

# 蜂窝纸板弯曲破坏模式和机理研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2023.04.008

黄欣洁<sup>1,2</sup> 王冬梅<sup>2</sup>  
郭红革<sup>1</sup> 廖强华<sup>3</sup>

1. 齐鲁工业大学  
轻工学部  
山东 济南 250353
2. 深圳职业技术学院  
传播工程学院  
广东 深圳 518055
3. 深圳职业技术学院  
机电工程学院  
广东 深圳 518055

**摘要:** 基于蜂窝纸板的结构和受力情况,对蜂窝纸板进行三点弯曲实验,分析纸蜂窝夹层结构的弯曲破坏模式和弯曲破坏过程,探究纸蜂窝夹层结构弯曲变形机理。结果表明:蜂窝纸板的弯曲破坏模式主要有面板屈曲褶皱和局部塌陷两种;蜂窝纸板的弯曲破坏过程分为5个阶段;蜂窝纸板的弯曲破坏模式与面板屈曲、蜂窝胞元壁受压形成塑性铰以及蜂窝胞元壁向中间挤压靠近有关。

**关键词:** 蜂窝纸板;三点弯曲;弯曲破坏

**中图分类号:** TB487; TB484.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2023)04-0068-07

**引文格式:** 黄欣洁,王冬梅,郭红革,等.蜂窝纸板弯曲破坏模式和机理研究[J].包装学报,2023,15(4):68-74.

## 1 研究背景

蜂窝夹层结构由上下面板和蜂窝芯层黏结而成,因其具有质量轻、高比强度、高比刚度、抗振、隔热、隔声、耐冲击等优点,而广泛应用于航空航天、轨道交通、建筑等领域<sup>[1-5]</sup>。蜂窝纸板具有材料来源广泛、价格低廉、可完全回收利用等优点,是一种性能优异的环境友好型材料,在运输包装领域得到广泛应用<sup>[6-7]</sup>。我国美的、海尔、长虹等企业已经形成较为成熟的、用于包装和运输产品的蜂窝纸板包装形式<sup>[8]</sup>。蜂窝纸板还可用作空投包装材料<sup>[9-10]</sup>。

蜂窝纸板作为包装件不仅要有良好的缓冲性能,还要有一定的抗弯性能。已有专家学者对纸蜂窝夹层结构的缓冲性能进行了大量研究,在面内压缩、面外压缩、冲击、振动等<sup>[11-15]</sup>方面取得了丰富的研究成果。受纸质材料结构和性能以及纸蜂窝夹层结构性能的影响,蜂窝纸板的弯曲过程复杂且不易于控制。

目前,国内外对金属蜂窝板和复合材料蜂窝板的抗弯性能有一定研究,但关于蜂窝纸板的抗弯性能研究较少,且大多是通过改变影响因素对纸蜂窝夹层材料进行弯曲实验,得到载荷-位移曲线,以此说明影响因素与抗弯性能的关系。Lu C.等<sup>[16]</sup>对碳纤维复合蜂窝板进行三点弯曲实验,并用有限元分析弯曲承载性能。结果表明,受载时,复合蜂窝板的上面板应力分布远高于芯层和下面板,其破坏模式主要是上面板开裂和面板芯层脱胶。H. Fatin等<sup>[17]</sup>对用作支架的多孔复合梁进行三点弯曲实验,发现梁开裂是先从下面板逐渐延伸至芯层及上面板。A. Petras等<sup>[18]</sup>研究了以Nomex蜂窝芯为芯层、玻璃钢为蒙皮的蜂窝板失效模式,通过三点弯曲实验并应用经典梁理论,得到蜂窝夹层结构失效模型和失效模式图。Wei X. Y.等<sup>[19]</sup>利用碳纤维/环氧树脂预浸料制造碳纤维蜂窝板,并分析6种失效模式,在二维失效模式图的基础上建立三维失效模式图,直观揭示了从

收稿日期:2023-01-10

作者简介:黄欣洁(1997-),女,山东菏泽人,齐鲁工业大学、深圳职业技术学院硕士生,主要研究方向为运输包装,  
E-mail:17854117642@163.com

通信作者:王冬梅(1976-),女,河北献县人,深圳职业技术学院教授,博士,主要从事包装结构设计,运输包装研究,  
E-mail:szybz202202@163.com

