

文章编号: 1001-1455(2009)06-0590-06

# 双层夹芯复合材料结构横向冲击响应实验\*

江大志, 郭 洋, 李长亮, 肖加余

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 采用玻璃纤维增强环氧树脂复合材料层合板作为内、外面板, 以 PVC 泡沫作为芯材, 构造了双层夹芯复合材料结构。采用落锤冲击实验, 得到了冲击过程的撞击力历史; 研究了在不同的冲击能量下, 双层夹芯结构的冲击响应及内面板位置对双层夹芯结构冲击响应的影响。实验结果表明, 内面板的引入及内面板的位置显著影响双层夹芯结构的撞击力历史, 根据该撞击力历史可以优化设计出抗冲击性能优异的新型双层夹芯复合材料结构。

**关键词:** 固体力学; 夹层结构; 低速冲击; 复合材料; 撞击力

**中图分类号:** O347      **国标学科代码:** 130·15      **文献标志码:** A

## 1 引 言

夹层结构在构造上通常是用厚度较小、强度高、刚度大的材料作为面板, 而用密度小、厚度较大、有一定承剪能力的材料作为芯层, 用胶接的方法把它们连接起来。夹层结构的主要特点是抗弯刚度大, 可以在结构质量较小的情况下承受较大的弯曲载荷, 即具有较高的抗弯刚度/质量比, 被广泛用于制造飞机和火箭的外部部件。此外, 夹层结构还具有隔音、隔热等优异的物理性能, 可被制成轻质构件作为高层框架结构的内外墙体材料。

传统的夹芯结构通常由上下面板和 1 层芯材构成。当夹芯结构受到低速冲击时可能导致面板与芯材间脱粘、上面板损伤和芯材塌陷、整体贯穿等损失和破坏模式的发生<sup>[1-5]</sup>; 或当外面板破坏后, 水或其他物质渗入芯材导致结构失效。另外, 受损的夹层结构的修复也比较困难, 修复结构的功能恢复较差。

20 世纪 90 年代 C. A. Weeks 等<sup>[6]</sup>提出了多层夹芯结构的设想, 并比较了多层夹芯结构与传统单层夹芯结构的性能, 结果表明, 尽管多层夹芯结构的弯曲刚度比单层夹芯结构的稍小, 但多层夹芯结构抗横向冲击损伤的能力明显优于单层夹芯结构。此外, 由于内面板的分隔作用, 可以预见多层夹芯结构将具有更好的隔音、隔热等物理性能; 对非整体贯穿型损伤的修复也非常有利, 甚至可免于修复处理。初步的数值模拟研究表明<sup>[7-8]</sup>, 在横向冲击载荷下, 双层夹芯结构中内面板起到了将作用在冲击点局部的能量分散至整体夹芯结构的作用, 有效地抑制了面板与芯材间脱粘、芯材塌陷和整体贯穿等损失模式的发生。双(多)层夹芯结构具有良好的结构特性并显示出了优异的性能, 已引起越来越多的关注<sup>[9]</sup>。

本文中拟采用玻璃纤维增强环氧树脂复合材料层合板作为内、外面板, 以 PVC 泡沫作为芯材, 构造双层夹芯复合材料结构。采用落锤冲击实验, 对构造的双层夹芯复合材料结构进行横向低速冲击实验, 得到冲击过程的撞击力历史; 研究在不同的冲击能量下, 双层夹芯结构的冲击响应及内面板位置对双层夹芯结构冲击响应(撞击力)的影响。

## 2 实 验

重点研究内面板的位置对双层夹芯复合材料结构冲击响应的影响。通过改变内面板在夹芯中的位置, 设计出不同构型的双层夹芯结构。根据设计出的结构制备试件进行落锤冲击实验, 通过自由下落的

\* 收稿日期: 2008-07-12; 修回日期: 2009-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50673099)

