

## 正棱台缓冲垫结构参数对静态缓冲性能的影响

李志强<sup>1,2</sup>, 靳朝晖<sup>1</sup>, 张素风<sup>1,2</sup>, 孙涛<sup>1</sup>

(1. 陕西科技大学, 西安 710021; 2. 轻化工程国家级实验教学示范中心(陕西科技大学), 西安 710021)

**摘要:** **目的** 研究不同结构参数的正棱台缓冲垫(EPS)在接触面积相同且体积相同时静态缓冲性能的差异。**方法** 以发泡聚苯乙烯(EPS)为试验材料, 设立10组接触面积相同, 体积相同, 厚度及斜面倾角不同的正棱台结构样本, 利用万能材料试验机对10组样本进行静态压缩试验, 得到10组不同结构参数的应力-应变曲线、应变能-应变曲线、应变能-应力曲线及缓冲系数-静应力曲线。**结果** 随着斜面倾角的增大, 缓冲垫的刚度逐渐增大, 能量吸收增大, 当斜面倾角大于等于70°后, 缓冲性能基本相同; 在缓冲垫受到同等冲击强度条件下, 斜面倾角为80°时正棱台缓冲垫的缓冲性能最好, 应变能最大, 且其产生的变形量及应力均小于普通六面体缓冲垫。**结论** 在包装设计过程中, 可将接触面的侧面设置为80°倾角, 按照此结构设计包装, 产品更安全, 接触部位厚度可降低25.12%, 真正实现了降本增效。

**关键词:** 缓冲包装; 异形缓冲垫; 降本增效

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)07-0141-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.07.019

## Influence of Structural Parameters of Prism Cushion on Its Static Cushioning Property

LI Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, JIN Zhao-hui<sup>1</sup>, ZHANG Su-feng<sup>1,2</sup>, SUN Tao<sup>1</sup>

(1. Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education (Shaanxi University of Science & Technology), Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the difference in static cushioning property of prism cushions (EPS) with different structural parameters when their contact area is the same and the volume is the same. With expanded polystyrene (EPS) as the test material, the static compression test was carried out on ten groups of samples with the same contact area, the same volume, different thickness and inclination by universal pressure tester. The stress-strain curves, strain energy-strain curves, strain energy-stress curves and cushioning coefficient-static stress curves of ten groups of different structural parameters were obtained. As the inclination of the bevel increased, the cushion stiffness increased gradually, and the energy absorption increased. When the inclination was greater than or equal to 70°, the cushioning property was basically the same. Under the condition that the cushion was subject to the same large impact strength, the prism cushion of 80° inclination had the best cushioning property and the largest strain energy, and the deformation and stress generated by the cushion were smaller than those of the ordinary hexahedral cushion. In the packaging design process, 80° inclination can be set on the side of the contact surface. Based on the packaging with such structural design, the product is safer and the thickness of the contact part can be reduced by 25.12%, realizing cost decreasing and benefit increasing.

**KEY WORDS:** cushioning packaging; irregular cushion; cost decreasing and benefit increasing

收稿日期: 2019-06-28

作者简介: 李志强(1976—), 男, 陕西科技大学副教授, 主要研究方向为绿色包装技术与解决方案的研究与开发。

通信作者: 张素风(1972—), 女, 博士, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为纤维新材料与纸基复合材料。

随着近年来下游包装材料价格持续升高，如何降低包装成本是各大企业关注的重点之一。目前，国内大家电包装行业首选的包装材料以发泡聚苯乙烯(EPS)、发泡聚乙烯(EPE)和瓦楞制品等为主<sup>[1-2]</sup>。在实际包装设计活动中，一方面由于家电产品可受力部位面积有限，另一方面由于缓冲衬垫的模具成型要求，导致实际上缓冲衬垫只有与产品接触的位置才具有缓冲效果。过去常采用增加接触部位的厚度来达到缓冲要求，该方法将导致包装件的外形尺寸进一步加大，整体包装用量增加，相应成本上升，严重影响产品的用户体验，损害企业的声誉<sup>[3-4]</sup>。为了增加材料的使用效率，增大能效比，可以通过改变其结构、增加等效接触面积的方法来达到缓冲要求。

