

空气垫静态缓冲性能的数值模拟

吴芳英, 范小平, 向红, 张钦发, 黄建萍

(华南农业大学, 广州 510642)

摘要:目的 采用有限元数值模拟方法研究空气垫在静态压缩时的力学性能,以便更直观、系统地了解空气垫的静态压缩力学行为。方法 以柱状空气垫为对象,建立空气垫的静态压缩物理模型和力学模型,并基于该有限元模型模拟该结构的静态压缩过程,分析结构尺寸和充气压力对其静态缓冲性能的影响,得到空气垫在不同压缩量下的应力分布规律和变形特点。同时,将试验结果与模拟结果进行对比。结果 空气垫的变形是从接触钢板的地方开始的,上下位置同时被压缩,有限元分析结果与试验结果吻合良好。结论 所建立的有限元模型和数值模拟方法结果准确、合理。

关键词: 空气垫; 静态缓冲性能; 有限元; 数值模拟

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)05-0011-05

Numerical Simulation of Static Cushion Performance of Air Cushion

WU Fang-ying, FAN Xiao-ping, XIANG Hong, ZHANG Qin-fa, HUANG Jian-ping

(South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

ABSTRACT: To study the mechanical properties of air cushion under static compression using the finite element numerical simulation method, in order to understand the static compression mechanical behavior of air cushion more directly and systematically. Column air cushion was taken as the object in this paper. The physical model and mechanical model of static compression of the air cushion were built. The static compression of the structure was simulated by finite element method (FEM). The effects of the physical dimension and the pressure of filling atmospheric on air cushion were analyzed, and the stress distribution and deformation characteristics of air cushion under different compression amount were obtained. Meanwhile, the simulation results were compared with the test results. The deformation of air cushion started from the contact surfaces, and both the upper and lower surfaces were compressed at the same time. The results of finite element analysis were in good agreement with the experimental results. The finite element model established and the numerical simulation results and method were accurate and reasonable.

KEY WORDS: air cushion; static cushion performance; finite element; numerical simulation

空气垫是一种新型承载与缓冲材料,它由塑料薄膜包裹气体,并经封合而成为突起状的气泡(柱),气泡的形状主要有柱状、半圆状和钟罩状等。从原理上讲,空气垫是利用密闭在塑料薄膜气室内的可压缩气体来实现弹性功能的^[1]。相对于泡沫塑料、蜂窝纸板和瓦楞纸板等缓冲包装材料,空气垫具有良好的弹性、抗冲击性、隔振性、复原性、湿度稳定性及弱吸湿性等性能^[2],并可回收再利用,具有良好的经济和环境

效益,目前广泛应用于产品的缓冲包装,尤其是近年来随着电子商务迅猛发展的快递包裹领域。

国内外学者从理论与实验的角度对空气垫的静态压缩、动态压缩及振动等特性进行了研究^[3-8]。其中,卢立新等发表了不少关于空气垫缓冲材料的论文,测定分析了其基本力学与缓冲性能,建立了空气垫几何压缩模型及其承载力的理论计算公式,同时对跌落冲击时的缓冲机理及性能进行了分析。由于理

收稿日期: 2014-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(31201401); 广东省大学生创新训练计划(201410564172)

作者简介: 吴芳英(1990—),女,浙江人,华南农业大学硕士生,主攻食品加工与包装。

通讯作者: 范小平(1981—),男,湖南人,博士,华南农业大学副教授,主要研究方向为食品加工与包装。

论分析在建模时对实际问题做了较多的简化,所以当压缩量过大时,理论模型会过高估计空气垫的承载能力,得出与试验明显不符的结论。影响空气垫承载与缓冲性能的因素较多,包括塑膜材料的基本性能、充气压力、结构形状与尺寸等^[9-11],要系统研究各因素对材料缓冲性能的影响所需费用高、原料用量大。另一方面,实验过程容易受到环境、人为因素等外界条件的影响而导致结果不够准确。使用计算机模拟仿真来设计包装的具体方案,以及验证方案的可行性将大大缩短设计周期,提高设计质量,减少试验费用,节约材料。基于此,拟采用有限元数值模拟方法对空气垫在静态压缩时的力学性能进行研究,以便更直观、系统地了解空气垫的静态压缩力学行为。

1 物理模型

物流运输包装中通常采用的空气垫由若干单元组合而成,每个独立气室的排气口之间无影响,且相邻2个气室间的相互挤压对空气垫载荷计算带来的影响并不大,可忽略^[12],这里针对单个空气垫的钢板静态压缩性能进行分析,压缩试验模型见图1。同时,为了提高有限元数值模拟效率,对空气垫的压缩模型作如下假设。

