纤维束诱导基体裂纹变形场 DGS 实验研究

原亚南, 郝文峰, 马寅佺, 刘彬, 姚学锋*

清华大学航天航空学院固体力学研究所, 北京 100084

* E-mail: yxf@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2014-10-23; 接受日期: 2015-01-22

国家重点基础研究发展计划(编号: 2011CB606105)资助项目

摘要 本文主要利用数字梯度敏感方法(DGS)和 Eshelby 等效夹杂理论研究纤维束与基体裂纹的相互作用机制. 首先, 利用 DGS 方法得到了碳纳米管改性纤维束模型、未改性纤维束模型基体裂纹尖端的位移场分布及演化规律, 并提取了相应的基体裂纹尖端应力强度因子. 其次, 利用 Eshelby 等效夹杂理论分析了碳纳米管改性纤维束模型、未改性纤维束模型的基体裂纹尖端应力强度因子的影响机制. 最后, 比较了碳纳米管改性纤维束夹杂和未改性纤维束夹杂两种模型中基体裂纹尖端应力强度因子的理论预测结果与 DGS 实验结果, 吻合较好. 研究成果为纤维束与基体相互作用机制提供了可靠的实验依据及理论参考.

关键词

DGS 方法

纤维束与基体相互作用

碳纳米管改性

等效夹杂理论

应力强度因子

1 引言

数字梯度敏感方法(digital gradient sensing, DGS)是一种新型的全场光学测量技术, 具有光学设备简单、抗外界干扰能力好等优点, 在材料变形与断裂问题实验研究中具有显著的优势和潜在的应用前景.

DGS 方法^[1]是一种非接触光学测试手段, 其原理在于光线透过试件的折射率和试件厚度随应力状态发生变化, 从而导致通过试件的光线发生偏转, 通过数字图像相关技术得到光线通过受力试件的偏转量来确定受力试件的主应力和梯度及面内位移分布. DGS 方法最先由 Tippur 提出, 并将其应用于有机玻璃的静动态断裂^[1]、集中载荷作用下的有机玻璃静动态应力集中问题^[2]、透明件无损检测^[3]等研究领域. 同时, Tippur 等还发展反射式 DGS 方法, 并将其应用于薄膜材料的离面位移测量^[4].

基体裂纹与纤维的相互作用机制一直是复合材料细观力学关注的科学问题. 本文将 DGS 测量方法应用于纤维束诱导基体裂纹尖端变形场演化的实验研究中, 同时结合 Eshelby 等效夹杂理论, 研究碳纳米管改性纤维束对基体裂纹尖端应力强度因子的影响机制.

2 DGS 实验原理及模型

2.1 DGS 实验装置及原理

DGS 方法的实验装置见图 1, 包括: 散斑标志物、待测试件、照相机. 标志物表面用油漆喷涂一层黑白随机斑点. 待测试件放置在散斑标志物前方(距离 Δ), 并与标志物所在平面平行. 在待测试件后方与其相距 $L(L \gg \Delta)$ 的地方放置一长焦相机, 将焦平面调整到散斑标志物上. 通过冷光源给予散斑标志物充

引用格式: 原亚南, 郝文峰, 马寅佺, 等. 纤维束诱导基体裂纹变形场 DGS 实验研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 476–482
Yuan Y N, Hao W F, Ma Y J, et al. Experimental study of deformation field around the matrix crack induced by fiber bundles using DGS method (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 476–482, doi: 10.1360/N092014-00377

图1 DGS方法试验装置^[1]

足均匀的光线。

由图1所示, 试件所在平面坐标系为 (x, y) , 散斑标志物所在平面坐标系为 (x_0, y_0) , 光轴沿 Z 方向。假设散斑标志物平面的斑点通过厚度为 d 、折射率为 n 的试件, 成像于相机平面, 初始状态为参考状态。那么, 散斑面的 P 点对应于试件上的 O 点, 作为参考状态下的点成像于相机平面。当试件受到载荷作用后, 折射率和试件厚度都将随应力状态发生变化, 将导致通过试件的光线发生偏转。参考状态下光线 $\overline{OP}$ 现在对应于变形后的 $\overline{OQ}$, 通过测量向量 $\overline{PQ}$ 以及散斑标志物与试件之间的距离 Δ , 偏离光轴角度 ϕ_x, ϕ_y 就能确定, 最后试件的面内位移和裂纹尖端的应力强度因子等信息即可确定。

