

文章编号: 1001-4888(2019)05-0853-11

纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的静态缓冲性能研究^{*}

王行宁, 郭彦峰, 付云岗, 夏荣厚, 王慧超

(西安理工大学印刷包装与数字媒体学院, 陕西西安 710048)

摘要: 针对纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的缓冲吸能特性, 实验分析了正弦瓦楞夹层结构、六边蜂窝夹层结构以及复合夹层结构的静态压缩特性和变形模式, 计算了总吸能、比吸能、单位体积和单位面积吸能, 研究了压缩速率、瓦楞夹层楞型、蜂窝夹层厚度对复合夹层结构缓冲性能的影响规律。结果发现, 纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构是逐层压溃, 瓦楞夹层先压溃, 其次是蜂窝夹层; 压缩速率的变化对这种复合夹层结构的缓冲性能影响不明显; 在相同压缩速率条件下, 改变瓦楞夹层楞型和蜂窝夹层厚度对这种复合夹层结构的能量吸收影响较大, 由惯性矩较大的瓦楞夹层与厚度较高的蜂窝夹层组成的纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的缓冲性能良好。

关键词: 复合夹层结构; 纸瓦楞; 纸蜂窝; 静态压缩; 缓冲性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-076

0 引言

纸瓦楞、纸蜂窝都是非金属多孔夹层缓冲材料, 具有质量轻、工艺简单、成本低、环保性好、承载能力强和抗冲击性好等特点, 被广泛应用于产品防护与包装工程领域。目前对这类二维点阵结构材料的面外承载性能和缓冲性能的研究成果丰富, 如 Talbi 等^[1]建立了正弦瓦楞夹芯层的本构关系与局部坐标系的转换关系, 将单瓦楞纸板近似为等效正交各向异性板的均质化模型。付云岗等^[2]分析了瓦楞纸板的变形模式和准静态压缩性能, 得到了在不同压缩速率下瓦楞纸板的能量吸收图、能量吸收效率曲线及质量比吸能曲线。Nordstrand 等^[3]利用有限元方法分析了瓦楞夹层面板的局部屈曲行为及其对整体结构后屈曲的影响规律。刘晔等^[4]研究了三层瓦楞夹层结构的强度特性, 建立了非线性数学模型。Rejab 等^[5]基于悬臂梁的压剪联合变形模式, 研究了瓦楞夹芯层中单个瓦楞侧壁在面外压缩条件下的屈曲行为, 提出了临界压缩载荷的计算公式。Sek 等^[6]对比分析了多层 A 型瓦楞纸板的动态压缩特性, 结果表明这种缓冲结构逐层压溃, 各个瓦楞夹层孔隙内的气体对整体结构的压缩特性和缓冲性能会产生一定的影响。高德等^[7]研究了连续多次跌落冲击时 B 型双瓦楞纸板的非线性粘弹塑性模型。王冬梅等^[8]基于 Cowper-Symonds 模型, 建立了一个综合考虑结构参数和应变率效应的多层瓦楞纸板的动态平台应力的预测方程。Guo 等^[9]研究分析了平行双瓦楞夹层结构、正交三瓦楞夹层结构、弹力型结构、折叠型结构在不同跌落高度下的动态响应和缓冲特性。王志伟等^[10]研究了正六边形蜂窝纸板在跌落冲击条件下的动态压缩过程和缓冲性能, 结果表明纸蜂窝夹层的变形规律是一个从顶部到底部的渐进叠缩压溃模式。卢富德等^[11]利用一个连续函数建立了蜂窝纸板一维的动态本构关系, 并在此基础上

^{*} 收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51345008)、西安市科技计划项目(2017080CG/RC043(XALG024))和陕西省重点研发计划一般项目(2018GY-191)资助

通讯作者: 郭彦峰(1970—), 男, 教授, 博士, 主要从事缓冲包装动力学、新型缓冲吸能结构与性能方面的研究。Email: guoyf@xaut.edu.cn

研究了易损件-产品主体-蜂窝纸板缓冲系统的冲击谱响应,为蜂窝纸板缓冲包装优化设计提供了高效的方法。Kobayashi 等^[12]基于静态和动态压缩实验结果,得到了蜂窝纸板的最大应力、平均应力及吸收能量与压缩速率之间的关系,结果显示动态载荷作用下的蜂窝纸板吸收能量较多。宋俊杰等^[13]采用非线性有限元分析软件 Marc 模拟分析了纸蜂窝芯层的静态压缩变形过程及其应力应变云图。王刚等^[14]通过摆锤冲击实验和有限元方法,研究了铝蜂窝的动态压缩性能及低速冲击吸能特性,发现铝蜂窝在低速冲击作用下的变形特征与准静态变形类似。范志庚等^[15]基于疲劳压缩实验结果,以剩余平台应力为损伤参量,利用损伤累积方法建立了蜂窝纸板疲劳累积损伤模型。程军等^[16]提出了由三点弯曲线载荷两端简支板的挠度测试方法,阐明了金属蜂窝板的等效弹性模量计算与非金属蜂窝板之间存在较大的差异。

纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构是一种新型缓冲吸能结构,有机组合了瓦楞纸板和蜂窝纸板的承载与缓冲性能,对产品包装防护具有重要应用价值。然而,目前关于纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构力学性能研究的论文较少,例如,李厚民等^[17]对比分析了纸瓦楞-蜂窝层合结构的强度特性,耿敏等^[18]对瓦楞-蜂窝纸板的刚度进行了理论分析和实验测试,结果表明面纸的横纵方向对纸板弯曲刚度起决定性作用,复合纸板的刚度比单层纸板有显著的提高。本文对正弦瓦楞夹层结构、六边蜂窝夹层结构以及它们的复合夹层结构进行对比实验,研究这类层状结构的静态压缩变形特性,揭示压缩速率、瓦楞楞型、蜂窝夹层厚度对复合夹层结构缓冲吸能特性的影响规律,以便为纸瓦楞-蜂窝复合结构的应用提供理论和技术基础。