作者简介: 江大志(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

冲击杆上的应变片记录冲击杆中传播的应力波,进而得到撞击力历史。

## 2.1 试件制备

设计的双层夹芯结构主要由上下面板、上下芯材和内面板组成。其中上夹芯的高度即内面板距离上面板的高度用  $h$  表示。实验中设定夹芯板的面内尺寸为  $180\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ ,总厚度为  $25\text{ mm}$ ,其中内面板厚度为  $1\text{ mm}$ ,上下面板厚度均为  $2\text{ mm}$ ,均为玻璃纤维方格布/环氧复合材料,上下面板的加载率、跨距、弯曲强度、弯曲模量分别为  $2.0\text{ mm/min}$ 、 $50.0\text{ mm}$ 、 $281.4\text{ MPa}$ 、 $17.5\text{ GPa}$ ,内面板的加载率、跨距、弯曲强度、弯曲模量分别为  $1.0\text{ mm/min}$ 、 $30.0\text{ mm}$ 、 $243.9\text{ MPa}$ 、 $11.0\text{ GPa}$ 。芯材为PVC泡沫,平均表观密度  $60\text{ kg/m}^3$ ,压缩强度  $0.9\text{ MPa}$ 。依  $h$  的不同,构造了4种夹芯结构:5:15结构( $h=5\text{ mm}$ )、10:10结构( $h=10\text{ mm}$ )、15:5结构( $h=15\text{ mm}$ )、单层夹芯结构( $h=21\text{ mm}$ )。

## 2.2 落锤冲击实验系统

为了得到冲击过程中的撞击力历史,采用带球头的长杆落锤冲击。在锤头附近对称的位置粘贴1对应变片,采用数字波形记录仪记录应变片的应变响应。长杆材料为45钢,总长为  $1\ 850\text{ mm}$ ,直径  $25\text{ mm}$ ,通过砝码调节冲击能量;锤头为半球形,直径为  $22\text{ mm}$ ,长约  $45\text{ mm}$ 。试样平放在实验机底座上,底面简支,周边自由。采用DL750数字波形记录仪对应变片的响应信号进行采样,采集时间为  $20\text{ ms}$ ,采样间距为  $20\ \mu\text{s}$ 。

## 3 结果与讨论

实验中,锤头的自由下落距离为  $500\text{ mm}$ ,因此初始撞击速度约  $3.13\text{ m/s}$ 。通过砝码调节撞击杆的整体质量,从而获得不同的冲击能量。本实验中,撞击杆的冲击能量分别为  $34.3$ 、 $44.1$  和  $53.9\text{ J}$ ,为分析方便起见,分别称为低能量、中能量和高能量。

