

发泡聚丙烯动态缓冲性能分析

孙德强, 金强维, 李国志

(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室
b.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究发泡聚丙烯材料的动态缓冲特性。**方法** 对发泡聚丙烯材料进行动态压缩试验, 分析密度、厚度、跌落高度对发泡聚丙烯动态缓冲性能的影响。**结果** 发泡聚丙烯密度越大, 动态压缩特性曲线最低点对应的加速度和静应力越大, 最小缓冲系数越大。发泡聚丙烯厚度越大, 曲线最低点对应的最大加速度越小, 对应的静应力越大。随着跌落高度的增加, 曲线最低点对应的最大加速度逐渐增加, 静应力逐渐减小。**结论** 在安全范围内, 考虑到轻量化和成本因素, 选择缓冲材料时需要综合考虑材料的密度、厚度以及实际的运输环境。

关键词: 聚丙烯材料; 动态压缩试验; 最大加速度-静应力曲线; 缓冲系数-最大静应力曲线

中图分类号: TB484.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)03-0114-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.016

Analysis on Dynamic Cushioning Property of Expanded Polypropylene Materials

SUN De-qiang, JIN Qiang-wei, LI Guo-zhi

(a.Shaanxi Province Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper b.National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University Science & Technology, Xi'an 710021)

ABSTRACT: The work aims to study the dynamic cushioning property of expanded polypropylene materials. Dynamic compression test was carried out to the expanded polypropylene materials and the effects of densities, thickness and drop height on dynamic cushioning property of expanded polypropylene were analyzed. The higher the density of expanded polypropylene was, the greater the acceleration and static stress corresponding to the lowest point of the dynamic cushioning property curve were, and the greater the lowest point of the buffer coefficient was. The thicker the expanded polypropylene was, the smaller the maximum acceleration at the lowest point of the curve was and the greater the static stress was. With the increases of drop height, the maximum acceleration corresponding to the lowest point of the curve increased, but the static stress decreased. For the weight reduction and cost saving, the polypropylene materials should be selected within a safe range with reference to density, thickness and actual transportation environment of materials.

KEY WORDS: expanded polypropylene materials; dynamic crushing; acceleration-static stress curve; cushioning coefficient-static stress curve

发泡聚丙烯作为一种稳定、质轻、经济环保且缓冲性能良好的绿色包装材料, 广泛应用于包装、建筑、

电子等各个领域^[1-3]。发泡聚丙烯材料作为缓冲材料, 可以吸收运输包装件在流通过程中由于跌落而产

收稿日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(51575327); 陕西省教育厅重点实验室及基地项目(16JS014); 陕西省教育厅 2014 陕西本科高校专业综合改革试点子项目(陕教高[2014]16号)

作者简介: 孙德强(1976—), 男, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为多孔材料力学性能测试与仿真, 计算机辅助技术与软件开发。

通信作者: 李国志(1979—), 男, 陕西科技大学副教授, 主要研究方向为包装材料结构与系统设计。

生的冲击能，进而保护产品。

罗兰^[4]对常用的缓冲材料进行了动态压缩试验，研究他们的动态压缩特性。吴丽娟和姜帅^[5]通过动态压缩试验研究了 3 种常用缓冲材料的动态压缩特性，包括 EPS（聚苯乙烯）、EPE（发泡聚乙烯）以及蜂窝纸板。杨帅^[6]也对 EPE 的缓冲性能进行了研究。曾克俭和刘珊^[7]研究了不同厚度蜂窝纸板的动态缓冲性能。朱大鹏等^[8]通过动态压缩实验测试了蜂窝纸板的缓冲性能。郭彦峰和张景绘^[9]研究蜂窝纸板的动态缓冲特性与振动传递特性。王冬梅^[10]采用自由跌落和能量吸收原理，分析了纸蜂窝结构因素对冲击性能的影响。邓真^[11]在动态实验条件下对纸浆模制品的性能进行了研究分析。言利容和谢勇^[12]研究了蜂窝纸板/EPE 组合材料的动态缓冲性能。王冬梅^[13]通过静态试验分析了多层蜂窝纸板的能量吸收性能并不总是高于单层蜂窝纸板，蜂窝纸板的高度对其缓冲性能有影响。方婷^[14]研究了温度等因素对 EPE 材料缓冲性能的影响。

