

碳/环氧复合材料层板压缩破坏特征研究*

毛天祥

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘要 本文对斜角铺层碳/环氧复合材料层板($[0^\circ]_{48}$, $[\pm 30^\circ]_{12s}$, $[\pm 45^\circ]_{12s}$, $[\pm 60^\circ]_{12s}$, $[90^\circ]_{48}$)的压缩破坏进行了实验研究, 实验结果包括压缩强度, 层板破坏模式和破坏机理。对所研究的层板, 其破坏模式为层间剪切破坏($[0^\circ]_{48}$, $[\pm 30^\circ]_{12s}$ 试件), 纤维剪变($[\pm 45^\circ]_{12s}$ 试件), 面内基体剪切破坏及基体压缩破坏($[\pm 60^\circ]_{12s}$, $[90^\circ]_{48}$ 试件)。

关键词 复合材料层板 压缩破坏 层间压缩破坏 基体压缩破坏

1 引言

长纤维增强复合材料, 如碳纤维增强环氧, 由于纤维的拉伸强度很高具有极好的拉伸性能。由于压缩时塑性微屈曲的影响其压缩性能仅为其拉伸强度的60%。在过去的20年间, 复合材料的拉伸强度, 抗冲击能力及断裂韧性均有很大的提高, 但是其压缩强度改进不大。

近10年来, 许多学者研究单向复合材料的压缩破坏机理, 并取得了进展(Fleck and Budiansky)[1]他们分析了微屈曲的弹性及塑性弯折现象, 并能解释某些单向复合材料压缩破坏的实验现象。他们同时还指出, 需要建立斜角铺层中的损伤生成, 扩展的模型。

近年来Gupta教授及其同事对不同复合材料体系, 在单向及双向压缩载荷作用下的破坏机理进行了研究。他们研究了碳/碳层板复合材料及二维编织碳/聚酰亚胺在单向及双向压缩载荷作用下的破坏机理[2][3]。他们还对45°斜角铺层层板的压缩破坏进行了分析及实验研究。Shuart等也研究了多向斜角铺层层板的压缩破坏[4][5]。

本文介绍了几种斜角铺层碳/环氧层板, 如 $[0^\circ]_{48}$, $[\pm 30^\circ]_{12s}$, $[\pm 45^\circ]_{12s}$, $[\pm 60^\circ]_{12s}$, $[90^\circ]_{48}$ 的压缩实验研究结果。实验结果有压缩强度, 破坏模式和破坏机理。对本文所研究的层板, 破坏模式为层间剪切, 面内剪切, 纤维剪变及基体压缩破坏。

2 试件及实验

碳/环氧复合材料试件是由商用无纬布压制而成, 该无纬布是Hercules AS4 石墨纤维预浸在450-K固化的 Hercules 3502 热固性环氧树脂制成的。将此无纬布按所需角度铺设成48层, 约厚6毫米的层板。再将此层板放入由计算机控制的热压机, 按照环氧树脂厂家提供的固化程序进行固化。所有试件切割为25毫米长, 13毫米宽, 6毫米厚。两加载面被加工为相互平行的平面, 以确保压力均匀施加于试件上。层板的铺层顺序列于表1。试件在容量为100 KN的Instron 8501 或 MTS 8100 试验机上受轴向缓慢加载直至破坏, 以模拟准静态加载状态。在实验的同时, 载荷和试验机加载头位移由计算机自动记录, 由此可得到应力应变曲线。对一些试件使用显微镜来监视试件侧面的裂纹扩展。实验后, 用扫描电子显微镜观察试件的断口。所用试件和装置简单而紧凑, 试件要求有足够厚度, 以防止试件整体失稳; 试件要足够大使得试件内可容有材料所固有的缺陷; 但又不能过大以便在一块层

