

CALL 混杂复合材料的弯曲试验研究

卿新林 戴福隆

(清华大学, 北京 100084)

毛天祥 韩金虎

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 本文用高灵敏度云纹干涉法对 CALL 混杂复合材料在纤维方向和垂直于纤维方向的弯曲及破坏特性进行了实验研究, 得到了弯曲试件横截面上的剪应变分布规律及破坏形式。实验结果表明: 碳纤维/环氧树脂层的剪应变明显大于铝层的剪应变, 但各自沿截面呈抛物线分布。纤维方向弯曲试件的破坏形式是分层或碳纤维/环氧树脂层剪切破坏; 垂直于纤维方向弯曲试件的破坏由受拉面碳纤维/环氧树脂层的拉伸破坏所致。本文工作为进一步深入研究 CALL 材料的力学性能提供了重要的实验依据。

关键词 混杂复合材料, 云纹干涉法, 弯曲, 剪应变, 破坏模式

1 引 言

利用胶接技术将各向同性的铝合金薄板与各向异性的纤维复合材料巧妙的结合起来将会产生一种兼有两者优点并克服各自缺点的新型结构材料——纤维铝合金胶接层板。ARALL 就是其典型产品, 它兼有金属铝材与芳纶纤维/树脂复合材料的优点。有关 ARALL 的力学性能研究, 国内外许多学者作了大量工作^[1~3]。目前已有多种不同铝材、不同树脂经不同加工处理的 ARALL 产品, 它们分别具有高强度、高韧性、耐环境性好、加工性能优良等特点。

根据上述同样思想研制成的碳纤维/环氧树脂/铝薄板层间混杂复合材料(CALL)将兼有碳纤维/环氧树脂复合材料的高强度、耐疲劳和铝材耐冲击、易加工等优点。国内外已开始对 CALL 进行研究^[4,5]。

云纹干涉法是在几何云纹法基础上发展起来的一种现代光测力学方法, 由于它具有灵敏度高、条纹质量好、实时观测和全场分析等优点, 特别是能够揭示材料细观结构的一些力学行为, 已开始广泛地应用于新材料的试验研究中^[6~8]。在本文中, 用云纹干涉法研究了单向增强 CALL 混杂复合材料在纤维方向和垂直于纤维方向的弯曲特征。

2 试件与试验

本实验所用单向增强 CALL 混杂复合材料由 13 层铝薄板和 12 层碳纤维/环氧树脂复合材料经过复杂的预处理过程后热压而成^[9]。每一碳纤维/环氧树脂层又由两层厚度为 0.125 毫

本文于 1994 年 1 月 24 日收到修改稿, 1993 年 8 月 18 日收到初稿。国家自然科学基金资助项目

米的无纬布组成,每层铝板的厚度为 0.2 毫米。在厚板的纵向和横向切割,分别得到外形尺寸均如图 1 所示的纵向试件和横向试件。

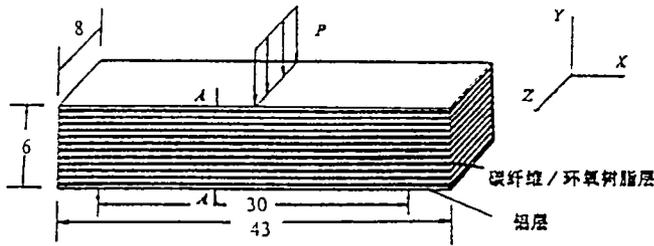


图 1 试件外形与加载示意(单位:mm)

