

基于水果包装的可发性聚乙烯结构缓冲性能研究

王章苹*, 杨 传

(长沙师范学院, 长沙 410010)

摘 要: **目的** 研究可发性聚乙烯水果缓冲包装结构性能。**方法** 以中小尺寸水果包装的圆型结构和方型结构为基础, 进行静载实验和跌落冲击实验, 分析可发性聚乙烯结构在相关尺寸变化时的缓冲性能。**结果** 随着厚度和宽度的增加, 单元结构的载荷逐渐增大, 加速度峰值逐渐降低, 当宽高比在 0.15~0.2 变化时, 结构的载荷净增值趋于平稳, 载荷增长稳定, 且圆型结构的承载能力和抗冲击能力均优于方型结构。**结论** 在水果的缓冲包装中, 合理设计结构的几何尺寸, 更好的发挥材料的缓冲性能, 提高结构的缓冲能力和材料利用率, 实现缓冲结构的保护功能。

关键词: 可发性聚乙烯; 静载试验; 跌落实验; 单元结构

Research on the cushioning performance of expandable polyethylene structure based on fruit packaging

WANG Zhang-Ping*, YANG Chuan

(Changsha Normal University, Changsha 410010, China)

ABSTRACT: Objective To study the structural properties of expandable polyethylene fruit buffer packaging. **Methods** On the basis of the round structure and square structure of small and medium-sized fruit packaging, the static load test and drop impact test were carried out to analyze the cushioning performance of the expandable polyethylene structure while the relevant size changes. **Results** With the increase of thickness and width, the load of expandable polyethylene element structure increased and the peak acceleration decreased. When the aspect ratio changed from 0.15 to 0.2, the net increase of load tended to be stable, and the load growth was stable, and the bearing capacity and impact resistance of circular structure were better than that of square structure. **Conclusion** In the buffering packaging of fruits, the geometry size of the structure shall be designed reasonably to give full play to the buffering performance of the materials, improve the cushioning performance and material utilization of the structure, and realize the protection function of the buffering structure.

KEY WORDS: expandable polyethylene; static load test; drop test; unit structure

1 引 言

作为我国农业三大支柱产业之一的水果产业, 年产量多年来稳居全球第一, 在满足国民饮食多样性的基础上助力着经济的稳步发展。在接近 700 种水果中^[1], 营养价

值高的纯天然水果尤其受到人们的青睐, 这就要求新鲜水果在采摘之后能够及时、安全的送达消费者手中, 但水果在运送过程中容易遭受静压损伤、振动损伤和冲击损伤而导致水果品质的降低和价值的损失^[2]。据我国相关数据统计, 水果在运输中因遭受机械损伤而产生的损耗率高达

*通讯作者: 王章苹, 硕士, 副教授, 主要研究方向为包装材料、缓冲包装。E-mail: cathywzp@163.com

*Corresponding author: WANG Zhang-Ping, Master, Assistant Professor, Changsha Normal University, No.9 Teli Road, Xingsha Town, Changsha 410010, China. E-mail: cathywzp@163.com

30%，而发达国家的损耗率仅仅为 7%^[3]。在水果的机械损伤中，静压损伤和冲击损伤是水果损耗最重要的因素。因此在满足水果产品包装要求的基础上建立避免水果运输中的静压和冲击损伤的缓冲结构成为水果行业发展的重要内容。

可发性聚乙烯(expandable polyethylene, EPE)具有质轻、回复率高、性能优良、柔韧性好等特点，对产品尺寸的包容度大，广泛应用于各类产品的缓冲包装，尤其是易损产品的包装^[4]。随着研究的深入，缓冲包装设计逐渐从增加缓冲衬垫转变为缓冲结构设计，以空间的充盈和包覆为基本形式实现对产品的保护。值得注意的是，EPE 是层叠结构，目前大多产品的包装仍然以衬垫结构进行包覆，虽能实现产品的保护，但却大大增加了材料的用量和产品包装的重量，从而导致产品包装成本的增加。因此，从 EPE 材料的基本缓冲性能出发，建立缓冲结构，研究不同缓冲结构的缓冲性能，在实现产品保护的基础上实现减量化包装成为缓冲包装设计的重要命题，而目前关于此方面的研究在水果包装上的应用相对较少。

