

基于静态压缩的葫芦膜单元承载压力的实验分析

杜兴丹^{1,2,3}, 顾晓杰^{1,2,3}, 杨立颖^{1,2,3}

(1. 邮政科学研究规划院有限公司, 北京 100096; 2. 中国邮政集团有限公司邮政研究中心, 北京 100096; 3. 中国邮政绿色包装创新实验室, 北京 100096)

摘要: **目的** 研究葫芦膜泡径、厚度、充气量、材料降解性对缓冲包装单元承载压力的影响。**方法** 针对不同规格的葫芦膜进行静态压缩实验, 测定其单元承载压力-变形特性, 分析静态压缩速度、充气速度、泡径、厚度、材料降解性对其单元承载压力的影响。**结果** 在一定范围内, 静态压缩速度和充气速度对其单元承载压力的影响不显著; 超出这一范围后, 静态压缩速度越大, 充气速度越慢, 则相同压缩变形条件下葫芦膜的单元承载压力越大; 葫芦膜的泡径越小, 薄膜厚度越大, 在相同压缩变形条件下单元承载压力越大; 在尺寸规格相同的情况下, 降解材质的葫芦膜的单元承压性能远低于非降解材质的葫芦膜。**结论** 研究结果对葫芦膜包装材料的选择和使用有一定的指导意义。

关键词: 葫芦膜; 静态压缩; 单元承载压力

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)23-0174-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.23.018

Experimental Analysis on Bearing Pressure of Gourd Film Unit Based on Static Compression

DU Xingdan^{1,2,3}, GU Xiaojie^{1,2,3}, YANG Liying^{1,2,3}

(1. Postal Science Research and Planning Institute Co., Ltd., Beijing 100096, China;

2. Postal Research Center, China Post Group Co., Ltd., Beijing 100096, China;

3. China Postal Green Packaging Innovation Laboratory, Beijing 100096, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the effects of bubble diameter, film thickness, inflation amount of gourd films and material degradability on the bearing pressure of cushion packaging units of gourd films. Static compression experiments were carried out for different specifications of gourd films, and the unit bearing pressure-deformation characteristics were measured. The effects of static compression speed, inflation speed of gourd film, bubble diameter, film thickness and material degradability on the unit bearing pressure were analyzed. In a certain range, the static compression speed and the inflation speed of gourd film had no significant effects on the unit bearing pressure. Beyond a certain range, the higher the static compression speed, the slower the inflation speed of the gourd film, and the greater the unit bearing pressure of the gourd film under the same compression deformation condition. The smaller the bubble diameter of the gourd film, the greater the film thickness, and the greater the unit bearing pressure under the same compression deformation condition. Under the same size and specification, the unit pressure-bearing performance of the degradable material gourd film was much lower than that of the non-degradable material gourd film. The research results have certain guiding significance for the selection and use of gourd film packaging materials.

KEY WORDS: gourd film; static compression; unit bearing pressure

在运输过程中, 产品往往会受到多次振动冲击, 所以需要对物品进行包装保护, 保证其完好性。缓冲包装材料能够在产品受到冲击振动时吸收部分能量, 从而保证运输产品的安全性。生活中常见的缓冲包装材料主要有发泡塑料缓冲材料、气垫缓冲材料、纸质缓冲包装材料和植物纤维类缓冲包装材料等。塑料缓冲包装材料因其质量轻、强度高、容易加工、价格低廉, 且具有较好的缓冲吸振性能而被广泛使用, 但近年来随着禁塑令及绿色环保政策的要求, 减塑类缓冲包装材料深受快递行业的喜爱。其中, 充气类缓冲包装利用由气体 (99%) 和缓冲层 (1%) 组合而成, 大大减少了缓冲包装材料的用量, 成为目前行业中使用较多的一种新型减量类缓冲材料。同时, 随着降解材料在中国的发展, 降解类充气缓冲包装材料已被研发出来。

