



波纹夹芯碳纤维金属层板冲击特性

王健 丁梓峻 王重阳 熊浪 王皑冬 严晓强

Impact characteristics of corrugated sandwich carbon fiber metal laminates

WANG Jian, DING Zijun, WANG Chongyang, XIONG Lang, WANG Aidong, YAN Xiaoqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241203.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳/芳纶混杂纤维增强波纹夹芯结构低速冲击性能

Low-velocity impact properties of carbon/aramid hybrid fiber reinforced corrugated sandwich structure

复合材料学报. 2023, 40(2): 1004–1014 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220317.001>

金属面复合材料波纹夹层结构多次冲击性能及其剩余强度

Performance and residual strength of metal-faced composite corrugated sandwich structure under multiple impacts

复合材料学报. 2024, 41(9): 5016–5031 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240419.002>

齿板-玻璃纤维/聚氨酯泡沫芯夹层梁的低速冲击性能

Low-velocity impact behavior of tooth plate glass fiber/polyurethane foam core sandwich beams

复合材料学报. 2019, 36(5): 1092–1100 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180612.001>

碳纤维-金属网增强复合材料低速冲击和界面损伤机制

Low-velocity impact and interlaminar damage mechanism of carbon fiber–metal mesh reinforced composites

复合材料学报. 2023, 40(11): 6351–6362 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230222.007>

基于精确板理论的复合材料格栅/波纹夹芯结构屈曲特性

Buckling characteristics of composite grid/corrugated sandwich structure based on refined plate theory

复合材料学报. 2022, 39(1): 399–411 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210309.003>

结构参数对CFRP蒙皮-铝蜂窝夹层板低速冲击性能的影响

Effect of structural parameters on the low-velocity impact performance of aluminum honeycomb sandwich plate with CFRP face sheets

复合材料学报. 2020, 37(6): 1352–1363 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190815.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20241203.002

波纹夹芯碳纤维金属层板冲击特性

王健^{*1,2}, 丁梓峻^{1,2}, 王重阳^{1,2}, 雄浪^{1,2}, 王晓冬^{1,2}, 严晓强^{1,2}

分享本文

(1. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 对波纹夹芯铝板碳纤维金属层板的低速冲击性能进行了研究, 探索了在不同冲击载荷下的不同高度差波纹层板及层间添加微观粒子层板的挠度、载荷、能量和表面可视损伤。在芯部添加波纹铝板的基础上, 在预浸带表面添加粒子来进一步提高层板的整体冲击性能。分别以 15 J、30 J 和 50 J 冲击能量对波纹夹芯碳纤维金属层板进行冲击试验, 研究该层板的低速冲击响应。在 3 种冲击能量下, 高度差为 0.2 mm 并添加纳米纤维素的层板表现出最好的抗冲击性能, 层板表面可视损伤和内部损伤程度最低。在冲击能量 30 J 时候区别最明显, 添加纳米纤维素的波纹层板接触力峰值达到 8.2 kN, 比只添加 0.2 mm 波纹板的 7.5 kN 提升了 9.3%, 同时也表现出了更好的吸能特性。结果表明, 层板芯部添加波纹铝板可以对碳纤维金属层板芯部起到增韧和支撑效果, 添加纳米纤维素可以改变裂纹扩展方向, 在一定程度上可以提高碳纤维金属层板的抗冲击性能, 二者结合使整体抗冲击的性能得到提升。

关键词: 碳纤维金属层板; 低速冲击; 波纹夹芯铝板; 纳米纤维素; 模压成形

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)10-5907-16

Impact characteristics of corrugated sandwich carbon fiber metal laminates

WANG Jian^{*1,2}, DING Zijun^{1,2}, WANG Chongyang^{1,2}, XIONG Lang^{1,2}, WANG Aidong^{1,2}, YAN Xiaoqiang^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The low-velocity impact properties of carbon fiber metal laminates with corrugated sandwich aluminum plates were studied. The deflection, load, energy and surface visual damage of corrugated laminates with different height differences under different impact loads and laminates with microscopic particles added between layers were explored. On the basis of adding corrugated aluminum plate in the core, particle modification was added to the surface of the prepreg strip to further improve the overall impact performance of the laminate. The impact tests of corrugated sandwich carbon fiber metal laminates were carried out with 15 J, 30 J and 50 J impact energy respectively, and the low-speed impact response of the laminates was studied. Under the three kinds of impact energy, the laminates with a height difference of 0.2 mm and the addition of nanocellulose show the best impact resistance, and the surface visual damage and internal damage of the laminates are the lowest. The difference is most obvious when the impact energy is 30 J. The peak contact force of corrugated laminates with nanocellulose reaches 8.2 kN, which is 9.3% higher than that of 7.5 kN with only 0.2 mm corrugated laminates, and also shows better energy absorption characteristics. The results show that the addition of corrugated aluminum plate in the core of the laminate can toughen and support the core of the carbon fiber metal laminate. The addition of nanocellulose can change the direction of crack propagation and improve the impact resistance of the carbon fiber metal laminate to a certain extent. The combination of the two makes the overall impact resistance.

收稿日期: 2024-09-25; 修回日期: 2024-11-14; 录用日期: 2024-11-23; 网络首发时间: 2024-12-04 11:31:44

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241203.002>

基金项目: 山西省科技重大专项计划项目 (202101120401008); 河北省自然科学基金面上基金 (2023203058)

Shanxi Province Science and Technology Major Special Project Plan Project (202101120401008); Hebei Natural Science Foundation General Fund (2023203058)

通信作者: 王健, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为碳纤维复合材料成形成性 E-mail: jwang@ysu.edu.cn

引用格式: 王健, 丁梓峻, 王重阳, 等. 波纹夹芯碳纤维金属层板冲击特性 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(10): 5907-5922.

WANG Jian, DING Zijun, WANG Chongyang, et al. Impact characteristics of corrugated sandwich carbon fiber metal laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(10): 5907-5922(in Chinese).

Keywords: carbon fiber metal laminates; low-velocity impact; corrugated sandwich aluminum plate; cellulose nano fiber; molding forming

纤维金属层板 (Fiber metal laminates, FMLs) 是由薄金属和纤维增强复合材料组成的一种新型复合材料^[1]，与传统复合材料层板相比，具有比强度高、抗疲劳性能好、抗冲击性能优异、耐腐蚀和安全性高等特点^[2-5]，正是由于复合材料具有这些优点，使其在航空航天、船舶建造和汽车轻量化等方面备受青睐^[6]。FMLs 具有优良的抗疲劳特性和较高的比强度和比刚度性能，增强了金属合金组件的承载能力和抗冲击性能^[7-8]。无论是飞机还是汽车所采用的纤维金属层板在服役过程中可能会遭受砂石、弹丸等冲击，或在检修过程中工具的掉落冲击，从而使结构受到不同程度的损伤，影响飞机或汽车的服役状态。随着复合材料产业的不断发展，树脂基纤维金属层板的种类越来越多。一直以来树脂基纤维金属层板都是以热固性树脂为主，但是热固性树脂存在成型时间长、过程难以控制、污染环境和难以回收再利用等缺点^[9-10]。而热塑性树脂基纤维金属层板力学性能能满足工业结构的应用需求，其材料制备过程中更加清洁，几乎没有污染物产生并且成型周期短、生产效率高^[11]，越来越多的学者开始研究与推广热塑性复合材料的应用。

纤维金属层板受到高速冲击时因动能较大，纤维金属层板往往被冲击物穿透，损伤易于观察和分析^[12]。低速冲击时的冲击能量较小，纤维金属层板受到冲击后的表面可视损伤不明显，但在内部已经形成细微裂纹和分层等损伤^[13-16]，极大地降低了纤维金属层板的力学性能。因此研究纤维金属层板的低速冲击损伤是十分有必要的。而不同金属层板对纤维金属层板的冲击性能有较大影响。Nakatani 等^[17] 研究了钛合金层板的 FMLs 的抗冲击性能，但由于钛合金层板的低延展性和高强度的特点，使得钛合金的 FMLs 的抗冲击性能并不优秀。Liu 等^[18] 研究了不同的金属层板对玻璃纤维-铝合金层板 (Glass reinforced aluminum laminates, GLARE) 的抗冲击性能的影响，结果表明基于 2024-T3 铝板的 GLARE 在受到冲击载荷后的变形和分层要比采用更高强度和刚度的 7475-T6 要严重。但是由于 7475-T6 铝板的脆性特点使其吸收的能量要比 2024-T3 小，所以 2024-T3 铝板有更好的抗冲击性能。

纤维金属层板的结构设计同样对层板的抗冲击性能有较大影响。不同的铺层方式将很大程度上影响损伤面积、分层区域和最大载荷等。Yaghoubi 等^[19] 将纤维层设置为单向铺层、角度铺层、交叉铺层以及准各项同性铺层，冲击结果显示准各项同性铺层方式的纤维金属层板的抗冲击性能最好，角度铺层和交叉铺层的抗冲击性能次之，单向铺层的抗冲击性能最差，对于提高层板抗冲击性能的预浸带铺层方式设计提供了基础；Sadighi 等^[20] 研究了 FMLs 中的金属铺层厚度对 FMLs 抗冲击性能的影响，结果表明增加金属铺层厚度可提高 FMLs 抗冲击性能，但导致其质量增加，因此对 FMLs 进行厚度优化设计；Sharma 等^[21] 研究了金属层厚度分布对纤维金属层压板低速冲击响应的影响，结果表明，在 20J 冲击能量下 4/3 FMLs 的损伤程度最高，2/1 FMLs 的损伤程度最低，在接近穿孔阈值的冲击能量水平下几种 FMLs 的损伤程度差异不大；付珊珊等^[22] 研究了功能梯度蜂窝夹层板的抗低速冲击性能。实验结果表明，在 20J、50J 和 100J，同等质量的功能梯度夹层板比传统夹层板吸能分别提升 7.54%、5.33% 和 8.65%；万云等^[23] 研究了插入不锈钢丝网和铝合金丝网对复合材料层板抗冲击性能的影响。研究结果表明，层板延性显著提高使得混合结构可以吸收更多的冲击能量。在 FMLs 的层间结构设计中，添加金属层可以提升层板的整体抗冲击性能。

而对纤维金属层板的基体进行改性处理也会影响层板的抗冲击性能。赵昌葆等^[24] 将不同质量分数的石墨烯纳米片利用超声分散技术分散于环氧树脂中。王森等^[25] 使用单层纳米氧化石墨烯、纳米二氧化硅和陶瓷粉对环氧树脂进行改性处理，通过落锤冲击试验来研究不同粒子改性基体的抗冲击性能，粒子改性可以显著提升碳纤维增强复合材料 (CFRP) 层板的抗冲击性能，纳米粒子比微米粒子的提升效果更加明显。对预浸带表面喷涂微观粒子可以有效地提升层板的抗冲击性能，且与添加的粒子尺寸及分散性相关。

上述研究内容均通过结构设计来提升层板的抗冲击性能，但并未涉及小尺寸波纹结构设计及在层间添加微观粒子二者结合的作用下冲击性能的提升。本文采用不同波纹高度差的夹芯铝板并