2.2 实验模型

图2为制备出的芳纶纤维束实验试件模型(长、宽、厚分别为160, 60和5 mm)。芳纶纤维采用聚对苯甲酰胺纤维 Kevlar-49, 具有较高的比强度、比刚度和抗冲击断裂韧性。纤维束分为未改性纤维束和碳纳米管改性纤维束两种情况。其中, 改性前芳纶纤维束直径为1 mm, 改性后纤维束直径为1.5 mm, 改性用的多壁碳纳米管直径范围为10~20 nm, 长度小于2 μm , 基体为环氧树脂。图3为未改性纤维束/树脂试样在DGS实验光路中的散斑图, 在纤维束模型散斑图中每33个像素点代表1 mm, 对于纯树脂模型散斑图中每64个像素点代表1 mm。图中分别标注出了纤维束的位置、基体裂纹的位置。将厚度为0.1 mm的聚四氟乙烯薄膜裁剪成预制裂纹的大小, 轻轻放置

到试件的待开裂位置并固定, 固化完成后拔出聚四氟乙烯薄膜得到预制裂纹。本实验全部试样均采用相同的裂纹长度, 其中裂纹面的长度为15 mm, 本文研究当裂纹尖端距离 $a_0=15$ mm时, 纤维对裂纹尖端应力强度因子的影响。此外, 本文采用三点弯曲加载方式, 跨距为120 mm。如图3所示。

2.3 应力强度因子提取

基于如下假设: 纤维束在裂纹尖端 K 主导区外, 裂纹尖端应力场的角分布函数不受纤维束影响。对于平面应力问题, I型基体裂纹尖端应力场 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 表达式为^[5]

图2 (网络版彩图)试样示意图
(a) 未改性纤维束/树脂试样; (b) 碳纳米管改性纤维束/树脂试样

图3 实验加载装置示意图

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_{tip}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]; \\ \sigma_y &= \frac{K_{tip}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]; \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{tip}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}.\end{aligned}\quad (1)$$

其中, K_{tip} 表示裂纹尖端应力强度因子, r , θ 是极坐标系分量. 由 DGS 方法测量原理可得^[1]

$$\frac{\partial(\sigma_x + \sigma_y)}{\partial x} \approx \frac{\delta_x}{\Delta C d}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\sigma_x + \sigma_y)}{\partial y} \approx \frac{\delta_y}{\Delta C d}. \quad (3)$$

其中, 等式的左边表示主应力和梯度分量, δ_x , δ_y 分别为测量点在 x , y 方向上的位移分量, Δ 为裂纹尖端到散斑标志物的距离, C 为各向同性透明材料的光学常数, 这里取 $C = -0.75 \times 10^{-10} (\text{m}^2/\text{N})$.

结合方程(1)~(3), 可以推导出纤维束附近基体裂纹尖端应力强度因子的表达式

$$K_{tip} = \frac{\sqrt{2\pi} \delta_x r^{\frac{3}{2}}}{\Delta C d \cos \frac{3\theta}{2}} = \frac{\sqrt{2\pi} \delta_y r^{\frac{3}{2}}}{\Delta C d \sin \frac{3\theta}{2}}. \quad (4)$$

