

文章编号: 1001-4888(2013)02-0269-08

基于数字散斑相关方法测定 I 型裂纹应力强度因子^{*}

代树红^{1,2}, 马胜利², 潘一山¹, 王洪山¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 提出了一种通过数字散斑相关方法测定金属材料 I 型裂纹尖端位置和应力强度因子的实验方法。实验采用疲劳试验机对含 I 型缺口的 Cr12MoV 钢试件预制裂纹, 通过数字散斑相关方法测试试件在三点弯曲加载条件下裂纹的扩展过程及裂尖区域的位移场。将位移场数据代入裂尖位移场方程组, 采用牛顿—拉普森方法求解含未知参量的裂尖非线性位移场方程组, 计算裂尖位置和应力强度因子。实验结果表明, 采用该方法可以准确地测定金属材料 I 型裂纹应力强度因子、裂尖位置及裂纹扩展长度, 解决了以往研究中因不能准确测定裂纹尖端位置, 而无法准确计算 I 型裂纹裂尖断裂参数的难题, 揭示了金属材料裂纹扩展过程中应力强度因子演化特征。

关键词: 数字散斑相关方法; I 型裂纹应力强度因子; 裂纹扩展长度; 非线性方法

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-098

0 引言

断裂是含缺陷的金属材料及结构最常见的失效方式之一, 研究表明大量断裂事故皆与结构中存在缺陷或裂纹有关^[1,2]。计算材料断裂韧性、追踪裂纹扩展和评价结构的稳定性都要用到应力强度因子。虽然目前数值方法在确定应力强度因子中应用广泛, 但计算所需时间长, 而且在复杂的边界条件下, 还会因为遇到数学方面的困难而使问题一时得不到解决。因此, 强度因子测试方法是断裂力学研究和应用的关键问题。

为了准确测定断裂因子, 莫尔云纹法^[3]、全息法和光弹性法等光测力学方法被应用到了断裂实验中^[4-6]。光测方法可以做到全场、非接触、高自动化和高精度的测量, 测量结果比较直观, 而且适用于动态观测。数字散斑相关方法不仅具有以上光测方法的优点, 同时该方法对测量环境要求低, 测量系统易于实现, 测量的尺度和精度可以很方便地调节, 该方法可以有效地获得裂纹尖端区域的位移场^[7]。通过实验获得裂尖区域的位移参量, 并带入裂尖位移场方程, 是一种有效求解应力强度因子等断裂参数的方法。早期研究中, 多应用裂纹边缘少量点的实验数据计算断裂参量^[8,9], 显然由于数据量的限制, 这些方法很难准确计算表征裂纹尖端应力场分布强度的参量—应力强度因子。

本文将开展含预制裂纹的 Cr12MoV 金属试件, 在三点弯曲加载条件下 I 型裂纹扩展的断裂实验。通过数字散斑相关法测定试件裂尖区域的位移场, 将位移分量带入裂尖位移场方程, 采用牛顿—拉普森方法求解含未知参量的非线性方程组, 确定加载过程中裂纹尖端的位置、应力强度因子和裂纹扩展

* 收稿日期: 2012-08-21; 修订日期: 2012-12-14

基金项目: 辽宁省教育厅科学技术研究项目(2009A337); 国家自然科学基金资助项目(41002075)资助

通讯作者: 代树红(1978—), 男, 博士, 讲师。主要从事光测力学及应用研究。E-mail: dsh3000@126.com

长度。

1 实验方法

1.1 数字散斑相关方法

数字散斑相关方法是在上世纪 80 年代由 Peters 与 Ranson 和山口一郎等人同时独立提出的^[10,11],以后又有很多人做了一系列的研究和改进工作,并应用到了研究木材、金属、航空材料、复合材料、岩石等材料的力学性质实验^[12-15],以及和活动断裂相关的地质力学模型实验^[16]。数字散斑相关方法通过采集物体表面变形前后的两幅图像,根据其表面随机分布的散斑点(人工喷漆或材料自然纹理)在变形前后的概率统计相关性来确定物体表面的位移场,实现物体位移场的测量,从而进一步计算得到应变场。

