

碳/玻璃混杂 NOMEX 蜂窝夹层 抗冲击性能分析

郑菊艳¹, 孙川², 石进¹

(1. 上海船舶工艺研究所, 上海 200032; 2. 中船奥蓝托无锡软件技术有限公司, 江苏无锡 214000)

摘要: [目的]为了系统分析低速重载条件下, 碳/玻璃纤维混杂增强 NOMEX 蜂窝夹层结构的抗冲击性能, 以及不同冲头形状对其损伤行为的影响规律。[方法]采用试验测试与数值模拟相结合的方法, 利用 3 种形状的冲头对碳/玻璃纤维混杂增强 NOMEX 复合材料进行冲击, 分析不同冲头对混杂增强材料破坏特征的影响规律。在此基础上, 通过控制变量法, 研究冲击能量参数与结构力学性能之间的关联性, 揭示冲击载荷作用下蜂窝夹层结构的承载机理和能量吸收特性。[结果]结果表明: 在冲击能不变的条件下, 该蜂窝夹层结构的承载能力和损伤程度在圆锥头、半球头和平头的作用下依次递增; 同时, 结构的临界穿透能也随着冲头形状按圆锥头、半球头和平头的顺序逐渐增大。由此可知, 蜂窝夹层结构的吸能能力受冲头形状和冲击能的影响显著。[结论]为量化不同冲击条件对碳/玻璃纤维混杂增强 NOMEX 蜂窝夹层结构承载能力的影响提供了重要的工程参考价值。

关键词: NOMEX; 蜂窝夹层结构; 低速重载; 抗冲击性能; 承载机理

中图分类号: TB332; O347.3 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.05.15

Analysis of Impact Resistance Performance of Carbon/Glass Hybrid NOMEX Honeycomb Sandwich

ZHENG Juyan¹, SUN Chuan², SHI Jin¹

(1. Shanghai Shipbuilding Technology Research Institute, Shanghai 200032, China; 2. Wuxi Orient Software Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, Jiangsu, China)

Abstract: [Purpose] To systematically analyze the impact resistance of carbon/glass fiber hybrid-reinforced NOMEX honeycomb sandwich structures under low-speed and heavy-load conditions, as well as the influence of different punch shapes on their damage behavior, [Method] a combination of experimental testing and numerical simulation is employed. Three shapes of punches are used to impact carbon/glass fiber hybrid-reinforced NOMEX composites, and the influence of different punches on the damage characteristics of the hybrid-reinforced materials is analyzed. Based on this, the correlation between impact energy parameters and structural mechanical properties is investigated using the controlled variable method, revealing the load-bearing mechanism and energy absorption characteristics of honeycomb sandwich structures under impact loading. [Result] The results showed that under constant impact energy conditions, the load-bearing capacity and damage degree of the honeycomb sandwich structure increased sequentially under the actions of conical, hemispherical, and flat punches. Meanwhile, the critical penetration energy of the structure also gradually increased with the order of conical, hemispherical, and flat punches. It can be inferred that the energy absorption capacity of honeycomb sandwich structures is significantly influenced by the shape of the punch and the impact energy. [Conclusion] It provides important engineering reference value for quantifying the impact of different impact conditions on the load-bearing capacity of carbon/glass

收稿日期: 2025-08-05; 修回日期: 2026-01-07

作者简介: 郑菊艳 (1983—), 女, 研究员。研究方向: 材料、工艺及制造技术。

fiber hybrid-reinforced NOMEX honeycomb sandwich structures.

Key words: NOMEX; honeycomb sandwich structure; low speed and heavy load; impact resistance performance; bearing mechanism

0 引言

碳/玻璃纤维混杂增强NOMEX蜂窝夹层结构融合了碳纤维的高强度、玻璃纤维的高韧性及NOMEX蜂窝芯优异的吸能与轻量化特性,其比刚度与比强度显著优于普通金属蜂窝及单一纤维增强夹层结构,能高效地分散载荷。同时,该结构密度极低,整体结构质量较实心结构减少50%以上,已成功应用于船舶甲板、舱壁等轻量化关键部件。然而,该混杂增强结构在低速重载冲击下表现出明显的抗冲击性能不足,对冲击损伤的敏感性较高,易发生蒙皮脱粘^[1]、芯材压溃^[2]等问题。在低速冲击载荷作用下,加之蜂窝夹层结构在运输、安装和维护过程中难以避免磕碰、跌落等情况,该结构在实际应用中存在一定的局限性^[3]。因此,研究高性能蜂窝夹层结构对提高船舶防撞性能具有深远的工程意义,进一步探索该特定结构在低速重载条件下的抗冲击性能尤为重要^[4-6]。