由于对包装材料的研究主要集中于新材料领域、材料的静态动态缓冲性能、组合结构的综合缓冲性能等<sup>[5-11]</sup>，对实际包装设计中用到的不规则结构关注过少。吴莎等<sup>[12]</sup>研究了瓦楞纸板不同结构件的缓冲性能，李淑娟等<sup>[13]</sup>研究了等效缓冲面积相同的异形缓冲垫(EPE)的缓冲性能差异，但试验选取的样本过少，且试验样本体积不同，比较刚度及能量吸收存在局限性。

文中利用万能材料试验机，对接触面积相同、体积相同、结构参数不同的EPS正棱台缓冲垫进行静态压缩试验，由应力-应变曲线得出结构参数对能效比的影响，以及最佳结构参数与能量的关系，为缓冲包装设计提供理论依据。

## 1 试验设计

### 1.1 材料和仪器设备

正棱台结构缓冲垫试验的材料选择密度为21 kg/m<sup>3</sup>的发泡聚苯乙烯EPS，由浙江省宁波市杭州湾新区博裕泡沫厂提供。设定正棱台上表面为接触面，大小为100 mm×100 mm，体积为600 cm<sup>3</sup>。由于在包装设计中缓冲部位的斜面倾角 $\theta$ 一般不会小于45°，以同体积普通六面体缓冲垫(斜面倾角90°)作为对照组，因此正棱台的斜面倾角范围是45°~85°。以5°为间隔递增得到共10组体积相同、接触面积相同的样本，结构参数见图1和表1，每组样本的等效面积<sup>[14]</sup>见式(1)。

$$A_e = ab \tag{1}$$

式中： $A_e$ 为按照等效面积理论得到的正棱台的等效缓冲面积； $a$ 为接触面的边长； $b$ 为缓冲垫的底面边长。

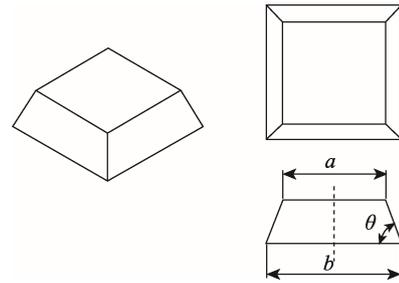


图1 正棱台缓冲垫  
Fig.1 Prism cushion

表1 试验材料规格

Tab.1 Specifications of the testing samples

编号	斜面倾角 $\theta/^\circ$	顶面边长 $a/\text{mm}$	底面边长 $b/\text{mm}$	厚度 $h/\text{mm}$	等效缓冲面积/ $\text{cm}^2$
第1组	45	100	166	33	166
第2组	50	100	159	35	159
第3组	55	100	152	37	152
第4组	60	100	145	39	145
第5组	65	100	139	42	139
第6组	70	100	132	44	132
第7组	75	100	125	47	125
第8组	80	100	118	50	118
第9组	85	100	110	55	110
第10组	90	100	100	60	100

### 1.2 试验方法

按照GB/T 8168—2008进行缓冲材料的静态压缩试验，采用不进行预处理的方法进行试验<sup>[15]</sup>。针对表1的10组不同规格的样本，每组进行4次重复性试验。

### 1.3 数据处理

拟合每组4次重复性试验得到的缓冲垫压力-位移数据，将10组拟合后的缓冲垫压力-位移数据经过式(2—3)处理为应力-应变数据，经过式(4)处理为应变能-应变曲线和应变能-应力曲线，经过式(5)处理为缓冲系数-静应力曲线。

