# 建立 EPE 和蜂窝纸板串联组合本构模型的方法

# 崔爽<sup>1,2</sup>,徐绍虎<sup>1,2</sup>

(1.制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室,重庆 400067; 2.重庆工商大学,重庆 400067)

摘要:目的 寻求建立 EPE 和蜂窝纸板串联组合本构模型的方法,为其他串联组合衬垫本构模型的建立 提供参考依据。方法 通过静态压缩试验得到 EPE 的应力-应变曲线和蜂窝纸板的应力-应变曲线,利 用三次 Bezier 曲线分别拟合其试验曲线,根据拟合曲线求 EPE 和蜂窝纸板串联组合的应力-应变曲线。 结果 EPE 和蜂窝纸板的拟合曲线与其各自的试验曲线有很好的吻合度,用同样的方法拟合得到的串 联组合的应力-应变曲线与基于其各自的本构模型计算得到的串联组合的应力-应变曲线亦很好地吻 合。结论 利用文中方法得到串联组合本构模型是可行的,为缓冲包装设计提供了参考依据。

关键词:本构模型;三次贝塞尔曲线;串联组合衬垫;参数方程

中图分类号: TB484.1; O241.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)15-0177-05 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.15.021

# Method for Establishing the Constitutive Model of EPE and Honeycomb Paperboard Series Connection

CUI Shuang<sup>1,2</sup>, XU Shao-hu<sup>1,2</sup>

(1.Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing 400067, China;
 2.Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**ABSTRACT:** The work aims to seek the method of establishing the constitutive model of EPE and honeycomb paperboard series connection, which can provide reference for establishing the constitutive model of other series connection. The stress-strain curve of EPE and the stress-strain curve of honeycomb paperboard were obtained by static compression tests. Three cubed Bezier curve was used to fit the experimental curves. And according to the fitting curve, the stress-strain curve of EPE and honeycomb paperboard series connection was obtained. The fitting curves of EPE and honeycomb paperboard were in good agreement with their respective test curves. The stress-strain curve of series connection obtained in the same way and the stress-strain curve of series connection calculated based on their constitutive models also had good consistency. The results show that it is feasible to obtain constitutive model of the series connection by the method, which provides a reference basis for cushion packaging design.

KEY WORDS: constitutive model; three cubed Bezier curve; series connection cushion; parameter equation

2种缓冲材料串联或并联形成组合衬垫后,其性 能优势可以互补,同时物流成本也会有效降低<sup>[1]</sup>。对 组合衬垫的研究主要体现在力学模型、缓冲性能、振 动特性等方面。卢富德等<sup>[2]</sup>建立了多层瓦楞纸板串联 组合衬垫的动力学模型。WANG D M 等<sup>[3-5]</sup>研究了多 层瓦楞纸板串联组合的缓冲性能。钟玲珠等<sup>[6]</sup>分析了 EPE/EPS 与蜂窝纸板串联组合的静态缓冲性能。史奥 等<sup>[7]</sup>研究 EPS 与 BC 型瓦楞纸板串联组合的缓冲性

收稿日期: 2020-12-31

基金项目:重庆工商大学校内科研项目(1552016,1552015)

作者简介:崔爽(1980—),女,硕士,重庆工商大学讲师,主要研究方向为包装材料、工艺、结构设计等。

能。朱若燕等<sup>[8]</sup>研究了不同面积蜂窝纸板串联组合的 缓冲性能。郭彦峰等<sup>[9]</sup>分析了缓冲系数在缓冲衬垫结 构设计中的应用,并推导出 2 种组合衬垫的缓冲系 数。张家凡等<sup>[10]</sup>研究了瓦楞纸板与 EPS 串联组合的 振动特性。由 2 种缓冲材料的应力-应变试验曲线可 计算得到组合衬垫的应力-应变曲线,通过拟合可得 到本构模型;不同的组合衬垫很难得到统一的本构模 型,或者为了得到统一的本构模型,拟合曲线与原曲 线的吻合度较低。为此,文中拟根据 EPE 和蜂窝纸 板各自的应力-应变试验曲线来研究 EPE 和蜂窝纸板 的串联组合本构模型的建立过程,力求为其他组合衬 垫本构模型的建立提供参考依据。