1 试样结构与测试方法

纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构属于瓦楞与蜂窝组合而成的夹层板结构,常见的组合形式为单面和双面复合,如图 1 所示。利用白乳胶将 B 型和 C 型瓦楞纸板与蜂窝纸板粘接成两层或者三层复合夹层结构。B 型瓦楞纸板的楞高为 2.5~3mm,在 30cm 长度内具有 50 ± 2 个楞数;C 型瓦楞纸板的楞高为 3.5~4mm,在 30cm 长度内具有 38 ± 2 个楞数。两种瓦楞纸板的厚度为 3mm 和 4mm,面纸定量 145g/m^2 、厚度 0.262mm,芯纸定量 145g/m^2 、厚度 0.260mm。两种蜂窝纸板的厚度为 20mm 和 30mm,面纸定量 300g/m^2 、厚度 0.45mm,芯纸定量 110g/m^2 ,蜂窝单层壁厚 0.14mm、蜂窝边长 9.675mm。用“2”表示 20mm 厚蜂窝纸板,“3”表示 30mm 厚蜂窝纸板,复合结构包括 4 种纸瓦楞-蜂窝单面复合夹层结构(B2、B3、C2、C3)以及两种纸瓦楞-蜂窝双面复合夹层结构(B2C、B3C,其中 B、C 瓦楞平行铺设)。实验之前,所有试样在温度 20°C 、相对湿度为 65% 的环境条件下静置处理 24 小时。实验采用 HT-2402 电脑伺服控制材料试验机,选取 12mm/min 和 48mm/min 两种静态压缩速率,参照国家标准 GB/T 8168“包装用缓冲材料静态压缩实验方法”,对 10 种试样分别进行静态压缩实验,观察试样的变形情况并提取相关数据及压缩应力-应变曲线,分析这类层状结构的静态压缩变形和缓冲吸能特性。

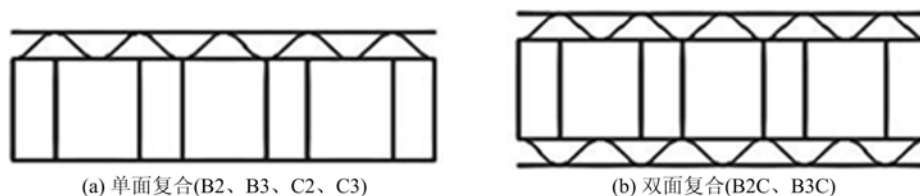


图 1 纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构示意图

Fig. 1 Geometry of the composite structures with paper corrugation and honeycomb cores

2 结果与讨论

2.1 静态压缩实验结果

2.1.1 屈服强度值

纸瓦楞、纸蜂窝及其复合夹层结构 B 瓦楞、C 瓦楞、2 蜂窝、3 蜂窝、B2、B3、C2、C3 和 B2C、B3C 在压缩速率为 12mm/min 和 48mm/min 时的屈服强度值如表 1 所示。对于单层夹层结构,B 瓦楞与 C 瓦楞

相比,楞数多且楞高小,屈服时具有较大应力值和应变值;3 蜂窝与 2 蜂窝相比,厚度大,屈服时应力值较大而应变值较小。纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的屈服次数与夹层数有关,并按照各层结构屈服强度值大小逐层屈服。对比 B 瓦楞、C 瓦楞分别与蜂窝单面复合夹层结构在相同压缩速率下的屈服强度值,第一次屈服的应力值差异明显,第二次屈服应力差异微小,瓦楞夹层楞型对复合夹层结构的屈服行为影响较大。对比相同压缩速率条件下同种瓦楞与不同厚度蜂窝复合的单、双面复合夹层结构的屈服强度值,瓦楞夹层的屈服强度值变化较小,蜂窝夹层厚度改变对复合夹层结构的屈服行为影响较大。

表 1 不同压缩速率下的屈服强度值

Tab. 1 Yield strength at different compression rates

结构 类型	压缩速率 /(mm/min)	第一次屈服		第二次屈服		第三次屈服	
		应力/(kPa)	应变/%	应力/(kPa)	应变/%	应力/(kPa)	应变/%
B 瓦楞	12	192	35.30				
	48	225	13.75				
C 瓦楞	12	114	26.63				
	48	106	13.75				
2 蜂窝	12	115	13.72				
	48	110	10.38				
3 蜂窝	12	165	2.88				
	48	190	2.44				
B2	12	140	6.21	150	19.33		
	48	140	8.09	155	21.76		
B3	12	155	2.95	170	9.77		
	48	160	3.24	180	10.17		
C2	12	110	13.07	150	27.08		
	48	115	12.92	120	22.89		
C3	12	115	3.98	175	10.43		
	48	130	5.03	175	11.68		
B2C	12	130	10.61	155	24.68	160	32.01
	48	120	8.69	160	23.73	170	32.01
B3C	12	130	3.74	165	8.92	200	16.60
	48	125	4.55	155	10.61	195	16.60