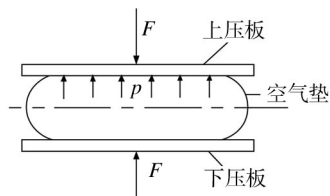


图1 压缩试验模型示意
Fig.1 Schematic diagram of compression test model

- 1) 空气垫的长度相对于其半径足够大,忽略空气垫两端的边缘效应,并将空气垫简化为圆柱形的柱身和半球形的两端^[13]。
- 2) 薄膜厚度相对于空气垫气室厚度可忽略不计,采用壳单元建立空气垫模型,即用二维单元替代三维单元。

空气垫相关参数见表1,据此建立的单个空气垫及其静态压缩的物理模型分别见图2—3(已进行有限元网格化处理)。

2 力学模型

2.1 材料属性及力学模型

在图3中,上下钢板的密度为7830 kg/m³,弹性模

表1 空气垫相关参数
Tab.1 Parameters of air cushion

宽度/mm	膜厚/ μm	充气压强/kPa	气室厚度/mm	气室长度/mm
20	115	60/90/120	10	165
40	115	60/90/110	25	165
60	115	30/40/60	40	165



图2 单个空气垫的物理模型
Fig.2 Physical model of the single air cushion

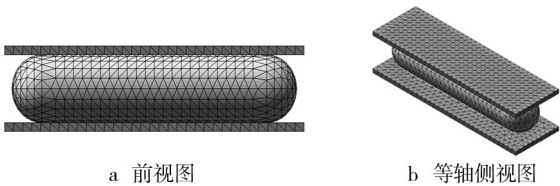


图3 单个空气垫的静态压缩物理模型
Fig.3 Physical model of static compression of the single air cushion

量为210 GPa,泊松比为0.3。空气垫为充气薄膜气柱结构,薄膜具有明显的非线性弹性,此类材料的力学行为一般由超弹性(hyper-elastic)描述^[14-15]。这里,采用有限元分析工具COMSOL Multiphysics对空气垫的静态压缩进行力学仿真模拟。国内外研究者提出了诸多描述聚合物的超弹性本构模型^[16-18],通过对比发现,COMSOL Multiphysics中的超弹性Mooney-Rivlin材料模型适用于所研究的空气垫缓冲材料,其应变能密度函数模型为:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k}(I_3 - 1)^{2k} \tag{1}$$

典型的二项三阶展开式为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \tag{2}$$

式中: I_1, I_2, I_3 为变形张量不变量; N, C_{ij}, d_k 为材料常数,由材料试验确定。对于不可压缩材料, $J=1$,这里 J 取1。

2.2 边界条件

由于进行空气垫压缩试验时,上、下采用光滑的钢板加载,因此忽略摩擦的影响;上压板不会沿水平方向滑动,因而在该面各节点施加2个水平方向的位

移约束,同时在各节点上施加竖直方向的位移载荷;下压板固定不动,因而该板在下表面施加全约束,保证这些节点不发生平动或转动;空气垫中间分割线处各边不会沿水平方向滑动,因而在各节点上施加水平方向的位移约束;为了保证空气垫在被压缩时与上、下压板的接触界面之间不发生穿透,设置该接触类型为无穿透。

3 模拟结果与分析

3.1 不同压缩条件下的应力分布

空气垫在压缩过程中会发生较大变形,且为非线性过程,这里在利用COMSOL Multiphysics进行有限元分析时采用拉格朗日-二次单元类型,并使用SPOOLES求解器求解,可得到空气垫在不同压缩状态下的应力分布,从而确定其静态缓冲性能。其中,模拟得到的规格为60-115(宽度-膜厚)的空气垫,在不

同压缩状态下的应力分布见图4。
图4表明,空气垫的变形是从接触钢板处开始的,上、下位置同时被压缩,这与试验观察到的情况基本吻合;最大应力出现在两端的半球形及被压缩折弯的4条棱处。

3.2 不同充气压力下的应力分布

充气压力是空气垫承载特性的最主要影响因素之一。为研究不同充气压力下空气垫的静态缓冲性能,对规格为“20-115”的空气垫分别在充气压力为60,90,120 kPa,规格为“40-115”的空气垫分别在充气压力为60,90,110 kPa,以及规格为“60-115”的空气垫分别在充气压力为30,40,60 kPa下的压缩力学行为进行数值模拟(压缩速度均为20 mm/min),得到静态压缩力(载荷)-压缩量的变化规律,结果见图5。

