

# 环境相对湿度对牛皮纸垫缓冲性能影响的研究

覃敏, 方健, 杨旭, 陶文轩, 于雷

(北京林业大学 木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 探究环境相对湿度对新型牛皮纸垫缓冲性能的影响。**方法** 基于静、动态压缩试验, 分析叠加层数分别为 2、3、4 的牛皮纸垫在环境相对湿度分别为 30%、50%、70%、90% 条件下的缓冲性能。**结果** 在静态压缩试验中, 牛皮纸垫静压承载能力随着环境相对湿度的增大而减弱、叠加层数的增多而增强。不同规格纸垫存在对应的湿度应力分界值, 当材料所受外力小于湿度应力分界值时, 其缓冲性能随着湿度的增大而提高; 当外力大于湿度应力分界值时, 缓冲性能随湿度的增大而减弱。一定湿度条件下, 叠加层数对牛皮纸垫缓冲性能也存在影响: 相对湿度为 30% 时, 缓冲性能随叠加层数的增多而减弱; 相对湿度为 50%、70%、90% 时, 存在层数应力分界值, 当材料所受外力小于层数应力分界值时, 其缓冲性能随叠加层数的增多而减弱, 当外力大于层数应力分界值时, 缓冲性能随叠加层数的增多而增强。在动态压缩试验中, 随着环境相对湿度的增加, 牛皮纸垫传递给产品的最大加速度增大, 缓冲性能减弱; 叠加层数的增多, 使其传递给产品的最大加速度减小, 缓冲性能增强。**结论** 研究结果对牛皮纸垫缓冲包装的设计和材料选择存在潜在的指导意义。

**关键词:** 牛皮纸垫; 缓冲性能; 静态压缩; 动态压缩; 环境相对湿度

中图分类号: TH212; TH213.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)09-0190-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.023

## Effect of Ambient Relative Humidity on Cushioning Performance of Kraft Paper Pads

QIN Min, FANG Jian, YANG Xu, TAO Wen-xuan, YU Lei

(MOE Key Laboratory of Wood Material Science and Application, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the effect of ambient relative humidity on the cushioning performance of a new kraft paper pad. Based on static and dynamic compression tests, the cushioning performance of kraft paper pads of 2, 3 and 4 layers was analyzed under 30%, 50%, 70% and 90% ambient relative humidity. In the static compression test, the static pressure bearing capacity of kraft paper pad decreased with the increase of relative humidity, but increased with the increasing superimposed layers. There were humidity stress boundary values of paper pads of different specifications. When the external force on the material was less than the humidity stress boundary value, the cushioning performance increased with the increase of humidity. When the external force was greater than the humidity stress boundary value, the cushioning performance decreased with the increase of humidity. Under certain humidity conditions, the number of superimposed layers also affected the cushioning performance of kraft paper pad. At 30% relative humidity, the cushioning performance decreased with the increase of the number of layers. At 50%, 70% and 90% relative humidity, there were

收稿日期: 2022-09-04

基金项目: 北京林业大学中央高校基本科研业务费专项资金 (2017JC12)

作者简介: 覃敏 (1997—), 女, 硕士生, 主攻缓冲包装。

通信作者: 方健 (1978—), 女, 博士, 主要研究方向为功能性包装材料, 包括淀粉、纤维素、壳聚糖、PVA 等可降解包装材料及相变微胶囊材料的研究。

stress boundary values corresponding to the number of layers. When the external force on the material was less than the stress boundary value of the number of layers, the cushioning performance decreased with the increase of the number of layers. When the external force was greater than the stress boundary value of the number of layers, the cushioning performance increased with the increase of the number of superimposed layers. In the dynamic compression test, with the increase of the ambient relative humidity, the maximum acceleration transmitted by the kraft paper pad to the product increased, and the cushioning performance decreased. The increase in the number of superimposed layers reduced the maximum acceleration transmitted to the product and enhanced the cushioning performance. The above results have potential guiding significance for the design and material selection of kraft paper pad cushioning packaging.

**KEY WORDS:** kraft paper pad; cushioning performance; static compression; dynamic compression; ambient relative humidity

伴随着《“十四五”循环经济发展规划》的出台以及限塑令的下达, 国家邮政总局大力推动绿色包装的发展<sup>[1-2]</sup>。纸质包装材料与其他包装材料相比, 加工工艺成熟, 成本稳定, 绿色环保, 得到了广泛应用, 成为近年来缓冲包装行业的新宠<sup>[3-4]</sup>。如今市场上出现了一种新型纸质缓冲包装材料——牛皮纸垫, 将一种长纤维、高韧度的牛皮纸通过专门的纸垫机折叠挤压成型, 使之成为具有规则折皱的缓冲包装材料。空气被锁在折皱的纸层中, 纸垫受到外力作用时, 通过本身折皱变形吸收压缩能, 从而对产品起到缓冲保护作用<sup>[5]</sup>。目前, 牛皮纸垫广泛应用于家具用品、化妆品、通信电子等行业, 特别适用于易碎产品的缓冲防护。常见的包装形式有十字交叉形、折叠填充、四周环绕等。对比其他纸质包装材料, 牛皮纸垫成型简单, 包装形式更灵活, 且在生产制造过程中能够较大地利用原料。

纸质材料被广泛应用于运输包装, 纸基材料本身固有的吸湿性导致其在使用过程中对环境相对湿度尤为敏感, 基本物理性能易受影响, 从而导致缓冲性能的变化, 因此有少部分学者探究了环境相对湿度对瓦楞纸板和蜂窝纸板等纸质材料缓冲性能的影响。汪苗苗<sup>[6]</sup>在探究环境温湿度对瓦楞纸板缓冲性能的影响实验中, 通过静态压缩试验方法, 讨论了瓦楞纸板在不同湿度条件下的应力-应变曲线以及缓冲系数, 结果表明, 受环境相对湿度的影响, 缓冲系数随着湿度的增大逐渐变小。孙爽<sup>[7]</sup>同样通过静态压缩的方法探究了环境相对湿度对瓦楞纸板静态承载性能的影响, 发现当环境相对湿度为 50%~75%时, 平台应力和初始峰值应力的下降趋势不明显; 当环境相对湿度超过 85%时, 平台应力下降明显, 承载力减弱。除了用缓冲系数法表征瓦楞纸板的缓冲性能, 吴莎<sup>[8]</sup>使用能量吸收法探究环境湿度对瓦楞纸板缓冲性能的影响, 得出环境湿度与弹性比能之间呈线性的关系, 并且随着相对湿度的增大, 应力和单位体积吸收能均减小。环境相对湿度对蜂窝纸板缓冲性能同样存在影响, 张志昆<sup>[9]</sup>探究了 5 个湿度条件下蜂窝纸板的静态压缩缓冲性能, 在环境相对湿度为 35%~95%时, 蜂窝纸板压缩性能有较明显变化, 随着环境相对湿度的

