

文章编号: 1000-4750(2006)03-0173-04

正交复合材料 I 型裂纹动态响应焦散线实验研究

*许 蔚¹, 徐曼琼¹, 姚学锋¹, 李 焯², 蒋元兴²

(1. 清华大学工程力学系, 北京 100084; 2. 中国航天科技集团 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

摘 要: 利用高速摄影技术与光学焦散线技术相结合, 对冲击下正交复合材料 I 型裂纹尖端的动态应力集中问题进行了光测力学实验研究。记录了两种层状碳纤维/环氧树脂复合材料在冲击作用下 I 型裂纹尖端的动态焦散斑图, 提取反映材料局部应力集中问题的力学参数: 焦散斑特征尺寸, 进而比较两种复合材料的抗冲击性能。这些研究工作对于复合材料冲击性能评估具有工程应用价值和科学研究意义。

关键词: 正交复合材料; 应力强度因子; 焦散线; I 型裂纹; 动态响应

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A

EXPERIMENTAL STUDY OF CAUSTICS OF MODE-I DYNAMIC CRACK RESPONSE IN ORTHOTROPIC COMPOSITES

*XU Wei¹, XU Man-qiong¹, YAO Xue-feng¹, LI Xuan², JIANG Yuan-xing²

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. 701 institute, Beijing 100076, China)

Abstract: High-speed Schardin photography and optical caustics method are introduced to study dynamic stress singularities of mode-I crack tip in orthotropic composites under impact. A series of dynamic caustic patterns stranding the crack tip of two kinds of laminated carbon fiber/epoxy resins composites under impact were recorded. Variations of the caustic shape diameter due to the local stress singularity at the crack tip were examined. The characteristic size of caustics that is related to the mechanical parameter of local stress concentration was measured. The impact behaviors of two kinds of composites were compared. These results can help to evaluate strength and predict service life for composite structures.

Key words: orthotropic composites; stress intensity factors; caustics; mode-I crack; dynamic response

由于复合材料的非均匀、各向异性特征, 它的力学性能存在着许多尚待研究的问题, 特别是复合材料的冲击性能评估, 目前是力学与材料科学等交叉学科领域的前沿课题, 具有重要的学术研究意义和工程应用背景。

在正交复合材料冲击性能的理论研究方面, Shindo 和 Hiroaki 分析了稳态裂纹尖端的应力强度

因子^[1]; Achenbach 和 Bazant, Piva 和 Viola 研究了以常速度扩展裂纹尖端的应力场与位移场^[2~4]; P.S.Theocaris 和 H.G.Georgiadis 描述了正交板中静止的 III 型裂纹尖端的应力强度因子分布^[5]。1996 年 Kwang-Ho Lee 建立了正交各向异性复合材料 I-II 混合型扩展裂纹尖端的应力场与位移场的理论解^[6]。但是这些理论研究缺少适合的实验方法进行

收稿日期: 2004-04-14; 修改日期: 2004-06-28

基金项目: 国家自然科学基金研究项目(19902008)

作者简介: *许 蔚(1976), 男, 云南人, 博士生, 主要从事光测实验力学研究(E-mail: xuww02@mails.tsinghua.edu.cn);

徐曼琼(1975), 女, 云南人, 工程师, 主要从事实验力学研究;

姚学锋(1966), 男, 河南人, 副教授, 主要从事实验力学, 复合材料力学研究;

李 焯(1973), 女, 吉林人, 工程师, 主要从事复合材料研究;

蒋元兴(1964), 男, 浙江人, 高级工程师, 主要从事复合材料研究。

验证和进一步的对材料抗冲击性能的分析。

高速摄影与光学焦散线相结合的技术已经广泛应用于均匀各向同性材料的冲击断裂力学研究中^[7~11], 相对来说用于研究复合材料的冲击性能则文献涉及较少。本文利用该技术记录冲击载荷作用下两种正交结构复合材料变形过程中的动态光学信息斑图, 确定复合材料的 K_I 值, 比较抗冲击性能, 为正交复合材料的冲击性能评估提供一个切实可行的实验依据。