复合材料蜂窝夹层结构承受的冲击载荷由蒙皮与蜂窝芯共同承担,其中混杂纤维蒙皮的断裂韧性及NOMEX蜂窝芯的剪切吸能特性,是决定结构抗冲击性能的核心因素^[7]。国内外学者对由层合板(蒙皮)和夹芯组成的夹层结构的冲击特性开展了大量研究。在低速冲击载荷作用下,NOMEX蜂窝的主要损伤模式为芯体压溃^[8],铝蜂窝的主要损伤模式为芯体屈曲^[9],泡沫夹层结构的主要损伤模式则为泡沫芯粉碎^[10]。MANES等^[11]采用试验与仿真方法,研究了由铝蒙皮与NOMEX蜂窝芯组成的夹层结构在低速冲击载荷作用下的响应,发现铝蒙皮通常会产生产永久性凹坑损伤。诸多学者重点研究了蜂窝芯的几何尺寸与形状对夹层板冲击特性的影响,以期在满足高性能要求的同时实现结构的轻量化设计。蜂窝夹层结构的关键参数包括芯体高度、蜂窝形状、蜂窝壁厚及胞元尺寸等。研究发现,蜂窝夹层结构的抗冲击性能随蜂窝壁厚的增加而提升^[12],胞元尺寸的增大会降低其抗冲击性能^[13-14]。对于芯体高度,

研究发现其对结构整体损伤的影响较小^[15]。

不同冲击条件对蜂窝夹层结构的损伤范围、损伤程度、承载能力和吸能能力均有显著影响^[16-18]。冲击接触面较大的冲头会产生更大的接触力和损伤面积,但接触时间较短^[19]。冲头直径与蜂窝夹层结构的峰值力呈正相关,而与能量吸收呈负相关^[20]。冲击角度对峰值力和能量吸收的影响取决于冲头是否穿透整体结构^[21]。对于不同冲击角度,损伤面积、峰值力和能量吸收随冲击角度的增大而减小,而接触时间与冲击角度无关^[22-23]。现有研究主要集中于冲击能量参数对蜂窝夹层结构宏观力学性能的影响,对于冲头几何特征与碳/玻璃纤维混杂增强NOMEX蜂窝夹层结构损伤模式、极限承载力及能量吸收效率之间的量化关联机制,尚未开展系统性研究^[24-25]。

针对上述问题,本文采用试验测试与数值模拟相结合的研究方法,系统分析碳纤维/玻璃纤维混杂增强NOMEX蜂窝夹层结构在低速冲击载荷作用下,冲击能量和冲头形状对其抗冲击性能的影响机制。研究结果将填补冲头形状对该类混杂增强结构损伤模式量化影响的研究空白,为船舶工程实践中该类复合材料的承载性能评估方法提供理论基础,并为轻量化结构优化提供指导建议。

1 试验和仿真

1.1 试样介绍

该复合材料试样采用典型的三明治夹层结构,由上、下2层蒙皮和中间的蜂窝芯材组成(见图1),蒙皮与蜂窝芯材通过高性能黏结剂进行黏接。试样为方形,边长尺寸为150 mm×150 mm。

蒙皮由碳/玻璃纤维混杂编织而成,铺层顺序为[(0/90)C(±45)6G(0/90)C],名义厚度为1.92 mm,共8层。蜂窝芯为正六边形,胞元尺寸为4.8 mm,单层壁厚为0.1 mm,双壁厚度为0.2 mm。高性能黏结剂为J-95胶,试样中蒙皮与蜂窝芯粘接良好。

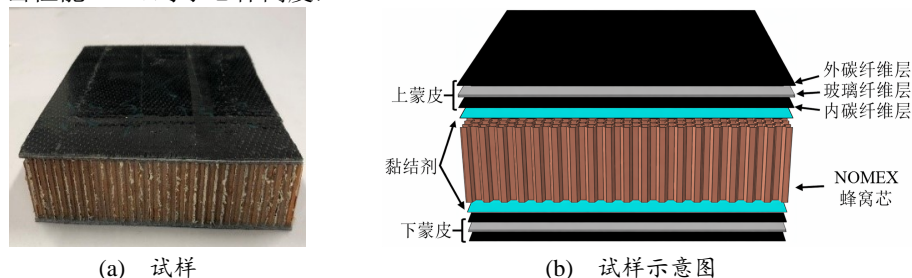


图1 蜂窝夹层结构构造

Fig. 1 Honeycomb Aandwich Structure Construction

1.2 研究计划

本文采用试验测试和数值模拟相结合的方法,分析蜂窝夹层结构的抗冲击性能。通过设计低速冲击试验方案,选用3种不同形状的冲头开展重载冲击试验,记录不同冲击能量下的结构损伤情况和形貌特征。在ABAQUS/Explicit模块中创建精细化的有限元模型并进行仿真计算,将试验结果与仿真结果进行对比,以验证数值模型的可靠性。在此基础上,分析蜂窝夹层结构在半球头冲头和平头冲头冲击下

的层合板破坏损伤规律,并总结3种形状的冲头对该结构抗冲击性能的作用机制。

本文设计了3组对照试验,试验内容见表1。3种冲头分别为圆锥头、半球头和平头,依次用字母C、H和F表示。所有冲头的质量统一为31 kg,冲击能量的调节通过改变冲头的下落高度来实现。试样编号采用“能量-尺寸-类型”的命名方式,如IE25-16F表示平头的冲头直径为16 mm,冲击能量为25 J。试验中各试样命名见表1。