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_e} \tag{2}$$

式中： $\sigma_i$ 为应力； $F_i$ 为压力； $A_e$ 为等效缓冲面积。

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h_i}{h} \tag{3}$$

式中： $\varepsilon_i$ 为应变； $\Delta h_i$ 为压缩量； $h$ 为初始厚度。

$$e_i = \frac{1}{2}(\sigma_1 \cdot \varepsilon_1) + \sum_{i=2}^n \frac{(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{2} \tag{4}$$

式中： $e_i$ 为应变能。

$$C_i = \frac{\sigma_i}{e_i} \tag{5}$$

式中： $C_i$ 为缓冲系数。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 同体积同接触面积正棱台缓冲垫力学性能

基于上述试验，对处理得到的应力-应变曲线进行分析，得到不同结构参数的 EPS 缓冲垫的应力-应变曲线见图 2，其中第 10 组数据为同体积的普通六面体缓冲垫。

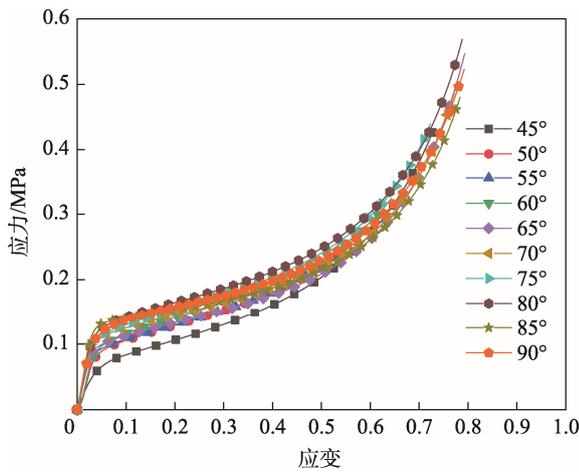


图 2 不同规格 EPS 材料的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of EPS with varied specifications

由图 2 中可知，体积相同、接触面积相同的正棱台在倾角变化的情况下，力学性能有很大区别。在弹性阶段，普通六面体缓冲垫（斜面倾角 90°）的弹性模量处于斜面倾角 75°~80°的正棱台缓冲垫弹性模量之间；随着斜面倾角的增大，弹性模量也随之增大，而斜面倾角 70°~90°的弹性模量相差不大；斜面倾角小于 70°之后，弹性模量显著减少，说明在体积相同、接触面积相同的前提下，正棱台缓冲垫的刚度随着斜面倾角变小而变小，但斜面倾角为 70°~90°的正棱台缓冲垫刚度相差很小，故可更加关注斜面倾角 70°~90°缓冲垫的能量吸收特性。斜面倾角越小，弹性阶段越短，且更早进入平台塑性阶段，力学性能表现为在同样应变条件下，倾角越大，可承载应力越大，各规格样本在受到大应变的条件下，受力趋势一致，斜面倾角为 75°和 80°时的力学性能更佳。

### 2.2 同体积同接触面积正棱台缓冲垫能量吸收性能

#### 2.2.1 同规格线性材料

根据表 1 中材料参数可知，若材料为线性材料，即压缩过程中弹性模量保持不变，设缓冲垫的最大应变为 75%，假设普通六面体缓冲垫可吸收能量为  $W_0$ ，

则不同结构缓冲垫可吸收能量与  $W_0$  的比值见表 2。

表 2 线性材料同规格样本吸收能量

Tab.2 Energy absorbed by the linear material sample of the same specifications

侧面倾角 $\theta/(\circ)$	厚度 $h/\text{mm}$	等效缓冲面积/ $\text{cm}^2$	$W$ 与 $W_0$ 的比值/%
45	33	166	91.9
50	35	159	93.2
55	37	152	94.4
60	39	145	95.5
65	42	139	96.5
70	44	132	97.5
75	47	125	98.3
80	50	118	99.1
85	55	110	99.7
90	60	100	100