本文实验中采用公式(1)作为计算变形前图像上点 $f(m, n)$ 和变形后图像上点 $g(m, n)$ 之间相关性的相关系数:

$$C(m, n) = \frac{\sum_{i=-R/2}^{R/2} \sum_{j=-R/2}^{R/2} [(f(x_{m+i}, y_{n+j}) - \bar{f}) \cdot (g(x_{m+i}, y_{n+j}) - \bar{g})]}{\left[\sum_{i=-R/2}^{R/2} \sum_{j=-R/2}^{R/2} (f(x_{m+i}, y_{n+j}) - \bar{f})^2 \cdot \sum_{i=-R/2}^{R/2} \sum_{j=-R/2}^{R/2} (g(x_{m+i}, y_{n+j}) - \bar{g})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

其中 R 表示以点 $f(m, n)$ 为中心的相关区域,大小为 $R \times R$ 像素。 R 数值大小的选取关系到测量精度和计算量,本文设定 $R=31$; $\bar{f}$ 代表变形前相关区域内的平均灰度值, $\bar{g}$ 代表变形后相关区域内的平均灰度值。测量精度的提高可以采用硬件方法和软件方法,硬件方法主要是提高 CCD 的空间分辨率,但该方法成本比较高,而且分辨率毕竟有限;本文实验中采用了亚像素的方法,在像素级搜索的基础上,又进行了亚像素的处理,使精度达到 0.01 像素级。

1.2 试件加工及实验过程

实验采用 Cr12MoV 钢作为金属断裂实验材料,制作单位提供的材料化学组分如表 1 所列。其基本物理力学参数分别为弹性模量 $E=210\text{GPa}$ 、切变模量 $G=80\text{GPa}$ 、泊松比 $\mu=0.27$ 、屈服极限 $\sigma_s=658\text{MPa}$ 。

表 1 Cr12MoV 钢的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of Cr12MoV

名 称	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Cr12MoV	1.45~1.70	≤ 0.40	≤ 0.40	11.00~12.50	0.40~0.60	0.15~0.30

实验加载示意图如图 1 所示,实验跨距 $2s=50\text{mm}$,试件的几何尺寸为 $60\text{mm} \times 20\text{mm} \times 10\text{mm}$,预制缺口的深度为 6mm 位于实验跨中,加载方向和缺口方向在同一条直线上。试件是通过线切割方法加工制作的,采用断裂实验室研制的实用疲劳裂纹预制机对试件预制了裂纹^[17,18],经放大后的预制裂纹如图 2 所示,图中由线切割加工的半圆形缺口前端存在一条长 0.8mm 的预制裂纹。

为了提高试件表面的散斑对比度,实验前用自喷漆在加工好的试件表面首先喷涂成白色,待白色漆面干透后再喷涂随机性的黑色斑点。实验通过一台量程为 50kN 的液压伺服试验机加载,正式加载前对试件预加了 1.78kN 的荷载,实验采用加载速率为 0.3mm/min 的位移控制方式匀速加载。实验采用德国 Basler 公司生产的 404K 面阵黑白工业 CCD(Charge-coupled device)拍摄试件表面裂尖区域的散斑场,CCD 的分辨率为 2352×1720 像素,同 CCD 配套使用的是一款 105mm 镜头,获得散斑场的物面分辨率为 0.0253mm/像素,CCD 的采集和存储速率设定为 15 帧/秒。实验表明,通过以上实验设备、加载和观测方法,能够有效地观测金属试件裂纹的扩展过程。

