

异型缓冲垫的静态缓冲性能

李淑娟, 仲晨, 张居中
(曲阜师范大学, 日照 273865)

摘要: **目的** 研究异型缓冲垫的静态缓冲性能, 明确其与普通缓冲垫的性能差异。**方法** 以发泡聚苯乙烯(EPE)为试验材料, 将其切割成正棱台异型缓冲垫; 利用万能压力试验机分别对等效面积相同但侧面倾角不同的试样进行静态压缩试验; 绘制应力-应变曲线、能量吸收曲线和缓冲系数曲线; 将上述曲线与正六面体普通缓冲垫数据进行对比。**结果** 异型缓冲垫较普通缓冲垫刚度小, 且侧面倾角越小刚度越小。在相同应力水平下, 异型缓冲垫与普通缓冲垫的能量吸收基本相同; 在相同应变水平下, 异型缓冲垫的能量吸收小于普通缓冲垫。载荷不大时, 异型缓冲垫的缓冲系数小于普通缓冲垫, 随着应力水平的增加, 两者间的差距呈减小趋势。**结论** 异型缓冲垫的静态缓冲性能与普通缓冲垫有明显区别, 在缓冲包装设计时应根据实际情况进行充分考量, 以免造成过度包装或欠包装。

关键词: 缓冲垫; 异型; 静态缓冲特性; 缓冲系数; 刚度

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0041-05

Static Cushioning Performance of Irregular-shaped Cushions

LI Shu-juan, ZHONG Chen, ZHANG Ju-zhong
(Qufu Normal University, Rizhao 273865, China)

ABSTRACT: The work aims to study the static cushioning property of irregular cushions to pinpoint their difference from ordinary cushions in property. With expanded polyethylene (EPE) as the test material, it was cut into a prismoid cushion. The universal compression tester was used to carry out the static compression test on the samples of the same equivalent area but different side dip angles. Stress-strain curves, energy absorption curves and cushioning coefficient curves were plotted. Comparisons on the data between the above-mentioned curves and the regular hexahedron cushions were made. The rigidity of the irregular cushions was smaller than that of regular cushions. The rigidity became smaller with the decrease in the side dip angle. The energy absorption of the irregular cushions approached that of the regular cushions at the same stress level. However, the energy absorption of irregular cushions was smaller than that of the regular cushions at the same strain level. The cushioning coefficient of the irregular cushions was smaller than that of the regular cushions when the load was small. The difference was not significant with the increase of the stress. There is a significant difference in the static cushioning property between the irregular and regular cushions. Therefore, to avoid excessive packaging or insufficient packaging, considerations should be carefully taken for the design of cushioning package according to the specific circumstances.

KEY WORDS: cushion; irregular shape; static cushioning performance; cushioning coefficient; rigidity

缓冲包装在现代物流中具有重要的作用, 它可以有效保护产品不受外界载荷的作用而损坏。根据缓冲包装设计“六步法”^[1-2], 缓冲材料的性能是缓冲包装设计的基础依据之一。虽然包装件在各种激励下呈现

的损伤失效形式具有多样性和复杂性, 但从力学角度看, 包装件的各种损伤现象都是由于结构材料在外载荷作用下的响应参数(应力、变形、加速度、位移等)超过了其容许的极限所致。包装材料缓冲性能描述的

收稿日期: 2016-07-03

作者简介: 李淑娟(1975—), 女, 曲阜师范大学副教授, 主要研究方向为运输包装。

通讯作者: 仲晨(1979—), 男, 博士, 曲阜师范大学讲师, 主要研究方向为运输包装、包装仿真和包装结构设计。

准确性对能否进行最优缓冲包装设计有着直接和重要的影响。

国内外学者就包装材料缓冲性能这一课题,在环境对材料性能的影响、材料的动静态性能、材料性能表征等方面^[3-9]进行了许多基础性研究,但这些研究的试验样品均为标准的六面体形状,而非实际物流过程中所用的非六面体的异型缓冲垫。现有文献对异型缓冲垫的性能研究主要集中在纸板类缓冲垫方面^[10-14];针对发泡塑料类异型缓冲垫,彭国勋^[2]基于同一层缓冲垫应力均匀分布假设,给出了等效面积理论,但该理论的假设前提与实际情况也有出入。可见,针对异型缓冲垫的研究目前尚不深入,研究形状对缓冲材料性能的影响具有重要的现实意义。

