用激光散斑法和云纹法测量含裂纹薄板的裂纹张开位移[1)]

薛以年　韩金虎

（中国科学院力学研究所）

平面应力的弹塑性断裂理论的研究一直受到广泛重视，正在深入发展，其中很多工作是通过研究裂纹张开位移和裂纹附近的应变场进行的．用光学方法对裂纹张开位移和裂纹周围的变形进行测量具有显著的优越性，不但测量精度高，而且能够把整个裂纹包括裂纹顶端的张开位移都同时测量出来，并得到裂纹周围的位移全场分布．近年来激光散斑法在实验应力分析中发展很快，已被用来测量裂纹张开位移和裂纹周围的应变场[1-4]，其测量灵敏度高，方法简单；但是当载荷较高变形较大时，测量值要经过逐级加载的许多张两次曝光散斑记录的数据相加，由于测量误差的累积，测量结果的精确度不易得到保证．用云纹法测量裂纹张开位移和裂纹周围的应变场已发表了许多工作[5]．对于栅线密度为每毫米 50 线左右的常用栅线，当载荷较低变形不大时，所产生云纹图的测量灵敏度显得不够；如果用栅线密度很高的特殊栅线（例如有每英寸 13400 线[5]），则当载荷较高变形较大时，所产生的云纹图又显得过密而难以测量。因此要用云纹法测量整个加载过程的裂纹张开位移和裂纹周围的应变场是比较困难的．

本文对受拉伸载荷的含中心裂纹薄铝板试件，在其前表面用激光散斑照相法后表面用云纹法一起进行变形测量，它们兼顾了加载过程中变形从小到大不同阶段所需要的测量灵敏度，即在变形较小时主要用激光散斑照相法获得测量数据，变形较大时主要用云纹法（这里用的是常用栅线，栅线密度最大为每毫米 50 线）获得测量数据．由于在散斑照相和读测云纹图时对试件进行了放大，因此能够比较精确地确定被测点的位置，这有利于测量裂纹顶端的张开位移，效果是明显的．在这两种方法同时获得测量结果的变形阶段，它们的实验测量值符合很好，由此表明，激光散斑法和云纹法的实验测量值是精确可靠的，用它们来验证理论计算结果是足以信赖的．

一、实验测量方法

1. 激光散斑法

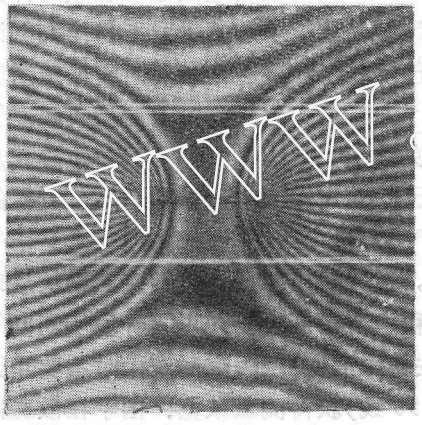
利用激光散斑干涉测量试件表面的面内位移有两种方法，一种是激光散斑照相[1,3]，另一种是激光散斑直接记录[2-4]，用这两种方法测量裂纹张开位移和裂纹周围的位移场各有其优缺点．

激光散斑照相的主要优点是在照相时可以将试件放大，所以能够比较精确地确定被

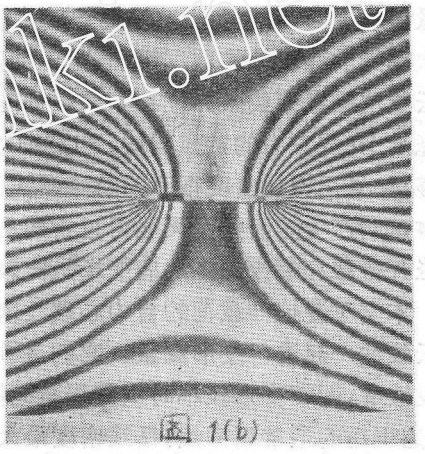
1) 本文于 1980 年 8 月收到．

测点的位置；对散斑照相得到的两次曝光记录底片进行分析时，其逐点分析的杨氏条纹和全场分析的等位移线条纹都比较清晰．关于加载系统引起试件的面内刚体位移，如果刚体位移过大，则将淹没试件变形的位移，是不利因素；但是适当的垂直于裂纹方向的刚体位移将提高裂纹张开位移的测量精度，即起所谓线性错配的作用，却是有利因素．主要缺点是加载系统引起试件的离面刚体位移会降低杨氏条纹和等位移线条纹的清晰度，甚至完全得不到，原因是离面位移使第二次曝光所拍摄的试件及其散斑不能准确地成象在记录介质上，除非在第二次曝光时重新对焦．因此，要求加载装置能够使试件在两次曝光之间的加载中，只产生极小的离面刚体位移；此外，适当地缩小光圈增大景深对改善两次曝光散斑照相的记录质量也有一定效果．