## 1 EPE 和蜂窝纸板本构模型的建立

## 1.1 EPE 和蜂窝纸板试验曲线

根据 GB/T 8168—2008<sup>[11]</sup>,采用万能材料试验机 对已经在恒温恒湿(温度设置为 23 ℃,相对湿度设 置为 50%)箱中预处理 24 h以上,厚度为 20 mm、 尺寸为 100 mm×100 mm 的 EPE 试样进行试验。EPE 应变取 0~0.9,应变采样间隔为 0.005,(应变,应力) 数据采样点取 181 个,从而得到 EPE 的应力-应变试 验曲线;用同样的方法得到厚度为 20 mm、尺寸为 100 mm×100 mm 的蜂窝纸板试样的应力-应变试验曲 线。EPE 和蜂窝纸板的应力-应变试验曲线见图 1。



图 1 EPE 和蜂窝纸板静态压缩应力-应变试验曲线 Fig.1 Static compression stress-strain curves of EPE and honeycomb paperboard

### 1.2 EPE 分段拟合曲线及本构模型

将图 1 的 EPE 应力-应变试验曲线在点 A (0.22, 0.0286) 一分为二, 分别采用三次 Bezier 曲线进行拟 合<sup>[12]</sup>。采用该方法拟合的曲线形状受 4 个控制点控制,改变控制点的位置,可以使拟合曲线和分段试验 曲线趋于重合,且拟合的曲线经过分段试验曲线的起 点和终点,相切于起(终)点和其相邻控制点连接的 边<sup>[13]</sup>。控制点拟合的 EPE 前段三次 Bezier 曲线控制 点依次取起点(0,0)、点(0.09,0.017)、点(0.11, 0.018)和分段点 *A*(0.22,0.0286),拟合的 EPE 后 段三次 Bezier 曲线控制点依次取分段点 *A*(0.22, 0.0286)、点(0.65,0.079)、点(0.80,0.161)和 终点(0.9,0.7527),得到 EPE 的应力-应变拟合曲 线见图 2 中虚线所示。图 2 中的实线为 EPE 的应力-应变试验曲线,不难看出 2 条曲线几乎重合,吻合 度很好。



图 2 EPE 的拟合曲线和试验曲线比较 Fig.2 Comparison of fitting curve and experimental curve for EPE

EPE 的本构模型用分段参数方程表示,见式(1) 和式(2)。

$$\begin{cases} \varepsilon(t)_{\text{epel}} = 0.2700t - 0.2100t^2 + 0.1600t^3\\ \sigma(t)_{\text{epel}} = 0.0510t - 0.0480t^2 + 0.0256t^3 \end{cases} \quad (0 \le t \le 1) \end{cases}$$
(1)

式中:  $\varepsilon(t)_{epel}$ 为拟合的 EPE 前段曲线对应的应 变;  $\sigma(t)_{epel}$ 为拟合的 EPE 前段曲线对应的应力 (MPa)。

$$\begin{cases} \varepsilon(t)_{epc2} = 0.2200 + 1.2900t - \\ 0.8400t^2 + 0.2300t^3 \\ \sigma(t)_{epc2} = 0.0286 + 0.1512t + \\ 0.0948t^2 + 0.4781t^3 \end{cases} \quad (0 \le t \le 1)$$
(2)

式中:  $\varepsilon(t)_{epe2}$ 为拟合的 EPE 后段曲线对应的应变;  $\sigma(t)_{epe2}$ 为拟合的 EPE 后段曲线对应的应力 (MPa)。