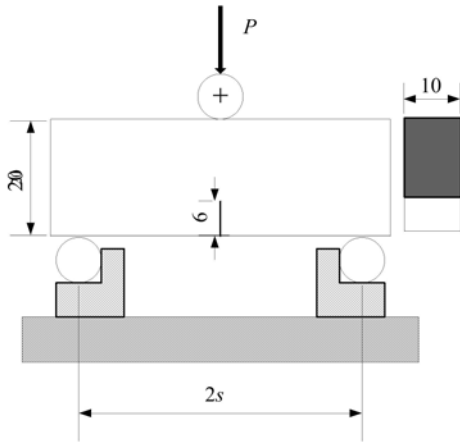


图1 Cr12MoV 试件及加载示意图

Fig. 1 The sketch map of Cr12MoV specimen and loading condition

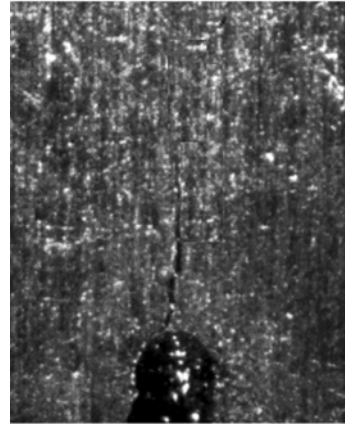


图2 试件的预制裂纹图

Fig. 2 The precrack on specimen

2 基于位移场计算应力强度因子

本文采用将裂纹尖端位置和应力强度因子作为未知参量,通过数字散斑观测方法得到的裂尖位移数据,求解裂尖区域非线性位移场方程组。

裂纹尖端区域的位移场方程如方程(2)所示:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{I n}}{2G} r^{n/2} \begin{Bmatrix} \kappa \cos \frac{n}{2} \theta - \frac{n}{2} \cos(\frac{n}{2} - 2) \theta + \left\{ \frac{n}{2} + (-1)^n \right\} \cos \frac{n}{2} \theta \\ \kappa \sin \frac{n}{2} \theta + \frac{n}{2} \sin(\frac{n}{2} - 2) \theta - \left\{ \frac{n}{2} + (-1)^n \right\} \sin \frac{n}{2} \theta \end{Bmatrix} \\ - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{II n}}{2G} r^{n/2} \begin{Bmatrix} \kappa \sin \frac{n}{2} \theta - \frac{n}{2} \sin(\frac{n}{2} - 2) \theta + \left\{ \frac{n}{2} - (-1)^n \right\} \sin \frac{n}{2} \theta \\ - \kappa \cos \frac{n}{2} \theta + \frac{n}{2} \cos(\frac{n}{2} - 2) \theta + \left\{ \frac{n}{2} - (-1)^n \right\} \cos \frac{n}{2} \theta \end{Bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

式中, u_x 、 u_y 分别为 X 和 Y 方向的位移分量,方向如图 3 所示。G 是材料的切变模量;在平面应力问题中 $\kappa = (3 - \mu)/(1 + \mu)$ 、平面应变问题中 $\kappa = 3 - 4\mu$; r 和 θ 分别为裂尖附近位置的极坐标参量; $A_{I n}$ 和 $A_{II n}$ 为级数项系数,下标 n 表示级数序列。

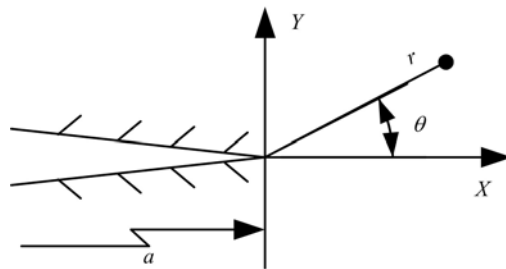


图3 裂纹尖端的坐标示意图

Fig. 3 Coordinate system around a crack tip

A_{I1} 、 A_{II1} 同 I 型断裂因子 K_I 和 II 型断裂因子 K_{II} 的关系可以通过方程(3)表示:

$$A_{I1} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}}, \quad A_{II1} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \quad (3)$$

金属试件 I 型断裂实验中,裂纹尖端区域的位移垂直于裂纹面,即用 Y 方向的位移参量可以有效求解位移场方程组。实验中任一散斑图中的裂尖坐标用某一直角坐标系下的 (x_0, y_0) 表示,则裂纹尖端区域

各点的极坐标参量如方程(4)所示:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \\ \theta &= \tan^{-1} \left\{ \frac{y-y_0}{x-x_0} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

将方程(4)和数字散斑相关方法测得的 M 个点的坐标 (x, y) 以及裂纹面法线方向的位移量参量 u_y 带入方程(2),并引入试件的刚体位移参量 T_y :

$$\begin{aligned} u_{iy} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{In}}{2G} r_t^{n/2} \left(\kappa \sin \frac{n}{2} \theta_t + \frac{n}{2} \sin \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta_t - \left\{ \frac{n}{2} + (-1)^n \right\} \sin \frac{n}{2} \theta_t \right) \\ &\quad - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{In}}{2G} r_t^{n/2} \left(-\kappa \cos \frac{n}{2} \theta_t - \frac{n}{2} \cos \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta_t + \left\{ \frac{n}{2} - (-1)^n \right\} \cos \frac{n}{2} \theta_t \right) + T_y \end{aligned} \quad (5)$$

则方程(5)变成了一组 M 个关于未知参量 $A_{I1}, \dots, A_{IN}, A_{II1}, \dots, A_{IIN}, T_y, x_0$ 和 y_0 的非线性方程组,下标 t 表示裂尖区域数据点 $(t = 1, 2, \dots, M)$ 。本文采用牛顿-拉普森方法,对方程组进行迭代求解。