在层间填充粒子来制备波纹夹芯热塑性碳纤维金属层板。并采用落锤冲击试验机对层板进行低速冲击试验，根据表面可视损伤、载荷曲线、凹坑深度和吸收能量等数据综合分析层板的抗冲击性能。本实验旨在通过宏微观叠层结构设计一种抗冲击性能优异的碳纤维金属层板。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

所用预浸带为聚酰胺 6 单向热塑性碳纤维预浸带，由 T300 碳纤维与聚酰胺 6 组成；使用的铝板类型为 6061；选用的铝板厚度为 0.5 mm 和 0.6 mm，纳米纤维素为 2.5% 浓度的针叶木凝胶。

1.2 波纹设计及波纹板制备

以 0.3 mm 高度差为例，考虑到铝板在模压后会有回弹，所以模具高度差要稍大于设计尺寸，故波纹为半径为 2 mm，圆心角为 54° 的圆弧相切而成，模具设计高度差为 0.44 mm，波纹样条见图 1。其余高度差所选圆心角如表 1 所示。

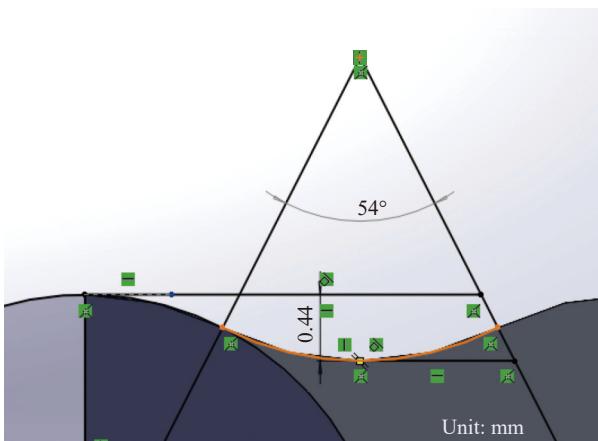


图 1 高度差 0.3 mm 的波纹样条示意图

Fig. 1 Corrugated spline diagram with height difference of 0.3 mm

表 1 波纹高度差与圆心角关系

Table 1 Relationship between ripple height difference and central angle

Corrugated height difference/mm	Central angle/(°)
0.1	40
0.2	46
0.3	54

波纹板制备：将双面打磨 0.5 mm 的铝板放于波纹模具中再将模具整体放于深圳三思检测技术有限公司的 WAW-600 微机控制电液伺服万能试验机，在 450 kN 的压力下保压 10 min，保压完成后取出铝板，具体制备如图 2 所示。



图 2 波纹铝板制备示意图

Fig. 2 Preparation diagram of corrugated aluminum plate

1.3 预浸带表面改性处理

纳米纤维素悬浊液制备：将适量的纳米纤维素凝胶倒入含有蒸馏水的烧杯中，之后放置于超声波清洗仪不断振荡并且不断用玻璃棒搅拌。将悬浊液均匀喷于预浸带表面，后烘干备用。

碳纤维粉及短切碳纤维悬浊液制备：将碳纤维粉末及短切碳纤维放于盛有无水乙醇的烧杯中，之后放置于超声波清洗仪不断振荡并且不断用玻璃棒搅拌。将分散完全的碳纤维粉末酒精悬浊液倒入方形容器中，将裁剪后的预浸带放置于悬浊液中约 5 s，取出后烘干备用。

1.4 层板制备

将预浸带裁剪为 100 mm×100 mm，将已改性与未改性的预浸带分别按顺序铺层，与经过打磨、酸碱洗和阳极氧化后的铝板贴合，铺层顺序为 [Al_{0.6}/90/0/90/0/0/Al^b_{0.5}/0/0/90/0/90/Al_{0.6}]，下标为铝板厚度，上标 b 为波纹铝板，整个层板厚度为 3 mm，层板的结构示意图见图 3。将铺设好的层板放于模压模具中，将模具放于加热炉中，图 4 为模压过程中的压力-温度折线图。

1.5 拉剪试验

在电子万能试验机 Inspekt table 100 上对不同界面处理的添加微观粒子的碳纤维金属复合层板进行拉剪试验，如图 5 所示。试样根据《胶粘剂拉伸剪切强度的测定》(GB/T 7124—2008)^[26] 制备。

1.6 落锤冲击试验

在 Instron 9400 落锤实验机上进行落锤冲击实验，冲击落锤的质量为 11.2 kg，冲头是直径为 20 mm 的半球形。该试验仪器可满足多种冲击条

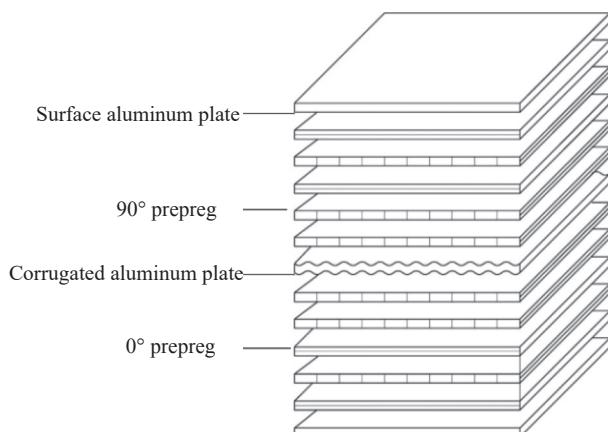


图 3 波纹夹芯碳纤维金属层板示意图

Fig. 3 Schematic diagram of corrugated sandwich carbon fiber metal laminates

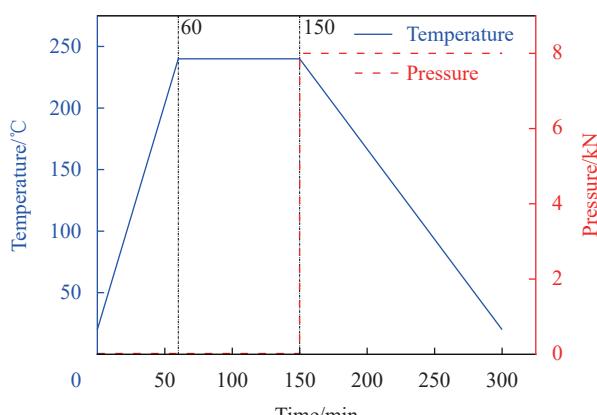


图 4 模压制备的温度-压力变化曲线

Fig. 4 Temperature-pressure curve of molding preparation



图 5 3 种微粒不同质量分数改性处理的拉剪试验

Fig. 5 Tensile shear test of three kinds of particles modified with different mass fractions

件而且可防止冲击试验过程中产生二次冲击。冲击实验前把冲击试样放在下方夹具上，如图 6 所

示，通过软件调节落锤高度来控制冲击能量。冲击结束后落锤反弹，设备气动装置控制落锤防止产生二次冲击影响冲击实验。最后通过电脑获取冲击过程中的接触力、冲击能量、位移和速度随时间的变化曲线。

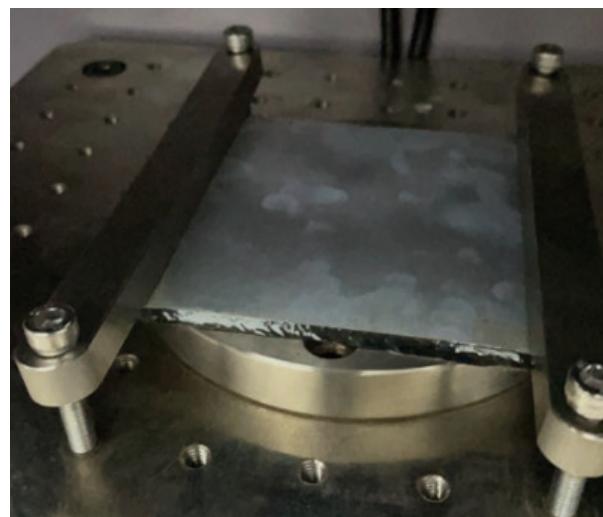


图 6 低速冲击试验工装图

Fig. 6 Low-velocity test tooling diagram

2 结果与讨论

2.1 不同质量分数的微粒对层板拉剪强度的影响

图 7 为添加不同质量分数的短切碳纤维 (Chopped carbon fibers, CCF)、碳纤维粉 (Carbon fibers powder, CFP) 和纳米纤维素 (Cellulose nano fiber, CNF) 的拉剪强度。可以看出，随着 3 种微粒质量分数的增加拉剪强度均呈现先上升后下降的趋势。在添加 CCF 的层板中，随着添加 CCF 质

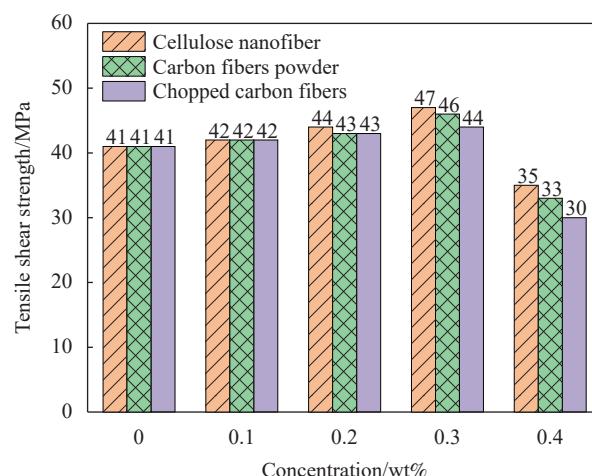


图 7 3 种微粒不同质量分数改性处理的拉剪强度

Fig. 7 Tensile shear strength of three kinds of particles with different mass fraction modification treatments

量分数的增加, 碳纤维金属层板的拉剪强度呈现上升的趋势, 达到了最大值 44 MPa, 这是由于 CCF 的加入提高了树脂基体的强度。但是当添加短切碳纤维质量分数增加到 0.4wt% 时, 其层板拉剪强度骤降至 30 MPa。这主要是由于添加的 CCF 过量, 使 CCF 在界面处发生团聚, 降低了树脂基体的强度。对于添加 CFP 的层板的拉剪强度也呈现相似的趋势, 但添加碳纤维粉的拉剪强度在浓度为 0.3wt% 和 0.4wt% 时略高于添加 CCF 的拉剪强度, 其最大值为浓度为 0.3wt% 时的 46 MPa。添加 CNF 的拉剪强度改善效果最为明显, 而其拉剪强度也表现出了先上升后下降的趋势。当添加纳米纤维素浓度为 0.3wt% 时拉剪强度达到最大值 47 MPa, 当增加 CNF 浓度达到 0.4wt% 时拉剪强度骤降至 35 MPa。之所以 CNF 的改善效果最好, 主要与其尺寸和数量有关, CCF 的直径为 7 μm , 长度为 1 mm, 而 CNF 的直径仅为 20~50 nm, 长度约为 1~5 μm , 单位面积上纳米纤维素的数量是短切碳纤维的几十倍甚至上百倍, 从而 CNF 改善树脂基体的效果更好。从图中可以看出, 当微粒