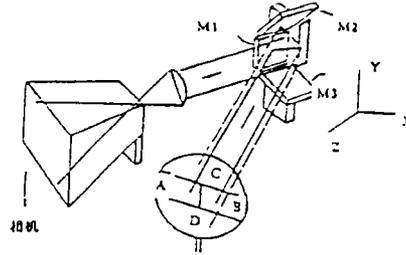


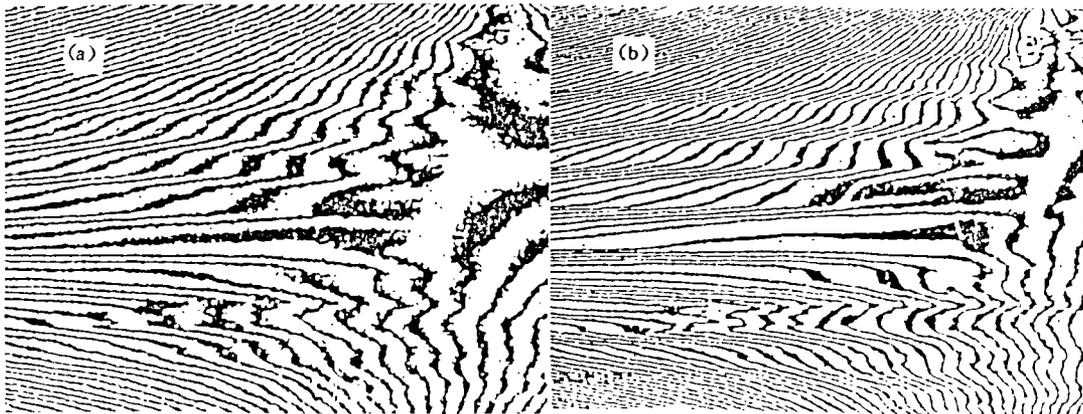
图 2 云纹干涉法光路

在试件垂直于 Z 轴的一侧面复制有 1200l/mm 的正交位相型全息光栅。采用如图 2 所示四光束光路系统。当试件变形时,复制在试件表面的试件栅也跟着变形。入射光 B 和经反射镜 M₁ 后的入射光 A 通过 y 向的栅线发生衍射,其正、负一级衍射相互干涉产生云纹图案,该云纹图反映了试件在 x 方向的位移。同理,入射光 C、D 分别经反射镜 M₂、M₃ 后通过 x 向的栅线发生衍射,其正、负一级衍射相互干涉产生反映试件在 y 方向位移的云纹图^[10]。

3 试验结果及分析

3.1 面内位移与剪应变分布

图 3 和图 4 分别是纵向试件和横向试件在不同加载时刻的典型位移场(u 场)条纹图。



(a) $P=125\text{kg}$

(b) $P=200\text{kg}$

图 3 纵向试件 u 场条纹图

面内剪应变可以从 u 场和 v 场条纹中获得,计算公式为

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{f} \left(\frac{\Delta N_x}{\Delta y} + \frac{\Delta N_y}{\Delta x} \right)$$

