

纸蜂窝夹芯复合板材静态缓冲性能研究

张衬英, 杨小俊, 叶竹君, 覃路韦, 张斌
(湖北工业大学, 武汉 430068)

摘要: **目的** 为了新型纸蜂窝夹芯复合板材在运输包装中的推广应用, 对新型泡状纸蜂窝夹芯复合板和纸蜂窝夹芯复合平板的缓冲性能和吸能特性进行研究。**方法** 主要通过静态压缩实验, 研究不同芯高的纸蜂窝结构类板材的应力-应变曲线、总能量吸收图、单位体积能量吸收图和缓冲系数-应变曲线, 分析结构和芯高对板材静态压缩性能的影响。**结果** 数据表明同种芯高的板材, 纸蜂窝夹芯复合平板的应力峰值稍高; 纸蜂窝夹芯复合平板的能量吸收、单位体积能量吸收最好; 泡状纸蜂窝夹芯板由于泡结构的作用, 缓冲性能大大增强。**结论** 纸蜂窝夹芯复合平板的平压强度最好, 而泡状纸蜂窝夹芯复合板的缓冲性能优于同等结构的蜂窝纸板, 2种板材都有很好的应用前景。

关键词: 泡状纸蜂窝; 纸蜂窝; 夹芯复合平板; 静态压缩; 缓冲性能

中图分类号: TB484.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)03-0115-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.017

Static Cushioning Performance of Paper Honeycomb Sandwich Composite Boards

ZHANG Chen-ying, YANG Xiao-jun, YE Zhu-jun, QIN Lu-wei, ZHANG Bin

(Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: The work aims to research the cushioning performance and energy absorption characteristics of new bubble paper honeycomb sandwich composite board and paper honeycomb sandwich composite board to widely use the new honeycomb sandwich composite board in transportation packaging. The stress-strain curves, total energy absorption charts, unit volume energy absorption charts and cushioning coefficient-strain curves of honeycomb structural boards with different core heights were studied by static compression experiments to analyze the effects of structure and core heights on the static compression properties of honeycomb structural boards. The data show that the peak stress of paper honeycomb sandwich composite boards was slightly higher than other boards with the same core height. The total energy absorption and the energy absorption per unit volume of paper honeycomb sandwich composite boards were the best. Due to the effect of bubbles structure, the cushioning property of bubble paper honeycomb sandwich composite board was greatly enhanced. Therefore, it is concluded that the paper honeycomb sandwich composite boards have the best flat compression strength and the cushioning performance of the bubble paper honeycomb sandwich composite board is better than that of the honeycomb paperboard with the same structure. Both of them have good application prospects.

KEY WORDS: bubble paper honeycomb; paper honeycomb; sandwich composite board; static compression; cushioning properties

收稿日期: 2019-10-22

基金项目: 湖北省技术创新专项(重大项目)(2018AAA026)

作者简介: 张衬英(1990—), 女, 湖北工业大学硕士生, 主攻缓冲包装设计。

通信作者: 杨小俊(1970—), 女, 湖北工业大学副教授, 主要研究方向为运输包装。

蜂窝夹层结构材料质量轻、强度高,而纸蜂窝夹层结构材料又有环保、可回收利用等优点,在运输包装中得到了广泛的应用,其中最具代表性的就是蜂窝纸板。蜂窝纸板在运输包装中的应用主要有2类:用作支撑材料,比如蜂窝纸做的运输托盘等,以纸代木有利于环境保护;用作缓冲材料,代替聚苯乙烯泡沫,解决了白色污染问题,还能减少包装用料,降低运输成本。我国每年有大量的商品需要出口,而产品的缓冲包装材料主要应用的就是蜂窝纸板^[1]。

