

静力拉伸载荷下纤维金属层板的变形行为

佟安时¹, 谢里阳¹, 刘建中², 白恩军¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 为研究静力拉伸载荷下纤维金属层板变形行为,在标准试验之外引入数字图像关联技术(简称DIC),观测了GLARE2-3/2、GLARE3-3/2和GLARE6-3/2层板试样的应变变化过程。对比分析了获得的应力-应变曲线、应变云图及试样不同位置处的应变随载荷时间历程变化的过程。结果显示:GLARE2-3/2层板试样的应变变化过程均匀稳定,无明显边界效应;GLARE3-3/2层板试样轴向有瞬时的性能退化,横向具有边界效应;GLARE6-3/2铺层试样具有两次瞬时性能退化,横向边界效应与GLARE3层板试样相反。

关 键 词: 纤维金属层板;应力-应变曲线;损伤机制;非线性行为;玻璃纤维;环氧树脂

中图分类号: TB 333

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)01-0091-04

Deformation of Fiber-Metal Laminates Under Uniaxial Tensile Loading

TONG An-shi¹, XIE Li-yang¹, LIU Jian-zhong², BAI En-jun¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Avic Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China. Corresponding author: XIE Li-yang, E-mail: lyxie@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to find the deformation behavior and boundary effect of fiber-metal laminate (FML) under uniaxial tensile loading, mechanical tests were carried out on GLARE2-3/2, GLARE3-3/2 and GLARE6-3/2 laminates. A new method of digital image correlation was introduced to record the surface strain of the GLARE laminate samples during loading. The stress-strain curves, strain cloud chart and strain-loading time curves show that the deformation of GLARE2-3/2 laminates is uniform, without obvious boundary effects; the GLARE3-3/2 laminates have instantaneous performance degradation and boundary effect, and the GLARE6-3/2 laminates have two performance degradation and the boundary effect is opposite to that of GLARE3-3/2 laminates.

Key words: fiber-metal laminates; stress-strain curve; failure mechanism; non-linear behavior; glass fiber; epoxy resin

纤维金属混合层板是由特定胶黏剂浸渍强韧纤维形成的预浸料与金属薄板相互交叠铺层,然后经一定的固化工艺成型的一种层压板,具有优异的疲劳损伤容限性能、耐冲击性能、阻燃性和耐腐蚀性、易加工成型性能^[1-3]。其中ARALL和GLARE已成功商业化,ARALL在C-17运输机的货舱门上得到成功应用,GLARE作为A380的蒙皮材料获得成功应用^[4]。目前,荷兰GTM Advanced Structures和美国Alcoa Technical

Center共同研制的新型混合层板CentrAL即将应用于大型运输机C-130的机翼结构^[5]。

作为一种应用于关键部位并承载的航空材料,掌握其静力性能及损伤机制十分必要。Kawai等^[6]研究测试了不同加载角度下GLARE2-3/2的静力性能,提出了不完全退化模型;Wu等^[7]分别采用数值分析方法和有限元方法模拟预测了GLARE4-3/2和GLARE5-2/1的非弹性变形;Iaccarino等^[8]提出了一种等效材料模型方法,模

拟预测了 GLARE3 - 3/2 的应力 - 应变响应; Cortes 等^[9]研究了一种钛基热塑型纤维金属层板的首层失效强度和最终断裂强度,并提出了一种基于纤维方向的刚度退化模型;Carrillo 等^[10]研究了纤维金属层板的尺寸效应.

以上研究中都以经典层板理论为基础,忽略了预浸料层的各向异性产生试样变形的不均匀性.因此,获得真实的纤维金属层板试样加载过程中的变形情况,将有助于模型的修正和完善.而传统的应变片法和应变规法都无法实现以上的需求.本文除标准静力拉伸试验之外,引入数字图像关联技术(简称 DIC),观测了 GLARE2 - 3/2, GLARE3 - 3/2 和 GLARE6 - 3/2 层板试样的应变变化过程.对比分析了获得的应力 - 应变曲线、应变云图及试样不同位置处的应变随载荷历程变化的过程.