这里 $f=2400 \text{ l/mm}$,代表虚参考栅频率; N_x 、 N_y 分别代表 u 场和 v 场条纹级次。

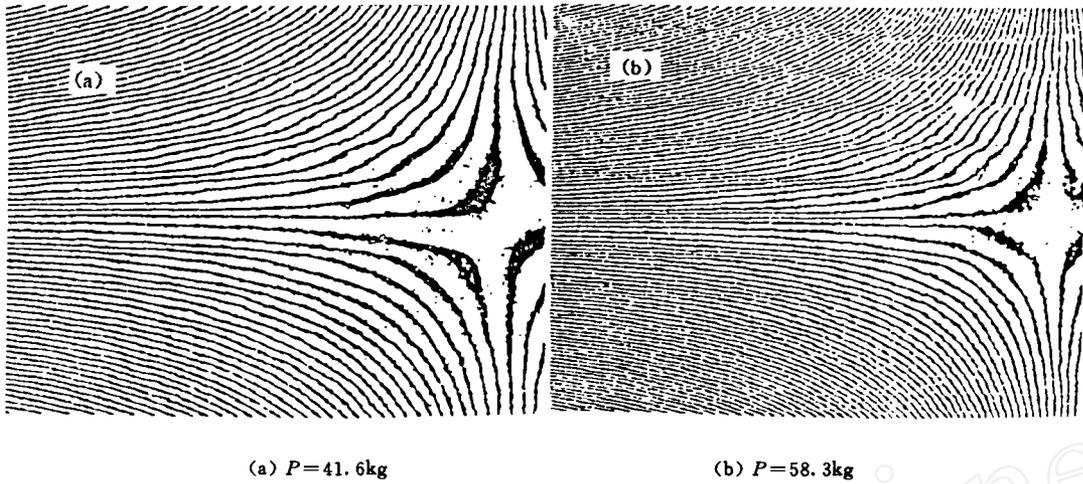


图 4 横向试件 u 场条纹图

图 5(a)、(b)分别是纵向试件和横向试件在载荷 P 等于 200kg 和 58.3kg 时沿截面 AA 的剪应变分布曲线。

由图 5 可以看出:不管是纵向试件,还是横向试件,碳纤维/环氧树脂层的剪应变都明显大于铝层剪应变,但各自基本上服从沿截面呈抛物线分布规律。

造成碳纤维/环氧树脂层与铝层剪应变相差较大的原因是两者剪切模量的差异。铝合金的剪切模量 G 为 27.7GPa,单向碳纤维/环氧树脂层的面内剪切模量 G_{12} 为 7GPa,环氧树脂基体剪切模量 G' 为 3GPa。对于纵向试件,碳纤维/环氧树脂层的剪切由 G_{13} 决定;对于横向试件,碳纤维/环氧树脂层的剪切由 G_{23} 决定。它们的模量数值与面内剪切模量及基体剪切模量的关系为 $G_{12} \geq G_{13} > G_{23} > G'$ 。因此,无论是纵向试件还是横向试件,碳纤维/环氧树脂层的剪切模量均在 3GPa 到 7GPa 之间,与铝层剪切模量相差 4 至 9 倍。由图 5 可知,纵向试件在截面中部碳纤维/环氧树脂层的剪应变为 $8600\mu\epsilon$,相应铝层内的剪应变为 $3000\mu\epsilon$;横向试件在截面中部碳纤维/环氧树脂层内的剪应变为 $3600\mu\epsilon$,相应铝层内的剪应变为 $1700\mu\epsilon$ 。碳纤维/环氧树脂层与铝层内的剪应变之比要小于它们相应的剪切模量之比。此外,尽管 G_{23} 小 G_{13} ,但横向试件中碳纤维/环氧树脂层的剪应变与铝层中的剪应变的变化并不比纵向试件大。这说明决定剪应变大小的因素除了剪切模量这个内因外,还有剪应力这个外因。

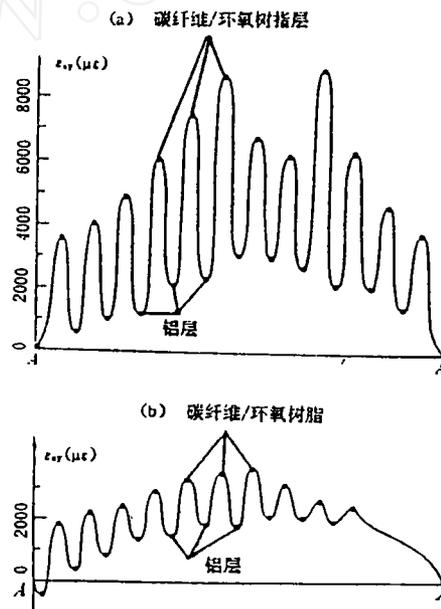


图 5 沿 AA 截面剪应变分布

3.2 破坏特征

纵向试件破坏载荷为 267kg, 横向试件破坏载荷为 66kg。两类试件的破坏形式明显不同。

(1) 纵向试件的弯曲破坏形式是分层或碳纤维/环氧树脂基体破坏引起剪切损伤局部化而导致试件最终破坏。试件的分层损伤载荷与破坏载荷不完全相同, 这是由于层间损伤后, 试件并未完全失去承载能力, 随着载荷的继续增加, 层间损伤不断扩展, 直至贯穿试件, 此时试件才完全失去承载能力。

(2) 横向试件的弯曲破坏是由受拉面的碳纤维/环氧树脂层拉伸破坏所致。受拉面的 90° 方向碳纤维/环氧树脂层拉伸开裂致使试件损伤局部化, 此时开裂点上、下铝板因应力集中而发生颈缩, 使整个试件失去承载能力。试验中, 试件在 66kg 载荷作用下, 碳纤维/环氧树脂层开裂, 此时载荷仍能继续上升至 70kg 左右, 然后突然自动卸载至 60kg。卸载后发现试件下表面与加载点对应处的铝板上有一沿试件厚度方向的沟槽, 这就是损伤局部化引起的铝层颈缩的结构。

这里再讨论一下造成两类试件弯曲破坏形式不同的原因。由位移场条纹图可得到纵向试件在载荷 P 等于 200kg 情况下的拉伸应变最大值和剪应变最大值以及横向试件在载荷 P 等于 58.3kg 时的拉伸应变最大值和剪应变最大值, 如表 1 所示。

表 1 试样拉伸应变及剪应变最大值

力学量	纵向试件	横向试件
荷载 F (kg)	200	58.3
铝层内拉伸应变最大值	4740×10^{-6}	6130×10^{-6}
碳/环氧层拉伸应变最大值	4370×10^{-6}	5880×10^{-6}
铝层内剪应变最大值	3000×10^{-6}	1700×10^{-6}
碳/环氧层剪应变最大值	8600×10^{-6}	3600×10^{-6}

