

芯材高度对三维中空夹芯复合材料低速冲击性能的影响

曹海建¹ 陈红霞² 钱洪浩²

(1 江南大学纺织服装学院,无锡 214122)

(2 张家港市恒仕达纺织有限公司,苏州 215600)

文 摘 选取芯材高度分别为 5、6、7 mm 的三维中空夹芯复合材料为研究对象,采用落锤式低速冲击试验装置分别对上述材料进行 8 J 能量的低速冲击测试,研究材料的低速冲击性能;利用 Instron 3385H 型万能材料试验机分别测试上述材料受到低速冲击载荷前后的压缩强度,研究材料受到低速冲击载荷后的压缩损伤容限。结果表明:三维中空夹芯复合材料对低速冲击载荷比较敏感;随着芯材高度的增加,材料抗低速冲击性能有所增加;低速冲击载荷使材料的剩余压缩强度大幅下降。

关键词 三维中空夹芯复合材料,芯材高度,低速冲击性能,压缩损伤容限,万能材料试验机

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.06.017

Influence of Pile Height on Low-Velocity Impact Properties of Three Dimension Hollow Sandwich Composites

CAO Haijian¹ CHEN Hongxia² QIAN Honghao²

(1 College of Textile and Clothing, Jiangnan University, Wuxi 214112)

(2 Zhangjiagang Hengshida Textile Limited Company, Suzhou 215600)

Abstract Three dimension hollow sandwich composites (3D composites) with pile height of 5, 6 and 7 mm were selected as object of study. In order to study low-velocity impact properties of the 3D composites, low-velocity impact testing was conducted by using drop hammer low-velocity impact tester at energy of 8 J. In addition, compressive strength of the 3D composites before and after impacting was tested by using universal material testing machine (Instron 3385H) for studying compressive damage tolerance of the 3D composites suffering low-velocity impact loads. The results indicate that the 3D composites were sensitive to low-velocity impact loads. Low-velocity impact properties increased with the increase of pile height of the 3D composites. Residual compressive strength of the 3D composites declined sharply after suffering low-velocity impact loads. The results contribute to the optimal design of the 3D sandwich composites.

Key words Three dimension hollow sandwich composites, Pile height, Low-velocity impact property, Compressive damage tolerance, Universal material testing machine

0 引言

三维中空夹芯复合材料是一种新型的夹芯材料,国外称之为三明治结构(sandwich structure)。该材料主要由 100% 的 E-Glass 纤维织造而成,其三明治结构通过 z 向纤维整体连接织物的上、下两层[1]。

三维中空夹芯复合材料具有优异的整体性能,克服了传统蜂窝、泡沫等夹层复合材料易分层、耐冲击性能差的缺点[2-3]。三维中空夹芯复合材料最早由荷兰的“parabeam BV”公司开发,目前已广泛用于大面积船身、机翼、油罐的夹层、各种地板、隔墙等[4-5]。

与大多数纤维增强复合材料一样,三维中空夹芯

收稿日期:2014-05-23

基金项目:国家自然科学基金(51302110);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013015-31)

作者简介:曹海建,1979 年出生,博士,副研究员,研究方向:纺织复合材料的研发及应用。E-mail:caohaijian@jiangnan.edu.cn

复合材料对冲击载荷,特别是低速冲击载荷比较敏感^[6]。当其在制造成型、运输、使用和维护过程中,常常会受到各种情况的低速冲击($<10\text{ m/s}$),如工具掉落、石子飞溅、冰雹侵袭等撞击,导致材料出现可视损伤(凹痕现象、基体开裂、纤维断裂)或不可视损伤(细小的基体裂纹),使得材料面内力学性能尤其是压缩性能大幅下降,严重影响材料的使用,最终极易导致材料结构破坏,甚至会直接导致事故的发生^[7]。因此,研究三维中空夹芯复合材料的低速冲击性能意义重大。