本文基于水果在运输中易遭受的静压损伤，从 EPE 的基本性能出发，按照实验标准 GB/T 8168-2008《包装用缓冲材料静态压缩试验》^[5]和 GB/T 4857.5-92《包装运输包装件跌落试验方法》^[6]对圆型缓冲结构和方型缓冲结构进行静态压缩试验，研究单元结构在相关参数变化时抗压能力和抗冲击情况，分析影响水果包装结构缓冲能力的因素，探寻水果包装结构的缓冲性能，在满足水果缓冲包装设计的要求基础上实现包装减量化，为相关产品的缓冲包装设计提供参考。

2 材料与方法

2.1 材料与仪器

EPE 材料：密度为 $2.9 \times 10^{-2} \text{ kg/mm}^3$ ，弹性模量为 3 Mpa，泊松比为 0.001，单层厚度为 10 mm，来自长沙德美包装材料有限公司。

MEGA 1510 电子万能试验机(济南兰光机电技术有限公司)；CHY-CA 测厚仪(济南兰光机电技术有限公司)；DZ-217A 跌落试验机(东莞市大中仪器有限公司)；211-104EK 千分尺(桂林广陆数字测控股份有限公司)。

2.2 静态压缩实验

1) 长宽度尺寸测量

分别沿试样的长度和宽度方向，用千分尺测量两端及中间 3 个位置的尺寸，取平均值并精确到 0.01 mm。

2) 厚度测量

在试样表面放置一块平整的刚性平板，使试样受到 $(0.20 \pm 0.01) \text{ kPa}$ 的压缩载荷，30 s 后在载荷状态下用测厚仪测量四角的厚度，取平均值并精确到 0.01 mm。

3) 极限载荷与位移

按照实验标准 GB/T 8168-2008《包装用缓冲材料静态压缩试验》在电子万能试验机上对 EPE 水果包装试样进行压缩实验，每组试样不小于 5 个，实验时以 $(12 \pm 3) \text{ mm/min}$ 的速度沿厚度方向对实验样品逐渐增加载荷，压缩过程中记录连续变化的载荷与位移曲线，当载荷急剧增加时停止实验，获得试样的极限载荷与位移，取多次实验结果的平均值获得试样的极限载荷与位移。

2.3 动态跌落实验

按照 GB/T 4857.5-92《包装运输包装件跌落试验方法》标准，设定跌落高度范围为 600~1000 mm，并将传感器置于单元缓冲结构包装件上，测量缓冲包装结构在跌落高度和结构尺寸变化时的加速度，绘制加速度曲线^[7]。

3 结果与分析

3.1 EPE 单元结构

EPE 材料的密度介于 $0.025 \sim 0.1 \text{ g/cm}^3$ ，厚度变化范围为 10 mm 到 60 mm^[8]。由于 EPE 属于非线性材料，其载荷-位移曲线具有正切函数曲线特征(图 1)，其特性非常接近于线性材料趋于压实状态的情况。因此，在试验分析时通常提取材料未压溃时(线性部分与曲线部分的拐点)的载荷做为极限载荷，研究结构的缓冲性能^[9-11]。

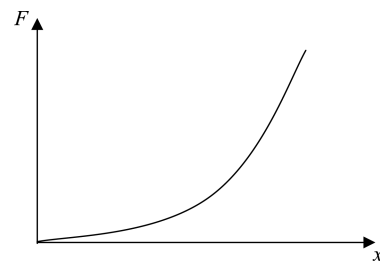


图 1 EPE 载荷-位移曲线

Fig.1 Load displacement curve of EPE

在产品的缓冲包装中，方型结构和圆型结构是 2 种基本的单元结构，且 2 种结构经拓展和延伸可得到不同的缓冲结构。在以 EPE 为缓冲材料的水果包装中，通过对衬垫的内切获得两种基本的单元结构，圆型和方型结构^[12,13]。在水果包装中，结构抗压能力和抗冲击能力的优劣是水果能否抵御机械损伤的重要指标^[14]。本文以容纳重量在 50~150 g 的中小尺寸水果包装为基础，制作尺寸为 50 mm × 50 mm 的方型结构(最大容纳尺寸为 85 mm × 85 mm)和直径为 $D=50 \text{ mm}$ 的圆型结构(最大容纳尺寸为 82 mm × 82 mm)试样(图 2)，进行静态压缩实验和跌落实验，研究厚度在 10~60 mm，宽度在 2~10 mm 变化时两种缓冲结构的抗压能力和冲击加速度变化情况^[15]。

