复合材料褶皱夹芯结构的制备及压缩性能研究

杨阳,王新筑,蹇开林

(重庆大学 航空航天学院,重庆 400040)

摘要:目的 探究复合材料褶皱芯子的一次性成型工艺,并研究浸胶量对褶皱夹芯结构压缩性能的影响。 方法 以V型褶皱夹芯结构为研究对象,首先采用真空吸附成型工艺制备V型复合材料褶皱芯子,然后 通过黏接工艺将碳纤维复合材料层合板与褶皱芯子进行复合,得到复合材料褶皱夹芯结构,最后通过实 验测试,研究该结构在压缩载荷作用下的力学性能和失效模式,以及不同浸胶量对其压缩性能的影响。 结果 采用真空吸附成型工艺能够一次性制备出褶皱芯子,其成型精度有待提高;由压缩实验可知,褶皱夹 芯结构先从壁面开始失效,后逐步扩散至棱线处,最终导致芯子的整体失效;由压缩实验则试结果可知, 浸胶量(质量分数)为11%、17%、22%的褶皱夹芯结构的破坏载荷分别为362.853、420.521、471.389 N。 结论 采用真空吸附成型工艺可一次性成型出褶皱芯子,其制备效率较高,但存在成型尺寸精度不高问 题,后续需要进一步改进;在一定范围内,复合材料褶皱夹芯结构的压缩破坏载荷与芯子的浸胶量近似 成正比例线性关系。

关键词: V 型褶皱夹芯结构; 真空吸附成型工艺; 压缩性能; 失效模式 中图分类号: O341; TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)23-0144-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.23.017

Preparation and Compression Performance of Composite Folded Sandwich Structure

YANG Yang, WANG Xin-zhu, JIAN Kai-lin

(College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400040, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the one-off forming process of composite folded core and study the effect of dipped glue concentration on the compression performance of folded sandwich structure. V-shaped folded sandwich structure was taken as the research object. Firstly, the vacuum draw forming was used to build a V-shaped composite folded core. Then, the folded core was compounded with the carbon fiber composite laminate by a bonding process to obtain the composite folded sandwich structure. Finally, the mechanical properties and failure modes of the structure under the action of compression load were investigated by experimental tests and the effects of different dipped glue concentration on the compression performance were analyzed. The folded core was prepared by the vacuum draw forming at one time, but the forming precision was required to be improved. From the compression test, the failure of the folded sandwich structure under the glue concentrations of 11%, 17% and 22% was 362.853 N, 420.521 N, and 471.389 N, respectively. The vacuum draw forming can prepare the folded core at one time with high efficiency, but it still needs to be improved due to low precision of forming size. In a certain range, the ultimate compression load of the composite folded sandwich structure is approximately proportional to the dipped glue concentration.

收稿日期: 2022-04-21

基金项目:重庆市留创计划创新类项目(cx2020001);重庆市技术创新与应用发展专项融合创新重点项目(Z20211357) 作者简介:杨阳(1994—),男,硕士,主要研究方向为航空航天复合材料。

通信作者:王新筑(1976—),男,博士,讲师,主要研究方向为先进材料与结构设计、制备工艺及性能评估。

KEY WORDS: V-shaped folded sandwich structure; vacuum draw forming; compression performance; failure modes

随着航空、航天、航海等领域的装备对轻量化和 功能化的迫切需求,夹芯结构备受人们的关注^[1-2]。 夹芯结构的芯子有很多种,其中蜂窝芯子是典型代表 之一。由于蜂窝芯子的内部空间是封闭的,易造成热 量传递困难、冷凝水积聚等问题,且制造成本昂贵、 维修成本较高,因此阻碍了其广泛应用^[3]。近年来发 展起来的褶皱芯子的构型源于日本学者 Miura 提出 的折纸单元,即按照规律将平面材料折叠起来,构 成立体结构芯子^[4]。该结构的优点是保持了芯子材 料的连续性及其自身的力学性能,同时褶皱芯子的 设计灵活性较高。此外,褶皱芯子拥有一个方向的 通道,流体介质可在面内流动,起到了运输介质、 传递热量、避免冷凝水积聚等作用,因此具有明显 的结构/功能特征,有望在很多装备上取代现用的蜂 窝夹芯结构(如图1所示^[5])。目前,在芯子的制备 材料和相关制备工艺上还有很多问题需要深入研 究,为其在航空航天等领域的广泛应用提供理论依据 和科学指导。



