第 16 卷 第 2 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 2
1999 年 5 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA May 1999

玻璃-环氧圆柱壳吸能特性的试验研究

万志敏 桂良进* 谢志民 杜星文
(哈尔滨工业大学 复合材料研究室, 哈尔滨 150001)

摘 要 主要研究[±θ]$_5$ 玻璃-环氧圆柱壳在轴向压缩载荷作用下的吸能特性。通过试验研究, 分析了纤维缠绕角度对能量吸收性能的影响; 比较了不同纤维缠绕角度的圆柱壳在不同加载条件下的压缩过程、压碎破坏模式及吸能能力。

关键词 复合材料圆柱壳, 缓冲特性, 能量吸收
中图分类号 TB332, O347.1

复合材料圆柱壳作为缓冲结构有很广阔的应用前景。目前, 国外已经把这种缓冲结构用于航空、航天等领域, 而且这方面的民用研究也正在进行。

很多研究表明[1~3], 复合材料具有较好的能量吸收性能。复合材料制成的结构, 能量吸收机理不同于金属结构, 金属结构依靠塑性变形来吸收能量, 而复合材料制成的结构则依靠层间开裂、纤维和基体的断裂、纤维的拔出等来吸收能量。

纤维增强复合材料圆柱壳的吸能特性与多种因素有关, 其外形尺寸[4]、基体和纤维的材料性能[5]、铺层方式[6]及冲击载荷的速率[7~9]等对它的吸能特性均有一定影响。本文中主要试验研究分析纤维缠绕角度对复合材料圆柱壳吸能特性的影响。

1 试验研究

试件为[±15°]$_5$、[±45°]$_5$、[±75°]$_5$ 的 S 玻璃-环氧圆柱壳。

为进行动态试验, 设计并建立了动态冲击试验系统, 该系统由冲击试验装置、加速度传感器和激光-光栅位移测量系统及数据采集系统组成。

1.1 冲击试验装置

冲击试验装置示意图见图 1。当重锤在一定高度落下时, 可实现对试件的动态加载。为使在加载过程中重锤的底面保持水平, 需用导轨加以导向。挂钩和电磁铁等组成电磁脱钩装置, 可在试验过程中自动快速释放重锤。

1.2 瞬态冲击力的测量

使用加速度传感器测量重锤在冲击过程中的瞬态加速度的变化, 可间接获得瞬态冲击力。

1.3 瞬态位移的测量

光栅传感器在测量及控制中的应用很广。通常, 把光栅常数相等的主光栅和指示光栅刻线面相对叠合在一起, 利用莫尔条纹与两光栅相对移动距离之间的一一对应关系, 根据光电元件

收修改稿、初稿日期: 1998-03-21, 1997-07-31。哈尔滨市青年基金资助项目

* 现为北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系博士研究生

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

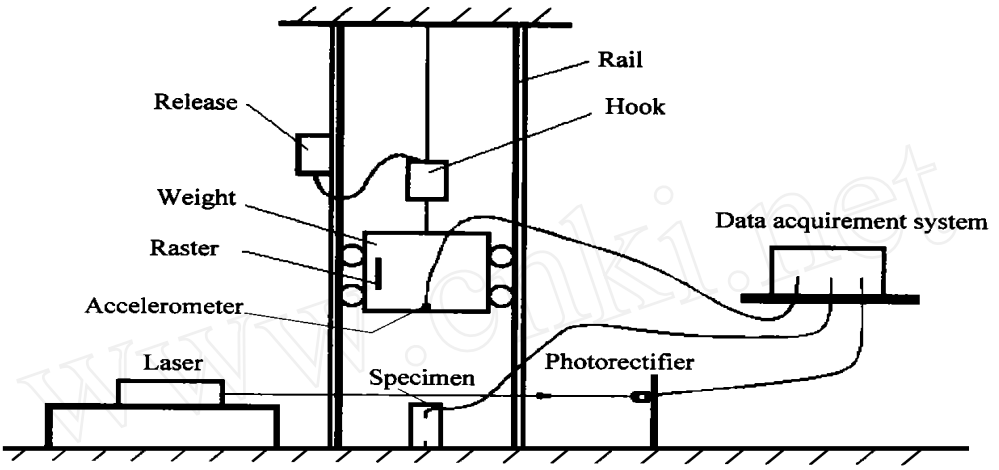

图 1 冲击试验装置示意图 Fig. 1 Sketch of impact equipment

接收的条纹数目, 就可得知主光栅所移动的位移值。为测量重锤下落时的瞬时位移, 根据光栅传感器原理, 本文作者设计了激光光栅瞬态位移测量装置。其构成如图 2 所示,