1 正交复合材料 I 型稳态裂纹尖端应力集中问题的焦散线方程

根据焦散线形成的几何光学原理, 它是指观察屏上的一高亮度曲线, 即把所研究的奇异区内的特征状态通过几何光学原理变换为参考屏上可进行测量的几何曲线, 通过对焦散线特征长度的测量和简单的计算, 就可以得到有关代表奇异特征的力学参量。反射焦散线形成的基本原理和光路系统见图 1。

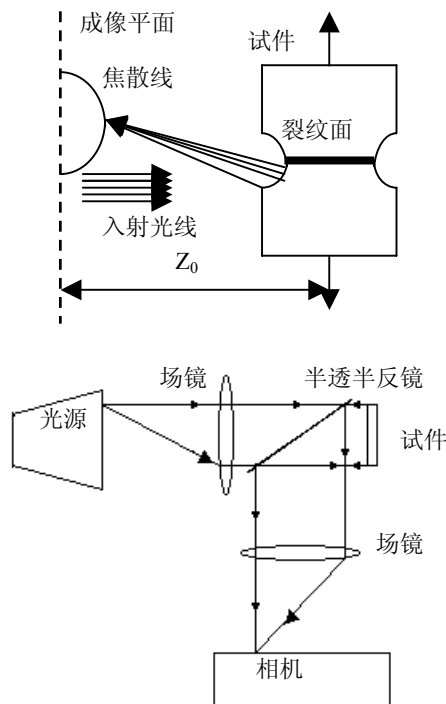


图 1 反射焦散线形成原理与光路

Fig.1 The optical principle and the set up of reflection caustics

对于正交复合材料 I 型稳态裂纹尖端的应力集中问题, 文献[9]根据 Semenski 得出的解析解^[10]以及反射型焦散线形成的基本原理, 得到了试件

裂纹尖端的初始曲线方程:

$$r_0 = (Z_0 d \frac{K_I}{\lambda \sqrt{2\pi}})^{\frac{2}{5}} M_0 \quad (1)$$

及其对应的参考平面上的焦散线参数方程:

$$X = \lambda^{\frac{3}{5}} (Z_0 d \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}})^{\frac{2}{5}} \cdot [M_0 \cos \theta + M_0^{-\frac{3}{2}} (-\frac{L_1}{2} \cos \theta - \frac{\partial L_1}{\partial \theta} \sin \theta)] \quad (2)$$

$$Y = \lambda^{\frac{3}{5}} (Z_0 d \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}})^{\frac{2}{5}} \cdot [M_0 \sin \theta + M_0^{-\frac{3}{2}} (-\frac{L_1}{2} \sin \theta + \frac{\partial L_1}{\partial \theta} \cos \theta)] \quad (3)$$

其中: Z_0 代表成像平面到试件的距离, d 代表试件厚度, λ 代表光路的放大倍数, 此外, 式(1)、(2)、(3)中各个符号的意义表述如下:

$$M_0 = [-\frac{M_1}{2} + \sqrt{(\frac{M_1}{2})^2 - M_2}]^{\frac{2}{5}}$$

$$M_1 = \frac{1}{4} L_1 + \frac{\partial^2 L_1}{\partial \theta^2}$$

$$M_2 = -\frac{3}{2} [\frac{1}{4} L_1^2 - \frac{1}{2} L_1 \frac{\partial^2 L_1}{\partial \theta^2} + \frac{3}{2} (\frac{\partial L_1}{\partial \theta})^2]$$

$$L_1 = \text{Re}[\frac{1}{F} [A_1 C^{-\frac{1}{2}} - B_1 D^{-\frac{1}{2}}]]$$

$$A_1 = \mu_1 (\mu_2^2 S_{13} + S_{23} - \mu_2 S_{36})$$

$$B_1 = \mu_2 (\mu_1^2 S_{13} + S_{23} - \mu_1 S_{36})$$

$$C = \cos \theta + \mu_2 \sin \theta \quad D = \cos \theta + \mu_1 \sin \theta$$

$$F = \mu_1 - \mu_2$$

其中 S_{ij} 为材料柔度系数, θ 代表试件平面极坐标, μ_1 、 μ_2 为下式的两复数根:

$$S_{11} \mu_k^4 - 2S_{16} \mu_k^3 + (2S_{12} + S_{66}) \mu_k^2 - 2S_{26} \mu_k + S_{22} = 0$$