一种失效模式向另一种失效模式的转变过程。Sun G. Y. 等<sup>[20]</sup>对铝蜂窝板进行三点弯曲实验,发现弯曲过程中该板会发生多种形式的夹层结构损伤,但最终造成夹层结构破坏失效的是加载头下方蜂窝坍塌和加载头附近蜂窝坍塌两种方式,这两种坍塌方式受蜂窝芯厚度和面板厚度的影响。E. E. Gdoutos 等<sup>[21]</sup>研究了复合材料夹层梁在三点 and 四点弯曲下的破坏行为,发现夹层梁失效模式为面板起皱、压痕失效和芯部失效,与分析预测模型比较后,还发现失效模式的起始、传播和相互作用取决于载荷类型、组成材料特性和几何尺寸。上述研究对于探究蜂窝纸板的弯曲破坏模式和弯曲变形机理有一定的借鉴意义。然而,纸质材料是由多层纤维堆积结合而形成的各向异性材料,沿纸张纵向以化学键结合,沿纸张横向以氢键结合,键力的不同使蜂窝纸板有很强的方向性特点<sup>[22]</sup>,并且蜂窝纸板黏结强度、生产工艺造成的产品缺陷使蜂窝纸板弯曲变形情况更加复杂,使蜂窝纸板弯曲破坏模式难以预测、弯曲性能难以评估。故本研究借鉴上述研究方法,从蜂窝纸板的结构和受力情况对蜂窝纸板弯曲破坏过程和弯曲破坏模式进行分析,以期对蜂窝纸板结构优化和应用提供一定参考。

## 2 实验

### 2.1 材料与仪器

主要材料:蜂窝纸板的尺寸为 200 mm × 60 mm (长 × 宽)。面纸定量为 230 g/m<sup>2</sup> 的试样购于广州荷力胜蜂窝制品有限公司,其余试样购于惠州锦旺包装环保材料有限公司。不同蜂窝纸板试样规格如表 1 所示。

表 1 不同蜂窝纸板试样规格

Table 1 Parameters of different honeycomb paperboard specimens

名 称	面纸定量 / (g·m <sup>-2</sup> )	芯纸定量 / (g·m <sup>-2</sup> )	纸板厚度 / mm	蜂窝胞元 边长 /mm
230-110-10-6	230	110	10	6
230-110-10-8	230	110	10	8
230-110-10-10	230	110	10	10
230-110-10-12	230	110	10	12
160-100-20-6	160	110	20	6
350-100-20-6	350	100	20	6
520-100-20-6	520	100	20	6
600-100-20-6	600	100	20	6
1000-100-20-6	1000	100	20	6
160-100-10-6	160	100	10	6
160-100-30-6	160	100	30	6
160-100-40-6	160	100	40	6

主要设备:恒温恒湿箱, LB-CB80 型, 深圳蓝博检测仪器有限公司; 万能试验机, M-3050 型, 深圳市瑞格尔仪器有限公司。

### 2.2 测试方法

参照 GB/T 4857.2—2005《包装 运输包装件基本试验 第 2 部分 温湿度调节处理》<sup>[23]</sup>, 利用恒温恒湿箱将蜂窝纸板在 23 ℃、50% 相对湿度环境条件下处理 48 h。参照 GB/T 1456—2021《夹层结构弯曲性能试验方法》<sup>[24]</sup>, 将试样从恒温恒湿箱中取出, 在 5 min 内利用万能试验机在加载速度为 5 mm/min, 跨距分别为 160, 140, 120, 100, 80 mm 的条件下对试样进行三点弯曲测试, 得到载荷-位移曲线, 并观察实验过程中试样弯曲破坏情况。

## 3 蜂窝纸板的弯曲破坏模式

为探究蜂窝纸板的弯曲破坏模式, 本研究对不同面板厚度、芯层高度、厚跨比的蜂窝纸板试样进行三点弯曲测试。测试结果表明, 蜂窝纸板受载弯曲时, 会出现不同的损伤形式, 例如支撑架会出现微小的塑性铰, 蜂窝胞元壁出现小幅度扭转等, 但这些微小损伤并不会引起蜂窝纸板弯曲失效。测试过程中出现的弯曲破坏模式有面板屈曲褶皱、局部塌陷、面芯脱胶、蜂窝芯剪切 4 种, 如图 1 所示。4 种弯曲破坏模式为竞争机制, 蜂窝纸板弯曲破坏模式和面板刚度、芯纸刚度、芯层厚度、黏结强度、跨度有关。在芯纸刚度小、芯层较厚且跨度较小情况下, 蜂窝纸板弯曲破坏模式主要是局部塌陷; 在跨度较大情况下, 蜂窝纸板弯曲破坏模式主要是面板屈曲褶皱; 面芯脱胶和蜂窝芯剪切两种破坏模式出现次数非常少。故蜂窝纸板的弯曲破坏模式以面板屈曲褶皱、局部塌陷为主。