增加, 材料在弹性阶段的应力值和屈服阶段的应力值都随之下降。鄂玉萍<sup>[10]</sup>研究了蜂窝纸板和瓦楞纸板在不同湿度和不同初始应变率下的能量吸收性能, 得出 2 种纸板的能量吸收能力随相对湿度的增加呈现出阶段性响应的规律。徐烁等<sup>[11]</sup>研究了蜂窝纸板在 3 种不同湿度条件下的动态压缩性能, 结果表明, 随着相对湿度的增大, 蜂窝纸板吸收能量的能力随之减弱。牛皮纸垫作为一种新型的纸质缓冲材料, 目前缺乏关于环境相对湿度对其缓冲性能影响的研究。因此, 本文基于静、动态压缩试验, 根据静态压缩试验结果分析 4 种环境相对湿度条件下材料的应力-应变曲线、弹性比能、缓冲系数, 以及动态压缩试验中得到的最大加速度曲线, 探究牛皮纸垫的缓冲性能, 为其缓冲包装设计及应用提供参考。

## 1 试验

### 1.1 材料与仪器

主要材料: 牛皮纸垫, 如图 1a 所示, 购于上海贵荣纸业有限公司, 定量为 70 g/m<sup>2</sup>, 未经防潮处理。将条状纸垫裁切成为 100 mm×100 mm 大小, 在实际应用中, 牛皮纸垫存在折叠使用的情况, 因此将其分别制成叠加层数为 2、3、4 层纸垫试样, 如图 1b 为叠加层数为 3 的试样。试验所用的试样规格如表 1 所示, 试样以“S-叠加层数”命名, 如“S-3”表示叠加层数为 3 层的试样。在不同环境相对湿度下进行试验的试样以“湿度-试样名称”表示, 如“30%-S-3”表示在 30%湿度下进行试验的 3 层试样。



a 牛皮纸垫

b 3层试样

图 1 牛皮纸垫试样  
Fig.1 Kraft paper pad sample

表 1 牛皮纸垫试样规格  
Tab.1 Specifications of kraft paper pad sample

| 试样规格 | 原纸定量/(g·m <sup>-2</sup> ) | 叠加层数 | 初始厚度/mm |
|------|---------------------------|------|---------|
| S-2  | 70                        | 2    | 25.12   |
| S-3  | 70                        | 3    | 30.56   |
| S-4  | 70                        | 4    | 40.29   |

主要仪器：MMW-50 万能材料试验机，济南耐而试验机有限公司；DY-2 跌落冲击试验机，陕西科技大学；HWS-150B 型号恒温恒湿箱，天津市泰斯特仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

静态压缩试验和动态压缩试验是评价缓冲材料静态缓冲性能的基本方法。将表 1 所有牛皮纸垫试样放置于恒温恒湿箱内，在温度为 23 °C，湿度分别为 30%、50%、70%、90%条件下分别预处理 48 h。静态压缩试验参照 GB/T 8168—2008<sup>[12]</sup>《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》中规定的方法 A，每种试样进行 10 次重复试验，至少取 5 次有效数据平均值。动态压缩试验参照 GB/T 8167—2008<sup>[13]</sup>《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》。由于牛皮纸垫属于纸制品，承受一次冲击就被压溃，从而造成缓冲性能下降。所以在动态压缩试验中，每冲击 1 次，试样需更换 1 次。同种条件下进行 15 次重复试验，取 10 次有效最大加速度值进行平均。

## 2 结果与分析

### 2.1 静态压缩试验

#### 2.1.1 应力-应变曲线

根据式(1)计算应力、应变，绘制应力-应变(σ-ε)曲线。

$$\sigma = \frac{P}{A} \times 10^3, \quad \varepsilon = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \quad (1)$$

式中：σ 为压缩应力，kPa；P 为压缩载荷，N；A 为试样承受面积，mm<sup>2</sup>；ε 为压缩应变；d<sub>0</sub> 为试样原始厚度，mm；d<sub>1</sub> 为试样试验后的厚度，mm。

牛皮纸垫在不同环境相对湿度条件下受到静压后的应力-应变曲线如图 2 所示，可以看出环境相对湿度对牛皮纸垫静压承载能力有影响。3 种规格的牛皮纸垫均体现出在同一应变下，应力随着湿度的增大而减小的规律，且在环境相对湿度为 90% 条件下，S-2、S-3、S-4 这 3 种规格试样在达到 0.8 高程度应变时应力值分别小于 10、20、30 kPa，说明在高湿条件下，材料承受外力的能力较差。其原因在于纸张因吸水而溶胀，当纤维吸收水分超过一定量时，出现水分扩张使得纤维之间的结合力减