3 实验分析过程与结果

3.1 实验分析过程

实验从正式加载到最终裂纹发生失稳扩展共用了 5.253s, CCD 记录并存储了 76 张散斑图片, 图片中包含着试件表面的变形和裂纹扩展信息, 失稳扩展后的试件如图 4 所示, 裂纹沿预制裂纹方向自裂尖向上端加载点扩展。图 4 中白色框线是 $6\text{mm} \times 8\text{mm}$ 大小的分析区域, 该区域覆盖了裂纹的整个扩展路径。实验结束后试件的断口如图 5 所示, 图 5(a) 中平整规则黑色区是采用线切割预制的缺口, 缺口长度为 6mm , 由于受到油的侵蚀和氧化呈黑色; 线切割缺口上方平均长度 0.8mm 呈光亮平整的断口区域, 是试件在疲劳裂纹预制机作用下形成的预制裂纹, 裂纹预制过程中裂纹断口在接触和摩擦作用下呈平整光亮特征; 预制裂纹上方断口形貌呈粗糙的环状坑分布, 是试件在三点弯曲加载作用的拉张断裂区域, 图 5(b) 是对包含以上三个区域边界的放大效果图。试件断口形貌的特征表明, 预制缺口和预制裂纹达到了断裂实验对试件加工的预期要求。

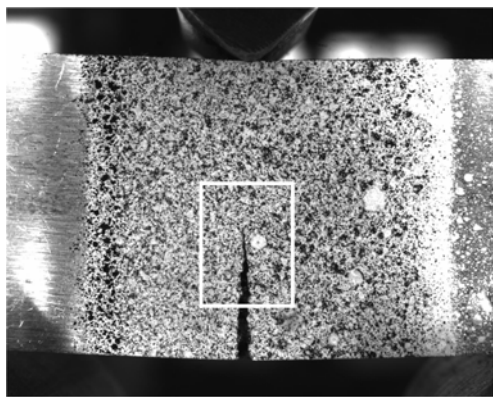
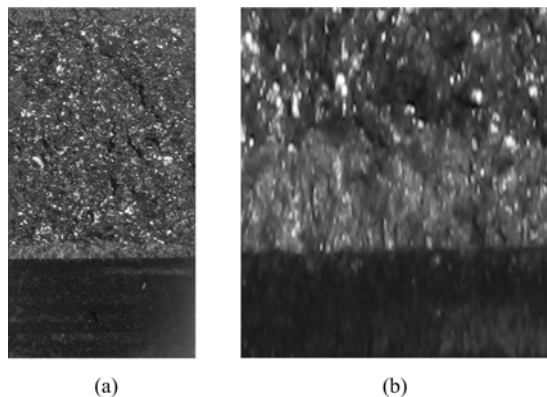


图 4 失稳扩展后的试件

Fig. 4 The specimen after unstable crack extension



(a) (b)

图 5 试件断口及局部放大图

Fig. 5 The fracture face and amplified map of the edge location

金属材料断裂过程中, 裂尖存在塑性变形区, 本文采用塑性区尺寸估算公式计算裂尖塑性区大小^[19]:

$$r = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{K_I}{\sigma_s} \right)^2 \quad (6)$$

Cr12MoV 钢的屈服应力 $\sigma_s = 658\text{MPa}$, 断裂韧度 K_{Ic} 的分布区间在 $60 \sim 100\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。根据公式(6), Cr12MoV 钢裂尖的塑性区尺寸在 1mm 左右, 选取塑性区外的位移场数据点计算断裂参数可以减小塑性变形的影响。图 6 是加载时间 $t = 3.828\text{s}$, 载荷 $P = 17.48\text{kN}$ 时, 裂尖分析区域内沿裂纹法线方向(Y