2 试件及实验装置

2.1 层状碳纤维/环氧树脂复合材料

本文选用的试件为层状碳纤维/环氧树脂材料, 其中碳纤维为T300, 环氧树脂为WSR618, 它们是通过热压罐固化工艺制造而成。它们的铺层方式相同: $\{\pm 45/90/0/(\pm 45)_4\}_s$, 厚度为3.5mm。其中A材料纤维含量为56%, B材料纤维含量65%。试件的尺寸为 $100 \times 25 \text{ mm}^2$ 。试件开有单边裂纹, 裂纹尺寸为 $5 \times 0.6 \text{ mm}$ 。两种材料的弹性力学常数用电测方法根据国标GB3354—82, GB3355—82测量得到, 见表1:

表1 两种材料的弹性力学常数

Table 1 Material constants

材料	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	G_{12}/GPa	ν_{12}	ν_{21}
A	31.7	38.1	8.0	28.1	0.45	0.37
B	34.8	31.4	8.0	27.5	0.38	0.42

由于复合材料非透明, 表面粗糙不平, 不能达到有效反射光线的要求。所以试件表面需要转移粘贴一层 50 微米厚的铝膜反射镜面, 以适用于反射光学实验的要求, 如图 2 所示:

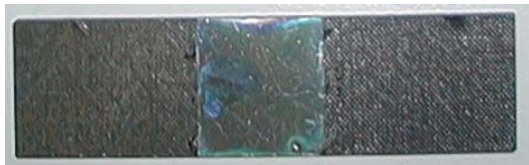


图2 粘贴镜面反射膜的复合材料试件

Fig.2 An orthotropic composite sample with reflective film

2.2 高速摄影与冲击加载装置

高速摄影装置主要由多火花放电系统、光学记录系统、同步延迟控制系统组成。多火花放电系统由 4×4 个放电火花方阵组成, 其触发信号是幅间距从 1~9999 微妙连续可调的脉冲信号。通过延迟控制系统按事先设置的时间间隔触发 16 个电火花放电发光, 光线最后汇聚于 4×4 相机方阵组成的照相机, 从而记录冲击下不同瞬时的焦散线图像。

冲击加载装置主要由自由落锤系统组成, 落锤质量为 2kg, 高度 70cm。为了保证落锤的铅垂下落, 落锤被两根铅直导轨所约束。实验中落锤下落方向平行于裂纹方向, 试件受三点弯曲, 裂纹为 I 型裂纹, 加载装置如图 3 所示:

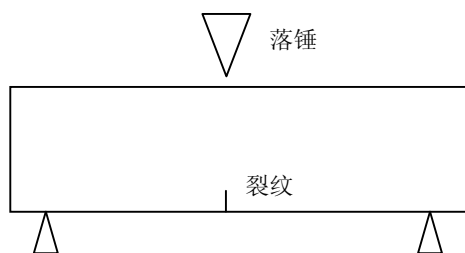


图3 三点弯曲加载

Fig.3 Loading configuration

3 结果与分析

3.1 冲击下正交复合材料 I 型稳态裂纹尖端的动态焦散斑演化

利用高速摄影装置和动态焦散线方法, 对

A、B 两种正交复合材料的 I 型裂纹尖端应力集中问题进行了动态实验研究。每种材料分别进行了 10 组实验, 其中具有代表性的动态焦散斑光学模式如图 4 所示, 图中标出时间为落锤与试件开始接触到拍摄时的间距。