弱，从而降低纸张的强度，材料抵抗外界载荷的能力下降，甚至在 90% 的高湿条件下几乎不能承受外力作用<sup>[14]</sup>。

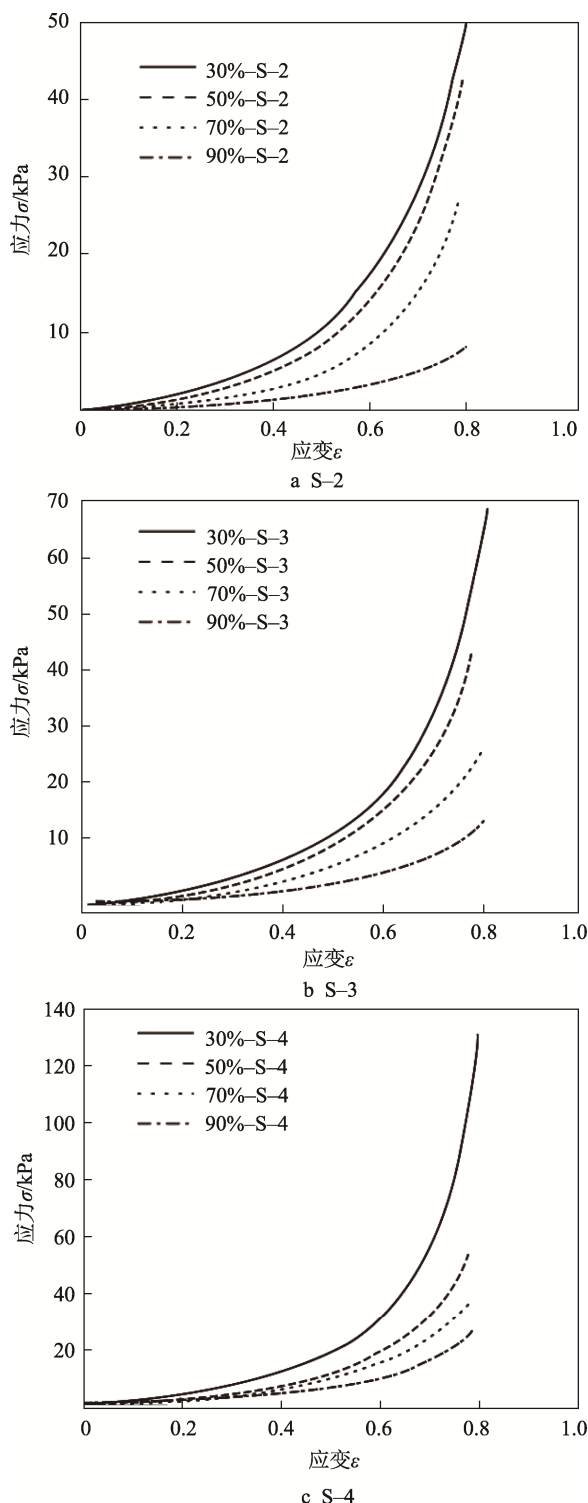


图 2 不同环境相对湿度下的应力-应变曲线(23 °C)

Fig.2 Stress-strain curves under different ambient relative humidity conditions (23 °C)

表 2 列出了 3 种规格牛皮纸垫环境相对湿度增大与应力减小的比例关系。从表 2 可以看出 S-2 与 S-3

表 2 相同应变下随湿度增大应力减小百分比  
Tab.2 Percentage of stress decrease with the increase of humidity at the same strain

| 试样编号    | $\sigma_{0.4}/\text{kPa}$ | $\sigma_{0.5}/\text{kPa}$ | $\sigma_{0.6}/\text{kPa}$ | $\sigma_{0.7}/\text{kPa}$ | $\sigma_{0.8}/\text{kPa}$ | 应力减小百分比/%   |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| 30%-S-2 | 6.62                      | 10.7                      | 17.45                     | 28.54                     | 49.93                     |             |
| 50%-S-2 | 5.43                      | 8.83                      | 14.52                     | 24.63                     | 43.12                     | 13.64~17.98 |
| 70%-S-2 | 3.06                      | 5.1                       | 9.04                      | 15.67                     | 27.52                     | 36.18~43.65 |
| 90%-S-2 | 1.61                      | 2.38                      | 3.4                       | 5.18                      | 7.9                       | 47.39~71.29 |
| 30%-S-3 | 7.81                      | 12.22                     | 19.87                     | 33.89                     | 68.7                      |             |
| 50%-S-3 | 6.37                      | 10.36                     | 16.73                     | 28.03                     | 45.01                     | 15.22~34.48 |
| 70%-S-3 | 4.33                      | 6.88                      | 10.7                      | 16.82                     | 26.67                     | 32.03~59.25 |
| 90%-S-3 | 2.46                      | 3.65                      | 5.52                      | 8.66                      | 14.02                     | 43.19~48.51 |
| 30%-S-4 | 11.08                     | 17.71                     | 30.06                     | 56.18                     | 130.19                    |             |
| 50%-S-4 | 6.88                      | 11.26                     | 18.55                     | 31.44                     | 56.63                     | 36.42~56.52 |
| 70%-S-4 | 5.86                      | 9.43                      | 14.9                      | 23.82                     | 37.45                     | 14.83~33.87 |
| 90%-S-4 | 3.91                      | 6.11                      | 9.34                      | 15.03                     | 27.09                     | 27.66~37.32 |

试样应力下降比例范围随着湿度的增大而增大,说明其承载能力受湿度影响较大。S-4 试样随着湿度的增大,应力下降比例范围没有随之增大,其原因可能在于叠加层数较多的纸垫可以减弱湿度对其承载能力带来的影响,且在相同的应变率下,叠加层数越多,纸垫可承受的外力能力越强。当叠加层数变多后,牛皮纸垫承受载荷单元变多,由此可以通过增加叠加层数来提高材料的静态承压能力,减弱湿度增大对该性能的影响。

由上述分析可知,环境相对湿度不是影响牛皮纸垫静态承压能力的唯一因素,叠加层数对其也有一定影响作用。

### 2.1.2 弹性比能及缓冲系数曲线

在包装件受到外力冲击时,缓冲材料的实质是吸收和消耗冲击能量,削弱其对产品的损伤。缓冲材料的弹性比能  $u$  是应力-应变曲线围成的面积,可由应力-应变曲线积分后得到<sup>[15]</sup>。由式(2)计算后绘制弹性比能-应力曲线。

$$u = \int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon \quad (2)$$

式中:  $u$  为弹性比能,  $\text{kJ/m}^3$ ;  $\sigma$  为压缩应力,  $\text{kPa}$ ;  $\epsilon$  为压缩应变。

弹性比能表征了缓冲材料单位体积吸收能量的大小。在相同应力条件下,缓冲材料的弹性比能越大,即单位体积吸收的能量越多,缓冲吸能特性越好。

另外,缓冲系数  $C$  常用于评价材料的缓冲特性,根据应力-应变曲线可以获得缓冲系数-应力 ( $C-\sigma$ ) 曲线。相同应力条件下,缓冲系数越小则表示材料