产品在运输、装卸、仓储等环节中会受到振动、冲击的作用,所以研究材料的缓冲吸能特性尤为重要^[2]。近年来国内外已经充分利用纸板的优点对新型缓冲吸能结构板材进行了广泛的研究,对提高产品的防护与包装性能具有重要意义。研究者通过将聚氨酯泡沫填充到蜂窝纸板孔隙中,制得蜂窝纸板和聚氨酯泡沫复合结构的板材,结果表明在一定程度上其缓冲性能和能量吸收均有明显的提升^[3-5]。高德等^[6]通过实验分析了钙塑瓦楞纸板和蜂窝纸板的复合结构的缓冲性能,结果表明能量吸收明显提高。Caserta^[7]对铝蜂窝和聚乙烯泡沫板复合结构的能量吸收特性做了研究,结果表明,单独的铝蜂窝结构具有很高的能量吸收特性,最初起到缓冲作用的是聚乙烯泡沫板。由于蜂窝纸板表面材料为纸,抗戳穿性较差、耐潮性差,受潮后缓冲性能严重下降,进而影响了板材的缓冲性能。余丽萍^[8]等利用微波发泡方法制得了具有调湿和缓冲吸能功能的发泡缓冲包装材料,解决了部分精密仪器运输存贮中受潮或过于干燥而影响精度的问题。兰青山^[9]以纤维材料作面材,聚氨酯泡沫作为粘合剂,加热模压成型为新型纸蜂窝夹芯复合板材,以提高纸蜂窝类材料的抗戳穿性能和防潮性能。

基于以上研究,开发了一种具有泡状结构的纤维——纸蜂窝夹芯复合板(泡状纸蜂窝夹芯复合板,以

下简称泡状复合板),文中对泡状纸蜂窝夹芯复合板、纸蜂窝夹芯复合平板(简称复合平板)和蜂窝纸板的承载能力和压缩性能作对比研究,为新材料的应用提供理论基础。

1 板材结构及缓冲机理分析

蜂窝纸板由涂胶后的上下面纸直接与纸蜂窝芯压合而成,其结构简化见图1a。纸蜂窝的胞元在理想情况下存在着大量的气体,气体对蜂窝胞元的缓冲性能的影响发生在弹塑性阶段,此阶段蜂窝胞元没有变形,影响其缓冲性能的主要因素是蜂窝结构和原材料。当应力达到峰值后,蜂窝胞元壁开始受压弯曲,导致胞元体积减小应力下降,直到压力达到平衡^[10]。事实上,在蜂窝纸板受压过程中蜂窝胞元的气密性极易破坏,进而影响板材的缓冲性能。胞元中的气体开始泄露时,芯纸承担绝大部分压力,芯纸最大应力公式为:

$$\sigma \approx \frac{Q}{bd} \tag{1}$$

式中:Q为截面力;b为芯高;d为芯纸厚度。

纸蜂窝夹芯复合平板(复合平板)以纤维布和玻纤毡作面板,以聚氨酯作为粘接剂,在制作过程中由于聚氨酯粘接剂在高温下发泡,会形成厚度e约为2~5mm的发泡层,使蜂窝胞元的气密性较蜂窝纸板有很大的提高,且承压后也不易被破坏。同时发泡层还会稳定、固化纸蜂窝胞柱的根部,且芯纸高度减小2e,其结构简化见图1b,实物见图2a。由式(1)可知,此发泡层会提高芯纸的最大应力。以常用的芯高为15,20,30mm的纸蜂窝芯为例,芯纸的最大应力分别会提高约35%,25%,15%。