2.1.2 应力—应变曲线特征

由于复合夹层结构各层材料不同,瓦楞夹层与蜂窝夹层按屈服强度值从小到大的顺序逐层压溃。单纸瓦楞夹层结构、单纸蜂窝夹层结构以及纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构在不同压缩速率(12mm/min 和 48mm/min)下的应力—应变曲线特征类似,图 2 列出了 C 瓦楞、3 蜂窝、C3、B3C、在压缩速率 48mm/min 的压缩变形曲线。纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的屈服极限点数与其复合层数相关,单 C 瓦楞与单 30mm 蜂窝均为一个峰值点,单蜂窝的屈服极限值较大,单瓦楞的屈服极限值较小。C3 单面复合结构在静态压缩过程中出现两个峰值点,这是由于 C 瓦楞的屈服极限较低,受压时首先发生屈曲,曲线出现第一个峰值点即 C 瓦楞的屈服极限值,同时复合结构瓦楞部分的曲线与单 C 瓦楞夹层结构曲线趋势一致且屈服强度有明显提升;待瓦楞部分压溃后,蜂窝部分开始变形,第二个峰值点即为 3 蜂窝的屈服极限值,蜂窝部分的曲线与单 3 蜂窝夹层结构曲线趋势基本相同,其屈服强度值也稍有提升。由于 C 瓦楞

屈服极限小于 B 瓦楞屈服极限小于 3 蜂窝屈服极限,因此对于 B3C 双面复合夹层结构,共有三个屈服极限点,第一个峰值较小为最下层 C 瓦楞的屈服强度,第二个峰值为强度值稍大的上层 B 瓦楞,第三个峰值为屈服强度值最大的 3 蜂窝部分,双面复合夹层结构的瓦楞、蜂窝部分的应力—应变曲线分别与单瓦楞、单蜂窝结构的曲线趋势大致相同,但各部分的屈服强度值都有一定程度的提高。除此之外,与 C3 单面复合夹层结构的应力—应变曲线相比,双面复合夹层结构各部分的屈服强度值也稍有提升。

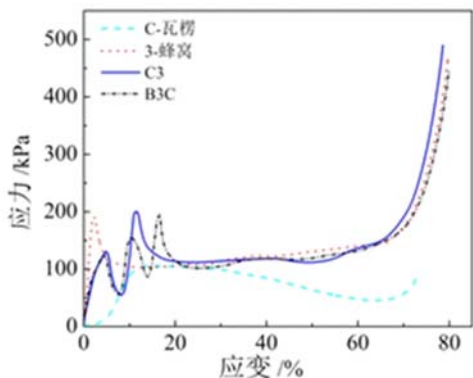


图 2 压缩速率 48mm/min 复合夹层结构应力—应变曲线

Fig. 2 Stress and strain curves of the composite sandwich structures at compression rate of 48mm/min

2.1.3 夹层结构力学分析

瓦楞芯层结构模型如图 3 所示,图中, h 为芯层瓦楞高度; t_c 为瓦楞芯纸厚度; λ 为瓦楞波长; l 为瓦楞芯层侧壁的长度; θ 为面板和瓦楞侧壁的夹角; δ 为 z 方向位移,可分解成轴向沿着杆的位移 ϕ_1 和垂直于梁的位移 ϕ_2 。由于瓦楞单元结构的周期性和对称性,取芯层半个波长的结构为单元结构,将其视为一个悬臂梁。悬臂梁受到轴向压缩载荷 N 剪切载荷 R 和弯矩 M 的作用, k 为与边界条件相关的数值因子, n 为瓦楞楞数。若假设外加压缩载荷为 $5P$,则瓦楞夹层结构的临界屈曲应力可以表示为^[5]:

$$\sigma_{cr1} = \frac{nk^2 \pi^2 E_c t_c^2 (l^2 \sin^2 \theta + t_c^2 \cos^2 \theta)}{6l^4 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

显然,瓦楞结构的屈服应力与瓦楞楞数和瓦楞芯层侧壁的长度有关,瓦楞楞数越多,侧壁长度短的瓦楞结

构屈服强度较高。与 C 瓦楞夹层结构相比, B 瓦楞纸板芯层的瓦楞楞数多,且侧壁的长度较短,因此,可以预测出在静态压缩过程中 C 瓦楞夹层结构比 B 瓦楞夹层结构先屈服。

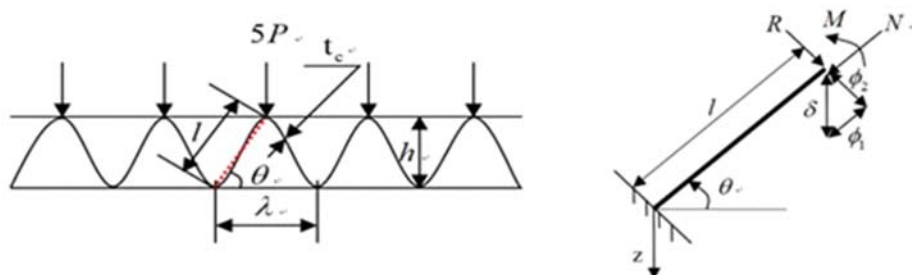


图 3 纸瓦楞夹层结构模型

Fig. 3 Paper corrugation structure model

蜂窝夹层面外压缩的力学分析可转化为单层薄板的小挠度屈曲问题,其结构模型如图 4 所示,当蜂窝夹层结构受垂直压缩载荷作用时,单层壁板和双层壁板共同受力。若设单个蜂窝芯层的承压面积为 S_1 ,单层板所受的力为 P_y ,根据几何关系可知, $S_1 = \frac{3\sqrt{3}}{2} a^2$,则单个蜂窝结构的临界屈曲应力可表示为^[19]:

$$\sigma_{cr2} = \frac{20\pi^2}{3\sqrt{3}a^3} [D_{11}(\frac{b}{na})^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) + D_{22}(\frac{na}{b})^2] \quad (2)$$

式中, a 、 b 分别为蜂窝单元结构的边长与高度; n 为胞壁屈曲时沿 y 方向的半波数; $D_{ij} = \int_{-t/2}^{t/2} C_{ij} z^2 dz$, $i, j = 1, 2, 6$ 。显然,蜂窝结构的屈曲应力与蜂窝边长、蜂窝边长与高度之比以及胞壁屈曲时沿受力方向的半波数有关。

