

不同材料界面 III 型裂纹尖端场实验研究*

蔺书田 周志刚 薛 焕

(清华大学工程力学系 100084, 北京)

摘要 本文应用激光全息干涉法获得了两种材料 III 型界面裂纹试件的高面位移场, 通过试验数据处理求得了裂纹尖端附近位移、应力场强度的控制参量 K_{III}, J 值, 给出了局部解的适用区域。还研究了两种材料粘结界面处的连续条件, 分析了结果的合理性。为了对比和分析界面裂纹问题, 还对同种材料试件进行了试验和数据处理。

关键词 III 型界面裂纹, 全息干涉

1. 前言

随着科学技术和生产的发展, 新结构和新材料得到日新月异的发展和应用。在化工、核电结构的多层容器, 发动机的陶瓷镀层, 微电子材料、器件和光学材料的薄膜等新结构的交界面上, 以及复合材料的晶须、纤维与基体之间, 多相介质的夹杂与基体间, 还有双晶、多晶的晶界, 这些在力学上均可模化为两种介质的界面问题。出于节省材料和产品质量安全可靠性的要求, 需要对含有裂纹的界面问题作广泛深入的研究。在美国这些力学问题的基础理论研究已经取得较大进展, 目前还方兴未艾。J.W.Hutchinson, J.R. Rice 和 C.F.Shih 等人用解析法或数值法在这方面取得了一批成果^[1,2]; F.P.Chiang 等人用试验方法从事这方面的研究。在国内这方面的研究工作正在起步。

2. 试验及其原理

1) 试件

试件几何尺寸如图 1 所示, 试件的①是环氧树脂材料, 其弹性模量 $E_I = 0.35 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, 泊松比 $\mu_I = 0.36$; ②是铝合金材料 $E_{II} = 7.0 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, $\mu_{II} = 0.34$ 。先将试件清洗干净, 用 502 胶将被粘界面粘牢, 试件表面涂匀漫反射的白色广告粉后将其夹持在试验台钳上, 加载试验。同种材料试件材料为铝合金, 尺寸同图 1。

2) 试验光路与原理

试验光路如图 2 所示, 物光、参考光的复振幅分别为 O, R , 全息干板在加载前后各一次曝光记录, 总光强:

$$I = I_1 + I_2 = (O + R)(O + R)^* + (O' + R)(O' + R)^*$$

其中 O' 为变形后的物光复振幅。经显影、定影后, 再现的 -1 级衍射光波即为加载前后物光波的再现光波, 其光强为:

$$I' = 2A_0^2 \{1 + \cos[Kd(-e_i + e_R)]\}$$

本文于 1990 年 11 月 17 日第一次稿于 1991 年 5 月 13 日收到修改稿。

* 本文得到国家自然科学基金资助。

上式是在 $G_2 \gg G_1$ 时得到的。

试件所承受的载荷并非纯 III 型, 界面裂纹尖端附近的位移场也不是纯 III 型的。若假定在裂尖端附近的每根射线上的离面位移 w 与半径 r 的 n 次幂成正比, 则

$$n = \Delta(\lg w) / \Delta(\lg r)$$

由上式对试验数据进行处理后所得到的图 3(a1)、(a2) 可以看出, 环氧树脂和铝合金两种材料中分别在 $\theta = 48^\circ$ 、 -60° 时 $n = 0.5$ 。将 $\theta = 22.5^\circ, 48^\circ, 180^\circ; -22.5^\circ, -60^\circ, -180^\circ$ 等 6 根射线上试验数据归一化处理

$$w/w_1 = N/N_1$$

其中 w_1, N_1 分别为 $r = 1\text{mm}$ 处的位移、条纹级次值。从所得到的图 3(b1)、(b2) 十分清楚地看到在 $\theta = 48^\circ$ 、 -60° 的射线上在裂纹尖端附近实验值与局部理论解吻合的很好, 而远离这两角度的射线上两者吻合较差, 这是弯矩对裂纹尖端附近变形场影响的结果。因而在其它角度射线上通过简单的数据处理就能准确地确定裂纹尖端附近局部解的适用区域是十分困难的。

从图版 II 照片 1(a) 可观察到界面裂纹尖端相对试件的下固支端有刚体平动和刚体转动, 这样试件每种材料均可模化为粘结界面带有弹性支承的悬臂梁, 在界面裂纹尖端附近的离面位移场可用局部解与悬臂梁离面位移的迭加去近似, 因此试件界面裂纹尖端附近的离面位移可假设为

$$w = a_0 + a_{\frac{1}{2}} r^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 \quad (3)$$