以上研究或是对不同缓冲材料进行对比分析，或是针对外界条件对缓冲材料的影响进行研究。为了更充分地利用发泡聚丙烯材料，应合理地选取发泡聚丙烯材料的密度、厚度等。文中在已有研究的基础上，采用动态压缩特性曲线分析发泡聚丙烯的材料密度、厚度以及跌落高度对其缓冲性能的影响，并建立此 3 种情况下的最大加速度-静应力曲线和缓冲系数-最大静应力曲线，对试验结果进行分析。

1 实验

1.1 材料

发泡聚丙烯试样尺寸为 100 mm×100 mm，密度分别取 20，30，45 和 60 kg/m³，厚度取为 35，50，60 mm。文中选择的试样是常州市华雨橡塑新材料有限公司生产的发泡聚丙烯材料。

1.2 方法

试验采用 DY-2 型冲击试验机（西安广博检测设备有限公司检修）进行试验。通过逐步改变试验机冲击器的质量来测试不同冲击条件对发泡聚丙烯的作用效果。首先，每次试验保持跌落高度不变，得到不同密度、厚度的发泡聚丙烯的最大加速度-静应力曲线和缓冲系数-最大静应力曲线。然后，改变跌落高度，得到不同跌落高度的发泡聚丙烯的最大加速度-静应力曲线和缓冲系数-最大静应力曲线。

试验参照 GB/T 8167—2008《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》^[15]。在试验前，所有的试验样品都是在温度为（27±1）℃的环境中进行预处理，并在相对湿度为（70±2）%条件下放置 24 h 以上，然后随机抽取符合规定的样品进行试验。在所有试验中，试样

均以试验机的下压板中心点为中心放置。

2 结果与讨论

动态压缩试验可以营造出产品在运输过程中，发泡聚丙烯材料作为缓冲衬垫时受到的冲击环境，并将试验结果绘制为发泡聚丙烯材料的动态压缩曲线，可以用其评价发泡聚丙烯材料在冲击过程中对产品的保护能力。材料的冲击行为通常用峰值加速度-静应力曲线来表示。峰值加速度是指在一定的冲击作用下，向受保护产品传递的加速度。加速度越小，受冲击产品损坏的几率越低，对产品的保护效果也越好。文中所有试验均建立在弹性范围内，且由于动态压缩试验机的冲击质量、冲击高度的限制，只是说明了材料最大加速度-静应力关系和缓冲系数-最大静应力关系，这并不代表材料可承受的最大冲击以及最大跌落高度为试验中设置的数值。

2.1 发泡聚丙烯密度的影响

测试样品的特征和实验结果见表 1。D20 表示试验样品的密度为 20 kg/m³，同理可知 D30，D45，D60。厚度为 50 mm，跌落高度为 425 mm，尺寸为 100 mm×100 mm 的不同密度发泡聚丙烯试样的最大加速度-静应力曲线见图 1。由图 1 可知，任意密度的曲线呈凹函数形状，开口向上，在试验范围内有 1 个最小值点。随着静应力的增大，最大加速度先是减小到某一点，再缓慢增加。图 1 中 4 条不同密度的动态压缩曲线随着发泡聚丙烯材料密度的增大，动态压缩特性曲线以不同差值逐渐向图 1 的右上方挪动，即最大加速度-静应力曲线最低点处所对应的加速度和静应力随着密度的增大而增大。

表 1 动态压缩试验方案（密度）
Tab.1 Test scheme of dynamic crushing (densities)

样品	密度/ (kg·m ⁻³)	厚度/mm	跌落高 度/mm	试样数量
D20	20	50	425	25
D30	30	50	425	25
D45	45	50	425	25
D60	60	50	425	25

当发泡聚丙烯密度为 20 kg/m³时，曲线最低点对应的最大加速度为 62.5 m/s²，静应力为 13 kPa；当发泡聚丙烯密度为 60 kg/m³时，曲线最低点对应的最大加速度为 102.4 m/s²，静应力为 23 kPa。密度为 30，45 kg/m³的发泡聚丙烯的最大加速度-静应力曲线中，2 种密度最低点处的静应力和加速度相差不大，但是密度为 60 kg/m³与密度为 30，45 kg/m³的发泡聚丙烯曲线最低点处的静应力与加速度差异较大，这可能与