#### 1.3 蜂窝纸板分段拟合曲线及本构模型

同样, 将图 1 的蜂窝纸板应力-应变试验曲线以 点 B(0.025, 0.1867)、点 C(0.175, 0.0435)和点 D (0.615, 0.0711)为分段点分成 4 段, 分段点的选取 最好能满足应力单调递增或单调递减。将起点(0,0) 至分段点 B(0.025, 0.1867)之间, 分段点 C(0.175, 0.0435)至分段点 D(0.615, 0.0711)之间的 2 段试 验曲线分别用直线拟合;将分段点 *B*(0.025,0.1867) 至分段点 *C*(0.175,0.0435)之间,分段点 *D*(0.615, 0.0711)至终点(0.9,0.7511)之间的 2 段试验曲线 分别用三次 Bezier 曲线进行拟合。拟合的蜂窝纸板 前段三次 Bezier 曲线控制点依次取分段点 *B*(0.025, 0.1867)、点(0.04,0.109)、点(0.12,0.026)和 分段点 *C*(0.175,0.0435);拟合的蜂窝纸板后段三 次 Bezier 曲线控制点依次取分段点 *D*(0.615, 0.0711)、点(0.835,0.108)、点(0.845,0.122) 和终点(0.9,0.7511),得到蜂窝纸板的应力-应变 拟合曲线见图 3 中实线所示。图 3 中的虚线为蜂窝 纸板的应力-应变试验曲线,不难看出 2 条曲线几乎 重合,吻合度较好。



图 3 蜂窝纸板的拟合曲线和试验曲线比较 Fig.3 Comparison of fitting curve and experimental curve for honeycomb paperboard

蜂窝纸板的的本构模型用分段参数方程,见式(3-6)。

$$\begin{cases} \varepsilon(t)_{\text{fwzb1}} = 0.025t \\ \sigma(t)_{\text{fwzb1}} = 0.1867t \end{cases} \quad (0 \le t \le 1) \tag{3}$$

式中:  $\varepsilon(t)_{fwzb1}$ 为拟合的蜂窝纸板第 1 段曲线对 应的应变;  $\sigma(t)_{fwzb1}$ 为拟合的蜂窝纸板第 1 段曲线对 应的应力 (MPa)。

$$\begin{cases} \varepsilon(t)_{\text{fwzb2}} = 0.0250 + 0.0450t + \\ 0.1950t^2 - 0.0900t^3 \\ \sigma(t)_{\text{fwzb2}} = 0.1867 - 0.2331t - \\ 0.0159t^2 + 0.1058t^3 \end{cases} \quad (0 \le t \le 1)$$
(4)

式中:  $\varepsilon(t)_{fwzb2}$  为拟合的蜂窝纸板第 2 段曲线对应的应变;  $\sigma(t)_{fwzb2}$  为拟合的蜂窝纸板第 2 段曲线对应的应力 (MPa)。

$$\begin{cases} \varepsilon(t)_{\text{fwzb3}} = 0.1750 + 0.4400t \\ \sigma(t)_{\text{fwzb3}} = 0.0435 + 0.0276t \end{cases} \quad (0 \le t \le 1) \tag{5}$$

式中:  $\varepsilon(t)_{fwzb3}$ 为拟合的蜂窝纸板第 3 段曲线对 应的应变;  $\sigma(t)_{fwzb3}$ 为拟合的蜂窝纸板第 3 段曲线对 应的应力 (MPa)。

$$\begin{cases} \varepsilon(t)_{\text{fwzb4}} = 0.6150 + 0.6600t - \\ 0.6300t^2 + 0.2550t^3 \\ (0 \le t \le 1) \end{cases}$$

$$\sigma(t)_{\text{fwzb4}} = 0.0711 + 0.1107t - \qquad (0 \le t \le 1) \qquad (6)$$
  
$$0.0687t^2 + 0.6380t^3$$

式中:  $\varepsilon(t)_{fwzb4}$  为拟合的蜂窝纸板第 4 段曲线对 应的应变;  $\sigma(t)_{fwzb4}$  为拟合的蜂窝纸板第 4 段曲线对 应的应力 (MPa)。