图 1 2 种典型夹芯结构^[5] Fig.1 Two typical sandwich structures^[5]

国内外学者在褶皱芯子的制备工艺及其力学性 能方面做了许多探索性研究工作。在制备工艺方面, Alekseev 等^[5]通过 Solidworks 参数化模拟,研究了不 同几何尺寸褶皱芯子的制备工艺,所提出的参数化几 何模型使得其在为生产线设计压辊时,可以自动重新 计算每个新变量的刀具几何尺寸,从而提高了制备效 率。Elsayed 等^[6]提出一种将板材通过多组压辊从二 维折叠成三维芯子,并设计为纵向折叠、交叉折叠和 角度折叠等方式,以产生所需折叠芯子的连续制备工 艺。Schneider 等^[7]对 Miura-ori 结构冲压刀具进行了开 发,设计出具有 3 个弯曲轴的刀具,以冲压的方式将金 属板材进行折叠,这种制备工艺可以成型 0.2~0.6 mm 的铝合金板材或 0.1 mm 的钢板。

在力学性能和隔声性能方面,Heimbs 等^[8]分别采 用芳纶纤维预浸料和碳纤维预浸料制备了褶皱芯子, 并对其压缩和冲击载荷作用下的力学性能进行了评 估。研究表明,由芳纶纤维预浸料制备的褶皱芯子的

韧性较好,而由碳纤维预浸料制备的褶皱芯子具有更 高的比刚度和比强度。杜昀桐等^[9]对S型褶皱夹芯结 构进行了平压实验研究,发现褶皱芯子的失效模式随 着芯子壁厚的增加而改变。Du 等^[10]研究了碳纤维增 强复合材料 S 型褶皱芯子的压缩性能和失效模式,随 着褶皱芯子壁厚的增加,褶皱芯子的失效模式由壁面 屈曲转变为压碎破坏,在芯子被压碎的过程中可以吸 收更多的能量。丛立新等^[11]通过改变 V-型褶皱芯子 上部面积,将线接触改为面接触,从而增大了芯子与 面板的胶结面积,提高了结构的剪切强度和弯曲强 度。邓云飞等^[12]采用热压法制备了玻璃纤维增强 S 型褶皱夹芯板,并使用聚氨酯泡沫进行了填充,通过 落锤试验机对夹芯板节点与基座 2 个位置进行了冲 击试验。研究表明,冲击位置对泡沫填充褶皱夹芯板 的失效模式存在影响。Zang 等^[13]对热塑性材料聚醚 醚酮(PEEK)制备的褶皱夹芯结构进行了平压性能 研究,结果表明,PEEK 褶皱芯子的刚度和强度较低, 但在吸能特性上与具有相同几何形状的芳纶褶皱芯 子相当。Deng 等^[14]提出了一种基于广义 Resch 模式 的褶皱芯子设计方法,采用有限元方法对其准静态力 学性能进行了系统研究,并通过实验进行了验证,揭 示了褶皱芯子的力学性能与各几何参数之间的关系。 Li 等^[15]将 Miura-ori 结构与菱形蜂窝结构相结合, 提 出一种新构型褶皱夹芯结构,并通过数值分析和准静 态压缩实验进行了理论模型的验证,研究了该结构在 准静态加载条件下的失效模式。Xiang 等^[16-17]对 Miura-ori 尼龙超材料的准静态压缩力学行为进行了 研究,实验结果表明,夹芯结构的比吸能随着支撑角 的增大呈现先增后减的趋势。此外,还对基于 Miura-ori 的 3D 打印不锈钢超材料的准静态压缩性 能进行了研究,实验结果表明,梯度超材料比均匀超 材料具有更高的比吸能,同时梯度超材料有效地降低 了峰值力后压缩载荷的下降幅度。Lyu 等^[18]将厚度为 0.3 mm 的铝板压缩后,制备出 Miura-ori 芯子,并对 其进行了面外压缩实验和数值研究,仿真结果与实验 结果吻合较好。研究结果表明,夹芯结构的极限载荷 随着芯子壁厚和支撑角度的增大而增大。Ma 等^[19]提 出一种新型金字塔褶皱芯子,并对其夹芯结构在准静 态面外压缩和剪切作用下的力学性能进行了实验和 数值仿真研究,数值仿真结果与实验结果吻合较好。 研究结果表明,该结构的平压强度比常用的蜂窝夹芯 结构的平压强度高 73%, 其剪切强度相差 11%。王志 瑾等^[20]通过对褶皱芯子进行隔声试验,得出影响其隔 声性能的主要因素为折叠褶皱芯子的构型和壁厚。