葫芦膜作为一种新型泡状充气包装材料^[1-2], 因其独特的葫芦状结构而得名。它具备即充即用的特点, 在仓储空间的利用上显示出明显的优势, 相较于传统的发泡类缓冲包装产品, 葫芦膜的使用可以显著降低存储空间的需求。此外, 与传统气柱类缓冲材料相比, 葫芦膜展现出了卓越的柔性, 能够适应不同规格的物品包装, 这一特点使其在快递行业中得到广泛应用。在使用葫芦膜包装物品时, 需要使用专用的葫芦膜充气机, 并通过热封技术将气体封存于葫芦膜内部。这些被封存的气体在遇到外部冲击时能够有效吸收冲击能量^[3], 从而保护包装内的产品免受损伤。尽管影响葫芦膜承压性能的因素很多, 包括材料的基本性能、充气量, 以及结构和尺寸等^[4-13], 但目前关于柱状充气垫和充气袋的研究相对更为丰富, 专门针对葫芦膜的深入研究相对较少。因此, 本研究致力于深入探讨葫芦膜的承压性能, 特别关注泡径、薄膜厚度、充气速度及材料的降解性能等变量的影响。通过实验分析, 拟为葫芦膜的选择与应用提供坚实的理论支持, 进一步推进其在缓冲包装领域的应用研究。

1 试验

1.1 材料

试验的研究对象为葫芦膜, 如图 1 所示。选用 PE 薄膜类、PLA+牛皮纸、PLA+PBAT 等材质进行对比分析。在实验前, 将葫芦膜试样在未充气状态下的单元尺寸统一设定为 400 mm×320 mm, 确保实验的统一性和数据的可比性。为了全面考察葫芦膜的性能, 选取了市场上常见的泡径规格及材料厚度为试验参数。这些参数包括厚度 (15、20 μm)、泡径 (40、30、25 mm), 这些不同厚度和泡径组合形成了 4 种不同规格的葫芦膜试样。为了便于实验的管理和结果的分析, 将试样的编号设定为薄膜厚度 (μm)-泡径 (mm)。根据这一规则, 生成的 4 种试样编号分别为: 20-40、



图 1 葫芦膜
Fig.1 Gourd film

20-30、20-25、15-30。其中, 编号的第 1 个数字 (如 20 或 15) 代表薄膜的厚度, 第 2 个数字 (如 40、30、25) 表示泡径。

1.2 仪器设备

主要仪器设备: 万能材料试验机, WCJ-W 型, 中国, 量程为 0~1 000 kgf (1 kgf=9.806 65 N); 葫芦膜充气机; 直尺, 量程为 0~500 mm。

1.3 充气速度

充气量是充气包装缓冲性能的重要影响因素。针对即充即用型的葫芦膜充气包装, 一般以充气时间和单位时间的气体流量来控制充气量^[14], 本试验单位时间充气流量为 190 L/min, 充气时间由葫芦膜单元的充气时间确定 (葫芦膜单元长度/充气速度), 葫芦膜单元长度为 320 mm, 因此以葫芦膜充气机的充气速度来间接控制葫芦膜的充气量, 使形成的充气葫芦膜满足实验要求, 具体葫芦膜的充气速度试验参数结合机器常见的参数设置见表 1。

1.4 方法

采用准静态压缩试验方法, 测定葫芦膜的单元承载压力-变形特征。参考 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》^[15], 对充满气体的葫芦膜进行压缩试验, 直到有葫芦膜爆破或压缩形变超过 95% 为止, 记录葫芦膜的爆破承载压力及变形, 并绘制葫芦膜的单元承载压力-变形量曲线。经过预试验发现, 葫芦膜进行多次压缩试验后的单元承载压力-变形量曲线基本重合, 因此每个样品只进行 1 次试验。

1.5 试验设计

为了全面掌握葫芦膜材料在不同条件下的承压性能, 采用精细的实验设计, 确保实验结果的准确性和可重复性。通过使用单一变量试验方法, 控制压缩速度、充气速度、葫芦膜厚度和泡径, 以及材料的降解性能等变量, 每次只更改 1 个变量, 其他条件保持不变, 揭示每个单一变量对葫芦膜承压性能的影响。为了方便测试及观察结果, 设计了详细的试验方案变量控制表, 列明了所有测试的变量及其各自的控制水平, 见表 1。

表1 葫芦膜测试相关参数
Tab.1 Related parameters of gourd film test

材料降解性	试样编号	压缩速度/ (mm·min ⁻¹)	充气速度/ (mm·s ⁻¹)
非降解	20-40	12	100
		18	
		20	
		25	
非降解	20-40	12	70
			80
			90
			100
			100
非降解	20-25	12	100
	20-30		
	20-40		
非降解	15-30	12	100
	20-30		
降解材质	20-40	12	100

表2 不同压缩速度下葫芦膜单元爆破承载压力
Tab.2 Blasting bearing pressure of gourd film unit with different compression speed