方向)的位移场云图,图中黑色点的位置表示用于求解位移方程组的数据点位置,数据点距裂尖初始值的最小距离为 1mm。

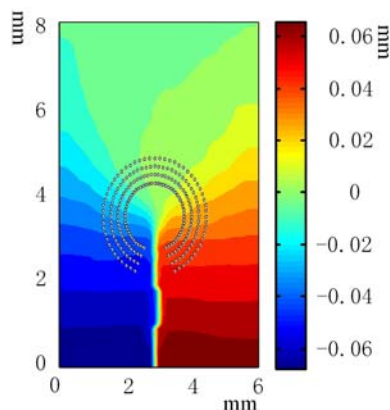


图6 数据点位置及位移场云图
Fig. 6 The selected data point position on contour map

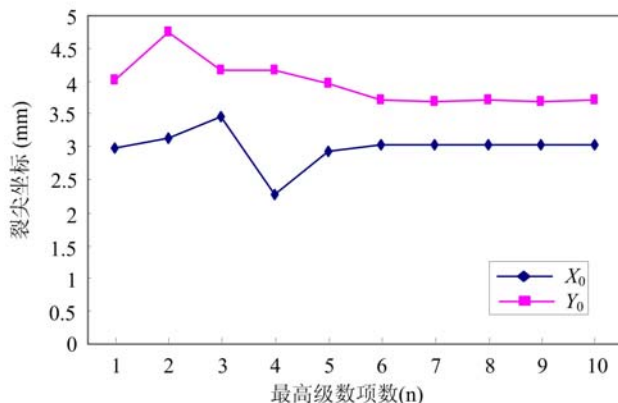


图7 级数项数目对裂尖位置计算结果的影响
Fig. 7 The effect of terms on the determination of the crack tip position

求解非线性位移场方程组时,选取显微镜下观测得到的裂尖位置作为加载起始时刻裂尖的迭代初始值,在计算下一加载时刻的方程组时,将上一时刻计算得到的裂纹尖端位置及相关参数定义为新的初始值,并根据裂尖位置选定新的数据点位置。由于数字散斑相关法获得的数据点位置分布于裂纹尖端附近一定距离的区域,理论中方程(5)中的级数项数目越大,计算结果的收敛性将越好,但实际中计算量也会加大。图7是对加载时间 $t = 3.828\text{s}$,载荷 $P = 17.48\text{kN}$ 时,裂纹裂尖位置同级数项数目相关性的计算结果,数据表明最高级数项数 $N \geq 5$ 时计算结果具有很好的收敛性,在本文实验分析中最高级数项数设定为 8。

3.2 应力强度因子 K_I 和裂纹扩展长度的计算结果及讨论

通过非线性方法求解裂尖区域 Y 方向位移场方程(5)和数字散斑相关方法测得的位移分量 u_{ty} 构成的方程组,计算结果如图 8 和图 9 所示。

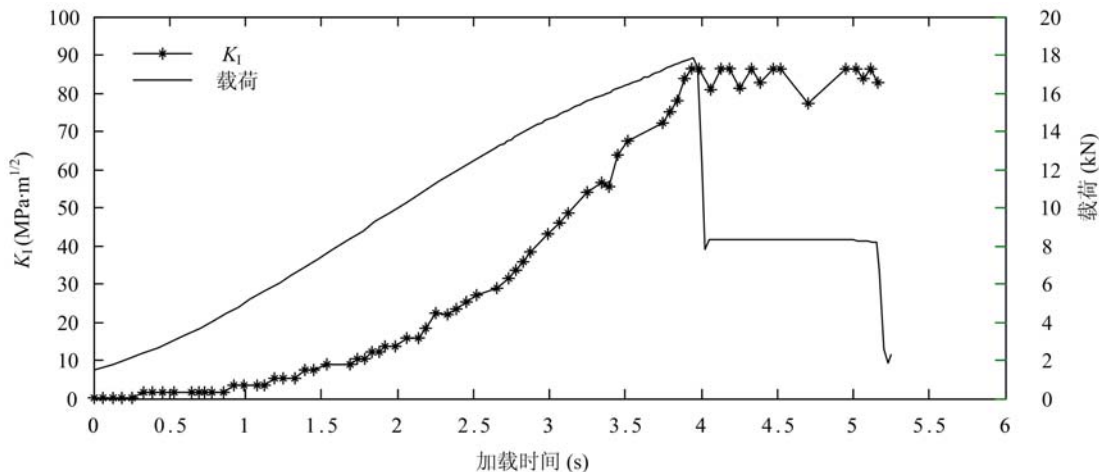


图8 载荷、应力强度因子 K_I -时间曲线
Fig. 8 The curves of load-time and K_I -time

图8中分别给出了载荷-时间曲线和应力强度因子 K_I -时间曲线。载荷-时间曲线中,载荷峰值 $P_{\max} = 17.828\text{kN}$,峰值前载荷没有明显的僵持阶段,峰值后载荷骤降并有小段僵持阶段,表明裂纹失稳扩展前呈线弹性断裂特征。应力强度因子 K_I -时间曲线中,在载荷峰值前, K_I 伴随载荷 P 的增加

