

柱形空气垫静态压缩几何模型研究

巩桂芬^{a,b,c}, 黄民虎^{a,b,c}, 刘晓晨^{a,b,c}, 孙德强^{a,b,c}

(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.中国轻工业纸基功能材料重点实验室
c.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要：目的 研究柱形空气垫静态压缩缓冲性能，将理论几何压缩模型进行试验验证，证明可行性。

方法 根据柱形空气垫受压变形特征，推导出几何压缩模型理论公式，对不同宽度、不同充气压强的柱形空气垫进行静态压缩试验，用拓色法计算理论面积，将试验曲线与理论曲线进行对比。**结果** 随着压缩位移的增加，接触面积曲线的理论值与试验值呈线性关系，在宽度相同的情况下，充气压强的增大导致接触面积曲线的理论值与试验值吻合程度下降；相同宽度、不同压强的柱形空气垫载荷位移曲线很接近，显示出规格才是影响柱形空气垫缓冲性能的主要因素。**结论** 所提出的柱形空气垫静态压缩几何模型可行。

关键词：空气垫；静态压缩；几何模型；缓冲性能

中图分类号：TB485.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2020)19-0062-06

DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.19.009

Static Compression Geometric Model of Cylindrical Air Cushion

GONG Gui-fen^{a,b,c}, HUANG Min-hu^{a,b,c}, LIU Xiao-chen^{a,b,c}, SUN De-qiang^{a,b,c}

(a.Shaanxi Provincial Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper Development b.Key Laboratory of Paper Based Functional Materials of China National Light Industry c. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the static compression cushioning performance of cylindrical air cushion, and experimentally verify the theoretical geometric compression model to prove the feasibility. Based on the compressive deformation characteristics of cylindrical air cushion, the geometric compression theoretical formulas were derived. Static compression tests were performed on cylindrical air cushions of different width and different inflation pressures. The theoretical area was calculated by the color extension method, and the experimental curve and the theoretical curve were compared. As the compression displacement increased, the theoretical and experimental values of contact area had linear relationship. The increase of inflation pressure led to decline of the fit degree under the same width. The load and displacement curves of cylindrical air cushions with the same specifications and different pressures were very close, indicating that the specifications were the main factors affecting the cushioning performance. The static compression geometric model of cylindrical air cushion proposed in this work is feasible.

KEY WORDS: air cushion; static compression; geometric model; cushioning performance

收稿日期：2020-03-16

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：巩桂芬（1974—），女，陕西科技大学副教授，主要研究方向为缓冲包装动力学、运输包装及包装结构设计。

空气垫是包装行业新兴的一种包装材料。由于 EPE (发泡聚乙烯) 材料刚度较差, EPS (发泡聚苯乙烯) 材料不易降解, 且不利于环保, 因此市面上空气垫的材质多采用 PA (聚酰胺)/PE (聚乙烯) 复合膜、PE/PA/PE 复合膜和 PE/PA 等 7 层共挤高阻隔膜, 提高了包装材料所需的强度和环友好性^[1-4]。空气垫具有无毒、可回收利用等优点, 广泛应用于电子产品、精密仪器、易碎产品和易爆产品的缓冲包装。

空气垫在产品跌落或受到冲击时, 提供其达到静止所需要的空间, 且可吸收能量, 具有良好的隔振性能^[5-6]。空气垫的研究主要分为 3 个方面内容: 空气垫理论研究, 采用不同方法模拟空气垫缓冲机理和承载特性, 并结合试验, 对比空气垫理论研究的准确度^[7-10]; 空气垫材料、参数试验研究, 根据试验结果分析参数的改变对空气垫缓冲性能的影响, 如在考虑压缩变形和薄膜的拉伸变形的情况下, 通过改变空气垫的充气压力和受冲击载荷进行试验, 并分析充气压力与冲击载荷之间的关系^[11-13]; 空气垫有限元仿真模拟研究, 采用三维软件对空气垫进行建模, 分析受压变形状态下应力的分布特征^[14]。

文中以柱形空气垫为研究对象, 在之前提出的柱形空气垫压缩变形特征的基础上, 推导出几何压缩模型理论公式, 并进行静态压缩试验, 将试验值与理论值进行对比, 分析验证理论公式的可行性, 为空气垫缓冲包装的设计应用提供借鉴。