压缩速度/ (mm·min ⁻¹)	材质	最大承载 压力/kgf	最大 变形量/mm
12	PE	740.174	23.462
	PLA+PBAT	72.563	9.134
18	PE	847.601	24.598
	PLA+PBAT	86.532	10.582
20	PE	760.804	24.391
	PLA+PBAT	101.356	11.159
25	PE	834.846	24.392
	PLA+PBAT	115.355	10.956

爆破，随后葫芦膜单元承载压力随着葫芦膜的爆破快速下降。

由图 2a 可知，对于 PE 材质的葫芦膜，当压缩速度从 12 mm/min 增至 20 mm/min 时，相同变形下葫芦膜的单元承载压力受压缩速度的影响不显著，爆破压力在压缩速度为 18 mm/min 时出现最大值，此时材料最大变形为 24.598 mm。当万能材料试验机的压缩速度增至 25 mm/min 时，葫芦膜单元承载压力与变形曲线的整体趋势向上偏移。该结果说明 PE 材质的葫芦膜在进行静态压缩试验时，不宜选择较大的压缩速度，宜以低速为主。由图 2b 可知，当 PLA+PBAT 材质的葫芦膜的压缩速度从 12 mm/min 增至 25 mm/min 时，相同变形下葫芦膜的单元承载压力随着压缩速度的增加而增大，且在压缩速度为 25 mm/min 时，葫芦膜的爆破承载压力最大。

2 结果与分析

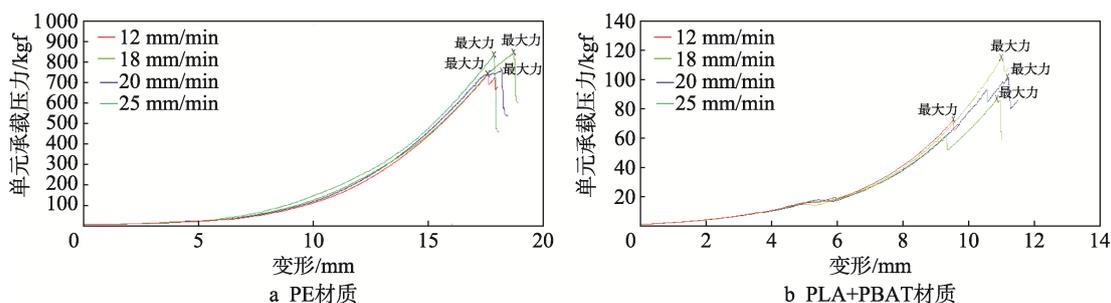
2.1 压缩速度对葫芦膜承压性能的影响

选取厚度 20 μm、泡径 40 mm (20-40) 的 PE 材质和 PLA+PBAT 材质的单元葫芦膜，充气机的充气速度为 100 mm/s，探索不同压缩速度 (12、18、20、25 mm/min) 下葫芦膜承压性能的变化情况，记录不同压缩速度条件下葫芦膜的爆破承载压力及变形 (表 2)，并绘制单元承载压力-变形曲线，如图 2 所示。

通过分析不同压缩速度下葫芦膜的单元承载压力-变形可知，PE 材质和 PLA+PBAT 材质的葫芦膜的单元承载特性近似为正切变化，即葫芦膜的单元承载压力随着压缩变形的增加缓慢增大，后期随着压缩变形的增加，单元承载压力快速增大，直至最终出现单元承载压力最大值，此时葫芦膜发生压溃

2.2 薄膜厚度对葫芦膜承压性能的影响

选取编号为 15-30、20-30 的非降解材质单元葫芦膜，研究相同泡径 (30 mm)、不同薄膜厚度 (15、20 μm) 下葫芦膜承压性能的变化。选择充气速度为 100 mm/s，压缩速度为 12 mm/min，记录不同薄膜厚度条件下葫芦膜的爆破承载压力和变形 (表 3)，并绘制单元承载压力-变形曲线，如图 3 所示。



注：1 kgf=9.80665 N

图2 压缩速度对葫芦膜单元承载压力的影响

Fig.2 Effect of compression speed on bearing pressure of gourd film unit

表 3 不同薄膜厚度下葫芦膜单元爆破承载压力
Tab.3 Blasting bearing pressure of gourd film unit with different film thickness