令 $t = r^{\frac{1}{2}}$, 并将(1)式代入上式得到试验数据拟合公式

$$N = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_4 t^4 + A_6 t^6 \quad (4)$$

利用最小二乘法得到

$$\sum_j A_j \sum_{i=1}^m t_i^j t_i = \sum_{i=1}^m t_i^j N_i, \quad (j, k = 0, 1, 2, 4, 6) \quad (5)$$

按(5)式编程联立解出 A_0, A_1, A_2, A_4, A_6 。其中 A_k 为界面裂纹尖端处条纹级次。

在利用(5)式进行数据处理过程中, 当 $\theta = \text{const}$ 时, 按采集点半径 r_i 增大的方向增加点数, 注意观察采集点个数增加时, 如果存在一个使系数 $a_{\frac{1}{2}}$ 保持不变的区域, 若再增加点时, 将使 $a_{\frac{1}{2}}$ 变化较大, 则此时将最后一个采集点半径作为 J 积分的有效半径。在改变 θ 值时, 仍按上述方法处理, 在计算中发现存在一个系数 $a_{\frac{1}{2}}$ 变化幅度不大的区域, 这一区域即可称为 J 积分的有效区域, 如图 4(b) 所示。

J 积分试验计算公式为

$$J = \frac{\pi G_1}{2} \left[\frac{\lambda}{2(\cos \alpha + \cos \beta)} \right]^2 \left(\frac{A_{1,II}}{\sin \frac{\theta}{2}} \right)^2 \quad (6.1)$$

或

$$J = \frac{\pi G_1}{2} \left[\frac{\lambda G_2}{2G_1(\cos \alpha + \cos \beta)} \right]^2 \left(\frac{A_{1,III}}{\sin \frac{\theta}{2}} \right)^2 \quad (6.2)$$

III 型界面裂纹应力强度因子计算公式

$$K_{III} = \left[2 \left(\frac{2G_1 G_2}{G_1 + G_2} \right) J \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

对同种材料试件的试验结果按下式进行处理^[3]:

$$\lg(cw) = \lg K_{III} + \frac{1}{2} \lg r \quad (8)$$

其中 $c = G \sqrt{\frac{\pi}{2}} / \sin \frac{\theta}{2}$, 将试验数据绘制成 $\lg(cw) - \lg r$ 曲线, 利用截距值确定 K_{III} , 再用曲线斜率接近 0.5 的区域确定局部解的适用范围, 这样得到图 4(a)。