# 2 EPE 和蜂窝纸板串联组合本构模型的建立

将 EPE 与蜂窝纸板串联组合后,可以直接通过 试验的方法获得其应力-应变曲线。实际上,也可以 通过已经得到的 EPE 的本构模型参数方程和蜂窝纸 板的本构模型参数方程来获得 EPE 与蜂窝纸板串联 组合的应力-应变曲线,这样就不需要进行 EPE 和蜂 窝纸板组合材料的压缩试验,还能节约试验材料。

### 2.1 理论基础

2 种面积相同的缓冲材料串联组合,组合衬垫、 衬垫1 和衬垫2 的厚度分别记为*d*,*d*<sub>1</sub>和*d*<sub>2</sub>,则:

$$d=d_1+d_{2\circ} \Leftrightarrow \frac{d_1}{d}=\alpha , \quad \frac{d_2}{d}=\beta , \quad \emptyset \mid \alpha+\beta=1_\circ$$

设组合衬垫在 2 个不同的时刻  $m \ \pi n (m > n)$ 的 总变形量分别为  $x_m \ \pi x_n$ ,衬垫 1 在时刻  $m \ \pi n$ 的变 形量分别为  $x_{1m} \ \pi x_{1n}$ , 增量记为 $\Delta x_{1mn} = x_{1m} - x_{1n}$ ,衬垫 2 在时刻  $m \ \pi n$ 的变形量分别为  $x_{2m} \ \pi x_{2n}$ ,增量记为  $\Delta x_{2mn} = x_{2m} - x_{2n}$ ,则有如式 (7)所示关系。

$$\begin{aligned} x_m &= x_{1m} + x_{2m} = \\ (x_{1n} + \Delta x_{1mn}) + (x_{2n} + \Delta x_{2mn}) = \\ x_n + \Delta x_{1mn} + \Delta x_{2mn} = \\ x_n + (x_{1m} - x_{1n}) + (x_{2m} - x_{2n}) \end{aligned}$$
(7)

设组合衬垫在 2 个不同的时刻  $m \ \pi n (m > n)$ 的 应变分别为  $\varepsilon_m \ \pi \varepsilon_n$ ,衬垫 1 在时刻  $m \ \pi n$ 的变形量  $x_{1m} \ \pi x_{1n}$ 与其厚度  $d_1$ 的比值分别为  $\varepsilon_{1m} \ \pi \varepsilon_{1n}$ ,衬垫 2 在时刻  $m \ \pi n$ 的变形量  $x_{2m} \ \pi x_{2n}$ 与其厚度  $d_2$ 的比值 分别为  $\varepsilon_{2m} \ \pi \varepsilon_{2n}$ ,则有如式(8)所示关系。

式(9)<sup>[14]</sup>。

$$\varepsilon_m = \alpha \varepsilon_{1m} + \beta \varepsilon_{2m} \tag{9}$$

根据式(8)或式(9)中的串联组合衬垫的应变 (对应厚度 d)与衬垫1的应变(对应厚度 d<sub>1</sub>)和衬 垫 2 的应变(对应厚度 d<sub>2</sub>)之间的关系,将衬垫 1 和衬垫2的应力-应变曲线上的应力按相同规律取值。 将每一应力对应的衬垫1和衬垫2的应变代入式(8) 或式(9),得到该应力下串联组合衬垫的应变,集合 串联组合衬垫一定数量的(应变,应力)数据点就可 以得到其应力-应变曲线。