3 DGS 实验结果

通过数字图像相关分析技术^[6-8], 得到裂纹尖端附近区域的面内位移即 δ_x , δ_y . 数字图像相关的计算区域(region of image, ROI)如图 3 中矩形框所示. 图 4 和 5 为两种试件基体裂纹尖端区域的面内位移条纹图, 图中标注出了基体裂纹和芳纶纤维的位置, 图中条纹上的数字单位为像素点. 图 4 和 5 的左列为 X 方向位移条纹图, 右列为 Y 方向位移条纹图. 在三点弯曲实验中, 裂纹尖端处的位移分布规律明显, X 方向上的位移关于裂纹方向呈反对称分布, 且以裂纹尖端处为起点向外呈辐射状扩展, 裂纹尖端处位移最大, 向外扩展位移逐渐减小. Y 方向上的位移关于裂纹方向呈对称分布, 且同样遵循裂纹尖端处位移最大, 向外扩展位移逐渐减小的规律. 图 6 为纯环氧树脂

图 4 (网络版彩图)未改性纤维束试件中裂尖周围的位移云图

(a) $\delta_x (F=100 \text{ N})$; (b) $\delta_y (F=100 \text{ N})$; (c) $\delta_x (F=200 \text{ N})$; (d) $\delta_y (F=200 \text{ N})$

图 5 (网络版彩图)碳纳米管改性纤维束试件中裂尖周围的位移云图

(a) $\delta_x(F=100\text{ N})$; (b) $\delta_y(F=100\text{ N})$; (c) $\delta_x(F=200\text{ N})$; (d) $\delta_y(F=200\text{ N})$

脂试件基体裂纹尖端 Y 方向位移分布云图. 由图 4 和 5 的 Y 方向位移条纹图并结合图 6 分析可知, Y 方向的位移分布在靠近纤维束时趋于稳定, 并且纤维束极大地限制了 Y 方向位移的扩展, 该现象在碳纳米管改性纤维束模型中更加显著.

4 纤维增韧效应分析

4.1 裂纹尖端应力强度因子

基于图 4 和 5 中裂纹尖端附近区域的面内位移即 δ_x , δ_y , 根据公式(4)得到距离基体裂纹尖端不同距离的应力强度因子, 通过回归分析方法得到两种试验模型中基体裂纹尖端应力强度因子. 由图 7 可见, 对于未改性纤维束和改性纤维束两种模型中基体裂纹尖端的应力强度因子均随着载荷的增加而增加. 此外, 对于纤维束未改性的模型, 求解得到的裂纹尖端应力强度因子在相同载荷情况下均比碳纳米管改性

纤维束模型基体裂纹尖端应力强度因子大, 这表明, 利用碳纳米管对纤维束进行改性, 可以有效的降低基体裂纹尖端应力强度因子.

4.2 基体裂纹与纤维束的相互作用效应分析

4.2.1 纤维束对基体裂纹奇异场的影响

基于基体裂纹与纤维束相互作用的平面问题, 提出如下假设: 1) 本文的研究模型在宽度方向相对于纤维近似为平面对称板; 2) 纤维束在基体裂纹 K 主导区之外, 故认为在纤维夹杂作用下, I 型裂纹尖端的经典应力场仍然成立; 3) 纤维束关于基体裂纹面对称且假设纤维束与基体的粘接是完好的.

图 8 为纤维束附近的基体裂纹模型, 本文中考虑取 $a_0=15\text{ mm}$ 来研究纤维对裂纹尖端应力强度因子的影响. 这里假设基体为各向同性, 纤维束为横观各向同性, 根据脆性材料的相变增韧理论, 裂纹尖端应力强度因子的微分表达式为^[5,9]

图6 (网络版彩图)纯环氧树脂试件中裂尖周围Y方向位移云图

 (a) $\delta_x(F=100\text{ N})$; (b) $\delta_y(F=100\text{ N})$; (c) $\delta_x(F=200\text{ N})$; (d) $\delta_y(F=200\text{ N})$

图7 三种模型下裂纹尖端应力强度因子对比

$$dK_{\text{tip}} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \frac{E_m}{1-\nu^2} r^{-\frac{3}{2}} f(\varepsilon_{\alpha\gamma}^T, \theta) dA, \quad (5)$$