1) 面板屈曲褶皱。蜂窝纸板受载弯曲时, 压头下方靠近上面板处的蜂窝胞元壁形成小的塑性铰, 面板向下屈曲并从蜂窝胞元单层壁处嵌入蜂窝胞元内, 随着压头继续下移, 面板发生弯折。受蜂窝芯刚度和黏结强度影响, 面板可能向上或向下弯折。若蜂窝芯刚度较小、黏结强度较好, 面板向下弯折, 压头下的蜂窝胞元壁挤压在一起, 且随着位移的增加, 附近蜂窝胞元壁继续向中间挤压靠近, 进而使压头附近面板继续屈曲, 最终造成面板屈曲褶皱破坏模式 (见图 1a)。若蜂窝芯刚度较大、黏结强度较差, 在压头附近的面板会与芯层脱黏, 面板向上凸起并折弯, 蜂窝胞元壁很容易挤压在一起, 造成载荷急剧下降,



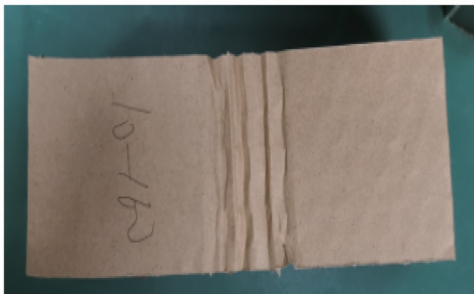
且随着位移的增加,附近蜂窝胞元壁向中间挤压靠近,面板继续屈曲,最终形成面板屈曲褶皱。

2) 局部坍塌。弯曲加载过程中,蜂窝芯刚度差、厚度大导致压头下方蜂窝胞元壁形成塑性铰,随着压头下移,压头下方蜂窝芯局部坍塌,坍塌宽度几乎等于压头宽度(见图1b)。

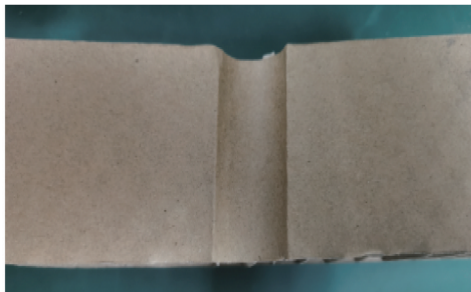
3) 面芯脱胶。蜂窝纸板的面板和蜂窝芯的接触面积仅为面板的1%~5%<sup>[25]</sup>,甚至更小,因此二者之间的黏结质量会对蜂窝纸板的破坏模式造成较大的影响。蜂窝纸板受载弯曲时,面板和蜂窝芯层的黏结薄弱处率先发生脱胶,蜂窝胞元壁会在脱胶处挤压靠近,蜂窝纸板的弯曲破坏可能发生在压头之外的地方(见图1c)。

4) 蜂窝芯剪切。蜂窝芯剪切是由三点弯曲加载载荷方向与支撑受力方向不一致引起的。通过实验观察到,蜂窝纸板受载弯曲时,蜂窝芯层受到上下两个方向的力相互作用,蜂窝双层壁的黏结缺陷或蜂窝芯层的胞壁缺陷造成蜂窝芯剪切(见图1d)。蜂窝芯剪切多发生于支撑支架和加载压头中间部位。

值得注意的是,蜂窝纸板在弯曲破坏过程中并未出现上下面板的屈服断裂,但当面板厚度增加,面板发生屈曲褶皱时,上面板出现轻微分层现象,如图2所示。



a) 面板屈曲褶皱



b) 局部塌陷



c) 面芯脱胶



d) 蜂窝芯剪切

图1 蜂窝纸板弯曲破坏模式图

Fig. 1 Bending failure mode of honeycomb cardboard



图2 屈曲褶皱时厚面板的轻微分层图

Fig. 2 Slight delamination diagram of thick panels at flexural folds

#### 4 蜂窝纸板的受载弯曲过程

本研究对不同面纸厚度、芯层高度、厚跨比的蜂窝纸板进行三点弯曲测试,蜂窝纸板载荷-位移曲线如图3所示。在弯曲破坏过程中,蜂窝纸板芯层因受压而形成塑性铰,进而发生面板弯折、面芯脱胶、蜂窝芯挤压靠近,受芯层和面纸强度、黏结强度、缺陷、厚度、跨距等影响,所有现象发生的顺序有所