结果表明,对于规格为“20-115”的空气垫,随着充气压力的增大,空气垫承载力有明显提高;对于规格为“40-115”和“60-115”的空气垫,充气压力对承载

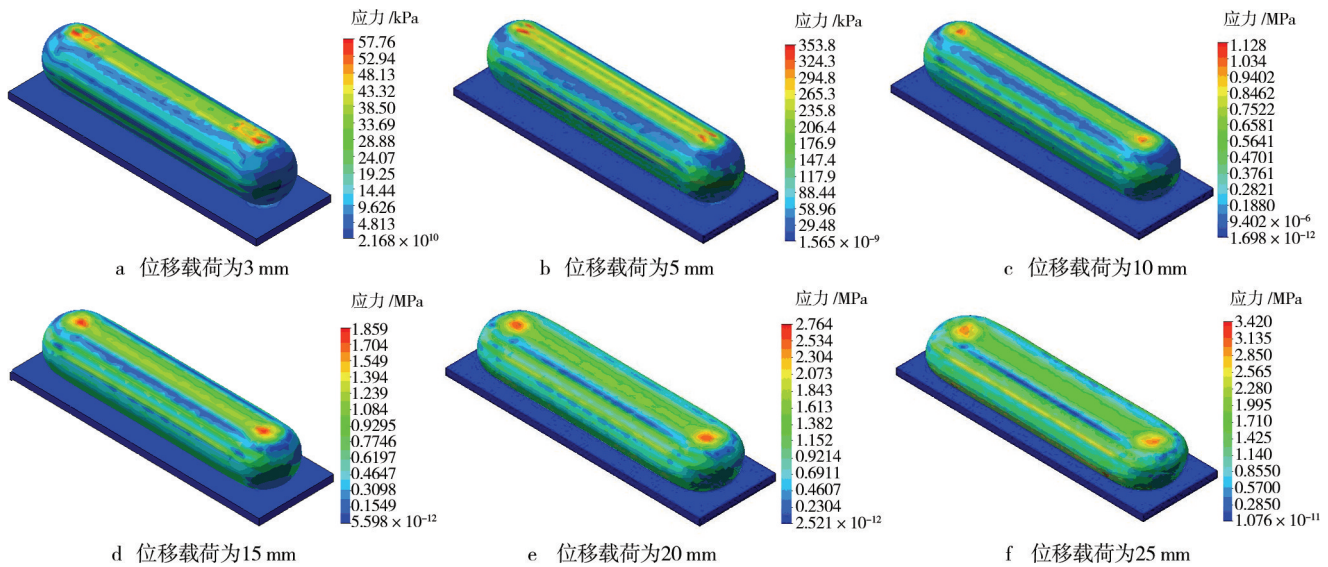


图4 气室厚度为40 mm的空气垫在各压缩状态下的应力分布

Fig.4 Distribution of stress and characteristics of deformation at different stages of compression for air cushion with the thickness of 40 mm

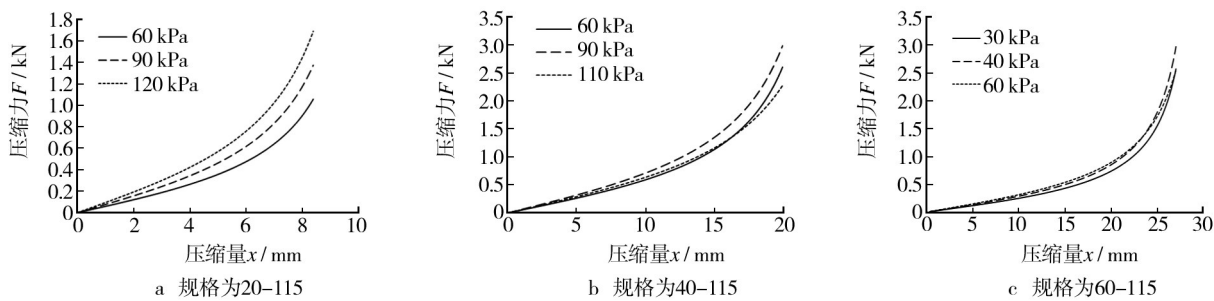


图5 不同规格空气垫在不同充气压力下的压缩力-压缩量关系

Fig.5 The relationship of the compressing force and the compressing amount of the air cushion of different specifications

