

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.004

## 穿孔泡沫夹层复合材料低速冲击性能试验研究

季秋足, 崔为运, 蔡登安, 周光明

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 针对普通泡沫夹层复合材料层间性能较弱的问题, 提出在泡沫上预先打孔的方法, 在泡沫芯材中形成胶钉从而提高泡沫夹层材料的力学性能, 并对穿孔泡沫夹层复合材料的低速冲击性能进行了研究。通过手糊和真空辅助成型工艺制备穿孔泡沫夹层复合材料试验件, 对其进行不同能量的低速冲击试验, 记录接触力、冲头位移和能量吸收率等力学响应, 并采用目视检测和超声 C 扫无损检测两种方法确定冲击损伤的范围, 探究胶钉密度、打孔深度和泡沫槽宽等变量对穿孔泡沫夹层复合材料低速冲击阻抗性能的影响。试验结果表明, 随着冲击能量的增加, 最大接触力、最大冲头位移和残余变形均增加, 凹坑深度和内部损伤面积也增大, 同时结构的能量吸收率也有所提高; 适当地增加胶钉密度和泡沫槽宽能提高穿孔泡沫夹层材料的低速冲击阻抗性能, 而泡沫孔深度对其冲击性能的影响较小。

**关键词:** 泡沫夹层复合材料; 真空辅助成型; 低速冲击试验; 能量吸收率; 无损检测

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)01-0035-09

### Experimental Investigation on Low-Velocity Impact Behavior of Perforated Foam Core Sandwich Composites

Ji Qiuzu, Cui Weiyun, Cai Deng'an, Zhou Guangming

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A method of pre-piecing the foam to form resin glue nails in the foam core is proposed to address the disadvantage of poor interlayer behavior of plain foam core sandwich composites, and low-velocity impact behavior of perforated foam core sandwich composites is investigated. Perforated foam core sandwich testing pieces are made by hand-pasting and vacuum assisted manufacturing process, and low-velocity impact tests with different energies are performed on these pieces to obtain the mechanic responses, such as contact forces, crosshead displacements, and energy absorbing ratios. The extension of low-velocity impact damages are determined by methods of visually inspection and nondestructive inspection with ultrasonic C-scan. It is known from the testing results that the maximum contact forces, the maximum impactor displacements, and residual deformation increase with the increasing of impact energy, indentation and internal damage area also increase, while energy absorbing ratio of the structure is promoted as well. Low-velocity impact resistance of perforated foam core sandwich composites can be improved by enhancing nail densities and foam groove widths moderately, while hole depth has little effects on its impact performances.

**基金项目:** 国家自然科学基金(52005256); 江苏省基础研究计划自然科学基金(BK20190394); 江苏省博士后科研资助计划项目(2020Z437); 机械结构力学及控制国家重点实验室开放课题(MCMS-E-0220Y02); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

**收稿日期:** 2021-06-03; **修订日期:** 2022-03-19

**通信作者:** 周光明, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhougm@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 季秋足, 崔为运, 蔡登安, 等. 穿孔泡沫夹层复合材料低速冲击性能试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 35-43. Ji Qiuzu, Cui Weiyun, Cai Deng'an, et al. Experimental investigation on low-velocity impact behavior of perforated foam core sandwich composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 35-43.

**Key words:** foam core sandwich composites; vacuum assisted manufacturing; low-velocity impact test; energy absorbing ratio; nondestructive inspection

复合材料泡沫夹层结构是由高强度的树脂基纤维增强层合面板和轻质的闭孔泡沫芯材通过胶粘剂粘合而成的一种特殊复合材料结构<sup>[1]</sup>,它具有抗弯刚度高、重量轻、易成形易修复、耐腐蚀、隔音隔热等优点,因而在航空领域应用广泛。

但是,普通泡沫夹层材料厚度方向的强度和刚度较低,在受到剪切或低速冲击载荷时容易发生面板和泡沫的分层<sup>[2]</sup>,严重降低飞机结构的剩余强度和损伤容限,因此国内外学者提出很多方法提高泡沫夹层结构的Z向性能,目前研究比较多的有Z-pin增强技术<sup>[3-10]</sup>和三维缝纫技术<sup>[11-15]</sup>。Z-pin增强技术方面,杜龙等<sup>[5-6]</sup>对X状Z-pin增强泡沫夹层结构的剪切和弯曲性能进行了试验研究,并结合空间网架结构和等效夹杂法提出X-cor夹层结构剪切刚度的预报模型;单杭英等<sup>[7-8]</sup>通过试验考察了Z-pin植入角度对X-cor泡沫夹层结构的平压和剪切性能的影响,并提出了X-cor夹层结构剪切刚度的理论预测公式;朱飞等<sup>[9]</sup>对X-cor泡沫夹层结构的低速冲击性能进行了试验和数值模拟,发现在6 J能量冲击时,增加Z-pin体积分数对减少面板分层效果显著,而泡沫密度对分层面积影响不大。三维缝纫技术方面,郭书良等<sup>[12]</sup>采用热压罐工艺制备了Kevlar缝纫增强泡沫夹层复合材料,并考察其平压、侧压和剪切性能,试验结果表明经过缝纫增强试件的压缩剪切强度和刚度远高于未增强件,并随着缝线密度的增加而提高;黄涛等<sup>[13]</sup>对缝纫泡沫夹层材料的三点弯曲强度和破坏机制进行了试验研究和理论分析,试验结果表明缝纫泡沫夹层材料的弯曲破坏形式为泡沫的剪切开裂和面板的屈曲破坏,弯曲破坏强度相比于未缝纫件提高了68%。虽然Z-pin增强技术和三维缝纫技术提高了泡沫夹层结构的Z向拉压、剪切和弯曲性能,但不可避免地会对面板造成损伤,在针孔处形成富树脂区,降低了泡沫夹层结构的面内强度<sup>[5,11]</sup>。本文所研究的穿孔泡沫夹层结构,是通过在泡沫芯材上预先打孔,使得在成形时在泡沫芯材内出现沿厚度方向贯穿的胶钉,上下面板通过胶钉直接连接,提高泡沫夹层结构的层间性能<sup>[16-17]</sup>。由于树脂胶钉是由树脂固化形成,不会降低面板的面内性能,因此相比于Z-pin增强技术和缝纫技术来说,这种成形技术在航空、船舶、军事等领域的应用前景更为广阔,例如可以应用于导弹发射箱盖<sup>[17]</sup>。