不同, 且不会都发生。由图 3 可知, 不同规格的蜂窝纸板载荷-位移曲线的变化趋势大体相同, 随着面纸定量、芯层高度的增加和蜂窝胞元边长的减小, 蜂窝纸板的极限弯曲载荷会增大。

分析蜂窝纸板试样 1000-100-20-6 在跨距为 160 mm 时的三点弯曲载荷-位移曲线可知, 蜂窝纸板的载荷-位移曲线大致可以分为 5 个阶段 (见图 4)。

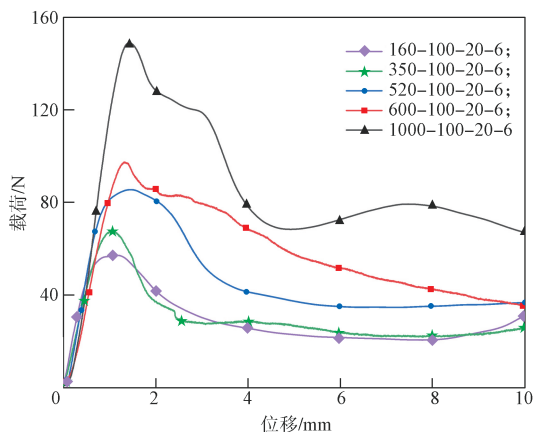
1) 第一阶段 (AB)。蜂窝纸板受载初期, 纸板发生弹性形变, 纸板的弹性模量等于载荷-位移曲线的斜率。

2) 第二阶段 (BC)。当载荷加载到一定程度时, 由于面板和芯层之间的胶黏作用, 压头下方蜂窝芯带动面板有向下屈曲弯折的趋势。若黏结强度较差, 则压头外侧的面板会发生局部脱胶, 脱胶处面板对蜂窝胞元壁挤压靠近的阻力减小, 载荷急剧下降。若黏结强度良好, 压头下方蜂窝胞元壁产生塑性铰, 面板有向下弯折并嵌入蜂窝胞元壁的趋势, 蜂窝胞元壁挤压靠近的阻力大大降低, 载荷急剧下降。

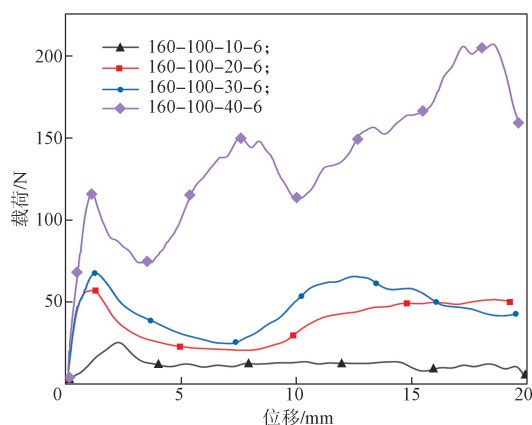
3) 第三阶段 (CD)。随着位移增大, 蜂窝胞元壁向中间靠近挤压, 有屈曲弯折趋势的面板发生弯折。此阶段, 载荷的变化不大, 位移受跨距和芯层厚度的影响。

4) 第四阶段 (DE)。当面板弯折后, 随着位移的增加, 两侧蜂窝胞元壁会继续向中间挤压靠近, 此时由于压头两侧蜂窝胞元上的面板未发生屈曲, 面板会阻碍蜂窝胞元壁挤压靠近, 载荷上升。