图1为单层夹芯结构、5:15双层夹芯结构、10:10双层夹芯结构和15:5双层夹芯结构在低能量

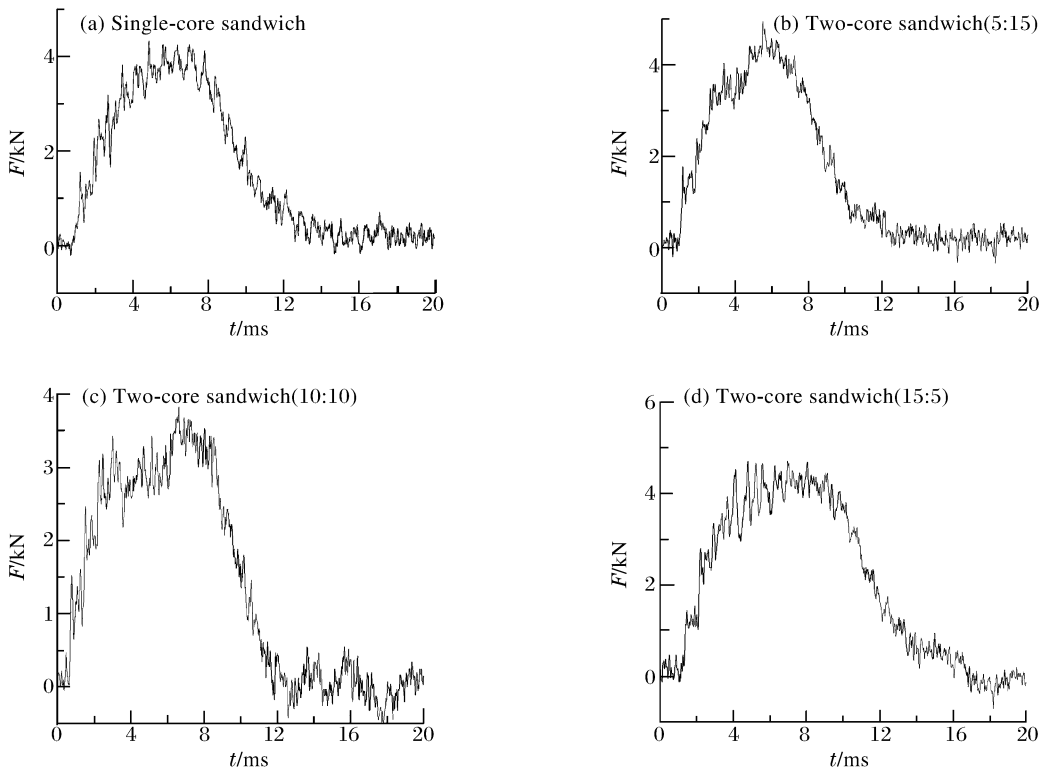


图1 在冲击能量为  $34.3\text{ J}$  下的撞击力历史

Fig. 1 Contact force histories of the sandwich structures at  $34.3\text{ J}$

冲击下的撞击力历史。从图 1(a)可以看出,单层夹芯结构在此冲击能量下的撞击力峰值约为 4 kN,发生在 7 ms 左右;图 1(b)表明,5:15 双层夹芯结构的撞击力峰值约为 4.2 kN,同样发生在 7 ms 左右;此双层夹芯结构的撞击力峰值比单层夹芯结构的高,原因在于双层夹芯结构在冲击方向的刚度较大。从图 1(b)还可以看出有 2 个撞击力峰,分别对应于撞击头穿透上面板和撞击头接触内面板。注意到上面板和内面板间距仅 5 mm,因此这 2 个撞击力峰靠得很近,同时也说明在此条件下内面板对撞击力产生了显著影响。图 1(c)表明,随着上面板与内面板间距增大,呈现 2 个明显的撞击力峰;且撞击力峰值与 5:15 结构的相比略低,而与单层夹芯结构相当。这是因为在此冲击能量下,撞击体不足以击穿上夹芯,就撞击力而言,此双层夹芯结构与单层夹芯结构相当。图 1(d)进一步说明,随着上面板与内面板间距的进一步增大,内面板的影响进一步减弱,双层夹芯结构的撞击力响应与单层结构的几乎相同。就双层夹芯结构的设计而言,在此冲击能量下,10:10 双层夹芯结构是较优的设计。一方面,此双层夹芯结构的撞击力峰值与单层夹芯结构的相当,另一方面,由于内面板的存在,不仅明显减少了撞击体的穿深,而且内面板的作用恰到好处,撞击体对下夹芯及下面板未造成显著影响。图 2 为在低能量冲击下 5:15 双层夹芯结构冲击正面及背面的照片。从图 2 可知,冲击正面的上面板被击穿,下面板未见破坏。

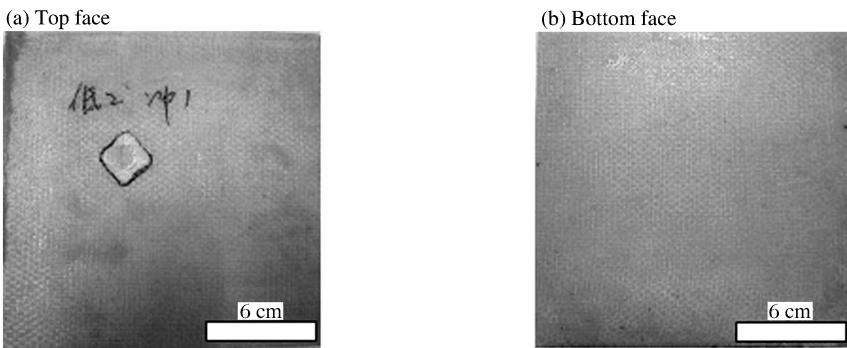


图 2 5:15 结构在  $E=34.3$  J 冲击下正背面的损伤

Fig. 2 Damage of top and bottom face sheet in 5:15 sandwich structures at  $E=34.3$  J

图 3 为 4 种夹芯结构在中能量冲击下的撞击力历史。与低能量冲击下的撞击力历史相比,在中能量冲击下,相应单层及双层夹芯结构的撞击力峰值减小,撞击力历史的下降沿趋缓,表明上面板、上芯材及内面板均出现了损伤和破坏。但双层夹芯结构的撞击力历史均表现出双峰特征,表明内面板对撞击体具有阻碍作用。图 4 为在中能量冲击下 15:5 双层夹芯结构冲击正面及背面的照片。从图 4 可知,上面板被击穿,且损伤面积比低能量冲击下的大,下面板未见破坏。