1 试验与方法

1.1 材料及试样

研究所采用的纤维金属层板由 3 层铝合金层和 4 层 S4/SY - 14 预浸料层交替铺设而成,包括 GLARE2 - 3/2 (AL/0°/AL/0°/AL), GLARE3 - 3/2 (AL/0°/90°/AL/90°/0°/AL) 和 GLARE6 - 3/2 (AL/+45°/-45°/AL/-45°/+45°/AL),其中 0°,45°和 90°分别表示预浸料层的铺层方向.试样形式如图 1 所示,试样总长 $L=270\text{ mm}$ 、标距段长 $L_G=160\text{ mm}$ 、宽 $W=15\text{ mm}$,为防止在夹持处破坏,试样两端贴有铝合金加强片,厚度 $t=0.25\text{ mm}$.

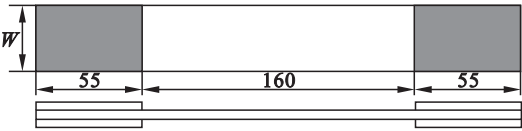


图 1 试样的几何形式
Fig. 1 Geometry and dimensions of the specimen

1.2 试验测试

静力拉伸测试在岛津静力拉伸试验机 (SHIMADZU 300 kN) 上进行,加载速度为 2 mm/min .试验过程中实时记录载荷和应变数据,每根试样拉伸过程中采样至少 1 000 个点,同时采用光学应变仪 (ARAMIS 4M) 均匀拍照,每根试件拉伸过程中至少拍摄 30 张照片.实验结束后,采用 ARAMIS 自带软件对应变云图进行处理,对断裂试样采用 10% 的氢氧化钠溶液进行腐蚀去层处理.

2 试验结果及讨论

2.1 应力 - 应变曲线

GLARE2 - 3/2, GLARE3 - 3/2 和 GLARE6 - 3/2 层板的拉伸强度和弹性模量测试结果如表 1 所示.图 2 给出了三种 GLARE 层板应力 - 应变曲线测试结果.从图中可见三种 GLARE 试样的应力 - 应变均呈现几个典型阶段.第 I 为线弹性阶段,此时层板结构保持完好,各组分材料未发生塑性变形或分层;第 II 为过渡阶段,此时曲线斜率开始出现下降,铝合金层开始发生塑性变形并失去部分载荷承担能力;第 III 阶段应力 - 应变曲线斜率再次稳定,此时层板变形性能受预浸料层铺层角度的影响明显;第 IV 阶段为层板开裂阶段.

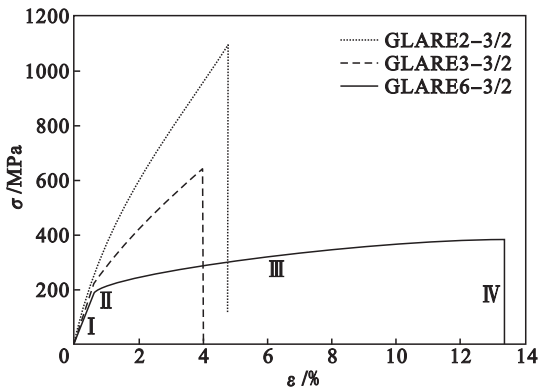


图 2 三种试样应力 - 应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of GLARE2 - 3/2, GLARE3 - 3/2 and GLARE6 - 3/2 laminates under uniaxial tensile loading

线弹性阶段, GLARE2 - 3/2 层板的轴向弹性模量最高为 61.55 GPa,略低于铝合金板的 71.1 GPa;GLARE3 - 3/2 层板的轴向弹性模量为 51.6 GPa,略低于 GLARE2 - 3/2 层板,原因是 90°方向的预浸料层弹性模量较低;GLARE6 层板的轴向弹性模量最低为 44.93 GPa.

