

Nomex 蜂窝夹层板弯曲性能温度相关性的实验研究

王家伟, 陈敏孙, 江厚满

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 采用三点弯曲法对六边形 Nomex 蜂窝夹层板在不同温度下的弯曲性能进行了研究。根据蜂窝芯的正交各向异性特征, 分别取面内的两个主方向为长度方向制作了 L 试件和 W 试件。在 25 °C、50 °C、100 °C、150 °C 和 180 °C 下开展了弯曲实验, 确定了弯曲刚度与剪切刚度。结果表明: 随着温度的升高, 两个方向上的弯曲刚度与剪切刚度均明显下降; 当温度升高到 180 °C 时, 弯曲刚度与剪切刚度均低于常温时的 20%。对于蜂窝夹层板在横向力学载荷作用下的破坏模式, 当温度低于 50 °C 时, 多出现面板凹陷; 当温度达到 150 °C 甚至更高时, 多出现面板与蜂窝芯脱离并向外凸出。文中研究成果可以为 Nomex 蜂窝夹层板在变温或激光辐照下的工程应用提供参考。

关键词: Nomex 蜂窝; 夹层板; 弯曲刚度; 剪切刚度

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0120004

Experimental study on the temperature effect on the flexural properties of Nomex honeycomb sandwich structure

Wang Jiawei, Chen Minsun, Jiang Houman

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The flexural properties of Nomex honeycomb sandwich structure at different temperatures were studied with three-point bending method. Considering the honeycomb's orthotropy, L and W specimens were made, respectively taking the two main directions in the core plane as the longitudinal direction. Bending experiments were carried out to determine the bending stiffness and shear stiffness at 25 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C and 180 °C respectively. The results show that both the bending stiffness and the shear stiffness in the two directions decreases as the temperature rises. When the temperature rises to 180 °C, the two kinds of stiffness are less than 20% of that at room temperature. The temperature also has effect on the failure mode when the sandwich structure is under transverse mechanical load. A sunken skin is often seen when the temperature is below 50 °C; when the temperature rises to 150 °C or higher, the skin may be separated from the honeycomb and be protruded outward. The research results may provide a reference for the application of Nomex honeycomb structure in laser irradiation or fluctuating temperature environments.

Key words: Nomex honeycomb; sandwich structure; bending stiffness; shear stiffness

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-12-03

作者简介: 王家伟(1989-), 男, 硕士生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: 451965397@qq.com

导师简介: 江厚满(1970-), 男, 研究员, 硕士生导师, 博士后, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: jhm3395@sina.com

0 引言

以 Nomex 蜂窝为夹芯、Kevlar 纤维为面板的蜂窝夹层板具有比强度较高、比刚度较高、抗冲击、耐腐蚀等很多优良的特性,在工程上被广泛应用^[1-3]。实际应用中,Nomex 蜂窝夹层板经常承受弯矩,必须满足一定的刚度要求才能不发生失稳。

当 Nomex 蜂窝夹层板的工作温度发生较大的变化,或者遭到激光辐照而升温,为了分析夹层板在这两种环境下的力学稳定性,就需要研究夹层板力学特性的温度相关性。

张小珍等人实验研究了从常温到 160 °C 范围内 Nomex 蜂窝板的压缩和剪切强度随温度的变化^[4]。考虑到 Nomex 蜂窝夹层板经常承受弯矩,文中关注其弯曲性能随温度的变化。将在不同的温度下采用三点弯曲法测量 Nomex 蜂窝夹层板的弯曲刚度与剪切刚度,进而分析刚度随温度的变化特性;考察不同温度下 Nomex 蜂窝夹层板的破坏模式。

1 三点弯曲法

工程上常采用三点弯曲法测量蜂窝夹层板的弯曲刚度与剪切刚度。该方法可通过一次测量得到多个弹性参数,方法简单,用料节省^[6]。

图 1 是三点弯曲法的示意图。夹层板在 A、B 两处简支,中心 O 处施加线载荷 P。d 为夹层板的宽度,b 为夹层板外伸臂的长度,l 为两简支点的跨距长度。用位移传感器测量中点挠度 ω_m 、外伸点的挠度 ω_{b1} 和 ω_{b2} ,用压力传感器测量载荷 P。由于外伸点满足对称关系,理想情况下有 $\omega_{b1}=\omega_{b2}$;实际测量中一般取 $\omega_b=(\omega_{b1}+\omega_{b2})/2$ 。