泡状纸蜂窝夹芯复合板(泡状复合板)在复合平

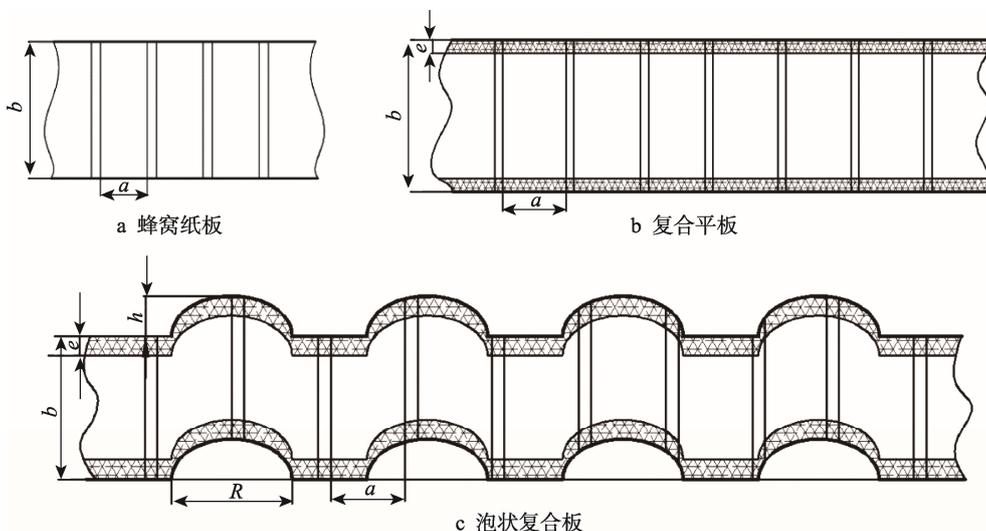


图1 3种板材的结构示意

Fig.1 Structural sketches of three kinds of boards

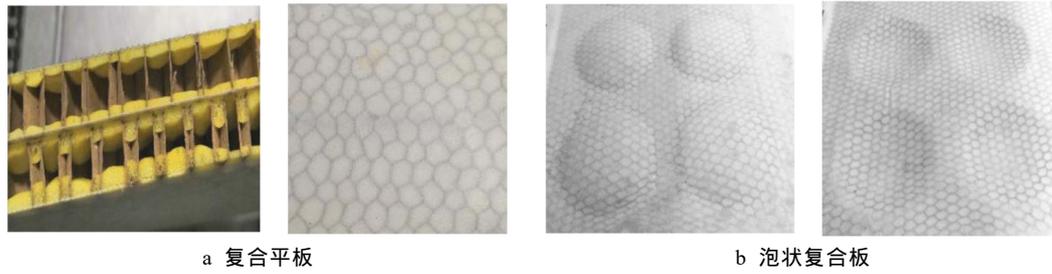


图 2 板材实物

Fig.2 Physical drawings of boards

板的同时加工泡状结构，且泡结构的形状、大小和密度均可依据实际需要进行调整。这种新型板材热模压加工成型方法只需要改变模具就可以得到不同结构的纸蜂窝夹芯板材，见图 1c，实物见图 2b。泡状结构内径为 100 mm，泡状结构高度为 10 mm。泡状复合板在承受压力时首先是泡状结构受力变形，受力的情况与结构形状和尺寸有关。此方法还可以加工成和产品贴合的异形，以稳定产品在包装箱中的位置。

2 实验

2.1 材料

主要材料：复合平板和泡状复合板，为了对比分

析，还测试了同种芯高的蜂窝纸板。试样面积为 100 mm×100 mm，实验之前，参照 GB/T 4857.2—2005《包装运输包装件基本试验》，所有试样在温度 25 °C、相对湿度 50%的环境条件下预处理 24 h。3 种板材的属性见表 1。

2.2 方案

采用 RGT-10 型微机控制电子万能试验机(深圳市瑞格尔仪器有限公司)来探究 3 种材料的静态压缩性能。实验中以 10 mm/min 的速度对试样进行压缩，见图 3。得到材料的载荷-位移曲线，记录每种材料的 5 次实验数据取平均值，保证实验数据的可靠性。

表 1 各板材面纸和芯纸的材料属性

Tab.1 Material properties of surface paper and core paper of various boards

材料类型	芯纸			面纸	
	芯高/mm	蜂窝边长/mm	定量/(g·m ⁻²)	厚度/mm	定量/(g·m ⁻²)
泡状复合板	10	10	105	0.5	250
	15	10	105	0.5	250
	20	10	105	0.5	250
复合平板	10	10	105	0.5	250
	15	10	105	0.5	250
	20	10	105	0.5	250
蜂窝纸板	10	10	105	0.5	250
	15	10	105	0.5	250
	20	10	105	0.5	250



图 3 实验过程

Fig.3 Experimental process

3 结果与讨论

3.1 静态压缩变形分析

蜂窝纸板受压时大多蜂窝胞柱中部弯折变形,少量胞柱由于根部与面纸撕裂,根部变形较大,实验过程见图3。复合平板受压时蜂窝胞柱的变形基本发生在中部,完整蜂窝胞元受压时两端不会撕裂。泡状复合板受压时先是泡状结构受压,结构破坏后板材的变形情况与复合平板相似。