式中,

$$f(\varepsilon_{\alpha\gamma}^T, \theta) = (\varepsilon_{11}^T + \varepsilon_{22}^T) \cos \frac{3\theta}{2} + 3\varepsilon_{12}^T \cos \frac{5\theta}{2} \sin \theta + \frac{3}{2} (\varepsilon_{22}^T - \varepsilon_{11}^T) \sin \theta \sin \frac{5\theta}{2}, \quad (6)$$

图8 纤维束垂直于基体裂纹面示意图

其中 $\varepsilon_{11}^T, \varepsilon_{22}^T, \varepsilon_{12}^T$ 为区域 (r, θ) 处无约束转换应变分量, E_m, ν 分别为基体弹性模量和泊松比, dA 为夹杂的微元面积。

夹杂中应变等效转换矩阵 ε^T 随施加在物体上的应变 ε^A 变化, 基于 Eshelby 等效夹杂理论, 等效转换矩阵 ε^T 可表示^[10]为

$$\varepsilon^T = [(C_f - C_m)S + C_m]^{-1}(C_m - C_f)\varepsilon^A, \quad (7)$$

式中 ε^A 为施加在物体上的应变, C_f , C_m 分别为纤维束和基体的刚度矩阵, S 为 Eshelby 张量, 与材料的泊松比有关. 通过积分化简计算得到^[11]

$$\Delta K_{\text{tip}} \approx \frac{WK_0}{\pi a_0(1-\nu)}(H_1 - H_3). \quad (8)$$

对于树脂中的纤维束, 纤维束刚度大于基体的刚度, 因此,

$$\frac{K_{\text{tip}}}{K_0} = \frac{K_0 + \Delta K_{\text{tip}}}{K_0} = 1 + \frac{W}{\pi a_0(1-\nu)}(H_1 - H_3), \quad (9)$$

其中, ΔK_{tip} 表示纤维对裂纹尖端应力强度因子的改变量; K_0 表示无纤维夹杂时基体裂纹尖端应力强度因子, W 表示纤维的宽度, a_0 表示裂纹尖端距纤维的距离, H_1 , H_3 的表达式见文献[11]所示.

4.2.2 纤维束增韧效应分析

公式(9)中 K_{tip}/K_0 表征了纤维束对基体裂纹尖端应力强度因子的影响及对裂纹的阻裂作用. 比值越小, 纤维束对基体裂纹的阻裂作用越明显. 公式(9)从理论上预测了纤维束对基体裂纹尖端应力强度因子影响的归一化结果, 通过数值计算, 得到未改性纤维束模型和改性纤维束模型基体裂纹尖端的应力强度因子 K_{tip} 比未夹杂模型 K_0 分别降低了 6.9% 和 14%, 说明改性纤维束的增韧效果优于未改性纤维束.

此外, 通过 DGS 实验方法得到了两种实验模型基体裂纹尖端应力强度因子 K_{tip}/K_0 的比值. 图 9 为实验测量得到的 K_{tip}/K_0 与 Eshelby 夹杂理论预测的对比结果. 由图可见, 理论预测的 K_{tip}/K_0 与载荷无关, 实验得到的 K_{tip}/K_0 随着载荷的变化而变化. 对于未改性纤维束模型, 实验结果在理论预测结果上下 4% 范围波动, 而对于碳纳米管改性纤维束模型, 实验结果大部分数据点(除第二个点)在理论预测结果上下 14.7% 范围内波动. 由于理论预测中没有考虑到纤维与基体之间界面粘结性能的改变, 而实验中界面粘结性能势必对裂纹尖端的应力强度因子产生影响, 这也是理论与实验结果存在差异的原因之一. 此外, 实验中数字图像相关误差和回归分析中求解应力强度因子的误差也是导致增韧效果的理论与实验结果存在差异的部分原因.

5 总结

本文主要利用 DGS 方法与 Eshelby 等效夹杂理论研究纤维束与基体裂纹的相互作用力学机制, 得到如下结论.

1) DGS 方法直观地再现了纤维束附近基体裂纹尖端的位移场演化规律. 其中纤维束的存在极大限制了 Y 方向位移的增加, 该现象在碳纳米管改性纤维束模型中更加显著.