2.1.4 压缩变形模式

瓦楞夹层结构在横向压缩时包括线弹性阶段、初始屈服阶段、渐进屈曲阶段、密实阶段^[2],蜂窝夹层

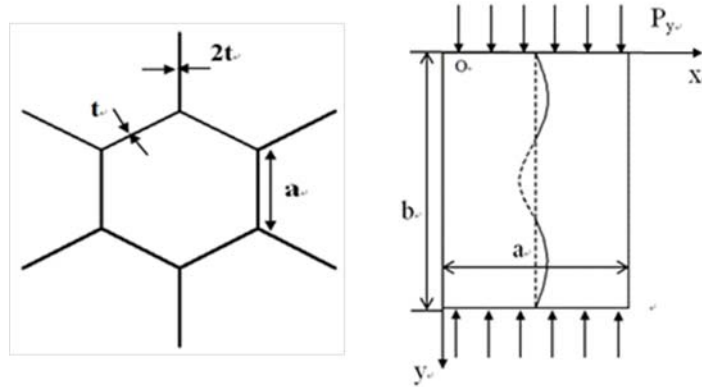


图4 蜂窝夹层结构模型

Fig. 4 Paper honeycomb cores structure model

结构在横向压缩时大致经历了弹性变形阶段、塑性坍塌阶段、致密阶段^[20]。综合瓦楞夹层结构与蜂窝夹层结构的垂直压缩变形过程,可将纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的静态压缩变形过程分为5个阶段:瓦楞弹塑性阶段、瓦楞塑性坍塌阶段(对应图5Ⅰ、Ⅱ)、蜂窝弹塑性阶段(对应图5Ⅲ)、蜂窝塑性坍塌阶段(对应图5Ⅳ)和整体密实化阶段(对应图5Ⅴ)。在瓦楞弹塑性阶段,应力随应变线性增大,去除外力后变形即可恢复,瓦楞结构没有明显变形;随着应力缓慢增加,瓦楞单元的波峰与波谷被压平,瓦楞芯纸与上下面纸的接触面积增大,瓦楞芯层变形以对称变形为主。随着应变继续增大,应力反而减小,瓦楞芯层两侧的塌陷部位使得瓦楞芯层的侧壁逐渐发展为近似竖直壁,瓦楞芯层侧壁突然失稳,瓦楞芯层开始向一侧倾斜,呈现出倾倒变形特点,开始进入瓦楞塑性坍塌。在瓦楞塑性坍塌阶段,竖直壁出现塑性铰使得形变急剧增大,面层与芯层接触部分逐渐增大,当瓦楞部分完全压溃后,蜂窝部分承受全部的垂直载荷,如图6(b)、图7(b)和图7(c)所示。蜂窝弹塑性阶段,蜂窝夹层结构的应力急剧增加,达到临界屈服峰值。继续加载达到蜂窝塑性坍塌阶段,胞壁屈曲出现塑性铰,随后壁板褶皱加深堆叠,蜂窝壁板相互挤压,变形量不断增加,但应力基本保持不变,进入近似平台区。整体密实化阶段时,瓦楞的正弦芯层与蜂窝的孔穴完全坍塌破坏,整个复合夹层结构被彻底压实,如图6(c)和图7(d)所示,压缩应力几乎呈垂直上升的状态,整个瓦楞-蜂窝复合夹层结构失去缓冲吸能特性。

2.2 能量吸收特性结果

本文采用单位体积吸收能量、总吸能、单位面积吸收能量和比吸能等参数评价分析纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的缓冲吸能特性^[21,22]。

(1) 单位体积吸收能量(Unit volume energy absorption),为结构密实化前应力-应变曲线下的面积:

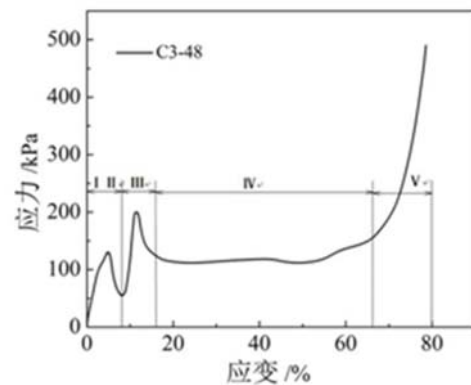
$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

(2) 总吸能(Total energy absorption),为单位体积吸收能量与试样体积的乘积:

$$E = AT \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (4)$$

式中, $\sigma(\epsilon)$ 为应力; ϵ 为应变; A 为试样的面积; T 为试样的厚度。

根据实验所获得的纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的静态压缩变形曲线,计算得到其缓冲吸能特性参数。表2是纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构在12mm/min、48mm/min两种压缩速率条件下的缓冲吸能特性结果。

图5 试样 C3-48 压缩变形
应力-应变曲线Fig. 5 Stress and strain curve of
compression deformation of C3-48

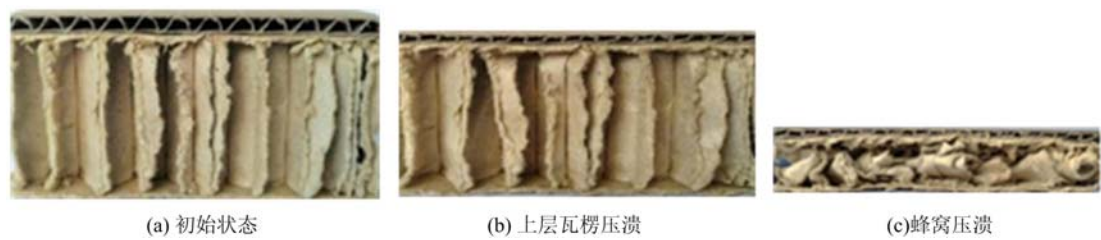


图 6 纸瓦楞-蜂窝单面复合夹层结构破坏过程(C3)