葫芦膜编号	最大承载压力/kgf	最大变形量/mm
15-30	676.102	14.049
20-30	792.248	14.479

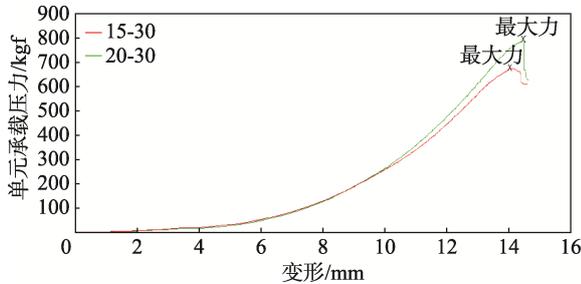


图 3 薄膜厚度对葫芦膜单元承载压力的影响
Fig.3 Effect of film thickness on bearing pressure of gourd film unit

通过分析葫芦膜的单元承载压力-变形曲线可知, 不同厚度下葫芦膜的单元承载压力-变形曲线的变化趋势基本一致; 在相同变形条件下, 葫芦膜的单元承载压力随着薄膜厚度的增加而增加, 且爆破承载压力也随薄膜厚度的增加而显著增加。由表 3 可知, 厚度为 15 μm 的葫芦膜爆破时, 单元承载压力为 676.102 kgf, 最大变形量为 14.049 mm; 厚度为 20 μm 的葫芦膜爆破时, 单元承载压力为 792.248 kgf, 最大变形量为 14.479 mm。可见, 对于相同泡径的葫芦膜, 其最大力的变形差异不明显, 即在承担最大爆破力时, 葫芦膜的极限压缩值相同。葫芦膜的单元承载压力主要由内部气压和葫芦膜材料本身决定, 这可能与不同薄膜厚度的拉伸强度有关, 即随着压缩变形的增大, 材料随之发生拉伸变形, 在一定程度上影响葫芦膜的承载压力。此外, 这些结果表明, 在实际使用葫芦膜时, 可根据强度需求选择相应厚度的葫芦膜。

2.3 泡径对葫芦膜承压性能的影响

选择充气速度为 100 mm/s、压缩速度为 12 mm/min, 对编号为 20-40、20-30、20-25 的非降解材质单元葫芦膜 (即相同厚度、不同泡径) 的承压性能的影响, 记录葫芦膜在不同泡径条件下的爆破承载压力及变形 (表 4), 并绘制单元承载压力-变形曲线, 如图 4 所示。

表 4 不同泡径下葫芦膜的单元爆破承载压力
Tab.4 Blasting bearing pressure of gourd film unit under different bubble diameters

葫芦膜编号	最大承载压力/kgf	最大变形量/mm
20-25	983.016	11.976
20-30	930.253	15.897
20-40	769.845	17.950

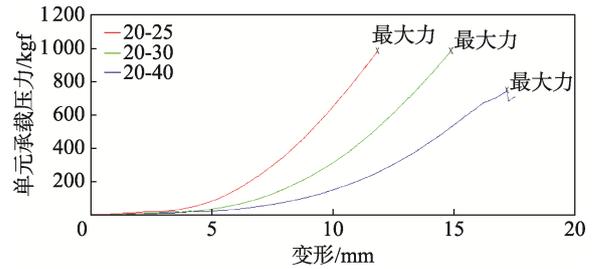


图 4 泡径对葫芦膜单元承载压力的影响
Fig.4 Effect of bubble diameter on bearing pressure of gourd film unit

分析不同泡径下葫芦膜的单元承载压力-变形量曲线可知, 在相同单元面积下, 压缩相同变形时, 葫芦膜的泡径越小, 则单元承载压力越大。由图 4 可知, 20-25、20-30 规格的葫芦膜均未出现曲线突然下降的阶段, 即在变形量达到 95% 时, 均未出现爆破情况, 说明其承压性能良好。20-40 规格的葫芦膜在变形末期出现下降趋势, 说明此时葫芦膜出现爆破情况。从表 4 可知, 泡径为 25、30、40 mm 的葫芦膜的单元承载压力最大值依次为 983.016、930.253、769.845 kgf, 说明爆破压力随着泡径的增大而降低。这主要是因为, 在相同压缩条件下, 小泡径的葫芦膜的接触面积较小, 在相同应变条件下其应力大。泡径为 25、30、40 mm 的葫芦膜爆破时的变形分别为 11.976、15.897、17.950 mm, 说明葫芦膜的泡径越大, 其最大变形随之增大。由此可见, 在选择缓冲包装材料时, 既要考虑材料能够抵抗的外部压力, 也需考虑缓冲材料能够预留的最大变形, 防止缓冲设计的触底风险。