夹层结构的低速冲击损伤阻抗和剩余强度受到国内外学者的广泛关注<sup>[18-22]</sup>,蜂窝夹芯结构的低速冲击损伤形式包括面板纤维断裂、树脂开裂、面板分层和夹芯胞壁屈曲,而泡沫夹芯结构还会出现局部泡沫碎裂和板芯界面脱粘。Bernard等<sup>[23]</sup>对铝蜂窝、Nomex纸蜂窝和Rohacell泡沫3种夹芯结构进行了低速冲击试验,结果表明夹芯刚度较大的铝蜂窝夹芯结构更容易出现板芯界面分层,但面板本身损伤较小。Daniel等<sup>[24]</sup>对碳纤维平纹面板PVC泡沫夹芯结构的低速冲击性能和准静态压痕性能进行了对比研究,证明可以用静压痕试验来等效模拟夹层结构的低速冲击响应和损伤。王杰<sup>[25]</sup>对PUR聚氨酯泡沫夹层结构的低速冲击损伤进行了试验和数值研究,表明泡沫夹层结构主要损伤形式为凹坑区域的纤维基体损伤以及泡沫碎裂,凹坑深度的大小和深度随冲击能量的增加而增加,随面板厚度和冲头尺寸的增加而减小,与芯材厚度关系不大。

穿孔泡沫夹层复合材料提升了泡沫夹层结构的层间性能,目前针对穿孔泡沫夹层复合材料低速冲击响应及剩余压缩性能的研究较少,冲击载荷下的失效机理尚不明确。本文通过低速冲击试验来研究穿孔泡沫夹层复合材料的低速冲击响应和损伤。采用手糊和真空辅助成形工艺制备穿孔泡沫夹层材料试验件,对其进行落锤式低速冲击试验,得到接触力、冲头位移、能量吸收率等力学响应;通过目视检测和超声C扫描确定低速冲击损伤大小以及残余凹坑深度,并探讨胶钉密度、打孔深度和泡沫槽宽对穿孔泡沫夹层结构低速冲击损伤阻抗性能的影响,为穿孔泡沫夹层复合材料结构设计及应用提供技术支持。

## 1 穿孔泡沫夹层复合材料的低速冲击试验

### 1.1 试样材料

穿孔泡沫夹层复合材料的面板为玻璃/环氧复合材料,增强材料为中材科技公司生产的E型玻璃纤维平纹织物,力学参数如表1所示;基体为E-51环氧树脂,力学参数如表2所示。夹芯材料为PUR聚氨酯泡沫,通过单轴压缩试验得到其压缩应力-应变曲线如图1所示,进而得到其弹性模量、泊松比和压缩屈服应力如表3所示。

表 1 玻纤/环氧平纹织物复合材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of Glass/Epoxy plain fabric composites

$E_1/\text{GPa}$	$E_2/\text{GPa}$	$E_3/\text{GPa}$	$G_{12}/\text{GPa}$	$G_{13}/\text{GPa}$	$G_{23}/\text{GPa}$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$
19.03	19.03	5.63	3.42	2	2	0.11	0.32	0.32
$X_T/\text{MPa}$	$X_C/\text{MPa}$	$Y_T/\text{MPa}$	$Y_C/\text{MPa}$	$Z_T/\text{MPa}$	$Z_C/\text{MPa}$	$S_{12}/\text{MPa}$	$S_{13}/\text{MPa}$	$S_{23}/\text{MPa}$
188.72	74.85	188.72	74.85	15.15	42.6	69.76	15.53	15.53

注: $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 表示主方向弹性模量; $G_{12}$ 、 $G_{13}$ 、 $G_{23}$ 表示主平面内剪切模量; $\nu_{12}$ 、 $\nu_{13}$ 、 $\nu_{23}$ 表示主平面泊松比; $X_T$ 、 $X_C$ 表示经向纤维的拉伸和压缩强度; $Y_T$ 、 $Y_C$ 表示纬向纤维的拉伸和压缩强度; $Z_T$ 、 $Z_C$ 表示层合板层间拉压强度; $S_{12}$ 、 $S_{13}$ 、 $S_{23}$ 表示剪切强度。

表 2 E-51 环氧树脂的性能参数

Table 2 Mechanical parameters of E-51 epoxy resin

弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	压缩强度 $\sigma_c/\text{MPa}$	剪切强度 $S/\text{MPa}$
3.5	0.35	241	89.6