3. 试验结果分析

1) 激光全息干涉法具有 $1/2$ 级灵敏度, 适宜测量微小的离面位移, 且条纹对比度很好。在本次试验中得到了满意的试验结果。

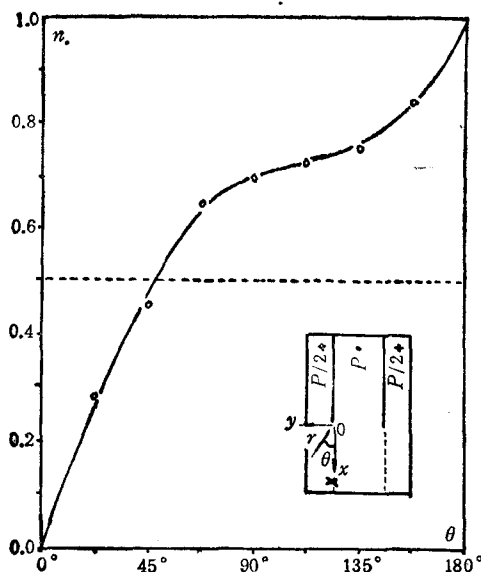
2) 全场条纹图合理性分析

所得全场条纹图对称性比较好, 条纹在粘结界面上连续性很好, 说明加载情况和界面粘结质量均良好。

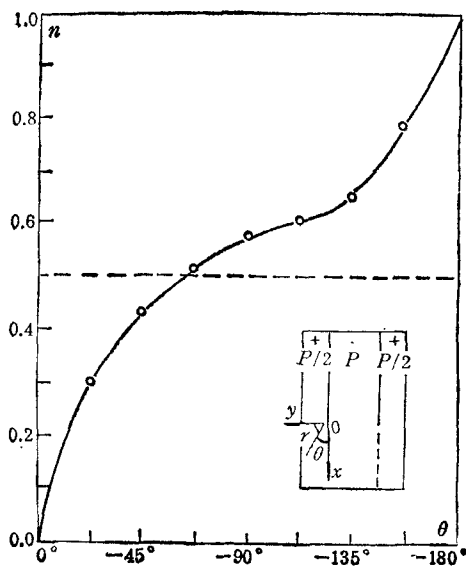
同种材料试件下夹持端离面位移为零, 如图版 II 照片 1(a) 所示, 这根条纹在 $\theta = 0^\circ$ 附近通往裂纹尖端, 这与解析结果基本一致。对于两种材料试件如图版 II 照片 1(b) 所示, 零位移条纹由底部夹持端通往刚性较大的铝合金一侧离裂纹尖端不远的岸边, 说明裂纹尖端附近有刚体平动和刚体转动。它的另一分支则穿过粘结界面和环氧树脂材料通往试件侧边界。在零位移条纹两侧离面位移方向相反。

离面位移条纹与自由界面相交角趋于 90° , 这与自由界面的力边界条件相一致。

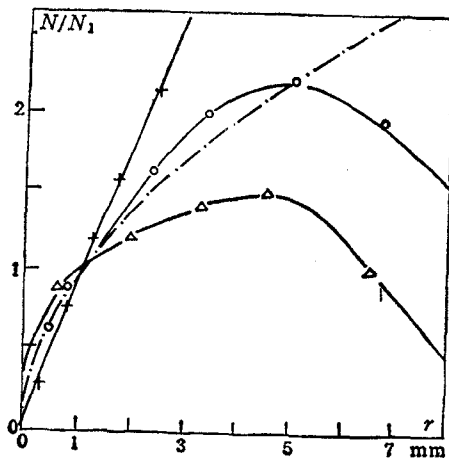
3) 控制参量与局部解适用区域



(a1) 环氧树脂材料中 $n \sim \theta$ 曲线



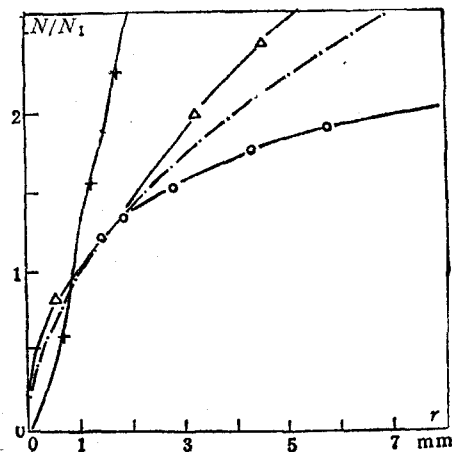
(a2) 铝合金材料中 $n \sim \theta$ 曲线



(b1) 环氧树脂材料中不同角度

射线上 $\frac{N}{N_1} \sim r$ 曲线

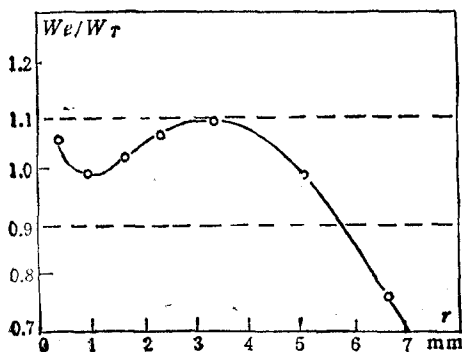
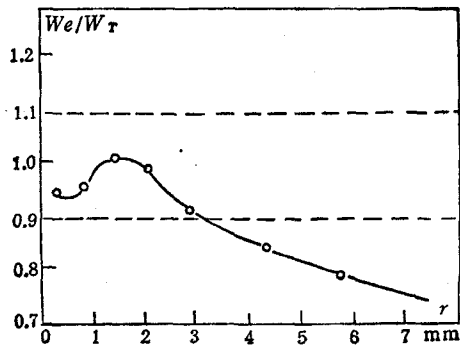
—△— 22.5° 实验值 —○— 48° 实验值
—+— 180° 实验值 —●— 理论值



(b2) 铝合金材料中不同角度

射线上 $\frac{N}{N_1} \sim r$ 曲线

—△— 22.5° 实验值 —○— 60° 实验值
—+— 180° 实验值 —●— 理论值

(c1) 环氧树脂材料中 $\theta = 48^\circ$ 射线上 $\frac{w_e}{w_r} \sim r$ 曲线(c2) 铝合金材料中 $\theta = -60^\circ$ 射线上 $\frac{w_e}{w_r} \sim r$ 曲线图 3 $P = 3.23\text{kg}$ 下两种材料试件的试验数据分析与处理

