

缓冲空气垫静态刚度研究

郭振斌¹, 陈安军^{1,2}

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 国家轻工业包装制品质量监督检测中心, 无锡 214122)

摘要: 以柱状空气垫为研究对象, 在几何压缩模型的基础上, 基于准静态压缩中空气垫内气体变化为等温过程, 建立了气垫静态刚度与气垫内初始相对内压、压缩变形量关系的理论模型; 取规格不同、初始内压相近及规格相同、初始内压不同的空气垫, 通过准静态压缩试验, 得到了静态刚度并与理论值进行了比较。研究表明, 当压缩量较小时, 理论模型对空气垫静态刚度的预测较为准确。

关键词: 柱状空气垫; 静态刚度; 理论模型; 准静态试验

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)11-0005-03

On the Static Stiffness of Air Cushion

GUO Zhen-bin¹, CHEN An-jun^{1,2}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. China National Light Industry Package Quality Supervising and Testing Center, Wuxi 214122, China)

Abstract: Column air cushion was taken as object of study. The theoretical model of the static stiffness, initial internal pressure and compression deformation were established in terms of the geometry model based on the isothermal process inside the air cushion. Static stiffness characteristics were obtained from quasi-static compression test, and comparison was made between the models and experimental values of the different specifications and initial internal pressures. The results showed that the static stiffness from theoretical model is more suitable for small compression deformation.

Key words: column air cushion; static stiffness; theoretical model; quasi-static experiment

由塑料薄膜制袋、充气形成空气垫, 是一种新型承载与缓冲材料, 并已应用于多种产品的缓冲包装。文献[1]通过静态压缩试验对气垫的性能分析表明, 其本构关系属于正切型; 文献[2-3]通过与 PS 泡沫塑料缓冲性能的对比分析, 发现空气垫低频工况下吸振性能及抗冲击性能较好, 缓冲性能优于 PS 泡沫塑料; 文献[4-5]以柱状空气垫为研究对象, 采用准静态压缩试验, 得到了不同规格空气垫压缩接触面积和载荷特性, 提出了新的几何压缩模型, 并探讨了充气压力、结构几何尺寸对空气垫承载与缓冲性能的影响。作为一种新型承载及缓冲包装材料, 其减振及抗冲击性能与材料的刚度、阻尼等因素相关, 而空气垫的刚度及阻尼特性的研究国内未见报道。

笔者以柱状空气垫为研究对象, 在几何压缩模型

的基础上, 建立静态刚度与空气垫内部初始压力、压缩变形量的关系, 并通过试验分析验证。

1 空气垫压缩几何模型的建立

取单个柱状空气垫为研究对象, 假设其材料不可拉伸, 准静态压缩过程空气垫内气体变化为等温过程, 动态压缩气体状态变化可近似认为是绝热过程。空气垫充满空气压缩前, 圆柱状部分长为 l_0 , 横截面直径为 D , 两端为半球状且压缩过程中两端仍保持为半球状, 其纵向截面见图 1a; 压缩前其横截面为半径 $D/2$ 的圆, 压缩过程中其周长不变, 两端为圆弧, 圆弧对应的半径仍为 $D/2$, 压缩前空气垫体积:

$$V_0 = \frac{1}{4} \pi D^2 l_0 + \frac{1}{6} \pi D^3 \quad (1)$$

收稿日期: 2011-04-16

作者简介: 郭振斌(1988—), 女, 安徽人, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通讯作者: 陈安军(1962—), 男, 河南潢川人, 江南大学教授, 主要从事包装动力学、机器人动力学及控制的研究。

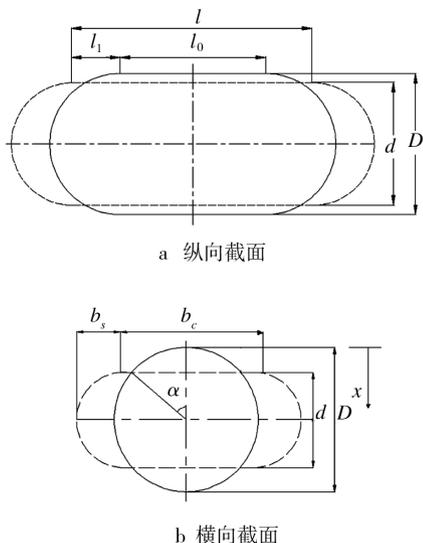


图1 圆柱状空气垫几何模型

Fig. 1 The geometrical model of column air cushion

取未压缩时坐标为原点,见图 1b,当压缩量为 x 时,由图 1b 知:

$$x = D - d \tag{2}$$

$$b_c = \alpha D \tag{3}$$

$$\cos \alpha = d/D \tag{4}$$

$$b_s = \frac{D}{2}(1 - \sin \alpha) \tag{5}$$

其横截面面积:

$$S_1 = b_c d + 2 \left[\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \frac{D^2}{4} - \frac{D}{4} d \sin \alpha \right] \tag{6}$$