2) 对于未改性纤维束和改性纤维束两种模型, 其基体裂纹尖端的应力强度因子均随着载荷的增加而增加, 但是碳纳米管改性纤维束模型中基体裂纹

图 9 增韧效果的实验与理论对比

(a) 未改性纤维束模型; (b) 碳纳米管改性纤维束模型

应力强度因子明显低于未改性纤维束模型中基体裂纹应力强度因子, 即碳纳米管改性纤维束可以有效的降低裂纹尖端应力强度因子, 改性纤维束的增韧效果优于未改性纤维束。

3) 通过 Eshelby 等效夹杂增韧理论预测纳米改性纤维束和未改性纤维束两种模型中基体裂纹尖端应力强度因子比值 K_{tip}/K_0 与通过 DGS 实验得到的 K_{tip}/K_0 结果吻合较好。

参考文献

- 1 Periasamy C, Tippur H V. Measurement of crack-tip and punch-tip transient deformations and stress intensity factors using Digital Gradient Sensing technique. *Eng Fract Mech*, 2013, 98: 185–199
- 2 Periasamy C, Tippur H V. Full-field digital gradient sensing method for evaluating stress gradients in transparent solids. *Appl Opt*, 2012, 51: 2088–2097
- 3 Periasamy C, Tippur H V. Nondestructive evaluation of transparent sheets using a full-field digital gradient sensor. *NDT E Int*, 2013, 54: 103–106
- 4 Periasamy C, Tippur H V. A full-field reflection-mode digital gradient sensing method for measuring orthogonal slopes and curvatures of thin structures. *Meas Sci Technol*, 2013, 24: 202–250
- 5 Sih G C, Paris P C, Erdogan F. Crack-tip, stress-intensity factors for plane extension and plate bending problems. *J Appl Mech*, 1962, 29: 306–312
- 6 Yao X F, Wang P, Dai R C. Experimental study of damage and fracture of cancellous bone using a digital speckle correlation method. *J Biomed Opt*, 2008, 13: 26–34
- 7 Yao X F, Meng L B, Jin J C, et al. Full-field deformation measurement of fiber composite pressure vessel using digital speckle correlation method. *Polym Test*, 2005, 24: 245–251
- 8 Ma Y J, Yao X F, Wang D. Experimental investigation on mechanical properties of CNT film using digital speckle correlation method. *Opt Laser Eng*, 2012, 50: 1575–1581
- 9 Li Z H, Qiang C. Crack-inclusion interaction for mode I crack analyzed by Eshelby equivalent inclusion method. *Int J Fracture*, 2002, 118: 29–40
- 10 Hutchinson J W. On steady quasi-static crack growth. Harvard University Report. 1974
- 11 郝文峰. 芳纶纤维复合材料界面力学设计与静态断裂实验研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2014

Experimental study of deformation field around the matrix crack induced by fiber bundles using DGS method

YUAN YaNan, HAO WenFeng, MA YinJi, LIU Bin & YAO XueFeng

Department of Engineering Mechanics, Applied Mechanics Lab, Tsinghua University, Beijing 100084, China

The interaction mechanism between the fiber bundle and the matrix crack using the DGS method and Eshelby equivalent inclusion theory is studied in this paper. First, the displacement field distribution and evolution around the matrix crack tip were obtained experimentally using DGS method and then the corresponding stress intensity factors were extracted from modified fiber bundle/epoxy model and pure fiber bundle/epoxy model. Second, the fracture mechanisms on crack tip stress intensity factor induced by fiber bundles have been analyzed using Eshelby equivalent inclusion theory. Finally, the ratios of K_{tip}/K_0 obtained by DGS experiment show good agreement with the result from the theory prediction. The research result provides a reliable experimental and theoretical basis for understanding the interaction mechanism between the fiber bundle and the matrix crack.

DGS method, fiber bundle/matrix interaction, MWCNTs modification, equivalent inclusion theory, stress intensity factor

doi: 10.1360/N092014-00377