## 2.2 EPE 和蜂窝纸板串联组合应力-应变曲线

由图1可知,蜂窝纸板的试验曲线有一段呈明显 递减趋势,这是由于试验时蜂窝纸板芯纸被压溃后应 力减小的缘故。EPE 和蜂窝纸板串联组合衬垫应力从 0开始增大,在达到 0.1867 MPa 之前,应变按式(8) 进行计算。由图1可知,蜂窝纸板的应力大部分集中 在蜂窝芯开始被压溃时,对应的应力在 0.1867 MPa 以下。组合衬垫应力在 0.1867 MPa 以下的, 按 0.002 MPa 递增或递减取值;应力在 0.1867 MPa 以上的, 按 0.006 MPa 递增。在组合衬垫应力达到 0.1867 MPa 后,开始减小,蜂窝纸板继续被压缩,而 EPE 由于 应力减小发生回弹, EPE 的回弹性比较好<sup>[15]</sup>, 但回弹 持续时间较短,在回弹持续时间内产生的应变变化量 相对单一 EPE 衬垫对应应变变化量(负值)较小, 可取其 0.2 倍。应力达到最低点 0.0435 MPa 后, 开始 增大, 在达到 0.1867 MPa 前, EPE 的应变变化量(正 值)相对单一 EPE 衬垫对应应变变化量较小,同样 取其 0.2 倍。此段时间内组合衬垫应变按式(8) 计 算,但 EPE 的应变变化量取单一 EPE 衬垫对应应变 变化量的 0.2 倍。当组合衬垫的应力大于 0.1867 MPa 时,应力按 0.006 MPa 递增,应变按式(8)计算。

计算结果见表 1。表 1 中组合衬垫应力  $\sigma$  按蜂窝 纸板应力变化取值,即以 0.1867 MPa 为界,小于 0.1867 MPa 时,按 0.002 MPa 递增或递减取值;大于 0.1867 MPa 时,按 0.006 MPa 递增。表 1 中还增加了 EPE 和蜂窝纸板各自的分段点和终点的值。 $t_{fwzb}$  和  $t_{epe}$  分别为取对应  $\sigma$  时蜂窝纸板和 EPE 分段参数方程的 参数值。 $\varepsilon_{fwzb}$ 和  $\varepsilon_{epe}$ 为蜂窝纸板和 EPE 分别为取  $t_{fwzb}$ 和  $t_{epe}$  时代入分段参数方程得到的应变值。组合衬垫 应变  $\varepsilon$  按前述方法计算得到。

### 2.3 EPE 和蜂窝纸板串联组合本构模型

依次连接表 1 中的 ( $\varepsilon$ ,  $\sigma$ ) 各点,得到 EPE 和蜂 窝纸板串联组合衬垫的应力-应变曲线,见图 4 中的 实线。采用三次 Bezier 曲线进行分段拟合,拟合曲线 见图 4 中的虚线。

EPE 和蜂窝纸板串联组合衬垫的本构模型用分段参数方程表示,见式(10—12)。

$$\begin{cases} \varepsilon(t)_{\text{zuhel}} = 0.6000t - 0.4200t^2 + 0.1739t^3 \\ \sigma(t)_{\text{zuhel}} = 0.1350t - 0.0600t^2 + 0.1117t^3 \end{cases} (0 \le t \le 1)$$
(10)