文中以正棱台异型缓冲垫为切入点,通过实验研究了不同形状参数的 EPE 材料的静态缓冲性能,并进行对比分析,得到正棱台异型缓冲垫的缓冲特性,为缓冲包装设计提供理论支持,同时也为其他类型的泡沫材料的缓冲性能研究提供借鉴。

1 实验设计

1.1 材料和仪器设备

该研究以发泡聚苯乙烯 EPE (厚度为 40 mm, 发泡倍率为 25 倍, 密度为 20 kg/m³) 为实验材料, 将其切割成正棱台形状。考虑到实际生产设计情况, 棱台缓冲垫的侧面倾角 θ 大于 45° 的情况是极少见的; 同时, 为了更好地进行对比, 该实验同时包含六面体普通缓冲垫, 即 $\theta=90^\circ$ 。 θ 被设定为 50°, 60°, 70°, 80°, 90°, 缓冲垫结构及试样材料规格分别见图 1 和表 1。所有试样的等效面积设定为 10 000 mm², 其中异型缓冲垫试样的等效面积的计算为^[2]: $A_e=ab$ 。 A_e 为正棱台异型缓冲垫等效横截面积; a 、 b 分别为正棱台异型缓冲垫的上、下底面边长。实验设备为 WD 型电子万能试验机 (长春市月明小型试验机械有限责任公司)。

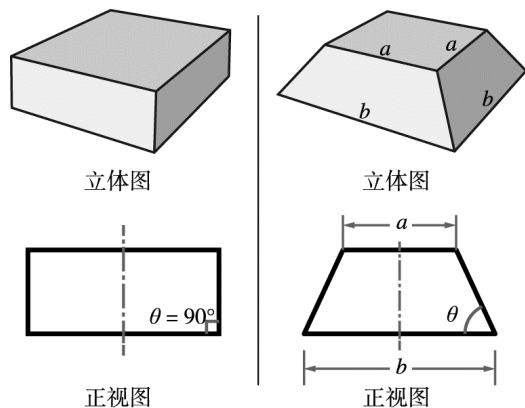


图 1 普通与异型缓冲垫
Fig.1 Regular and irregular cushions

表 1 实验材料规格
Tab.1 Dimension of the testing samples

侧边倾角/(°)	顶面边长/mm	底面边长/mm	等效面积/mm ²
90	100	100	10 000
80	91	106	9646
70	89	116	10 324
60	83	126	10 458
50	77	140	10 780

1.2 实验方法

按照 GB/T 8168—2008 进行静态压缩实验^[15], 该标准中实验方法分为不进行预处理和进行预处理后再实验 2 种, 结合实际设计中总是优先考虑新材料的原则, 该研究采用不进行预处理的方法进行试验。针对表 1 所列 5 种规格的试样, 每种规格进行 3 次重复性试验, 每次试验将一块试样连续压缩 5 次, 每次压缩间隔 5 min。

1) 将试样置于平整桌面上, 在试样的上表面放置一块平整的刚性平板, 使试样受到 (0.2 ± 0.02) kPa 的静压力载荷 (梯台试样以等效面积计算压力)。30 s 后在载荷状态下使用数显游标卡尺测量试样四角的厚度, 计算厚度平均值 (精确到 0.1 mm)。

2) 按照 GB/T 8168—2008, 设置试验机的压缩速度为 (12 ± 3) mm/min, 最大压缩量设定为 30 mm (即最大应变 ε_m 为 75%)。把试样放在压板之间, 保证试样两端面与压板表面平行。

3) 沿厚度方向对试样进行加载, 并记录压缩力和变形值。

1.3 数据处理

由实验获得缓冲垫的压缩力及变形数据:

$$\begin{bmatrix} F \\ \Delta L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdots F_i \cdots \\ \cdots \Delta L_i \cdots \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $[F]$ 为压缩力序列; $[\Delta L]$ 为变形量序列; i 为数据点序号。