呈近线性增大,载荷峰值时刻 K_I 达到极值并在峰值后的载荷僵持阶段趋于常量,该临界值为试件的断裂韧度即 $K_{Ic} = 86.5 \text{ MPa}^{1/2}$ 。

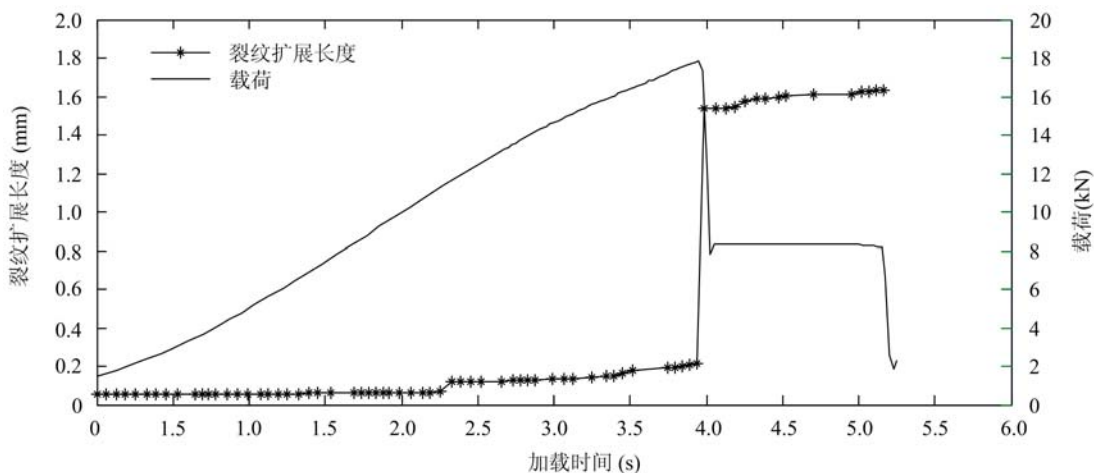


图 9 载荷、裂纹扩展长度—时间曲线

Fig. 9 The curves of load-time and crack extension length Δa -time

图 9 中分别给出了载荷—时间曲线和裂纹扩展长度—时间曲线,裂纹扩展长度 Δa 是新的裂尖位置和初始裂尖位置沿裂纹扩展路径的长度值。从加载到载荷峰值前,裂纹扩展了 0.16mm,扩展不明显,不存在裂纹扩展过程区;载荷峰值时刻裂纹急速扩展了 1.48mm,图 10 中(c)和(d)分别对应于载荷峰值前后裂纹法向方向的位移场云图,对比图(c)、(d)可见裂尖位置沿预置裂纹方向发生了明显的扩展,表明裂纹扩展为失稳扩展方式。