图 5 为 4 种夹芯结构在高能量冲击下的撞击力历史。图 5(a)中有 2 个撞击力峰,其中第 2 个撞击力峰是由于撞击体击穿整个单层夹芯结构后撞击试样支撑体产生的(见图 6,图中 3 个破坏区为 3 次重复撞击所致),因此是个伪撞击力峰。图 5(b)~(d)表明,随着上面板与上夹芯间距的增加,2 个撞击力峰间距也增大;而撞击力峰值则逐渐减小。就双层夹芯结构的设计而言,在此冲击能量下,15:5 双层夹芯结构的撞击力峰值最低,2 个撞击力峰间距最大,充分发挥了上下 2 层芯材和内面板的吸能作用。

综上所述,本文中涉及的 3 种双层夹芯结构在 34.3、44.1 和 53.9 J 的冲击能量下撞击力响应出现明显变化。这种变化表明,双层夹芯结构对冲击能量具有选择性。在同一冲击能量下,内面板的位置对撞击力响应有显著影响。从撞击力响应曲线可以看出,若内面板与上面板距离太近,则此双层夹芯结构与单层夹芯结构相当,只是撞击力峰值略有增加,类似于上面板较厚的单层夹芯结构,如图 1(b)、3(b)和 5(b)所示;若内面板距离上面板太远,则内面板对撞击力响应几乎无影响,如图 1(d)和 3(d)所示。但在一定的冲击能量下,可以通过合理设计内面板的位置,获得需要的撞击力响应,即如图 5(d)所示的撞击力响应,这是单层夹芯结构所不能实现的特性。因此,通过撞击力响应曲线可定量评价双层夹芯结构的抗冲击特性。对于同一夹芯结构,随着冲击能量的增加,撞击力峰值并未如预想的那样有所增加。这是因为,随着冲击能量的增加,试样的损伤面积增加,表现出软化现象。表 1 列出了夹芯结构损伤面

积随冲击能量的变化规律。从表 1 可以看出,对于同一种构型的夹芯结构,随着冲击能量的增加,损伤面积增加。在同一冲击能量下,单层夹芯结构的损伤面积均大于双层夹芯结构的损伤面积;内面板的位置对双层夹芯结构的损伤面积有显著影响,且其变化规律与撞击力峰值的变化规律基本一致。