基于式(1)的原始实验数据, 可得材料的应力 σ 及应变 ε 数据:

$$\begin{bmatrix} \sigma \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdots \sigma_i \cdots \\ \cdots \varepsilon_i \cdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdots \frac{F_i}{A_e} \cdots \\ \cdots \frac{\Delta L_i}{L} \cdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $[\sigma]$ 为应力序列; $[\varepsilon]$ 为应变序列; A_e 为等效面积, 这里对于不同侧面倾角 θ 的缓冲垫的 A_e 取表 1 中各值; L 为缓冲垫厚度, 这里均为 40 mm。

材料在不同应力 σ_i 和应变 ε_i 条件下所吸收能量 $[e]$ 的计算为:

$$[e] = [\cdots e_i \cdots] =$$

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 \cdot \varepsilon_1) + \sum_{i=2}^n \frac{(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{2} \quad (3)$$

式中: n 为应力-应变(σ - ε)曲线上点的分割份数。

在式(2)—(3)的基础上, 可计算得到材料的缓冲系数 $[C]$:

$$[C] = [\dots C_i \dots] = \left[\dots \frac{\sigma_i}{e_i} \dots \right] \quad (4)$$

2 试验结果与分析

2.1 异型缓冲垫对刚度的影响

基于上述数据分析, 不同规格 EPE 材料的 σ - ε 曲线归纳见图 2。

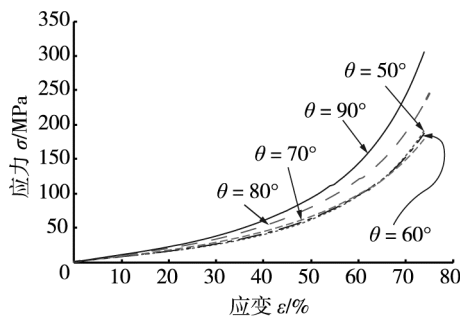


图 2 不同规格 EPE 材料的应力-应变曲线

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

异型缓冲垫不论侧面倾角 θ 大小如何($\theta=70^\circ$, 60° , 50°), 其 σ - ε 曲线均在普通缓冲垫($\theta=90^\circ$)之下, 说明异型缓冲垫的刚度较普通缓冲垫要小。

当侧面倾角 θ 由 90° 向 70° 变化时 (即棱台斜面变得越来越大), 随着 θ 的减少, 异型缓冲垫的刚度越来越小, 即材料越软。当侧面倾角 $\theta \leq 70^\circ$ (50° , 60° , 70°) 时, 其 σ - ε 曲线基本重合, 说明当 θ 减小到一定程度 (阈值为 70°) 时, 异型缓冲垫的刚度几乎不再随 θ 而减小, 因此可以用 70° 的应力-应变曲线描述侧面倾角小于 70° 的异型缓冲垫。可见, 较之普通缓冲垫, 异型缓冲垫的刚度变小, 材料变软; 但当侧面倾角 $\theta < 70^\circ$ 时, 其刚度不再有显著变化。 $\theta=70^\circ$ 可以作为 EPE 正棱台异型缓冲垫的重要参考数据。

2.2 异型缓冲垫的能量吸收特性

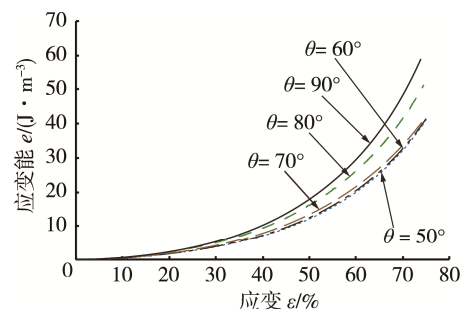
2.2.1 同一应变水平

同一应变水平下不同规格 EPE 试样的 e - ε 曲线见图 3a。可知, 在同一应变水平下, 异型缓冲垫的能量吸收小于普通缓冲垫, 这一点与同一应力水平下的能量吸收特性相反; 当侧面倾角 θ 在 90° 向 70° 变化时, 随着 θ 的减小, 异型缓冲垫的能量吸收能力逐渐降低; 当倾角减小到 70° 以下 (50° , 60° , 70° 曲线) 时, 曲线基本保持重合, 能量吸收保持相同。由此可