的浓度为 0.3wt% 时, 其拉剪强度最高, 预浸带与铝板的结合强度最高, 所以后续实验中添加 3 种微粒的浓度均为 0.3wt%。

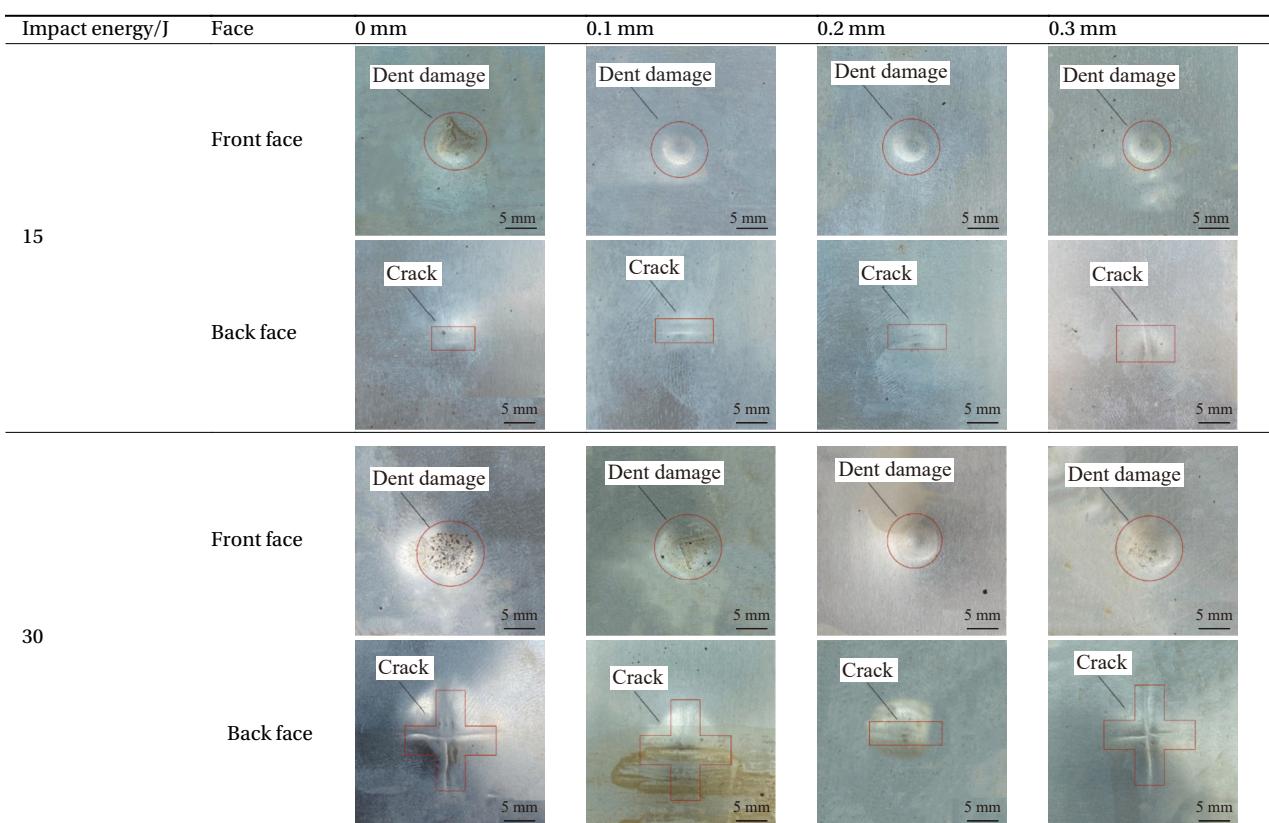
2.2 波纹层板冲击

2.2.1 波纹层板冲击损伤

表 2 和表 3 分别为不同高度差的波纹夹芯碳纤维金属层板在不同冲击能量下的正背面局部损伤视图和不同高度差的波纹夹芯碳纤维金属层板在不同冲击能量下的内部损伤视图。这些图片可以清晰、直观地反映出受到冲击后碳纤维金属层板的损伤情况。当低速冲击能量为 15 J 时, 从表 2 可以看出在冲击点正面产生了一个圆形永久性凹坑损伤, 凹坑直径大约为 3 mm, 在冲击点背面出现鼓包和小段裂痕。在 15 J 冲击能量下层板背面没有出现明显开裂现象。从表 3 可以看出, 当冲击能量为 15 J 时, 各层板的损伤主要发生在下侧的复合材料层。3 种波纹板层板的损伤程度相近, 均出现基体损伤和界面分层损伤, 中间层厚度 0 mm 层板的损伤最为严重, 不仅发生了基体损伤和界面分层损伤还发生了纤维断裂损伤, 层板

表 2 不同高度差的波纹夹芯碳纤维金属层板在不同冲击能量下的正背面局部损伤视图

Table 2 Front and back local damage views of corrugated sandwich carbon fiber metal laminates with different height differences under different impact energies



续表 2

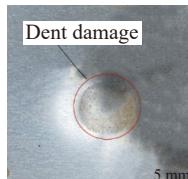
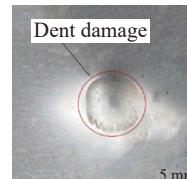
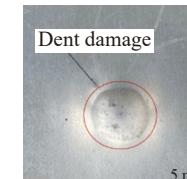
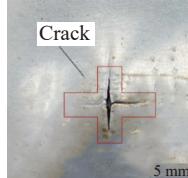
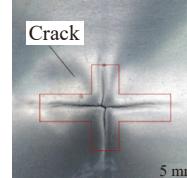
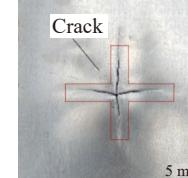
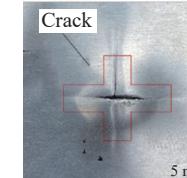
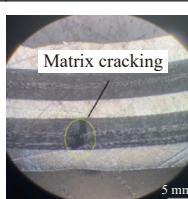
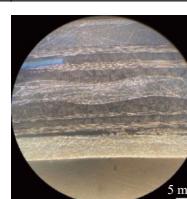
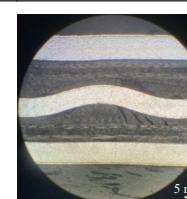
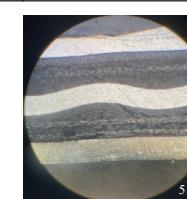
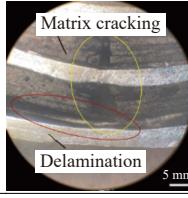
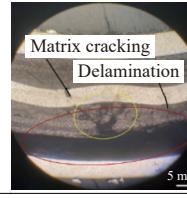
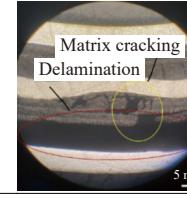
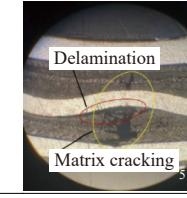
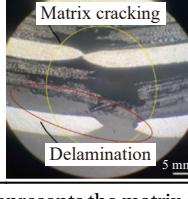
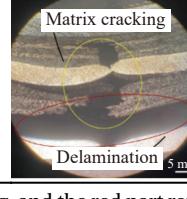
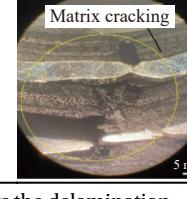
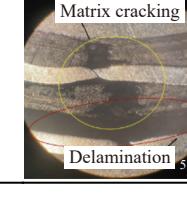
Impact energy/J	Face	0 mm	0.1 mm	0.2 mm	0.3 mm
50	Front face				
		Dent damage	Dent damage	Dent damage	Dent damage
		5 mm	5 mm	5 mm	5 mm
					
	Back face	Crack	Crack	Crack	Crack
		5 mm	5 mm	5 mm	5 mm
		5 mm	5 mm	5 mm	5 mm

表 3 不同高度差的波纹夹芯碳纤维金属层板在不同冲击能量下的内部损伤视图

Table 3 Internal damage view of corrugated sandwich carbon fiber metal laminates with different height difference under different impact energies

Impact energy/J	0 mm	0.1 mm	0.2 mm	0.3 mm
15				
		Matrix cracking		
		5 mm	5 mm	5 mm
				
		Matrix cracking	Matrix cracking	Matrix cracking
		Delamination	Delamination	Delamination
				
		Matrix cracking	Matrix cracking	Matrix cracking
		Delamination	Delamination	Delamination

Note: The yellow part represents the matrix cracking, and the red part represents the delamination.

中的纤维出现断裂损伤会极大削弱层板性能。当低速冲击能量为 30 J 时, 从表 2 可以看出, 在冲击点正面的永久凹坑损伤加重, 凹坑直径约为 6 mm, 层板冲击点正面均没有明显裂纹损伤。损伤全部发生在冲击点背面, 这主要是由于受到冲击载荷时层板背部承受拉应力和弯曲应力。从表 2 中还可看出, 0 mm 的层板的鼓包最大, 直径达到 14 mm, “十”字形裂痕长度最长, 0.3 mm 层板的鼓包和裂痕长度次之。0.2 mm 层板的鼓包最小, 直径约为 7 mm, 产生一道轻微裂痕。从表 3 可以看出, 4 种层板中内部复合材料层均发生了

严重的破坏。在 0 mm 层板内部损伤最为严重, 两层复合材料层均完全断裂, 以及背面铝板和下侧复合材料层发生大面积分层损伤。0.3 mm 层板内部损伤也比较严重, 下侧复合材料层完全断裂和分层损伤, 上侧复合材料层发生基体断裂损伤和少量纤维断裂损伤, 而且背面铝板受拉伸载荷的影响发生局部拉伸变薄。0.1 mm 和 0.2 mm 层板的损伤主要发生在下侧复合材料层, 下侧复合材料层完全断裂发生大面积基体断裂损伤、纤维断裂损伤和分层损伤, 0.2 mm 层板上侧复合材料层发生少量基体损伤。

当低速冲击能量为 50 J 时, 从表 2 和表 3 可以看出 4 种层板均发生了严重破坏。从表 2 发现, 低速冲击在冲击点正面产生的永久凹坑进一步加重但并没有产生明显裂痕。冲击点背面产生的鼓包直径可达 15~18 mm 且均产生“十”字形裂纹。从表 3 中可以看出, 层板内部损伤十分严重, 两层复合材料层全部出现断裂, 下侧铝板均出现裂纹, 中间层铝板也接近断裂。

加入波纹板可以提高层板的抗冲击性能, 冲击能量为 15 J 时, 较低的冲击能量对层板的破坏有限, 加入波纹板对提高层板的抗冲击性能不明显。当冲击能量提高到 30 J 时, 0.1 mm 和 0.2 mm 层板的损伤程度明显要低, 波纹板中拱形结构的变形阻力更高, 提高了冲头与层板的接触力, 加速了冲头的能量耗散, 0.3 mm 层板的改善效果较差, 主要由于在单位宽度上波纹结构的数量要少于另外两种。冲击能量提高至 50 J, 层板受到较高的冲击能量时, 由于层板中的拱形结构较小, 吸收的能量有限, 波纹板改善层板抗冲击性能的作用较小。