Fig. 6 Failure process of single-sided composite sandwich structure (C3)

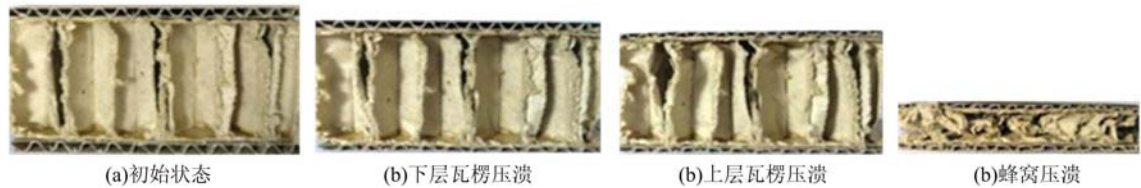


图 7 纸瓦楞-蜂窝双面复合夹层结构破坏过程(B3C)

Fig. 7 Failure process of double-sided composite sandwich structure (B3C)

表 2 能量吸收特性对比结果

Tab. 2 Energy absorbing characteristic parameters of composite sandwich structures

结构 类型	压缩速率 /(mm/min)	总吸能 /(J)	比吸能 /(J/g)	单位体积 吸收能量 /(J/m ³)	单位面积 吸收能量 /(J/m ²)
B2	12	1.523	0.08646	6552.6	152.3
	48	1.541	0.08743	6625.8	154.1
B3	12	2.613	0.10817	7860.1	261.3
	48	2.637	0.10917	7932.2	263.7
C2	12	1.349	0.07714	5561.8	134.9
	48	1.357	0.07761	5595.3	135.7
C3	12	2.472	0.10514	7216.9	247.2
	48	2.543	0.10816	7424.5	254.3
B2C	12	2.052	0.08499	7463.6	205.2
	48	2.096	0.08681	7623.4	209.6
B3C	12	3.023	0.16195	8086.6	302.3
	48	3.070	0.10710	8186.8	307.0

2.3 压缩速率对复合夹层结构缓冲性能的影响

为了分析不同的压缩速率对纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构缓冲性能的影响,选取静态压缩速率为 12mm/min 和 48mm/min、蜂窝夹层部分厚度分别为 20mm、30mm 的单、双面复合夹层结构试样应力—应变曲线进行分析。由图 8 可得,对于单、双面瓦楞-蜂窝夹层结构,相同试样在不同压缩速率下的应力—应变曲线变化趋势基本相同,屈服强度值与平台区出现的位置以及大小接近。图 9 是试样单位体积吸收能量和总吸能计算结果,通过对比发现,相同的纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构在不同压缩速率下单位体积吸收能量与总吸能值大小相差不大,说明改变静态压缩速率对试样的缓冲性能影响甚微。

2.4 瓦楞夹层楞型对复合夹层结构缓冲性能的影响

瓦楞夹层结构的压缩变形主要由芯层决定,有对称变形、倾倒变形和混合变形三种变形模式,如图 10 所示。图 11 为静态压缩速率分别为 12mm/min 和 48mm/min、蜂窝夹层厚度分别为 20mm 和

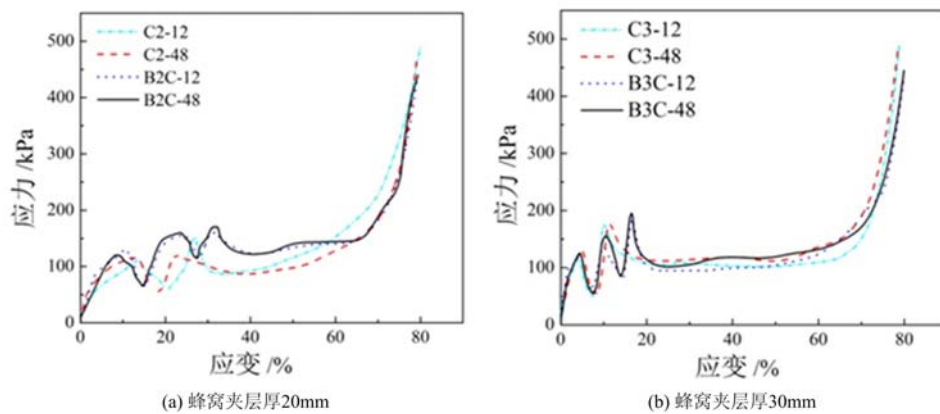


图8 不同压缩速率下的复合夹层结构应力—应变曲线

Fig. 8 Stress and strain curves of the composite sandwich structures at different compression rates

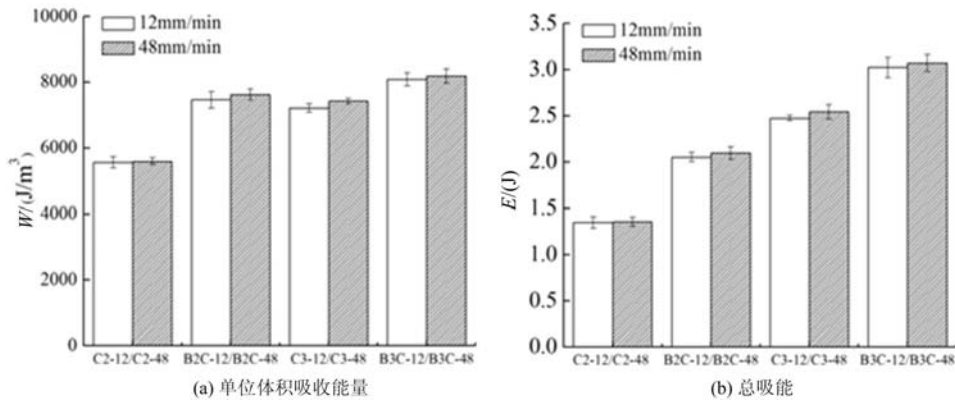


图9 不同压缩速率复合夹层结构能量吸收对比

Fig. 9 Energy absorption comparison of the composite sandwich structures with different compression rates