2.4 充气速度对葫芦膜承压性能的影响

选取规格为 20-40 的非降解材质单元葫芦膜, 充气速度为 70、80、90、100 mm/s, 压缩速度为 12 mm/min, 记录不同充气速度条件下葫芦膜的单元爆破承载压力及变形 (表 5), 并绘制单元承载压力-变形量曲线 (图 5)。

由图 5 可知, 充气速度由 100 mm/s 降至 80 mm/s 时, 葫芦膜单元承载压力-变形曲线基本重合, 单元承载压力受充气速度的影响不显著。当充气速度降至 70 mm/s 时, 葫芦膜在相同压缩变形时, 单元承载压力-变形曲线整体向上偏移。由表 5 可知, 充气速度为 90 mm/s 的葫芦膜的单元爆破承载压力最大 (863.213 kgf), 此时变形量为 18.596 mm。该试验结果可为实际使用葫芦膜充气时选择合适的充气速度。

表 5 不同充气速度下葫芦膜单元爆破承载压力
Tab.5 Blasting bearing pressure of gourd film unit at different inflating rates

充气速度/(mm·s ⁻¹)	最大承载压力/kgf	最大变形量/mm
100	764.598	17.945
90	863.213	18.596
80	760.908	17.788
70	734.905	17.382

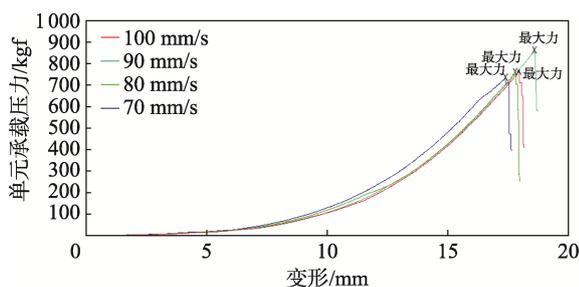


图5 充气速度对葫芦膜单元承载压力的影响
Fig.5 Effect of inflation speed on bearing pressure of gourd film unit

2.5 材质对葫芦膜承压性能的影响

选取规格为20-40的降解单元葫芦膜与非降解材质的葫芦膜进行对比试验,充气速度为100 mm/s,压缩速度为12 mm/min,每种材质进行3组实验,记录不同材质葫芦膜的单元爆破承载压力平均值和变形量,见表6。

表6 不同材质的葫芦膜单元爆破承载压力
Tab.6 Blasting bearing pressure of gourd film unit of different materials

材质	葫芦膜 编号	最大承载 压力/kgf	最大 变形量/mm
PE	20-40	769.845	17.950
PLA+PBAT+牛皮纸	20-40	203.366	15.220
PLA+PBAT	20-40	72.385	9.522

由表6可知,降解材质葫芦膜的单元爆破承载压力低于非降解材质的葫芦膜。该结果可能是由可降解材料的力学性能不佳所致,材料的降解性通常会影响力学性能,在某些情况下,如PLA(聚乳酸)降解材质,其结晶过程与降解过程相互竞争,这些都会影响力学性能。

3 结语

通过研究葫芦膜在静态压缩试验下的单元承载压力,揭示了多种因素对其压缩性能的影响。研究表明,压缩速度对葫芦膜的静态压缩性能具有显著影响,这一发现为葫芦膜类充气包装的压缩试验提供了重要的参考依据。此外,还探讨了葫芦膜充气机的充气速度对其压缩性能的影响,为实际使用中充气机的速度调节提供了理论依据。

在确定上述因素后,进一步研究了市场上葫芦膜主流规格的单元承载压力-变形规律。结果显示,葫芦膜的泡径和厚度均是影响力学性能的重要因素。这一发现表明,在运输包装设计时,需要综合考量葫芦膜的规格和材料特性,以达到最佳的保护效果。另外,还测试了国内新型可降解葫芦膜的力学性能,研

究表明当前可降解葫芦膜的力学性能尚不及非降解材质葫芦膜,这一发现指出了技术进一步发展和改进的必要性。尽管面临挑战,可降解葫芦膜的开发和应用仍具有重要的环保价值,值得持续关注和研究。在应力-应变特性的分析方面,由于葫芦膜的单元片材由多排气泡组成,并且在实际压缩过程中压缩面积会实时变化,这增大了测量的难度,因此本文暂未对其应力-应变特性进行深入分析,这部分工作将在后续研究中逐步完善。