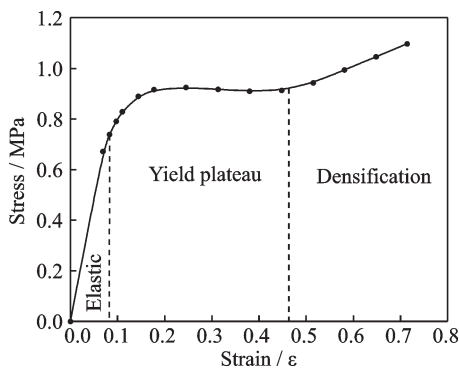


图 1 PUR 聚氨酯泡沫单轴压缩应力-应变曲线

Fig.1 Axial compression stress-strain curve of PUR foam

表 3 PUR 聚氨酯泡沫的性能参数

Table 3 Mechanical parameters of PUR foam

密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	压缩强度 $\sigma_c/\text{MPa}$	剪切强度 $S/\text{MPa}$
65	10.71	0.31	0.95	0.73

1.2 试验件制备

穿孔泡沫夹层复合材料低速冲击试验件的结构尺寸如图 2 所示,长和宽为 150 mm×100 mm,面板厚 0.8 mm,由 4 层玻纤平纹布(单层厚度 0.2 mm)按[0/90]<sub>4</sub>的角度顺序铺设,泡沫夹芯厚度为 10 mm。泡沫孔的直径为 2 mm。所有的试验件

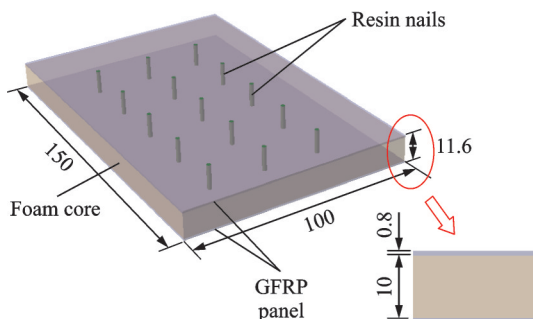


图 2 穿孔泡沫夹层复合材料低速冲击试验件

Fig.2 Low-velocity impact test pieces of perforated foam core sandwich composites

均采用手糊+真空辅助成形工艺制备(图 3),成形所用树脂胶由环氧树脂、固化剂和增塑剂按照 10:2:1 的质量比混合配制而成,糊制完成后将试验件罩上一层真空袋,利用真空压紧试验件以减少夹层板内部的孔隙和缺陷,室温下固化 24 h 后再进行 4 h 60 °C 的后处理,然后脱模并用碟式切割机按照规定的尺寸切割出试验件。



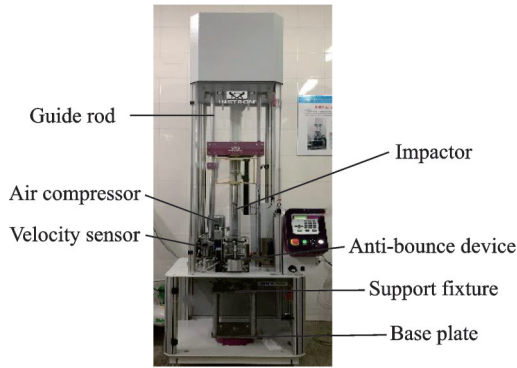
图 3 真空辅助成形工艺

Fig.3 Vacuum assisted manufacturing process

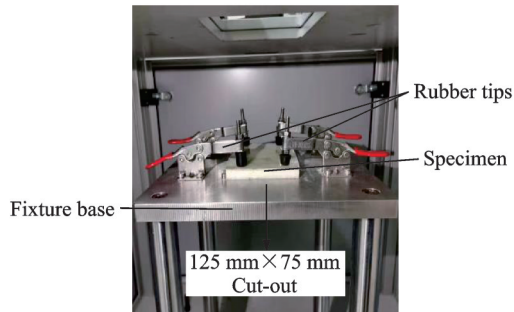
1.3 低速冲击试验

低速冲击试验按照试验标准 ASTM-D7136<sup>[26]</sup>(纤维增强树脂基复合材料低速冲击损伤阻抗性能测试标准),在 CEAST 9350 落锤式低速冲击试验机(图 4(a))上进行。试验所用的冲头形状为半球形,直径 16 mm,质量 5.277 kg,夹持试验件所用的夹具如图 4(b)所示,由 1 个带有 125 mm×75 mm 矩形开口的钢制底座和 4 个固定夹头组成,装夹试验件时要确保试验件的中心与底座开口中心对齐,然后压紧固定夹头提供固支边界条件。低速冲击试验设置的变量参数有泡沫穿孔的密度、深度,泡沫与面板粘接界面开槽的宽度以及冲击能量,所有试验工况的参数和相应的试验件编号如表 4 所示,同一编号的试验件准备 3 个,试验结果取平均值。试验前依次打开空气压缩机、控制器和数据采集处理器的开关,在计算机冲击测试软件中输入试验件厚度、冲击能量等参数,并根据设定的试验件厚度调整速度传感器的旋钮刻度,确保在冲头接触试验件的瞬间开始采集冲头速度和位移数据,然后开始试验。冲击结束后,将测得的载荷、变形等响应数据导出并保存,然后打开防护门更换试验件,准备下一个工况的试验。





(a) CEAST 9350 drop-hammer low velocity impact device



(b) Specimen and support fixture

图4 低速冲击试验装置和夹具

Fig.4 Low-velocity impact device and support fixture

表4 穿孔泡沫夹层结构低速冲击试验工况

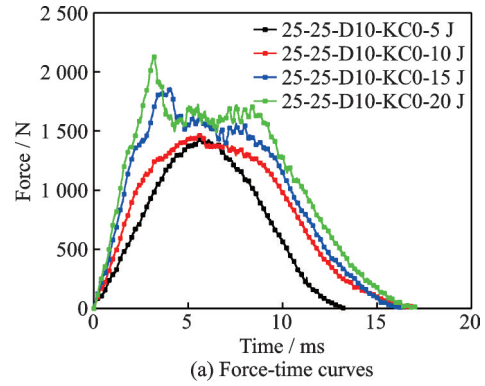
Table 4 Low-velocity impact test cases of perforated foam core sandwich composites