表 1 研究计划

Tab. 1 Research Plan

组别	试件名称	冲头形状	冲头直径/mm	冲击能量/J	落锤高度/mm	初始速度/(m/s)	试验	仿真
组 1	IE25-16C	C	16	25	82	1.270	✓	✓
	IE45-16C			45	148	1.704	✓	✓
组 2	IE25-16H	H		25	82	1.270	✓	✓
	IE45-16H			45	148	1.704	✓	✓
	IE65-16H			65	214	2.048	✓	✓
组 3	IE25-16F	F		25	82	1.270	✓	✓
	IE45-16F			45	148	1.704	✓	✓
	IE65-16F			65	214	2.048	✓	✓
	IE100-16F			100	329	2.540	✓	✓

1.3 试验过程

冲击试验机及冲头见图2,冲击试验机主要包括3大部件:落锤系统、夹具和数据采集系统。夹具由钢板切割成型,结构设计为一对方形窗口,尺寸为125 mm×125 mm,能保证夹具完全固定蜂窝夹层试样,并确保试样中心与夹具中心对齐。为保证冲击试验的单次冲击特性,本文采用连杆结构,当冲头完成首次冲击后立即触发机械自锁,有效避免落锤发生二次冲击。数据采集系统将实时监控冲头在运动过程中的载荷大小和速率变化。

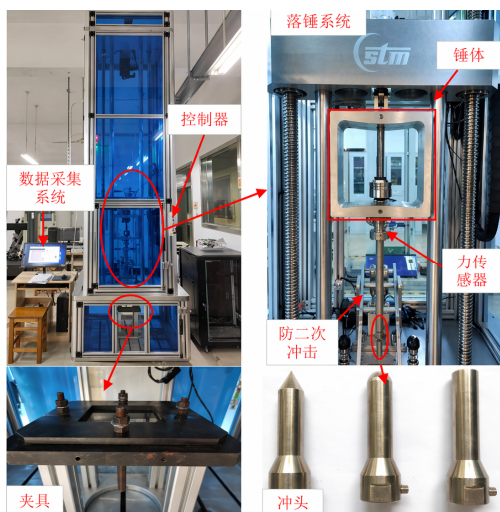


图 2 冲击试验机

Fig. 2 Impact Testing Machine

1.4 数值仿真

在ABAQUS/Explicit显示动力学分析中,建立试样的有限元模型。该模型采用差异化的单元设计,上下蒙皮单元类型选用C3D8R,蜂窝芯的单元类型选用S4R。为有效控制沙漏变形,仿真模型采用Enhanced沙漏控制算法。通过对网格相关性分析可知,当单元尺寸小于0.7 mm时,关键力学参数误差显著降低,计算效率相比于更细的网格划分模型提升较大。本文仿真模型整体采用0.5 mm的网格尺寸,单元总数达1 964 332。根据冲击试验后试件表面损伤面积的观察结果,对冲击中心区域进行局部网格加密,即对上下蒙皮的冲击中心区域进行网格加密处理,加密区域宽度为30.0 mm,加密网格为0.3 mm,尺寸见图3。

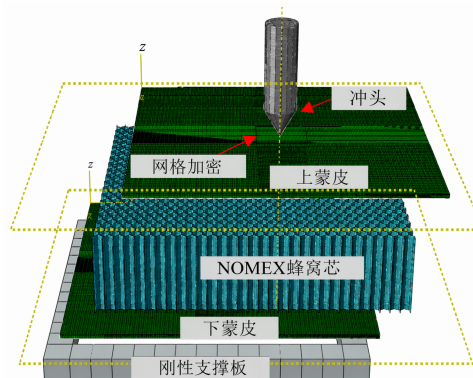


图 3 冲击仿真模型

Fig. 3 Impact Simulation Model

计算模型采用Surface-to-surface的接触算法, 以确保模拟冲击界面行为的精确性。在模型中约束层合板四周所有自由度, 以模拟实际夹具的固定方式, 准确复现试验边界条件。此外, 冲头仅保留Z方向的平移自由度, 通过定义冲头参考点在Z方向的初始速度场来施加冲击载荷。

为了准确预测蒙皮的破坏行为, 本文在蒙皮的冲击数值模拟中采用了渐进失效模型。NOMEX蜂窝材料模型为理想弹塑性本构。蒙皮和蜂窝芯的关键参数见表2和表3。渐进破坏模式的损伤起始准则如下。

纬向拉伸失效 ($\epsilon_{11} \geq 0$):

$$\frac{\epsilon_{11}^2}{(\epsilon_{t_{0.1}})^2} + \frac{\epsilon_{12}^2}{\epsilon_{0,12}^2} + \frac{\epsilon_{13}^2}{\epsilon_{0,13}^2} = 1 \quad (1)$$

纬向压缩失效 ($\epsilon_{11} < 0$):

$$\left(\frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_{c_{0.1}}} \right)^2 = 1 \quad (2)$$

经向拉伸失效 ($\epsilon_{22} \geq 0$):

$$\frac{\epsilon_{22}^2}{(\epsilon_{c_{0.2}})^2} + \frac{\epsilon_{12}^2}{\epsilon_{0,12}^2} + \frac{\epsilon_{13}^2}{\epsilon_{0,13}^2} = 1 \quad (3)$$