纸蜂窝芯高为20 mm的3种板材的应力-应变曲线见图4。在静态压缩过程中3种板材会经历弹性阶

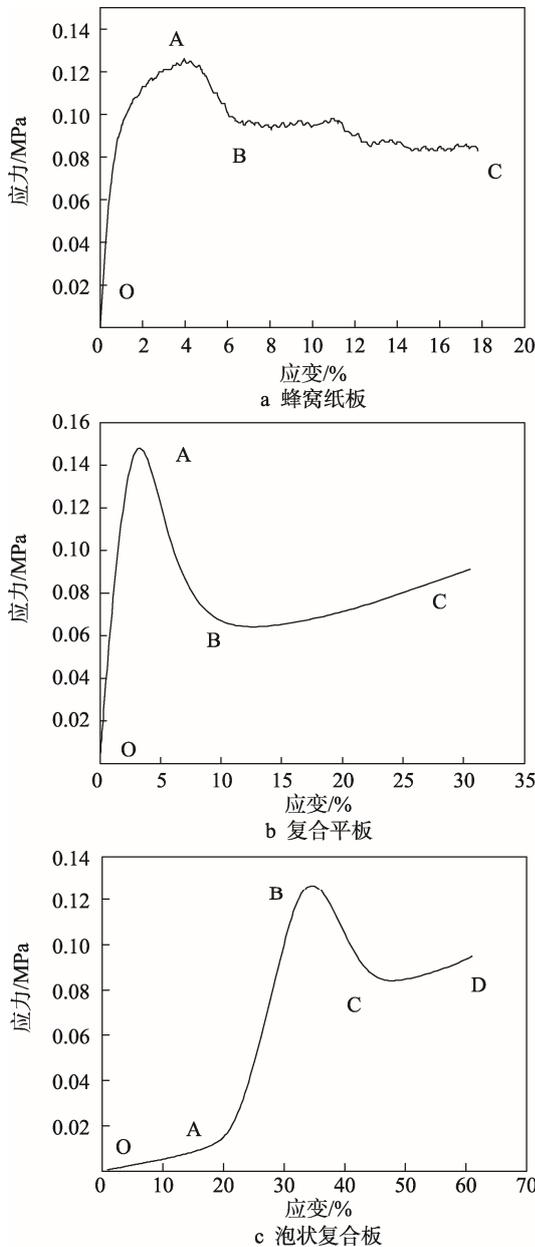


图4 20 mm 芯高不同结构板材的应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curves of boards with 20 mm high core and different structures

段、弹塑性阶段、塑性阶段^[11]。蜂窝纸板在OA段,随着压力的增加,应力增加的趋势逐渐减弱,见图4a。复合平板由于发泡胶的固化作用,平压强度明显提高,应力峰值比蜂窝纸板提高了约20%左右。当应力达到弹性极限后,复合平板下降趋势更为明显,见图4b,说明胞元密封性能好,能承受比较大的弯曲。在BC段胞元内气体的压力大,压力增加的趋势也明显。泡状复合板的变形趋势和复合平板相似,然而由于泡结构的作用,有初始线弹性阶段,即图4c的OA段。泡状复合板随着压力的增加,由于泡结构的作用板材的应变明显增大。

随着芯高的增加,应力峰值增加,胞元中的气体增多,达到弹性极限后,应力下降的越明显,见图5。而芯高为10 mm的泡状复合板的应力-应变曲线没有明显的初始线弹性阶段、弹性阶段和弹塑性阶段之分,是由于材料芯高较小而泡状结构偏高,压力主要由泡状结构承担,而材料的抗压性能较弱,见图5a。