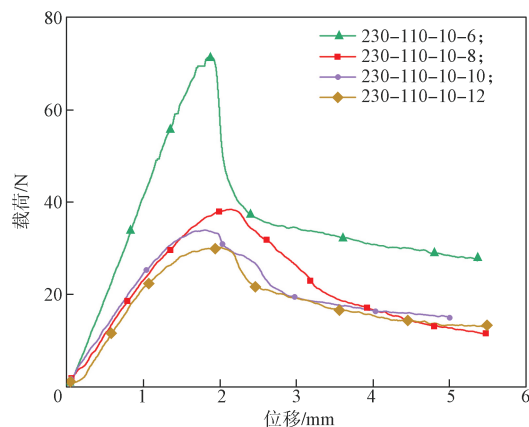
5) 第五阶段 (EF)。随着位移继续增大, 压头下方两侧面板会继续屈曲弯折。经极限弯曲载荷后, 有几个明显载荷上升阶段就有几次面板弯折发生。此阶段的位移很大, 蜂窝纸板已经被严重破坏而无法使用。



a) 不同面纸定量



b) 不同芯层高度



c) 不同厚跨比

图 3 不同规格的蜂窝纸板载荷位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of honeycomb cardboard of different specifications

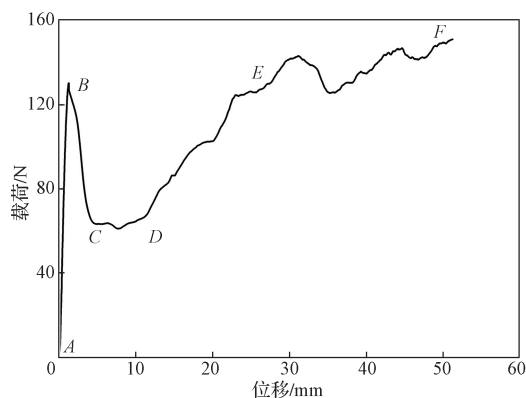


图 4 蜂窝纸板受载弯曲的完整载荷-位移曲线

Fig. 4 Complete bending load-displacement curve of honeycomb paperboard

## 5 蜂窝纸板弯曲破坏机理

纸张是由纤维、填料和胶料等原料混合制浆, 在

网上交错形成<sup>[26]</sup>。纸张纤维内以化学键结合,纤维间以氢键结合,如图5所示。分子内化学键强度大于分子间氢键,因而纸张沿长纤维排布方向有良好的力学性能,可以承受较大拉伸力且不易断裂,但纤维间力学性能相对较弱。

蜂窝纸板受载弯曲时,上面板承受压应力,下面板承受拉应力,芯层承受剪切应力<sup>[27]</sup>。结合试验分析及课题组对蜂窝纸板压缩破坏机理的研究结果,发现蜂窝纸板受载弯曲时出现不同弯曲破坏模式的主要原因是纸张纤维受力导致纸张破坏<sup>[22, 28]</sup>。如图6a所示,纸张受到垂直纤维方向的力时,纤维之间存在方向相反的作用力,导致纤维之间氢键断裂,使纸板出现微小裂纹,甚至使纸张开裂。当面板强度较大、芯纸强度较小时,弯曲过程中,蜂窝胞元壁易沿芯纸厚度方向倾斜破裂。如图6b所示,纸张受拉伸力时,纸张纤维会受到两个方向相反的拉力作用,使极少的纤维断裂,而不会导致纸张断裂。对于蜂窝纸板受载弯曲来说,面板受拉力或压力的作用时,纸张纤维会出现断裂现象,但蜂窝纸板不会出现面板屈曲断裂现象。这是因为蜂窝纸板独特的结构性能,芯纸承受了大部分弯曲载荷,并且沿纤维方向键力较强。如图6c所示,当纸张受到压力作用时,纸张纤维发生剪切现象,造成纸张剪切变形<sup>[26]</sup>,最明显的就是蜂窝胞元壁形成塑性铰,面板分层。