这种激光-光栅瞬态位移测量装置的工作原理是: 固定在重锤上的光栅, 随重锤同步运动, 光栅的移动使透射光发生周期性变化, 这种变化经接收放大后, 显示出清晰的梳子状脉冲信号, 如图 3 所示, 这种脉冲信号的间距变化记录着重锤下落的快慢, 经处理, 可得到重锤对应于每一个时刻的位移。

这种光栅传感器与常规光栅传感器的不同之处在于: 它只需要一个主光栅, 直接由主光栅所移动的光栅常数的数目来代替莫尔条纹。

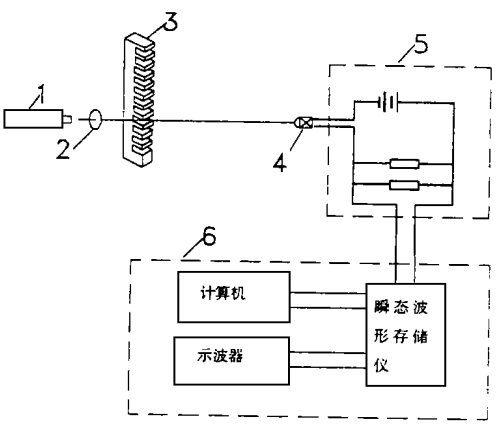

图 2 激光-光栅位移测量系统示意图
Fig. 2 Sketch of laser-raster-displacement measure system

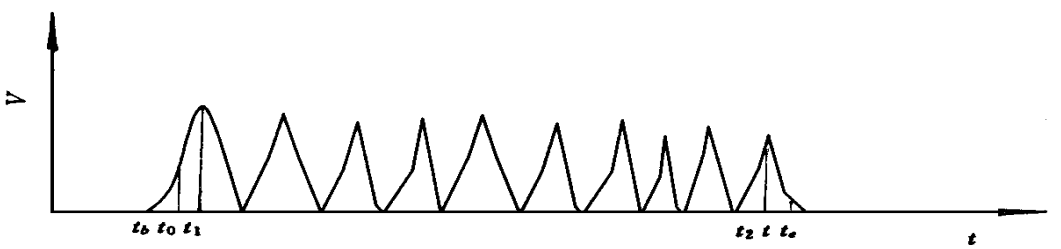

图 3 位移脉冲信号 Fig. 3 A series of displacement pulses

1.4 数据采集系统

数据采集系统的工作框图如图 4 所示。由压电式加速度传感器、国产 3112 电荷放大器、BC-885 瞬态波形存储仪、激光-光栅位移测量系统、数字示波器及计算机组成。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

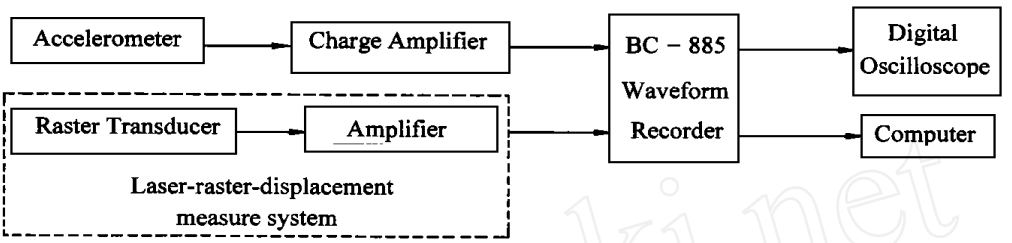

图 4　数据采集系统示意图　　Fig. 4　Data acquirement system

2　试验结果分析

2.1　压缩过程分析

试验表明, 复合材料圆柱壳的压缩过程呈现三种基本形式: (1) 稳态压缩过程; (2) 非稳态压缩过程; (3) 混合压缩过程。

试件上端发生局部初始破坏后, 随着进一步加载, 试件自上而下被逐段压碎, 我们称之为稳态压缩过程; 试件在压缩载荷作用下突然发生整体破坏(倒塌)并且丧失承载能力, 我们称之为非稳态压缩过程; 试件经历了一段逐渐压碎过程后, 再发生较大的破坏, 其承载能力迅速降低。这种压缩过程称为混合压缩过程。