本文重点分析芯材高度与三维中空夹芯复合材料低速冲击性能之间的关系。选取芯材高度分别为5、6、7 mm的该材料为研究对象,分别对上述材料进行8 J能量的低速冲击,研究材料的低速冲击性能,以及含损结构材料的剩余压缩强度,为此类材料的结构优化设计和性能分析奠定了基础。

1 实验

1.1 试件制备

1.1.1 低速冲击试件制备

采用E-Glass纤维织造三维中空夹芯织物,利用手糊成型工艺制备三维中空夹芯复合材料^[8-9],如图1所示。三维中空夹芯复合材料试件规格如下:纱线细度(tex)为180;经密,地经10根/cm,绒经5根/cm;纬密8根/cm;芯材高度5、6、7 mm;树脂种类,环氧618;固化剂,聚酰胺651;稀释剂,环氧丙烷丁基醚660;质量分数(树脂:固化剂:稀释剂)为100:50:30。

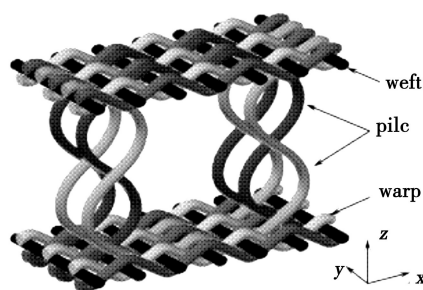


图1 三维中空夹芯复合材料示意图

Fig.1 Schematic diagram of three dimension hollow sandwich composites

1.1.2 压缩试件制备

对低速冲击前后的试件进行切割,制成尺寸为 $100\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的压缩试件,如图2所示。为了保证加载正常,试件两端用树脂基体填实,其长度为10 mm,外面再胶接厚度为1 mm的铝保护片。为了叙述方便,定义受冲击的面板为上面板,未受冲击的面

板为下面板。

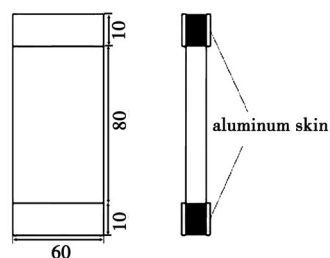


图2 压缩试件尺寸图

Fig.2 Dimension figure of compressive samples

1.2 实验标准及装置

1.2.1 低速冲击实验

三维中空夹芯复合材料的低速冲击试验方法参考航空标准HB-6739-1993进行。冲击能量为8 J,每种试件取5次有效数据的平均值,冲击试件尺寸大小为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。冲击试验通过落锤式冲击装置(双导轨自由落体)进行,如图3所示。

夹具尺寸 $160\text{ mm}\times 120\text{ mm}$,冲击部分是直径达76 mm的圆形区域,夹具四周用螺栓拧紧;冲击头是一个直径为12.7 mm的钢质半球形端部,冲头轴线与夹具平面垂直,冲击头质量为3.385 kg,通过调整落锤的下落高度来控制冲击能量和速度。

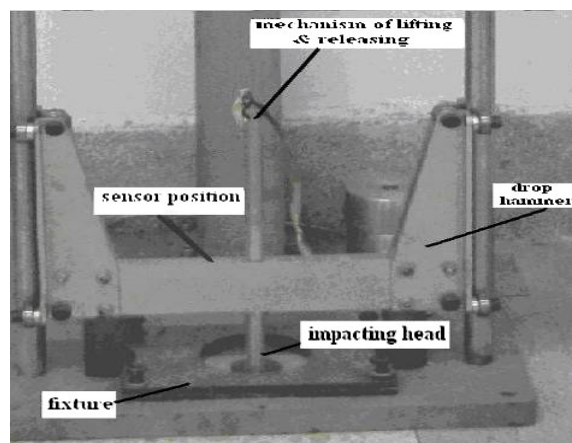


图3 低速冲击实验装置图

Fig.3 Diagram of testing equipment on low-velocity

实验数据采集由加速度传感器(CA-YD-139T)和信号采集系统组成,如图4所示。加速度传感器基本参数:灵敏度 $1.35\text{ pC}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$;频率 $1\sim 10\text{ kHz}$;允许的最大加速度 $2\times 10^4\text{ m/s}^2$;工作温度 $-40\sim 150^\circ\text{C}$;质量5 g;最大横向灵敏度 $<5\%$ 。信号采集系统:主要由DLF-4电荷电压滤波积分放大器、INV306DF智能信号采集处理分析仪和DASP专业版软件三部分组成。