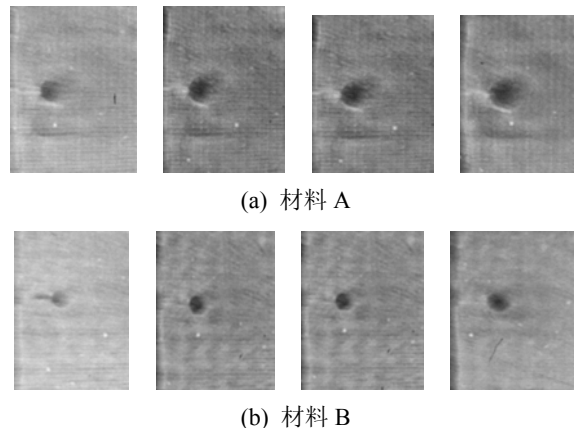


图4 I型稳态裂纹尖端应力集中的动态焦散斑图

Fig.4 Recorded caustics of mode-I dynamic crack

由图 4 可以看出, 在冲击载荷作用下, 复合材料 I 型裂纹尖端的应力集中不断演化, 主要体现在反映应力集中的焦散斑几何图像的不断变化。对于所研究的两种复合材料来讲, 由于它们的弹性力学性能不同, 因而它们各自裂纹尖端应力奇异性不同, 反映到焦散线图像上, 表现在它们的形状和几何尺寸的变化。这些变化特征在冲击载荷下具有振荡性, 并且与每种复合材料的弹性常数, 各向异性, 界面特性, 应用载荷等因素有关。与均质各向同性材料 I 型裂纹尖端的焦散斑特征相比, 复合材料裂纹尖端焦散斑的几何形状显得更复杂化, 主要表现在它的形状不规则, 不光滑, 测量和分析的难度相应的增加。

3.2 I 型稳态裂纹尖端的焦散线定量表征

焦散线实验技术的主要特征在于能够定量确定裂纹尖端的应力强度因子。这里, 将表 1 材料 A 的弹性常数代入焦散线方程(2)、(3), 可以得到焦散线的数值模拟图。

在图 5 标注中, 最大横向几何尺寸 Y_c 代表焦散线的特征尺寸, 该特征尺寸由式(3)对 θ 求极值可以得到:

$$Y_c = \lambda^{\frac{3}{5}} (Z_0 d \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}})^{\frac{2}{5}} \delta_c \quad (4)$$

其中

$$\delta_c = \delta_{\theta_1} - \delta_{\theta_2}$$

$$\delta_{\theta=\theta_1, \theta_2} = [M_0 \sin \theta + M_0^{-\frac{3}{2}} (-\frac{L_I}{2} \sin \theta + \frac{\partial L_I}{\partial \theta} \cos \theta)]$$

这里 θ_1, θ_2 根据 $\frac{dY}{d\theta} = 0$ 求得。

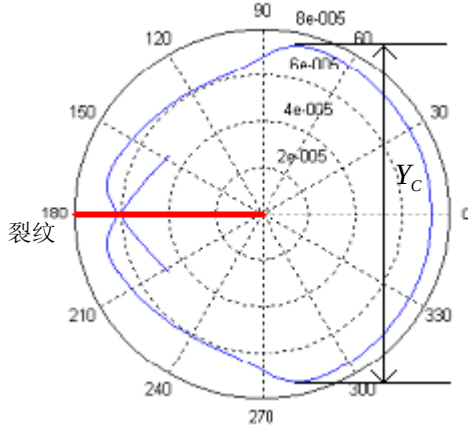


图5 焦散线数值模拟

Fig.5 Simulated caustics

由式(4)可以直接得到应力强度因子 K_I 和特征尺寸 Y_c 之间的关系:

$$K_I = \frac{\sqrt{2\pi}}{Z_0 d} \left(\frac{Y_c}{\delta_c} \right)^{5/2} \quad (5)$$