经向压缩失效 ($\epsilon_{22} < 0$):

$$\left(\frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{c_{0.2}}^c} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

层间拉伸失效 ($\epsilon_{33} \geq 0$):

$$\frac{\epsilon_{33}^2}{(\epsilon_{t_{0.3}})^2} + \frac{\epsilon_{13}^2}{\epsilon_{0,13}^2} + \frac{\epsilon_{23}^2}{\epsilon_{0,23}^2} = 1 \quad (5)$$

层间压缩失效 ($\epsilon_{33} < 0$):

$$\frac{\epsilon_{33}^2}{(\epsilon_{c_{0.3}})^2} + \frac{\epsilon_{13}^2}{\epsilon_{0,13}^2} + \frac{\epsilon_{23}^2}{\epsilon_{0,23}^2} = 1 \quad (6)$$

式(1)~式(6)中: 下标1、2和3分别为纬向、径向和面外的方向; ϵ_{ii} 为主方向的应变; ϵ_{ij} 为*i-j*面的极限剪切应变; $\epsilon_{t_{0,i}}$ 为极限拉伸应变; $\epsilon_{c_{0,i}}$ 为极限压缩应变。

表 2 蜂窝材料参数

Tab. 2 Parameters of Honeycomb Materials

参数	数值
密度/(kg/m ³)	710
弹性模量/MPa	2 000
泊松比	0.3
屈服强度/MPa	20

表 3 蒙皮材料参数

Tab. 3 Parameters of Skin Material

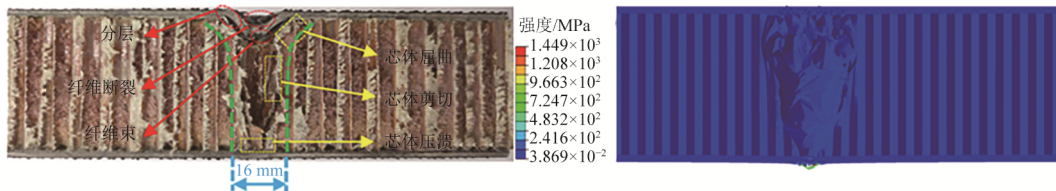
材料	玻璃纤维 GFRP	碳纤维 CFRP
密度/(kg/m ³)	$\rho=1\ 756$	$\rho=1\ 570$
弹性参数/MPa	$E_{11}=14\ 730$	$E_{11}=63\ 000$
	$E_{22}=14\ 730$	$E_{22}=63\ 000$
	$E_{33}=6\ 870$	$E_{33}=8\ 000$
	$\mu_{12}=0.12$	$\mu_{12}=0.06$
	$G_{12}=2\ 800$	$G_{12}=4\ 100$
	$G_{13}=1\ 430$	$G_{13}=3\ 800$
强度值/MPa	$X_T=442$	$X_T=499$
	$X_c=337$	$X_c=352$
	$Y_T=442$	$Y_T=499$
	$Y_c=337$	$Y_c=352$
	$Z_T=75$	$Z_T=64$
	$Z_c=210$	$Z_c=160$
	$S_{12}=52$	$S_{12}=88$
	$S_{13}=45$	$S_{13}=52$
$S_{23}=45$	$S_{23}=52$	

2 结果与讨论

2.1 损伤模式

2.1.1 整体失效

夹层板的截面损伤形貌见图4。通过试验观察与数值分析结果的对比可知, 该结构在冲击载荷作用下的主要失效形式为刺穿损伤。对蒙皮损伤直径、蜂窝芯压溃及剪切范围等核心指标的定量统计显示, 仿真结果与试验实测值的相对误差均小于12%, 平均相对误差为9.5%。误差主要来源于试验损伤边界的视觉判定偏差与仿真中材料参数的均质化假设。



(a) IE45-16C

图 4 试验和仿真结果的试样截面失效模式对比

Fig. 4 Comparison of Failure Modes of Sample Sections in Experimental and Simulation Results

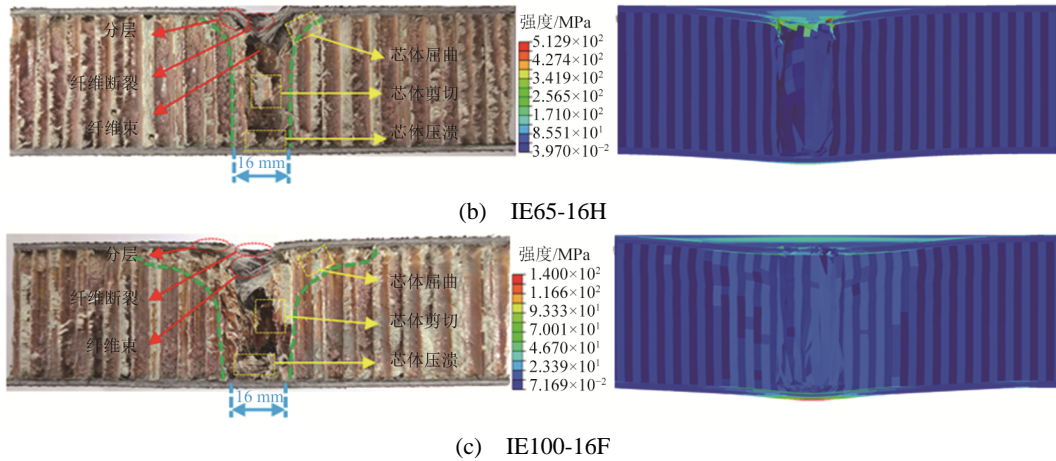


图4 试验和仿真结果的试样截面失效模式对比 (续)