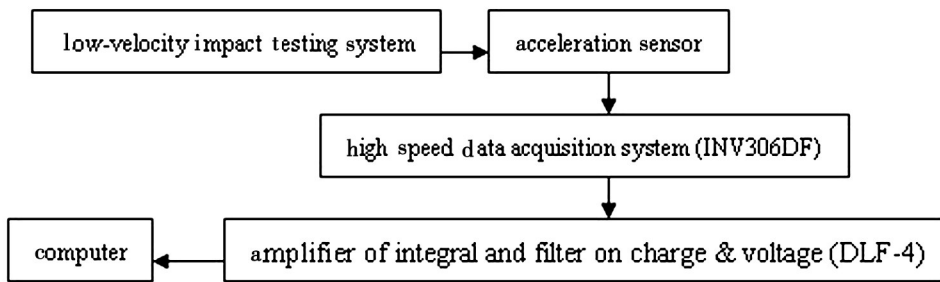


图4 实验系统框图

Fig. 4 Frame diagram of testing system

1.2.2 压缩实验

由于目前三维机织整体中空复合材料还没有统一的实验规范和测试标准,压缩实验及相应夹具的设计制造均参照 GB/T1454—2005(夹层结构侧压性能试验方法)进行。全部实验均通过 Instron 3385H 型万能材料试验机进行。

2 结果与讨论

2.1 芯材高度对低速冲击性能的影响

2.1.1 低速冲击特性

芯材高度分别为 5、6、7 mm 的三维中空夹芯复合材料受到 8 J 能量低速冲击后的破坏形貌如图 5、图 6 所示。

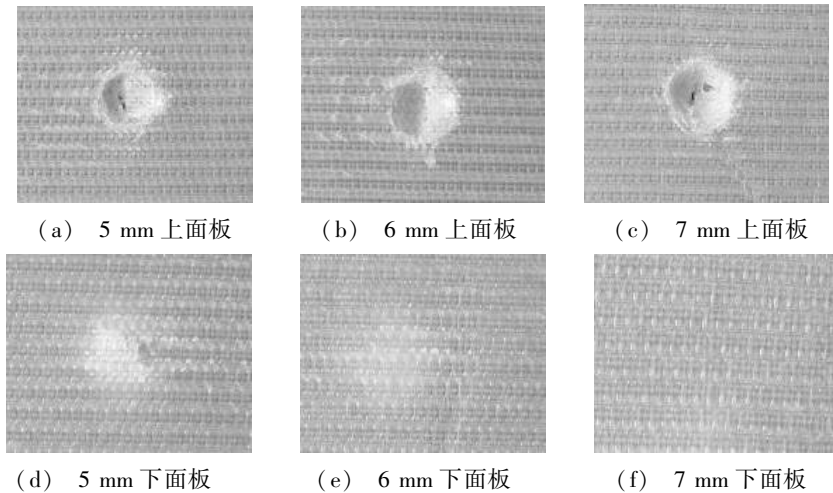
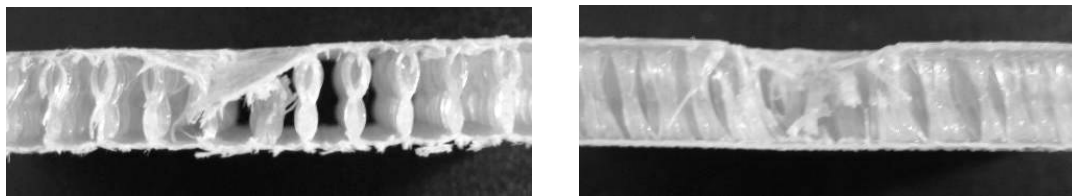