对于同一种材料而言, δ_c 是一个固定值, 因此我们只需要测量每次试验得到的特征尺寸 Y_c , 就可以由式(5)计算得到对应时刻 K_I 的大小。

3.3 复合材料冲击性能评估

根据冲击下正交复合材料 I 型稳态裂纹尖端的动态焦散斑图, 可以测量每幅图像的特征尺寸 Y_c , 由式(5)计算得到各时刻对应的应力强度因子 K_I , 对应图 4 焦散斑图测量的特征尺寸 Y_c 和根据式(5)计算得到的 K_I 结果见图 6, 它表明了动态冲击过程中两种材料 I 型裂纹尖端的最大横向特征几何尺寸 Y_c 和动态应力强度因子 K_I 的变化规律。同时表 2 对两种材料实验结果进行了进一步的比较。

表2 两种材料冲击性能比较

Table 2 Comparison of impact behaviors of two kinds of composites

时间/ μs	120	130	140	150	160
A-B					
$\Delta Y_c / mm$	0.64	0.52	1.34	1.86	1.67
$\Delta K_I (MN \cdot m^{3/2})$	1.67	1.63	4.83	6.84	6.89

图 6 与表 2 结果表明: 冲击后同一时刻, 材料 A 的 I 型裂纹尖端焦散线特征尺寸明显大于材

料 B 的 I 型裂纹尖端焦散线特征尺寸, 材料 A 的焦散线特征尺寸平均比材料 B 的焦散线特征尺寸大 1.20mm。说明材料 A 的抵抗变形能力小于材料 B 的抵抗变形能力, 即对材料 A 的 I 型裂纹尖端引起的应力集中程度大于对材料 B 的 I 型裂纹尖端引起的应力集中程度; 另一方面, 材料 A 的 I 型裂纹尖端的应力强度因子大于材料 B 的 I 型裂纹尖端的应力强度因子, 材料 A 的 I 型裂纹尖端应力强度因子平均比材料 B 的 I 型裂纹尖端应力强度因子大 $4.37 MN \cdot m^{-3/2}$ 。由该结果可以预测材料 B 的抗冲击性好于材料 A 的抗冲击性。

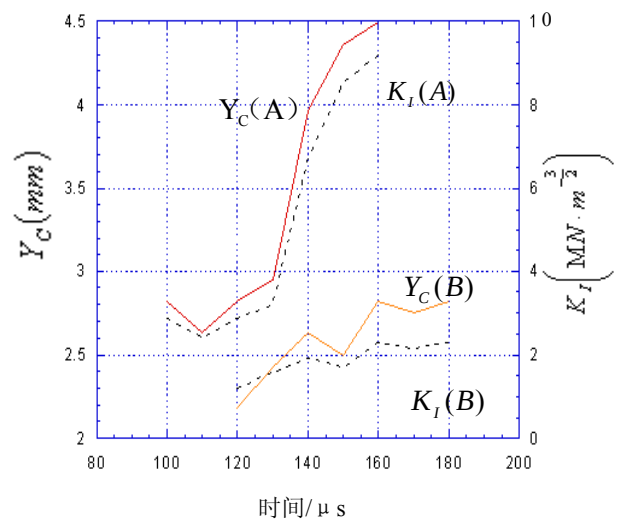


图6 两种正交复合材料冲击特性比较

Fig.6 Comparison of impact behaviors of two kinds of composites

4 结论

本文对冲击作用下两种正交复合材料 I 型裂纹尖端的应力奇异性进行了动态焦散线光学实验研究, 结果表明:

(1) 复合材料裂纹尖端的应力奇异特性可以用焦散线技术直观得到, 它的几何特征与复合材料弹性常数, 铺层方向, 界面特征和冲击载荷等因素直接有关。

(2) 高速摄影技术与光学焦散线方法结合能够实时的记录动态冲击过程中裂纹尖端的应力集中现象, 反映材料的抗冲击性能。

(3) 定量和定性分析复合材料的抗冲击性能, 为复合材料冲击性能评估提供了一种直观的动态可视化实验技术。

(参考文献转第 155 页)