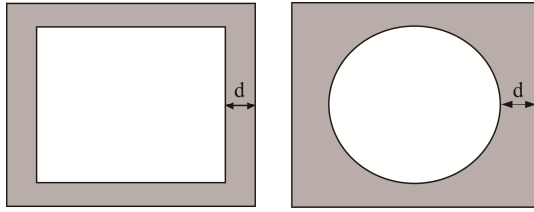


图 2 EPE 单元结构
Fig.2 Unit structure of EPE

3.2 EPE 单元结构的静态压缩性能

在方型结构和圆型结构中, 截面宽度 d 和厚度 T 均影响单元结构的承载能力, 表 1 表 2 分别为尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的方型结构和圆型结构在截面宽度和厚度均变化时的载荷情况, 表 3 和表 4 分别为 2 种结构在不同厚度时, 截面宽度增加引起的载荷净增量。图 3 和图 4 分别为 2 种结构在厚度为 20 mm 和 50 mm 时, 截面宽度变化时结构位移量的变化情况。

表 1 方型结构载荷变化情况($n=3$)
Table 1 Load change of square structure ($n=3$)

厚度 T/mm		载荷(N)				
		宽度 $d=2\text{ mm}$	宽度 $d=4\text{ mm}$	宽度 $d=6\text{ mm}$	宽度 $d=8\text{ mm}$	宽度 $d=10\text{ mm}$
10	平均值	76	91	178	221	225
	方差	3.16	3.81	13.67	12.98	12.91
20	平均值	93	145	206	305	334
	方差	4.18	9.21	15.86	9.57	12.35
30	平均值	157	222	287	413	476
	方差	2.96	4.68	7.87	11.25	9.71
40	平均值	194	298	353	515	737
	方差	1.65	5.63	8.21	11.52	9.87
50	平均值	225	334	476	637	904
	方差	4.65	3.01	5.84	12.35	7.68
60	平均值	309	387	584	764	995
	方差	1.58	4.26	5.69	8.21	11.05

表 2 圆型结构的载荷变化情况
Table 2 Load change of circular structure

厚度 T/mm		载荷(N)				
		宽度 $d=2\text{ mm}$	宽度 $d=4\text{ mm}$	宽度 $d=6\text{ mm}$	宽度 $d=8\text{ mm}$	宽度 $d=10\text{ mm}$
10	平均值	89	106	189	277	393
	方差	1.32	1.17	2.56	3.58	5.69
20	平均值	105	215	349	465	596
	方差	3.26	5.24	8.27	7.85	10.21
30	平均值	179	314	533	608	752
	方差	3.28	2.01	8.95	8.21	11.27
40	平均值	245	427	629	798	942
	方差	5.26	4.17	3.65	13.07	7.36
50	平均值	308	561	702	925	1141
	方差	2.56	8.19	5.36	4.99	14.01
60	平均值	412	707	814	1036	1281
	方差	3.69	8.51	12.03	9.87	11.25

表 3 方型结构载荷净增值
Table 3 Net load increment of square structure

宽度 d/mm	载荷增长量(N)						
	$T=10\text{ mm}$	$T=20\text{ mm}$	$T=30\text{ mm}$	$T=40\text{ mm}$	$T=50\text{ mm}$	$T=60\text{ mm}$	
2	0	0	0	0	0	0	
4	平均值	15	52	65	104	78	
	方差	0.85	1.09	1.38	0.89	1.01	0.69
6	平均值	87	81	65	55	142	197
	方差	1.21	0.61	0.34	0.12	1.02	0.27
8	平均值	43	99	126	162	161	180
	方差	0.33	0.55	1.32	2.36	2.04	1.98
10	平均值	4	29	64	222	267	231
	方差	0.05	0.69	0.32	1.65	2.18	1.58

表 4 圆型结构载荷净增值
Table 4 Net load increment of circular structure

宽度 d/mm	载荷增长量(N)						
	$T=10\text{ mm}$	$T=20\text{ mm}$	$T=30\text{ mm}$	$T=40\text{ mm}$	$T=50\text{ mm}$	$T=60\text{ mm}$	
2	0	0	0	0	0	0	
4	平均值	17	110	135	182	253	295
	方差	1.32	2.10	1.02	1.88	1.69	2.36
6	平均值	83	134	219	202	141	107
	方差	0.96	1.37	1.87	2.08	1.47	0.99
8	平均值	88	116	75	169	223	222
	方差	0.58	1.49	0.69	3.97	2.53	1.96
10	平均值	116	91	144	144	216	245
	方差	1.46	1.01	1.68	2.01	2.36	3.26