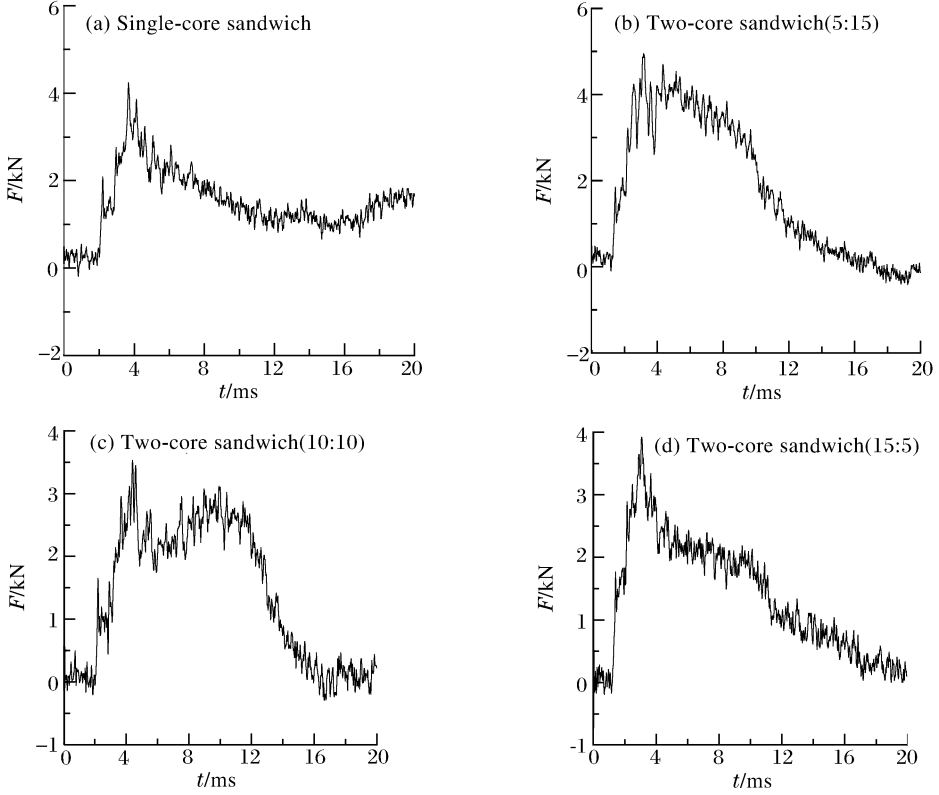


图 3 在冲击能量为 44.1 J 下的撞击力历史

Fig. 3 Contact force histories of the sandwich structures at 44.1 J

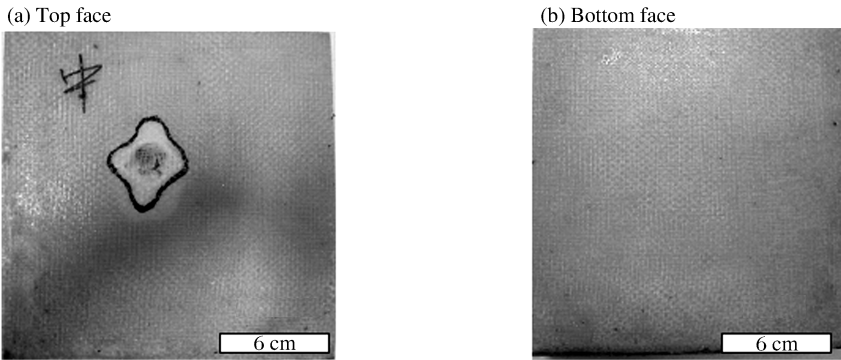


图 4 15 : 5 结构在  $E=44.1$  J 冲击下正背面的损伤

Fig. 4 Damage of top and bottom face sheet in 15 : 5 sandwich structures at  $E=44.1$  J

表 1 损伤面积随冲击能量和内面板位置的变化

Table 1 Effects of impact energy and HC1 on damage area in sandwich structures  $\text{cm}^2$

冲击能量	5 : 15 结构	10 : 10 结构	15 : 5 结构	单层结构
低能量( $E=34.3$ J)	4.0	9.0	6.0	11.0
中能量( $E=44.1$ J)	5.0	12.0	8.0	13.0
高能量( $E=53.9$ J)	8.0	13.0	9.0	19.0