综上所述,目前在复合材料褶皱芯子材料的选择 上,均为玻璃纤维、芳纶纤维预浸料和碳纤维预浸料 等,缺乏良好的可设计性,不能很好地满足使用需求, 目前也无相关成熟的制备工艺。如将材料与芯子制备 工艺进行有机结合,实现一次性成型,则具有十分重 要的意义。由此,文中拟进行真空吸附一次成型工艺 制备褶皱芯子的探索工作,并研究不同浸胶量对复合 材料褶皱夹芯结构压缩性能的影响。

1 V 型复合材料褶皱夹芯结构的制备

1.1 V型褶皱芯子的制备

新型先进褶皱芯子的制备方法采用由重庆大学航 空航天学院与华南理工大学制浆造纸工程国家重点实 验室联合研发的真空吸附一次成型工艺,该工艺无需先 制备特种纸张,而是直接一次性成型褶皱芯子。

1.1.1 褶皱芯子的几何构型

褶皱芯子的重要特征之一是其构型不同,构型的 几何尺寸有很多种,不同的参数可以获取不同性能和 功能的芯子结构,故具有较强的设计性。以 V 型为 例,定义其几何参数:张开角度 α、支撑角度 β、Z 型 线长 a、芯子高度 H、锯齿线步长 2L、张开距离 2S、 幅值 V,如图 2 所示。



图 2 V型褶皱芯子的几何构型 Fig.2 Geometrical structure of the V-shaped folded core

文中所用褶皱芯子的几何构型参照 Heimbs 的设 计^[8],其中芯子壁面厚度 t = 0.5 mm。V 型褶皱芯子 的几何尺寸如表1所示。

表 1 V 型褶皱芯子的几何尺寸 Tab.1 Geometrical dimension of the V-shaped folded core

几何参数	<i>a</i> /mm	H/mm	2 <i>L</i> /mm	α/(°)	$\beta/(^{\circ})$
数值	28.28	28	15.5	60	63

1.1.2 实验材料

通过实验发现,在芳纶浆粕(1313 芳纶浆粕,1 mm, 广州龙塔贸易有限公司)与短切芳纶纤维(1313 短切 芳纶,2*D*×6 mm,广州龙塔贸易有限公司)的配比中, 当芳纶浆粕的添加量(质量分数)为30%时,芳纶浆粕 与短切芳纶的黏结作用和短切纤维自身强度对试样物 理强度的影响相当,达到最优值,故选定短切纤维与 芳纶浆粕的质量比为7:3。

1.1.2 制备过程

真空吸附成型是将下模具浸入浆池,通过真空负 压将浆池中的浆料吸附到下模具上,然后合模挤压成 型。该方法生产效率高、成型次品率低,是目前造纸 业中广泛使用的一种成型方式。褶皱夹芯结构制备流 程和成型模具如图 3—4 所示。