1 空气垫理论模型

1.1 空气垫几何特性

空气垫由多个气柱组成, 单个充气前的空气垫见图 1, 充气后多个气柱形态见图 2。

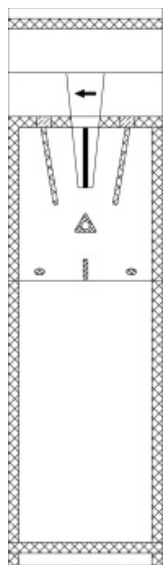


图 1 单个未充气空气垫
Fig.1 Single uninflated air cushion

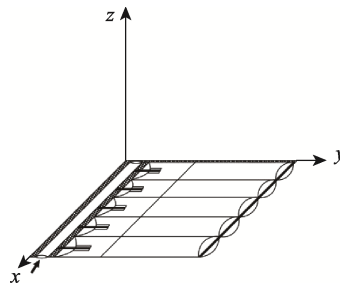


图 2 充气后空气垫示意
Fig.2 Schematic diagram of air cushion after inflation

将充气后的空气垫看作圆柱体, 空气垫受外力压缩后会发生形变。经综合考虑可知, 薄膜在受压时存在径向和轴向的压缩应变, 对空气垫反复压缩 5 次后, 计算发现应变可忽略不计, 因此可将空气垫视为非弹性材料。空气垫 xz 截面压缩前后对比见图 3, 压缩过程中周长不发生变化, 压缩后 yz 面长度与压缩前相等^[13]。 xy 截面示意图见图 4。

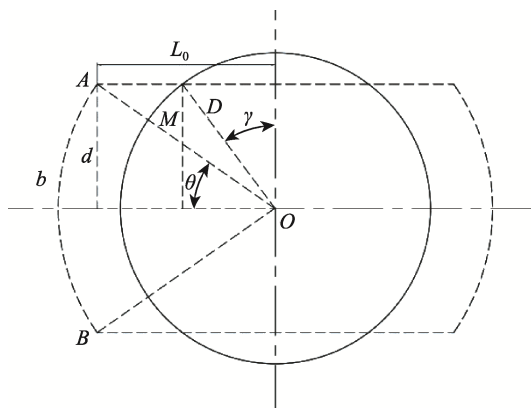


图 3 xz 截面受压变形前后对比
Fig.3 Comparison of xz -section before and after compression deformation

根据图 3 及已知条件有:

$$A = 2L_0 \cdot L = 2D \cdot L \cdot \arccos \frac{d}{D} \quad (1)$$

$$M = \sqrt{(\gamma \cdot D)^2 + d^2} \quad (2)$$

$$b = 2\theta \cdot M \quad (3)$$

式中: γ , θ 为弧度; D , d 为压缩前、后的厚度; A 为接触面积; L_0 为 xz 截面接触宽度; L 为空气垫长度; M , b 为扇形 AOB 的半径与弧长。

图 4c 所示几何模型被斜切部分坐标系底面可用 $x^2 + y^2 = D^2$ 的方程表示, 假定 α 为 45° 。阴影部分的面积的计算:

$$A_1 = \frac{1}{2} (D^2 - x^2) \tan \alpha \quad (4)$$

立体的体积可表示为:

$$V_1 = \frac{1}{2} \int_{-D}^D (D^2 - x^2) \tan \alpha dx = \frac{2}{3} D^3 \quad (5)$$