Fig. 4 Comparison of Failure Modes of Sample Sections in Experimental and Simulation Results (Continued)

蜂窝夹层结构的上蒙皮呈现出多层次的损伤模式，主要包括纤维断裂、纤维束损伤和层间分层。在圆锥头冲头冲击下，冲头尖锐的几何特征导致局部应力集中，刺穿上蒙皮。首先在接触点附近引发纤维断裂，随后断裂区域逐步扩展，损伤程度演变为大范围的纤维束损伤。值得注意的是，由于蒙皮采用碳/玻璃纤维混杂增强体系，2种增强材料在断裂韧性方面存在显著差异，导致层间应力分布不均匀，在冲击区域内的蒙皮纤维层中产生了分层现象。通过对比不同冲头的影响发现，半球头和平头冲头冲击下的蒙皮损伤模式与圆锥头冲头类似。同时，由于3种冲头的接触面积不同，蒙皮冲击受损区域按“圆锥头→半球头→平头”的顺序依次显著扩大。

蜂窝芯层的基本失效模式包括结构屈曲、剪切破坏和压缩压溃。在圆锥头冲头冲击过程中，尖锐的几何特征导致蜂窝芯层发生局部屈曲变形。当冲头刺入结构内部时，蜂窝芯壁开始发生剪切破坏，同时受冲击部位发生压缩破坏。当冲头为半球头时，其曲面接触特性引起蜂窝芯损伤的差异性分布。由于半球头为曲面接触，与结构的接触面积大于圆锥头的点接触，冲击载荷更易通过蒙皮传递至蜂窝芯；同时蒙皮未出现刺穿，因此蜂窝芯呈现出整体压溃损伤现象，且压溃程度由冲击区域中心向试样边缘逐渐减小。在平头冲击下，其平面接触特性使冲击载荷均匀分布于接触区域。与另外2种冲头相比，平头的接触面积最大，应力传递更为直接：冲击初始阶段，蜂窝芯冲击区域周围呈现出剪切穿孔损伤趋势；随着冲击能量的持续作用，沿45°方向的剪切损伤逐渐占据主导地位。

2.1.2 蒙皮失效

不同冲头冲击蜂窝夹层结构时蒙皮损伤情况见表4。上蒙皮损伤主要有2种类型：穿孔损伤和局部凹坑损伤。与上蒙皮相比，下蒙皮承受的剩余冲击

能量更小，损伤程度也更轻，仅出现微小凹痕和局部纤维断裂。整体而言，蜂窝夹层结构的蒙皮损伤特征主要表现为纤维断裂和分层。

表4 不同冲头冲击蜂窝夹层结构时蒙皮损伤情况
Tab. 4 Damage to Skin when Different Punches Impact Honeycomb Sandwich Structure

表面	上表面	下表面
IE45-16C		
IE65-16H		
IE100-16F		

蒙皮损伤的演变过程受冲头形状影响显著。在圆锥头冲击下，上蒙皮首先发生局部刺穿，随后挤压损伤以辐射状扩展，形成挤压-穿孔复合损伤；下蒙皮因冲击能量衰减，表面仅出现一个尖点状损伤。在半球头冲击下，上下蒙皮的纤维层被冲头撕裂，表面出现纤维断裂，与圆锥头冲击相比，层合板的

损伤更为严重。在平头冲击下, 上蒙皮受平头的冲压效应作用, 中心区域出现圆形剪切穿孔, 冲击区域呈现十字形裂纹损伤; 下蒙皮主要发生弹性变形, 因此损伤程度较轻。

2.1.3 仿真结果

不同冲头冲击下的蜂窝夹层蒙皮仿真结果见图5。通过对比发现, 损伤情况与试验数据保持高度一致。从仿真结果中可以看出, 蒙皮损伤扩展与冲头形状关系密切。在临界穿透状态下, 蜂窝夹层蒙皮结构的损伤面积随冲头形状从“圆锥头→半球头→平头”的变化依次增大。在圆锥头冲击下, 层合板出现高度局部化的损伤区域, 损伤直径仅为圆锥头直径的2.4倍。在半球头冲击下, 蒙皮损伤面积处于中等程度, 损伤直径约为半球头直径的4.6倍。在平头冲击下, 蒙皮损伤区域延展至整个蒙皮范围, 并伴随显著的边界效应。