在真空吸附成型时,首先将模具抽真空,使得模 腔内形成负压,纸浆中的纤维在真空环境下会均匀地 沉积在模具表面,在达到制件要求的厚度时,将下模 具从浆液中移出,并与上模具合模,进行挤压脱水, 最后通过外力作用使湿坯脱模,得到初步制备的试 样。在脱模后仍保留真空吸附后的状态,此时试样表 面较粗糙,故需将试样经过 30 min 烘道烘干后,放 置在鼓风干燥室内将水分的质量分数平衡至 10%~12%。然后,在温度为 180 ℃、压力为 10~15 MN 的高温高压下热压 10~60 s, 以获得更好的尺寸、形状 稳定性和表面平整度。然后将热压完成的试样浸渍在 2124 酚醛树脂(BR, 上海阿拉丁生化科技股份有限公 司)中,通过改变溶解干酒精中的酚醛树脂的容量来改 变浸胶量。在经过4h、170℃、0.4 MPa的高温高压后, 得到了浸胶量(文中均用质量分数计)分别为 11%、 17%、22%的试样。浸胶前和浸胶后的试样如图 5-6 所示。



图 3 褶皱夹芯结构制备流程 Fig.3 Preparation flow chart of folded sandwich structure



图 4 成型模具 Fig.4 Forming mould



图 5 浸胶前的试样 Fig.5 Sample before dipping in glue



图 6 浸胶后的试样 Fig.6 Sample after dipping in glue

1.1.4 褶皱芯子成型质量评估

通过测量制备成功的褶皱芯子的尺寸发现,采用 真空吸附一次成型工艺制备的褶皱芯子的顶部、中部 和底部等尺寸存在一定差异。使用纤维分析仪对褶皱 芯子试样(图7)的顶部、中部和底部进行测试,测 试结果如表2所示。文中的加权长度指以纤维计数加 权平均所得到的长度值,即以各长度组纤维根数为参 数(权)时的算术平均值。宽度指纤维的宽度,根据 纤维的框架来确定。



图 7 V型褶皱芯子的顶部、中部、底部示意图 Fig.7 Top, middle and bottom of V-shaped folded core

	表 2	显微:	分析结果	
Tab.2	Micros	scopic	analysis	results

试样	加权长度/mm	宽度/µm
顶部	0.646	20.3
中部	0.927	21.7
底部	1.028	25.2

由表 2 可知,从芯子顶部、中部开始,一直到 底部,纤维的含量逐渐增大。这与光学显微镜下观 察到的结果一致,见图 8。



图 8 光学显微镜放大观察图(400倍) Fig.8 Optical microscopic view at 400×

复合材料褶皱芯子由芳纶浆粕与短切芳纶纤维混 合制备而成。其中,芳纶浆粕的尺寸(1 mm)较小, 短切芳纶纤维尺寸(2*D*×6 mm)相对较大,且短切芳纶 纤维在打浆过程中会产生尺寸较小的纤维碎片。在上 窄下宽的模具中进行真空吸附时,尺寸较小的部分会 被优先吸附,在后续的吸附中,因模具间隙较宽,吸 附的纤维尺寸也逐渐增大,因此褶皱芯子的顶部、中 部、底部出现了尺寸差异现象。

1.2 V-型褶皱夹芯结构的制备

1.2.1 碳纤维复合材料面板的制备

文中选用型号为 T700/3234、树脂含量(质量 分数)为 38%~39%的碳纤维单向预浸料,单层预浸 料 的 厚 度 为 0.125 mm, 铺 层 顺 序 为 [0°/45°/90/°-45°]₂₈ 对 称 铺 层 ,所用 碳 纤 维 T700/3234 预浸料的环氧树脂的玻璃化温度为 120~130 ℃,在 70 ℃时黏度为 15~30 Pa·s,所以将 预浸料固化成型分为 2 次行程:一次行程是在压力 为 0 MPa、温度为 80 ℃下预固化 30 min;二次行程 是在压力为 0.5 MPa、温度为 125 ℃下固化 120 min, 经固化成型后自然冷却。制备得到的层合板厚度为 1.0 mm 左右,其力学性能如表 3 所示。