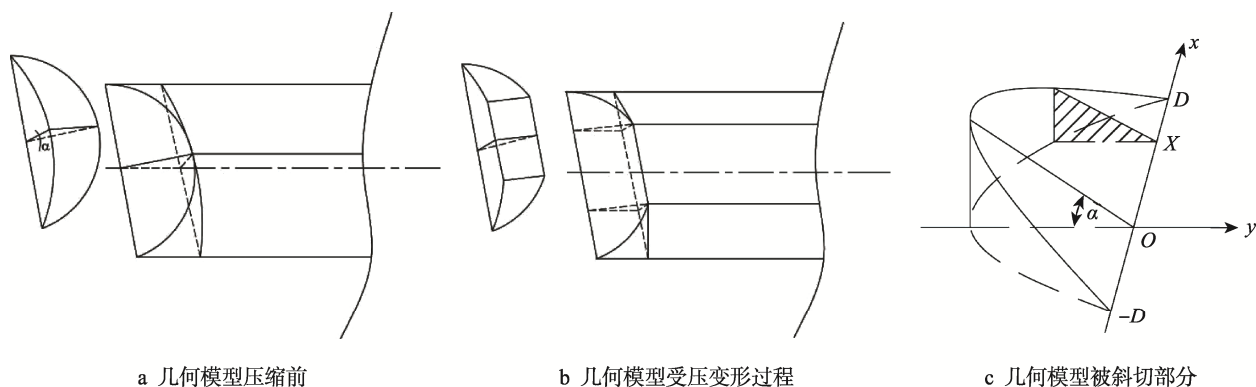


图4 空气垫理论模型受压变形过程
Fig.4 Compression process of air cushion theoretical model

$$V_0 = \pi D^2 \left[L + \frac{2D}{\cot \alpha} \right] - 2 \int_{-D}^D (D^2 - x^2) \tan \alpha dx = \quad (6)$$

$$\pi D^2 \left[L + \frac{2D}{\cot \alpha} \right] - \frac{8}{3} D^3$$

$$V = \frac{8}{3} (M - \gamma \cdot D)(D - x)^2 + 4(D - x)^2 \cdot L_0 + \quad (7)$$

$$2(\theta \cdot M^2 - \gamma \cdot D(D - x)) \cdot L + 4(D - x) \cdot \gamma \cdot D \cdot L$$

式中: α 为斜面与底面夹角; V_1 为斜切立体体积; V_0 为气垫初始体积; V 为压缩过程中的体积。

1.2 空气垫受压变形特性

空气垫内部充入气体后能全面包裹产品,在运输过程中受到外界冲击时,产生压缩变形可对内装物进行保护。在这个过程中,气垫的压强与外力存在以下关系:

$$F = P_q \cdot A \quad (8)$$

根据空气动力学理论可知,常温常压下空气分子的体积与分子之间的相互作用力可忽略不计,满足以下理想气体状态方程:

$$(P_q + P_a) \cdot V^m = (P_r + P_a) \cdot V_0^m \quad (9)$$

式中: P_a 为 101.325 kPa; P_r 为初始相对气压; P_q 为压缩过程中的相对气压; m 为多变指数,在静态压缩过程中,气体状态可近似为等温过程, $m=1$,动态试验中可视为绝热过程, $m=1.4$ 。

结合式(8)与式(9)有:

$$F = P_q \cdot A = \left[(P_r + P_a) \cdot \frac{V_0}{V} - P_a \right] \cdot A =$$

$$\left[\frac{(P_r + P_a) \cdot \left(\pi D^2 (L + 2D) - \frac{8}{3} D^3 \right)}{\frac{8}{3} (M - \gamma \cdot D)(D - x)^2 + 4(D - x)^2 \cdot L_0} - P_a + \right.$$

$$\left. \frac{2L(\theta \cdot M^2 - \gamma D(D - x)) + 4(D - x) \gamma \cdot D \cdot L}{2L \arccos \frac{(D - x)}{D}} \cdot D \right] \quad (10)$$

2 试验

2.1 材料与仪器

试验材料:由江阴艾尔克缓冲材料有限公司生产的柱形空气垫,材质为 PE/PA 7 层共挤高阻隔膜,长度为 150 mm,厚度为 115 μm 。

主要试验仪器:YH-CZ60W 型智能数控充气泵,余姚市兔巴哥电器厂;YE-50 型包装件压力试验机,宁夏吴忠材料试验机厂。

2.2 方法

试验先采用 6 根相连的柱形空气垫,参数见表 1,参考 GB/T 8168—2008 的方法^[15],充气后在表面涂覆颜料,并在涂有颜料的下方放置 1 张白纸,控制包装件压力试验机的压缩量为定值,每改变 1 次压缩值,重新更换纸张,根据颜料在纸张上留下的印记,计算接触面积。然后利用包装件压力试验机对不同规格的空气垫以 10 mm/min 的速度进行压缩,记录载荷-位移曲线,重复 3 次试验,取其平均值。不同规格空气垫压缩前后的厚度对比见表 2。