图5 三维中空夹芯复合材料承受 8 J 能量低速冲击时上下面板破坏形貌

Fig. 5 Damage pictures of three dimension hollow sandwich composites suffering low-velocity impact loads at 8 J impact energy



(c) 经向截面破坏形式

(d) 纬向截面破坏形式

图6 三维中空夹芯复合材料在 8 J 能量冲击下经、纬向截面破坏形貌

Fig. 6 Warp & weft section damage pictures of three dimension hollow sandwich composites suffering low-velocity impact loads at 8 J impact energy

由试验过程,结合图 5、图 6 可知,(1)芯材高度分别为 5、6、7 mm 的三维中空夹芯复合材料在受到 8 J 能量低速冲击后,材料的上面板均被落锤冲击头击破,芯材与上面板接触部位出现不同程度的局部破坏,同时材料的下面板有目视可见“白斑”出现。

料破坏程度有所减轻。芯材高度为 5 mm 的材料下面板“白斑”最明显,芯材高度为 7 mm 的材料下面板“白斑”不明显。这是因为:芯材变形能力随着芯材高度的增加而增强,7 mm 材料在遭受低速冲击载荷时,其芯材变形能力大于 6 和 5 mm,对冲击的缓冲作用较强,能够吸收更多的冲击能量,从而减轻对材料

(2)随着芯材高度的增加,三维中空夹芯复合材料

的冲击损伤。

2.1.2 低速冲击性能

芯材高度分别为 5、6、7 mm 的三维中空夹芯复合材料受到 8J 能量低速冲击后的载荷—时间曲线如图 7 所示。

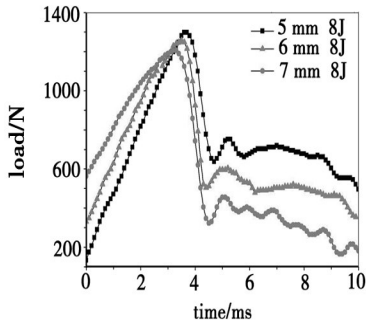
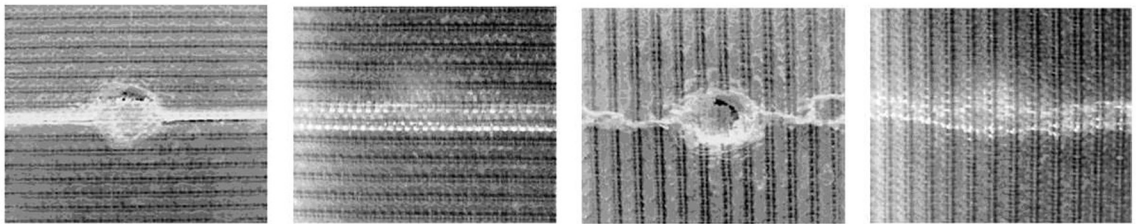


图 7 不同芯材高度条件下的载荷—时间曲线
Fig.7 Curves of Load vs. time on the composites at different pile height

由图 7 可知, (1) 不同高度材料在低速冲击下, 载荷随时间变化总体规律相同; 开始阶段载荷随时间线性增加并达到峰值, 随后载荷急剧下降至某一值后又上升, 最后阶段载荷下降并最终趋于 0。这是由材



(a) 经向破坏(上面板) (b) 经向破坏(下面板) (c) 纬向破坏(上面板) (d) 纬向破坏(下面板)

图 8 经、纬向压缩破坏形貌

Fig.8 Breakage outline of compression in warp & weft directions

由图 8 可知, (1) 受低速冲击载荷作用后的三维中空夹芯复合材料, 其压缩破坏损伤主要发生在上面板(受低速冲击的面板), 而下面板破坏损伤相对较小, 由此说明该结构材料低速冲击后的剩余压缩性能主要由上面板控制。