发生稳态压缩的前提条件是: 试件的成型工艺好, 结构均匀; 其组分材料较脆, 容易开裂; 纤维缠绕角度 θ 接近 0°或 90°; 试件上端存在一定的初始削弱(如倒角), 使整个压碎破坏过程能从试件上端触发。

稳态压缩过程中, 压缩载荷变化小, 试件用于缓冲时, 可以对被缓冲物体施加比较平稳的制动力, 因此具有较好的缓冲性能。另外, 因为压缩载荷在有效压缩位移上保持较高的值, 因而试件吸收了较多的能量。

稳态压缩过程的典型压缩载荷-位移曲线见图 5, 它可以分为三个阶段: (1) 弹性压缩阶段; (2) 渐进压碎阶段; (3) 碎片压实阶段。

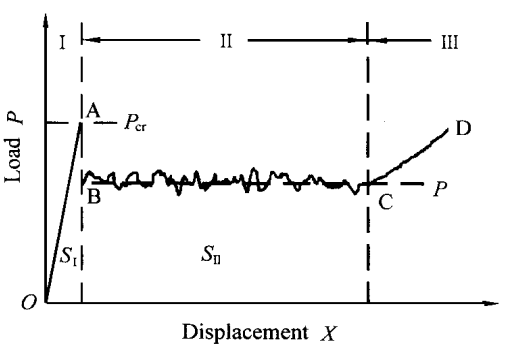

图 5　稳态压缩的三个阶段

Fig. 5　Three stages of stable crushing process

如图 5 所示载荷-位移曲线中, 第 I 部分(OA 段)为弹性压缩阶段, OA 的斜率等于试件的轴向压缩刚度, 此时试件的弹性应变能增加。弹性压缩阶段所吸收的总能量可由载荷-位移曲线的第 I 部分下的面积 S_{I} 表示。

第 II 部分(BC 段)为渐进压碎阶段。在该阶段, 试件上端开始发生局部破坏, 随着进一步压缩, 试件自上而下被逐段压碎破坏, 压缩载荷变化不大, 载荷-位移曲线在平均值附近波动。该阶段所吸收的总能量可由 BC 段曲线下的面积 S_{II} 来表示, 它主要包括形成裂纹新表面的表面能。

第 III 部分(CD 段)为碎片压实阶段。在该阶段, 试件被完全压碎后, 随着进一步加载, 碎片被压实, 压缩载荷逐步增大。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 典型破坏模式

根据试验结果, 本文中把[±θ°]$_5$ 铺层的玻璃-环氧复合材料圆柱壳受轴向压缩载荷作用时的破坏模式归纳如下:

2.2.1 非稳态压缩破坏模式

非稳态压缩破坏以总体破坏(45°方向剪切)为主, 如图 6 所示, 这种破坏模式的最明显特征是试件的壳壁上产生 45°方向的穿透裂纹。在压缩载荷作用下, 壳壁发生剪切破坏, 裂纹沿 45°方向呈螺旋线状自上而下迅速扩展, 使试件发生总体破坏。这种破坏模式主要出现于[±45°]$_5$ 试件中。显然试件以这种模式破坏时, 所吸收的能量很少。

2.2.2 稳态压缩破坏模式

试件在承受轴向压缩载荷作用下, 往往先发生局部失稳, 随着进一步加载, 局部屈曲向下逐步发展, 此后, 随着继续加载, θ角较小的试件会发生层间开裂破坏, θ角较大的试件则会发生横向剪切破坏。

(1) 层间开裂 如图 7 所示, 这种破坏模式的主要特征是大量层间裂纹的生成、扩展导致了圆柱壳的层间开裂。试件在压缩载荷作用下, 壳壁层内裂纹的萌生、扩展以及平行于纤维方向的裂纹在单层或相邻的层内沿纤维方向扩展, 使基体发生周向断裂, 从而使圆柱壳的铺层沿周向开裂成分离的层束, 随着进一步加载, 由于中面附近 I 型(张开型)裂纹的扩展, 层束发生层间开裂, 并向内外两侧弯曲, 当弯曲变形增大时, 层间剪切应力的增大导致了层束的层间 II 型(剪切型)裂纹的生成、扩展, 因而引起壳壁的其它层间开裂。这种破坏模式以基体的断裂为主, 纤维的断裂很少, 而且有的纤维还很完整。很显然, 这种破坏模式的压碎过程主要是由基体控制的, 其能量吸收机理主要是基体中裂纹的扩展。