由图 1a 知:

$$l = l_0 + 2l_1 \tag{7}$$

$$l_1 = \frac{\pi(D-d)}{4} \tag{8}$$

压缩过程的体积:

$$V = \left[b_c d + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \frac{D^2}{4} - \frac{D}{4} d \sin \alpha \right] \cdot$$

$$\left[l_0 + \frac{\pi}{2}(D-d) \right] + \frac{1}{6} \pi d^3 \tag{9}$$

由式(2)–(9),压缩过程圆柱状充气垫体积与压缩量 x 的关系为:

$$V = \left[\arccos \frac{D-x}{D} D(D-x) + \left(\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{D-x}{D} \right) \cdot \frac{D^2}{2} - \frac{1}{2}(D-x)\sqrt{2Dx-x^2} \right] \left(l_0 + \frac{\pi}{2}x \right) + \frac{1}{6} \pi (D-x)^3 \quad (0 \leq x \leq x_{\text{极限}}) \tag{10}$$

式中: $x_{\text{极限}}$ 可通过试验确定,即压缩破坏前的最

大压缩量。压缩过程的有效接触面积(承压面积):

$$S = b_c l = \arccos \frac{D-x}{D} D \left(l_0 + \frac{\pi}{2}x \right) \tag{11}$$

2 刚度的表征

圆柱状空气垫压缩过程的受力见图 2。设内部

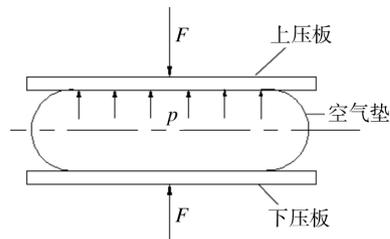


图2 空气垫的压缩受力情况

Fig. 2 The compressive force of air cushion

气体的相对气压 p ,压缩过程由力平衡知:

$$F = pS \tag{12}$$

式中: S 为与压板间的有效承压面积,与压缩量的关系由式(11)确定,对竖向变形(压缩量)求偏导,则其刚度可表征为:

$$K = \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} S + p \frac{\partial S}{\partial x} \tag{13}$$

式中:第 1 项描述空气垫内部压力变化对刚度的影响;第 2 项描述几何变化对刚度的影响。压缩过程空气垫内部压力与体积满足气体状态方程^[6-7]:

$$(p + p_a)V^m = (p_r + p_a)V_0^m \tag{14}$$

式中: p_a 为一个标准大气压; p_r 为气垫内初始相对气压; V_0 为气垫初始体积(气体体积); V 为压缩过程气体体积; m 为多变指数,静态分析时气体状态变化为等温过程, m 取 1,动态分析时,气体状态可近似为绝热过程, m 近似取 1.4。由式(14)知:

$$p = (p_r + p_a) \left(\frac{V_0}{V} \right)^m - p_a \tag{15}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -(p_r + p_a) \left(\frac{V_0}{V} \right)^m m \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial x} \tag{16}$$

上两式代入式(13)得空气垫压缩刚度:

$$K = (p_r + p_a) \left(\frac{V_0}{V} \right)^m \left(\frac{\partial S}{\partial x} - \frac{m}{V} \frac{\partial V}{\partial x} S \right) - p_a \frac{\partial S}{\partial x} \tag{17}$$

当 m 取 1 可表征静刚度, m 取 1.4 可表征动刚度。由式(17)知刚度不仅与空气垫几何参数有关,还

与初始内压有关,在给定几何形状及初始内压条件下表征为压缩行程的非线性函数。

3 静态刚度的试验验证

3.1 材料及试验方法

1) 取内充空气的 PE/PA/PE 膜单气室垫,具体规格及初始内压参数见表 1。

表 1 空气垫的规格及初始参数
Tab.1 The specifications and initial parameters of air cushion

规格*	长度 t /mm	内压 p_i /kPa	厚度 D /mm
20×115	155	18.7	11
		32.7	12
		47.6	12
		77.2	13
30×115	165	26.8	15
		40.9	17
		48.2	18
		51.4	18
		63.0	18
40×115	165	24.3	23
		31.6	25
		42.6	25
		64.6	26
		73.8	26
		80.0	26
60×115	165	15.0	35
		22.8	35
		24.5	35
		44.5	39