表 1 部分数据 Tab.1 Partial data

| σ       | $t_{\rm fwzb}$   | $\varepsilon_{\mathrm{fwzb}}$ | t <sub>epe</sub> | $\varepsilon_{\rm epe}$ | З      |
|---------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------|--------|
| 0.0000  | 0.0000           | 0.0000                        | 0.0000           | 0.0000                  | 0.0000 |
| 0.0020  | 0.0107           | 0.0003                        | 0.0407           | 0.0107                  | 0.0055 |
|         |                  |                               |                  |                         |        |
| 0.0280  | 0.1500           | 0.0037                        | 0.9811           | 0.2139                  | 0.1088 |
| 0.0286  | 0.1531           | 0.0038                        | 1.0000<br>0.0000 | 0.2200                  | 0.1119 |
| 0.0300  | 0.1607           | 0.0040                        | 0.0093           | 0.2319                  | 0.1180 |
|         |                  |                               |                  |                         |        |
| 0.18600 | 0.9961           | 0.0249                        | 0.4973           | 0.6821                  | 0.3535 |
| 0.1867  | 1.0000           | 0.0250                        | 0.4984           | 0.6828                  | 0.3539 |
| 0.1860  | 0.0031           | 0.0251                        | 0.4973           | 0.6821                  | 0.3539 |
|         |                  |                               |                  |                         |        |
| 0.0440  | 0.8036           | 0.1404                        | 0.0938           | 0.3338                  | 0.3767 |
| 0.0435  | 1.0000<br>0.0000 | 0.1750                        | 0.0909           | 0.3305                  | 0.3937 |
| 0.0440  | 0.0192           | 0.1834                        | 0.0938           | 0.3338                  | 0.3982 |
|         |                  |                               |                  |                         |        |
| 0.0700  | 0.9605           | 0.5976                        | 0.2141           | 0.4599                  | 0.6179 |
| 0.0711  | 1.0000<br>0.0000 | 0.615                         | 0.2183           | 0.4640                  | 0.6271 |
| 0.0720  | 0.0083           | 0.6204                        | 0.2218           | 0.4673                  | 0.6301 |
|         |                  |                               |                  |                         |        |
| 0.7460  | 0.9973           | 0.8996                        | 0.9962           | 0.8989                  | 0.8996 |
| 0.7511  | 1.0000           | 0.9000                        | 0.9991           | 0.8997                  | 0.9002 |
| 0.7527  |                  |                               | 1.0000           | 0.9000                  |        |



计算曲线比较



式中:  $\varepsilon(t)_{zuhel}$  为拟合的组合衬垫第 1 段曲线对 应的应变;  $\sigma(t)_{zuhel}$  为拟合的组合衬垫第 1 段曲线对 应的应力 (MPa)。

 $\begin{cases} \varepsilon(t)_{\text{zuhe2}} = 0.3539 + 0.0183t - \\ 0.0183t^2 + 0.0228t^3 \\ \sigma(t)_{\text{zuhe2}} = 0.1867 - 0.1102t - \\ 0.1298t^2 + 0.0973t^3 \end{cases} \quad (0 \le t \le 1) \quad (11)$ 

式中:  $\varepsilon(t)_{zuhe2}$  为拟合的组合衬垫第 2 段曲线对 应的应变;  $\sigma(t)_{zuhe2}$  为拟合的组合衬垫第 2 段曲线对 应的应力 (MPa)。

 $\begin{cases} \varepsilon(t)_{\text{zuhe3}} = 0.3767 + 1.0299t - \\ 0.6849t^2 + 0.1785t^3 \\ \sigma(t)_{\text{zuhe3}} = 0.0440 - 0.0360t + \\ 0.3840t^2 + 0.3591t^3 \end{cases} \quad (0 \le t \le 1) \quad (12)$ 

式中:  $\varepsilon(t)_{zuhe3}$ 为拟合的组合衬垫第 3 段曲线对 应的应变;  $\sigma(t)_{zuhe3}$ 为拟合的组合衬垫第 3 段曲线对 应的应力 (MPa)。

## 3 结语

通过试验分别得到 EPE 和蜂窝纸板的应力-应变 曲线,采用三次 Bezier 曲线分别拟合,得到各自的拟 合曲线和本构模型,本构模型用分段参数方程表示。 推导了串联组合衬垫任意时刻的应变与异于该时刻 的应变、形成串联组合衬垫的2个单一衬垫应变变化 量之间的关系式。利用该关系式得到了 EPE 和蜂窝 纸板串联组合衬垫不同应力下对应的应变数据,从而 得到其应力-应变曲线。同样采用三次 Bezier 曲线进 行拟合,得到 EPE 和蜂窝纸板串联组合衬垫的拟合 曲线和本构模型,本构模型亦用分段参数方程表示。 不难看出,EPE 和蜂窝纸板串联组合衬垫本构模型的 建立为推导求其缓冲系数提供了必要的条件,进而得 到缓冲系数-最大应力参数方程,为缓冲包装设计提 供参考依据。