一种材料试件, 在 $P = 6.45\text{kg}$ 时数据处理得到 $K_{III} = 0.717\text{ kg/mm}^{\frac{2}{3}}$, $J = K_{III}^2 / 2G = 0.984 \times 10^{-4}\text{ kg/mm}$; 局部解适用区域如图 4(a) 所示, $R_K \approx 6\text{mm}$, 形状近似为圆。

两种材料试件, 在 $P = 3.23\text{kg}$ 时数据处理得到 $J = 1.81 \times 10^{-6}\text{ kg/mm}$, $K_{III} = 3.02 \times 10^{-2}\text{ kg/mm}^{\frac{2}{3}}$; 局部解适用区域近似为腰子形, 如图 4(b) 所示, 在环氧树脂材料一侧, $\theta = 90^\circ$ 方向 $R_K = 5.4\text{ mm}$, 在 $\theta = 48^\circ$ 方向 $R_K = 4.5\text{ mm}$; 而图 3(c1) 中 $\theta = 48^\circ$ 方向 $R_K = 5.7\text{ mm}$ 。在铝合金材料一侧 $\theta = -90^\circ$ 方向 $R_K = 2.6\text{ mm}$, $\theta = -60^\circ$ 方向 $R_K = 2.6\text{ mm}$; 而图 3(c2) 中 $\theta = -60^\circ$ 方向 $R_K = 2.9\text{ mm}$ 。图 3(c1)、(c2) 所给的 R_K 值略大于图 4(b) R_K 值, 这主要是在解(5)式确定 R_K 值时采用了逐次增

加采点个数方法所致,其误差为采点间距。在粘结界面附近条纹稀疏,致使这里数据采集与处理精度下降,特别是 $\theta = 0^\circ$ 时适用范围是借助于它左右结果外推得到,因此在 $-40^\circ < \theta < 40^\circ$ 范围内用虚线绘出。

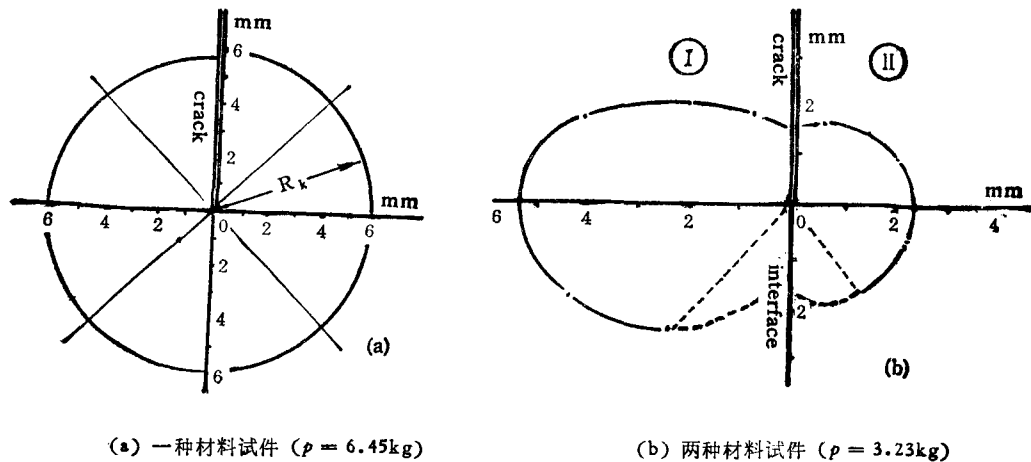


图 4 局部解适用区域

4) 两种材料试件粘结界面处连续条件

界面粘结剂胶层厚度约 0.1 mm, 从图版 II 照片 1(b) 离面位移条纹图可看到条纹在粘结界面处是连续的, 即 $w_I = w_{II}$ 。沿界面法线方向两种材料的位移梯度明显不同, 说明剪应变 $\gamma_{\theta z}$ 在界面处不连续, 这是它们的模量不同引起的, 它们应满足 $G_I \cdot \gamma_{\theta z, I} = G_{II} \gamma_{\theta z, II}$ 。裂纹尖端附近界面两侧的条纹与界面夹角很小, 说明 γ_{rz} 和 τ_{rz} 均较小。

此项工作得到余寿文教授的指导, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Durban D. and Ore, E. Interface Stress Singularities at a Notch Tip in Antiplane Shear. *JAM*. JUNE 1987, 54: 470—472
- [2] Shih C F and Asaro, R J. Elastic-Plastic Analysis of Cracks on Bimaterial Interfaces, *JAM*. JUNE 1988, 55:299—316
- [3] 黄克智, 余寿文. 弹塑性断裂力学. 北京: 清华大学出版社, 1985
- [4] 薛焕. 不同材料界面裂纹尖端附近变形场分析. 工学学士毕业论文, 1990.7.3