过渡阶段, GLARE2 - 3/2 层板偏转角度最小,接近于线性过渡;GALRE6 - 3/2 偏转的角度最大,层板也因此几乎失去大部分的载荷承担能力.

再次稳定阶段三种层板的应力 - 应变曲线都接近于线性, GLARE6 - 3/2 层板的斜率有逐渐下降的过程,表明内部预浸料层有逐渐损伤的过程.

最终断裂时 GLARE2 - 3/2 层板的强度最高,约是铝合金板的 3 倍, GLARE6 - 3/2 层板的断裂强度最低,与铝合金层板的断裂强度接近.

表 1 GLARE 层板的静力拉伸测试结果				
Table 1 Static longitudinal tensile test results for GLARE laminates				
试样	t/mm	W/mm	R_m/MPa	E/GPa
G2-3/2	1.35	15.07	1 038.94	60.99
G3-3/2	1.35	15.07	663.08	51.60
G6-3/2	1.31	15.06	384.97	44.93

2.2 DIC 测试结果

GLARE2-3/2 层板试样断裂前的轴向和横向应变云图如图 3 所示,图中可见轴向应变云图基本均匀,试样边界处有少量横向条纹出现,横向应变云图中存在均匀的轴向条纹.图 3 中 A、B 和 C 3 个不同位置处的轴向和横向应变随载荷历程而变化的过程如图 4 所示.图中显示,3 个不同位置处轴向和横向应变都与加载时间呈线性关系,不同位置处的轴向应变始终保持一致,边界 C 点位置处的横向应变低于试样中部的 A 点和 B 点位置处,且应变差随载荷的增加而增加.以上现象

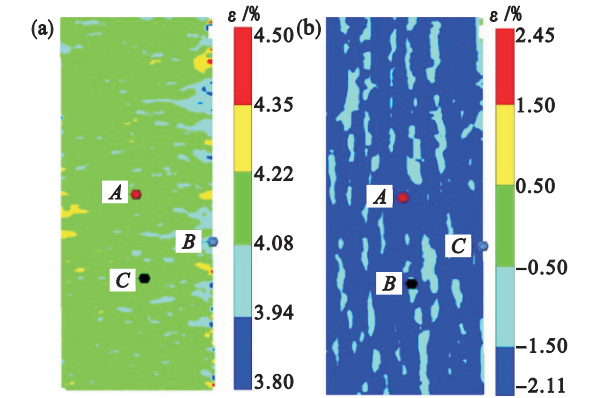


图 3 GLARE2-3/2 层板试样断裂前应变云图
Fig. 3 Strain cloud chart of GLARE2-3/2 laminates under uniaxial tensile loading
(a)—轴向;(b)—横向.

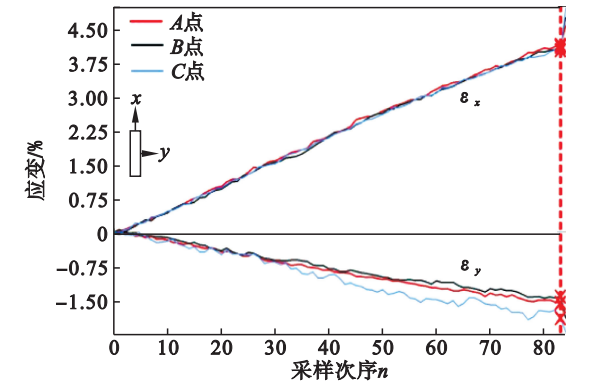


图 4 加载过程中 GLARE2-3/2 层板试样的不同位置处的应变变化过程
Fig. 4 Strain curves of GLARE2-3/2 laminate at different location under uniaxial tensile loading

也表明:GLARE2-3/2 层板试样的轴向变形均匀协调,无瞬时性能退化出现,横向变形略有不均匀,但差别很小.