### 参考文献:

- 刘晓艳,郑华明,曹国荣. EPS 与 EPE 组合使用的力 学性能研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 17—18.
   LIU Xiao-yan, ZHENG Hua-ming, CAO Guo-rong. Study of the Mechanical Performance of EPS and EPE Combination[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 17—18.
- [2] 卢富德,陶伟明,高德. 瓦楞纸板串联缓冲系统动力 学响应[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 30—32.
  LU FU-de, TAO Wei-ming, GAO De. Dynamic Response of a Series Cushioning Packaging System Made of Multi-Layer Corrugated Paperboard[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 30—32.
- [3] WANG D M. Cushioning Properties of Multi-Layer Corrugated Sandwich Structures[J]. Journal of Sand-

wich Structures and Materials, 2009, 11(1): 57-65.

- [4] SEK M A, ROUILLARD V, TARASH H, et al. Enhancement of Cushioning Performance with Paperboard Crumple Inserts[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(5): 273–278.
- [5] ROUILLARD V, SEK M A. Behaviour of Multi-layered Corrugated Paperboard Cushioning Systems under Impact Loads[J]. Strain, 2007, 43(4): 345–347.
- [6] 钟玲珠,陈安军. EPE/EPS 与蜂窝纸板组合静态缓冲 性能的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 36—39.
  ZHONG Ling-zhu, CHEN An-jun. Study on Static Cushion Performance of EPE/EPS and Honeycomb Paperboard Combination[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 36—39.
- [7] 史奧, 钱怡. EPS-BC 瓦楞串联缓冲包装结构试验研究[J]. 包装与食品机械, 2017, 35(3): 21—24.
   SHI Ao, QIAN Yi. Experimental Study on EPS and BC-Flute Corrugated Combination[J]. Packaging and Food Machinery, 2017, 35(3): 21—24.
- [8] 朱若燕, 尹琪, 李厚民. 组合蜂窝纸板缓冲性能的静态 试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(4): 105—107. ZHU Ruo-yan, YIN Qi, LI Hou-min. Study of the Performance of Combinatorial Honeycomb Paperboards Through the Static Compression[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2010, 25(4): 105—107.
- [9] 郭彦峰,赵杰,许文才.组合衬垫缓冲系数的分析与应用[J].中国包装工业,2000(6):42—44.
   GUO Yan-feng, ZHAO Jie, XU Wen-cai. Analysis and Application of Cushion Coefficient of Combinatorial Cushion[J]. China Packaging Industry, 2000(6): 42—44.
- [10] 张家凡,陈杰,吴国图. 瓦楞纸板与EPS板材组合包装垫振动传递特性的实验研究[J]. 环境技术,2006(5):22—24.
  ZHANG Jia-fan, CHEN Jie, WU Guo-tu. Study on Static Cushion Performance of EPE/EPS and Honey-comb Paperboard Combination[J]. Environmental Technology, 2006(5): 22—24.
- [11] GB/T 8168—2008, 包装用缓冲材料静态压缩试验[S]. GB/T 8168—2008, Testing Method of Static Compression for Packaging Cushioning Materials[S].
- [12] 徐绍虎,崔爽.基于本构模型的发泡聚乙烯缓冲特 性曲线研究[J].包装工程,2019,40(15):11—15. XU Shao-hu, CUI Shuang. Expanded Polyethylene Cushion Curve Based on Constitutive Model[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(15): 11—15.
- [13] 王德忠.包装计算机辅助设计[M].北京:印刷工业 出版社,2009:91—94.
  WANG De-zhong. Packaging Computer Aided Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2009: 91—94.
- [14] 彭国勋. 物流运输包装设计(第2版)[M]. 北京: 印刷 工业出版社, 2014: 111.
  PENG Guo-xun. Packaging Design for Logistic Transport(2nd Edition)[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2014: 111.
- [15] 孙聚杰,温时宝. EPE 静态压缩应力-应变曲线模拟
  [J]. 包装与食品机械, 2009, 27(1): 37—39.
  SUN Ju-jie, WEN Shi-bao. Simulation of Strain-Strain Curve for EPE Static Compression[J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(1): 37—39.