* 国家自然科学基金资助(19772058)。

板上可切割足够的试件,从而避免由于试件取自不同层板带来的实验数据的分散。试件简图及纤维方向示于图1。

表1 破坏载荷及铺层顺序

铺层顺序 Stacking sequence	破坏载荷 (MPa) Failure Stress
$[0^\circ]_{48}$	968
$[\pm 30^\circ]_{12s}$	269
$[\pm 45^\circ]_{12s}$	181
$[\pm 60^\circ]_{12s}$	247
$[90^\circ]_{48}$	194
$[45^\circ]_{48}$	240

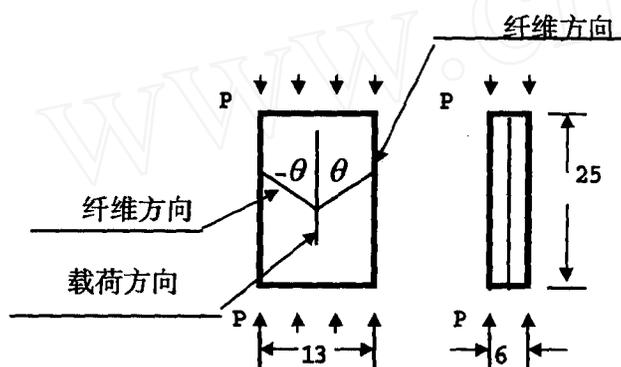


图1 试件 (毫米)

3 试验结果及讨论

试验结果有应力应变曲线和压缩强度(表1)。破坏应力根据试件的端部缩短计算得出的。除 $[\pm 45^\circ]_{12s}$ 试件,所有试件破坏应力均由试件所承受的最大载荷计算出来的。试件 $[\pm 45^\circ]_{12s}$ 的破坏应力是由其应力应变曲线上斜率为另时的载荷得出的。图2给出本文研究的所有铺层试件 $[0^\circ]_{48}$, $[\pm 30^\circ]_{12s}$, $[\pm 45^\circ]_{12s}$, $[\pm 60^\circ]_{12s}$, $[90^\circ]_{48}$ 的应力应变曲线。典型的 $[0^\circ]_{48}$ 试件的应力应变曲线示于图3,由图可看出试件的应力应变曲线近乎直线直到破坏并具有最高的破坏应力。这组试件的主要破坏模式为层间剪切破坏,其特征为层间裂纹和试件断口成刷子状。对试样仔细观察发现 $[0^\circ]_{48}$ 试样破坏于塑性弯折。图4所示为 $[\pm 30^\circ]_{12s}$ 和 $[\pm 45^\circ]_{12s}$ 试件的应力应变曲线, $[\pm 45^\circ]_{12s}$ 试件的应力应变曲线的非线性程度比 $[\pm 30^\circ]_{12s}$ 试件的大的多,而且是所有试件中最严重的。对 $[\pm 30^\circ]_{12s}$ 试样,主要的破坏模式为面内基体剪切破坏,对斜角铺层试件而言此破坏模式的特征为破坏面平行于纤维方向。 $[\pm 45^\circ]_{12s}$ 试件的破坏模式为面内基体剪切破坏和纤维剪变相结合的形式。当载荷达到150 Mpa以前,试件的侧表面没有任何损伤,相应的应力应变曲线为直线。载荷继续增大则出现了很强的非线性。当达到最大载荷180Mpa时,在试件侧面 ABCD 和 EFGH (图5)出现了二组横向裂纹,用眼睛观察时看得出是阴影线。对这些阴影线仔细分析发现,ABCD表面上半部份的阴影线与EFGH表面下半部份的阴影线相对应,作为一根剪变的纤维的两端出现在试件的侧面。