的缓冲性能越好。缓冲系数 ( $C$ ) 根据式(3)进行计算。

$$C = \frac{F}{Au} = \frac{\sigma}{u} = \frac{\sigma}{\int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon} \quad (3)$$

式中:  $C$  为缓冲系数;  $u$  为弹性比能,  $\text{kJ/m}^3$ ;  $\sigma$  为压缩应力,  $\text{kPa}$ ;  $\epsilon$  为压缩应变。

材料在不同环境相对湿度下的弹性比能-应力 ( $u-\sigma$ ) 曲线如图 3 所示,可发现 S-2、S-3、S-4 的弹性比能随着湿度的变化在应力值分别为 15、30、40  $\text{kPa}$  前后有不同的变化趋势,将前述应力值定义为湿度应力分界值。S-2 试样在应力小于 15  $\text{kPa}$  时,弹性比能随着环境相对湿度的增大而增大,即单位体积吸收能量多,缓冲性能变强;当应力超过 15  $\text{kPa}$  后,弹性比能随着湿度的增大而减小,缓冲性能减弱。S-3、S-4 这 2 种规格纸垫在应力分别为 30、40  $\text{kPa}$  之前,随着环境相对湿度的增大,其弹性比能随之变大;当应力超过上述数值后,弹性比能均随之下落。出现上述现象是由于纤维吸水后变得柔软,具有一定的弹性,所以在受压早期,处于较大湿度条件下的材料更易变形吸收压缩能。结合材料的应力-应变曲线可知,湿度越大的材料能承受的外力越小,因而较快接近变形最大化,进入密实化阶段,逐渐失去吸收能量的作用。在受压后期,随着外力的不断增大,处于低湿条件下的材料变形空间依旧较大,吸收能量能力比高湿条件下的材料强<sup>[12, 16]</sup>。从图 3 中还可看到,随着湿度的增大,材料的最大弹性比能随之减小,原因在于湿度越大,材料能承受的最大外力值越小,因而很快完全变形,从而失去缓冲作用。

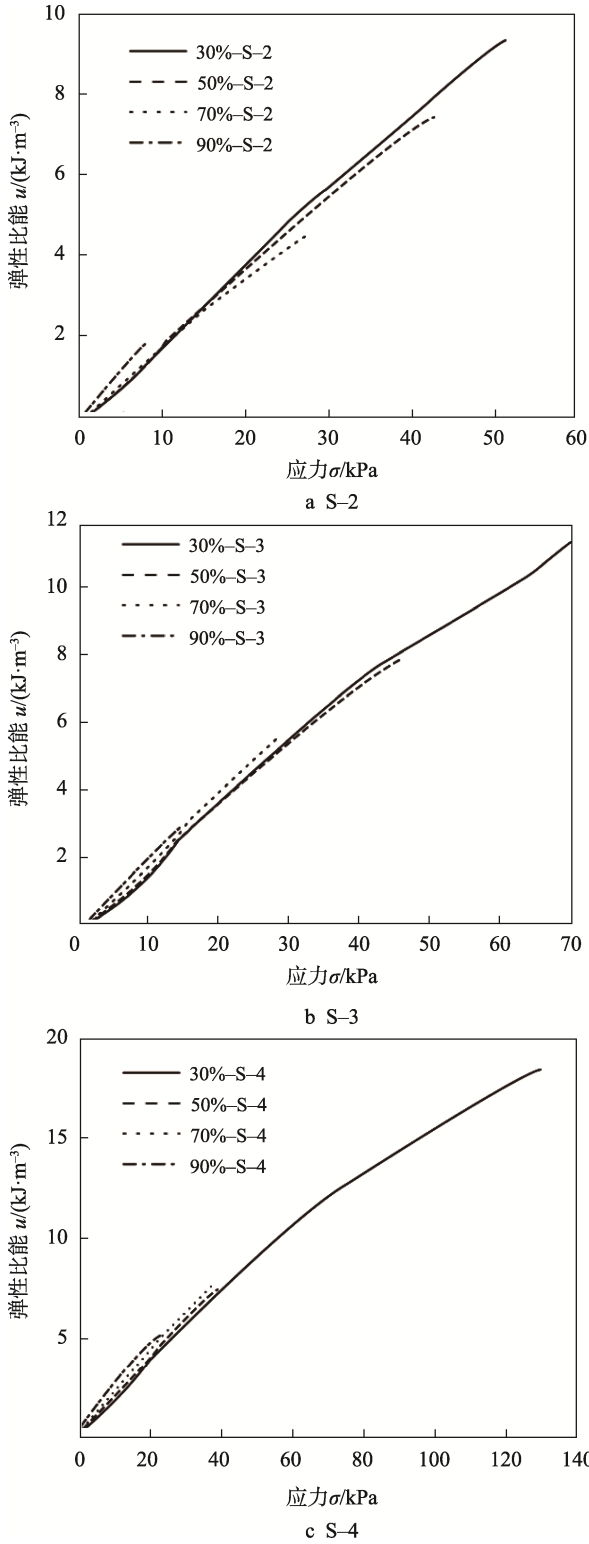


图3 不同环境相对湿度下的弹性比能-应力曲线 (23 °C)  
Fig.3 Elastic specific energy-stress curves under different ambient relative humidity conditions (23 °C)

材料缓冲系数-应力曲线如图4所示。S-2、S-3、S-4的湿度应力分界值分别为15、30、40 kPa, 当3种规格纸垫在应力分别小于湿度应力分界值时, 相同应力水平下缓冲系数随着环境相对湿度的增大而减

小, 缓冲性能提高; 当应力大于湿度应力分界值时, 缓冲系数随着环境相对湿度的增大而增大, 缓冲性能随之下降。这与环境相对湿度对材料的弹性比能曲线体现的缓冲性能变化规律相符。