参考文献:

- [1] 张健,李琛. 充气缓冲衬垫的性能及应用研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(19): 68-74.
ZHANG J, LI C. Research Progress on Performance and Application of Inflatable Cushion Pad[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(19): 68-74.
- [2] 辛丽颖. 缓冲包装材料的应用及发展[J]. 印刷技术, 2016(10): 42-43.
XIN L Y. Application and Development of Cushioning Packaging Materials[J]. Printing Technology, 2016(10): 42-43.
- [3] 沈剑锋,卢立新,任冬远. 柱状塑膜空气垫承载与缓冲性能的试验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(6): 6-7.
SHEN J F, LU L X, REN D Y. Research on Loading and Cushioning Performance of Plastic Cylinder Airbag[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 6-7.
- [4] 王雪芬,陆佳平. 充气袋承载与缓冲特性的试验研究[J]. 包装工程, 2013, 34(19): 55-58.
WANG X F, LU J P. Loading and Cushioning Performance of Air Filled Bag[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(19): 55-58.
- [5] 巩桂芬,黄民虎,刘晓晨,等. 柱形空气垫静态压缩几何模型研究[J]. 包装工程, 2020, 41(19): 62-67.
GONG G F, HUANG M H, LIU X C, et al. Static Compression Geometric Model of Cylindrical Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(19): 62-67.
- [6] 巩桂芬,李超. 柱形空气衬垫振动传递特性的试验研究[J]. 包装工程, 2019, 40(19): 92-96.
GONG G F, LI C. Experimental Study on Vibration Transmissibility Properties of Cylindrical Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(19): 92-96.
- [7] 陈梓垠,王玉龙,梁秀. 空气柱衬垫缓冲性能研究[J]. 绿色包装, 2017(9): 51-55.
CHEN Z Y, WANG Y L, LIANG X. Research on Cushioning Properties of Air Tube Pillow[J]. Green Packaging, 2017(9): 51-55.
- [8] 梁秀. 空气柱衬垫缓冲性能研究[D]. 武汉: 武汉大

- 学, 2017: 42-49.
- LIANG X. Study on Cushioning Performance of Air Column Gasket[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017: 42-49.
- [9] 周加彦, 范珺. 空气垫缓冲包装承载性验证及影响分析[J]. 中国包装, 2016, 36(5): 48-50.
- ZHOU J Y, FAN J. Verification and Influence Analysis of Bearing Capacity of Air Cushion Packaging[J]. China Packaging, 2016, 36(5): 48-50.
- [10] 刘功, 宋海燕, 刘占胜, 等. 空气垫缓冲包装性能的研究[J]. 包装与食品机械, 2005, 23(2): 18-20.
- LIU G, SONG H Y, LIU Z S, et al. The Study on Performance of Air Cushion Mats[J]. Packaging and Food Machinery, 2005, 23(2): 18-20.
- [11] 徐健, 刘晓玉, 王保升. 缓冲气柱袋在运输包装中的应用设计及研究现状[J]. 印刷技术, 2016(4): 40-42.
- XU J, LIU X Y, WANG B S. Application Design and Research Status of Buffer Gas Column Bag in Transportation Packaging[J]. Printing Technology, 2016(4): 40-42.
- [12] 巩桂芬, 刘萌沛. 充气垫缓冲材料破损强度研究[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2015, 33(3): 149-153.
- GONG G F, LIU M P. Study on the Compressive Strength of Air Filled Cushions[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2015, 33(3): 149-153.
- [13] 谷吉海, 田野, 高翔, 等. 充气压力对空气衬垫缓冲防护性能的影响研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(20): 226-230.
- GU J H, TIAN Y, GAO X, et al. Influence of Inflation Pressure on the Buffer Protection Performance of Air Cushions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(20): 226-230.
- [14] 赵德坚. 充气量对充气缓冲包装垫缓冲性能的影响研究[J]. 包装工程, 2011, 32(13): 32-34.
- ZHAO D J. On Influence of Gas Volume on Cushioning Property of Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13): 32-34.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 包装用缓冲材料静态压缩试验方法: GB/T 8168—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Testing Method of Static Compression for Packaging Cushioning Materials: GB/T 8168-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.