2.2.2 接触力-时间曲线分析

图 8 为不同波纹夹芯碳纤维金属层板在 15 J、30 J 和 50 J 冲击能量下的接触力-时间曲线。在曲线的上升阶段和极值阶段, 曲线是在不断震荡中上升的。这主要是由于冲头与层板接触时, 层板表面受到较高的冲击能量, 导致纤维产生压缩应力瞬时超过纤维强度, 致使层板正面冲击区域出现少量纤维断裂, 断裂的纤维使层板的承载能力下降, 进而导致接触力下降。但是随着冲击的继续进行, 冲击载荷传递到整个层板, 所以接触力继续快速增加, 当出现新的损伤时, 接触力又有一定下降, 随着冲击的进行接触力继续增加, 直到达最大接触力附近。从图中还可以看出, 当冲击能量不断增大时, 峰值接触力也在不断增大。当冲击能量为 15 J 时, 0.2 mm 和 0.3 mm 两种层板的峰值接触力达到 4 kN 要明显高于另外两种层板的峰值接触力, 高出大约 500 N 左右。当冲击能量为 30 J 时, 4 种层板的峰值接触力出现明显分层现象, 从上往下依次为 0.2 mm、0.3 mm、0.1 mm 和 0 mm 层板。当冲击能量达到 50 J 时, 4 种层板的接触力-时间曲线几乎一致没有明显区别。0.2 mm 和 0.3 mm 两种层板的峰值接触力要高于 0 mm 和 0.1 mm 两种层板, 在 15 J 以及 30 J

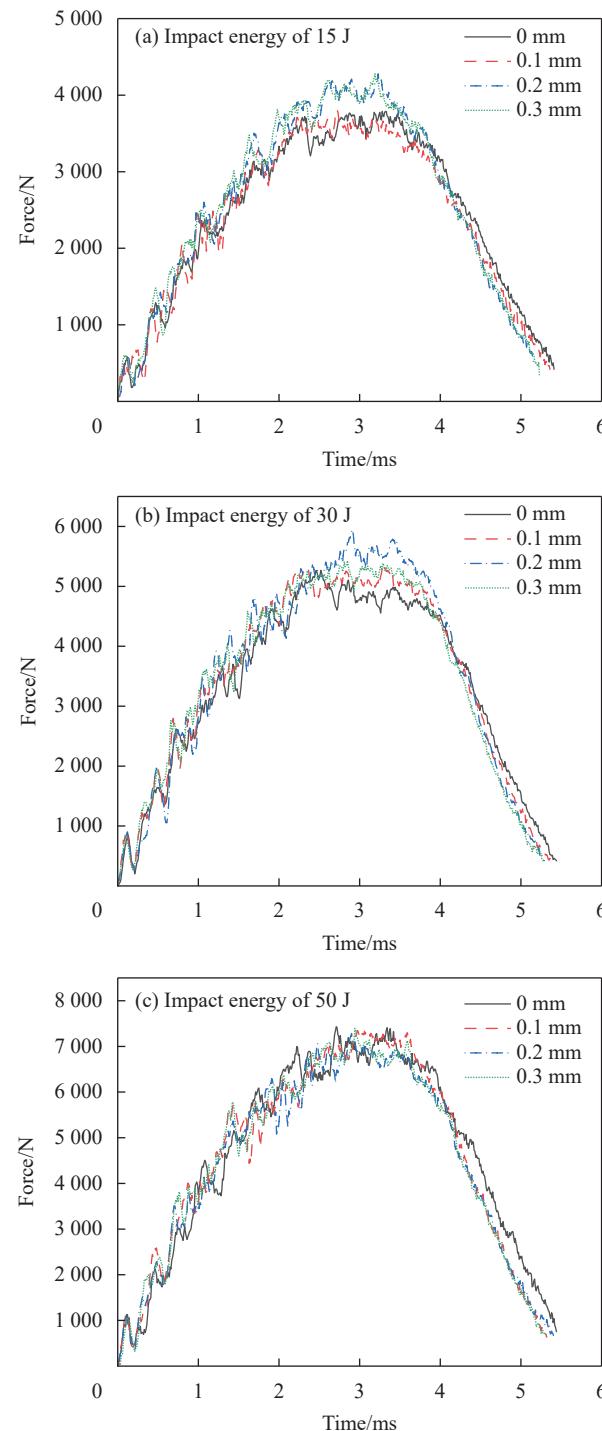


图 8 不同波纹夹芯碳纤维金属层板在 15 J、30 J 和 50 J 冲击能量下的接触力-时间曲线

Fig. 8 Contact force-time curves of different corrugated sandwich carbon fiber metal laminates under 15 J, 30 J and 50 J impact energies

冲击能量下, 0.2 mm 层板的峰值接触力较大。因为 0.1 mm 层板中的波纹结构较小, 变形阻力较低, 对峰值接触力的提升较小。0.2 mm 层板的波纹结构明显, 变形阻力较大, 提高了层板的峰值接触力。当冲击能量达到 50 J 时, 冲击能量较高, 波

纹结构对提高层板的抗冲击性能有限，导致4种层板的接触力-时间曲线几乎一致。

2.2.3 层板冲击凹坑深度

郑晓霞等^[27]认为层板受冲击后的凹坑深度相较于损伤面积可以更好地反映层板的抗冲击性能，冲击后的凹坑深度可以反映层板抵抗变形的能力，所以采用凹坑深度来分析层板的抗冲击性能更为合适。图9为3种冲击能量下的不同波纹夹芯层板冲击后的凹坑深度对比柱状图。当冲击能量为15 J时0.2 mm层板的凹坑深度最小为5.9 mm，0 mm层板的凹坑深度最大为6.7 mm，0.2 mm波纹板的加入使层板的凹坑深度降低了大约11.9%。当冲击能量为30 J和50 J时，最小凹坑深度均为0.2 mm层板，最大凹坑深度为0 mm层板，0.2 mm波纹板的加入使凹坑深度分别下降12.5%和5.1%。可以看出在15 J和30 J冲击能量下0.2 mm波纹板的加入可以很大程度地降低冲击后层板凹坑深度，当冲击能量增加至50 J，0.2 mm波纹板的加入对冲击后层板的凹坑深度的改善效果有所下降。在3种冲击能量下0.2 mm层板的凹坑深度最小，表示该层板的抗冲击性能比其余3种层板的性能好。碳纤维金属层板中铝板的塑性变形是抑制层板变形的主要形式，碳纤维属于脆性材料，抑制层板变形的能量较差。通过改变碳纤维金属层板芯部铝板的结构可以提高整个层板的韧性和支撑效果，进而使得整个层板抵抗变形的能力得到增强。

2.2.4 能量-时间曲线分析

图10为4种层板在15 J、30 J和50 J冲击能量

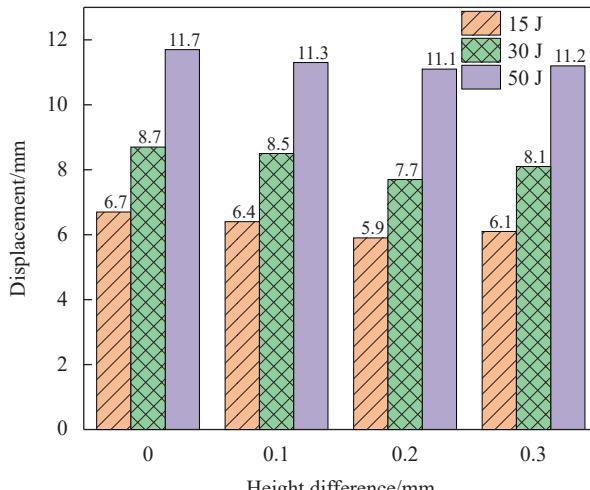


图9 3种冲击能量下不同波纹夹芯层板受冲击载荷后的凹坑深度

Fig. 9 Pit depth of different corrugated sandwich laminates after impact load under three kinds of impact energies

下层板吸能曲线。当冲击能量为15 J时，各层板吸能曲线有较为明显的差距，0 mm和0.1 mm层板的吸能曲线几乎一致，在4 ms以前0.3 mm层板和0.2 mm层板的吸能曲线较为接近，但在4 ms之后0.3 mm层板吸能曲线明显放缓。0.2 mm层板吸收的能量最多。当冲击能量为30 J时，0.2 mm和0.3 mm层板的吸能曲线一致而且吸能

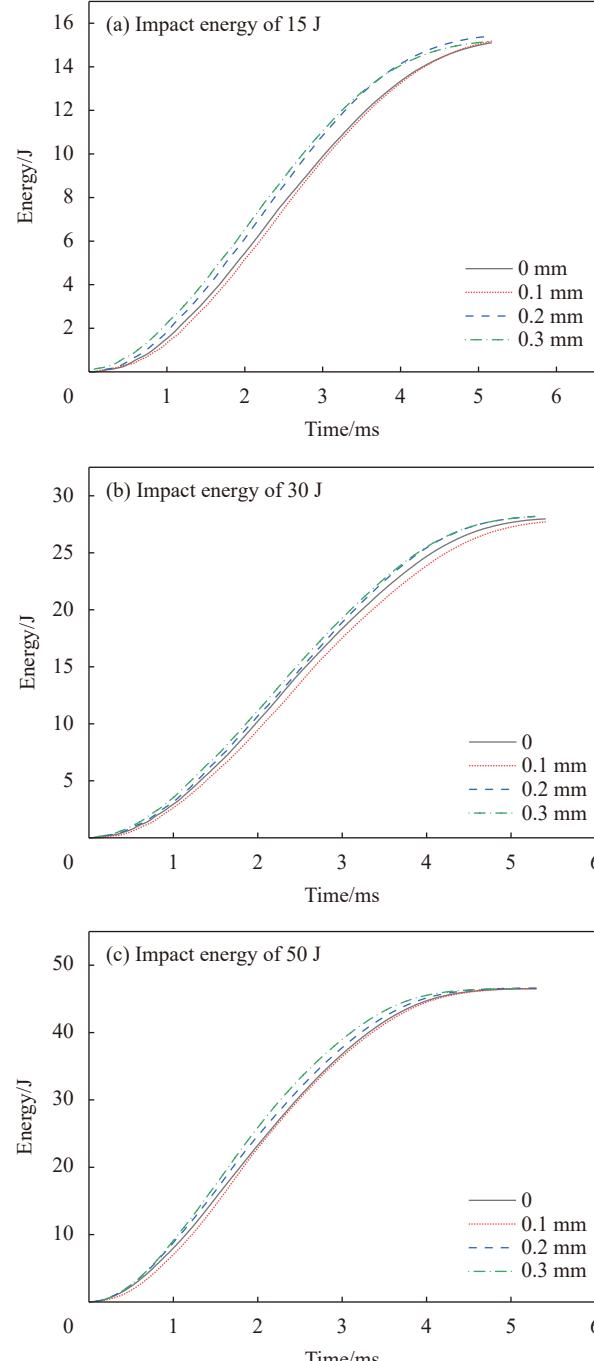


图10 3种冲击能量下不同层板的吸能曲线

Fig. 10 Energy absorption curves of different laminates under three kinds of impact energies

最多。当冲击能量为 50 J 时, 4 种层板的吸能曲线在冲击过程中有一定差异, 但是最终层板吸收的冲击能量几乎一致。在 15 J 和 30 J 冲击能量下, 0.2 mm 层板吸能效果较好, 由于芯部波纹板的加入, 当层板受到冲击载荷时芯部波纹板通过波纹结构的变形吸收部分冲击能量。在 50 J 冲击能量下, 由于冲击能量较高, 单层波纹结构对层板吸收能量的贡献有限, 即使改变波纹结构也没有比较优势, 可考虑增加层数及厚度抵抗更高能量的