孔密度/ (mm×mm)	孔深度/ mm	泡沫 槽宽/ mm	冲击 能量/ J	试件编号
25×25	10	0	5	25-25-D10-KC0-5 J
25×25	10	0	10	25-25-D10-KC0-10 J
25×25	10	0	15	25-25-D10-KC0-15 J
25×25	10	0	20	25-25-D10-KC0-20 J
25×20	10	0	15	25-20-D10-KC0-15 J
20×20	10	0	15	20-20-D10-KC0-15 J
25×25	4	0	15	25-25-D4-KC0-15 J
25×25	8	0	15	25-25-D8-KC0-15 J
25×25	10	1	15	25-25-D10-KC1-15 J
25×25	10	2	15	25-25-D10-KC2-15 J

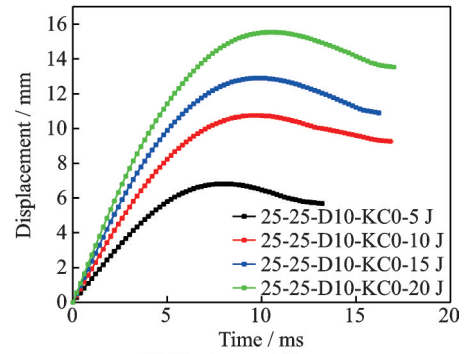
## 2 试验结果与分析

### 2.1 接触力和位移响应

图5为不同冲击能量下接触力和冲头位移的历程曲线。由图5可知,在冲击过程的初始阶段,接触力随时间线性增加,随后由于面板损伤出现和泡沫的局部压溃而进入屈服阶段,接触力增幅逐渐放缓直至峰值后,再经小幅度振荡后回落;随着冲击能量从5 J增加到20 J,接触力的峰值增加了接近60%,最大冲头位移增加了一倍多。图6为不同胶钉密度试验件的载荷和冲头位移的响应曲线,可



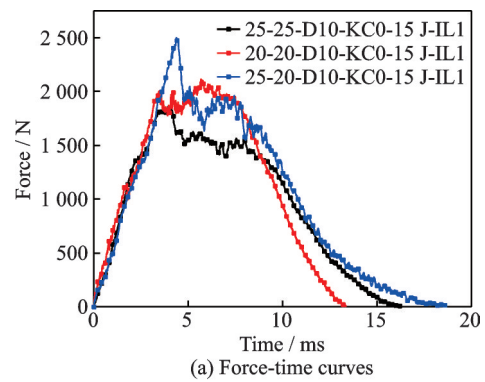
(a) Force-time curves



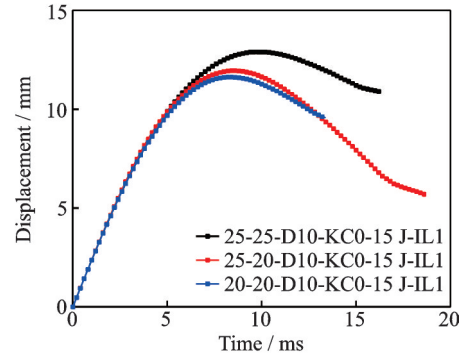
(b) Displacement-time curves

图5 不同冲击能量下穿孔泡沫夹层试验件的接触力-时间和冲头位移-时间曲线

Fig.5 Force-time curves and displacement-time curves of perforated foam core sandwich specimens under different impact energies



(a) Force-time curves



(b) Displacement-time curves

图6 不同胶钉的密度穿孔泡沫夹层试验件的接触力-时间和冲头位移-时间曲线

Fig.6 Force-time curves and displacement-time curves of perforated foam core sandwich specimens with different nail densities

以看到,随着胶钉密度的增加,最大接触力的变化不大,可以认为是试验件成形误差或试验误差;最大冲击变形则呈现单调减少的趋势,但下降幅度只有约 9%。泡沫打孔深度对接触力和位移响应的影响如图 7 所示,相比打通孔的试验件,打盲孔试验件的载荷和位移峰值更大,但在同样是盲孔的情况下,孔深 4 mm 和 8 mm 试件的载荷和位移曲线几乎重合,说明孔的深度对冲击响应影响不大。泡沫开槽对接触力和位移响应的影响如图 8 所示。显然,泡沫开槽试验件的最大接触力和接触时间相比未开槽件明显增大,但最大位移和残余变形明显减少;而同样开槽的槽宽 1 mm 和槽宽 2 mm 试验件的载荷和位移曲线几乎重合,表明泡沫槽宽对冲击响应的影响不大。

如果采用冲头回弹离开面板时的残余位移来衡量穿孔泡沫夹芯结构的低速冲击阻抗性能,那么由上述结果可知,在受到一定能量冲击时,增加胶钉密度能显著降低面板的残余变形,提高穿孔泡沫夹层结构的低速冲击阻抗性能,但是胶钉密度的增加也导致结构的重量增大,所以要在权衡结构性能和经济性原则的基础上选择合适的胶钉密度参数;相比打通孔,打盲孔使得残余变形更小,一定程度上提高了穿孔泡沫夹芯结构的冲击阻抗,但打盲孔