3.2 板材的缓冲吸能特性分析

采用总吸收能量、单位体积吸收能量和缓冲系数-应变曲线来评价泡状复合板、复合平板和蜂窝纸板的缓冲吸能特性^[12-14]。

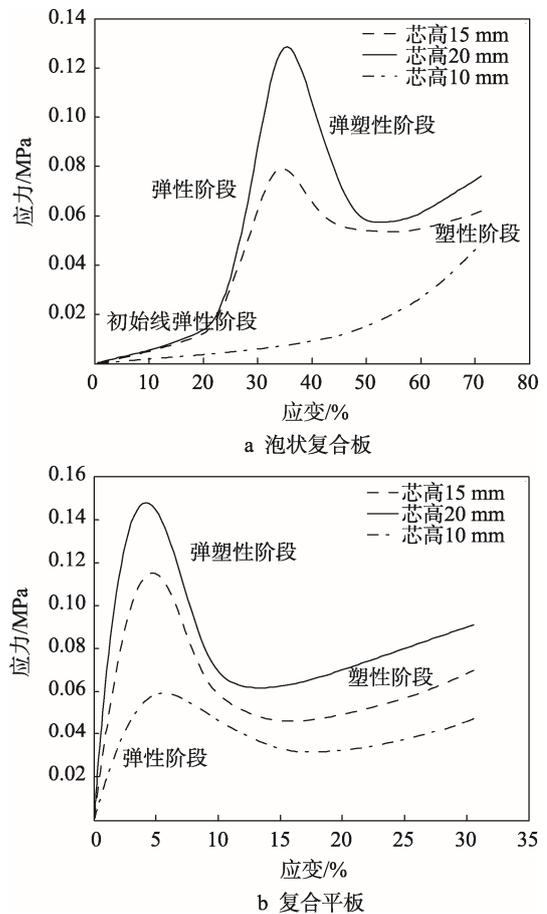


图5 不同芯高复合板的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of composite boards with different core heights

1) 能量吸收描述的是板材对能量的吸收特性, 见图 6。同种结构随着芯高的增加能量吸收也相应增加, 不同的结构对能量的吸收能力不同, 由于复合平板的应力峰值高, 塑性阶段长, 能量吸收最好。能量吸收能力依次为: 复合平板>蜂窝纸板>泡状复合板。

2) 缓冲系数主要表征材料的缓冲性能, 缓冲系数越小材料的缓冲性能越好^[15], 芯高为 20 mm 的不同结构的缓冲系数-应变曲线见图 7。3 种结构的缓冲

性能有所差异, 当应变小于 30% 时, 复合平板由于使用了聚氨酯作为粘接剂, 固化以后强度会变大, 在缓冲性能上略逊于蜂窝纸板。泡状复合板由于泡结构具有一定的缓冲作用, 缓冲系数始终最小, 表明板材的缓冲性能最好。当应变大于 30% 时, 3 种板材的曲线基本重合。板材随着芯高的增加, 蜂窝壁的弯曲能力增大, 蜂窝胞元中气体也增加, 其缓冲系数减小, 见图 8。

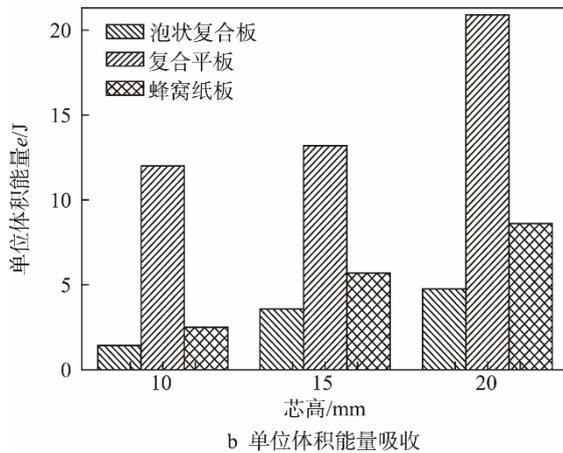
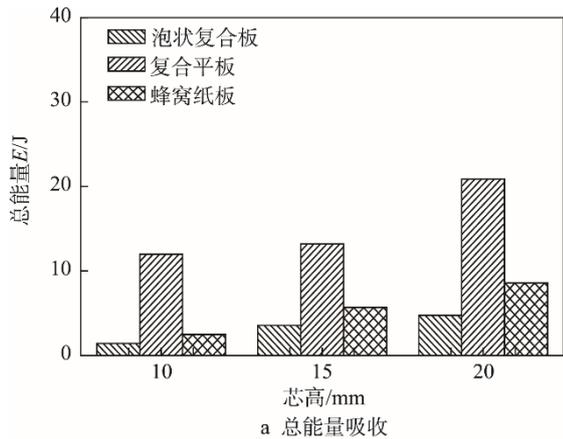