冲击。

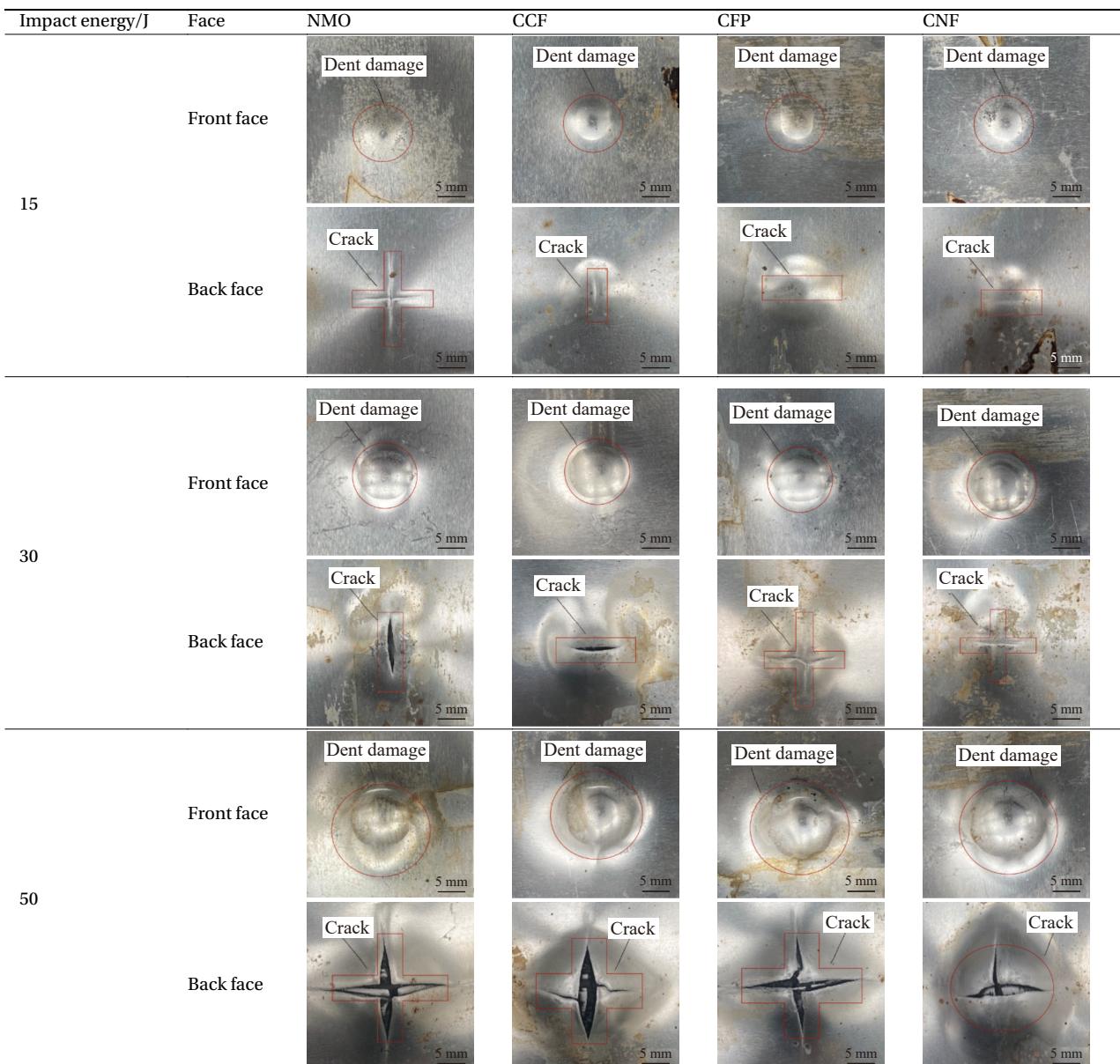
2.3 添加微观粒子层板冲击

2.3.1 微观粒子层板冲击损伤

表 4 为短切碳纤维 (CCF)、碳纤维粉末 (CFP) 和纳米纤维素 (CNF) 改性处理的碳纤维金属层板和无处理 (NMO) 碳纤维金属层板在不同冲击能量下的正背面局部损伤视图。当冲击能量为 15 J 时, 在冲击点正面 4 种层板均产生一个圆形凹坑。CFP、CCF 和 CNF 3 种层板在冲击点背面出现鼓

表 4 短切碳纤维 (CCF)、碳纤维粉末 (CFP) 和纳米纤维素 (CNF) 改性处理的碳纤维金属层板和无处理 (NMO) 碳纤维金属层板在不同冲击能量下的正背面局部损伤视图

Table 4 Front and back local damage views of chopped carbon fiber (CCF), carbon fiber powder (CFP) and nanocellulose (CNF) modified carbon fiber metal laminates and untreated (NMO) carbon fiber metal laminates under different impact energies



包和小段裂痕，而在 NMO 层板背面出现大段“十”字形裂痕。当冲击能量为 30 J 时，4 种层板在冲击点正面产生的圆形凹坑面积扩大，没有明显裂纹损伤。而在冲击点背面 NMO 和 CCF 层板出现“一”字形裂纹，CCF 和 CNF 层板仅出现裂痕没有出现裂纹。当冲击能量为 50 J 时，4 种层板的冲击点正面的凹坑进一步扩大，而且 NMO、CCF 和 CFP 在冲击点正面产生裂纹。当提高层板的抗冲击性能时，层板冲击后的损伤程度会得到改善。以 30 J 冲击能量后层板的破坏情况为例，添加 CFP 后层板冲击点背面的裂纹有所减小，添加 CCF 和 CNF 后层板冲击点背面没有出现裂纹仅出现裂痕，而 CNF 层板的裂痕要比 CCF 层板要小。通过对预浸带表面进行改性处理，可以提高层板的抗冲击性能，添加 CNF 的效果最佳。

2.3.2 接触力-时间曲线分析

图 11 为 CCF、CFP 和 CNF 改性处理的碳纤维金属层板和 NMO 碳纤维金属层板在 15 J、30 J 和 50 J 冲击能量下的接触力-时间曲线。当冲击能量为 15 J 时，在 0~2 ms 时间段内 4 条接触力-时间曲线几乎重合，之后表现出一定的差异性。CCF 层板在 2.3 ms 接触力出现巨大波动，层板在此时发生较为严重的损伤，可能是 CCF 发生团聚，使得基体力学性能降低。CNF 和 CFP 层板的接触力较为接近，CNF 层板的接触力略高。在冲击持续时间方面，CNF 层板的冲击时间最短，其余 3 种持续时间比较接近。当冲击能量为 30 J 时，4 条曲线的差异性比较明显，CCF 曲线在 1.5 ms 时有一次较为明显的震荡以及接触力达到最大值接触力有一次明显下降，CFP 曲线在 2 ms 时接触力有一次明显下降，接触力的明显降低主要与层板的损伤有关。NMO 层板的接触力较其余 3 种较低且冲击持续时间最长。CNF 层板的接触力在整个冲击过程中没有出现明显突降。当冲击能量为 50 J 时，4 种层板的接触力曲线之间的差距较小，但 CNF 层板的接触力略高于其余 3 种。从图 11 中曲线可以看出，预浸带表面处理后会影响层板的抗冲击性能。在 15 J、30 J 和 50 J 冲击能量下，4 种层板中峰值接触力排序大概如下：CNF 层板的峰值接触力最大，其次为 CCF 和 CFP，峰值接触力最小的为 NMO 层板。

在预浸带表面分别添加 CCF、CFP 和 CNF 可以提高层板的界面性能。当层板受到冲击载荷时，较高的界面强度可以使层板分层变得更加困难，

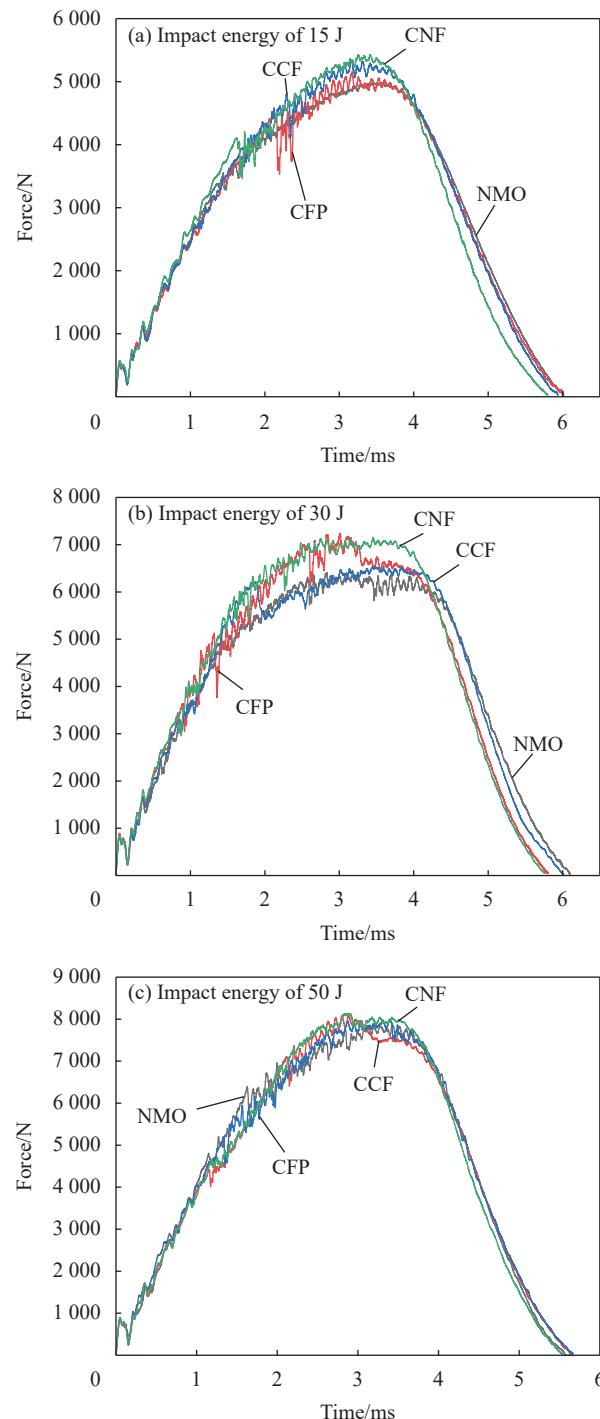


图 11 不同冲击能量下不同微粒改性层板的冲头与层板接触力-时间曲线

Fig. 11 Contact force-time curves of punch and laminate of different particle modified laminates under different impact energies

提高层板的抗冲击性能。当界面处的树脂开裂时，CCF 和 CNF 可以延缓裂纹扩展，降低冲头对层板的破坏，因为 CNF 尺寸小、质量轻，单位体积的树脂中含有的 CNF 的数目要多，所以添加 CNF 的层板的抗冲击性能更好。CCF 可以改变裂纹扩展方向，缓解冲头所带来的破坏，从而提升层板的

