

利用全息双曝光法和有限元分析对 铝板裂纹尖端塑性流动状况的研究

许德刚 韩连元 沈亚鹏

(郑州工学院) (西安交通大学)

提要 本文利用全息双曝光法,连续观察和分析了在拉伸载荷作用下LF21铝板试件裂纹尖端塑性区的产生和扩展过程,并按表面塑性区的形状划分了三个不同阶段,同时利用有限元程序对此进行了计算,并将两者的结果进行了对比分析。

关键词: 裂纹, 塑性流动, 全息照像术

现在,全息干涉计量术已被广泛的应用于断裂力学测试中。由于弹塑性断裂力学较为复杂,很多重要问题用解析法还不能够完全解决,这就更突出了实验研究的重要性。例如:裂纹尖端的塑性流动问题是断裂力学的基本问题,是研究裂纹扩展机理的关键,全息术的应用对此问题的研究提供了很大方便,因为利用这种方法能连续地观察塑性区随载荷变化而变化的情况,以便于分析裂纹尖端塑性流动的规律。另外由于计算机的发展,使我们不仅能够利用有限元法顺利地解决弹性问题,也能够解决塑性大应变问题。本文正是利用这两种手段,通过实验和计算,观察和分析了LF21铝板试件裂纹尖端在拉载荷作用下材料的塑性流动过程。

1 实验研究

1.1 双曝光法实验原理简介:

把待测试件变形前后的几何形状分别记录于同一张全息底板上,当用原参考光再现时,两物光发生干涉,产生包含有变形信息的干涉条纹,由此可算出试件表面各点位移的大小和方向。

设 O_1 和 O_2 分别为第一次和第二次曝光时干板处的物光复振幅, R 为参考光复振幅,再现时透射光场为:

$$g(X, Y, Z) = \beta_1 [R(|O_1|^2 + |O_2|^2 + 2|R|^2) + R \cdot R(O_1^* + O_2^*) + |R|^2(O_1 + O_2)] \quad (1)$$

β_1 为记录介质常数,括号内最后一项为两物光波的迭加,含有变形信息,其光强可由

$$I = 4A^2 \cos^2 \frac{1}{2} K \Delta \quad (2)$$

其中 A 为常数, $K = 2\pi/\lambda$, λ 为光波波长, Δ 为变形前后的光程差,此式说明衍射物光受

余弦函数平方的调制而出现条纹,且

$$\begin{aligned}\Delta &= n\lambda, \quad n=0, \pm 1, & \cdots \cdots \text{亮条纹} \\ \Delta &= \left(\frac{1}{2} + n\right)\lambda, \quad n=0, \pm 1, & \cdots \cdots \text{暗条纹}\end{aligned}\quad (3)$$

设 \vec{d} 为物面上任一点的位移矢量, \vec{r}_1, \vec{r}_2 分别为光线入射方向和观察方向的单位矢量, 则: $\Delta = \vec{d} \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$

若用平行光线照明, 对于平板试件, 适当布置光路使入射线, 物面变形前的法线和观察线符合反射定律, 由上式知光程差仅和离面位移有关, 上式变为:

$$\Delta = 2d_2 \cos\theta \quad (4)$$

其中 d_2 为离面位移。将 (4) 式代入 (3) 式整理得:

$$\begin{aligned}d_2 &= \frac{n\lambda}{2\cos\theta} \quad n=0, \pm 1, \cdots & \cdots \text{亮条纹} \\ d_2 &= \frac{(2n+1)\lambda}{4\cos\theta} \quad n=0, \pm 1, & \cdots \text{暗条纹}\end{aligned}\quad (5)$$

由 (5) 式可计算平面试件上任一点的离面位移。

另外相邻条纹之间的相对离面位移量为:

$$\Delta d_2 = \lambda / 2\cos\theta$$

由此式看出, 调整 θ 值可改变实验的灵敏度。 d_2 梯度小可减少 θ 值以提高灵敏度, d_2 梯度大可加大 θ 值以便清晰的观察条纹。

对含有裂纹的薄板试件, 随载荷的增加, 在裂纹尖端附近出现明显的法向位移, 全息图

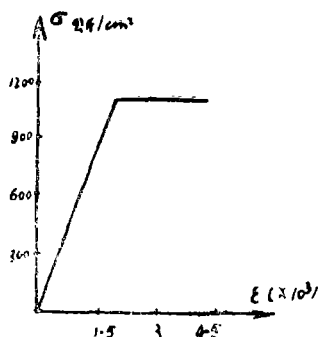


图1 材料拉伸图

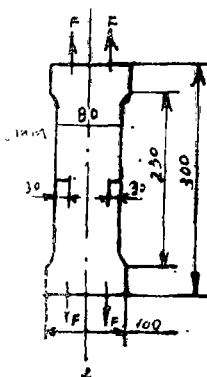


图2 试件尺寸图

上可看到反应此法向位移的特征变形区, 将此定义为塑性区。

1.2 实验准备:

试件由LF21铝合金制成, 材料简单拉伸曲线如图1所示, 屈服极限为1100kg/cm², 试件形状和尺寸如图2所示。裂纹尖端圆弧直径为0.1mm。将试件固定于隔振台上的加载装置上。照明采用4mW He—Ne激光器, 用天津I型干板记录。

1.3 实验过程:

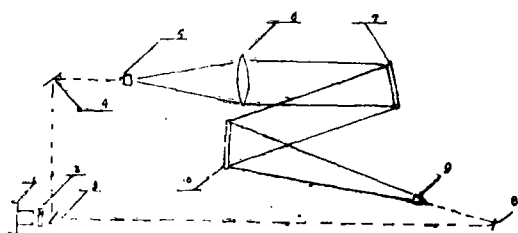


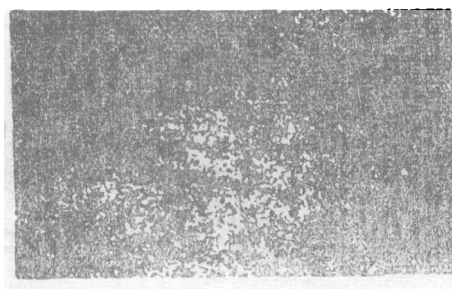
图3 1、激光器 2、快门 3、分光镜 4、反射镜 5、扩束镜
6、准直镜 7、物体 8、反射镜 9、扩束镜 10、干板

图3为实验光路简图, 照明入射角和观察角都采用 20° 。

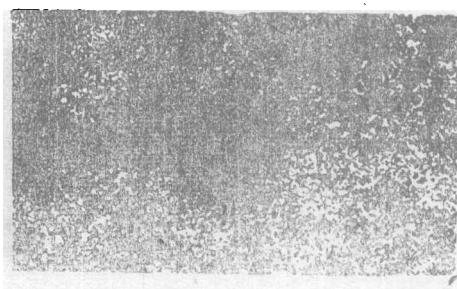
实验时先加预载100公斤, 然后边加载边拍摄全息图。加载间隔20公斤左右加载至试件断裂为止。

1.4 实验结果及分析:

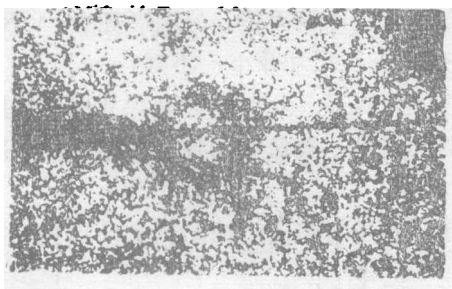
图4显示了裂纹尖端塑性区的扩展过程。通过观察分析可将此过程划分为三个阶段: (1) 等向扩展阶段, (2)