3 结果

3.1 接触面积理论值与试验值对比

接触面积理论值与试验值曲线对比见图 5。由于压力试验机的压缩量只能通过手动控制,取值较为固定,为使曲线更加准确,在 Origin 软件中使用插值法来扩大压缩范围。从图 5a 看出,当宽度为 20 mm,充气压力为 30 kPa 时,理论值与试验值曲线吻合程度很高,在压缩位移为 2~4 mm 时最为接近。随着压缩位移的不断增大,理论值开始小于试验值,但总体上二者都处于线性状态。由图 5c—d 可知,接触面积曲线理论值与试验值吻合程度出现下降趋势,理论值大于试验值,除去试验存在的人为误差,造成理论值与试验值出现偏差的原因可能是由于空气垫在压缩

过程中与纸张接触的有效长度低于理论值。

3.2 载荷-位移曲线理论值与试验值对比

将式（10）进行绘图，通过改变宽度和充气压强

得到载荷-位移理论曲线。由图 6 可知，通过对不同宽度、不同压强的空气垫载荷位移曲线试验值与理论值对比，可以看出曲线呈正切型。对于宽度相同的空气垫，充气压强的增加对载荷位移曲线无明显影响；

表 1 不同压缩量下空气柱的接触面积
Tab.1 Contact area of air column under different compression

规格(长度/mm，厚度/ μm)	压强/kPa	长度/mm	压缩量/mm	面积/ mm^2
20，115	30	150	2	1385.6
20，115	40	150	2	1231.7
20，115	50	150	2	2054.4
20，115	30	150	4	1828.5
20，115	40	150	4	2173.5
20，115	50	150	4	2080.3
20，115	30	150	6	2624.3
20，115	40	150	6	2268.1
20，115	50	150	6	2414.5
20，115	30	150	8	2969.6
20，115	40	150	8	2852.5
20，115	50	150	8	2737.3
30，115	30	150	3	1917.5
30，115	40	150	3	1715.6
30，115	50	150	3	1410.2
30，115	30	150	6	2533.3
30，115	40	150	6	2220.4
30，115	50	150	6	2072.4
30，115	30	150	9	3089.9
30，115	40	150	9	2887.6
30，115	50	150	9	2735.7
30，115	30	150	12	4582.3
30，115	40	150	12	3744.4
30，115	50	150	12	3255.4
30，115	30	150	15	4830.4
30，115	40	150	15	4523.8
30，115	50	150	15	3317.3

表 2 不同规格空气垫压缩前后厚度值
Tab.2 Thickness values of different specifications of air cushions before and after compression

规格(长度/mm，厚度/ μm)	试验次数	压强/kPa	长度/mm	压缩前厚度/mm	压缩后厚度/mm
20，115	1	30	150	10.15	9.97
	2	40		10.19	9.97
	3	50		10.39	10.22
30，115	1	30	150	18.12	17.71
	2	40		17.16	16.84
	3	50		17.46	17.16
40，115	1	50	150	25.57	25.11
	2	60		24.71	24.39
	3	70		28.53	27.55

