.2
376	0.5	-0.1	0.7	-0.1	0.7	-0.1	0.8	-0.2	0.8	-0.4	0.9	-0.3	0.8	-0.2	0.7	-0.3	0.8	-0.3	0.6	-0.2

若仍按宏观应变定义方法计算微区应变,则在两次采样间隔中,A 点的应变增量可由下式计算:

$$\left. \begin{aligned}\epsilon_{xx} &= \frac{\Delta x_{Bd} - \Delta x_{Ad}}{AB} = \frac{\Delta x_B - \Delta x_A}{AB} \\ \epsilon_{yy} &= \frac{\Delta y_{Cd} - \Delta y_{Ad}}{AC} = \frac{\Delta y_C - \Delta y_A}{AC} \\ \epsilon_{xy} &= \frac{\Delta x_{Cd} - \Delta x_{Ad}}{AC} + \frac{\Delta y_{Bd} - \Delta y_{Ad}}{AB} = \frac{\Delta x_C - \Delta x_A}{AC} + \frac{\Delta y_B - \Delta y_A}{AB}\end{aligned}\right\}$$

(5)

从测量区域各点的应变分量来看,变化具有很大的随机性.这种随机性取决于材料细观结构.本文采用如下数据处理手段分析Ⅰ型裂纹尖端塑性应变与载荷增加的关系,即取等效塑性应变为

$$\epsilon_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{I_2'} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{1}{2} e_{ij} e_{ij}}$$

(6)

式中: I_2' ——偏应变的第2不变量; e_{ij} ——偏应变张量.考虑塑性变形的不可压缩性($\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = 0$)和平面应力状态,可得

$$I_2' = \epsilon_{xx}^2 + \epsilon_{yy}^2 + \epsilon_{xx}\epsilon_{yy} + \epsilon_{yy}^2$$

(7)

若忽略裂尖区域内的弹性变形,则测量区域内的平均等效塑性应变可根据下式计算获得.

$$\bar{\epsilon}_p = \left\langle \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\epsilon_{xx}^2)^k + (\epsilon_{xx}\epsilon_{yy})^k + (\epsilon_{yy}^2)^k + (\epsilon_{xy}^2)^k} \right\rangle$$

(8)

式中: $\langle \cdots \rangle$ ——集合平均值; $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$ 由(5)式计算.一试样在失稳扩展前采样7次,其测量区域(0.2 mm×0.2 mm)的平均等效塑性应变随载荷变化的计算结果如图3曲线(a)所示.



图2 $\epsilon = 4.0 \times 10^{-3}$ 时试样裂尖的显微图

Fig.2 Microscope graph of crack tip at $\epsilon = 4.0 \times 10^{-3}$

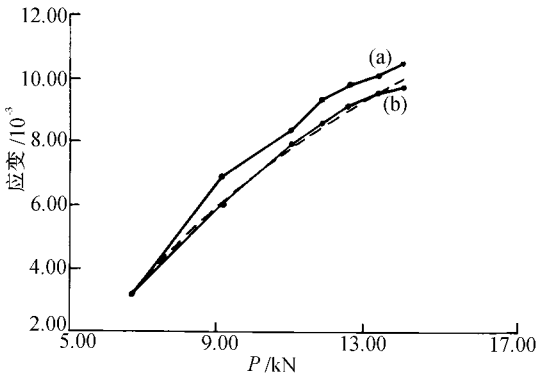


图3 平均等效塑性应变随载荷的变化

Fig.3 Change of average equivalent plasticity strain with load

3 塑性应变随载荷变化规律的统计分析

本研究共制作拉伸试样10根,在预制裂纹和实验记录等过程中损坏5根.对5根试样裂尖测量区域塑性应变,在各采样载荷下的平均等效塑性应变值进行了统计分析.宏观应变为 $\epsilon = 2.0 \times 10^{-3}$ 时的统计分析情况如表2所示.

表2 分布参数的估计值

Table 2 Estimated value of distributed parameters

试样编号	$\epsilon_p/10^{-3}$	$D(7,7,k)$	$C(7,7,k)$	$\ln \epsilon_{pk}$	$D \ln \epsilon_{pk}$	$C \ln \epsilon_{pk}$
3	3.764	0.0584	-0.1845	-5.5823	-0.3260	1.0299
5	4.346	0.1088	-0.1817	-5.4385	-0.5917	0.9882
2	6.125	0.1676	-0.1305	-5.0954	-0.8540	0.6649
1	6.917	0.2463	-0.0065	-4.9738	-1.2250	0.0323
4	7.542	0.4189	0.5031	-4.8873	-2.0473	-2.4588
总和					-5.0440	0.2565

注: $D(n,r,k), C(n,r,k)$ ——最佳线性无偏差估计系数; n ——样本数; r ——截尾数; k ——样本序号.

由表2可得该载荷下平均等效塑性应变分布参数 $\mu^* = -5.0440, \sigma^* = 0.2565$.

根据文献[3]中公式 $\tilde{\eta} = e^{\mu^*}$, $\tilde{m} = 1/\sigma^*$, 可得 $\tilde{\eta} = 6.4479 \times 10^{-3}$, $\tilde{m} = 3.8996$. 统计平均值为 $\tilde{\epsilon}_p = \tilde{\eta}\Gamma(1 + 1/\tilde{m}) = 6.0456 \times 10^{-3}$.

按同样的处理方法,可对宏观应变分为 $\epsilon = 1.0 \times 10^{-3}$, $\epsilon = 3.0 \times 10^{-3}$, $\epsilon = 4.0 \times 10^{-3}$, $\epsilon = 5.0 \times 10^{-3}$, $\epsilon = 6.0 \times 10^{-3}$, $\epsilon = 7.0 \times 10^{-3}$ 时的平均等效塑性应变值进行统计分析,从而得到各荷载对应下统计平均值. 统计平均值随载荷变化的情况如图 3 曲线(b)所示. 图中虚线表示拟合曲线,其方程为

$$\tilde{\epsilon}_p = A \times \ln(P/(10\text{ N})) - B$$

(9)

式中 : P ——拉伸载荷,10 N ; $A = 9.02269 \times 10^{-3}$; $B = 13.8855 \times 10^{-3}$.

4 结 束 语

裂纹扩展是一个动态过程,掌握裂尖塑性应变随载荷增加变化的实验数据,对断裂理论的深入研究十分有益. 本文提出了一种细观实验研究方法,并对实验数据处理进行了一些探索性的尝试. 然而,由于材料细观结构的随机性,致使实验结果有较大的离散性,因而本文在试样的数量和典型程度分析方面有欠缺,所得到的结论是否具有一般性仍需进行论证. 另外,通过细观实验手段得到的塑性区域内 $\tilde{\epsilon}_p$ 值与试样断裂分析、细观结构变化和材料力学性能改变的联系等也都有待于更进一步的研究.

参 考 文 献

1 哈宽富. 金属力学性能的微观理论. 北京 科学出版社,1983. 224 ~ 229

2 刘宝琛. 不同韧性金属扩展裂纹尖端 Gao-Hwang 奇异场的实验研究. 固体力学学报,1993,14(2) 67 ~ 74

3 戴树森,费鹤良,陈兆能. 可靠性试验及其统计分析 上册. 北京 国防工业出版社,1983. 157 ~ 165

Experimental Study on Law of Plastic Strain Change near Type-I Crack

Hong Baoning Zhao Weibing

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract With the help of Scanning Electric Mirror (SEM) and the technique of microscoscopic graph treatment, the plastic strain is calculated near type-I crack. The law of plastic strain change is discussed through statistical analysis.

Key words experiment ; type-I crack ; plastic strain