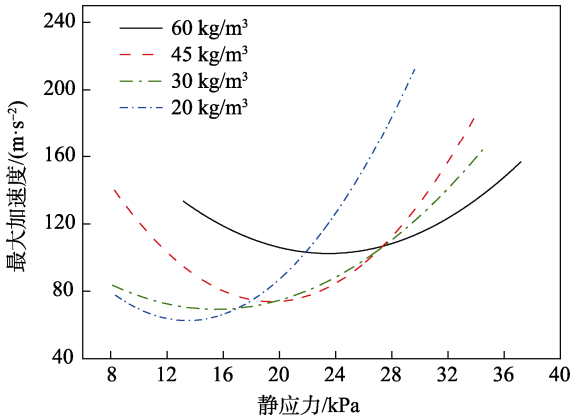


图1 不同密度试样的最大加速度-静应力曲线
Fig.1 Maximum cceleration vs static stress of sample at the different densities

材料本身的发泡不均匀有关。

利用曲线的拟合多项式得到了图 1 的动态缓冲曲线，动态缓冲曲线的经验公式分别如下所述。

当密度为 60 kg/m³ 时， $G = 0.02961\sigma_{st}^2 - 1.39167\sigma_{st} + 26.79981$ 。

当密度为 45 kg/m³ 时， $G = 0.05386\sigma_{st}^2 - 2.09601\sigma_{st} + 27.92259$ 。

当密度为 30 kg/m³ 时， $G = 0.02682\sigma_{st}^2 - 0.83109\sigma_{st} + 13.50756$ 。

当密度为 20 kg/m³ 时， $G = 0.05847\sigma_{st}^2 - 1.57371\sigma_{st} + 16.79508$ 。

式中： σ_{st} 为静态应力； G 为质量的峰值加速度。

不同密度发泡聚丙烯材料的缓冲系数-最大静应力曲线见图 2，与图 1 所呈现的规律相同。任一密度的曲线，随着静应力的增大，缓冲系数先是减小到某一点，再逐渐增加。不同密度的缓冲系数-最大静应力曲线随着发泡聚丙烯材料密度的增大而以不同差值向图 2 的右上方移动，即缓冲系数-最大静应力曲线最低点处所对应的缓冲系数和最大静应力随着密度的增大而增大。

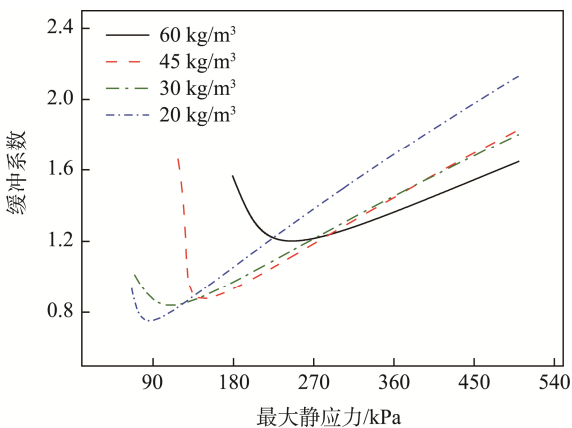


图2 不同密度试样的缓冲系数-最大静应力曲线
Fig.2 Cushioning coefficient vs. maximum static stress of sample at the different densities

缓冲系数是缓冲效率的倒数，缓冲系数越小，缓冲效率越高。当发泡聚丙烯密度为 20 kg/m³ 时，曲线最低点对应的缓冲系数为 0.75，静应力为 85 kPa；当发泡聚丙烯密度为 60 kg/m³ 时，曲线最低点对应的缓冲系数为 1.2，静应力为 245 kPa。随着密度的增大，不同密度的缓冲系数最小值逐渐增大，缓冲效率减小，即密度越大，缓冲效率越小。综上所述，在选择缓冲材料时，可以尽量选择缓冲系数小的发泡聚丙烯材料，达到省材且效果佳的目的。

2.2 发泡聚丙烯厚度的影响

测试样品的特征和试验结果见表 2，不同厚度的最大加速度-静应力曲线见图 3。由图 3 可知，最大加速度-静应力曲线随试样厚度的增加以不同差值向图 3 的右下方挪动，且曲线的开度也随着试样厚度的增大而增大，即随着发泡聚丙烯厚度的增加，加速度峰值减小，最佳缓冲设计点向右移动。试样的厚度越大，最大加速度-静应力曲线最低点处所对应的最大加速度越小，而对应的静应力越大。当发泡聚丙烯试样厚度为 35 mm 时，曲线最低点对应的最大加速度为 94.77 m/s²，静应力为 11 kPa；当发泡聚丙烯试样厚度为 60 mm 时，曲线最低点对应的最大加速度为 42.43 m/s²，静应力为 13 kPa。