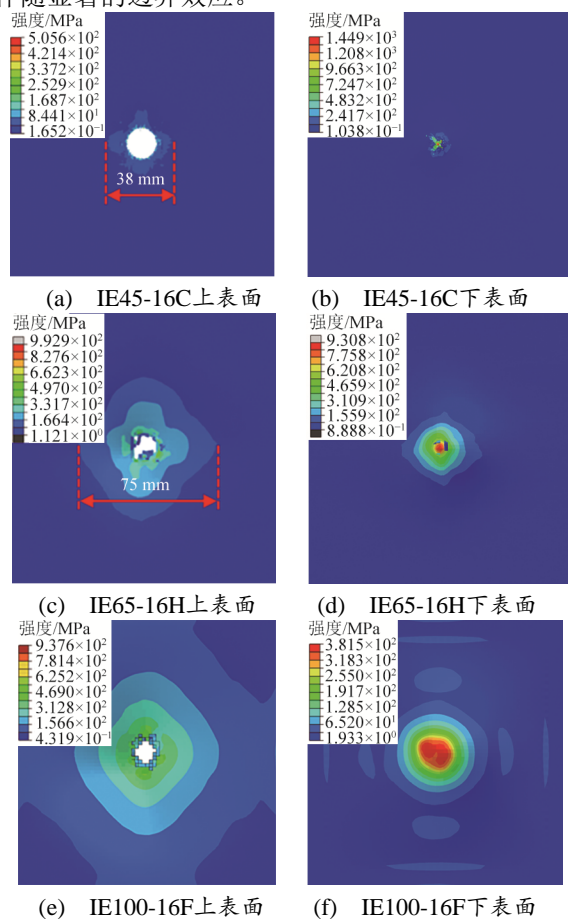


图5 不同冲头作用下的蜂窝夹层蒙皮仿真结果
Fig. 5 Simulation Results of Honeycomb Sandwich Skin Under Different Punch Actions

2.2 冲击力曲线

不同冲头冲击蜂窝结构过程中的接触力历程曲线见图6。通过系统对比试验数据与数值模拟结果发现, 二者呈现高度吻合的规律特征: 所有工况下峰

值力的相对误差均小于9%, 冲击持续时间的相对误差最大为11.2%, 平均相对误差仅为7.2%, 核心力学参数误差均处于工程可接受范围。具体而言, 当冲头仅贯穿单层蒙皮时, 接触力历程曲线呈典型的单波峰形态, 峰值对应蒙皮断裂的临界载荷; 当冲头连续穿透上、下2层蒙皮时, 接触力曲线则表现为双波峰。

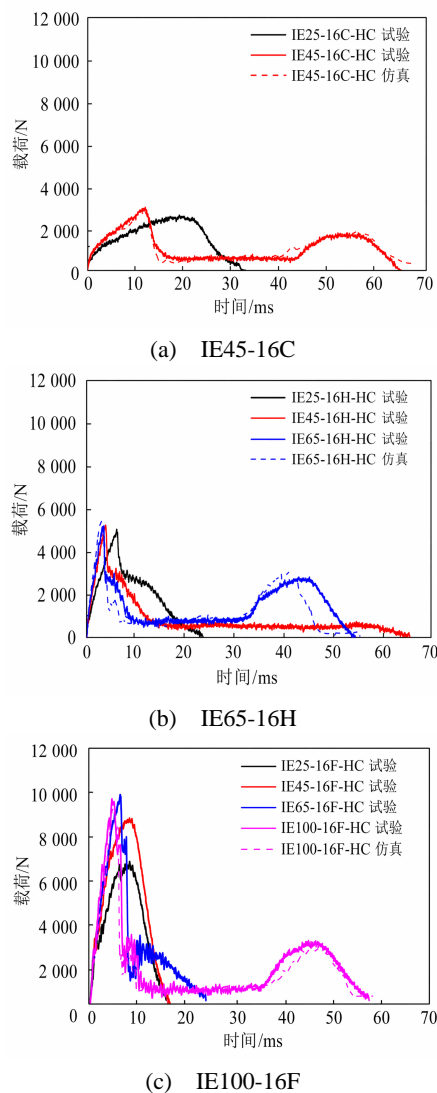


图6 3种冲头作用下的冲击力历程曲线
Fig. 6 Impact Force History Curves Under Action of Three Types of Punches

冲击试验结果表明, 曲线上的刚度变化存在显著差异, 峰值力在圆锥头、半球头和平头冲击下依次提高。这种力学差异主要源于不同冲头的接触动力学特性。其中, 圆锥头工况下的峰值力误差 $\leq 7\%$, 平头工况下的冲击持续时间误差稍大(约11%), 导致不同冲头达到接触力峰值所需的响应时间存在差异。在冲击能量相同的条件下时, 圆锥头由于具有渐进式接触特性, 需要比半球头和平头更长的时

间才能达到接触力峰值。这是因为圆锥头与夹层结构的初始接触为点接触，随着接触面积逐渐扩大，扩展过程导致能量消耗时间相对较长。平头与夹层结构的相互作用表现为面接触，能高效地实现能量吸收，从而显著缩短能量消耗时间。