图 6 板材的能量吸收对比

Fig.6 Energy absorption comparison of different boards

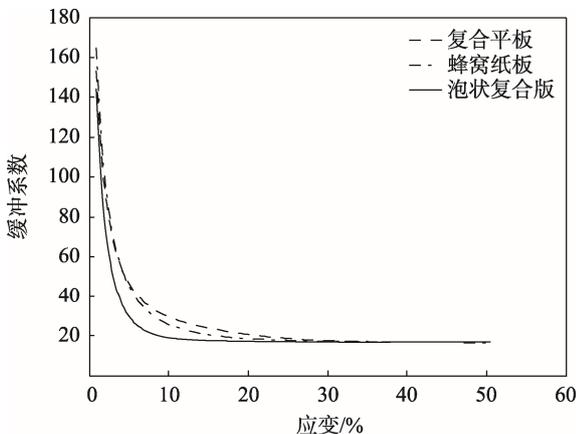


图 7 不同结构板材的缓冲系数-应变曲线

Fig.7 Buffer coefficient-strain curves of boards with different structures

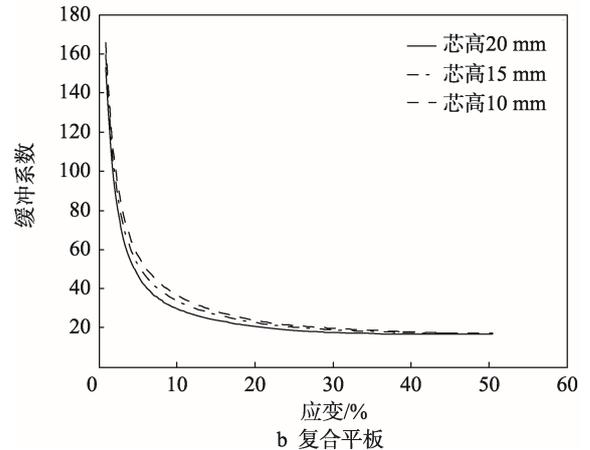
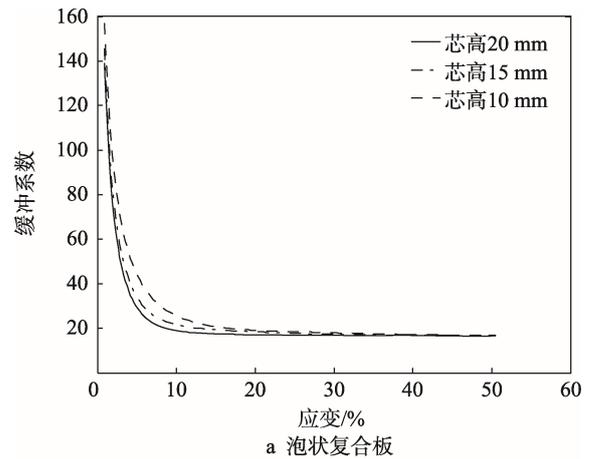


图 8 不同芯高的缓冲系数-应变曲线

Fig.8 Buffer coefficient-strain curves with different core heights

4 结语

通过静态压缩实验对比分析了泡状纸蜂窝夹芯复合板、纸蜂窝夹芯复合平板和蜂窝纸板的压缩变形特征和吸能特性, 得出以下结果。

1) 纸蜂窝夹芯复合平板的抗压性能高于相同类型的蜂窝纸板, 以芯高为 20 mm 的板材为例, 应力峰值较蜂窝纸板约提高了 20%。泡状复合板的抗压性能和相同类型的蜂窝纸板相似。

2) 相同类型的 3 种板材, 纸蜂窝夹芯复合平板的总能量吸收和单位体积能量吸收最高, 其次为蜂窝纸板。泡状纸蜂窝夹芯复合板由于塑性阶段所占比例小, 所以能量吸收最弱。

3) 泡状纸蜂窝夹芯复合板在应变小于 30%时, 缓冲系数最小, 缓冲性能最好。纸蜂窝夹芯复合板由于固化作用硬度变大, 缓冲性能略逊于蜂窝纸板。

参考文献:

- [1] 覃路韦. 泡状结构纸蜂窝夹芯复合板缓冲性能的研究与应用[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.
QIN Lu-wei. Research and Application of Cushioning Properties of Bubble Structure Honeycomb Sandwich Panel[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018.
- [2] 方婷. 缓冲包装材料缓冲性能的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2013.
FANG Ting. Research on Properties of Cushioning Packaging Material[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2013.
- [3] 鄂玉萍, 张喜俊. 泡沫填充型蜂窝纸板面外压缩性能实验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(20): 146—150.
E Yu-ping, ZHANG Xi-jun. An Experimental Study on Out-of-plane Compressive Behavior of a Honeycomb Paperboard Filled with Foams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(20): 146—150.
- [4] ZHANG Y, XIE W H, CHEN L. Dynamic Buffering Performance of the Honeycomb Paperboard Filled with Polyurethane[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 29(3): 561—566.
- [5] CERDA X, RETANA J, CROS S. Synergistic Energy Absorption in the Axial Crush Response of Filled Circular Cell Honeycombs[J]. Composite Structures, 2012, 94(16): 69—76.
- [6] 高德, 樊令强, 冯军, 等. 钙塑瓦楞纸板-蜂窝板复合结构缓冲功能实验分析[J]. 功能材料, 2014, 45(23): 16—19.
GAO De, FAN Ling-qiang, FENG Jun, et al. Cushioning Properties of Two-layered Cushioning Structure Stacked by Honeycomb and Calcium Plastic Board Subjected to Quasi-static Compressive Loadings[J]. Functional Materials, 2014, 45(23): 16—19.
- [7] CASERTA G, GALVANETTO U, LANNUCCI L. Static and Dynamic Energy Absorption of Aluminum Honeycombs and Polymeric Foams Composites[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2010, 17(3): 366—376.
- [8] 余丽萍, 鄂玉萍, 屠晓芬, 等. 具有调湿功能的缓冲包装材料制备及性能[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 38—44.
YU Li-ping, E Yu-ping, TU Xiao-fen, et al. Preparation and Performance of Cushion Packaging Material with Humidity Regulation Function[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 38—44.
- [9] 兰青山. 纸蜂窝夹芯结构复合板材的性能测试与分析[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2012.
LAN Qing-shan. The Performance Test and Analysis of Paper Honeycomb Sandwich Panel[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2012.
- [10] 毕中臣, 曹小龙, 谢勇. 蜂窝纸板缓冲机理探讨[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(6): 38—41.
BI Zhong-chen, CAO Xiao-long, XIE Yong. Research on the Cushioning Mechanism of Honeycomb Paperboard[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(6): 38—41.
- [11] KWANG Y J, SEONG S C, MAHBUBULB M. A Constitutive Model for Polyurethane Foam with Strain Rate Sensitivity[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(7): 2033—2038.
- [12] 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 Yun-gang, GUO Yan-feng, WANG Zhong-min. Compression Deformation and Energy Absorption Properties of Corrugated Paperboard[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2015, 30(3): 31—35.
- [13] 潘丹, 郭彦峰, 付云岗, 等. 纸夹芯和泡沫复合层状结构的静态缓冲吸能特性研究[J]. 工程力学, 2019, 36(2): 249—256.
PAN Dan, GUO Yan-feng, FU Yun-gang, et al. Static Cushioning and Energy Absorption of Composite Layered Structures with Paper Sandwich Core and Plastic Foam[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 249—256.
- [14] 霍银磊, 张新昌. 基于能量吸收效率的泡沫塑料缓冲材料选择[J]. 中国塑料, 2017, 20(4): 54—57.
HUO Yin-lei, ZHANG Xin-chang. Selection of Foamed Plastic Cushioning Material Based on Energy Absorption Efficiency[J]. China Plastics, 2017, 20(4): 54—57.
- [15] 罗瑜莹, 肖生苓, 李琛, 等. 纤维多孔缓冲包装材料泡孔参数与其力学性能的关系[J]. 林业科学, 2017, 53(5): 116—124.
LUO Yu-ying, XIAO Sheng-ling, LI Chen, et al. Relationships between Bubble Parameters and Mechanical Properties of Fiber Porous Cushioning Packaging Material[J]. Forestry Science, 2017, 53(5): 116—124.