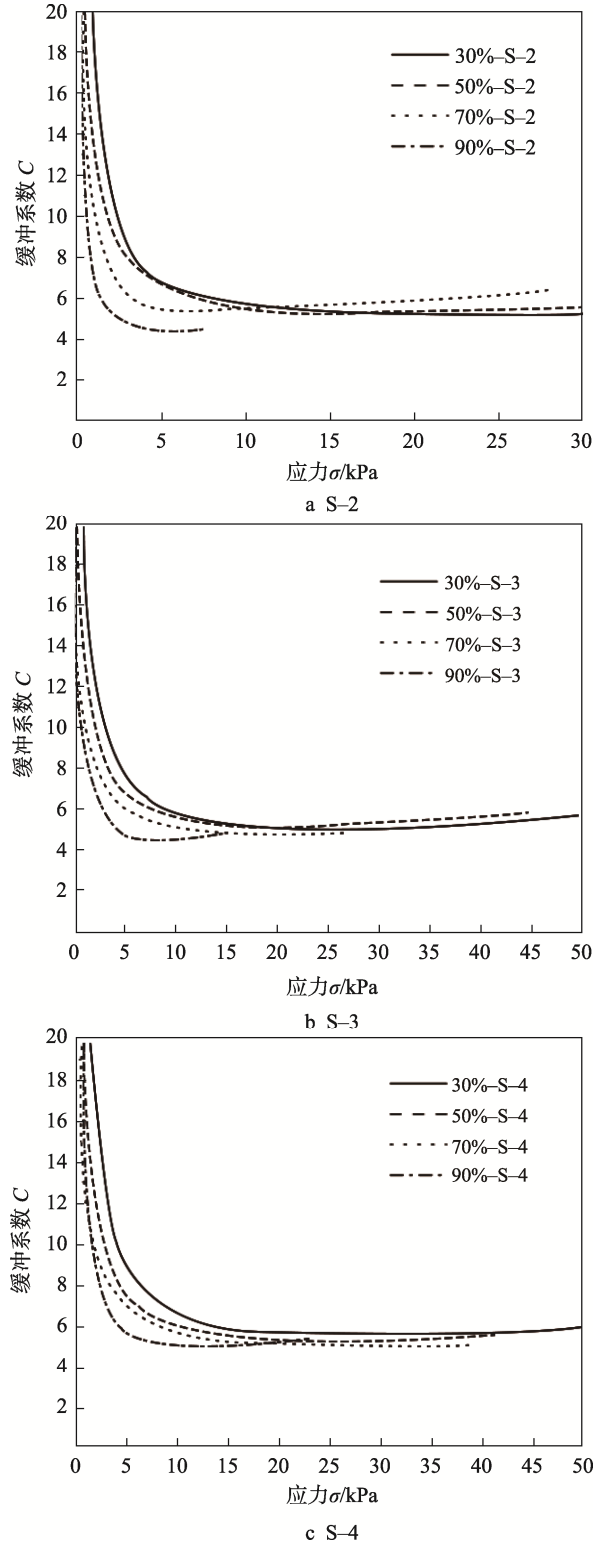


图4 不同环境相对湿度下的缓冲系数-应力曲线 (23 °C)  
Fig.4 Cushioning coefficient curves under different ambient relative humidity conditions (23 °C)

由材料应力-应变曲线的分析可知, 叠加层数与环境湿度对牛皮纸垫静态承压能力有交互影响作用, 在此同样探讨叠加层数对材料缓冲性能的影响。不同叠加层数牛皮纸垫弹性比能-应力曲线如图 5 所示。在环境相对湿度为 30% 的条件下, 随着叠加层数的增多, 材料的弹性比能变小。当环境相对湿度为 50%、70%、90% 时, 在应力值分别为 20、13、12 kPa 前后, 弹性比能随着叠加层数的变化有不同的变化趋势, 将此应力值定义为层数应力分界值。当应力小于层数应力分界值时, 材料的弹性比能随着叠加层数的增多而减小; 当应力大于层数应力分界值时, 弹性比能随着层数的增多而增大。出现上述现象原因在于受力前期, 叠加层数小的材料抵抗外力能力弱, 变形速度快, 且单位体积内空气运动的体积小, 空气分子之间的碰撞更强烈, 更多的冲击能量会转化成为热量并耗散; 在受压后期, 随着外力的不断增大, 同一外力下, 叠加层数越小的材料变形越大, 越来越接近密实化, 此时变形空间很小, 空气分子也减少, 缓冲性能下降<sup>[17]</sup>。

由图 6 分析 4 种环境相对湿度下不同叠加层数牛皮纸垫的缓冲系数-应力曲线, 可得到以下规律: 在

环境相对湿度为 30% 的条件下, 缓冲系数随着叠加层数的增大而增大, 缓冲性能减弱。在环境相对湿度为 50%、70%、90% 的条件下, 分别存在层数应力分界值为 20、13、12 kPa, 使得同一环境相对湿度条件下, 当应力小于层数应力分界值时, 缓冲系数随着叠加层数的增多变大, 缓冲性能减弱; 当应力大于层数应力分界值时, 缓冲系数随着叠加层数的增多减小, 缓冲性能得到提高。该规律与叠加层数对材料弹性比能曲线体现的缓冲性能规律相符。

### 2.2 动态压缩试验

用最大加速度-静应力 ( $G_m-\sigma_{st}$ ) 曲线表征包装材料的动态缓冲特性, 通常用曲线最低点以及附近值来指导缓冲包装设计。由于动态试验操作工作量大, 耗费样品数目多, 所以基于静态压缩试验得出的结果。为节省材料, 在动态压缩试验部分, 只选取 S-2 进行湿度变化试验, 同时取 S-2、S-3、S-4 在相对湿度为 50% 的条件下试验, 探究叠加层数对其动态缓冲性能的影响。