若缓冲材料为线性材料，由表 2 可知，斜面倾角越接近 90°，结构刚度越大，其可吸收能量越多。

#### 2.2.2 EPS 非线性材料

由应力-应变曲线经过式 (4) 处理得到应变能-应变曲线和应变能-应力曲线，得到同密度非线性材料应变能与应变、应力的关系。其中应变能又称单位体积变形能，表征单位体积可吸收冲击能力的大小<sup>[11]</sup>。

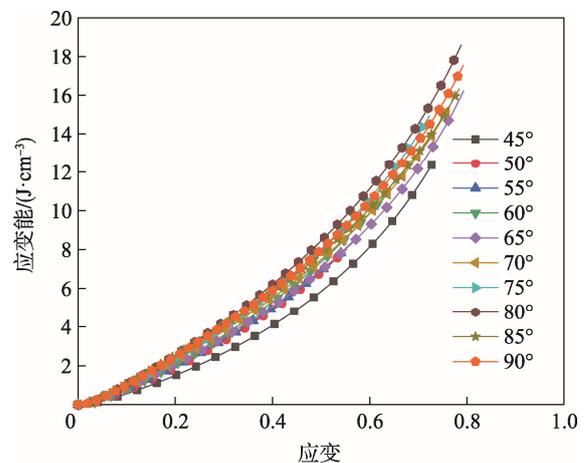


图 3 应变能-应变曲线

Fig.3 Strain energy-strain curves

由图 3 可知，前 9 组不同结构参数的正棱台缓冲垫数据与普通六面体缓冲垫对比。在应变较小的情况下 (0~0.08)，普通六面体缓冲垫的应变能优于其他斜面倾角的正棱台缓冲垫，但斜面倾角为 70°~90°的正棱台缓冲垫应变能相差不大，斜面倾角为 45°~65°时的应变能表现较差；随着应变的增加，斜面倾角为 80°的正棱台缓冲垫应变能表现更为优异，每单位体积吸收的能量最多，斜面倾角为 75°的正棱台缓冲垫次之，斜面倾角为 45°~65°的正棱台缓冲垫应变能表

现较差。由此可知,当缓冲衬垫接触位置产生相同应变时,与线性材料的结论不同。斜面倾角为 80°的正棱台缓冲垫吸收能量更多,变形量也比同体积普通六面体缓冲垫小。由于其厚度比普通六面体缓冲垫小,可降低整体衬垫厚度,成本与缓冲性能均优于普通六面体缓冲垫。在相同应变能的情况下,即单位体积吸收能量一致。在图 3 中找到各组应变能为 0.08 J 的数据点,得到各组的应变,计算得出斜面倾角 45°~90°的变形量依次为 19.63, 19.29, 20.28, 20.56, 23.05, 23.03, 23.48, 24.04, 28.03, 30.03 mm。在相同应变能的条件下分析,即各个结构单位体积吸收能量相同时,随着斜面倾角的增大,变形量呈上升趋势,其中斜面倾角为 65°,70°,75°及 80°的变形量差别在 1 mm 之内,在吸收相同能量时产生的变形基本相同。