承载能力。

2.3.3 层板冲击凹坑深度

图 12 为 CCF、CFP 和 CNF 改性处理层板和 NMO 层板在 15 J、30 J 和 50 J 冲击能量下的凹坑深度对比柱状图。当冲击能量为 15 J 时, CNF 层板位移最小为 5.2 mm, NMO 位移最大为 5.4 mm, 降低了约 3.7%。当冲击能量为 30 J 时, CNF 层板位移最小为 7.0 mm, NMO 层板位移最大为 7.6 mm, 降低了约 7.9%。当冲击能量为 50 J 时, 4 种层板之间的差异不再明显, 4 种层板的位移均为 10.4 mm。

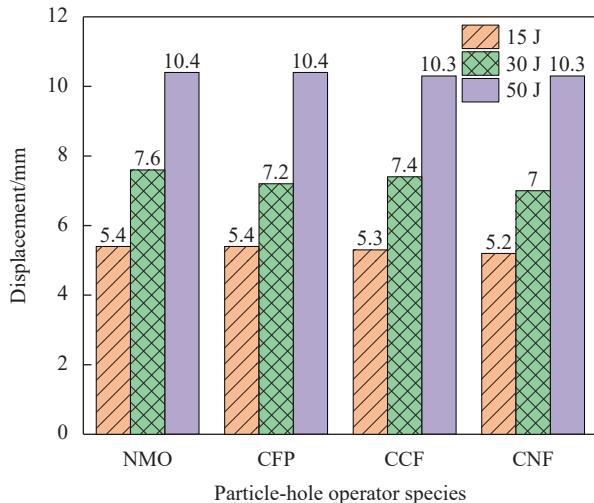


图 12 3 种冲击能量下不同微粒改性层板的受冲击载荷后的凹坑深度

Fig. 12 Pit depth of different particle modified laminates under three kinds of impact energy after impact load

当冲击能量为 15 J 和 30 J 时。从上面的分析以及图 12 可以看出 CNF 层板的冲头位移最小, 也就表示该层板的抗冲击性能要好于其余 3 种层板的抗冲击性能。CCF 和 CFP 层板的冲头位移次之, NMO 层板的冲头位移最大, 即未改性层板的抗冲击性能最差。对预浸带表面喷涂 CNF 可以较大幅度地改善碳纤维金属层板的抗冲击性能, 而对预浸带表面添加 CCF 和 CFP 对碳纤维金属层板的抗冲击性能的影响较小。在预浸带表面添加微粒可以一定程度提高整个层板的抗冲击性能。CCF 和 CNF 在一定程度上可以延缓层间裂纹扩展, 提高层板的抗分层能力, 从而导致层板的凹坑变小。CFP 可以改变裂纹扩展方向, 缓解冲头所带来的破坏, 从而提升层板的承载能力。当冲击能量为 50 J 时, 冲击能量较高, 对层板的破坏较大, 而通过添加微粒所提高的层板抗冲击性能就无法体现出来, 导致 4 条曲线重合。

2.3.4 能量-时间曲线分析

图 13 为 CCF、CFP 和 CNF 改性处理层板和 NMO 层板在 15 J、30 J 和 50 J 冲击能量下的吸收能量-时间曲线。冲击能量与时间的关系如图 13(a)

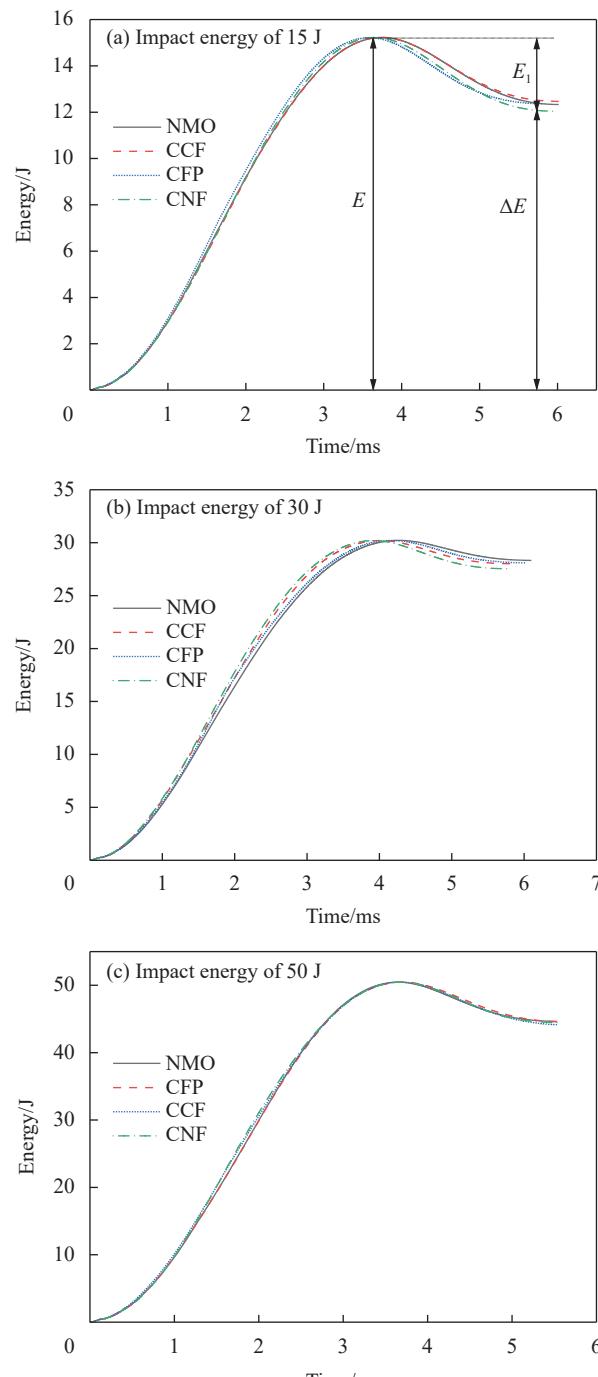


图 13 不同冲击能量不同微粒改性层板的吸收能量-时间曲线

Fig. 13 Absorption energy-time curves of different particle modified laminates with different impact energies

中以 CNF 层板冲击能量-时间曲线为例所示。 E 为冲头所携带的动能全部被层板吸收，此时冲头速度为零。在冲击结束时可以估算弹性吸能(冲击过程中未被层板吸收的能量 E_1)和被吸收的能量(冲击过程中被层板吸收和耗散的能量 ΔE)。

当冲击能量为 15 J 时，吸收能量-时间曲线如图 13(a) 所示，4 种层板对冲头动能的吸收速率大致相同，在 3.6 ms 层板吸收能量达到最大值。在反弹阶段，CFP 和 CNF 两种层板的能量反弹速率更快。冲击结束后，NMO、CFP 和 CCF 3 种层板反弹的能量为 2.5 J，CNF 层板反弹的能量为 3 J。当冲击能量为 30 J 时，吸收能量-时间曲线如图 13(b) 所示，CNF 和 CFP 层板对冲头动能的吸收速率要高于另外两种层板，这主要是 CNF 和 CCF 抗冲击刚度要大于另两种层板。在冲击结束后，NMO 层板反弹的能量最低约 1.7 J，CNF 层板反弹的能量最高约 2.5 J。当冲击能量为 50 J 时，4 种层板的吸收能量-时间曲线大致相同。

添加 CFP 和 CNF 后，当层板受到冲击时层间界面的 CFP 和 CNF 会以断裂或者从树脂中拔出的形式提高层板界面抵抗开裂的能力以及层板的抗冲击刚度。而当添加 CCF 的层板受到冲击载荷时，CCF 可以通过改变微裂纹的扩展方向来提升层板界面的抗开裂能力。

2.4 添加微观粒子的波纹层板冲击

2.4.1 微观粒子的波纹层板冲击损伤

表 5 为添加 CNF 的波纹层板在不同冲击能量下的正背面局部损伤视图。当冲击能量为 15 J 时，在冲击点正面两种层板均产生一个圆形凹坑。添加 CNF 的波纹层板在冲击点背面出现鼓包，无添加 CNF 的层板出现小段裂痕。当冲击能量为 30 J 时，两种层板在冲击点正面产生的圆形凹坑面积扩大，没有明显裂纹损伤。而在冲击点背面两种层板均出现鼓包，且无添加 CNF 的层板鼓包更加明显。当冲击能量为 50 J 时，两种层板的冲击点正面的凹坑进一步扩大。冲击点背面损伤十分严重，下侧和中间层铝板以及复合材料层全部破裂，添加 CNF 的波纹层板破坏程度较小。

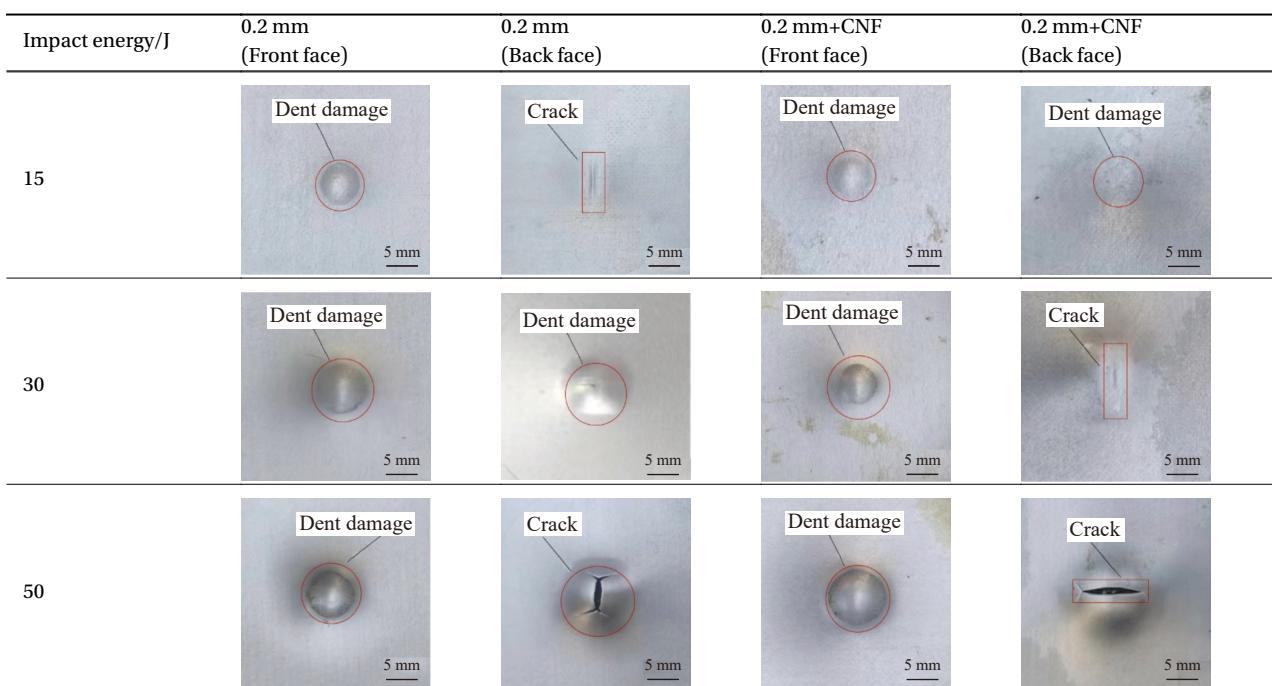
冲击后层板表面损伤情况与层板的抗冲击性能是相关的，当提高层板的抗冲击性能时，层板冲击后的损伤程度会得到改善。3 种冲击能量下，均为添加 CNF 的波纹层板的破坏程度小，说明在芯部添加波纹层板的基础上在预浸带表面添加 CNF 对层板的整体抗冲击性能有明显提升。