表2 动态压缩试验方案（厚度）
Tab.2 Test scheme of dynamic crushing (thickness)

样品	密度/ (kg·m ⁻³)	厚度/mm	跌落高 度/mm	试样数量
D20	20	35	425	25
D20	20	50	425	25
D20	20	60	425	25

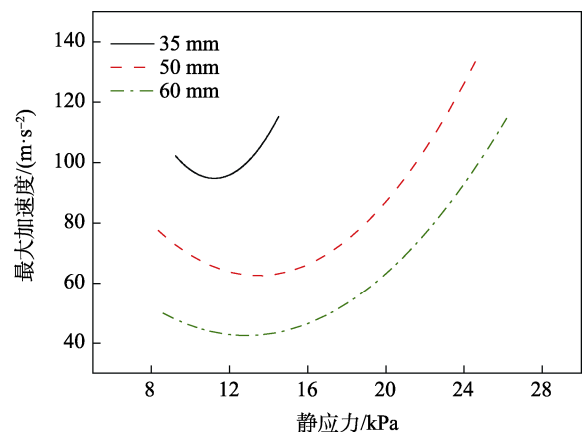


图3 不同厚度试样的最大加速度-静应力曲线
Fig.3 Maximum acceleration vs. static stress of sample at the different thickness

增加发泡聚丙烯的厚度，会增加发泡聚丙烯的缓冲能力，即增加发泡聚丙烯厚度可以更好地保护包装产品。然而，发泡聚丙烯厚度的增加同样会导致缓冲

成本的提高。

利用曲线的拟合多项式得到了图 3 的动态缓冲曲线，动态缓冲曲线的经验公式分别如下所述。

当厚度为 35 mm 时， $G = 0.19307\sigma_{st}^2 - 4.33152\sigma_{st} + 33.96911$ 。

当厚度为 50 mm 时， $G = 0.05847\sigma_{st}^2 - 1.57371\sigma_{st} + 16.97507$ 。

当厚度为 60 mm 时， $G = 0.04154\sigma_{st}^2 - 1.06862\sigma_{st} + 11.20928$ 。

不同厚度发泡聚丙烯材料的缓冲系数-最大静应力曲线见图 4。随着试样厚度的增加，缓冲系数-最大静应力曲线以不同差值向图 4 的左下方移动。厚度越大，曲线最低点对应的缓冲系数越小，对应的静应力越小。当发泡聚丙烯试样厚度为 35 mm 时，曲线最低点对应的缓冲系数为 0.78，静应力为 108 kPa；当发泡聚丙烯试样厚度为 60 mm 时，曲线最低点对应的缓冲系数为 0.624，静应力为 56 kPa。厚度越大，最小缓冲系数越小，这说明当跌落高度和静应力相同时，随着厚度的增加，缓冲系数最低点减小，其缓冲效率增大。

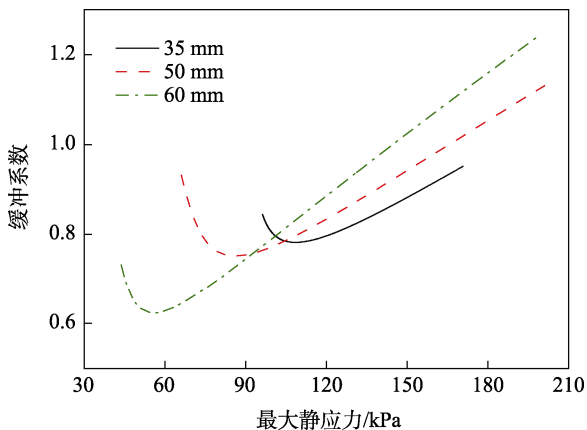


图 4 不同厚度试样的缓冲系数-最大静应力曲线
Fig.4 Cushioning coefficient vs. maximum static stress of sample at the different thickness

2.3 发泡聚丙烯跌落高度的影响

测试样品的特征和实验结果见表 3，不同跌落高度的最大加速度-静应力曲线见图 5。由图 5 可知，最大加速度-静应力曲线随跌落高度的增大以不同差值向图 5 的左上方挪动，当跌落高度增大时，最大加速度-静应力曲线最低点对应的最大加速度逐渐增加，静应力逐渐减少。当冲击器跌落高度为 425 mm 时，曲线最低点对应的最大加速度为 69.29 m/s²，静应力为 15 kPa；当冲击器跌落高度为 625 mm 时，曲线最低点对应的最大加速度为 74.48 m/s²，静应力为 11 kPa。忽略摩擦的影响，重力势能等于动能，当跌落高度增加时，重力势能转化的动能也随之增加，进而传给发泡聚丙烯的冲击加速度也随之增大。曲线的范围随着跌落高度的增加而减小，说明跌落高度越高，