在同一应力程度下,各规格缓冲垫的应变能-应力曲线见图 4。

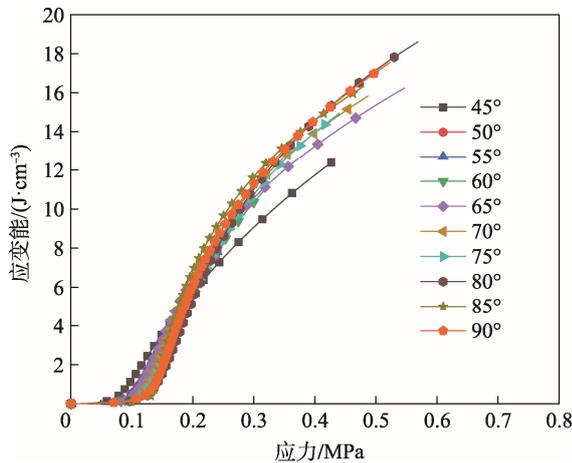


图 4 应变能-应力曲线  
Fig.4 Strain energy-stress curves

由图 4 可知,在小应力变化范围(0~0.13 MPa),斜面倾角越小应变能越大,斜面倾角越小刚度越小,单位体积吸收能量越多。当应力增加至 0.4 MPa 时,斜面倾角为 80°,85°及 90°缓冲垫的能量吸收能力基本相同,其他倾角能量吸收能力较差,说明各个规格缓冲垫受到相同程度的大冲击时,与线性结果不同,斜面倾角为 80°,85°正棱台结构与普通六面体缓冲垫能量吸收能力基本相同。

### 2.3 同体积同接触面积正棱台缓冲垫缓冲性能

不同规格参数的 EPS 的缓冲系数-应力曲线见图 5,其中,为使结果更为清晰,横坐标采用对数坐标。

由图 5 可知,同体积同接触面积的正棱台缓冲垫的静态缓冲曲线在不同应力范围内表现不同,普通六面体缓冲垫的缓冲能力并非最佳,缓冲能力与倾角也

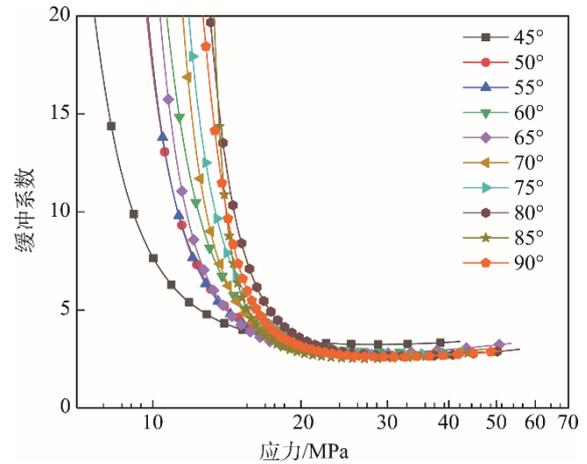


图 5 缓冲系数-应力曲线  
Fig.5 Cushioning coefficient-stress curves

并非线性关系。10 组规格的缓冲垫从 45°到 90°缓冲系数的最小值分别为 3.24, 3.02, 2.97, 2.84, 2.77, 2.66, 2.73, 2.65, 2.51, 2.60, 由缓冲系数数据可以看出,斜面倾角在 45°到 70°变化时,随着斜面倾角的增大,缓冲系数逐渐减小,缓冲效率逐渐增大,且普通六面体缓冲垫的缓冲系数与斜面倾角 70°,80°,85°正棱台缓冲垫相差在±0.15 之内,缓冲能力接近。在曲线的前半段,斜面倾角越小,刚度越小,缓冲性能优于大倾角缓冲垫,在曲线的后半段即重载时,大倾角的缓冲性能更优,但各个规格缓冲垫缓冲性能差距逐渐缩短。

### 2.4 同体积同接触面积正棱台缓冲垫理论设计方法

根据试验分析正棱台结构的力学性能、能量吸收性能以及缓冲性能分析的结果,进行结构设计时优先考虑斜面倾角为 70°~85°的正棱台结构。由此可知,采用正棱台倾角设计接触部位的缓冲衬垫,厚度可以先按一般缓冲系数曲线求取,按同体积同接触面积的条件限定,厚度  $t$  可由式(6)进行推导:

$$h = t + \frac{2t^2}{a \tan \theta} + \frac{4t^3}{a^2 \tan^2 \theta} \tag{6}$$

式中: $h$  为普通六面体缓冲垫的理论厚度; $t$  为同体积的正棱台缓冲垫的理论厚度; $a$  为接触面的边长; $\theta$  为正棱台的斜面倾角。