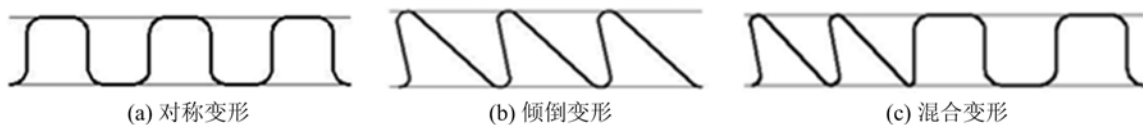


图10 瓦楞夹层结构变形模式

Fig. 10 Deformation modes of corrugation sandwich

30mm 的纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的应力—应变曲线。观察这些曲线发现,在相同压缩速率和蜂窝夹层厚度时,试样的压缩应力—应变曲线差异明显的区域主要在第一个波峰位置,即复合夹层结构的瓦楞夹层部分。结合表1与图11,以B瓦楞复合的试样B2-12、B3-12、B2-48、B3-48的第一个屈服极限值(140kPa、155kPa、140kPa、160kPa)分别大于对应C瓦楞复合的试样C2-12、C3-12、C2-48、C3-48的第一个屈服极限值(110kPa、115kPa、115kPa、130kPa)。但因蜂窝夹层厚度不变,其对应的第二屈服极限值相差较小。图11(b)中静态压缩速率为48mm/min时,C2和B2两者的压缩行为在密实化阶段的差异较大,而C3和B3在密实化阶段的差异却不明显。当压缩速率较低时,楞高大的更容易发生倾倒变形而导致密实化应变变小;当压缩速率较高时,楞高对密实化应变值的影响减小。

图12给出了纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的能量吸收计算结果,对比发现纸B瓦楞-蜂窝复合夹层结构的单位体积吸收能量、总吸能均大于纸C瓦楞-蜂窝复合夹层结构。由于瓦楞纸板受到面外压缩时,瓦楞芯纸需要一定平压强度使内、外面纸受压时保持距离,从而保持横截面的惯性矩,故在静态压缩时瓦楞夹层横截面惯性矩较大吸收的能量多,缓冲吸能性能更好。

2.5 蜂窝夹层厚度对复合夹层结构缓冲性能的影响

图13给出了单、双面纸瓦楞—蜂窝复合夹层结构在不同蜂窝夹层厚度条件下的静态压缩应力—应

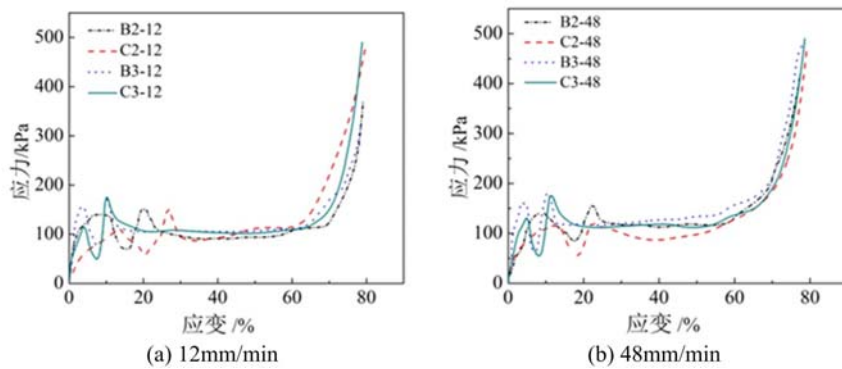


图 11 不同瓦楞的复合夹层结构应力—应变曲线

Fig. 11 Stress and strain curves of the composite sandwich structures with different corrugation types

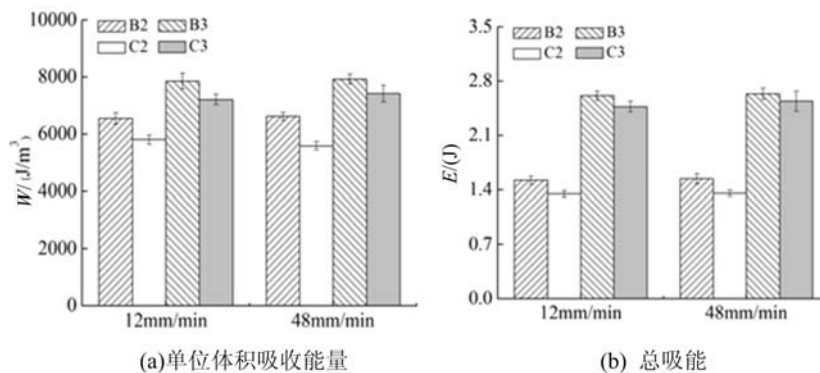


图 12 不同瓦楞的复合夹层结构能量吸收对比

Fig. 12 Energy absorption comparison of the composite sandwich structures with different corrugation types

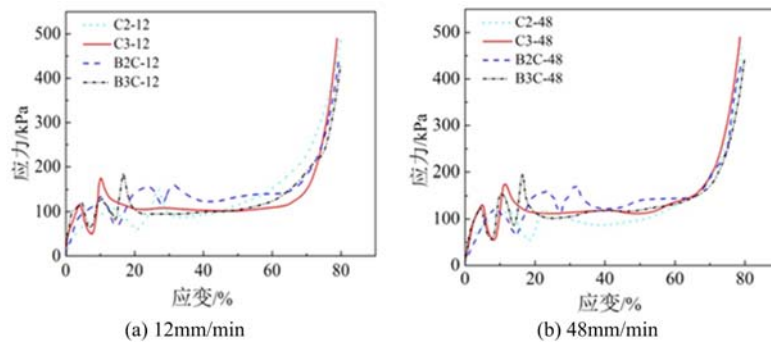


图 13 不同蜂窝夹层厚度的复合夹层结构应力—应变曲线

Fig. 13 Stress and strain curves of the composite sandwich structures with different honeycomb thicknesses