发泡聚丙烯所能承受的冲击器质量越小，发泡聚丙烯材料单位面积上承受的冲击载荷随之减小。

表 3 动态压缩试验方案（跌落高度）

Tab.3 Test scheme of dynamic crushing (drop height)

样品	密度/ (kg·m ⁻³)	厚度/ mm	跌落高度/ mm	试样数量
D30	30	50	425	25
D30	30	50	525	25
D30	30	50	625	25

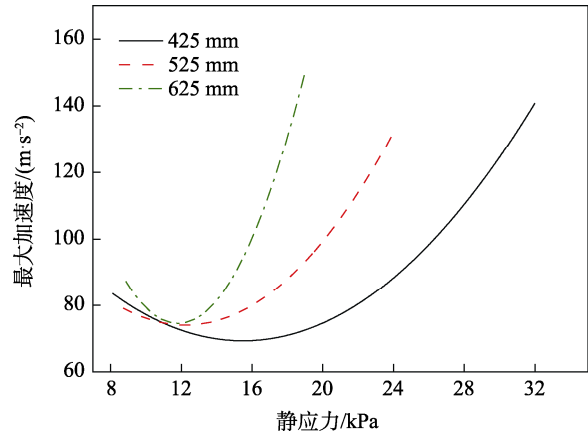


图 5 不同跌落高度试样的最大加速度-静应力曲线
Fig.5 Maximum acceleration vs. static stress of sample at the different drop height

利用曲线的拟合多项式得到了图 5 的动态缓冲曲线，动态缓冲曲线的经验公式分别为：

当跌落高度为 425 mm 时， $G = 0.02682\sigma_{st}^2 - 0.83109\sigma_{st} + 13.50757$ 。

当跌落高度为 525 mm 时， $G = 0.04263\sigma_{st}^2 - 1.042\sigma_{st} + 13.92094$ 。

当跌落高度为 625 mm 时， $G = 0.14986\sigma_{st}^2 - 3.54177\sigma_{st} + 28.53025$ 。

不同跌落高度发泡聚丙烯材料的缓冲系数-最大静应力曲线见图 6。随着跌落高度的增加，缓冲系数-

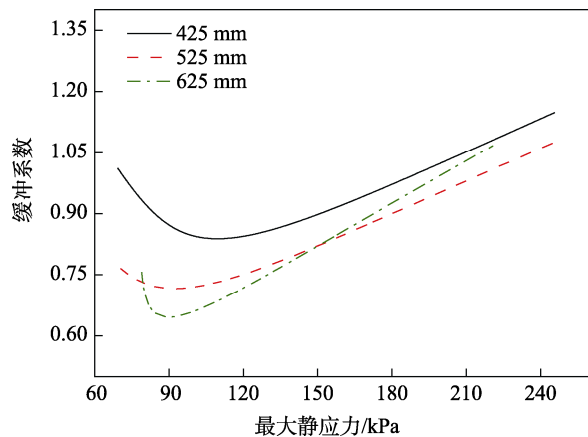


图 6 不同跌落高度试样的缓冲系数-最大静应力曲线
Fig.6 Cushioning coefficient vs. maximum static stress of sample at the different drop height

最大静应力曲线以不同差值向图6的左下方移动。跌落高度越大,曲线最低点对应的缓冲系数越小,对应的静应力越小。当冲击器跌落高度为425 mm时,曲线最低点对应的缓冲系数为0.84,静应力为110 kPa;当冲击器跌落高度为625 mm时,曲线最低点对应的缓冲系数为0.66,静应力为90 kPa。当料厚度和静应力相同时,跌落高度越大,最小缓冲系数越小。

3 结语

为了评价发泡聚丙烯的动态缓冲性能,文中对多种厚度、密度的发泡聚丙烯进行了跌落冲击试验。试验结果表明,发泡聚丙烯的厚度等对其缓冲性能有一定的影响。

1) 发泡聚丙烯的密度越大,动态压缩特性曲线最低点所对应的加速度和静应力值越大,即随着密度的增大,动态压缩特性曲线以不同差值逐渐向图的右上方挪动。随着密度的增大,最小缓冲系数增大,缓冲效率减小。