1.2.2 夹芯结构的制备

将制备好的碳纤维复合材料层合板按照相关实

验标准规定的压缩试件尺寸进行切割,切割后层合板的尺寸为 60 mm×70 mm×1 mm。然后,采用特种胶膜(J-272,黑龙江石油化工研究院)进行黏接,将黏接后的夹芯结构放入热压罐中,在压力为 0.1 MPa、温度为 100 ℃条件下保温、保压 240 min。为了保证黏接强度,需要在夹芯结构上放置 1 个质量块。褶皱夹芯结构的制备如图 9 所示。

表 3 T700 碳纤维复合材料单向板的力学性能 Tab.3 Mechanical properties of T700 carbon fiber composite unidirectional plate

材料 ——	弹性模	弹性模量/GPa		强度/MPa	
	拉伸	剪切	一行灯几	拉伸	剪切
	$E_{11} = 114$	<i>G</i> ₁₂ =4.16	v ₁₂ =0.3	$X_{\rm T} = 2688$	$S_{xy} = 136$
单向板	E ₂₂ =8.61	<i>G</i> ₁₃ =4.16	v ₁₃ =0.3	$Y_{\rm T} = 69.5$	$S_{xz} = 136$
	E ₃₃ =8.61	G ₂₃ =3.0	v ₂₃ =0.3	$Z_{\rm T} = 55.5$	$S_{xy} = 95.6$



a 褶皱芯子

b 碳纤维复合材料面板

c 褶皱夹芯结构

图 9 V 型褶皱夹芯结构的制备 Fig.9 Preparation of V-shaped folded sandwich structure

2 V 型褶皱夹芯结构的压缩性能实验

为了探究不同浸胶量对 V 型复合材料褶皱夹芯 结构压缩性能的影响,对 3 种不同浸胶量的夹芯结 构进行了压缩实验。实验按照 GB/T 1453—2005《夹 层结构或芯子平压性能试验方法》进行,在实验过程 中,位移加载速率为 0.5 mm/min,温度为 25 ℃;试样 两表面的平行度公差为 0.10 mm,试样边长大于等于 60 mm,试件的几何尺寸为60 mm×70 mm×30 mm。在 每种浸胶量下制备 3 个试件,根据 GB/T 1464《非金 属夹层结构或芯子密度试验方法》计算试样的密度, 并对实验过程进行录像。

3 分析与讨论

针对 3 种不同浸胶量褶皱芯子的复合材料夹芯 结构进行了压缩实验,在压缩实验过程中观察并记 录其失效模式。

浸胶量分别为 11%、17%、22%的褶皱夹芯结构 的应力-应变曲线如图 10 所示。3 种不同浸胶量的褶 皱夹芯结构的实验过程如图 11 所示。由实验测试数 据可得到破坏载荷,对实验数据进行了误差分析, 结果如表 4 所示。根据实验标准计算夹芯结构的平 压强度和压缩模量,结果如表 5 所示。





Fig.10 Stress-strain curves of folded core sandwich structures with three different dipped glue concentrations



a 浸胶量为11%

b 浸胶量为17%

c 浸胶量为22%

图 11 3 种不同浸胶量褶皱芯子夹芯结构的实验过程

Fig.11 Experimental process of folded core sandwich structures with different dipped glue concentrations

表 4 实验所得破坏载荷的误差分析 Tab.4 Error analysis of experimental failure load

<>>□応₽/0/						这 带 2 粉
反放里/% —	试样 1	试样 2	试样 3	平均值	你准差	丙取杀奴
11	372.392	355.471	360.695	362.853	7.074	0.019
17	416.169	422.160	423.233	420.521	3.108	0.007
22	474.615	470.796	468.756	471.389	2.428	0.005

表 5 不同浸胶量的褶皱芯子夹芯结构的压缩性能参数

Tab.5 Compression performance parameters of folded sandwich structures with different dipped glue concentrations

浸胶量/%	破坏载荷/N	平压强度/MPa	比强度/(N·m·kg ⁻¹)	压缩模量/MPa
11	362.853	0.086	471.485	1.893
17	420.521	0.101	525.233	2.022
22	471.389	0.113	560.114	2.146