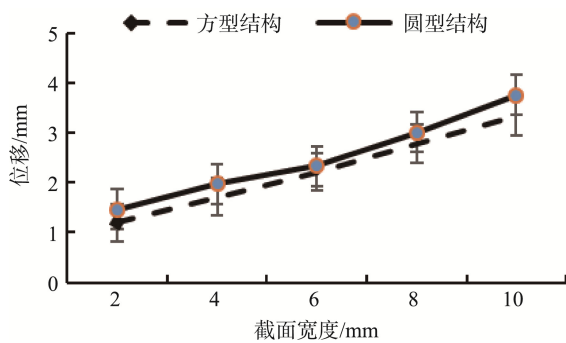


图 3 厚度为 20mm 时结构的位移($n=3$)

Fig.3 Displacement of the structure at a thickness of 20 mm($n=3$)

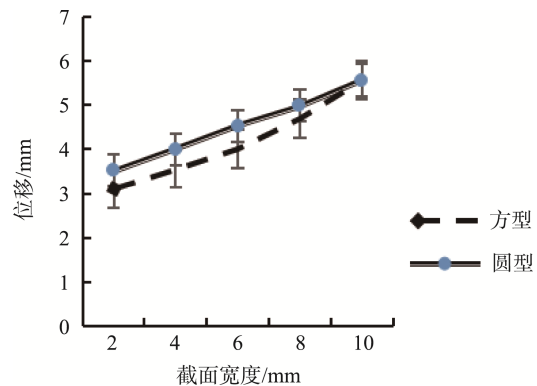


图 4 厚度为 50mm 时结构的位移($n=3$)

Fig.4 Displacement of the structure at a thickness of 50 mm($n=3$)

3.3 单元结构的动态缓冲性能

建立方型结构和圆型结构的水果包装件, 将传感器固定在水果易损部位, 设置跌落高度等参数, 进行跌落实验^[16]。跌落后检查 2 种包装件, 在水果无损伤的情况下导出结构的加速度曲线。图 5 为方型结构在厚度为 40 mm, 跌落高度为 600 mm 时, 截面宽度变化时的加速度曲线。图 6 为圆型结构在厚度为 60 mm, 跌落高度为 1000 mm 时, 截面宽度变化时的加速度曲线。图 7 为 2 种结构在厚度为 40 mm, 截面宽度为 6 mm, 跌落高度在 800 mm 时的加速度曲线。图 8 为 2 种结构在厚度为 60 mm, 截面宽度为 4 mm, 跌落高度为 700 mm 时的加速度曲线。