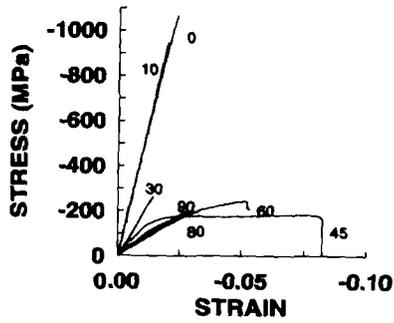


图 2. 应力应变曲线

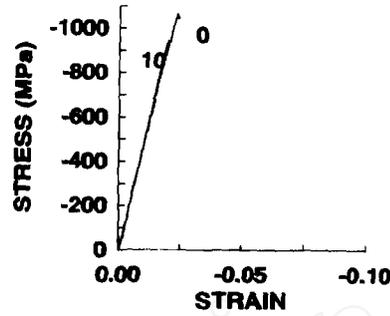


图 3. $[0]_{48}$ 试件的应力应变曲线

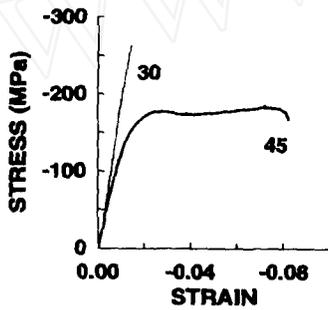


图4 $[\pm 30]_{12s}$ 和 $[\pm 45]_{12s}$ 试件的应力应变曲线

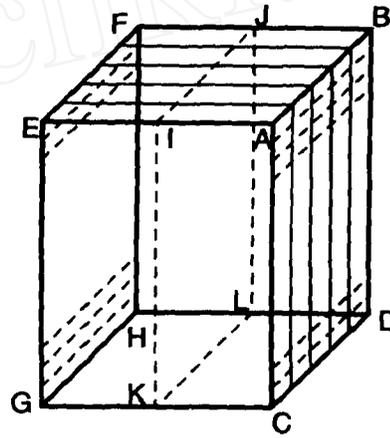


图 5 $[\pm 45]_{12s}$ 试件侧面裂纹示意图

用扫描电子显微镜观察,裂纹在试件侧面照片上为白色横线。实验还发现试件在压缩载荷作用下试件中部发生鼓胀,但是在试件的中面IJKL上,未发现有裂纹。另一方面在 $[\pm 45]_{12s}$ 试件的上表面发现面内基体剪切破坏,其裂纹方向是沿着纤维方向。

试件 $[\pm 60]_{12s}$ 和 $[90]_{48}$ 的典型应力应变曲线示于图6,此二种试件的数据表现了强烈的非线性,并且其破坏应变是除了试件 $[\pm 45]_{12s}$ 之外最大的。其破坏模式为基体压缩破坏,此种模式引起试件的破坏是灾难性的,并且其断裂面与试件中面成 45° 方向。

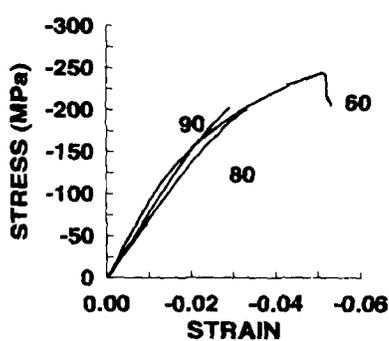


图6 $[\pm 60]_{12s}$ 和 $[90]_{48}$ 试件的应力应变曲线

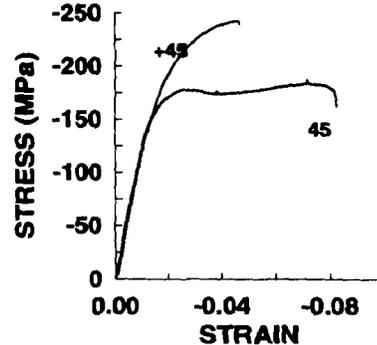


图7 $[45]_{48}$ 和 $[\pm 45]_{12s}$ 试件的应力应变曲线

试件 $[45^\circ]_{48}$ 和 $[\pm 45^\circ]_{12s}$ 应力应变曲线示于图7。从图中可以看出,在载荷达到150Mpa之前,此二种试件的应力应变曲线保持线性。当载荷超过150 Mpa之后,其表现很不相同。试件 $[45^\circ]_{48}$ 的断裂表面与纤维方向平行,但是与试件中面成 45° 角,因而其断裂模式为面内基体剪切破坏及基体压缩破坏二种模式相结合的模式。试件 $[\pm 45^\circ]_{12s}$ 的破坏模式为纤维剪变与面内基体剪切破坏二种模式相结合。图8给出纤维剪变的示意图。在压缩载荷作用下,试件 $[\pm 45^\circ]_{12s}$ 中的 45° 纤维束将要顺时针方向旋转,而 -45° 纤维束将要反时针方向旋转。在试件的左侧面 $+45^\circ$ 纤维束的下半部将向外旋转,而 -45° 纤维束的下半部将向内旋转。试件的上下加载面与加载装置接触,由于摩擦力其很难移动,因而试件的中部将向外鼓胀。