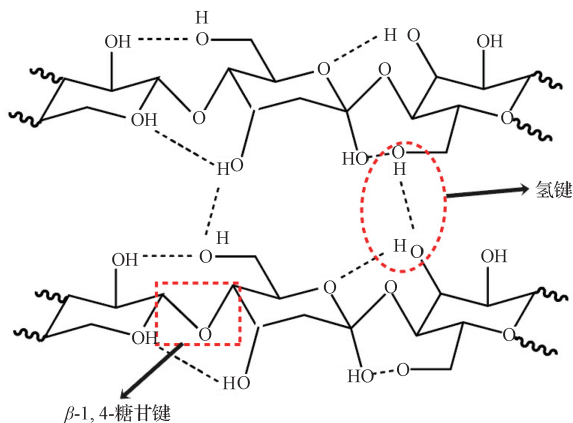


图5 纸张纤维结合方式图

Fig. 5 Diagram of the paper fibre bonding method

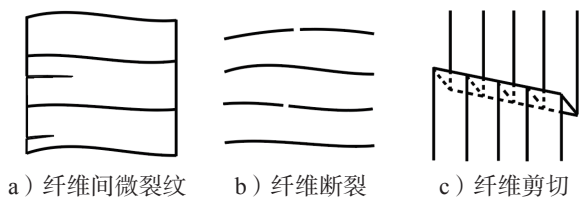


图6 纸张纤维破坏模式图

Fig. 6 Diagram of paper fibre damage patterns

## 6 结语

本研究基于蜂窝纸板结构和受力情况对蜂窝纸板的弯曲破坏模式、弯曲破坏过程进行分析,并从纤维受力破坏角度分析蜂窝纸板弯曲破坏机理。结果表明,蜂窝纸板的弯曲破坏模式有面板屈曲褶皱、局部塌陷、面芯脱胶、蜂窝芯剪切4种,但面芯脱胶和蜂窝芯剪切这两种破坏模式出现概率很小;蜂窝纸板弯曲破坏过程可以分为5个阶段。事实上,蜂窝纸板弯曲破坏过程非常复杂,还受环境温湿度、黏结剂种类、老化等因素影响。这些因素对蜂窝纸板弯曲性能的影响还有待研究。

## 参考文献:

- [1] HE M F, HU W B. A Study on Composite Honeycomb Sandwich Panel Structure[J]. Materials & Design, 2008, 29(3): 709-713.
- [2] LI Z D, WANG Z G, WANG X X, et al. Bending Behavior of Sandwich Beam with Tailored Hierarchical Honeycomb Cores[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 157: 107001.
- [3] WANG J F, SHI C Y, YANG N, et al. Strength, Stiffness, and Panel Peeling Strength of Carbon Fiber-Reinforced Composite Sandwich Structures with Aluminum Honeycomb Cores for Vehicle Body[J]. Composite Structures, 2018, 184: 1189-1196.
- [4] SHAH U B, KAPANIA R K. Failure of Hexagonal and Triangular Honeycomb Core Sandwich Panels[J]. AIAA Journal, 2020, 58: 4923-4940.
- [5] MOES C, HIBBARD G. De-Compositing Honeycombs: Rheology-Architecture Relationships in Melt-Stretched Sandwich Panels[J]. Polymer, 2020, 196: 122481.
- [6] WANG D M, BAI Z Y, LIAO Q H. 3D Energy Absorption Diagram Construction of Paper Honeycomb Sandwich Panel[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 4067062.
- [7] 张雪, 张红杰, 程芸, 等. 纸基包装材料的研究进展、应用现状及展望[J]. 中国造纸, 2020, 39(11): 53-69.  
ZHANG Xue, ZHANG Hongjie, CHENG Yun, et al. Research Progress, Application Status and Prospects of Paper-Based Packaging Materials[J]. China Pulp & Paper, 2020, 39(11): 53-69.
- [8] 胡亚洲. 美的蜂窝材料研究与应用[J]. 上海包装, 2017(6): 13-15.  
HU Yazhou. Research and Application of Midea