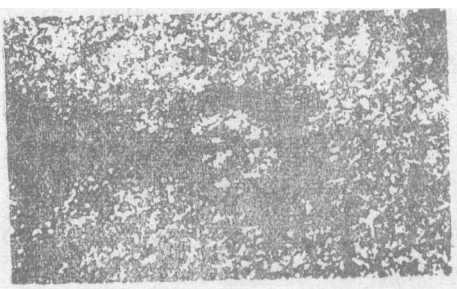
(1) $\sigma/\sigma_s=36\%$



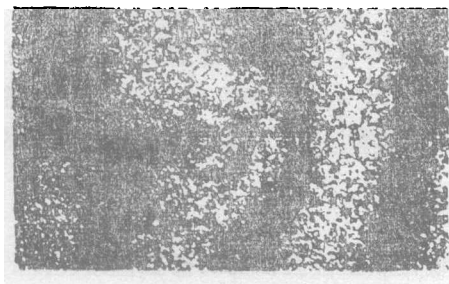
(2) $\sigma/\sigma_s=45\%$



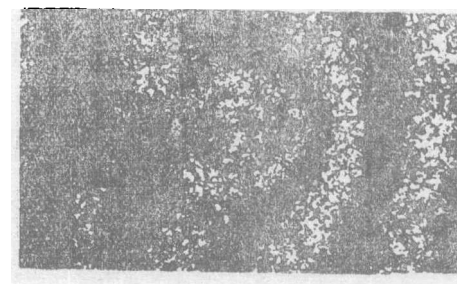
(3) $\sigma/\sigma_s=55\%$



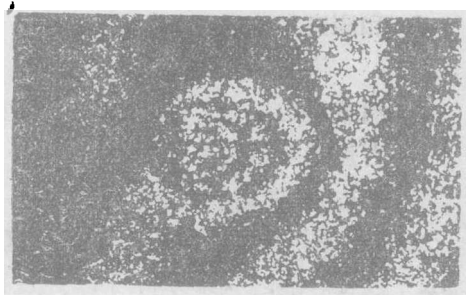
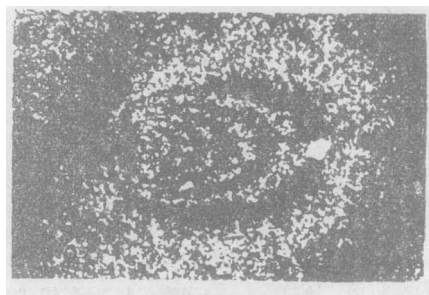
(4) $\sigma/\sigma_s=64\%$



(5) $\sigma/\sigma_s=73\%$



(6) $\sigma/\sigma_s=82\%$

(7) $\sigma/\sigma_s=91\%$ (8) $\sigma/\sigma_s=98\%$

过渡阶段, (3) 剪切滑移阶段。在每个阶段, 塑性区的扩展机制各不相同, 因而塑性区呈现不同的形状, 下面分别加以讨论。为方便起见, 第二阶段, 即过渡阶段, 将放在最后讨论。

1.4.1 等向扩展阶段——铰链形塑性区:

由图4—1至图4—5, 可以看出,

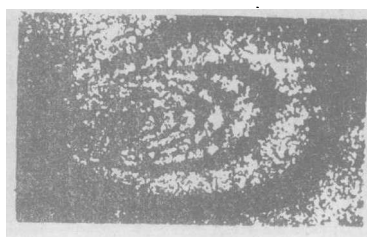
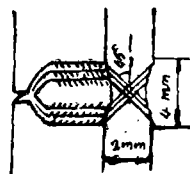
(9) $\sigma\sigma_s/=100\%$ 

图4裂纹尖端塑性区扩展过图 图5滑移简图

此时塑性区呈圆形, 等向扩展, 可称为圆塑性区或铰链形塑性区。

图4—1裂纹尖端的塑性区不太明显, 但在全息图上还比较清楚、呈圆形亮点, 尺寸为1mm多一些, 其实在 $\sigma/\sigma_s=30\%$ 时即可看到圆形亮点, 尺寸较小, 不到1mm。

图4—2塑性区处较暗, 中间有一亮点 (像片上不太明显) 此时塑性区尺寸已达板厚。

图4—3至图4—5塑性区较为明显, 全息图上更为清楚, 随载荷增加, 明暗相间的环状条纹一圈圈往外扩展, 如水面受扰动时的水纹。

在此阶段, 随载荷的增加, 裂纹尖端逐渐张开, 并开始塑性流动, 其流动趋势, 似以裂纹尖端为塑性源, 等向外流。

1.4.2 剪切滑移阶段——45° 剪切形塑性区

随载荷的增高, 当 σ/σ_s 超过90%时, 如图4—8和图4—9所示, 裂纹尖端条纹密集, 变形显著, 出现了较大的“颈缩”区, 此区域以外有一圈宽度较大的亮条纹和暗条纹, 说明“颈缩”区被弥散的变形较小的塑性区所包围, “颈缩”区的尺寸随载荷的增加在沿裂纹的方向上迅速扩展, 而在垂直于裂纹的方向上基本没有变化, “颈缩”区的宽度近似等于板厚的2倍, 显示了沿45° 斜面剪切滑移的变形特征, “颈缩”区正是剪切滑移的特征区, 其变形机制如图5所示。

1.4.3 过渡形塑性区

此种塑性区介于上述两种塑性区之间, 是由铰链形塑性区往剪切形塑性区过渡的一种形式, 其特点是: 随载荷增加, 塑性区沿各个方向都有扩展, 但沿裂纹方向扩展较快, 塑性区逐渐失去正圆形, 沿裂纹方向被拉长, 裂纹尖端条纹开始显密集状, 说明此时两种变形机制同时在起作用。见图4—(6) 和图4—(7)。

2 有限元计算

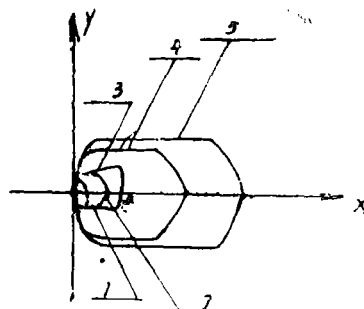
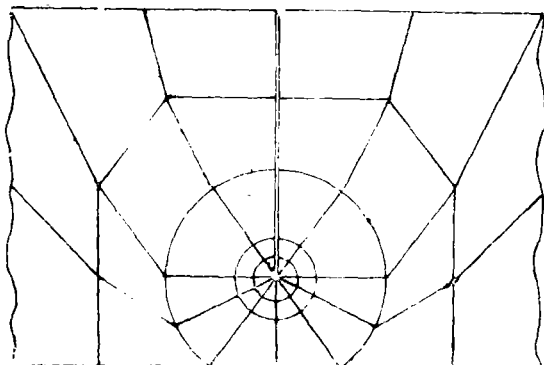