由于缓冲垫存在压缩挠曲,厚度较厚的缓冲垫容易发生挠曲,使承载能力下降,缓冲设计时,采用科斯特拉经验公式进行校核<sup>[16]</sup>:

$$\frac{A_{\min}}{(1.33t)^2} > 1 \tag{7}$$

由此, $a > 1.33t$ ,将边界值  $a = 1.33t$  代入式(6)可得,斜面倾角为 70°,75°,80°,85°正棱台缓冲垫的厚度依次至多可降低 45.85%,36.11%,25.12%,

12.96%。

## 2.5 结果

对比缓冲材料 EPS 同体积同接触面积不同斜面倾角的缓冲垫力学性能、能量吸收特性、缓冲特性曲线，可得出以下结论。

1) 当正棱台缓冲垫斜面倾角  $70^\circ$  时，其刚度、缓冲系数与普通六面体缓冲垫相差不大，缓冲能力相近，力学性能表现良好；斜面倾角为  $45^\circ\sim 65^\circ$  时，随着倾角的增大，刚度、缓冲系数均增大，缓冲能力比普通六面体缓冲垫差。

2) 在缓冲垫受到同等大冲击强度条件下，斜面倾角  $80^\circ$  正棱台缓冲垫产生的变形最小，最大静应力也最小，此时正棱台缓冲垫应变能最大，斜面倾角为  $75^\circ, 90^\circ$  次之。由此，在包装设计过程中，保持接触面积不变，将厚度换算为接触部位同体积缓冲垫变为斜面倾角  $80^\circ$  正棱台结构的厚度，不仅可以保证相同的缓冲效果，而且产品产生的相对位移比普通缓冲垫更小，产品更安全。

3) 非线性材料的正棱台缓冲垫，其缓冲性能比线性材料更为复杂。综合结构参数的影响，从应变能角度看，斜面倾角  $80^\circ$  正棱台缓冲垫的缓冲性能优于普通六面体缓冲垫，通过改变结构参数提高缓冲垫的应变能，同体积缓冲垫可吸收更多能量。

4) 在试验条件允许的情况下，可根据普通缓冲垫的缓冲系数-静应力曲线，按照式(5)换算正棱台缓冲垫厚度，推荐斜面倾角为  $70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$  正棱台结构；若试验条件不允许，优先推荐选用斜面倾角  $80^\circ$  结构进行包装设计。该研究结果可用于实际包装设计，通过改善结构降低缓冲厚度，达到减小整体包装的外形尺寸、降低包装成本、提高缓冲垫缓冲性能的目的。

## 3 结语

文中对同体积同接触面积的 EPS 正棱台缓冲垫进行静态压缩试验，得到不同结构参数下正棱台缓冲垫缓冲性能的差异。结果表明，在受到相同冲击强度条件下，同体积同接触面积斜面倾角  $80^\circ$  正棱台缓冲垫的缓冲性能最好，其产生的变形量及应力均小于普通六面体缓冲垫。按照此结构设计包装，产品更安全，接触部位厚度可降低 25.12%，整体包装成本随之下降。

文中研究基于等效面积理论，需结合实际设计案例进行产品安全评估、包装成本评估验证结论，且缓冲材料的静态缓冲特性与动态缓冲特性差异较大，后期可研究其他结构的缓冲垫静态、动态缓冲特性。