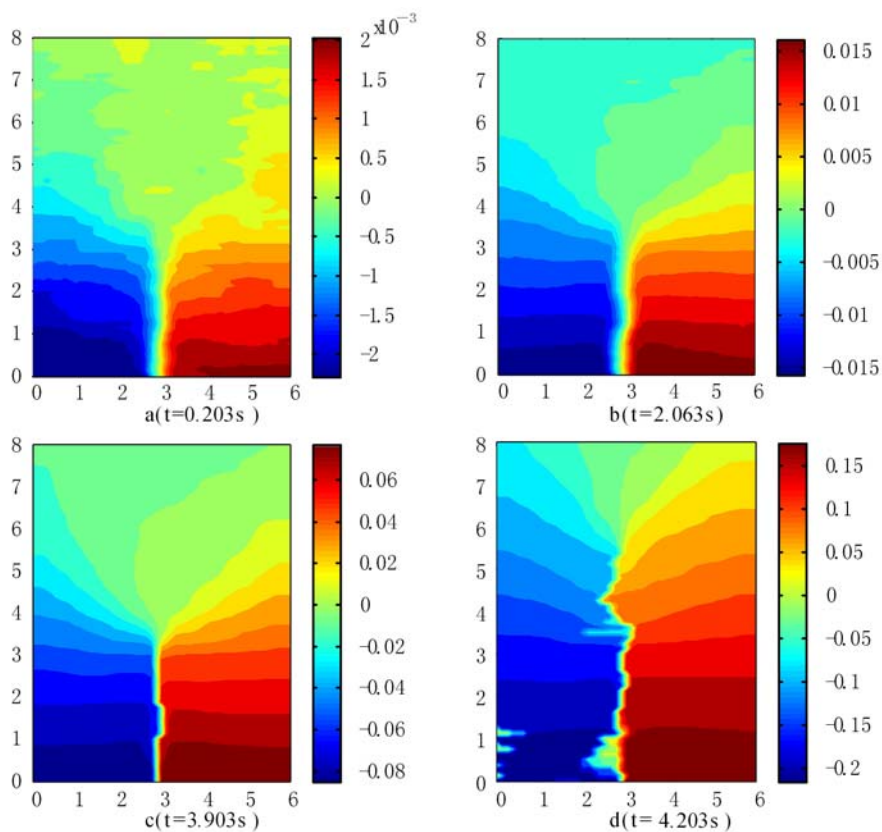


图 10 裂尖区域不同临界时刻沿 Y 方向的位移场云图(单位:mm)

Fig. 10 The Y direction displacement contour maps around the crack tip at different critical times (unit: mm)

图 10 是在载荷 P 施加过程中,裂尖分析区域内沿裂纹法线方向的位移场云图,位移场云图的分布

特征同 I 型裂纹位移场的理论分布特征一致。图 10(a)为加载初始阶段的位移场云图,图中位移量在微米的数量级;图 10(b)中位移量上升到 $10\mu\text{m}$ 的数量级;图 10(c)是载荷峰值时刻的位移场云图,图中位移场梯度增大,裂尖位置明显;图 10(d)是载荷峰值后的位移场云图,从图中不难判断裂纹发生了失稳扩展。表 2 是图 10 中各位移场云图对应时刻的实验数据与断裂参数。

表 2 图 10 对应时刻点的实验结果

Tab. 2 The experimental results corresponding to the figure 10

加载时间 $t(\text{s})$	载荷(kN)	K_{I} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	$\Delta a(\text{mm})$	$P / P_{\text{max}} \times 100 \%$
0.203	2.069	0.1754	0.057	11.6
2.063	10.246	13.808	0.062	54.5
3.903	17.828	86.500	1.540	100
4.203	8.299	86.412	1.542	46.5

4 结论

实验研究表明,通过数字散斑相关方法观测裂尖区域的位移场,采用牛顿-拉普森方法求解裂尖坐标系下位移分量和位移方程构成的非线性方程组,可以准确计算裂纹应力强度因子和裂尖位置,进而计算试件的断裂韧度和裂纹扩展长度;位移方程最高级数项 n 对于计算结果收敛性具有重要影响;合理设定数据点距裂尖的距离能够减小裂尖塑性变形对计算的影响。本文提出的实验方法解决了以往实验方法因不能确定裂尖位置,而不能准确计算裂纹应力强度因子的难题;通过该方法可以有效分析金属材料在外载荷作用下, I 型裂纹的应力强度因子 K_{I} 和裂纹扩展长度 Δa 的演化过程。

参考文献:

[1] 吴志学. 估算裂纹应力强度因子的新方法[J]. 力学学报, 2006, 38(3):414—420(WU Zhixue. A new method for evaluating stress intensity factors of planar crack in 3-D solid[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(3):414—420(in Chinese))

[2] 梁益龙, 雷昊 等. 板条马氏体钢的断裂韧性 with 缺口韧性、拉伸塑性的关系[J]. 金属学报, 1998, 34(9):950—958 (LIANG Yilong, LEI Min, et al. The Relationship Between Fracture Toughness and Notch Toughness, Tensile Ductilities in Lath Martensite Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1998, 34(9):950—958(in Chinese))

[3] 赵大华, 李华锋. 用光弹性法测定复合应力强度因子[J]. 实验力学, 2006, 21(4):513—518(ZHAO Da-hua, LI Hua-feng. Photoelastic Method for Determination of Mixed Mode Stress Intensity Factors[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(4):513—518 (in Chinese))

[4] Chiang F. Moire and speckle methods applied to elastic-plastic fracture studies[C]//In: Experimental Techniques in Fracture Mechanics, 3rd edn (J. S. Epstein, ed.). VCH, New York, 1993: 291—325.

[5] Sanford R J. Determining fracture parameters with full field optical methods[J]. Exp Mech, 1989, 29(3):241—247.

[6] Olden E J, Patterson E A. Optical analysis of crack tip stress fields: a comparative study [J]. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct, 2004, 277:623—636.