(4) 提供的矩形冷弯型钢钢管混凝土轴压、纯弯和压弯构件承载力计算公式与试验结果二者基本吻合, 可供有关工程设计参考。

(5) 由于实际工程中, 矩形钢管混凝土尚有可能在弱轴方向受弯。因而在本文研究工作的基础上, 可进一步开展矩形冷弯型钢钢管混凝土在双向偏压情况下的力学性能研究。

参考文献:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构(第三版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
Zhong Shantong. Concrete filled steel tubular structures (third edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
Cai Shaohuai. Modern concrete filled steel tubular structures [M]. Beijing: China Communication Press, 2003. (in Chinese)
- [3] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structures--theory and practice [M]. Beijing: China Science Press, 2004. (in Chinese)
- [4] 张素梅, 钟善桐. 空心钢管混凝土的研究及构件计算[J]. 土木工程学报, 1994, 27(3): 4~32.
Zhang Sumei, Zhong Shantong. Research and calculation of concrete-filled steel tubular hollow members [J]. China Civil Engineering Journal, 1994, 27(3): 4~32. (in Chinese)
- [5] Tao Z, Han L H, Wang Z B. Experimental behaviour of stiffened concrete-filled thin-walled hollow steel structural (HSS) stub columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(7): 962~983.
- [6] 陶忠, 韩林海, 黄宏. 圆中空夹层钢管混凝土柱力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 56~67.
Tao Zhong, Han Linhai, Huang Hong. Mechanical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular columns with circular cross sections [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(10): 56~67. (in Chinese)
- [7] Abdel-Rahman N, Sivakumaran K S. Material properties models for analysis of cold-formed steel members [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(9): 1135~1143.
- [8] Karren K W. Corner properties of cold formed steel shapes [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1967, 93(2): 401~432.
- [9] Sivakumaran K S, Abdel-Rahman N. A finite element analysis model for the behaviour of cold-formed steel members [J]. Thin-Walled Structures, 1998, 31(4): 305~324.
- [10] 王志滨. 矩形中空夹层钢管混凝土压弯构件力学性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2004.
Wang Zhibin. Behavior of concrete filled double-skin steel tubular beam-columns with rectangular sections [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004. (in Chinese)

(上接第 176 页)

参考文献:

- [1] Shindo Y, Hiroaki H. Impact response of symmetric edge cracks in an orthotropic strip [J]. JSME International Journal, 1991, 34(1): 7~12.
- [2] Achenbach J D, Bazant Z P. Elastodynamic near-tip stress and displacement fields for rapidly propagation crack in orthotropic materials [J]. Journal of Applied Mechanics, 1975, 42: 183~189.
- [3] Piva A, Viola E. Crack propagation in an orthotropic medium [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1988, 29(5): 535~548.
- [4] Viola E, Piva A, Radi E. Crack propagation in an orthotropic medium under general loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 34: 1155~1174.
- [5] P S Theocaris, H G Georgiadis. Mode III stress-intensity factors in cracked orthotropic plates-An analogy with propagating cracks in isotropic media [J]. Experimental Mechanics, 1984, 24(3): 177~183.
- [6] Kwang-Ho Lee. Dynamic stress intensity factors K_1 K_2 and dynamic crack propagation characteristics of orthotropic material [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 53(1): 119~140.
- [7] Kalthoff J F. On some current problems in experimental fracture dynamic [R]. Pasadena California: California Institute of Technology, 1983. 11~35.
- [8] X F Yao, W Xu, M Q Xu. Experimental study of dynamic fracture behavior of PMMA with overlapping offset-parallel cracks [J]. Polymer Testing, 2003, 22: 663~670.
- [9] Xue Feng Yao, Wei Xu, Guan Chang Jin. Low velocity impact study of laminate composites with mode-I crack using dynamic optical caustics [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(17): 1833~1844.
- [10] Semenski D. Method of caustics in fracture mechanics of mechanically anisotropic materials [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 58: 1~10.
- [11] Yao Xuefeng, Chen Junda, Jin Guanchang, Arakawa K, Takahashi K. Caustic analysis of stress singularities in orthotropic composite materials with mode-I crack [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64: 917~924.