图 5 给出了 GLARE3-3/2 层板试样断裂前的轴向和横向应变云图.图中可见轴向应变云图中具有明显的横向条纹状,横向应变云图整体均匀,但具有明显的边界效应.图 5 中 D、E、F 3 点位置处的轴向和横向应变随载荷历程而变化的过程如图 6 所示.图中可见,3 个不同位置处的轴向应变同时出现了瞬时转折现象,试样 D 点位置处的轴向应变在过渡区过后高于 E 点和 F 点位置处,应变差基本保持稳定;3 个不同位置处的横向应变与加载时间近似于线性关系,边界 F 点处的横向应变从起始阶段就低于试样中部的 D 点和 E 点处,应变差随载荷的增加而增加;整体上 GLARE3-3/2 层板的轴向和横向应变都低于 GLARE2-3/2 层板.以上现象表明:GLARE3-3/2 层板试样的轴向性能有瞬时的退化出现,试样抵抗横向变形的能力增强,具有明显的边界效应.

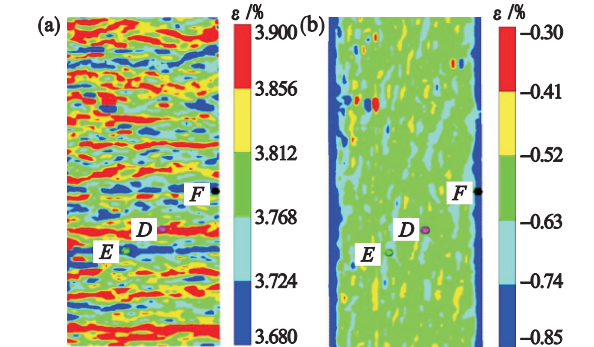


图 5 GLARE3-3/2 层板试样断裂前应变云图
Fig. 5 Strain cloud chart of GLARE3-3/2 laminate under uniaxial tensile loading
(a)—轴向;(b)—横向.

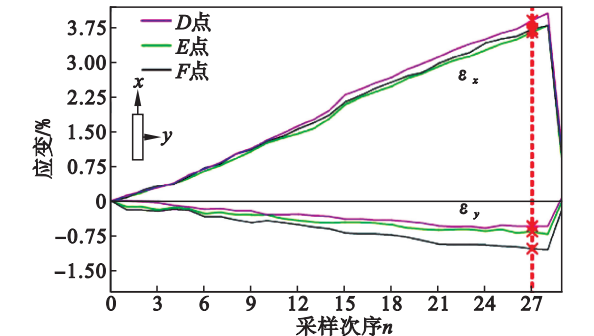


图 6 加载过程中 GLARE3-3/2 层板试样的不同位置处的应变变化过程
Fig. 6 Strain curves of GLARE3-3/2 laminate at different location under uniaxial tensile loading

图 7 给出 GLARE6 - 3/2 层板试样断裂前的轴向和横向应变云图. 从图中可见,试样的轴向和横向应变云图都不规则,呈交叉的 $\pm 45^\circ$ 方向的条纹,横向应变云图显示边界效应明显. 图 7 中 G , H , I 3 点位置处的应变随载荷历程而变化的过程如图 8 所示. 从图中可见,试样的轴向和横向应变都同时出现了两次转折,3 点位置处的轴向应变基本保持一致,当横向应变低于 -2% 时边界 I 点处横向应变高于试样中部 G 点和 H 点处,应变差随载荷的增加而增加,整体上试样的轴向和横向应变的幅度接近. 以上现象表明: GLARE6 - 3/2 层板有两次瞬时的性能退化出现,整体抵抗横向变形的能力相对较弱,边界效应与 GLARE3 - 3/2 层板相反.

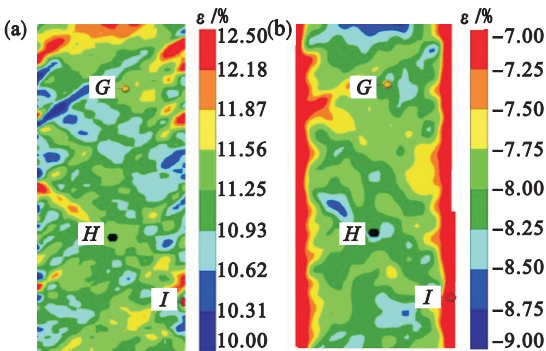


图 7 GLARE6 - 3/2 层板试样断裂前应变云图
Fig. 7 Strain cloud chart of GLARE6 - 3/2 laminate under uniaxial tensile loading
(a)—轴向; (b)—横向.