*:表示:宽度(mm)×膜厚(μm),下同。

2) 实验设备选用 LRX PLUS 型电子材料试验机,精度 0.5%。

3) 静态刚度测定。采用电子材料试验机对空气垫进行准静态压缩试验(加载速率 10 mm/s),记录载荷特性曲线,并用 Matlab 转化为刚度特性曲线。

3.2 试验值与理论值比较

1) 取 4 种不同规格空气垫在相近初始内压条件下的静态刚度特性,见图 3。

2) 取相同规格 40×115 型空气垫进行静态压缩试验,不同初始内压条件下的静态刚度见图 4。

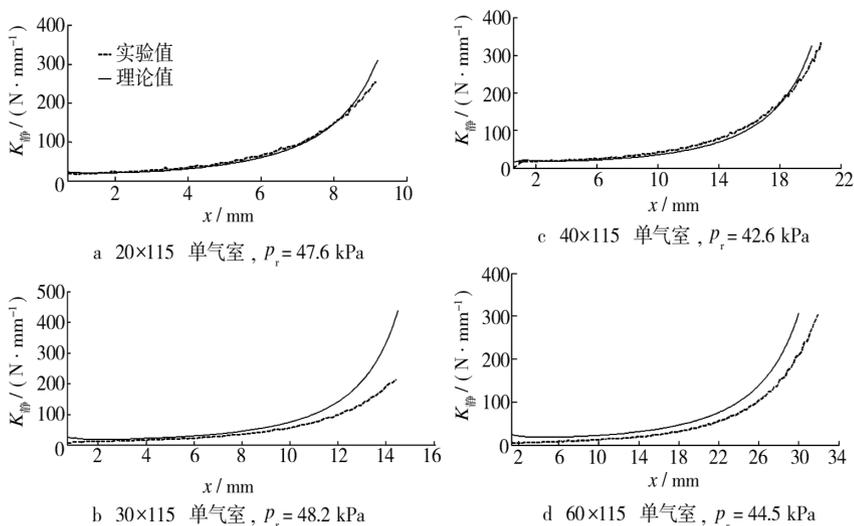


图 3 规格不同、内压相近的气垫的静态刚度试验值与理论值对比

Fig.3 Comparison of static stiffness values from model and experiment under approximate initial internal pressure of different specifications

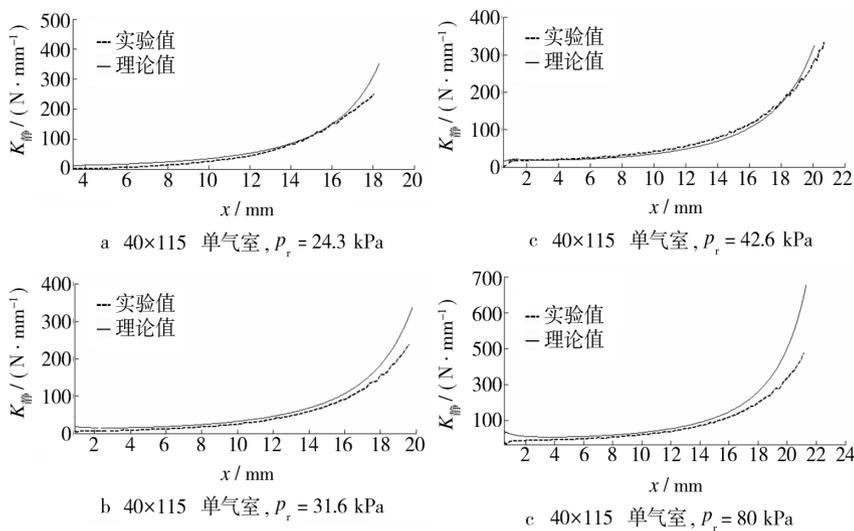


图 4 规格相同、内压不同的气垫的静态刚度试验值与理论值对比

Fig.4 Comparison of static stiffness values from model and experiment under different initial internal pressure of the same specifications

4 结语

由图 3 知,不同规格相近初始内压条件下,圆柱状空气垫静态刚度的理论表征与试验值趋势相同,变形量较小时与试验值接近程度较好;由图 4 知,相同规格 40×115 型圆柱状空气垫,不同初始内压条件下,静态刚度的理论表征与试验值较吻合;当变形量

(下转第 25 页)