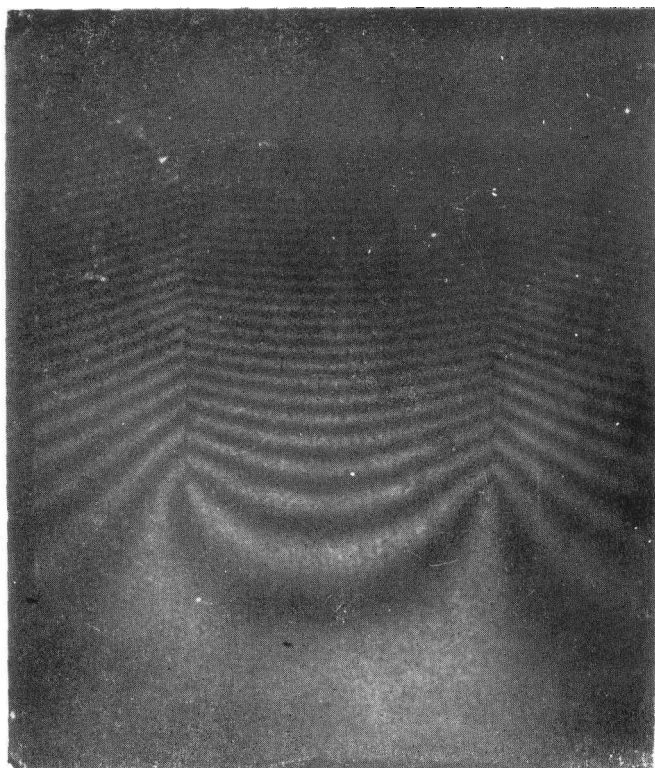
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FIELD OF THE MODE III CRACK TIP BETWEEN DISSIMILAR MATERIAL

Lin Shutian, Zhou Zhigang, Xue Huan

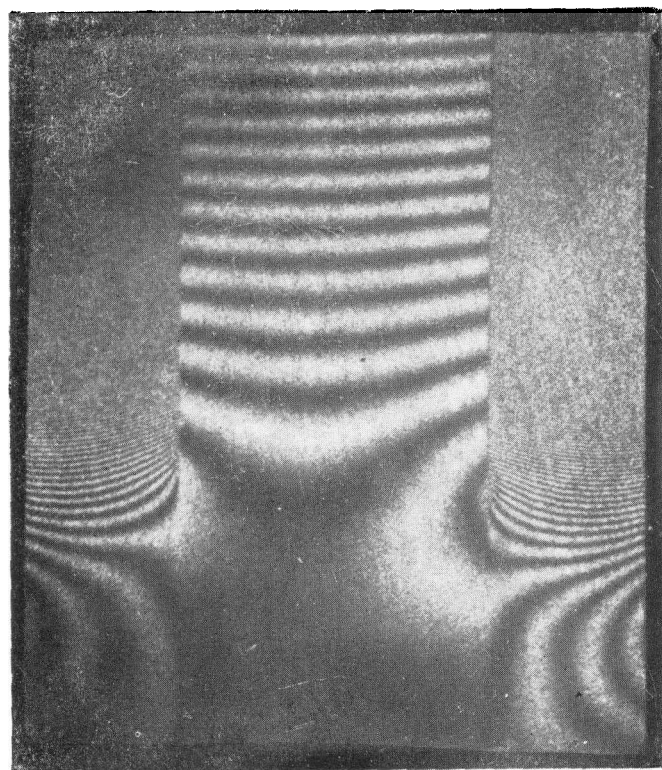
(Department of Engineering Mechanics Tsinghua University 100084, Beijing)

Abstract In this paper, the displacement field for the mode III interface crack between two materials is obtained by using the laser holographic interferometry. Through experimental data processing control parameters K_{III} , J of stress field intensity around crack tip are obtained, and the applicable region of local solution is given. The continuity condition across the interface between two materials is studied. Rationality of the results is analysed. For contrast, specimen of homogeneous material was tested and data were processed.

Key words mode III interface crack, holographic interferometry



(a) 一种材料试件 ($p = 6.45\text{kg}$)



(b) 两种材料试件 ($p = 3.23\text{kg}$)

照片 1 离面位移等值条纹图