变曲线。观察发现,不同蜂窝夹层厚度的试样在相同压缩速率条件下曲线变化差异较大,屈服强度差异明显。例如,B2C-48 的屈服强度值分别为 120kPa、160kPa、170kPa,对应的应变值为 8.69%、23.73%、32.01%,而 B3C-48 的屈服强度值分别为 125kPa、155kPa、195kPa,对应的应变值为 4.55%、10.61%、16.60%。对比可知,由于前两个屈服强度值分别对应复合结构中 C、B 瓦楞的屈服,B2C-48 与 B3C-48 前两个屈服强度值差异较小。在面外静态压缩过程中,20mm 蜂窝夹层孔壁的长宽比(9.675/20)大于 30mm 蜂窝夹层孔壁长宽比(9.675/30),屈曲不明显,弹性坍塌应力值也较小,所以对于复合结构 B3C-48 和 B2C-48 蜂窝屈服的第三个屈服强度值出现较大差异,B3C-48 大于 B2C-48。以相同速度压缩时,试样的变形量相同,30mm 厚蜂窝原始厚度大于 20mm 厚蜂窝,使得 B3C-48 的屈服强度值对应的应变值均小于 B2C-48。图 14 给出了不同蜂窝夹层厚度复合夹层的能量吸收计算结果,对比可得相同压缩速率条件下,纸瓦楞-3 蜂窝复合夹层结构的单位体积吸收能量和总吸能都大于纸瓦楞-2 蜂窝复合夹层结构。

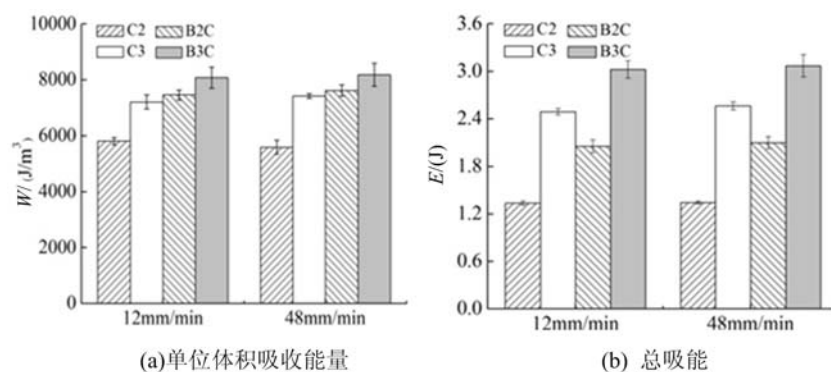


图14 不同蜂窝夹层厚度的复合夹层结构能量吸收对比

Fig. 14 Energy absorption comparison of the composite sandwich structures with different honeycomb thickness

3 结论

(1) 在面外静态压缩过程中,纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的压溃过程是逐层发生的,首先是瓦楞夹层被压溃,随着应力不断增加,蜂窝夹层被压溃,静态压缩速率对同种复合夹层结构的能量吸收特性、缓冲性能影响不大。

(2) 相同压缩速率条件下,B瓦楞夹层的面外承载能力优于C瓦楞夹层,B瓦楞-蜂窝复合夹层结构的总吸能、单位体积吸收能量均高于C瓦楞-蜂窝复合夹层结构,缓冲性能较好。

(3) 相同压缩速率条件下,改变蜂窝夹层厚度,对纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的缓冲性能有明显的影响,纸瓦楞-3蜂窝复合夹层结构缓冲性能优于纸瓦楞-2蜂窝复合夹层结构。

参考文献:

- [1] Talbi N, Batti A, Ayad R, et al. An analytical homogenization model for finite element modelling of corrugated cardboard[J]. Composite Structures, 2009, 88(2):280—289.
- [2] 付云岗, 郭彦峰, 王忠民. 瓦楞纸板的压缩变形及吸能特性研究[J]. 中国造纸学报, 2015, 30(3):31—35 (FU Yungang, GUO Yanfeng, WANG Zhongmin. Compression deformation and energy absorption properties of corrugated paperboard[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2015, 30(3):31—35 (in Chinese))
- [3] Nordstrand T, Allansson A. Stability and collapse of corrugated board panels, numerical and experimental analysis[C]. Proceedings of 6th International Conference on Sandwich Structures, USA, Florida, 2003:202—210.
- [4] 刘晔, 王振林, 高德, 等. 三重组合瓦楞纸板静态平压性能的理论建模[J]. 包装工程, 2004, 25(5):162—164 (LIU Ye, WANG Zhenlin, GAO De, et al. Modeling of the static plain compression performance of triple wall corrugated fiber board[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(5):162—164 (in Chinese))
- [5] Rejab M R M, Cantwell W J. The mechanical behavior of corrugated-core sandwich panels[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 47:267—277.
- [6] Sek M, Rouillard V, Crawford S, et al. Enhancement of cushioning performance with paperboard crumple inserts [J]. Packaging Technology & Science, 2005, 18(5):273—278.
- [7] 高德, 王振林, 陈乃立, 等. B楞双层瓦楞纸板衬垫平压缓冲动态性能建模[J]. 振动工程学报, 2001, 14(2):172—178 (GAO De, WANG Zhenlin, CHEN Naili, et al. The dynamic modeling of flat compression cushioning ade up of B-flute double-wall corrugated fiberboard [J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(2):172—178 (in Chinese))
- [8] 王冬梅, 柏子游, 龚户祥, 等. 瓦楞夹层结构动态力学性能评估[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3):94—97 (WANG Dongmei, BAI Ziyu, GONG Huxiang, et al. Evaluation of dynamic mechanical properties of corrugated sandwich structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(3):94—97 (in Chinese))
- [9] Guo Yanfeng, Xu Wencai, Fu Yungang, et al. Comparison studies on dynamic packaging properties of corrugated paperboard pads[J]. Journal of Engineering, 2010, 2(5):378—386.