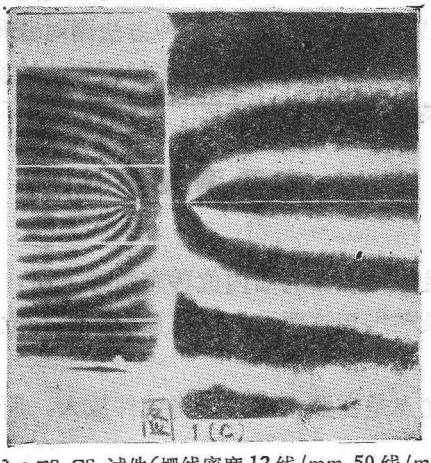
激光散斑直接记录的主要优点是由于记录底片固定在试件的一点上，加载系统引起试件的刚体位移可以自身补偿，尤其是离面刚体位移不会影响两次曝光的散斑记录；并且用这种记录方法可以同时得到反射全息图来测量离面变形[2-4]．缺点是记录散斑时不能对试件进行放大，因而被测点特别是裂纹顶端的位置不容易精确地确定；对散斑直接记录的两次曝光底片进行分析时，即使在试件表面涂玻璃微珠以提高光束的反射能力，其杨氏



(a) 软铝试件(栅线密度 20 线/mm)



(b) 软铝试件(栅线密度 12 线/mm)



(c) LC9-CS 试件(栅线密度 12 线/mm 50 线/mm)

图 1

条纹和等位移线条纹总不如散斑照相的清晰；散斑直接记录要求平行光垂直照射试件，因此被测面积受到准直透镜尺寸的限制.

2. 云纹法

经过二、三十年的发展，用云纹法测量物体的变形已经比较成熟，六十年代后期很快应用于断裂力学和疲劳[5]，主要是测量裂纹张开位移和裂纹周围的应变场，特别是用来研究韧性断裂、疲劳裂纹扩展和动态裂纹扩展. 如果采用单线栅，栅线方向平行于裂纹，当试件受拉伸变形时所产生的云纹就是垂直于裂纹方向的位移的等位移线，由此很容易得到裂纹张开位移和垂直于裂纹方向的位移全场分布. 这里所用的栅线属于常用的栅线密度范围(用过的有每毫米 10 线、12 线、20 线、40 线和 50 线等数种)，测量灵敏度不高，适合在变形较大时进行测量，一直可以测量到裂纹扩展试件断裂. 图 1 (a) 和 (b) 分别是软铝试件在变形较大时和裂纹扩展后的云纹图. 如果能够确定试件中心线两侧的变形是对称的，则可以在中心线两侧选用两种不同的栅线密度来进行测量，这样在加载过程中可进一步利用不同栅线密度的测量灵敏度，从而得到更精确的测量结果，如图 1 (c) 所示.

二、实验装置和实验结果

整个实验装置示意图见图 2 (①氦氖激光器②快门③反射镜④扩束镜⑤加载架和试件⑥照相座机⑦ 135 相机⑧闪光灯).

正式进行实验测量的含中心裂纹薄铝板试件有两块，材料是合金铝 LC9-CS (E = 6500kg/mm^2, $\sigma_{0.2}$ = 49kg/mm^2, σ_b = 55kg/mm^2)，厚度为 2 毫米，形状和尺寸见图 3. 试件上的中心裂纹用直径为 0.12 毫米的钼丝进行线切割加工而成，没有预制疲劳裂纹，因为是否开疲劳裂纹对韧性材料的薄板进行断裂试验影响不大[6]. 试件 I 的裂纹长度 $2a$ = 10 mm，试件 II $2a$ = 20mm.