2.4.2 接触力-时间曲线分析

图 14 为添加 CNF 的层间波纹碳纤维金属层板在 15 J、30 J 和 50 J 冲击能量下的接触力-时间曲线。当冲击能量为 15 J 时，由于能量较小，层板

表 5 添加微观粒子的波纹层板冲击损伤视图

Table 5 Impact damage view of corrugated laminates with microscopic particles added



的接触力区别不明显，但添加 CNF 的波纹层板略微高于无添加的层板，总体阶段近乎相同，但在 2~4 ms 时无添加 CNF 的层板波动明显。当冲击能量为 30 J 时，曲线趋势近乎一致，添加 CNF 的层间波纹碳纤维金属层板的接触力上升阶段高于波纹层板，而只添加波纹板的层板的接触力下降过

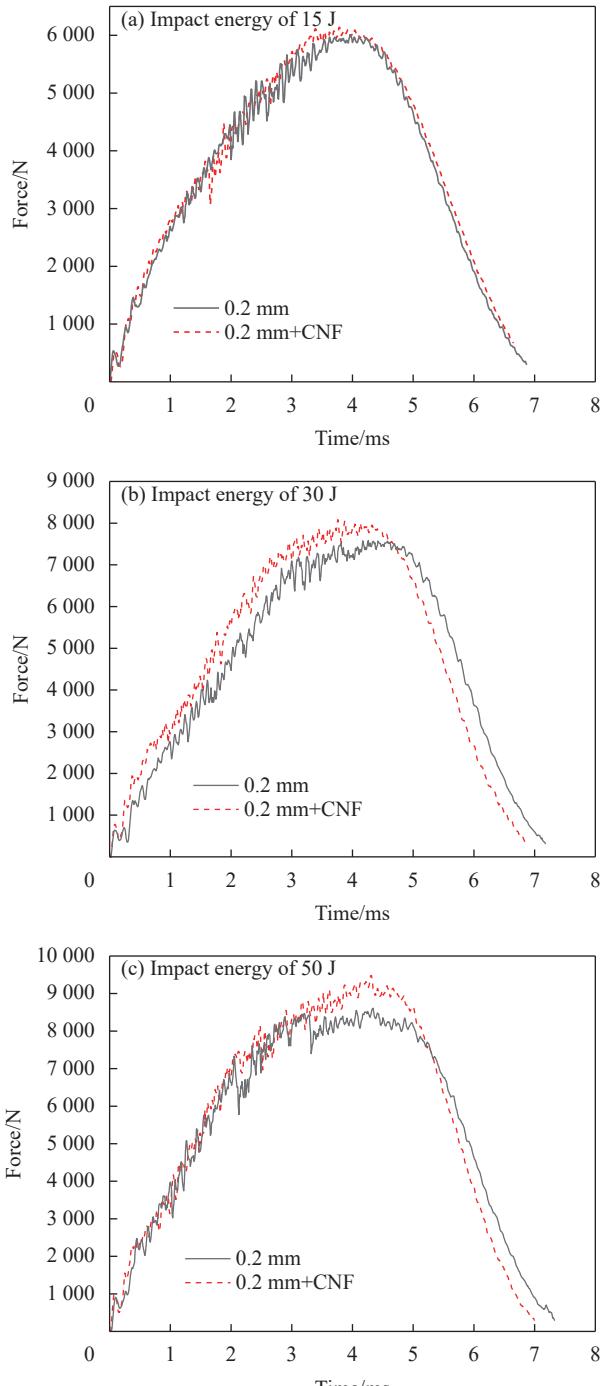


图 14 不同冲击能量波纹层板与微粒改性波纹层板的接触力-时间曲线

Fig. 14 Contact force-time curves of corrugated laminates with different impact energies and particle modified corrugated laminates

程比添加 CNF 的波纹层板的下降过程时间长，层板的吸能更小。能量为 50 J 时，两种层板的接触力上升阶段趋势相近，但添加 CNF 的层间波纹碳纤维金属层板的接触力峰值最高，在即将到达最大接触力时区别更明显且无明显的下降抖动，破坏程度更小。

从图 14 可以看出，预浸带表面处理并添加波纹夹芯板后会影响层板的抗冲击性能。在 15 J、30 J 和 50 J 冲击能量下，添加 CNF 的层间波纹碳纤维金属层板的峰值接触力最大，其中在 30 J 和 50 J 的情况下更为明显。在预浸带表面分别添加 CNF 可以提高层板的界面性能。当层板受到冲击载荷时，较高的界面强度可以使层板分层变得更加困难，提高层板的抗冲击性能。当界面处的树脂开裂时，CNF 可以延缓裂纹扩展，降低冲头对层板的破坏，而波纹铝板，可以对层板的整体起到增韧支撑效果，通过波纹变形来抵抗冲击，提升层板的总体抗冲击性能。

2.4.3 层板冲击凹坑深度

图 15 为 3 种冲击能量下的两种层板冲击后的凹坑深度对比柱状图。当冲击能量为 15 J 时添加 CNF 的波纹层板的凹坑深度最小为 4.7 mm，仅波纹层板的凹坑深度最大为 5.9 mm，CNF 的加入使层板的凹坑深度降低了大约 20%。当冲击能量为 30 J 和 50 J 时，CNF 与 0.2 mm 波纹板的组合加入使凹坑深度分别下降 23% 和 15%。可以看出在 15 J 和 30 J 冲击能量下 CNF 的加入降低冲击后层板凹坑深度，当冲击能量增加至 50 J，CNF 的加

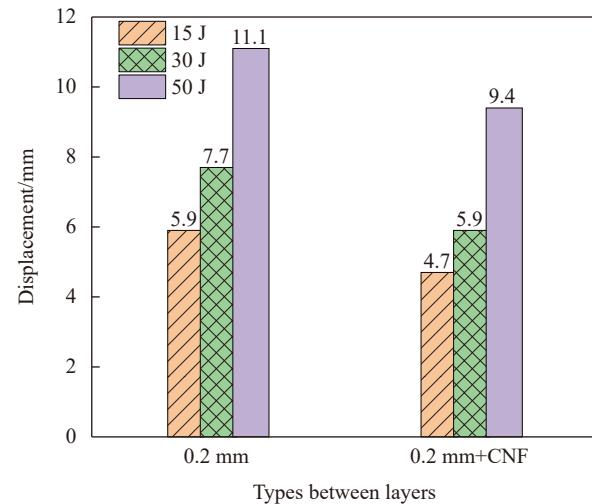


图 15 不同冲击能量下波纹层板与微粒改性波纹层板的凹坑高度

Fig. 15 Pit height of corrugated laminates and particle modified corrugated laminates under different impact energies

入对冲击后层板的凹坑深度的改善效果有所下降。在3种冲击能量下CNF与波纹板的组合的凹坑深度最小，表示该层板的抗冲击性能比其余3种层板的性能好。碳纤维金属层板中铝板的塑性变形是抑制层板变形的主要形式，碳纤维属于脆性材料，抑制层板变形的能量较差。通过改变碳纤维金属层板芯部铝板的结构可以提高整个层板的韧性和支撑效果，当界面处的树脂开裂时，CNF可以延缓裂纹扩展，降低冲头对层板的破坏，进而使得整个层板抵抗变形的能力得到增强。

2.4.4 能量-时间曲线分析

图16为两种层板在15 J、30 J和50 J冲击能量下层板吸能曲线，3种冲击能量下两种层板的吸能曲线趋势几乎一致均为添加CNF的波纹层板高于无添加CNF的波纹层板。当冲击能量为15 J时，添加CNF的波纹层板的整体趋势略高于无添加的波纹层板，但在上升过程中二者曲线斜率近乎平行，添加CNF的波纹层板的更先到冲击能量的最大值。当冲击能量为30 J时，3 ms前两者的能量上升曲线重合，3 ms后添加CNF的波纹层板的能量上升速度高于无添加的波纹层板，最终吸收的能量高于无添加的波纹层板。当冲击能量为50 J时，添加CNF的波纹层板的上升速度高于无添加的波纹层板，最终吸收的能量高于无添加的波纹层板。在3种冲击能量下，添加CNF的波纹层板吸能效果较好，且在30 J条件下效果更明显，15 J由于能量较小，都能达到15 J的能量，仅到达速度有所区别，50 J由于能量较大，层板均被破坏，但添加CNF的波纹层板最终上升能量也高于无添加的波纹层板。

2.4.5 波纹结构与基体改性对冲击性能的提升分析

通过芯部波纹铝板的加入及预浸带表面添加CNF两者结合的方式，显著的提升了层板的抗冲击性能。当层板受到冲击载荷时芯部波纹铝板通过波纹结构的变形吸收部分冲击能量，在表3中的内部损伤视图中有着明显表现，但是当冲击能量过大导致波纹结构破坏时，层板的破坏更加严重。而CNF在喷涂预浸带表面烘干后，会在预浸带表面形成密集的水凝膜，在制备后，预浸带间存在水凝膜，并与预浸带紧密结合，通过改变裂纹扩展的方式提高层板的冲击性能，两者提升层板冲击图性能的机制不同，但是，二者相辅相成，

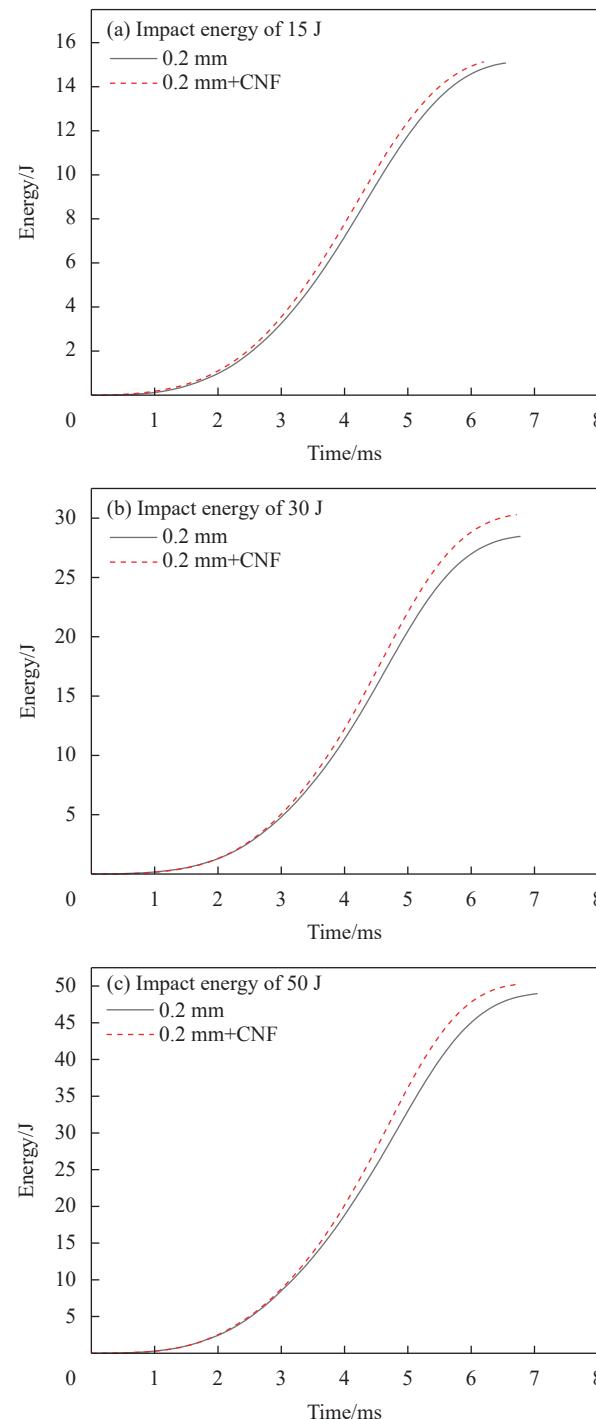


图16 不同冲击能量不同微粒改性波纹层板的接触力-时间曲线

Fig. 16 Contact force-time curves of corrugated laminates modified by different particles under different impact energies