2.3 承载力

2.3.1 不同冲击能下的承载力

不同冲击能作用下蜂窝夹层结构的承载力曲线见图7。

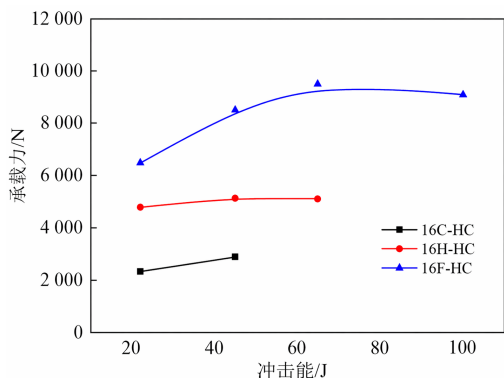


图7 不同冲击能作用下蜂窝夹层结构的承载力曲线

Fig. 7 Bearing Capacity Curves of Honeycomb Sandwich Structures Under Different Impact Energies

研究发现，在半球头和平头冲头冲击下，蜂窝夹层结构的承载力均随冲击能的增加而提高，达到临界值后基本保持稳定；而在圆锥头冲击下的承载力最低。这是因为当冲击能超过蜂窝夹层结构的最大能量吸收容量时，结构发生不可逆的塑性变形，进而导致整体失效。圆锥头接触面积小，蒙皮局部区域应力高度集中，难以将应力有效分散至蜂窝结构，因此承载力较低。半球头的接触面为曲面，冲击时应力分布较为分散，能使部分蜂窝芯材参与受力，促进蒙皮与蜂窝芯协同承载。平头冲头接触面积最大，冲击应力更为分散，使得蜂窝芯深度参与承载，因此蜂窝夹层结构的承载力最大。

冲头形状对蜂窝夹层板的承载性能具有显著影响。当不改变冲击能时，层合板的承载力与冲头形状密切相关：平头作用下层合板的承载力最大，其

次为半球头，圆锥头最小。进一步研究发现，不同冲头冲击下穿透层合板所需的临界冲击能存在较大差异。

2.3.2 最大承载力

3种冲头作用时的夹层板最大承载力见图8。由图8可知，冲头的形状对夹层板最大承载力的影响显著。平头冲击下的峰值承载力约圆锥头冲击的3.5倍，这种显著差异主要与不同冲头作用下结构的受力与承载面积有关。在圆锥头冲击过程中，初始接触阶段为点载荷作用，随着锥尖深入，损伤向四周扩散，导致有效承载面积受限。半球头冲击夹层板时形成环形接触区域，承载面积较圆锥头更大。平头由于接触面上的载荷均匀分布，整个夹层板参与协同变形，其抗穿透能力最强，最大的承载力约圆锥头的3.5倍。

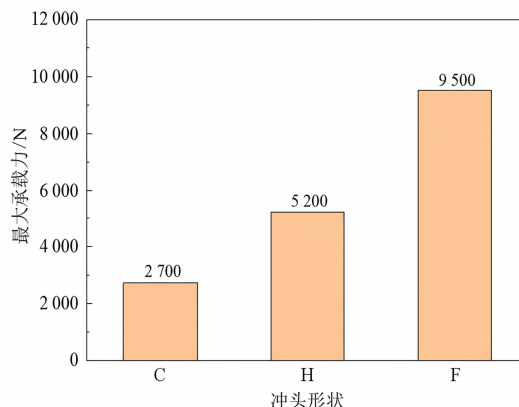


图8 不同冲头作用时夹层板的最大承载力

Fig. 8 Maximum Load-Bearing Capacity of Sandwich Plate Under Action of Different Punches

2.4 蜂窝夹层结构及其各组分的能量吸收

不同冲头冲击下蜂窝夹层结构各部分的能量吸收情况见图9。试验数据表明，在3种冲头冲击下，上下蒙皮和蜂窝芯的能量吸收与冲击能的大小均成正比。此外，下蒙皮的能量吸收始终保持较低水平。进一步研究发现，下蒙皮仅发生可恢复的弹性变形或局部微小损伤，未出现大范围的塑性变形或断裂。

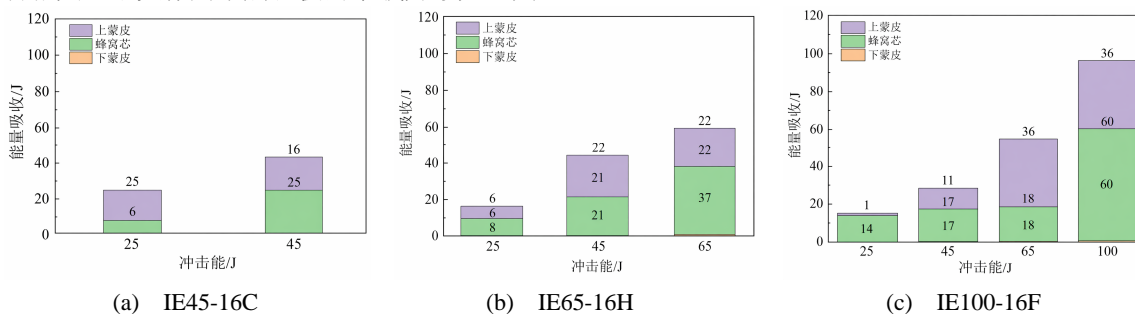


图9 不同冲头下的蜂窝夹层结构各部分的能量吸收

Fig. 9 Energy Absorption of Each Part of Honeycomb Sandwich Structure Under Different Punches