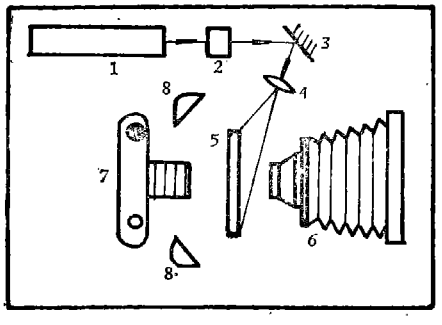


图 2

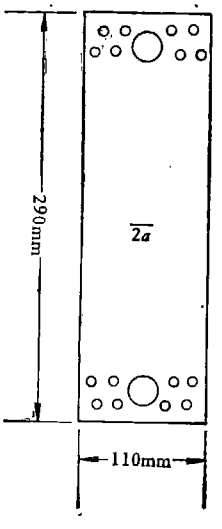


图 3

根据实验测量的目的和要求，这里采用激光散斑照相的方法. 试件的前表面用细砂纸无规则打磨，经过扩束的激光照射在试件上，用照相座机进行照相，记录介质是全息干板或全息软片. 试件 I 成象的放大倍数是 3，光圈为 f/5.6；试件 II 成象的放大倍数是 2，

光圈为 $f/3.5$. 实际上可以取更高的放大倍数对试件的局部进行照相，这里为了照整个裂纹周围的全场变形，并受全息底片尺寸的限制，所以放大倍数取得不高，即便如此，采用激光散斑照相测量裂纹张开位移和裂纹周围的变形，其放大作用的效果也已经显示出来.

这里用直径约为 0.5 毫米的细激光束垂直照射两次曝光散斑记录底片进行逐点分析，其测量精度比全场分析高. 由于加载时试件会有一些横向的面内位移，所以杨氏条纹的方向不一定平行于裂纹，但是只要读测垂直于裂纹方向的杨氏条纹间距 Δ，就可用公式

$$d = \frac{\lambda L}{M\Delta} \tag{1}$$

得到被照射点在裂纹垂直方向的位移分量 d，其中 λ 是激光波长（$\lambda = 6328$ Å），L 是底片到屏幕的距离（取 $L = 1500$mm），M 是放大系数. 裂纹线上某点上下所测出的相对位移就是该点的裂纹张开位移.

试件的后表面用细砂纸沿垂直裂纹方向定向打磨，这样照明光从试件左右斜射过来，可以使试件表面反射产生清晰明亮的云纹图. 把印有单向栅线的转贴软栅片用 502 胶粘在试件表面上，栅线平行于裂纹，然后撕去片基留下乳胶栅线而形成试件栅. 试件 I 选用了栅线密度为 50 线/mm 和 12 线/mm 两种试件栅，分别粘固在试件中心线左右两侧(见图 1(c))；试件 II 只用了 50 线/mm 的试件栅. 用透明机油把作为分析栅的软栅片附着在试件栅上便能产生清晰的云纹图. 用配有闪光灯的 135 相机对云纹图进行拍摄，然后把云纹图底片放在投影仪或印相放大机上进行放大读测. 云纹图上的条纹是垂直于裂纹方向位移分量的等位移线. 由裂纹线上某点上下读得的条纹级数差 Δn，就可用公式