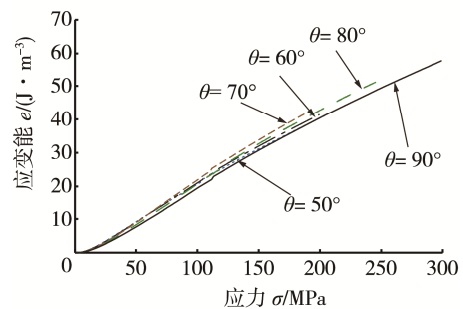
知, 当衬垫变形量相同时, 异型缓冲垫吸收的能量减少, 缓冲能力下降。基于普通缓冲垫设计的缓冲包装在冲击强度相同时很可能会由于变形量过大而产生损坏, 从而影响包装件的安全。

2.2.2 同一应力水平

同一应力水平下不同规格 EPE 试样的 e - σ 曲线见图 3b。 e 又被称为单位体积变形能, 它表征了单位体积的缓冲材料可吸收冲击能力的大小。通过应变能分析可以判断出材料的能量吸收特性。由 e - σ 曲线可知, 异型缓冲垫吸收冲击能量的性能较普通缓冲垫有提高, 但差异不大。由上述刚性分析可知, 这种结果应该是异型缓冲垫刚性降低, 材料变软所致; 在同一应力水平下, 不同侧面倾角 θ 的异型缓冲垫的能量吸收能力基本相同, 从能量吸收与冲击应力角度来看, 异形缓冲垫侧面倾角 θ 的影响并不显著。



a 同一应变水平



b 同一应力水平

图 3 应变能-应变曲线和应变能-应力曲线

Fig.3 Strain energy-strain and strain energy-stress curves

2.3 异型缓冲垫的缓冲系数

不同规格 EPE 的缓冲系数-应力(C - σ)曲线见图 4, 为了使比较结果更清晰, 纵坐标使用了对数坐标。可知, 在同样的应力水平下, 普通缓冲垫的缓冲系数最大, 缓冲性能最差, 而异型缓冲垫随着侧面倾角 θ 的减小, 缓冲系数逐渐减小, 缓冲性能逐渐增强; 缓冲系数并不严格遵循 θ 越小 C 越小的规律, 而是当 $\theta=70^\circ$ 时 C 最小, 可见, 对于正棱台异型缓冲垫, 可以将 $\theta=70^\circ$ 作为最佳参考值; 从曲线的后半段看, 在重载时各曲线更接近, 材料的缓冲能力表现出相同的趋势。

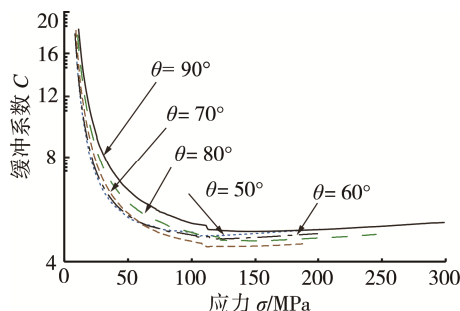


图4 不同规格EPE的缓冲系数-应力曲线
Fig.4 Cushioning coefficient-stress curves of EPE with varied specifications

2.4 材料变形机理

该试验所用EPE材料属于典型的闭孔泡沫缓冲材料。当泡沫材料处于压缩载荷下时,由固相的支撑结构和气相的密封空气共同承担载荷作用。

对于材料内部胞元,在压力作用下固相和气相分别通过弹(塑)性变形和变为压缩气体吸收冲击能量。考虑到内部大部分细胞结构呈封闭状态,因此当胞元内气体压缩时,内部各个胞壁两侧均有压缩气体,则胞壁所承受的压力为胞元两侧压差。越靠近材料内部,胞元受到的挤压越大,变形越大,即内部胞元的气压大于边缘胞元的气压,即从内向外材料的压力梯度是逐渐减小的,材料边界的刚度小于其内部刚度。对于处于边界的胞元,由于切割造成其表面胞壁破坏,形成开孔结构,且切割面积越大,开孔结构越多。当受到压缩载荷时,边界胞元仅靠固相结构通过弹(塑)性变形吸收冲击能量,承载能力较之内部胞元明显下降。由于材料边界的刚度总小于其内部刚度,且边界承载能力较之内部胞元明显下降,因此材料边界面积越大,其总体刚性越小。对于正棱台异型缓冲垫,其边界面积显著大于六面体普通缓冲垫,因此刚度更小,即正棱台异型缓冲垫更为柔软。