力影响显著性不大,甚至出现了充气压力大的空气垫比充气压力小的承载力要小,因此对于大规格空气垫的充气压力应恰当选择。

4 模型验证

为验证数值模拟结果的准确性,将规格为“20-115”、“40-115”和“60-115”的空气垫,分别在充气压力为60 kPa、压缩速度为20 mm/min时的数值模拟结果与相同条件下的试验结果^[5]进行对比,结果见图6。图6的结果表明,有限元数值模拟得到的静态压缩力-压缩量行为与试验结果表现出良好的一致性。只是对于大规格空气垫,在压缩量较大时的模拟结果与试验结果误差相对大些(最大误差为16.30%),但二者总体趋势一致,表明建立的有限元模型及采用的数值模拟方法,能较好地预测空气垫的静态缓冲性能。存在误差的主要原因是数值模拟对实际压缩模型进行了必要的简化处理。

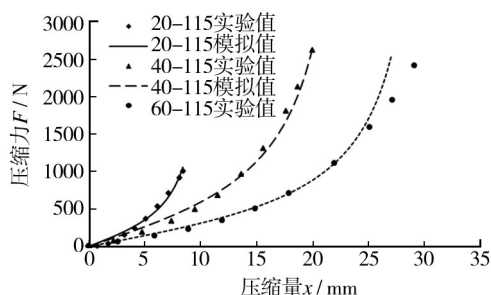


图6 空气垫静态缓冲性能的模拟值与实验值对比

Fig.6 Comparison of simulated values and experimental value of static cushion performance of air cushion

模拟结果还表明,空气垫的承载特性近似正切变化,这与试验结果也是一致的。在压缩量相同的情况下,空气垫结构尺寸越小其压缩载荷越大,即空气垫的结构尺寸越大其承载力也就越强。由此可见,在实际应用中可适当增大空气垫规格以提高其承载力。

5 结语

利用有限元数值模拟方法对空气垫的静态缓冲性能进行了较为系统的研究和分析,并通过对模拟结果与试验结果的比较,验证了模拟结果的准确性和合理性。研究结果表明,在压缩过程中,空气垫的变形是从接触钢板的地方开始的,上下位置同时被压缩;空气垫的承载特性近似正切变化,在压缩量相同的情况下,空气垫结构尺寸越小,其压缩载荷越

大,结构尺寸越大,承载力也就越强;充气压力对小规格空气垫承载力的影响较显著,对大规格的空气垫影响显著性不大。

参考文献:

- [1] 任冬远. 空气垫在受到跌落冲击时的缓冲机理及性能研究[D]. 无锡:江南大学,2008.
REN Dong-yuan. Research on the Cushion Mechanism and Property of Airbag in a Dropping[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [2] 徐人平. 包装新材料与新技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
XU Ren-ping. New Materials and Technologies of Packaging [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [3] ARAI T, KONO M. "SOFTECH" a Brand New Shock Absorbing Material [J]. JPI Journal, 1993, 31(8): 891—897.
- [4] MITSUD T. Characteristics of the AIR CHAIN for Package Design[J]. JPI Journal, 1999, 29(12): 1345—1351.
- [5] 沈剑锋. 空气垫基本力学与缓冲性能试验研究[D]. 无锡:江南大学,2008.
SHEN Jian-feng. The Basic Mechanic and Cushioning Performance Test Analysis of the Plastic Air Cushion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [6] 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.
REN Dong-yuan, LU Li-xin. Research on the Geometry Modeling of Airbag in Static Compression[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 12—14.
- [7] 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 Gang-sheng, et al. Constitutive Relationship and Cushioning Properties of Cylindrical Air Cushion Mats[J]. Packaging Journal, 2010, 2(4): 27—29.
- [8] 郭振斌, 陈安军. 柱状缓冲空气垫动态刚度研究[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 20.
GUO Zhen-bin, CHEN An-jun. On Dynamic Stiffness of Cylindrical Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 20.
- [9] SASAKI H, SAITO K, ABE K. Development of an Air Cushioning Material Based on a Novel Idea[J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12(3): 143—150.
- [10] 刘占胜, 宋海燕, 李光, 等. 洗碗机的缓冲包装[J]. 中国包装, 2004, 24(1): 97—98.
LIU Zhan-sheng, SONG Hai-yan, LI Guang, et al. The Cushion Package of Dishwasher[J]. China Packaging, 2004, 24(1): 97—98.
- [11] 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 Gong, SONG Hai-yan, LIU Zhan-sheng, et al. The Study on Performance of Air Cushion Mats[J]. Packaging and Food Machinery, 2005, 23(2): 18—20.
- [12] 周清艳, 言金. 自落式缓冲气囊仿真研究[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(2): 25—30.
- ZHOU Qing-yan, YAN Jin. Simulation of the Self-dropping Cushion Airbag[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(2): 25—30.
- [13] ESGAR J B, MORGAN W C. Analytical Study of Soft Landings on Gas-filled Bags[J]. NASA, 1960(19980223608).
- [14] 龚科家, 危银涛, 叶进雄. 填充橡胶超弹性本构参数试验与应用[J]. 工程力学, 2009, 26(6): 193—198.
- GONG Ke-jia, WEI Yin-tao, YE Jin-xiong. Constitutive Parametric Experiment of Tire Rubber Hyperelastic Laws with Application[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 193—198.
- [15] MAY-NEWMAN K, LAM C, YIN F C. A Hyperelastic Constitutive Law for Aortic Valve Tissue[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2009, 131(8): 81009.
- [16] SASSO M, PALMIERI G, CHIAPPINI G, et al. Characterization of Hyperelastic Rubber-like Materials by Biaxial and Uniaxial Stretching Tests Based on Optical Methods[J]. Polymer Testing, 2008, 27(8): 995—1004.
- [17] KIM B, LEE S B, LEE J, et al. A Comparison among Neo-Hookean Model, Mooney-Rivlin Model, and Ogden Model for Chloroprene Rubber[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(5): 759—764.
- [18] LAPRADE E J, LONG R, PHAM J T, et al. Large Deformation and Adhesive Contact Studies of Axisymmetric Membranes[J]. Langmuir, 2013, 29(5): 1407—1419.
-
- (上接第10页)
- [35] 黄钧浩. 智能标签的新发展[N]. 印刷杂志, 2014-5(003).
- HUANG Jun-hao. New Development of Intelligent Label[N]. Printing Field, 2014-5(003).
- [36] 吴丹, 陈健初, 王衍彬. 食品智能包装体系[J]. 食品工业, 2004(5): 38—40.
- WU Dan, CHEN Jian-chu, WANG Yan-bing. Food Intelligent Packaging System[J]. The Food Industry, 2004(5): 38—40.
- [37] AHVENAINEN R, EILAMO M, HURME E. Detection of Improper Sealing and Quality Deterioration of Modified-atmosphere-packed Pizza by a Colour Indication[J]. Food Control, 1997, 8(4): 177—184.
- [38] MILLS A. Oxygen Indicators and Intelligent Inks for Packaging Food[J]. Chemical Society Reviews, 2005, 34(12): 1003—1011.
- [39] 都凤军, 孙彬, 孙炳新. 活性与智能包装技术在食品工业中的研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(1): 135—140.
- DU Feng-jun, SUN Bin, SUN Bing-xin. Progresses in Active and Intelligent Food Packaging Technology[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(1): 135—140.
- [40] 蒋海鹏. 食品智能包装体系的研究进展分析[J]. 科技创业家, 2014(4): 214—215.
- JIANG Hai-peng. Research Progress of Food Intelligent Packaging System[J]. Technological Pioneers, 2014(4): 214—215.
- [41] 刘莹, 刘兆熙. 包装产业智能化研究综述[J]. 山东艺术学院学报, 2014(1): 69—73.
- LIU Ying, LIU Zhao-xi. Review of Smart Packaging Industry[J]. Journal of Shandong College of Arts, 2014(1): 69—73.
- [42] 刘东, 王建华. 信息型智能包装技术及其应用[J]. 印网工业, 2014(6): 47—51.
- LIU Dong, WANG Jian-hua. Information Intelligent Packaging Technology and Applications[J]. Screen Printing Industry, 2014(6): 47—51.
- [43] ANONYMOUS. Active, Intelligent and Green[J]. Technology Watch, 2008, 4(1): 1—12.
- [44] 许文凯. 智能包装的新宠—RFID技术[J]. 包装装潢, 2013(2): 57—59.
- XU Wen-kai. A New Favorite of Intelligent Packaging—RFID Technology[J]. Packaging Docraton, 2013(2): 57—59.
- [45] MOUSAVI A, SARHAVI M, LENK A, et al. Tracking and Traceability in the Meat Processing Industry: a Solution[J]. British Food Journal, 2002, 104(1): 7—19.