(2) 横向剪切 如图 8 所示, 这种破坏模式的显著特征是试件壳壁的轴向断面呈楔形, 且层束上有单个或多个短的层间裂纹和纵向层内裂纹, 层间裂纹和层内裂纹的长度通常小于壳壁厚度, 层间裂纹的扩展和层束的断裂控制压碎破坏过程。因此, 横向剪切破坏模式的能量吸收机理是层间裂纹的扩展和层束的断裂。层间裂纹的扩展与基体的材料性能有关, 层束的断裂则与周向纤维的拉伸刚度和应变极限有关。层间裂纹可按 I 型(张开型)裂纹或 II 型(剪切型)裂纹扩展, 周向纤维对 I 型裂纹的扩展有主要影响, 随破坏应变的增大, 层间裂纹的长度减小, 层束的长度也随之减小, 因而试件的吸能能力有所增加。

图 6 总体破坏
Fig. 6 Collapse

图 7 层间开裂
Fig. 7 Interlaminar cracking

图 8 横向剪切
Fig. 8 Transverse shearing

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3 试验结果比较

2.3.1 不同纤维缠绕角度的试验结果比较

实验采用图 1 所示冲击试验装置进行动态试验, 重锤与试件接触时的初始冲击速度为 6m/s。下面就[±15°]$_5$、[±45°]$_5$、[±75°]$_5$ 的试件压缩过程、破坏模式及吸能能力进行对比分析。如图 6 至图 8 所示, 纤维缠绕角度不同试件的破坏模式不同。[±15°]$_5$ 试件以层间开裂模式破坏; [±75°]$_5$试件以横向剪切模式破坏; 而[±45°]$_5$ 的破坏模式则比较复杂, 随试件的成型工艺及压缩时的边界条件(如有无润滑)不同, 可能发生总体破坏(45°方向剪切)或层间开裂兼有横向剪切破坏。

[±15°]$_5$、[±75°]$_5$ 试件的压缩过程是稳态的, 而[±45°]$_5$ 试件的压缩过程则可能为稳态、非稳态或混和模式。

由于不同纤维缠绕角度的试件破坏模式不同, 压缩过程也不同, 因而吸能能力也存在很大差异。图 9 为[±15°]$_5$、[±45°]$_5$、[±75°]$_5$ 试件的吸能能力对比, 图中 E_s 为试件的平均比能吸收能力, 即:

$$E_s = \frac{\sum E_i}{\sum M_i} = \frac{\sum E_i}{\rho \pi D \, t_i l_i}$$

式中: M_i、E_i 分别为 θ 相同的试件各自的质量和所吸收的能量; ρ 为试件的平均密度; D 为试件中面的直径; t_i 为试件壳壁厚度; l_i 为试件的有效压缩长度。对[±45°]$_5$ 试件, 只选取以稳态压缩模式破坏试件的数据。

从图中可以看到, 当 θ 角由 15°增大到 75°时, 试件的吸能能力有所增加。当 θ 角增大时, 圆柱壳的周向刚度和强度增大, 试件的破坏模式由层间开裂转变为横向剪切, 层束的断裂和层间裂纹的扩展控制压碎破坏过程, 纤维和基体的断裂吸收了大量的能量。

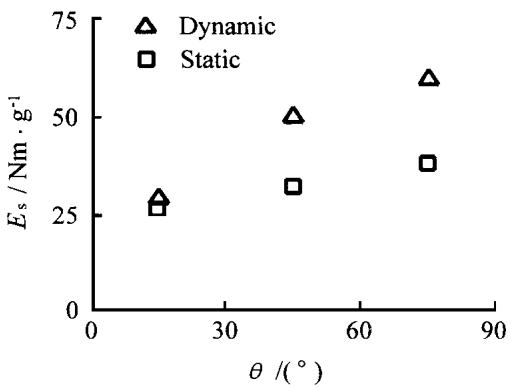

图 9　不同纤维缠绕角度试件的吸能能力对比

Fig. 9　Effect of winding angle on the energy absorption capability of the tubes

2.3.2 动态试验与静态试验结果比较

为对比分析, 本文中还进行了静态试验。试验结果表明, 静态载荷作用下, [±15°]$_5$、[±45°]$_5$、[±75°]$_5$ 的玻璃-环氧试件的破坏模式与静态加载条件下基本相同, 如图 9 所示。与静态加载相比, 在动态加载条件下, [±15°]$_5$ 试件的吸能能力稍有提高, 而[±45°]$_5$、[±75°]$_5$ 试件的能量吸收有较大提高。