(2) 三维中空夹芯复合材料的经、纬向压缩破坏方式完全不同。经向破坏发生在靠近冲击点中心线处的两排芯柱中间, 破坏形状近似一条直线, 较规则。这是由于经向两排芯柱之间距离很大, 两排芯柱之间的面层无芯柱支撑, 厚度很薄, 极易破坏。纬向破坏发生在靠近冲击点中心线附近, 破坏形状不规则。这是因为纬向芯柱排列紧密, 且排列并不像经向一样规则, 处于压头下的部分芯柱相互挤压破坏, 破坏后的前面板损伤区比经向大^[10]。

料本身的中空夹芯结构造成的, 在冲击载荷达到峰值前, 冲击点处发生弹性变形, 冲击载荷迅速上升; 在冲击载荷达到峰值时, 上面板被撕裂造成载荷急剧下降, 此时冲击头下方的树脂破裂, 上面板呈现明显的损伤裂纹; 随后, 冲击头穿透上面板, 压迫芯材和下面板, 此时芯材和下面板的阻力使得载荷上升, 随后发生卸载。

(2) 随着芯材高度的增加, 冲击载荷峰值呈下降趋势。当芯材高度为 5 mm 时, 冲击载荷峰值为 1.30 kN; 当芯材高度为 6 mm 时, 冲击载荷峰值为 1.26 kN; 当芯材高度为 7 mm 时, 冲击载荷峰值为 1.20 kN。这是因为材料受到低速低能量冲击时, 冲击力作用在上面板并向下面板扩展时, “8” 字形芯材结构有效的阻止了裂纹的扩展, 芯材高度越高, 这种作用越明显。

2.2 芯材高度对压缩损伤容限的影响

2.2.1 低速冲击后的压缩破坏形貌

芯材高度分别为 5、6、7 mm 的三维中空夹芯复合材料受到低速冲击载荷作用后的压缩破坏形貌类似, 均为上面板破坏为主。现以芯材高度为 6 mm 的材料为例, 其经、纬向破坏形貌如图 8 所示。

2.2.2 低速冲击后的剩余压缩强度

芯材高度分别为 5、6、7 mm 的三维中空夹芯复合材料受到低速冲击载荷作用后的剩余压缩强度如图 9 所示。

(1) 随着芯材高度的增加, 三维中空夹芯复合材料的压缩性能随之增加。以低速冲击前材料的经向压缩强度为例, 芯材高度为 5 mm 时, 材料的经向压缩强度为 3.9 MPa; 芯材高度为 6 mm 时, 经向压缩强度为 4.3 MPa; 芯材高度为 7 mm 时, 经向压缩强度为 4.7 MPa。这是因为三维中空夹芯复合材料的压缩性能主要决定于芯材的抗失稳能力, 在弹性模量相同的情况下, 芯材高度越高, 材料的截面惯性矩也就越大, 越不容易失稳^[11]。

(2) 三维中空夹芯复合材料的纬向压缩性能好

于经向。以芯材高度为 7 mm 的材料低速冲击前的压缩强度为例,材料的经向压缩强度为 4.7 MPa,纬向压缩强度为 9.3 MPa。这是因为纬向纤维较经向平直,有利于材料强度的发挥;同时纬向在压缩时芯材纤维与纬向成一定的倾角,也能分担部分载荷,上述两方面因素导致纬向侧压强度高于经向^[12]。

(3) 三维中空夹芯复合材料受到低速冲击载荷后,材料的剩余压缩性能大幅下降。芯材高度分别为 5、6 和 7 mm 三种试样分别进行 8 J 能量低速冲击后,材料的经向剩余压缩强度平均降低了 18% 以上,纬向降低了 24% 以上。造成这种现象的原因:首先,环氧树脂基体本身具有速度敏感性,这意味着基体在冲击载荷作用下会变脆;其次,三维中空夹芯复合材料是夹芯结构,当材料受到低速冲击载荷作用时,起支撑作用的芯材受到不同程度的破坏,从而降低了材料的抗压能力。

(2) 受低速冲击载荷作用后的三维中空夹芯复合材料,其压缩破坏损伤主要发生在上面板(受低速冲击的面板),而下面板破坏损伤相对较小。

(3) 三维中空夹芯复合材料的经、纬向压缩破坏方式完全不同。经向破坏发生在靠近冲击点中心线处的两排芯柱中间,破坏形状近似一条直线,较规则;纬向破坏发生在靠近冲击点中心线附近,破坏形状不规则。