根据图 10 中的曲线特征,可将其分为 4 个阶段。第 1 阶段为弹性阶段,对应图 10 中的区域 1, 在此阶段压缩载荷呈线性上升趋势,直至达到破坏 载荷(破坏载荷数据详见表 4)。随着压缩位移的增 大,进入第 2 阶段——压溃阶段,对应图 10 中的区 域 2,此时芯子的壁面起皱,即结构失稳,进入后屈 曲状态,芯子的承载能力降低。随后进入第 3 个阶 段——载荷平台期,对应图 10 中的区域 3,此阶段 的褶皱芯子夹芯结构有一定的承载能力,载荷为极 限载荷的 2/3 左右。第 4 个阶段为致密化阶段,对应 图 10 中的区域 4,此阶段因芯子壁面自接触,芯子 变得密实,所能承受的载荷逐渐增大。在卸载后, 芯子发生了回弹现象。卸除压缩载荷后的夹芯结构高 度为 24 mm(原高度为 30 mm),回弹量为 80%,即 整体高度变化相对较小。

比较 3 种浸胶量的褶皱夹芯结构的应力-应变曲 线可知,在一定范围内,随着浸胶量的增大,夹芯 结构的极限载荷、平压强度、压缩模量均随之增 大,且芯子浸胶量与夹芯结构的极限载荷近似成正 比例线性关系。3 种浸胶量的褶皱芯子夹芯结构的失 效模式极为相近,都在芯子壁面先出现起皱,然后 引起芯子棱线屈曲,芯子的承载能力减弱,进入载 荷平台期,随后因芯子壁面的自接触,芯子变得密 实,承载能力再次提升。

3种浸胶量的褶皱芯子夹芯结构的失效模式极为 相似,故此处仅放一组典型照片,如图 12 所示。



图 12 褶皱芯子夹芯结构失效过程 Fig.12 Failure process of folded core sandwich structure

4 结语

采用真空吸附成型工艺可一次性制备出所需的 复合材料褶皱芯子,具有很高的设计灵活性,且制 备效率较高。目前,该工艺存在成型尺寸精度不高 等问题,需要后续进行改进。

通过压缩实验测试可知,在一定范围内,复合材 料褶皱夹芯结构的破坏载荷、平压强度和弹性模量随 着浸胶量的增大而增大,芯子的浸胶量分别为11%、 17%、22%的褶皱夹芯结构的破坏载荷分别为 362.853、420.521、471.389N,芯子浸胶量与V型褶 皱夹芯结构的破坏载荷近似成正比例线性关系。3种 浸胶量的夹芯结构在压缩载荷作用下的失效模式相 同,即芯子壁面起皱、芯子棱线屈曲、芯子整体失 效。

参考文献:

- 邓云飞,曾宪智,周翔,等.复合材料褶皱夹芯结构 研究进展[J].复合材料学报,2020,37(12):2966-2983.
 DENG Yun-fei, ZENG Xian-zhi, ZHOU Xiang, et al. Research Progress for the Composite Sandwich Structure with Foldcore[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(12): 2966-2983.
- [2] 熊健,杜昀桐,杨雯,等.轻质复合材料夹芯结构设计及力学性能最新进展[J]. 宇航学报,2020,41(6):749-760.

XIONG Jian, DU Yun-tong, YANG Wen, et al. Research Progress on Design and Mechanical Properties of Lightweight Composite Sandwich Structures[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 749-760.

[3] 丛立新. 复合材料褶皱夹芯结构的制备及其力学行为 研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 82-88. CONG LI-xin. Preparation and Mechanical Behavior of Folded Sandwich Structure of Composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 82-88.

[4] 冯健,蔡建国,李萌.基于折纸元素的可展开结构形态与性能研究[M].北京:科学出版社, 2021:
 251.

FENG Jian, CAI Jian-guo, LI Meng. Research on Deployable Structure Morphology and Performance Based on Origami Elements[M]. Beijing: Science Publishing House, 2021: 251.