图 7 是最大加速度-静应力曲线, 图中的散点是试验测出的数值, 通过对实测数据拟合, 得到 4 条不同的曲线。

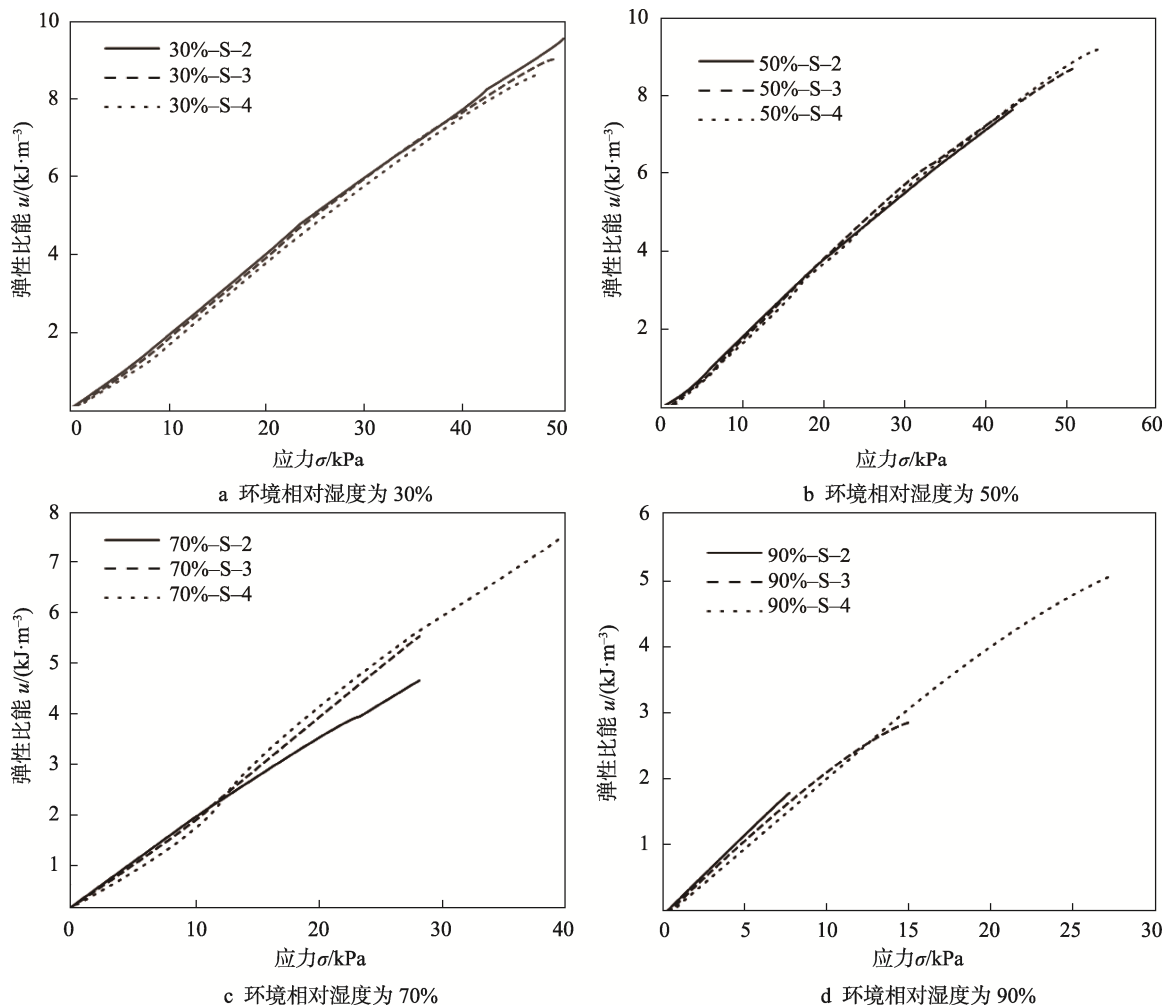


图 5 不同叠加层数的弹性比能-应力曲线 (23 °C)

Fig.5 Elastic specific energy-stress curve of different superimposed layers (23 °C)