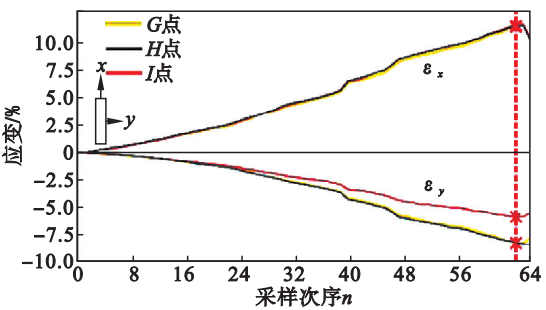


图 8 加载过程中 GLARE6 - 3/2 层板试样的不同位置处的应变变化过程
Fig. 8 Strain curves of GLARE6 - 3/2 laminate at different location under uniaxial tensile loading

3 结 论

1) GLARE 层板试样的应力 - 应变曲线与金属层类似,分为弹性阶段和塑性阶段,弹性阶段层板的承载能力和变形能力由预浸料层与金属层共同决定,塑性阶段层板的静力性能主要取决于预浸料层性能.

2) GLARE2 - 3/2 层板试样的轴向变形均匀协调,无瞬时性能退化出现,横向变形略有不均匀,但差别很小.

3) GLARE3 - 3/2 层板试样的轴向性能有瞬时的退化出现,试样抵抗横向变形的能力增强,具有明显的边界效应.

4) GLARE6 - 3/2 层板有两次瞬时的性能退化出现,整体抵抗横向变形的能力相对较弱,边界效应与 GLARE3 - 3/2 层板相反.

参考文献:

[1] Sinke J. Manufacturing of GLARE parts and structures[J]. *Applied Composite Materials*,2003 (10) :293 - 305.

[2] Fatt M S H,Lin C F,Revilock D M Jr,et al. Ballistic impact of GLARE laminates[J]. *Composite Structures*,2003,61:73 - 88.

[3] Vogelesang L B, Vlot A. Development of fibermetal laminates for advanced aerospace structures[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2000,103:1 - 5.

[4] 陈琪,关志东,黎增山. GLARE 层板性能研究进展[J]. 科技导报,2013,31(7) :50 - 56.

(Chen Qi,Guan Zhi-dong,Li Zeng-shan. Review of GLARE technology[J]. *Science & Technology Review*,2013,31(7) :50 - 56.)

[5] 黄啸,刘建中. 新型纤维金属混合层板结构的疲劳裂纹扩展与分层行为[J]. 航空材料学报,2012,32(5) :97 - 102.

(Huang Xiao,Liu Jian-zhong. Fatigue crack propagation and delamination behavior of advanced fiber metal hybrid laminate [J]. *Journal of Aeronautical Materials*,2012,32(5) :97 - 102.)

[6] Kawai M,Morishita M,Tomura S,et al. Inelastic behavior and strength of fiber-metal hybrid composite: GLARE[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*,1998,40:183 - 198.

[7] Wu G C,Yang J M. Analytical modeling and numerical simulation of the nonlinear deformation of hybrid fiber-metal laminates[J]. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*,2005,13:413 - 425.

[8] Iaccarino P,Langella A,Caprino A. A simplified model to predict the tensile and shear stress-strain behavior of fibreglass/aluminium laminates[J]. *Composites Science and Technology*,2007,67:1784 - 1793.

[9] Cortes P,Cantwell W J. The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre-metal laminates [J]. *Composites Science and Technology*,2006,66:2306 - 2316.

[10] Carrillo J G,Cantwell W J. Scaling effects in the tensile behavior of fiber-metal laminates[J]. *Composites Science and Technology*,2007,67:1684 - 1693.