(4) 三维中空夹芯复合材料受到低速冲击载荷后,材料的剩余压缩性能大幅下降。

参考文献

[1] Ko F K, Du G W. Processing of textile preforms. //Gutowski T G. ed. Advanced Composites Manufacturing[M]. New York:John Wiley & Sons Inc., 1997: 182-187

[2] Vaidya U K, Hosur M V, Earl D, et al. Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels[J]. Compos Part A: 2000,31:761-72

[3] Tien W S, Yu H P. Low velocity impact responses of hollow core sandwich laminate and interply hybrid laminate[J]. Compos. Struct.,2004,64:189-98

[4] Bannister M K, Braemar R, Crothers P J. The mechanical performance of 3D woven sandwich composites[J]. Composite Structures, 1999,47(4):687-690

[5] Park S J, Park W B, Lee J R. Characterization of the impact properties of three-dimensional glass fabric-reinforced vinyl ester matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(24):6151-6154

[6] Shyr T W, Pan Y H. Low velocity impact responses of hollow core sandwich laminate and interply hybrid laminate [J]. Composite Structures, 2004, 64(2): 189-198

[7] Hosur M V, Abdullah M, Jeelani S. Manufacturing and low-velocity impact characterization of hollow integrated core sandwich composites with hybrid face sheets [J]. Composite Structures, 2004, 65: 103-115

[8] 匡宁,周光明,张立泉,等.整体夹芯中空复合材料的开发与应用[J].玻璃纤维,2007(5): 15-20

[9] 匡宁,张建钟,杨朝坤,等.整体夹芯中空复合材料的研究[J].航空制造技术,2007(291): 53-56

[10] 高爱君,李敏,王绍凯,等.三维间隔连体织物复合材料力学性能[J].复合材料学报,2008, 25(2):87-93

[11] 周光明,薄晓莉,匡宁.整体中空夹层复合材料的弹性性能分析[J].复合材料学报,2010,27(1):185-189

[12] 周光明,钟志珊,张立泉,等.整体中空夹层复合材料力学性能的实验研究[J].南京航空航天大学学报,2007,39(1):11-15

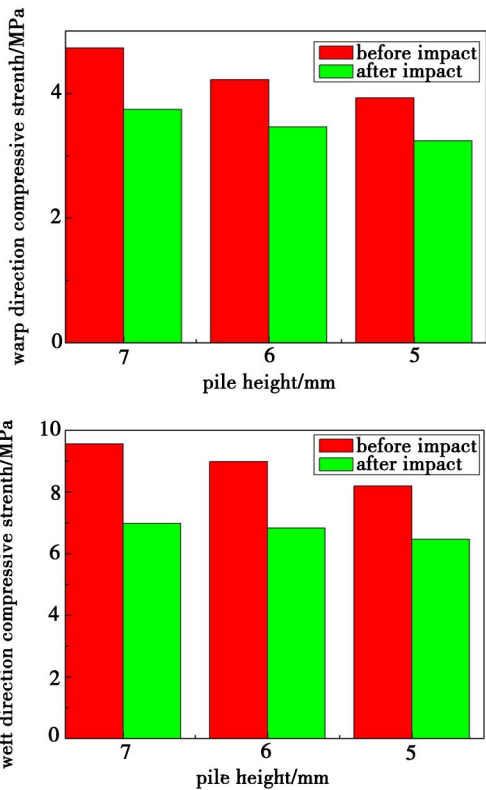


图9 低速冲击前后三维中空夹芯复合材料的经、纬向压缩强度

Fig. 9 Warp & weft compressive strength of three dimension hollow sandwich composites after low-velocity impact

3 结论

(1) 三维中空夹芯复合材料对低速冲击载荷比较敏感;随着芯材高度的增加,材料的抗冲击性能增强。

(编辑 任涛)