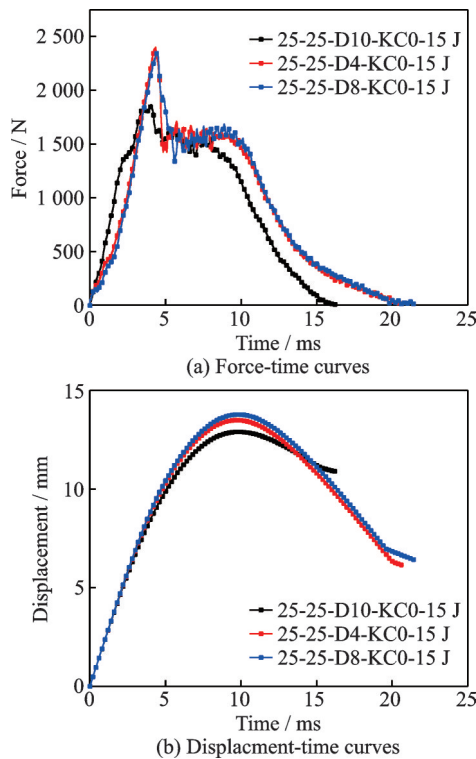


图 7 不同打孔深度的穿孔泡沫夹芯试验件的接触力-时间和冲头位移-时间曲线  
Fig.7 Force-time curves and displacement-time curves of perforated foam core sandwich specimens with different hole depths

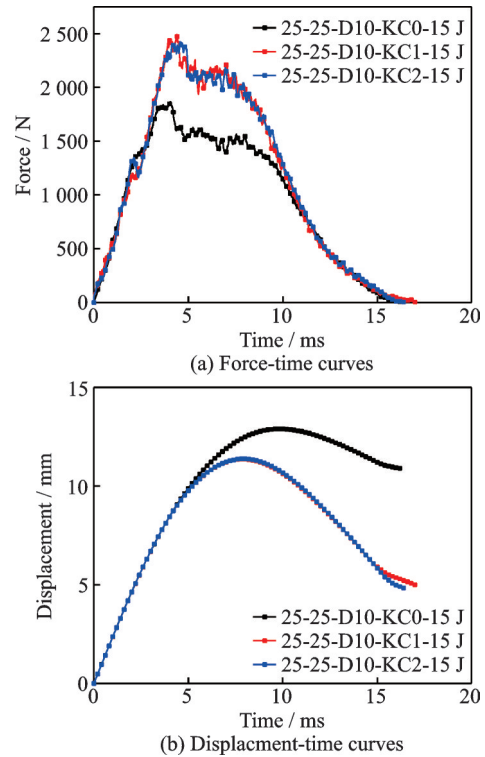


图 8 不同泡沫槽宽的穿孔泡沫夹芯结构的接触力-时间和冲头位移-时间曲线  
Fig.8 Force-time curves and displacement-time curves of perforated foam core sandwich specimens with different foam groove widths

深度对冲击性能影响不大;同样,相比泡沫不开槽,泡沫开槽也提高了结构抗冲击性能,但开槽宽度对抗冲击性能影响不大,所以从经济性角度来说选择较小的泡沫槽宽比较合适。

### 2.2 能量吸收率

穿孔泡沫夹层材料的低速冲击性能也可以用结构通过损伤和塑性变形来消耗冲击能量的能力即能量吸收率来衡量。本文将冲击接触开始时冲头的初动能(即实际冲击能量)与冲头回弹与面板脱离瞬间的动能的差值定义为冲击过程中穿孔泡沫夹芯结构所吸收的能量,即

$$E_{\text{absorb}} = \frac{1}{2} m v_0^2 - \frac{1}{2} m v_i^2 \quad (1)$$

式中: $v_0$ 为冲头与砝码架的总质量; $v_i$ 为冲头回弹脱离面板瞬间的速度。再用吸收的能量除以预定冲击能量计算穿孔泡沫夹芯结构的能量吸收率。所有工况试验件的低速冲击响应结果平均值如表 5 所示,所有数据的离散系数(CV)均小于 20%。由表 5 可知,穿孔泡沫夹层结构的能量吸收率随冲击能量的增加提高了约 5.9%,而随胶钉密度的增加略有下降,打孔深度和泡沫槽宽对能量吸收率的影响不大。总体来看,穿孔泡沫夹层材料的能量吸收率大多在 80% 以上,也就是说大部分的冲击能

表5 所有低速冲击工况的冲击响应结果平均值

Table 5 Average results of impact responses of all low-velocity impact cases

工况编号	$F_{\max}/\text{kN}$	$U_{\max}/\text{mm}$	$E_{\text{pred}}/\text{J}$	$E_{\text{real}}/\text{J}$	$E_{\text{absorb}}/\text{J}$	能量吸收率/%
25×25-D10-KC0-5 J	1.439	6.82	5	4.95	4.51	90.2
25×25-D10-KC0-10 J	1.472	10.76	10	9.93	9.42	94.2
25×25-D10-KC0-15 J	1.867	12.91	15	14.95	14.33	95.5
25×25-D10-KC0-20 J	2.139	15.54	20	19.95	18.85	94.2
25×20-D10-KC0-15 J	2.503	11.95	15	14.95	12.49	83.3
20×20-D10-KC0-15 J	2.114	11.63	15	14.95	14.00	93.3
25×25-D4-KC0-15 J	2.340	13.49	15	14.95	12.62	84.1
25×25-D8-KC0-15 J	2.358	13.78	15	14.95	12.51	83.4
25×25-D10-KC1-15 J	2.491	11.37	15	14.95	11.73	78.2
25×25-D10-KC2-15 J	2.427	11.39	15	14.95	11.66	77.7