由前面的分析可知, 随着角度的增大, 试件的破坏模式由层间开裂转变为横向剪切; 能量吸收机理由层间裂纹的扩展转变为层束的断裂; 相应的破坏过程由基体控制转变为由纤维和基体共同控制。因此, [±15°]$_5$ 试件的吸能能力稍有提高。而对[±45°]$_5$、[±75°]$_5$ 试件, 由于周向纤维的刚度和强度随应变率的增加而提高, 使其能量吸收能力有较大提高。

3 结　论

通过对玻璃-环氧复合材料圆柱壳吸能特性的试验研究, 得到以下结论:

复合材料圆柱壳在轴向压缩载荷作用下, 若发生稳态压缩时, 其吸能能力较大。发生稳态

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

压缩需满足一定条件。

在冲击载荷作用下,不同纤维缠绕角度的玻璃-环氧圆柱壳的压缩过程、破坏模式及吸能能力不同。$[\pm 15°]_5$ 和 $[\pm 75°]_5$ 圆柱壳的压缩过程是稳态的,$[\pm 15°]_5$ 试件破坏模式为层间开裂,其能量吸收机理主要是层间裂纹的扩展。$[\pm 75°]_5$ 试件的破坏模式为横向剪切,其能量吸收机理主要是层束的断裂,其次是层间裂纹的扩展。而 $[\pm 45°]_5$ 圆柱壳对结构的不均匀性比较敏感,其压缩过程是非稳态或稳态的,相应的破坏模式为总体破坏或层间开裂兼横向剪切。随纤维缠绕角度的增大,$[\pm\theta]_5$ 玻璃-环氧圆柱壳的吸能能力有所增加。

静态载荷作用下,与动态加载时相比,玻璃-环氧圆柱壳的压缩过程、破坏模式基本相同,而不同纤维缠绕角度的试件吸能能力有不同程度的降低。

参 考 文 献

1 Thornton P H, Edwards P J. Energy absorption in composite tubes. *Journal of Composite Materials*, 1982, 16(11): 521～545

2 Hull D. Energy absorption of composite materials under crash conditions. In: Hayashi ed. Proceedings of the fourth international conference on composite materials, Tokyo: Japan Society for Composite Materials, 1982. 861～870

3 Farley G L. Energy absorption of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 1983, 17(5): 267～279

4 Farley G L. Effect of specimen geometry on the energy absorption capability of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 1986, 20(7): 390～400

5 Farley G L. Effect of fiber and matrix maximum strain on the energy absorption of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 1986, 20(4): 322～334

6 Farley G L. Relationship between mechanical-property and energy absorption trends for composite tubes. *NASA* N93-16537

7 Thornton P H. The crush behavior of pultruded tubes at high strain rates, *Journal of Composite Materials*, 1990, 24(6): 594～615

8 Farley G L. The effect of crushing speed on the energy-absorption capability of composite tubes, *Journal of Composite Materials*, 1991, 25(10): 1312～1323

9 Boneil C, Jézéquel L, Marguet L B. Crushing behaviour and modeling of composite tubes. Lyon: EUROMECH 334, 1995. 15～17

EXPERIMENTAL STUDY ON ENERGY-ABSORPTION PROPERTIES OF GLASS-EPOXY CYLINDRICAL SHELLS

Wan Zhimin Gui Liangjin Xie Zhimin Du Xingwen

(Research Lab. Comp. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The energy-absorption properties of the $[\pm\theta]_5$ glass-epoxy cylindrical shells subjected to axial compression were studied in this paper. Tests were performed to study the effect of the winding angle of the fibers on energy-absorption properties. The crushing process, failure modes and energy-absorption capability of various cylindrical composite shells under various loading conditions were analyzed.

Key words cylindrical composite shell, attenuation property, energy absorption

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net