图6 有限元计算单元划分简图

图7 塑性区扩展状况 (计算结果) 1、 $\sigma/\sigma_s=36\%$ 2、 $\sigma/\sigma_s=63\%$

3、 $\sigma/\sigma_s=83\%$ 4、 $\sigma/\sigma_s=93\%$ 5、 $\sigma/\sigma_s=108\%$

2.1 计算过程:

本试件材料为LF21铝板, 屈服极限 $11\text{kg}/\text{m}^2$, 计算范围由弹性变形至屈服断裂。试件塑性变形相当大, 为此我们应用了Leps弹塑性大变形程序(3), 此程序采用八节点等参元, 用Mises 判据描述屈服。

试件裂纹尖端的单元划分如图6所示, 共62个单元, 564个自由度。将计算结果整理分析, 对于表面屈服状况部分结果列于图7。图中第一圈代表 σ/σ_s 等于36%时的塑性区的分布状况, 以此类推, 第四圈代表 σ/σ_s 等于100%时塑性区的分布。

2.2 试验结果和有限元计算结果对比:

2.2.1 塑性区的形状对比:

由图4和图7可看出, 从塑性区的形状来看, 载荷较大时实验结果和计算结果比较相符, 剪切滑移所形成的特征区和计算塑性区基本一致。但载荷较小时两者差别较大。从 $\sigma/\sigma_s=36\%$ 至 $\sigma/\sigma_s=80\%$, 由实验所得塑性区是等向扩展, 呈圆形, 而由计算所得塑性区, 主要在沿裂纹方向上发展, 呈长方形。产生这种差别的主要原因是: 程序是按平面应力问题进行计算的, 而实际承载试件在高载荷时和平面应力比较接近, 而在低载荷时有较大差别。

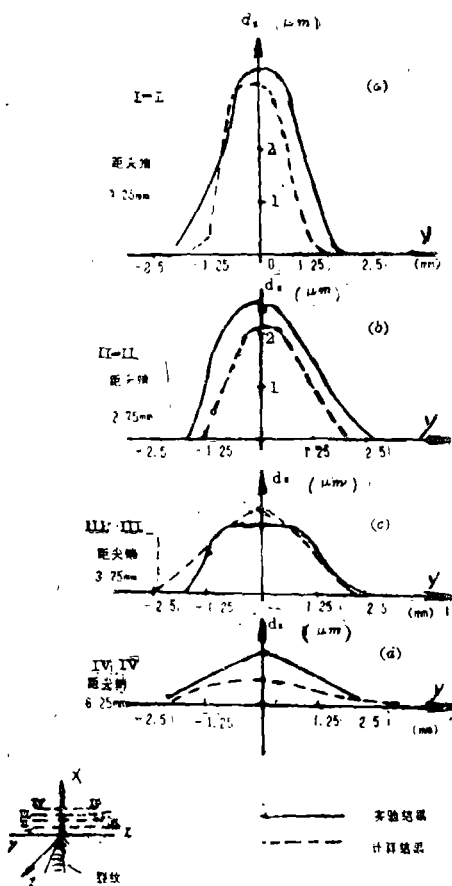


图8 塑性区剖面图

2.2.2 横向收缩情况(离面位移)的对比:

图8为图4—9所示塑性区的剖面图显示裂纹尖端不同距离处, Z向位移随Y的变化情况, (E)图标出了各剖面的具体位置。在图(a)、(b)、(c)、(D)中, 实线表示由实验得到的离面位移(Z向位移)变化图, 虚线是有限元计算所得结果。由图看出离裂纹尖端越远, 离面位移的绝对值和曲线的尖锐程度都迅速降低, 计算结果和实验结果基本相符。

参 考 文 献

- (1) ACTA METALLUR Vol.13.No.1—6 1965
- (2) OPTICA ACTA Vol23.No7—12 1976
- (3) 西安交通大学 弹塑性大应变问题八节点等参数有限元程序

Investigation of Plastic flow State of Aluminum Sheet Crack—Tip With Double—Exposure holographic Interferometry

XU Degang Shen yapeng .Han lanyan
(Dept. of Math. and Mech.)

Abstract The continuous development process of plastic—zone of aluminium sheet crack—tip has been observed and analyzed. Three types of plastic—zones are divided according to the picture of plastic—zones on the surface of the aluminium sheet. The plastic—zones have been calculated also by the finite element method. The results of experiment and calculation are compared.

key words: crack. plastic—flow. Holography