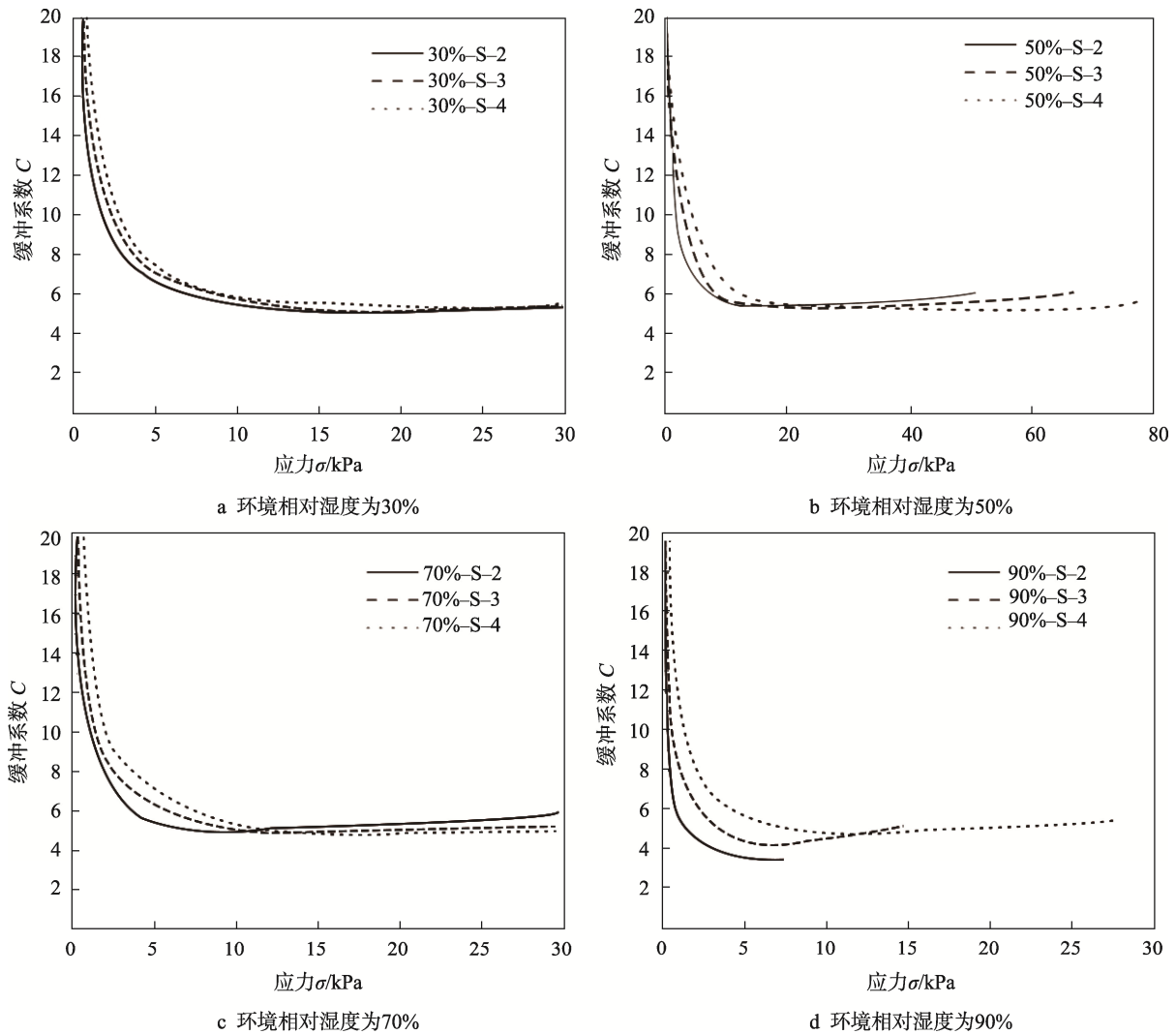


图6 不同叠加层数的缓冲系数-应力曲线 (23℃)  
 Fig.6 Cushioning coefficient curves of different superimposed layers (23 °C)

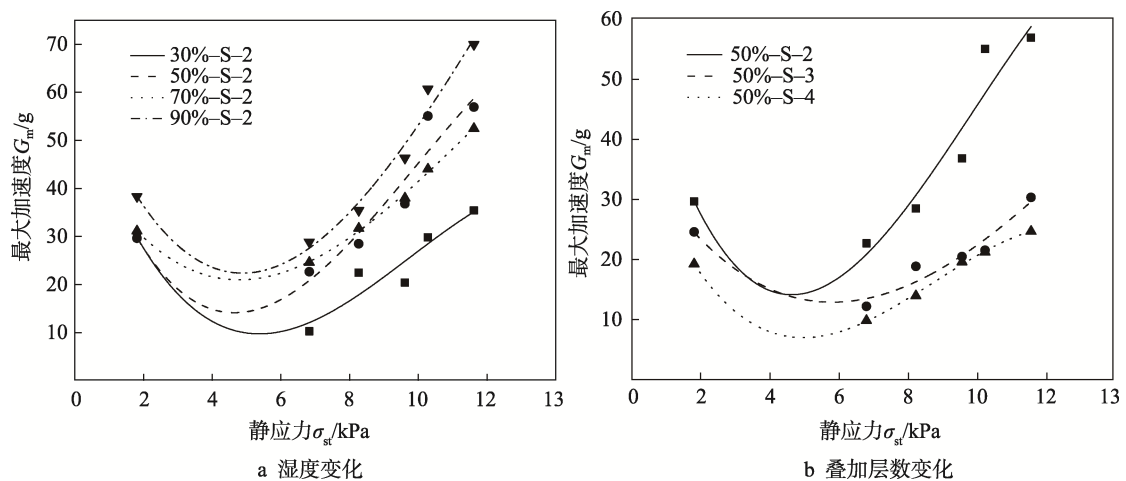


图7 最大加速度-静应力曲线 (23℃)  
 Fig.7 Peak acceleration-static stress curves (23 °C)

由图7可知,曲线均为具有一个极值点的凹谷曲线,随着静应力的增加,最大冲击加速度值先减小后增大。随着牛皮纸垫表面静应力增大,材料本身变形

以及对冲击能量的吸收效率随之变大,传递给质量块的冲击加速度会逐渐下降。当材料本身对冲击能量吸收效率达到一个最大值时,静应力继续增大,材料的

变形也在增加,但材料对冲击能量的吸收效率却在下降,因而对应的冲击加速度随之增大。

由图 7a 可知,随着环境相对湿度的增大,最大加速度值随之增大,即材料传递给质量块的冲击加速度增大,表明材料的缓冲性能随之下降。但可发现,随着湿度的增大,曲线最低点随之向左上方移动,在实际应用中,若外界动载荷较小时,可以考虑在高湿条件下使用牛皮纸垫作为缓冲材料,这与静态压缩试验提到的在一定小应力条件下,湿度增大,牛皮纸垫具备较好的缓冲性能的结论相符。图 7b 的最大加速度-静应力曲线最低点随着叠加层数的增加向右下方移动,缓冲性能提高。表明在较大的动载荷条件下,

多叠加层数的牛皮纸垫传递给质量块的冲击能越小。

采用最小二乘法拟合试验数据,获得最大加速度-静应力曲线的经验公式,多项式阶数的选取应使得残余误差平方和最小,即实测数值与拟合曲线的离散性最小。通过专业绘图软件 oringin 处理试验数据,确定拟合曲线的多项式阶数以及特征系数,最后获得多项式公式,见式(4),不同湿度条件和不同叠加层数的经验公式如表 3、4 所示。

$$G_m = c + a_1\sigma_{st} + a_2\sigma_{st}^2 + a_3\sigma_{st}^3 \quad (4)$$

式中:  $G_m$  为最大加速度,单位为重力加速度  $g$  ( $g=9.8 \text{ m/s}^2$ );  $\sigma_{st}$  为牛皮纸垫承受的静应力, kPa;  $c$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  均为特征系数。

表 3 不同湿度下  $G_m-\sigma_{st}$  特征系数及经验公式

Tab.3 Characteristic coefficient and empirical formula of  $G_m-\sigma_{st}$  curve under different humidity

| 试样编号    | 跌落高度 $h/\text{mm}$ | 特征系数 ( $c$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ ) | 经验公式  |
|---------|--------------------|--------------------------------------|---|
| 30%-S-2 | 200                | 60.6、-2 165.8、27 835.8、-95 359.8     | $G_m = 60.6 - 2\ 165.8\sigma_{st} + 27\ 835.8\sigma_{st}^2 - 95\ 359.8\sigma_{st}^3$  |
| 50%-S-2 | 200                | 59.9、-2 195.9、30 840.4、-103 563.6    | $G_m = 59.9 - 2\ 195.9\sigma_{st} + 30\ 840.4\sigma_{st}^2 - 103\ 563.6\sigma_{st}^3$ |
| 70%-S-2 | 200                | 49.3、-1 293.2、16 972.9、-48 215.9     | $G_m = 49.3 - 1\ 293.2\sigma_{st} + 16\ 972.9\sigma_{st}^2 - 48\ 215.9\sigma_{st}^3$  |
| 90%-S-2 | 200                | 65.6、-1 918.9、24 284.9、-63 316.1     | $G_m = 65.6 - 1\ 918.9\sigma_{st} + 24\ 284.9\sigma_{st}^2 - 63\ 316.1\sigma_{st}^3$  |