这也是造成发泡石头纸力学性能下降的重要原因。并且发泡剂添加越多,产生的气泡越多,发生应力集中的地方也就越大,相对应的力学性能也就下降得越多。

5 结论

通过造粒、高速冷混、挤出热压发泡而制备的发泡石头纸内部结构规则,形成的微孔分布比较均匀,石头纸的密度下降,但是发泡后的石头纸表面也产生了微孔。发泡剂的加入量和发泡产生的气体量大小,对发泡后的石头纸的物理性能会产生不同的影响。发泡剂的添加量和发泡量的大小低于一定的量时,发泡石头纸的物理性能可以得到提升,当超过这个量时,发泡石头纸的物理性能会下降。发泡技术带来的石头纸密度的下降,克服了当前国内石头纸密度较大的缺点,对于拓宽石头纸的应用范围有很重大而深远的意义。石头纸作为包装材料的应用,可大大降低包装的制造成本和运输成本;石头纸在新闻出版方面的应用,可给读者的携带带来极大的方便。

发泡石头纸在本质上是用发泡产生的气体来代替石头纸中的填充料,因此,石头纸发泡技术也是降低石头纸生产成本的技术。如何利用发泡石头纸密度减小的优点,改善和利用发泡石头纸表面的微孔结构,并达到与发泡石头纸的物理性能平衡,以最大化利用发泡石头纸的综合性能,将是发泡石头纸应用推广的关键。

参考文献:

[1] 林一亭. 石头造纸——传统造纸技术的重大突破[J]. 华

(上接第7页)

较大时,不同规格相近初始内压及相同规格不同初始内压静态刚度的理论值偏大。

对圆柱状空气垫,在几何压缩模型的基础上,所建立的静态刚度的理论模型,在压缩(变形)量较小时,可以表征其刚度特性,所建立的表征静态刚度模型对空气垫的缓冲设计具有一定的应用价值。

参考文献:

[1] 郑小林,郑百哲,任力强. 气垫性能及平板玻璃缓冲包装[J]. 包装工程,1991,12(2):62-64.
[2] 郝喜海,马力,唐芬南,等. 新型绿色缓冲包装材料及生

产设备的研究[J]. 中国包装工业,2000(7):33-36.

- [3] 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.
[4] 任冬远,卢立新. 空气垫几何压缩模型的研究[J]. 包装工程,2008,29(2):12-14.
[5] 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):6-7,26.
[6] 黄映云,吴善跃,朱石坚. 囊式空气弹簧隔振器的特性计算研究[J]. 振动工程学报,2004,17(2):249-252.
[7] 朱石坚,黄映云,何琳. 长方体形囊式空气弹簧刚度特性[J]. 中国制造,2002,43(2):36-43.
东纸业,2010(1):26.
[2] 俞达. 合成纸的开发与生产[J]. 今日科技,1995(3):1.
[3] 敖欢,刘廷华. 木塑复合材料发泡成型技术研究进展[J]. 塑料工业,2005,33(9):1-4.
[4] WANG D,JIANG W,GAO H,et al. Preparation,Characterization, and Mechanical Properties of Microcellular Poly(Aryl Ether Ketone) Foams[J]. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics,2007,45(2):173-183.
[5] JENKINS M J,HARRISON K L,SILVA M M C G,et al. Characterisation of Microcellular Foams Produced from Semi-crystalline PCL Using Supercritical Carbon Dioxide[J]. European Polymer Journal,2006,42(11):3145-3151.
[6] SUMARN O,YOSHIYUKI S,SHIGEKI T,et al. Production of Polystyrene Micorcellular Foam Plastics and a Comparison of Late-and Quick-heating [J]. Journal of Applied Polymer Science,2000,77(11):2383-2395.
[7] JIANG X,LIU T,XU Z,et al. Effects of Crystal Structure on the Foaming of Isotactic Polypropylene Using Supercritical Carbon Dioxide as a Foaming Agent[J]. The Journal of Supercritical Fluids,2009,48:167-175.
[8] GUPRAA B,REVAGADEA N,I-HLBOM J. Poly(k acid)Fiber: An Overview[J]. Pros Polym Sci,2007,32:455-482.
[9] 陈庆华,张江山,钱庆荣,等. 新型聚乙烯包装材料的可环境消纳性能研究[J]. 环境科学报,2001,11(6):24.
[10] 张丕运. 共挤 BOPP 合成纸性能的主要影响因素研究[D]. 无锡:江南大学,2008.
[11] 肖珊,王丽. 华圆形孔洞下应力集中的实验研究[J]. 大学物理实验,2009,22(1):18-22.