鉴于上述分析,对于异型缓冲垫而言有如下结论,在同等应变水平下其应力更小,同等应力水平下其应变更大,即:

$$\begin{aligned} \sigma'_\varepsilon &< \sigma_\varepsilon \\ \varepsilon'_\sigma &< \varepsilon_\sigma \end{aligned} \quad (5)$$

式中: σ'_ε , σ_ε 分别为异型缓冲垫、普通缓冲垫在应变为 ε 时的应力水平; ε'_σ , ε_σ 分别为异型缓冲垫、普通缓冲垫在应力为 σ 时的应变水平。

对于相同应变水平下的异型缓冲垫和普通缓冲垫的能量吸收:

$$e'_\varepsilon = \int_0^\varepsilon \sigma'_\varepsilon d\varepsilon \quad (6)$$

$$e_\varepsilon = \int_0^\varepsilon \sigma_\varepsilon d\varepsilon \quad (7)$$

式中: e'_ε , e_ε 分别为同种应变水平下异型缓冲垫、普通缓冲垫的应变能。

对比式(6)~(7),由于应变水平相同,即积分区间相同,又由式(5)知 $\varepsilon'_\sigma > \varepsilon_\sigma$, 则不难得出 $e'_\varepsilon < e_\varepsilon$, 即正棱台异型缓冲垫的能量吸收减少,缓冲能力降低。对于相同应力水平下的异型缓冲垫和普通缓冲垫的能量吸收:

$$e'_\sigma = \int_0^{\varepsilon'_\sigma} \sigma'_\sigma d\varepsilon \quad (8)$$

$$e_\sigma = \int_0^{\varepsilon_\sigma} \sigma_\sigma d\varepsilon \quad (9)$$

式中: e'_σ , e_σ 分别为同种应力水平下异型缓冲垫、普通缓冲垫的应变能。

对于式(8)~(9),由式(5)可知,尽管被积函数 $\sigma'_\varepsilon < \sigma_\varepsilon$,但积分区间 $\varepsilon'_\sigma > \varepsilon_\sigma$,两者相互抵消,这造成了异型缓冲垫和普通缓冲垫的能量吸收差异不大。

2.5 结果分析

对比正棱台异型缓冲垫与六面体普通缓冲垫,可以得出如下结论。

1) 当侧面倾角 θ 在 $70^\circ \sim 90^\circ$ 时,异型缓冲垫随着 θ 的减小,刚度、缓冲系数均减小;当 $\theta < 70^\circ$ 时,其力学性能基本与 70° 时相同。从刚度和缓冲系数的角度考虑,异型缓冲垫的缓冲能力优于普通缓冲垫,利用普通缓冲垫的设计原则设计出的异型缓冲垫处于设计安全侧,但可能会产生过度包装的问题。

2) 在同等冲击强度(冲击能量相同)条件下,异型缓冲垫的冲击应力与普通缓冲垫的冲击应力基本相同。从这一角度考虑,两者的缓冲性能相同。此外,在该条件下,异型缓冲垫的应变大于普通缓冲垫,即异型缓冲垫的变形量大于普通缓冲垫。若仍按普通缓冲垫的设计原则设计异型缓冲垫,则可能由于缓冲垫变形量过大而导致产品位移过大,造成内装物损坏,从而可能产生欠包装的问题。

3) 通过缓冲系数曲线可以看出,当 $\theta = 70^\circ$ 时 C 最小。可见,对于异型缓冲垫,可以将 $\theta = 70^\circ$ 作为侧面倾角的最佳参考值。