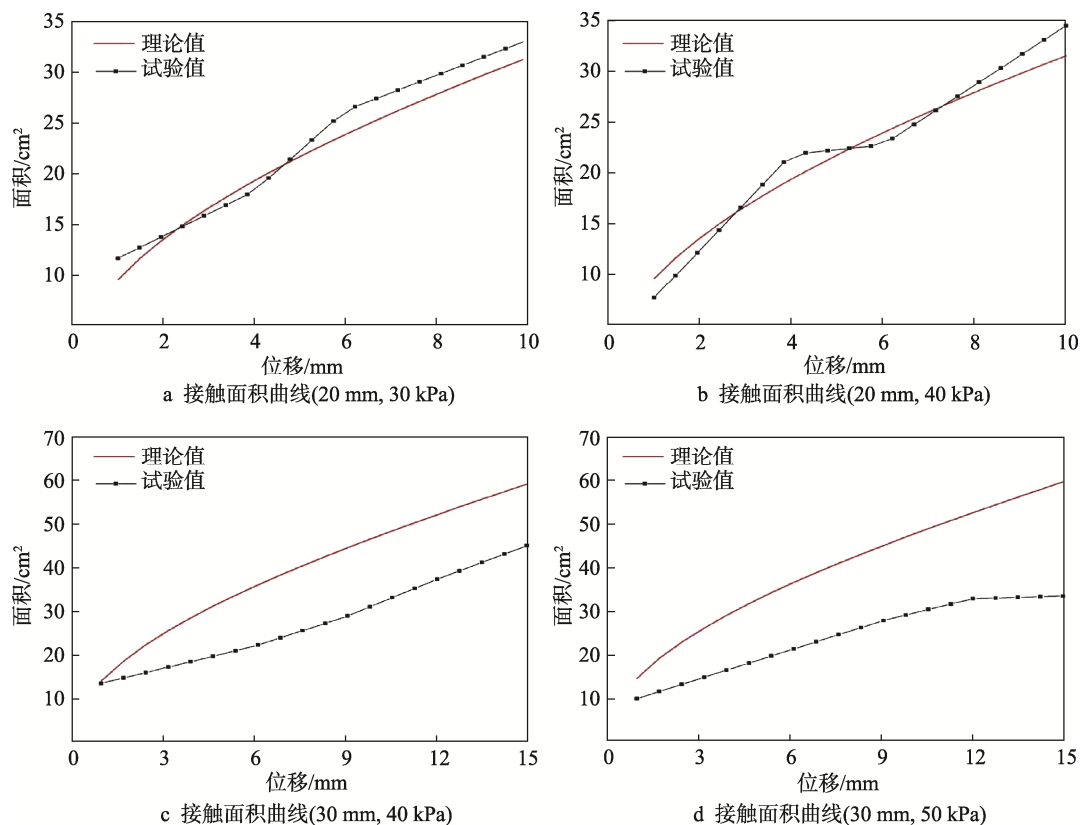


图 5 接触面积理论值与试验值曲线的对比

Fig.5 Comparison of theoretical value and experimental value of contact area

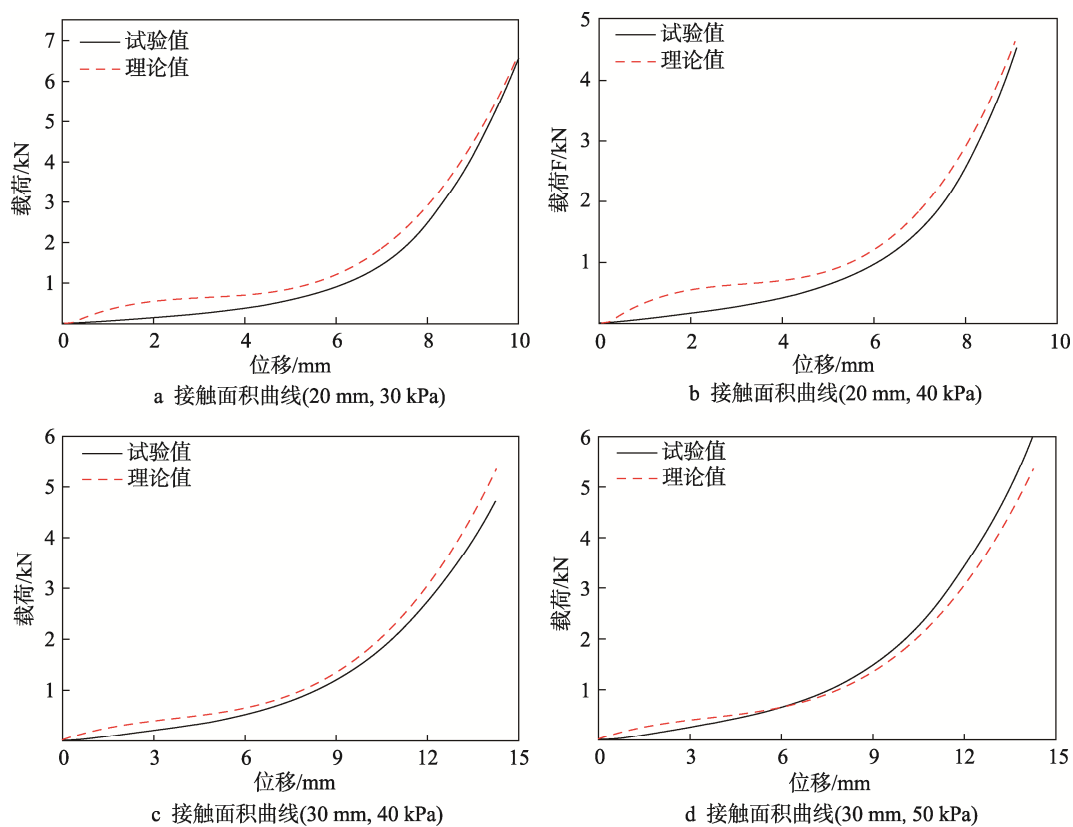


图 6 载荷位移曲线理论值与试验值的对比

Fig.6 Comparison of theoretical value and experimental value in load-displacement curve