$$\delta = \Delta n \cdot p \tag{2}$$

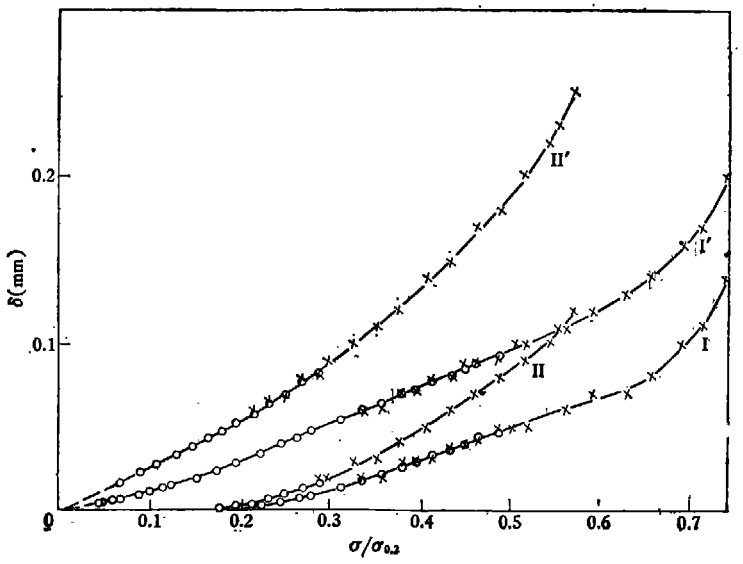


图 4

○ 散斑法实验值， × 云纹法实验值

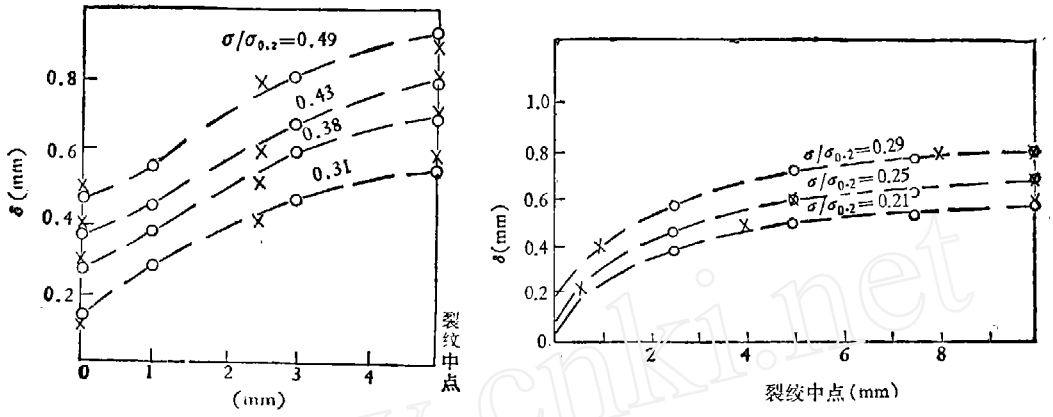
I 试件 I 的裂纹顶端张开位移 I′ 试件 I 的裂纹中点张开位移

II 试件 II 的裂纹顶端张开位移 II′ 试件 II 的裂纹中点张开位移

得到该点的裂纹张开位移 δ，其中 p 是栅线的节距.

图 4 给出了试件 I 和试件 II 的裂纹中点张开位移和裂纹顶端张开位移随载荷变化的曲线，直到试件断裂（σ 为远处施加的应力）. 由图 4 可以看出，在激光散斑照相和云纹法同时获得测量结果的变形阶段，这两种方法的测量数据符合很好. 图 5(a) 和 (b) 给出了这两种方法同时进行测量的几个载荷下的裂纹张开位移分布，其测量结果也符合很好.

参加本工作的还有王怡群.



(a)　　(b)

○ 散斑法实验值，× 云纹法实验值　　○ 散斑法实验值，× 云纹法实验值

图 5

参 考 文 献

[1] Evans, W. T. and Luxmoore, A., *Engng. Fract. Mech.*, 6, 4(1974), 735.

[2] Boone, P. M., *Optica Acta*, 22, 7(1975), 579.

[3] 中国科学技术大学五系激光全息组，激光散斑和全息干涉计量技术在断裂力学上的应用，1976 北京断裂力学交流会第二次会议文集 (1977)，168.

[4] 刘宝琛，蔺书田，刘春阳，用激光一束光反射全息和激光散斑干涉法研究有限宽中心裂纹板裂纹尖端三维位移场，清华大学学报 1(1981).

[5] Liu, H. W. and Ke, J. S., Moiré Method, Experimental Techniques in Fracture Mechanics, 2, SESA Monograph Series (1975), 111.

[6] Kuo, A. S. and Lin, H. W., *Proc. of the Fourth Int. Conf. on Fract.*, 3(1977), 311.

MEASUREMENT OF CRACK OPENING DISPLACEMENTS IN CRACKED SHEETS USING BOTH LASER SPECKLE METHOD AND MOIRÉ METHOD

Xue Yinian Han Jinhu

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

In order to provide adequate measuring sensitivities needed at various deformation stages in loading, the laser speckle method and the moiré method are used simultaneously to measure the crack opening displacements in front and at the back of centrally cracked aluminium alloy sheets respectively. At the deformation stage where experimental data can be obtained by either of the two methods, it is found that the measurements given by the two methods agree very well. Thus, the accuracy and reliability of both the speckle method and the moirémethod are verified.

www.cnki.net