4) 从材料的变形机理分析,造成异型缓冲垫缓冲性能差异的主要原因是由于其较之普通缓冲垫具有更大的边界、开孔胞元更多、衬垫总体硬度更软所致。

综上所述,异型缓冲垫的力学性能与普通缓冲垫的静态力学性能有明显差异,在进行缓冲包装设计时应充分考虑,避免出现过度包装和欠包装的问题。

3 结语

以正棱台形EPE缓冲垫为研究对象,通过静态压缩实验分析了其缓冲性能。结果表明,异型缓冲垫的缓冲性能与六面体普通缓冲垫有明显差异。对于以冲击应力为安全性评价指标的包装件,异型缓冲垫的

缓冲性能优于普通缓冲垫。对于以位移为安全性评价指标的包装件, 异型缓冲垫的缓冲性能劣于普通缓冲垫, 尤其在 $\theta > 70^\circ$ 时, θ 对缓冲性能的影响显著, 在 $\theta < 70^\circ$ 时, 异型缓冲垫的缓冲能力可用 70° 时的代替。进行异型缓冲垫设计时, 应充分考虑包装件的失效形式(位移、应力)和缓冲垫的形状参数, 避免造成包装不当尤其是欠包装的问题。

此外, 鉴于缓冲包装材料在受到动、静态压缩时的力学表现差异较大, 该研究由于试验条件限制仅进行了静态压缩试验, 故目前成果有一定局限性。在今后的研究中, 将进行动态特性分析的进一步研究。

参考文献:

- [1] GOODWIN D, YOUNG D. Protective Packaging for Distribution[M]. Lancaster: DEStech Publications Inc, 2011.
- [2] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Design of Transportation Packaging [M]. Beijing: Graphic Communication Press, 2012.
- [3] 计宏伟, 王怀文. 基于高速图像测量技术的缓冲材料缓冲性能表征[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 216—220.
JI Hong-wei, WANG Huai-wen. Characterization of Dynamic Cushioning Property of Cushioning Material Based on High-speed Image Measurement Technology [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 216—220.
- [4] 杨帅, 康勇刚, 齐菲. 低温对聚乙烯发泡材料动态缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 21—25.
YANG Shuai, KANG Yong-gang, QI Fei. Effect of Low Temperature upon Dynamic Cushioning Properties of EPE Foam Material[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 21—25.
- [5] 刘继飞. 缓冲包装材料性能的分析方法与研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(7): 149—155.
LIU Ji-fei. Analysis Method and Research Progress in Cushioning Performance of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7): 149—155.
- [6] 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): 36—39.
SUN Ju-jie, WEN Shi-bao. Simulation of Strain-strain Curve for EPE Static Compression[J]. Food and Packaging Machinery, 2009, 27(1): 36—39.
- [7] 张秀梅, 徐伟民, 张衡. 小麦秸秆缓冲包装材料的力学性能研究[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 26—30.
ZHANG Xiu-mei, XU Wei-min, ZHANG Heng. Mechanical Properties of Wheat Straw Cushioning Packaging Material[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 26—30.
- [8] 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 Properties for Cushioning Materials with Overlapping Structures of EPE and EPS Via Finite Element Method[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2016, 24(2): 14—16.
- [9] 沈伊淇, 康勇刚. EPE 棱跌落缓冲性能试验研究[J]. 包装工程, 2015, 36(21): 38—42.
SHEN Yi-qi, KANG Yong-gang. Experimental Research on Drop Cushioning Performance at the Edge of EPE[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(21): 38—42.
- [10] 李洪贵, 苏婷, 张新昌. 一种异形多边形瓦楞纸箱的抗压性能研究[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 52—55.
LI Hong-gui, SU Ting, ZHANG Xin-chang. Compressive Properties of an Irregular Polygonal Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 52—55.
- [11] ZHONG C, SAITO K. Modified Simulated Drop Test for Transmitted Shock Characteristics of Structural Corrugated Fiber Board[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2010, 4(4): 189—201.
- [12] ZHONG C, SAITO K. Equivalent Drop Test for Structural Pulp Mould Cushion[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2012, 6(3): 185—201.
- [13] ZHONG C, SAITO K. Modified Equivalent Drop Test for Structural Corrugated Fiberboard Cushioning[J]. Journal of Package Science & Technology, 2012, 21(4): 281—293.
- [14] ZHONG C, SAITO K, KAWAGUCHI K. Improvement of Equivalent Drop Theory for Transport Packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26(2): 67—81.
- [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].