表 4 不同叠加层数  $G_m-\sigma_{st}$  特征系数及经验公式

Tab.4 Characteristic coefficient and empirical formula of  $G_m-\sigma_{st}$  curve of different superimposed layers

| 试样编号    | 跌落高度 $h/\text{mm}$ | 特征系数                              | 经验公式  |
|---------|--------------------|-----------------------------------|---|
| 50%-S-2 | 200                | 59.9、-2 195.9、30 840.4、-103 563.6 | $G_m = 59.9 - 2\ 195.9\sigma_{st} + 30\ 840.4\sigma_{st}^2 - 103\ 563.6\sigma_{st}^3$ |
| 50%-S-3 | 200                | 38.7、-959.1、10 159.1、-22 167.6    | $G_m = 38.7 - 959.1\sigma_{st} + 10\ 159.1\sigma_{st}^2 - 22\ 167.6\sigma_{st}^3$     |
| 50%-S-4 | 200                | 40.9、-1 568.2、21 935.6、-82 979.8  | $G_m = 40.93 - 1\ 568.2\sigma_{st} + 21\ 935.6\sigma_{st}^2 - 82\ 979.8\sigma_{st}^3$ |

### 3 结语

本文基于静、动态压缩试验方法,探究环境相对湿度对牛皮纸垫缓冲性能的影响。通过探讨可知,在较湿的环境下,若外界冲击载荷较小时,牛皮纸垫也能够起到较好的缓冲作用,说明在某些条件下,牛皮纸垫的使用条件范围较广,具有较好的应用前景。同时,在运输过程中,环境相对湿度不是影响牛皮纸垫缓冲性能的唯一因素,而是与其他因素交互影响,如叠加层数。因此,在实际缓冲包装设计中,需综合考虑影响材料缓冲性能的诸多因素,例如在湿度波动较小的运输条件下,不必增加材料的叠加层数即可起到较好的缓冲作用,同时到达节约成本的效果。

#### 参考文献:

- [1] YOU S, LI W, YAN W C, et al. Green Strategies for Sustainable Packaging[J]. Science, 2021, 372(25): 802.
- [2] 叶新友. “限塑令”背景下可降解塑料的研究进展[J]. 塑料助剂, 2022(1): 62-66.  
YE Xin-you. Research Progress of Degradable Plastics under the Background of “Plastic Restriction Order”[J]. Plastic Additives, 2022(1): 62-66.
- [3] 刘滨, 苗红涛, 张岩. 基于能量吸收法的 U 型纸质缓冲材料性能模拟分析[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 58-62.  
LIU Bin, MIAO Hong-tao, ZHANG Yan. Performance Simulation Analysis of U Paper Cushioning Material Based on Energy Absorption Method[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 58-62.
- [4] GUO Yang-feng, JI Mei-juan. Cushioning Energy Absorption of Composite Layered Structures Including Paper Corrugation, Paper Honeycomb and Expandable Polyethylene[J]. J Strain Analysis, 2019, 54(3): 176-191.
- [5] 吴彤彤, 吴金卓, 王卉, 等. 缓冲包装材料经济性与环境影响评价研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 17-24.



- WU Tong-tong, WU Jin-zhuo, WANG Hui, et al. Research Progress on Technology Economy and Environmental Impact Assessment of Buffer Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 17-24.
- [6] 汪苗苗. 瓦楞纸板强度指标和缓冲性能对环境温湿度的响应[J]. 上海包装, 2019(2): 26-29.  
WANG Miao-miao. Response of Corrugated Board Strength Index and Buffering Performance to Ambient Temperature and Humidity[J]. Shanghai Packaging, 2019, 290(4): 26-29.
- [7] 孙爽. 基于面纸和芯纸相互作用的瓦楞纸板纵向压缩力学行为研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
SUN Shuang. Study on Mechanical Behavior of Corrugated Board in Longitudinal Compression Based on the Interaction Between Face Paper and Core Paper[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [8] 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.  
WU Sha. Research on the Application for Energy Absorption Method in the Design of Structural Cushioning Pad[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.
- [9] 张志昆. 相对湿度对蜂窝纸板静态压缩特性影响的试验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(9): 12-13.  
ZHANG Zhi-kun. Experiment Research on the Effects of Relative Humidity on the Static Compression Properties of Paper Honeycomb Panel[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(9): 12-13.
- [10] 鄂玉萍. 湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2010.  
E Yu-ping. Effect of Humidity and Strain Rate on Energy Absorption Characteristics of Paper Cushioning Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [11] 徐烁, 王志伟. 基于湿度影响的蜂窝纸板动态压缩能量吸收图[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23): 203-206.  
XU Shuo, WANG Zhi-wei. Energy-Absorption Diagrams of Honeycomb Paperboards under Dynamic Compression in Different Relative Humidities[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(23): 203-206.
- [12] 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].
- [13] GB/T 8167—2008, 包装用缓冲材料动态压缩试验方法[S].  
GB/T 8167—2008, Testing Method of Dynamic Compression for Packaging Cushion Materials[S].
- [14] HENRY W, HASLACH J R. The Moisture and Rate-Dependent Mechanical Properties of Paper: A Review[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2000(4): 169-210.
- [15] 李超. 柱形空气衬垫的缓冲性能研究与应用[D]. 西安: 陕西科技大学, 2020.  
LI Chao. Research on Cushioning properties and Application of Cylindrical Air Cushion[D]. Xian: Shaanxi University of Science and Technology, 2020.
- [16] SANTOS D, LIMA A G, COSTA P. The Effect of the Drying Temperature on the Moisture Removal and Mechanical Properties of Sisal Fibers[J]. Defect and Diffusion Forum, 2017, 380: 66-71.
- [17] WANG Dong-mei, YANG Rui. Investigation of Vibration Transmissibility for Paper Honeycomb sandwich Structures with Various Moisture Contents[J]. Mechanics & Industry, 2019, 108(20): 1-7.

责任编辑: 曾钰婵