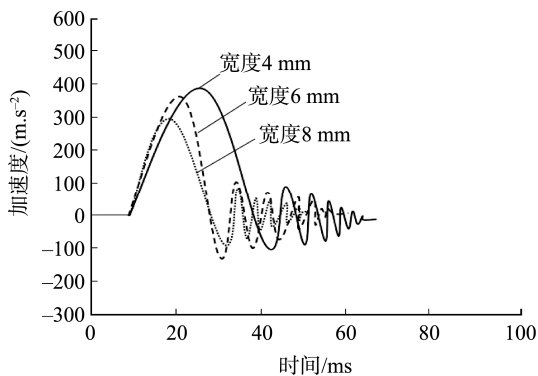


图 5 方型结构宽度变化的时间-加速度曲线

Fig.5 Time acceleration curve of width variation of square structure

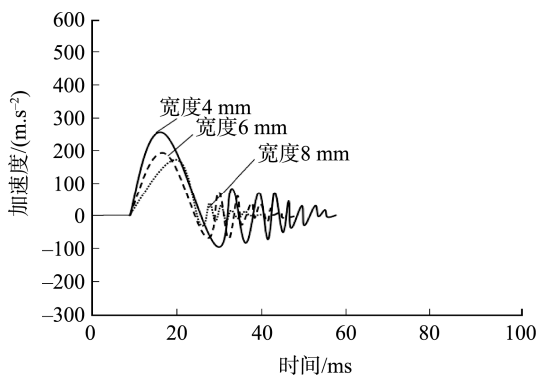


图 6 圆型结构宽度变化的时间-加速度曲线

Fig.6 Time acceleration curve of width variation of circular structure

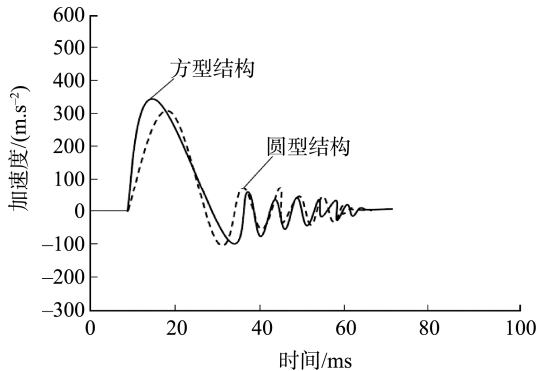


图 7 同尺寸的时间-加速度曲线

Fig.7 Time acceleration curve of the same size

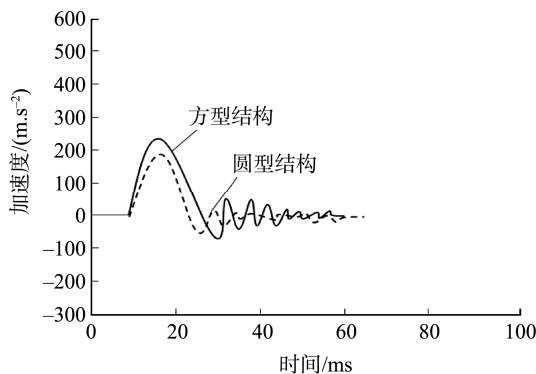


图 8 同尺寸的时间-加速度曲线

Fig.8 Time acceleration curve of the same size

从水果包装中 2 种结构的静载和动载实验情况来看, 可得到以下结论:

随着厚度的增加, 圆型结构和方型结构的抗压能力逐渐增强, 且在同等截面宽度时, 圆型结构的抗压效果优于方型结构, 表明圆型结构受厚度的影响较方型结构明显, 抗压能力略强。

截面宽度增加时, 2 种结构的抗压能力均增强, 但随着截面宽度的增加, 载荷值增大, 净增值先增大后减少, 表明当截面宽度达到 6 mm 后, 截面宽度对结构承载能力的影响逐渐较小, 且截面宽度的增加将导致结构重量的增加。从位移变化量来看, 随着厚度和宽度的增加, 结构的位移量逐渐增大, 抗压能力增强, 且圆型结构的位移量较方型结构大。

从净增值来看, 随着厚度的升高, 2 种结构的载荷净增值均逐渐增加, 当厚度达到 40 mm 后, 载荷净值增长趋势缓慢, 无突变, 增长量相对稳定, 静载缓冲性能稳定。

在跌落实验中, 结构在达到最大加速度后, 并未快速恢复到稳定状态, 而是有持续的微小波动, 这是由于包装件触地后缓冲结构变形导致的微小振动^[17]。随着单元结构厚度和截面宽度的增加, 2 种结构的加速度峰值逐渐减少, 触地后的振荡逐渐减弱, 表明结构的抗冲击能力趋于稳定, 且在同尺寸时, 圆型结构的抗冲击能力优于方型结构。同样的, 随厚度和宽度的增加, 结构的重量和成本也相应增加。

对比静载实验和动载实验不难发现, 2 种单元结构的宽度在 6~10 mm, 厚度在 40~60 mm 范围内变化时(宽高比值为 0.15~0.2), 结构的抗压性能和抗冲击性能均较好, 能在较少材料消耗的基础上实现较高的缓冲功能, 可有效提高材料的利用率。

4 结论

在 EPE 为单元结构的中小尺寸水果的缓冲包装中, 随着厚度和截面宽度的增加, 结构的载荷与位移逐渐增大,

加速度峰值逐渐降低,缓冲性能逐渐增强,但厚度和宽度的增加导致结构的重量和成本也相应增加。当结构的厚度达到 40 mm,截面宽度达到 6 mm 后,载荷的增长平缓,承载能力和加速度峰值均趋于稳定,且圆型截面的承载能力和抗冲击能力均优于方型结构。总之,2 种结构的宽厚比在 0.15~0.2 变化时,方型结构和圆型结构均具有良好的抗压能力和抗冲击性能,能有效阻止水果在运输过程中的机械损伤,在满足包装减量化原则的基础上实现对水果的保护。因此,在水果的缓冲包装中,合理设计结构的几何尺寸,有利于发挥材料的缓冲性能,提高结构的缓冲能力,实现缓冲结构的保护功能。