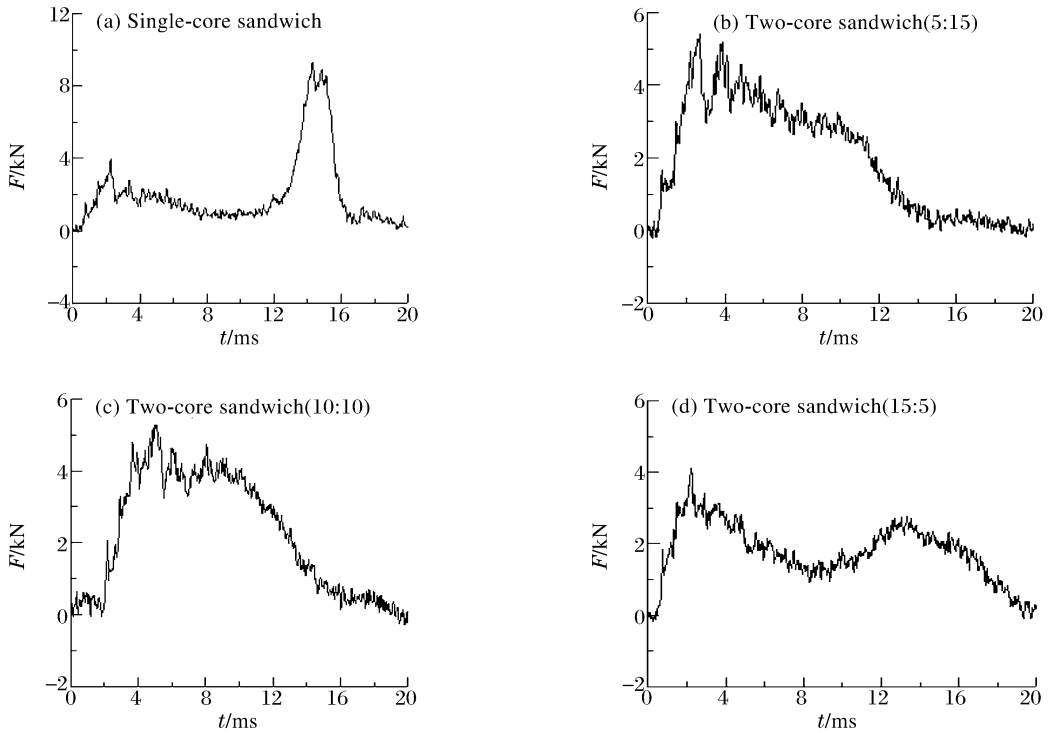


图5 在冲击能量为 53.9 J 下的撞击力历史

Fig. 5 Contact force histories of the sandwich structures at 53.9 J

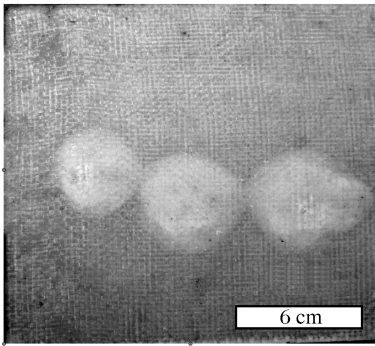


图6  $E=53.9$  J 时单层夹芯结构下面板的破坏

Fig. 6 Failure of bottom face sheet of the single sandwich structure at  $E=53.9$  J

## 4 结论

通过落锤冲击实验,对具有不同结构的双层夹芯复合材料结构进行了横向低速冲击实验,得到了冲击过程中的撞击力响应。通过撞击力响应曲线对不同冲击能量下双层夹芯结构中内面板的位置对撞击力响应的影响进行了系统研究。结果表明,内面板的位置对双层夹芯结构的撞击力响应有显著影响;双层夹芯结构可在一定条件下获得比单层夹芯结构优异的抗横向低速冲击性能;双层夹芯结构的最优抗冲击性能随冲击能量的不同而不同,在特定的冲击能量下,可通过调节内面板的位置,获得具有最优抗冲击性能的夹芯结构,这是双层夹芯结构的突出特点之一。

感谢中南大学李夕兵教授和周子龙博士在实验技术上提供的帮助。

## 参考文献:

- [1] Hazizan M A, Cantwell W J. The low velocity impact response of an aluminum honeycomb sandwich structure[J]. Composites: Part B, 2003,34(8):679-687.
- [2] Reyes V G, Cantwell W J. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures [J]. Composites Science and Technology, 2004,64(1):35-54.

- [3] Anderson T, Madenci E. Experimental investigation of low velocity impact characteristic of sandwich composites [J]. *Composite Structures*, 2000, 50(3):239-247.
- [4] Hazizan M A, Cantwell W J. The low velocity impact response of foam-based sandwich structures[J]. *Composites: Part B*, 2002, 33(3):193-204.
- [5] Abrate S. Localized impact on sandwich structures with laminated facings[J]. *Applied Mechanics Review*, 1997, 50(2):69-82.
- [6] Weeks C A, Sun C T. Multi-core composite laminates[J]. *Journal of Advanced Materials*, 1994, 25(3):28-37.
- [7] Jiang D Z, Shu D W. Local displacement of the core in two-layer sandwich structures subjected to low velocity impact[J]. *Composite Structures*, 2005, 71(1):53-60.
- [8] JIANG Da-zhi, YANG Fu-biao, XING Su-li, et al. Dynamic response of two-core sandwich composite structures under impact[J]. *Solid State Phenomena*, 2008, 136:115-124.
- [9] Icardi U, Ferrero L. Modeling assessment and optimization of impacted multi-core sandwich composites[C]// *Proceedings for International SAMPE Symposium and Exhibition, V52*. Baltimore, USA: 2007.

## Experimental investigation on response of two-core sandwich composite structures under transverse impact

JIANG Da-zhi<sup>\*</sup>, GUO Yang, LI Chang-liang, XIAO Jia-yu

(*College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China*)

**Abstract:** Traditional single core sandwich structures consist of two face sheets and one core. With an additional sheet, called internal sheet in this paper, inserted into the core, a two-core sandwich structure was then formed. Two-core sandwich structures with glass fiber/epoxy composite laminated face sheets and a thin internal sheet subjected to low velocity impact were studied, and attention was focused on the contact force responses of the two-core sandwich structures and effects of the locations of the internal sheet and levels of impact energy on the responses of the sandwich structures. A drop test was carried out and the contact force history between the projectile and the sandwich structures was then obtained. The results show that the contact force history of the two-core sandwich structures are affected significantly by the internal face sheet involved and the location of the internal face sheet.

**Key words:** solid mechanics; sandwich structures; low velocity impact; composite laminates; contact force

---

\* Corresponding author: JIANG Da-zhi  
Telephone: 86-731-84576315

E-mail address: jiangdz@nudt.edu.cn