注: $F_{\max}$ 表示冲击过程中最大接触力; $U_{\max}$ 表示最大冲头位移; $E_{\text{pred}}$ 表示预定冲击能量; $E_{\text{real}}$ 表示冲头接触面板前的实际初始动能; $E_{\text{absorb}}$ 为冲击过程中结构吸收的能量。

量都被结构消耗吸收,这一方面是因为本文所用的PUR泡沫质地较软,屈服强度较低,容易发生局部塑性变形,另一方面是因为环氧树脂胶钉在压缩过程中也会出现屈曲失稳,这种屈曲引起的塑性变形也会吸收一部分冲击能量。

### 2.3 损伤检测结果

本文采用目视检测和超声C扫描两种检测手段对穿孔泡沫夹层试验件的低速冲击损伤进行研究,并用千分尺测量了面板表面的凹坑深度。面板表面损伤的目视结果如图9所示,凹坑深度测量结果平均值如表6所示,所有数据的离散系数小于10%。可以看到,随着冲击能量的增加,面板凹坑深度由0.25 mm增加到0.8 mm,冲击能量较高时损伤还呈放射状扩展,凹坑区损伤形式以基体开裂为主,纤维的损伤并不明显;而随着胶钉密度的增

加,凹坑的深度增加了约30%,但损伤面积明显减小;泡沫开槽试验件的凹坑大小相比未开槽的更小,但是槽宽2 mm试验件的放射状损伤区域比槽宽1 mm试验件略大一些,这可能是因为成形过程中更宽的槽不容易充分浸胶,导致胶接强度不够。相同能量冲击时,冲击位置在点阵之间所造成的凹坑大小与正对胶钉的相差不大,但凹坑深度大于后者。对于泡沫打盲孔的试验件,由于下面板在冲击试验中与泡沫严重分层,试验件已完全破坏,无须再做损伤检测。

夹层结构内部损伤的C扫描检测结果如图10所示。由图可知,当冲击能量较低时,内部损伤面积较小,并未集中在冲击位置附近,而随着冲击能量增加到15 J,内部损伤区域自冲击点呈放射状向边缘扩展,这也印证了目视检测的结果;受相同能

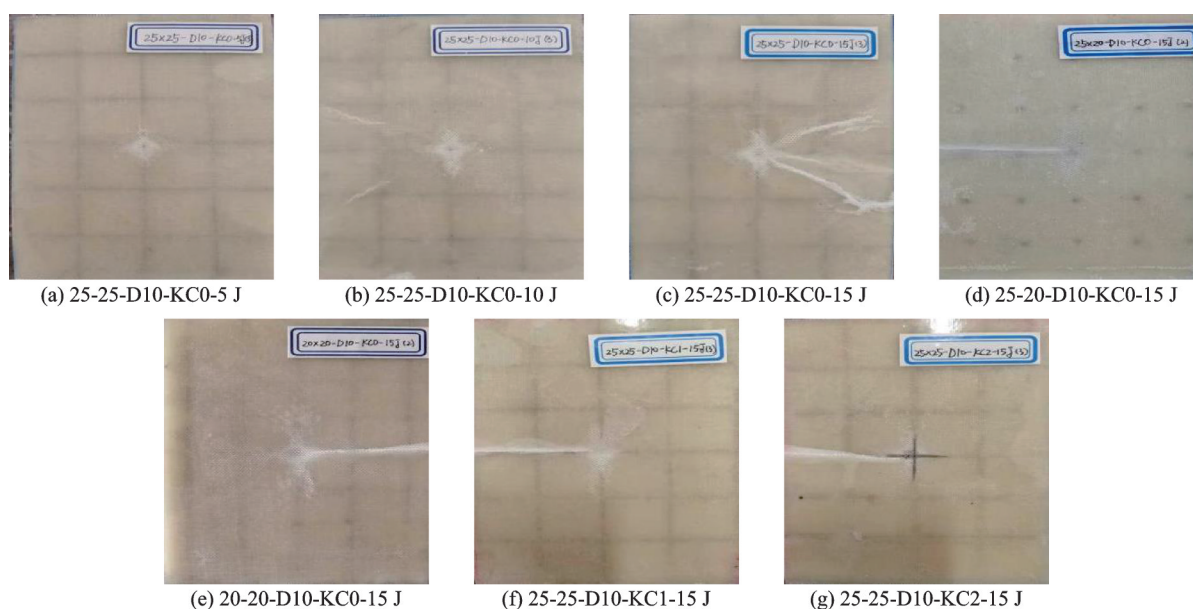


图9 低速冲击损伤目视检测照片

Fig.9 Visually inspection photos of low-velocity impact damage



表 6 所有低速冲击工况的凹坑深度测量结果平均值  
Table 6 Average measuring results of indentation depth of all low-velocity impact cases

工况编号	凹坑深度/mm
25×25-D10-KC0-5 J	0.251
25×25-D10-KC0-10 J	0.425
25×25-D10-KC0-15 J	0.697
25×25-D10-KC0-20 J	0.806
25×20-D10-KC0-15 J	1.010
20×20-D10-KC0-15 J	1.042
25×25-D4-KC0-15 J	0.698
25×25-D8-KC0-15 J	0.734
25×25-D10-KC1-15 J	0.831
25×25-D10-KC2-15 J	0.982