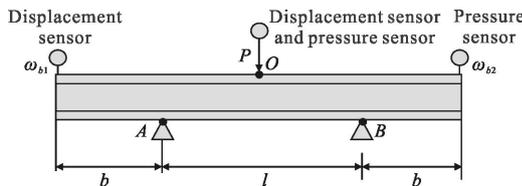


图 1 三点弯曲法示意图

Fig.1 Schematic diagram of three bending method

根据参考文献[7],中点和外伸点的挠度可表示为:

$$\omega_m = \frac{Pl^3}{48D_x d} + \frac{Pl}{4C_x d} \quad (1)$$

$$\omega_b = \frac{bPl^3}{16D_x d} \quad (2)$$

式中: D_x 与 C_x 分别为试件长度方向上的弯曲刚度与剪切刚度。

当 $l/b=3$ 时,弯曲刚度和剪切刚度可以方便地按下式计算^[8]:

$$D_x = \frac{Pl^3}{48\omega_b d} \quad (3)$$

$$C_x = \frac{Pl}{4\omega_b d} \quad (4)$$

式中: ω_s 为夹层板中点的挠度与外伸点挠度之差:

$$\omega_s = \omega_m - \omega_b \quad (5)$$

2 试件及实验装置

实验所用夹层板的上、下面板厚度为 0.5 mm, Nomex 蜂窝芯的高度为 4.5 mm,胞壁厚度为 0.5 mm,胞壁长度为 3 mm。蜂窝芯的图片见图 2。

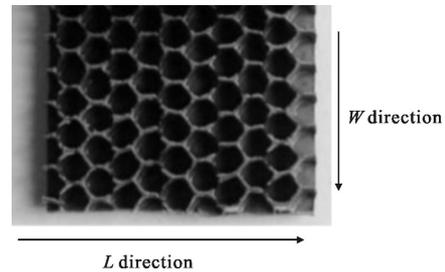


图 2 Nomex 蜂窝芯

Fig.2 Nomex honeycomb core

蜂窝芯具有正交各向异性特征,面内的两个主方向分别记为 L 和 W。分别取 L 方向和 W 方向为长度方向制作 L 试件和 W 试件。试件尺寸均为 80 mm×48 mm×5.5 mm,在宽度方向至少有四个完整的蜂窝周期。实验前试件形貌见图 3。

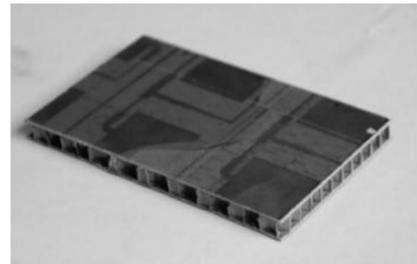


图 3 实验前试件形貌

Fig.3 Appearance of the specimen before experiment

实验在 WDW-100 型多传感器电子万能试验机上完成,实验装置见图 4。两筒支点的跨距 $l=48\text{ mm}$,外伸臂长度 $b=16\text{ mm}$ 。步进电机通过光滑圆棒以 2 mm/min 的速度对蜂窝夹层板施加荷载,直到试样破坏为止。蜂窝夹层板试件和图示各部件置于加热炉中。为确保试件整体达到热平衡,当和样品接触的热电偶记录的温度达到设置值之后,再保温 30 min 。实验中给试件施加了 10 N 的预载荷。当保温完成后,开始驱动步进电机,同时记录三个位移传感器和一个压力传感器的输出信号。实验中为了排除试件的分散性,每一个温度下都至少进行了两次实验。

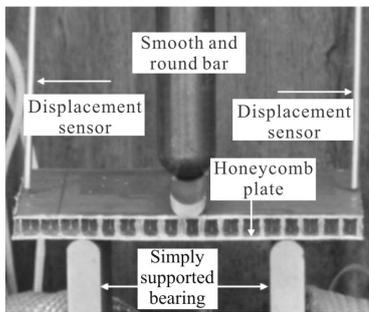


图 4 实验装置

Fig.4 Experimental facility

3 实验结果及分析

实验测量得到的典型载荷-位移曲线如图 5 所示(图示曲线对应于 L 试样、 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下的结果)。 ω_b 取两个外伸点挠度 ω_{b1} 和 ω_{b2} 的平均值, ω_s 为蜂窝夹层板中点挠度 ω_m 与外伸点挠度 ω_b 之差。可以看出,在加载过程中,载荷-位移曲线一般存在线性区,如图 AB 和 CD 段,取此线性区的斜率分别代入公式(3)和公式(4),就可以得到弯曲刚度 D_x 与剪切刚度 C_x 。载