- [10] 王志伟,姚著. 蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12):49—55 (WANG Zhiwei, YAO Zhu. Experimental investigation and finite element analysis for impact compression of honeycomb paperboards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12):49—55 (in Chinese))
- [11] 卢富德,高德. 蜂窝纸板一维动态本构关系及应用[J]. 振动工程学报, 2016, 29(1):38—44 (LU Fude, GAO De. One-dimension constitutive relationship and its application for honeycomb paperboard[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1):38—44 (in Chinese))
- [12] Kobayashi H, Daimaruya M, Kobayashi T. Dynamic and static compression tests for paper honeycomb cores and absorbed energy[J]. JSME International Journal, 1998, 41(3):338—344.
- [13] 宋俊杰,尹志宏,彭键林. 基于 Marc 的蜂窝纸芯力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(9):164—166 (SONG Junjie, YIN Zhihong, PENG Jianlin. Mechanical performance of paper honeycomb core based on marc software [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9):164—166 (in Chinese))
- [14] 王刚,李喜德. 低速冲击下蜂窝铝板的表面变形检测及其吸能特性研究[J]. 实验力学, 2011, 26(5):573—581 (WANG Gang, LI Xide. On the surface deformation measurement and energy absorption of a honeycomb panel subjected to low-velocity impact[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):573—581 (in Chinese))
- [15] 范志庚,卢立新,王军,等. 蜂窝纸板疲劳累积损伤模型实验研究[J]. 包装工程, 2015, 36(5):59—63 (FAN Zhigeng, LU Lixin, WANG Jun, et al. Experimental research on honeycomb paperboard fatigue cumulative damage model[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5):59—63 (in Chinese))
- [16] 程军,曾伟明,方如华,等. 金属蜂窝夹芯板等效弹性模量的实验测试[J]. 实验力学, 2003, 18(1):50—55 (CEHNG Jun, ZENG Weiming, FANG Ruhua, et al. Experimental measurement of metal honeycomb core sandwich panel equivalent modulus of elasticity[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(1):50—55 (in Chinese))
- [17] 李厚民,朱若燕,杨晓俊,等. 蜂窝纸板与瓦楞纸板组合结构缓冲特性研究[J]. 包装工程, 2005, 26(4):9—11 (LI Houmin, ZHU Ruoyan, YANG Xiaojun, et al. Research on the cushioning properties of combination of honeycomb paperboard and corrugated paperboard[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(4):9—11 (in Chinese))
- [18] 耿敏,熊宏智,葛效尧. 蜂窝纸板与瓦楞纸板的复合刚度试验及分析[J]. 北京轻工业学院学报, 2006, 27(1):11—16 (GENG Min, XIONG Hongzhi, GE Xiaoyao. Test and analysis for rigidity of combination of honeycomb fibreboard and corrugated fibreboard[J]. Journal of Beijing institute of Light Industry, 2006, 27(1):11—16 (in Chinese))
- [19] 蔡四维. 复合材料结构力学[M]. 北京:人民交通出版社,1987 (CAI Siwei. Structural mechanics of composite materials[M]. Beijing: China Communications Press, 1987 (in Chinese))
- [20] 樊彦斌,王之烁. 蜂窝结构异面变形动态塑性坍塌力学[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(11):1464—1468 (FAN Yanbing, WANG Zhishuo. Dynamic plastic collapse mechanical model of honeycomb structures out-plane deformation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(11):1464—1468 (in Chinese))
- [21] Eyvazian A, Habibi M K, Hamouda A M, et al. Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes[J]. Materials and Design, 2014, 54:1028—1038.
- [22] 李志斌,虞吉林,郑志军,等. 薄壁管及其泡沫金属填充结构耐撞性的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(1):77—86 (LI Zhibing, YU Jilin, ZHENG Zhijun, et al. An experimental study on the crashworthiness of thin-walled tubes and their metallic foam-filled structures[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(1):77—86 (in Chinese))

Cushioning performance of composite sandwich structures with paper corrugation and honeycomb cores under static compression

WANG Xing-ning, GUO Yan-feng, FU Yun-gang, XIA Rong-hou, WANG Hui-chao

(Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Aiming at the cushioning performance and energy absorption of the composite sandwich structures with paper corrugation and honeycomb cores, the static compression behaviors and deformation modes of sinusoidal corrugation sandwich structure, regular hexagonal honeycomb sandwich structure and their composite sandwich structures are analyzed experimentally. The values of the total energy absorption, specific energy absorption, unit volume and unit area energy absorption of the composite sandwich structures are calculated, and the influences of compression rate, corrugation flute and thickness of honeycomb core on the cushioning performance of the composite sandwich structures are also investigated. The results show that, the composite sandwich structures with paper corrugation and honeycomb cores are crushed layer by layer due to the difference of the yield strengths of sandwiches, and the honeycomb cores are crushed after the collapsing of corrugation cores. The influence of static compression rate on the cushioning performance of the composite sandwich structure with paper corrugation and honeycomb core is not obvious. Under the same condition of compression rates, the changes of corrugation flute and the thickness of honeycomb have significant influences on the energy absorption of these composite sandwich structures. Moreover, the composite sandwich structures consisting of paper corrugation sandwich with high inertia moment and honeycomb sandwich with high thickness have favorable cushioning performance.

Keywords: composite sandwich structures; paper corrugation; paper honeycomb; static compression; cushioning performance