压缩位移在 0~4 mm 之间时,载荷的理论值普遍大于试验值;压缩位移在 4 mm 以上时,试验值与理论值曲线吻合程度较高,其中随着规格和压强的增加,空气垫受压变形理论模型与试验的载荷位移曲线越接近。

4 结语

文中研究了柱形空气垫在不同宽度、不同压强下的变形特征,将理论模型的载荷-位移曲线与试验进行比对,结果表明理论模型曲线与试验曲线吻合程度良好,从而验证了可行性。柱形空气垫的规格是影响缓冲性能的主要因素,因此对不同包装产品采取不同规格的空气垫具有借鉴意义。在试验的过程中发现,拓色法计算接触面积会出现一定程度的误差,有待进一步改进。文中由于试验条件有限,未对较大规格的空气垫进行试验验证,但从现有的试验可以推断出,理论模型对较大规格的空气垫具有良好的变形表征。

参考文献:

- [1] 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 Jia-yan, FAN Jun. Validation and Impact Analysis of Air Cushion Packaging[J]. China Packaging, 2016, 36(5): 48—50.
- [2] 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, 2015, 33(3): 149—153.
GONG Gui-fen, LIU Meng-pei. Research on Damage Strength of Inflatable Cushion Buffer Material[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2015, 33(3): 149—153.
- [3] LI G, ROUILLARD V, SEK M A. Evaluation of Static and Dynamic Cushioning Properties of Polyethylene Foam for Determining Its Cushion Curves[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(1): 47—57.
- [4] LU F D, TAO W M, GAO D. Virtual Mass Method for Solution of Dynamic Response of Composite Cushion Packaging System[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26: 32—42.
- [5] CHANG C Y, LI S Y. Effect of Process Parameters on the Surface Quality of Air Cushion Method[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2015, 34(3): 257—266.
- [6] 彭国勋. 物流运输包装设计(第2版)[M]. 北京: 文化发展出版社, 2012: 100—150.
- PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design(2ndEdition)[M]. Beijing: Cultural Development Press, 2012: 100—150.
- [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 Zi-gen, WANG Yu-long, LIANG Xiu. Research on Cushioning Performance of Air Column Cushion[J]. Green Packaging, 2017(9): 51—55.
- [8] KYLE D D. Application of the Stress-energy Method to Evaluate Enclosed Air Cushion Systems[J]. International Journal of Advanced Packaging Technology. 2016, 4(1): 216—225.
- [9] 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 Jian-feng, LU Li-xin, REN Dong-yuan. Experimental Study on the Cushioning Properties of Cylindrical Plastic Film Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 6—7.
- [10] 江太君, 刘跃军, 曾广胜, 等. 圆柱形塑膜空气垫的本构关系及缓冲特性分析[J]. 包装学报, 2010, 2(4): 27—29.
JIANG Tai-jun, LIU Yue-jun, ZENG Guang-sheng, et al. Constitutive Relationship and Cushioning Characteristics of Cylindrical Plastic Film Air Cushion[J]. Packaging Journal, 2010, 2(4): 27—29.
- [11] CHEN M R, ZHANG J F. Optimal Design of Cushion Package for Airdrop System[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 617—620.
- [12] 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(2): 18—20.
LIU Gong, SONG Hai-yan, LIU Zhan-sheng, et al. Study on the Performance of Air Cushion Packaging[J]. Packaging and Food Machinery, 2005(2): 18—20.
- [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 Ji-hai, TIAN Ye, GAO Xiang, et al. Study on the Impact of Inflation Pressure on the Air Cushioning Shielding Performance[J]. Vibration and Shock, 2016, 35(20): 226—230.
- [14] 吴芳英, 范小平, 向红, 等. 空气垫静态缓冲性能的数值模拟[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 11—15.
WU Fang-ying, FAN Xiao-ping, XIANG Hong, et al. Numerical Simulation of Static Cushioning Performance of Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 11—15.
- [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, Test Method for Static Compression of Cushioning Materials for Packaging[S].