由表容易看出: 在外加载荷作用下, 纵向试件的拉伸应变最大值相对于剪应变最大值要小近一倍, 且在纤维方向的拉伸强度大, 而层间抗剪强度要低得多, 因此, 纵向试件必然出现层间或碳纤维/环氧树脂层剪切破坏。相反, 对于横向试件, 最大拉伸应变值比剪应变值要大, 且在垂直于纤维方向的碳纤维/环氧树脂复合材料拉伸强度较低, 因此, 当外加载荷超过某一临界值时, 必然会使 90° 方向碳纤维/环氧树脂层拉伸开裂破坏。值得一提的是, 横向试件在载荷 P 为 58.3kg 时的拉伸应变值比纵向试件在载荷 P 为 200kg 时相应的拉伸应变还要大。

4 结 论

(1) 云纹干涉法可有效地应用于 CALL 混杂复合材料的试验研究中。

(2) 无论是纵向试件还是横向试件, 碳纤维/环氧树脂层的剪应变均明显大于铝层剪应变, 但各自基本上服从沿截面呈抛物线分布的规律。

(3) 纵向试件的弯曲破坏形式是层间或碳纤维/环氧树脂层剪切破坏; 横向试件弯曲破坏是由受拉面的碳纤维/环氧树脂层拉伸破坏引起。

实验结果为对 CALL 材料的进一步深入研究提供了重要的实验依据。

感谢:感谢国家自然科学基金委的资助,感谢上海交通大学复合材料研究所吴人洁先生等给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Roebrocks G H J J. Constant amplitude fatigue of ARALL-2 laminates. Report LR-39, Faculty of Aerospace Eng. Delft Univ of Tech, The Netherlands, Oct 1987
- 2 郑瑞琪,李宏运,胡宏军. 芳纶纤维-铝合金混杂复合材料的层间残余应力. 第七届全国复合材料会议文集, H35-1-H35-7
- 3 Voegesang L B, Gunnink J W, Chen D, Reobrocks G H J J, Volt A. New development in ARALL laminates. Proc ARALL Laminates Technical Review Meeting. Alcoa Laboratories, Alcoa Center PA, June, 1988
- 4 Mao T X, Han J H. Tensile fracture of carbon/epoxy aluminium laminates. Proc of ISCMS/ I, Beijing, 1992
- 5 Sun K. Possibility of galvanic corrosion in interlayer of CALL. Proc of ISCMS/ I, Beijing, 1992
- 6 Post D, Czarnek R, Joh D. Shear strains in a graphite/PEEK beam by moire interferometry with carrier fringes. Exp Mech, Sept 1987
- 7 Post D. Moire interferometry for damage analysis of composites. Exp Mech, July 1983
- 8 Qing X L, Sun Q P, Dai F L. Study of transformation plasticity in tetragonal zirconia polycrystals by moire interferometry. Acta Mech Sinica, 1993; 9(4):329-336
- 9 孙康,吴人洁,胡延永. CFRP/Al 层间混杂复合材料. 复合材料新进展学术会议论文集. 济南, 1991
- 10 戴福隆等. 现代光测力学. 北京: 科学出版社, 1991
- 11 王震鸣, 范赋群主编. 复合材料及其结构力学进展(第 2 册), 广州: 华南理工大学出版社, 1992

EXPERIMENTAL STUDY OF BENDING BEHAVIOR IN CALL HYBRID COMPOSITES

Qing Xinlin Dai Fulong

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Mao Tianxiang Han Jinhu

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

Abstract The bending behavior and damage characteristic of CALL hybrid composites were studied by moire interferometry. The shear strain distributions over the cross-section and the forms of damage of bending beams were obtained. The results show that the magnitude of the shear strain in the carbon fiber/epoxy laminate is clearly larger than that in the correspondent aluminium laminate, and the shear strain distribution over the cross-section of carbon fiber/epoxy laminates conforms basically to a parabolic distribution curve in the same way as that of aluminium laminates. Shear damage either in interlamination or in carbon fiber/epoxy laminates and tensile failure of carbon fiber/epoxy laminates in the tension surface represent, respectively, the damage forms of the longitudinal and transverse bending specimens.

Key words hybrid composites, moire interferometry, bending, shear strain, damage form