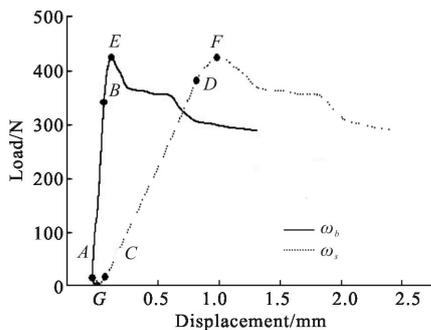


图 5 典型的载荷-位移曲线

Fig.5 Typical load-displacement curve

荷达到最大值(分别对应曲线上的 E 点和 F 点)后,随位移的增加,载荷反而下降,可以认为此时样品发生了失稳。刚开始加载时,在较小的位移区间内,外伸点的位移反向增大,如图 GA 段,这是在夹层板样品实验中多次观察到的现象,可能和面板与蜂窝芯间的剪切作用有关。

图 6 和图 7 分别给出了 L 和 W 方向上的弯曲刚度和剪切刚度随温度的变化曲线。可以看出,随着温度的升高, Nomex 蜂窝夹层板在这两个方向上的弯曲刚度和剪切刚度均呈明显下降趋势;当温度升高到 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 时, L 方向和 W 方向上的弯曲刚度分别为常温时的 5.0% 和 12% , 剪切刚度分别为常温时的 15% 和 3.6% 。总体而言,相同温度下, L 方向上的剪切刚度大于 W 方向上的剪切刚度;在温度较低时, L 方向上的弯曲刚度大于 W 方向上的弯曲刚度,但是当温度超过 $150\text{ }^\circ\text{C}$, W 方向上的弯曲刚度反而比 L 方向上的大。

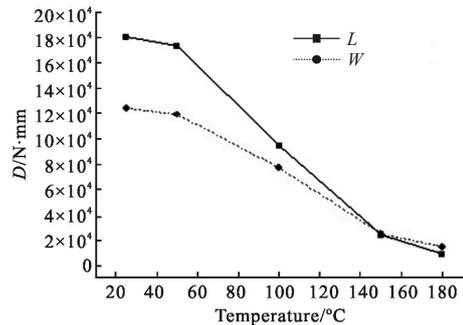


图 6 弯曲刚度随温度的变化

Fig.6 Variation of bending stiffness with temperature

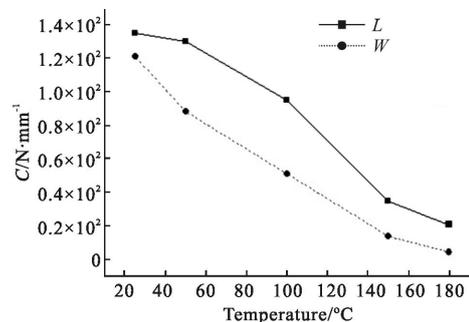


图 7 剪切刚度随温度的变化

Fig.7 Variation of shear stiffness with temperature

根据参考文献[7],蜂窝夹层板的弯曲刚度直接取决于面板的弹性模量,实验中研究的 Nomex 蜂窝夹层板,面板并不是严格的各向同性材料,在不同的

方向上弹性模量会有差异,这直接导致了实验测得的常温下 L 方向和 W 方向的弯曲刚度出现了较大差异。随着温度的升高,面板弹性模量均明显下降, W 方向和 L 方向的弯曲刚度呈现接近的趋势。另一方面,蜂窝板的剪切刚度直接取决于蜂窝芯的剪切模量。相关参考文献[7]计算了蜂窝芯不同取向的等效剪切模量后发现,等效剪切模量与蜂窝壁边长和厚度有关,实际的制作工艺决定了蜂窝芯在 L 方向的等效剪切模量一定大于 W 方向的等效剪切模量。这可以进一步解释为什么每一个温度节点, L 方向的剪切刚度必然大于 W 方向。

图 8 给出了 L 和 W 试件在不同温度下所能承受的最大横向力学载荷,可以看出, Nomex 蜂窝夹层板能承受的最大横向力学载荷随温度的升高明显减小;达到 180°C 时,试件已明显软化,难以承受较大的横向力学载荷。