[7] 云礼宁, 马少鹏 等. 用数字散斑相关方法研究竹材在拉伸载荷下的断裂行为[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3):258—261(YUN Lining, MA Shaopeng, et al. Experimental Study of the Fracture Behavior of Bamboo Under Tension Based on Digital Speckle Correlation Method[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(3):258—261(in Chinese))

[8] Rethore J, Gravouil A, Morestin F, Combescure A. Estimation of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral I[J]. J Fract, 2005, 132:65—79.

[9] Lopez-Crespo P, Shterenlikht A, Patterson E A, et al. The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation[J]. J Strain Anal, 2008, 43(8):769—780.

[10] Sutton M A, Cheng M, Peters W H, et al. Application of an optimized digital image correlation method to planar

- deformation analysis[J]. Image Vision Computing, 1986, 4(3):143—150.
- [11] Sutton M A, Wolters W J, Peters W H, et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method[J]. Image Vision Computing, 1983, 1(3):133—139.
- [12] 江泽慧, 费本华 等. 数字散斑相关方法在木材科学中的应用及展望[J]. 中国工程科学, 2003, 5(11):1—7(Jiang Zehui, Fei Benhua, et al. Application and Prospect of Digital Speckle Correlation Method on Wood Science[J]. Engineering Science, 2003, 5(11):1—7(in Chinese))
- [13] 王强, 王彪 等. 超弹性 NiTi 合金裂纹尖端应变场的数字散斑相关方法[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(2):143—147(WANG Qiang, WANG Biao, et al. Digital speckle correlation method for strain field near crack tip in superelastic NiTi alloy[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(2):143—147(in Chinese))
- [14] 金鑫, 吴林志 等. NiCr/ZrO₂ 功能梯度复合材料中混合型准静态裂纹启裂的数字散斑相关方法实验研究[J]. 复合材料学报, 2009, 26(6):150—154(JIN Xin, WU Linzhi, et al. Experimental investigation of the quasi-static mixed mode crack initiation in NiCr/ZrO₂ functionally graded materials by digital image correlation[J]. Acta Materiea Compositae Sinica, 2009, 26(6):150—154(in Chinese))
- [15] 马少鹏, 金观昌, 潘一山. 白光 DSCM 方法用于岩石变形观测的研究[J]. 实验力学, 2002, 17(1):10—16 (MA Shao-peng, JIN Guan-chang, PAN Yi-shan. Study on the White Light DSCM Method for Deformation Measurement of Rock Materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(1):10—16 (in Chinese))
- [16] 代树红, 马胜利, 潘一山 等. 隐伏走滑断层破裂扩展特征的实验研究[J]. 地震地质, 2006, 28(4):635—645 (DAI Shu-hong, MA Sheng-li, PAN Yi-shan, et al. Experimental study on rupture propagation along buried strike-slip fault [J]. Seismology and Geology, 2006, 28(4):635—645(in Chinese))
- [17] 王洪山. 实用疲劳裂纹预制机[J]. 理化检验物理分册, 2002, 38(8):363—367(WANG Hongshan. Practical Fatigue Precracking Machine[J]. Ptca (Part A: Physical Testing), 2002, 38(8):363—367 (in Chinese))
- [18] WANG Hongshan. Principle and Method for Determining Fracture Toughness of Structural Steel by Side Cut SE (B) [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1994, 48(6):885—890.
- [19] 庄茁, 蒋持平. 工程断裂与损伤[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004:27—30(ZHUANG Zhuo, JIANG Chiping. Engineering fracture and damage [M]. Beijing: China Machine Press, 2004:27—30 (in Chinese))

Determination of Mode I Stress Intensity Factors by Digital Speckle Correlation Method

DAI Shu-hong^{1,2}, MA Sheng-li², PAN Yi-shan¹, WANG Hong-shan¹

(1. School of Engineering and Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. State Key laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: An experimental method for determining mode I stress intensity factors and crack tip position of metal specimen by digital speckle correlation method is proposed in this paper. Before test, a precrack was made in front of the notch on a Cr12MoV specimen by fatigue testing machine, the crack growth process and the displacement contour map around crack tip of specimen were measured by digital speckle correlation method under three-point bending load condition. Then the displacement data were substituted into the non-linear crack tip displacement equations, and the equations were solved by Newton-Simpson method, the crack tip position and stress intensity factor were calculated. Experimental results show that the mode I stress intensity factor, the crack tip position and crack growth length of a metal specimen can be evaluated accurately from the displacement components by the proposed method, and the stress intensity factor's evolution features during crack growth process were also revealed.

Keywords: digital speckle correlation method; mode I stress intensity factor; crack extension length; nonlinear method