3 结论

本文将数值模拟与试验测试相结合, 研究低速重载冲击下冲击能和冲头类型对复合材料NOMEX蜂窝夹层结构抗冲击性能的影响规律。主要结论有如下3点。

1) 在低速重载条件下, 蜂窝夹层结构在冲头冲击下出现明显的刺穿损伤, 损伤程度按“圆锥头→半球头→平头”的顺序依次递增。

2) 半球头冲头因其曲面接触特性, 能使蒙皮与部分蜂窝芯协同承载。相比之下, 圆锥头和平头的破坏模式存在明显差异: 圆锥头冲击下承载主体为蒙皮, 平头冲击下承载主体为蜂窝芯。

3) 在不改变冲头的条件下, 增大冲击能会使夹层板的承载力呈增长趋势; 当冲击能增大到一定数值后, 承载力开始趋于稳定。此外, 当蜂窝夹层板承受的冲击超过其自身抗冲击能力时, 结构将发生失效。

参考文献:

- [1] 刘志杰, 张艳芳, 刘安黎, 等. 配合间隙对蜂窝夹层结构板芯胶接质量的影响与研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(5): 104-109.
LIU Z J, ZHANG Y F, LIU A L, et al. Effect of Fit Clearance on Bonding Quality of Honeycomb Sandwich Structure Plate and Core[J]. Composites Science and Engineering, 2021(5): 104-109.
- [2] 段苗苗, 史文艳, 张晓研, 等. 低速冲击下复合材料层合板损伤试验与模拟[J]. 强度与环境, 2020, 47(2): 26-31.
DUAN M M, SHI W Y, ZHANG X Y, et al. Experiment and Simulation of Damage of Composite Laminates Under Low-Velocity Impact[J]. Structure and Environment, 2020, 47(2): 26-31.
- [3] XIN Y, YAN H, YANG S, et al. Experimental Study on the Indentation of Epoxy Resin-Aluminum Honeycomb Composite Sandwich Panel[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2019, 28(12): 1-15.
- [4] ICTEN B M, KIRAL B G, DE NIZ M E. Impactor Diameter Effect on Low Velocity Impact Response of Woven Glass Epoxy Composite Plates[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 50(7): 325-332.
- [5] SEVKAT E, LIAW B, DELALE F. Drop-Weight Impact Response of Hybrid Composites Impacted by Impactor of Various Geometries[J]. Materials & Design, 2013, 52(12): 67-77.
- [6] 张晟, 陈伟, 高德平. 铝蜂窝夹层结构抗冲击性能试验与数值研究[J]. 黏接, 2022, 49(8): 142-145.
ZHANG S, CHEN W, GAO D P. Test and Numerical Study on Impact Resistance of Aluminum Honeycomb Sandwich Structure[J]. Bonding, 2022, 49(8): 142-145.
- [7] XIAO Y, HU Y, ZHANG J, et al. Dynamic Bending Responses of CFRP Thin-Walled Square Beams Filled with Aluminum Honeycomb[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 132(11): 494-503.
- [8] IVAÑEZ I, MOURE M M, GARCIA-CASTILLO S K, et al. The Oblique Impact Response of Composite Sandwich Plates[J]. Composite Structures, 2015, 133(12): 1127-1136.
- [9] RECEP G, KEMAL A. Development of Numerical Realistic Model for Predicting Low-Velocity Impact Response of Aluminium Honeycomb Sandwich Structures[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2016, 18(1): 95-112.
- [10] JIE W, WAAS A M, HAI W. Experimental and Numerical Study on the Low-Velocity Impact Behavior of Foam-Core Sandwich Panels[J]. Composite Structures, 2013, 96(2): 298-311.
- [11] MANES A, GILIOLI A, SBARUFATTI C, et al. Experimental and Numerical Investigations of Low Velocity Impact on Sandwich Panels[J]. Composite Structures, 2013, 99(5): 8-18.
- [12] CHEN Y, FU K, HOU S, et al. Multi-Objective Optimization for Designing a Composite Sandwich Structure Under Normal and 45 Degrees Impact Loadings[J]. Composites, Part B: Engineering, 2018, 142(6): 159-170.
- [13] CRUPI V, EPASTO G, GUGLIELMINO E. Comparison of Aluminium Sandwiches for Lightweight Ship Structures: Honeycomb vs. Foam[J]. Marine Structures, 2013, 30(1): 74-96.
- [14] CRUPI V, EPASTO G, GUGLIELMINO E. Collapse Modes in Aluminium Honeycomb Sandwich Panels Under Bending and Impact Loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 43(5): 6-15.
- [15] XUE X W, ZHANG C F, CHEN W, et al. Study on the Impact Resistance of Honeycomb Sandwich Structures Under Low-Velocity/Heavy Mass[J]. Composite Structures, 2019, 226(15): 11223.
- [16] MITREVSKI T, MARSSHALL I H, THOMSON R S, et al. Low-Velocity Impacts on Preloaded GFRP Specimens with Various Impactor Shapes[J]. Composite Structures, 2006, 76(3): 209-217.

(下转第 195 页)