2) 发泡聚丙烯的厚度越大,最大加速度-静应力曲线最低点对应的最大加速度越小,对应的静应力越大,即最大加速度-静应力曲线随试样厚度的增加而以不同差值向图的右下方挪动。当跌落高度和静应力相同时,随着厚度的增加,最小缓冲系数减小,缓冲效率增大。

3) 随着跌落高度的增加,最大加速度-静应力曲线最低点对应的最大加速度增加,静应力减少,即最大加速度-静应力曲线随跌落高度的增大以不同差值向图的左上方挪动。当跌落高度和静应力相同时,随着跌落高度的增加,最小缓冲系数减小。

研究结果为发泡聚丙烯缓冲包装材料的选择提供了参考,也可用于评价发泡聚丙烯材料的缓冲性能。

参考文献:

- [1] 李文光, 吴炳田, 王亚, 等. 中国 EPP 材料产业化发展前景展望[J]. 高分子通报, 2010(10): 106—110.
LI Wen-guang, WU Bing-tian, WANG Ya, et al. Prospectives in Industrial Development of EPP Materials in China[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2010(10): 106—110.
- [2] 韩德奇, 袁旦, 楚军, 等. 世界聚丙烯供需现状和我国聚丙烯应用前景[J]. 现代化工, 2000(12): 48—51.
HAN De-qi, YUAN Dan, CHU Jun, et al. Status Quo of Worldwide Supply/Demand of Polypropylene and Its Developing Strategy in China[J]. Modern Chemical Industry, 2000(12): 48—51.
- [3] 吴三清. 汽车用改性聚丙烯(PP)材料的开发与应用[J]. 汽车工艺与材料, 2004(2): 26—28.
WU San-qing. Development and Application of Automobile Used and Modified Polypropylene[J]. Automobile Technology & Material, 2004(2): 26—28.
- [4] 罗兰. 常用缓冲材料动态压缩特性研究[J]. 包装工程, 1996, 17(5): 10—13.
LUO Lan. Experimental Research on Dynamic Cushioning Performance of the Buffer Material[J]. Packaging Engineering, 1996, 17(5): 10—13.
- [5] 吴丽娟, 姜帅. 三种常见缓冲材料的动态压缩缓冲性能[J]. 中国水运, 2006(11): 62—64.
WU Li-juan, JIANG Shuai. Experimental Research on Dynamic Cushioning Performance of the Three Kinds of Cushioning Materials[J]. China Water Transport, 2006(11): 62—64.
- [6] 杨帅. EPE 缓冲性能的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
YANG Shuai. Research on Cushioning Properties of EPE[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [7] 曾克俭, 刘珊. 蜂窝纸板动态缓冲性能分析研究[J]. 包装工程, 2014, 35(17): 15—18.
ZENG Ke-jian, LIU Shan. Analysis on Dynamic Cushioning Property of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 15—18.
- [8] 朱大鹏, 张敏, 李文晖. 蜂窝纸板缓冲性能的研究[J]. 甘肃科技, 2003(10): 76—77.
ZHU Da-peng, ZHANG Min, LI Wen-hui. Experimental Study of Dynamic Cushioning Property of Honeycomb Paperboard[J]. Gansu Science and Technology, 2003(10): 76—77.
- [9] 郭彦峰, 张景绘. 蜂窝纸板动态缓冲特性及振动传递特性的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2003(5): 539—541.
GUO Yan-feng, ZHANG Jing-hui. Experimental Study of Dynamic Cushioning Property and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003(5): 539—541.
- [10] WANG D M. Impact Behavior and Energy Absorption of Paper Honeycomb Sandwich Panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 110—114.
- [11] 邓真. 纸浆模制品在动态实验条件下的性能研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2011.
DENG Zhen. Research on Performances of Moulded Pulp Products under Dynamic Test[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2011.
- [12] 言利容, 谢勇. 蜂窝纸板/EPE 组合材料的动态缓冲性能[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 13—16.

- YAN Li-rong, XIE Yong. Dynamic Cushioning Properties of Combination of Honeycomb Paperboard and EPE[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(19): 13—16.
- [13] WANG D M, WANG Z W. Experimental Investigation into the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. *Packaging Technology & Science*, 2010, 21(6): 309—316.
- [14] 方婷. 缓冲包装材料缓冲性能的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2013.
- FANG Ting. Research on Properties of Cushioning Packaging Materials[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2013.
- [15] GT/B 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 Cushioning Materials[S].