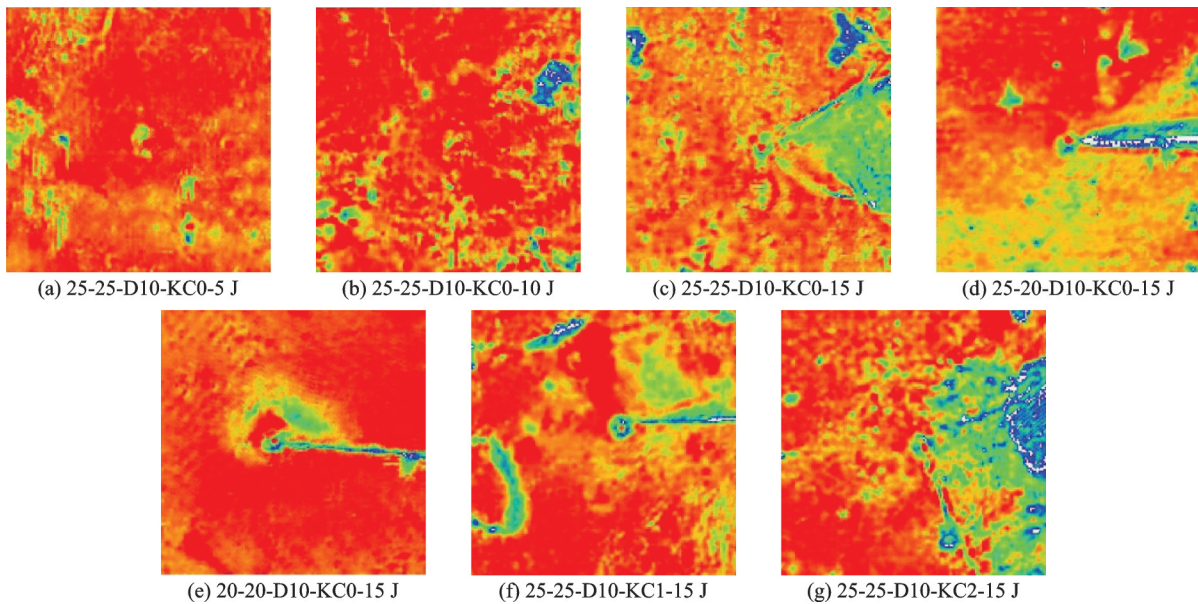


图 10 低速冲击损伤超声 C 扫描图片

Fig.10 Ultrasonic C-scan photos of low-velocity impact damage

### 3 结 论

本文对穿孔泡沫夹层复合材料结构的低速冲击性能进行了试验研究,对比探究了胶钉密度、打孔深度和泡沫槽宽对穿孔泡沫夹层材料低速冲击阻抗性能的影响,结论如下:

(1) 相同夹芯结构参数下,随着冲击能量的增加,冲击过程中的最大接触力增加了约 60%,最大冲头位移增加了一倍多,面板凹坑深度由 0.25 mm 增加到 0.8 mm,内部损伤区域也明显扩大,同时夹芯结构的能量吸收率提高了 5.9%,这说明冲击能量越大,穿孔泡沫夹芯复合材料的低速冲击响应幅度越大,结构的损伤也越严重。

(2) 通过对比不同胶钉密度、打孔深度和泡沫槽宽试验件的响应和损伤的结果来看,增加胶钉密度能显著提高穿孔泡沫夹层复合材料的低速冲击

量冲击时,胶钉密度越大的试验件的损伤区域面积越小;相比泡沫未开槽试验件,泡沫槽宽 1 mm 试验件的损伤面积明显减小,但是槽宽 2 mm 试验件的损伤区域相比槽宽 1 mm 更大,究其原因可能是成形过程中树脂未能充分浸润。

从目视检测和超声 C 扫描得到的损伤结果可以看出,相同结构参数下冲击损伤的大小与冲击能量呈正相关;胶钉密度的增加能显著缩小损伤面积,提高结构的冲击损伤阻抗性能,但还是要权衡结构重量的增加以选择合理的密度值;泡沫槽宽的增加在一定范围内能提高损伤阻抗,但也存在结构增重的问题,所以选择适当的槽宽效果更好。

损伤阻抗性能,但增加胶钉密度也导致结构增重,所以要权衡结构性能和经济性原则选择合适的胶钉密度参数;增加泡沫槽宽在一定范围内能提高穿孔泡沫夹层结构损伤阻抗性能,但也存在结构增重的问题,因此选择适当的槽宽效果更好;泡沫打孔的深度对穿孔泡沫夹层材料的冲击性能没有影响,而且相比打通孔的夹芯结构,打盲孔时下面板在冲击过程中更容易出现分层,反而降低了损伤阻抗性能。

#### 参考文献:

- [1] 张发,姜丽丽,孙宝忠. 泡沫夹层结构复合材料机翼模型弯曲破坏形态有限元模拟[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(2): 135-139, 145.

ZHANG Fa, JIANG Lili, SUN Baozhong. FEM simulation of failure modes under bending test for compos-