- Honeycomb Materials[J]. Shanghai Packaging, 2017(6): 13–15.
- [9] 孙杰华, 蒋明明, 赵西友. 中件空投托盘缓冲包装设计[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 154–159.  
SUN Jiehua, JIANG Mingming, ZHAO Xiyu. Design of Middle Airdrop Pallets Buffer Packaging[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 154–159.
- [10] 董新东, 王宏, 林浩, 等. 中件空投平台缓冲材料及技术[J]. 包装工程, 2016, 37(17): 30–33.  
DONG Xindong, WANG Hong, LIN Hao, et al. Cushioning Materials and Technology of Middle-Sized Pack Airdrop Platform[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(17): 30–33.
- [11] CRICRÌ G, PERRELLA M, CALÌ C. Honeycomb Failure Processes Under In-Plane Loading[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45(1): 1079–1090.
- [12] MEDIA W D, SCHOOL C, POLYTECHNIC S, et al. Out-of-Plane Compressive Properties of Hexagonal Paper Honeycombs[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 115–119.
- [13] WANG D M. Impact Behavior and Energy Absorption of Paper Honeycomb Sandwich Panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 110–114.
- [14] TOPKAYA T, SOLMAZ M Y. Investigation of Low Velocity Impact Behaviors of Honeycomb Sandwich Composites[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(7): 3161–3167.
- [15] 杨瑞, 郭彦峰, 王冬梅, 等. 纸蜂窝夹层板主共振频率的影响因素[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 117–123.  
YANG Rui, GUO Yanfeng, WANG Dongmei, et al. Influence Factors of Main Resonance Frequency for Paper Honeycomb Sandwich Plates[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 117–123.
- [16] LU C, ZHAO M Y, JIE L, et al. Stress Distribution on Composite Honeycomb Sandwich Structure Suffered from Bending Load[J]. Procedia Engineering, 2015, 99: 405–412.
- [17] FATIN H, MITSUGU T. Deformation Mechanism of Porous Composite Sandwich Beam for Orthopaedical Application Under Three-Point Bending[J]. Composite Structures, 2022, 281: 114983.
- [18] PETRAS A, SUTCLIFFE M P F. Failure Mode Maps for Honeycomb Sandwich Panels[J]. Composite Structures, 1999, 44(4): 237–252.
- [19] WEI X Y, WU Q Q, GAO Y, et al. Bending Characteristics of All-Composite Hexagon Honeycomb Sandwich Beams: Experimental Tests and a Three-Dimensional Failure Mechanism Map[J]. Mechanics of Materials, 2020, 148: 103401.
- [20] SUN G Y, HUO X T, CHEN D D, et al. Experimental and Numerical Study on Honeycomb Sandwich Panels Under Bending and In-Panel Compression[J]. Materials & Design, 2017, 133: 154–168.
- [21] GDOUTOS E E, DANIEL I M. Failure of Sandwich Structures[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 40(2): 35–46.
- [22] 张旭, 闫玥儿, 唐颐. 纸张脱酸中硅烷偶联剂与纤维素的相互作用研究[J]. 复旦学报(自然科学版), 2022, 61(5): 598–607.  
ZHANG Xu, YAN Yueer, TANG Yi. Interaction Between Silane and Cellulose in Aminosilane-Based Paper Deacidification[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2022, 61(5): 598–607.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 包装运输包装件基本试验 第2部分: 温湿度调节处理: GB/T 4857.2—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1–2.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Packaging Basic Tests for Transport Packages Part 2: Temperature and Humidity Conditioning: GB/T 4857.2—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1–2.
- [24] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 夹层结构弯曲性能试验方法: GB/T 1456—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 2.  
State Administrator for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions: GB/T 1456—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 2.
- [25] 卢翔, 曾琼芝. 湿热环境下含脱粘损伤蜂窝夹芯材料弯曲性能研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(1): 146–154.  
LU Xiang, ZENG Qiongzi. Study on Bending Properties of Honeycomb Sandwich Materials with Debonding Damage Under Hygrothermal Environment[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(1): 146–154.
- [26] 张美芳, 王亚静. 制浆造纸技术研究[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(1): 6–7, 14.  
ZHANG Meifang, WANG Yajing. Research on Pulp and Paper Technology[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2021, 50(1): 6–7, 14.

[27] MEDINA S A, MEZA J M, KAWASHITA L F. Damage Sequence of Honeycomb Sandwich Panels Under Bending Loading: Experimental and Numerical Investigation[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2020, 39(5/6): 175–192.

[28] 王冬梅. 蜂窝纸板压缩破坏机理研究 [J]. 包装工程,

2006, 27(1): 37–39.

WANG Dongmei. Compression Breakage Properties Research on the Honeycomb Fibreboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 37–39.

(责任编辑: 邓 彬)

## Study on Bending Failure Mode and Mechanism of Honeycomb Paperboard

HUANG Xinjie<sup>1,2</sup>, WANG Dongmei<sup>2</sup>, GUO Hongge<sup>1</sup>, LIAO Qianghua<sup>3</sup>

( 1. Faculty of Light Industry, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China;

2. School of Communication, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen Guangdong 518055, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen Guangdong 518055, China )

**Abstract:** Three-point bending experiments were carried out on honeycomb paperboard, and its bending failure mode and process were analyzed based on the structure and force of honeycomb paperboard to investigate the bending failure mode and mechanism of paper honeycomb sandwich structure. It was found that the bending failure modes of honeycomb paperboard mainly included panel buckling and local collapse. The bending failure process of honeycomb paperboard was divided into five stages. The bending failure mode of honeycomb paperboard was related to panel buckling, plastic hinge formation and squeezing towards the center by compression of the honeycomb cell walls.

**Keywords:** honeycomb paperboard; three-point bending; bending failure