参考文献

- [1] 俞德浚. 中国果树分类学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1979.
Yu DJ. Chinese fruit taxonomy [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1979.
- [2] 吴秀芬. 我区水果包装现状及问题启示[J]. 农民致富之友, 2018, (12): 43.
Wu XF. The present situation of fruit packaging in our district and its enlightenment [J]. Friends Farmers, 2018, (12): 43.
- [3] 毛星超. 水果运输缓冲包装研究现状[J]. 今日印刷, 2018, (5): 65-67.
Mao XC. Research status of buffer packaging for fruit transportation [J]. Print Today, 2018, (5): 65-67.
- [4] 苗红涛. EPE 泡沫塑料在多次冲击下的缓冲性能[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 111-114.
Miao HT. Cushioning properties of EPE foam under repeated impact [J]. Packag Eng, 2017, 38(5): 111-114.
- [5] GB/T8168-2008 包装用缓冲材料静态压缩试验[S].
GB/T8168-2008 Static compression test of cushioning materials for packaging [S].
- [6] GB/T 4857.5-92 运输包装件跌落实验方法[S].
GB/T 4857.5-92 Drop test method for transport package [S].
- [7] 郭强. 浅析 EPE 缓冲包装优化设计[J]. 中国包装工业, 2016, (2): 151-153.
Guo Q. Analysis of EPE buffer packaging optimization [J]. Chin Packag Ind, 2016, (2): 151-153.
- [8] 都学飞. EPE 缓冲材料的静态压缩性能试验研究[J]. 包装工程, 2018, 34(2): 20-22.
Du XF. Experimental study on static compression properties of EPE buffer materials [J]. Packag Eng, 2018, 34(2): 20-22.
- [9] 张书彬, 杨祖彬, 谭帆. 一种笔记本电脑的缓冲包装方案及设计[J]. 科技视界, 2017, (5): 51-53.
Zhang SB, Yang ZB, Tan F. A buffer packaging scheme and design of notebook computer [J]. Sci Technol Vis, 2017, (5): 51-53.
- [10] 肖雯娟, 郝阳. 常用密度 EPE 的静态压缩缓冲特性试验研究[J]. 中国包装工业, 2015, (4): 116-120.
Xiao WJ, Hao Y. Experimental study on static compression buffer characteristics of EPE [J]. Chin Packag Ind, 2015, (4): 116-120.
- [11] 宋晓利, 刘全校, 张改梅. 重叠结构缓冲材料缓冲性能分析[J]. 北京印刷学院学报, 2016, 24(2): 14-17.
Song XL, Liu QX, Zhang GM. Analysis of buffer performance of overlapping structure buffer material [J]. J Beijing Inst Graphic Commun, 2016, 24(2): 14-17.
- [12] 冯勇. EPE 缓冲材料双向性能比较分析[J]. 中国包装工业, 2007, (10): 47-48.
Feng Y. Comparative analysis of bidirectional properties of EPE buffer materials [J]. Chin Packag Ind, 2007, (10): 47-48.
- [13] 杨帅. EPE 缓冲性能的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
Yang S. Research on buffer performance of EPE [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [14] Chen Z, Katsuhiko S, Kazuaki K. Improvement of equivalent drop theory for transport packaging [J]. Packag Technol Sci, 2013, 26(2): 67-81.
- [15] Zheng C, Ning Y, James D. Flexural creep behavior of sandwich panels containing Kraft paper honeycomb core and wood composite skins [J]. Mat Sci Eng A, 2011, 528(16): 75-87.
- [16] Namasivayam N, Alan D. Humidity effect on compressive deformation and failure of recycled and virgin layered corrugated paperboard structures. [J]. Composites Part B. 2013, 45(1): 956-1008.
- [17] Wang HW, Ji HW, Miao H, *et al.* Research on compression mechanical behaviors and constitutive relation of moulded pulp material [J]. Mechan Strength, 2009, 31(3): 382-386.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



王章苹, 硕士, 副教授, 主要研究方向为包装材料、缓冲包装。
E-mail: cathywzp@163.com