- [5] ALEKSEEV K A, ZAKIROV I M, KARIMOVA G G. Geometrical Model of Creasing Roll for Manufacturing Line of the Wedge-Shaped Folded Cores Production[J]. Russian Aeronautics, 2011, 54(1): 104-107.
- [6] ELSAYED E A, BASILY B. A Continuous Folding Process for Sheet Materials[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2004, 21(1/2/3): 217.
- [7] SCHNEIDER M, LIEWALD M. Development of a Folding Tool for Miuri-Structures[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 418: 012120.
- [8] HEIMBS S, CICHOSZ J, KLAUS M, et al. Sandwich Structures with Textile-Reinforced Composite Foldcores under Impact Loads[J]. Composite Structures, 2010, 92(6): 1485-1497.
- [9] 杜昀桐,熊健.复合材料S型褶皱夹芯结构制备及平 压性能测试[J].中国科技论文,2017(5):25-31.
 DU Yun-tong, XIONG Jian. Preparation of S-type Folded Sandwich Structure and Test of Flat Pressing Properties of Composite Materials[J]. Science and Technology Papers of China. 2017(5): 25-31.
- [10] DU Yun-tong, SONG Chang-ping, XIONG Jian, et al. Fabrication and Mechanical Behaviors of Carbon Fiber Reinforced Composite Foldcore Based on Curved-

Crease Origami[J]. Composites Science and Technology, 2019, 174: 94-105.

[11] 丛立新, 孙雨果, 高亮, 等. 改进 V-型复合材料褶皱 夹芯结构的制备及压缩性能[J]. 复合材料学报, 2014, 31(2): 456-464.
CONG Li-xin, SUN Yu-guo, GAO Liang, et al. Preparation and Compression Performance of an Improved V-Type Folded GFRP Sandwich Structure[J]. Acta Ma-

teriae Compositae Sinica, 2014, 31(2): 456-464. [12] 邓云飞,张伟岐,吴华鹏,等.泡沫填充的 S 型褶皱 复合材料夹芯板低速冲击响应特性[J].复合材料学 报, 2021, 38(8): 2605-2615.

DENG Yun-fei, ZHANG Wei-qi, WU Hua-peng, et al. Low-Speed Impact Response of the Composite Sandwich Panels with S-Type Foldcore Filled by Foam[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2605-2615.

- [13] ZANG Shi-xi, ZHOU Xiang, WANG Hai, et al. Foldcores Made of Thermoplastic Materials: Experimental Study and Finite Element Analysis[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 100: 170-179.
- [14] DENG An-tao, JI Bin, ZHOU Xiang. Quasi-Static Mechanical Properties of Novel Generalized Resch-Pattern Composite Foldcores[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(6): 1008-1025.
- [15] LI Zhe-jian, YANG Qiu-song, FANG Rui, et al. Origa-

mi Metamaterial with Two-Stage Programmable Compressive Strength under Quasi-Static Loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 189: 105987.

- [16] XIANG Xin-mei, QIANG Wei, HOU Bing, et al. Quasi-Static and Dynamic Mechanical Properties of Miura-Ori Metamaterials[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 157: 106993.
- [17] XIANG Xin-mei, FU Zu-shu, ZHANG Shao-lin, et al. The Mechanical Characteristics of Graded Miura-Ori Metamaterials[J]. Materials & Design, 2021, 211: 110173.
- [18] LYU Yang, ZHANG Ying, GONG Neng, et al. On the Out-of-Plane Compression of a Miura-Ori Patterned Sheet[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 161/162: 105022.
- [19] MA Jia-yao, DAI Hua-ping, CHAI Si-bo, et al. Energy Absorption of Sandwich Structures with a Kirigami-Inspired Pyramid Foldcore under Quasi-Static Compression and Shear[J]. Materials & Design, 2021, 206: 109808.
- [20] 王志瑾,徐庆华. V-型皱褶夹芯板与隔声性能实验
 [J]. 振动工程学报, 2006, 19(1): 65-69.
 WANG Zhi-jin, XU Qing-hua. Experimental Research on Soundproof Characteristic for the Sandwich Plates with Folded Core[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(1): 65-69.

责任编辑: 彭颋