可以显著提升层板的抗冲击性能。图17为在芯部添加波纹铝板及添加CNF后层板抗冲击性能提升示意图。

3 结论

(1) 在层板芯部添加波纹铝板，15 J 和 30 J 冲

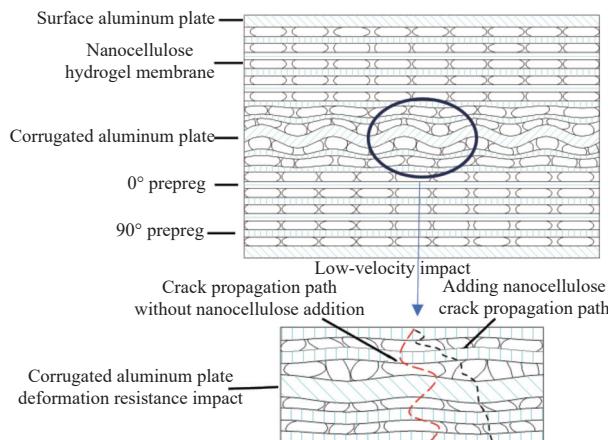


图 17 在芯部添加波纹铝板及添加 CNF 后层板抗冲击性能提升示意图

Fig. 17 Schematic diagram of improving the impact resistance of the laminate after adding corrugated aluminum plate and adding CNF to the core

击能量下，高度差 0.2 mm 的层板表现出最好的抗冲击性能，层板表面可视损伤和内部损伤程度最低，层板峰值载荷在 30 J 冲击能量下达到 6 kN 较平板的 5.1 kN 提升了 17.6%，同时也表现出了更好的吸能特性。在 50 J 冲击能量下，冲击后各种的冲击响应和损伤情况并无明显区别。在层板芯部添加波纹铝板可以对碳纤维金属层板芯部起到增韧和支撑效果，并在一定程度上可以提高碳纤维金属层板的抗冲击性能。

(2) 对预浸带表面涂覆短切碳纤维 (CCF)、碳纤维粉 (CFP) 和纳米纤维素 (CNF) 所制备的碳纤维金属层板层间界面强度得到提升。当层板受到冲击载荷后，裂纹萌生在冲击点下侧界面结合处，随着层板挠度和变形的增加，裂纹逐渐扩展，添加 CFP 可以提升基体强度，抑制裂纹扩展。而添加 CCF 和 CNF 会改变裂纹扩展方向，提高层板的抗冲击性能。在层间界面处添加 CFP、CCF 和 CNF 可以增强基体强度，提升界面结合能力，从而提高层板的抗冲击性能。

(3) 在层板芯部添加高度差为 0.2 mm 波纹铝板并在预浸带表面涂覆 CNF 所制备的碳纤维金属层板的总体抗冲击性能相较于仅添加波纹铝板跟仅添加 CNF 有着明显提升，芯部铝板的波纹抵抗了冲击形变，对层板起到支撑与增韧的作用，预浸带表面喷涂的 CNF，在制备过程中形成薄膜，提升了层板的界面强度与基体强度，改变裂纹扩展方向，二者相结合使得抗冲击性能得到显著提升。

参考文献：

- [1] HE W, WANG L, LIU H, et al. On impact behavior of fiber metal laminate (FML) structures: A state-of-the-art review[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 167: 108026.
- [2] KAZEMI M E, SHANMUGAM L, YANG L, et al. A review of the hybrid titanium composite laminates (H-TCLs) focuses on surface treatments, fabrications, and mechanical properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 128: 105679.
- [3] JAKUBCZAK P, PODOLAK P, DROŽDZIEL-JURKIEWICZ M. The assessment of the compressive strength of fibre metal laminates after low-velocity impact[J]. *Composite Structures*, 2023, 320: 117208.
- [4] FRANCESCONI L, AYMERICH F. Damage mechanisms in the CAI failure of thin Z-pinned composite laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 158: 106991.
- [5] KAZEMI M E, SHANMUGAM L, LU D, et al. Mechanical properties and failure modes of hybrid fiber reinforced polymer composites with a novelliid thermoplastic resin, Elijum®[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 125: 105523.
- [6] LU B, ZHANG J, ZHENG D, et al. Study on off-center impact behavior and damage characterization of carbon fiber reinforced aluminum laminate[J]. *Composite Structures*, 2023, 304: 116404.
- [7] YANG L, LIAO Z, QIU C, et al. Experimental study on the impact resistance and damage tolerance of thermoplastic FMLs[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 196: 111435.
- [8] SHARMA P A, KHAN H S. Influence of metal layer distribution on the projectiles impact response of glass fiber reinforced aluminum laminates[J]. *Polymer Testing*, 2018, 70: 320-347.
- [9] 黄亿洲, 王志瑾, 刘格菲. 碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用 [J]. *西安航空学院学报*, 2021, 39(5): 44-51.
HUANG Yizhou, WANG Zhijin, LIU Gefei. Application of carbon fiber reinforced composite in aerospace[J]. *Journal of Xi'an Aeronautical University*, 2021, 39(5): 44-51(in Chinese).
- [10] YUDHANTO A, WAFAI H, LUBINEAU G, et al. Revealing the effects of matrix behavior on low-velocity impact response of continuous fiber-reinforced thermoplastic laminates[J]. *Composite Structures*, 2019, 210: 239-249.
- [11] FRIZZELL R M, MCCARTHY C T, MCCARTHY M A. An experimental investigation into the progression of damage in pin-loaded fibre metal laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(6): 907-925.
- [12] KAZEMI M E, MEDEAU V, MENCATTELLI L, et al. Novel zone-based hybrid laminate structures for high-velocity

- impact (HVI) in carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 241: 110148.
- [13] LIU L, HU D, WAN D, et al. Low velocity impact behavior and simulation of parametric effect analysis for UHMWPE/LLDPE thermoplastic composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2021, 258: 113180.
- [14] LIU X, GUAN Z, WANG X, et al. Study on cure-induced residual stresses and spring-in deformation of L-shaped composite laminates using a simplified constitutive model considering stress relaxation[J]. *Composite Structures*, 2021, 272: 114203.
- [15] BHUDOLIA S K, JOSHI S C. Low-velocity impact response of carbon fibre composites with novel liquid methyl-methacrylate thermoplastic matrix[J]. *Composite Structures*, 2018, 203: 696-708.
- [16] CARVELLI V, NISHIDA H, FUJII T, et al. Low velocity impact and CAI of woven carbon fibre-reinforced highly polymerized thermoplastic epoxy modified with sub-micron diameter glass fibres[J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111835.
- [17] NAKATANI H, KOSAKA T, OSAKA K, et al. Damage characterization of titanium/GFRP hybrid laminates subjected to low-velocity impact[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(7): 772-781.
- [18] LIU Y, LIAW B. Effects of constituents and lay-up configuration on drop-weight tests of fiber-metal laminates[J]. *Applied Composite Materials*, 2010, 17(1): 43-62.
- [19] YAGHOUBI A S, LIU Y, LIAW B, et al. Stacking sequence and geometrical effects on low-velocity impact behaviors of GLARE 5 (3/2) fiber-metal laminates[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2012, 25(2): 223-247.
- [20] SADIGHI M, PÄRNÄNEN T, ALDERLIESSEN R C, et al. Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber metal laminates[J]. *Applied Composite Materials*, 2012, 19: 545-559.
- [21] SHARMA P A, KHAN H S, KITEY P, et al. Effect of through thickness metal layer distribution on the low velocity impact response of fiber metal laminates[J]. *Polymer Testing*, 2018, 65: 301-312.
- [22] 付珊珊, 陈栋, 时建纬, 等. CFRP 面板-功能梯度蜂窝夹层板的抗低速冲击性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 4226-4236.
- [23] FU Shanshan, CHEN Dong, SHI Jianwei, et al. Low-velocity impact of functional gradient honeycomb sandwich plate with CFRP face sheets[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7): 4226-4236(in Chinese).
- [24] 万云, 刘一辉, 李浩, 等. 碳纤维-金属网增强复合材料低速冲击和界面损伤机制 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(11): 6351-6362.
- [25] WAN Yun, LIU Yihui, LI Hao, et al. Low-velocity impact and interlaminar damage mechanism of carbon fiber-metal mesh reinforced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(11): 6351-6362(in Chinese).
- [26] 赵昌葆, 曹猛, 薛红前, 等. 石墨烯纳米片对碳纤维增强金属层板层间力学性能的影响 [J]. *西北工业大学学报*, 2022, 40(1): 141-147.
- [27] ZHAO Changbao, CAO Meng, XUE Hongqian, et al. Effect of graphene nanosheets on interlaminar mechanical properties of carbon fiber reinforced metal laminates[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(1): 141-147(in Chinese).
- [28] 王森, 赖家美, 阮金琦, 等. 不同粒子改性环氧树脂基碳纤维复合材料低速冲击及冲击后压缩性能 [J]. *材料导报*, 2021, 35(2): 178-184.
- [29] WANG Sen, LAI Jiamei, RUAN Jinqi, et al. Low speed impact and compression properties of epoxy based carbon fiber composite modified by different particles[J]. *Material Reports*, 2021, 35(2): 178-184(in Chinese).
- [30] 中国国家标准化管理委员会. 胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料): GB/T 7124—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [31] Standardization Administration of the People's Republic of China. Adhesives—Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies: GB/T 7124—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008(in Chinese).
- [32] 郑晓霞, 郑锡涛, 沈真, 等. 低速冲击与准静态压痕力下复合材料层合板的损伤等效性 [J]. *航空学报*, 2010, 31(5): 928-933.
- [33] ZHENG Xiaoxia, ZHENG Xitao, SHEN Zhen, et al. Damage equivalent of composite laminates subjected to drop-weight impact and quasi-static indentation force[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(5): 928-933(in Chinese).