## 参考文献：

- [1] 刘冰, 于志彬, 陈志周. 基于蜂窝-瓦楞复合纸的空调室内机缓冲包装设计[J]. 包装世界, 2015(4): 36—38.  
LIU Bing, YU Zhi-bin, CHEN Zhi-zhou. Design of Cushioning Packaging for Air Conditioner Indoor Unit Based on Honeycomb Corrugated Composite Paper[J]. Packaging World, 2015(4): 36—38.
- [2] 刘扬, 张惠忠. 热态内装物对纸箱抗压强度的影响研究[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 111—115.  
LIU Yang, ZHANG Hui-zhong. Influence of Hot Charging Contents on Compression Strength of Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 111—115.
- [3] 邢圆, 姜静, 张倍豪. 基于环保意识下的适度包装设计研究[J]. 上海包装, 2016(4): 22—24.  
XING Yuan, JIANG Jing, ZHANG Bei-hao. Study Based on Appropriate Packaging Design Environmentally Conscious Package[J]. Shanghai Packaging, 2016(4): 22—24.
- [4] 张立中. 论环保材料在绿色包装设计中的应用[J]. 包装世界, 2016(3): 26—27.  
ZHANG Li-zhong. Application of Environmentally Friendly Materials Green Packaging Design[J]. Packaging World, 2016(3): 26—27.
- [5] 陈满儒, 刘兰. 基于应力-能量法的缓冲包装材料性能研究[J]. 包装工程, 2018, 39(5): 44—47.  
CHEN Man-ru, LIU Lan. Properties of Packaging Materials Based on Stress-energy Method[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 44—47.
- [6] 宋卫生. 能量吸收图法在蜂窝纸板中的应用[J]. 包装工程, 2018, 39(15): 15—20.  
SONG Wei-sheng. Application of Energy Absorption Diagram in Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(15): 15—20.
- [7] 宋晓利, 刘全校, 张改梅, 等. 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—16.  
SONG Xiao-li, LIU Quan-xiao, ZHANG Gai-mei, et al. Analysis of Cushioning Materials with Overlapping Structure of EPE and EPS Via Finite Element Method[J]. Packaging Engineering, 2016, 24(2): 14—16.
- [8] 孙德强, 张小强, 王复会, 等. 凹六边形蜂窝芯材共面准静态力学行为[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2015, 33(5): 153—156.  
SUN De-qiang, ZHANG Xiao-qiang, WANG Fu-hui, et al. In-plane Quasi-static Mechanical Behavior of Cissoidal Hexagonal Honeycomb Cores[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 33(5): 153—156.
- [9] 韩会龙, 张新春, 王鹏. 负泊松比蜂窝材料的动力学响应及能量吸收特性[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(1): 47—57.  
HAN Hui-long, ZHANG Xin-chun, WANG Peng. Dynamic Response and Energy Absorption Characteristics of Negative Poisson's Ratio Honeycomb Materials[J]. Explosion and Shock, 2019, 39(1): 47—57.

- dynamic Response and Energy Absorption Characteristics of Negative Poisson's Ratio Honeycomb Materials[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(1): 47—57.
- [10] YU Chen, NING Jiang, HONG Hu. Mechanical Modeling of an Auxetic Tubular Braided Structure: Experimental and Numerical Analyses[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 160: 182—191.
- [11] ZHONG C, SAITO K, KAWAGUCHI K. Improvement of Equivalent Drop Theory for Transport Packaging[J]. *Packaging Technology and Science*, 2013, 26(2): 67—81.
- [12] 吴莎. 能量吸收法在结构类缓冲垫设计中的应用研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012: 3—4.  
WU Sha. Application for Energy Absorption Method in the Design of Structure Cushioning PAD[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012: 3—4.
- [13] 李淑娟, 仲晨, 张居中. 异型缓冲垫的静态缓冲性能[J]. *包装工程*, 2017, 38(3): 41—45.
- LI Shu-juan, ZHONG Chen, ZHANG Ju-zhong. Static Cushioning Performance of Irregular-shaped Cushions[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(3): 41—45.
- [14] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 135—136.  
PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012: 135—136.
- [15] GB/T 8168—2008, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].  
GB/T 8168—2008, Testing Method of Static Compression for Packaging Cushioning Materials[S].
- [16] 刘璐, 张业鹏. 储水式电热水器缓冲包装结构设计[J]. *包装工程*, 2013, 34(3): 88—91.  
LIU Lu, ZHANG Ye-peng. Cushion Packaging Structure Design for Electric Water Heater[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(3): 88—91.