- ite wing with foam sandwich structure [J]. *Journal of Dong Hua University (Nature Science)*, 2013, 39(2): 135-139, 145.
- [2] 蔡建丽, 余欢, 王云英, 等. 泡沫夹层结构复合材料准静态压痕实验[J]. *宇航材料工艺*, 2011, 41(3): 84-88.  
CAI Jianli, YU Huan, WANG Yunying, et al. Foam-core sandwich structure composites subjected to quasi-static indentation[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2011, 41(3): 84-88.
- [3] CARTIE D D, FLECK N A. The effect of pin reinforcement upon the through-thickness compressive strength of foam-cored sandwich panels[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(16): 2401-2409.
- [4] O' BRIEN K T, PARIS I L. Exploratory investigation of failure mechanisms in transition regions between solid laminates and X-cor truss sandwich [J]. *Composite Structures*, 2002, 57(1/2/3/4): 189-204.
- [5] 杜龙, 矫桂琼, 黄涛. X状Z-pin增强泡沫夹层结构的剪切性能[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(6): 140-146.  
DU Long, JIAO Guiqiong, HUANG Tao. Shear properties of X-Z-pin reinforced foam core sandwich [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(6): 140-146.
- [6] 杜龙, 矫桂琼, 黄涛, 等. Z-pin增强泡沫夹层结构的弯曲性能[C]//第十五届全国复合材料学术会议. 北京: 中国力学学会, 2008.  
DU Long, JIAO Guiqiong, HUANG Tao, et al. The flexural properties of Z-pin reinforced foam core sandwich [C]//Proceedings of the 15th National Conference on Composite Materials. Beijing: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2008.
- [7] 单杭英, 肖军, 李宁, 等. X-cor夹层结构的平压性能试验[J]. *宇航材料工艺*, 2012, 42(3): 78-81.  
SHAN Hangying, XIAO Jun, LI Ning, et al. Experimental on compressive behavior of X-cor sandwich[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2012, 42(3): 78-81.
- [8] 单杭英, 肖军, 尚伟, 等. X-cor夹层结构的剪切性能[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(3): 541-549.  
SHAN Hangying, XIAO Jun, SHANG Wei, et al. Shear properties of X-cor sandwich[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(3): 541-549.
- [9] 朱飞, 还大军, 肖军, 等. X-cor夹层结构低速冲击实验和数值模拟研究[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(2): 28-37.  
ZHU Fei, HUAN Dajun, XIAO Jun, et al. Experimental and numeral investigation on X-cor sandwich structure under low-velocity impact[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(2): 28-37.
- [10] 郑锡涛, 李泽江, 杨帆. Z-pin增强复合材料层合板断裂韧性试验研究[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(4): 180-188.  
ZHENG Xitao, LI Zejiang, YANG Fan. Experimental investigation on the fracture toughness of Z-pin reinforced composite laminates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(4): 180-188.
- [11] KIM J H, LEE Y S, PARK B J, et al. Evaluation of durability and strength of stitched foam-cored sandwich structures [J]. *Composite Structures*, 1999, 47(1): 543-550.
- [12] 郭书良, 赵龙, 黄峰, 等. Kevlar纤维缝制泡沫芯材复合材料力学性能研究[J]. *材料科学与工艺*, 2013, 21(2): 38-44.  
GUO Shuliang, ZHAO Long, HUANG Feng, et al. Mechanical properties of Kevlar fiber stitched foam core composite sandwich plates [J]. *Materials Science & Technology*, 2013, 21(2): 38-44.
- [13] 黄涛, 矫桂琼, 潘文革. 缝制泡沫夹层结构弯曲性能研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2006, 24(4): 535-538.  
HUANG Tao, JIAO Guiqiong, PAN Wenge. Study on flexural behavior of stitched foam-core sandwich [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2006, 24(4): 535-538.
- [14] 马元春. 缝制泡沫夹层结构稳定性试验研究[J]. *科技与创新*, 2017(16): 74-75.  
MA Yuanchun. Experimental investigation on structural stability of stitched foam core sandwich [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2017(16): 74-75.
- [15] 孙士勇, 秦进, 杨睿, 等. 缝制泡沫夹芯复合材料细观纤维柱破坏行为[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(4): 837-844.  
SUN Shiyong, QIN Jin, YANG Rui, et al. Fracture behavior of meso-fiber column in the stitched foam sandwich composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(4): 837-844.
- [16] 高鼎涵, 周光明. 穿孔泡沫夹层复合材料平拉强度研究[J]. *江苏航空*, 2011(S1): 84-86.  
GAO Dinghan, ZHOU Guangming. Investigation on plane tension strength of perforated foam-core sandwich composites [J]. *Jiangsu Aviation*, 2011(S1): 84-86.
- [17] 朱基炜. 穿孔泡沫夹层复合材料力学性能研究及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.  
ZHU Jiwei. Investigation and application on mechanical behaviors of perforated foam core sandwich composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [18] ABRATE S. Impact on composite structures [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.



- [19] NETTLES A T, HODGE A J. Impact testing of glass/phenolic honeycomb panels with graphite/epoxy facesheets[C]//Proceedings of the 35th International SAMPE Symposium and Exhibition. Anaheim, CA: [s.n.], 1990, 35: 1430-1440.
- [20] KIM C G, JUN E J. Impact resistance of composite laminated sandwich plates [J]. Composite Materials, 1992, 26(15): 2247-2261.
- [21] LAGACE P A, WILLIAMSON J E, TSANG P H W, et al. A preliminary proposition for a test method to measure impact damage resistance[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1993, 12(5): 584-601.
- [22] PALL T E. Impact resistance and residual compression strength of composite sandwich panels[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Composite Materials: Design, Manufacture & Application. Honolulu, HI: [s.n.], 1991: 3-G-1-3-G-14.
- [23] BERNARD M L, LAGACE P A. Impact resistance of composite sandwich plates[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1989, 8: 432-445.
- [24] SCHUBEL P M, LUO J J, DANIEL I M. Low velocity impact behavior of composite sandwich panels [J]. Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(10): 1389-1396.
- [25] 王杰. 复合材料泡沫夹层结构低速冲击与冲击后压缩性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
WANG Jie. Study on the low-velocity impact and compression after impact behavior of foam-core sandwich panels[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [26] American Society for Testing and Materials. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event: ASTM-D7136/D7136M-12 [S]. Philadelphia: ASTM, 2007.

(编辑: 胥橙庭)