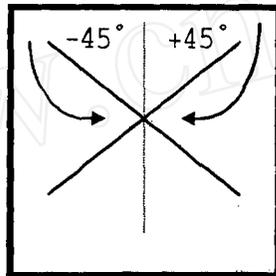


图 8

4 结论

本文研究了几种斜角铺层碳/环氧复合材料层板的压缩破坏。对 $[\pm 0^\circ]_{12s}$ 系列层板的压缩实验结果有破坏应力,破坏应变和层板的破坏模式。为了比较对 $[45^\circ]_{48}$ 试件的压缩破坏结果也一并列出。对 $[0^\circ]_{48}$ 试件主要的破坏模式为塑性弯折和层间剪切破坏;对 $[\pm 30^\circ]_{12s}$ 试件面内基体剪切破坏为其主要破坏模式;对 $[\pm 45^\circ]_{12s}$ 试件其主要破坏模式为面内基体剪切破坏和纤维剪变;对 $[\pm 60^\circ]_{12s}$ 和 $[90^\circ]_{48}$ 试件基体压缩破坏为其破坏模式。

5 致谢

作者感谢国家自然科学基金委员会和中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室的多方面支持。

参考文献

- [1] Budiansky, B. and Fleck, N.A., "Compression Failure of Fiber Composites", *J. of Mech. Phys. Solids*, 1993, Vol. 41, No. 1
- [2] Anand, K. and Gupta, V., "A Numerical Study of the Compression and Shear Failure of Woven Carbon-Carbon Laminates", *J. of Composite Materials*, 1995, Vol. 29, No. 18
- [3] Grape, J.A. and Guppy, V., "Failure in Carbon/Polymide Laminates Under Biaxial Compression", *J. of Composite Materials*, 1995, Vol. 29, No. 14
- [4] Shuart, M.J., "Failure of Compression-loaded Multidirectional Composite Laminates" *AIAA Journal*, 1989, Vol. 27, No. 9
- [5] Shuart, M.J. and Williams, J.G., "Compression Behavior of $\pm 45^\circ$ -Dominated Laminated with a Circular Hole or Impact Damage", *AIAA Journal*, 1986, Vol. 24, No. 1

[6] 毛天祥, Gupta, V., “斜角铺层碳/环氧复合材料层板的压缩破坏”, 第十届全国复合材料学术会议论文集, pp. 687

CHARACTERISTICS OF COMPRESSION FAILURE OF CARBON/EPOXY LAMINATED COMPOSITE

Tian Xiang Mao

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

ABSTRACT An experimental investigation of the failure of selected compression-loaded $[0^\circ]_{48}$, $[\pm 30^\circ]_{12s}$, $[\pm 45^\circ]_{12s}$, $[\pm 60^\circ]_{12s}$, $[90^\circ]_{48}$ Graphite/Epoxy composite laminates is described. The experiment results include compressive strength data and description of laminate failure modes and failure mechanisms. The dominant compression failure modes for the laminates in this study were found to be interlaminar shearing (for $[0^\circ]_{48}$, $[\pm 30^\circ]_{12s}$ specimens), fiber scissoring (for $[\pm 45^\circ]_{12s}$ specimen), in-plane matrix shearing and matrix compression (for $[\pm 60^\circ]_{12s}$, $[90^\circ]_{48}$ specimens). Both $[45^\circ]_{48}$ and $[\pm 45^\circ]_{12s}$ specimens behaved identically until the elastic limit of 150 MPa, after that they behaved quite different.

KEYWORDS Composite Laminate, Compression Failure, Interlaminar, Matrix Compression