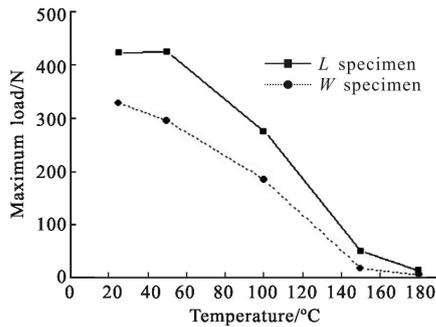


图 8 最大载荷随温度的变化

Fig.8 Variation of maximum load with temperature

图 9 给出了 Nomex 蜂窝夹层板试样在横向力学加载后的两种典型破坏形貌,图(a)、(b)分别对应 50°C 和 150°C 的热环境。可以看出, Nomex 蜂窝夹层板在 50°C 下破坏时,面板向内凹陷; 150°C 下破坏时,面板与蜂窝芯脱离并向外凸出。

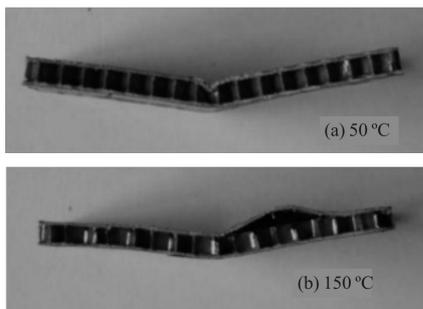


图 9 不同温度下的破坏形貌

Fig.9 Destructive appearance in different temperature

分析认为, Nomex 蜂窝夹层板发生面板凹陷主要原因是横向载荷过大,蜂窝芯的压缩强度不够;而较高温度下破坏时出现面板与蜂窝芯脱离,原因是高温下胶粘剂性能退化,在横向力学加载时面板与蜂窝芯粘合不紧。

4 结 论

文中在不同的温度下采用三点弯曲法测量了 Nomex 蜂窝夹层板的弯曲刚度与剪切刚度,进而分析刚度随温度的变化特性。结果表明,该蜂窝夹层板的弯曲刚度和剪切刚度均随温度的升高明显下降。当温度升高到 180°C 时,无论是 L 试件还是 W 试件都几乎不能承受横向力学载荷。温度升高对 Nomex 蜂窝夹层板的胶粘剂的性能影响较大。在高温下 Nomex 蜂窝夹层板极易出现面板与蜂窝芯脱离的破坏模式,这会直接导致其承受横向载荷的能力出现剧变。

由于温度对 Nomex 蜂窝夹层板的刚度以及在横向力学载荷作用下的破坏模式均有重要影响,当夹层板的工作温度有可能发生较大的变化或者遭到较强激光的辐照时,对可能出现的力学失稳是需要谨慎考虑的。

参考文献:

- [1] Castanié B, Bouvet C, Aminanda Y, et al. Modeling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(7): 620-634.
- [2] Foo C C, Chai G B, Seah L K. Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure [J]. *Composite Structures*, 2007, 80: 588-594.
- [3] Gornet L, Marguet S, Marckmann G. Modeling of Nomex honeycomb cores, linear and nonlinear behaviors [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2007, 14 (8): 589-601.
- [4] Zhang Xiaozhen, Li Yong, Song Guizhi, et al. The effect temperature on compression strength and shear strength of Nomex honeycomb[J]. *Material Engineering*, 1993(10): 17-18. (in Chinese)
- [5] 张小珍, 李勇, 宋桂枝, 等. 温度对 Nomex 蜂窝压缩和剪切强度影响[J]. *材料工程*, 1993(10): 17-18.
- [5] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, et al. Laser Irradiation Effect [M]. Beijing: National Defense Industry

- Press, 2002. (in Chinese)
- 孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [6] Li Jiaju, Yang Guicheng. The progression and determination of elastic constants of honeycomb sandwich panels[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 1992, 5: 6-13. (in Chinese)
- 李家驹, 杨桂成. 复合材料蜂窝夹层板弹性常数测试及进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 1992, 5: 6-13.
- [7] The Institute of Mechanics of the Chinese Academy of Science. Bending of Laminated Plate and Shell Stability and Vibration[M]. Beijing: Science Press, 1977. (in Chinese)
- 中国科学院北京力学研究所. 夹层板壳的弯曲稳定和振动[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [8] Yuan Jiajun. Design and Analysis of Satellite Structures [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2004. (in Chinese)
- 袁家军. 卫星结构设计与分析 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2004.