

# 垂直载荷作用下蜂窝纸板的非线性屈曲分析

曾广胜, 江太君, 刘跃军, 陈 挺

(湖南工业大学 包装新材料与技术重点实验室, 先进包装材料与技术湖南省普通高校重点实验室, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 蜂窝纸板质轻、强度高、抗冲击性能好, 广泛应用于包装物流领域, 但是由于其屈曲机理非常复杂而不能准确预测其屈曲强度。借助于有限元分析软件 ANSYS 对垂直载荷作用下蜂窝纸板的屈曲强度进行了特征值和非线性屈曲模拟分析, 并对其结果进行了对比分析。结果表明, 应用 ANSYS 软件对蜂窝纸板进行屈曲分析是可行的, 分析结果对蜂窝纸板的设计、力学性能研究与测试具有一定的参考价值; 非线性屈曲分析结果的精度比特征值屈曲分析高, 将两者结合使用可以有效地提高分析的效率和精度。

**关键词:** 垂直载荷; 蜂窝纸板; 非线性; 屈曲分析

**中图分类号:** TB485.3; TB487

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2010)01-0024-04

## Nonlinear Buckling Analysis of Honeycomb Paperboard under Vertical Load

Zeng Gangsheng, Jiang Taijun, Liu Yuejun, Chen Ting

(Key Laboratory of New Materials and Technology for Packaging, Key Laboratory of Advanced Materials and Technology for Packaging of Hunan Colleges and Universities, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** Because of the light weight, high strength and better impact resistance, honeycomb paperboard is widely applied in packaging and logistics, but it is difficult to precisely predict the ultimate buckling strength for the complex buckling mechanism. Eigen and nonlinear buckling analysis of honeycomb paperboard under vertical load were proceeded by using the FEM software-ANSYS, and difference and reasons for the results of the two were analyzed. The results show that it is feasible and valuable to simulate the buckling strength of honeycomb paperboard with ANSYS but the nonlinear method is superior to eigenvalue method and the combination of the two can promote the analyzing efficiency and accuracy in theory.

**Key words:** vertical load; honeycomb paperboard; nonlinear; buckling analysis

## 0 引言

蜂窝纸板是一种纸质蜂窝结构的夹层板, 具有质轻、强度高、抗冲击性能好等优点。蜂窝纸板现已广泛应用于人们生活的各个方面, 特别是在包装物流领域, 蜂窝纸板可用来代替实木或金属制作托盘或重型机械的包装箱, 从而极大地促进了绿色包装的发展。

鉴于蜂窝纸板的优良性能, 国内外很多学者都对其进行了深入的研究, 但大部分研究以实验为主<sup>[1-2]</sup>,

为了获得较精确的实验结果, 往往需要进行多次重复实验, 浪费了很多的材料与物力, 且降低了研究者的工作效率。随着计算机数值模拟技术的发展, 应用计算机模拟的方法对蜂窝纸板性能进行研究已成为当今包装材料研究的热点。该方法即在部分实验数据的基础上建立数学模型, 再对所建立的数学模型进行模拟分析<sup>[3-4]</sup>, 进而通过实验验证, 获得所需的实验结论。然而影响蜂窝纸板力学性能的因素很多, 特别是在使用过程中, 因屈曲失稳而发生的破坏种类与机理十分

收稿日期: 2009-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672197), 湖南省自然科学基金杰出青年基金资助项目(07JJ1001), 湖南省自然科学基金资助项目(09JJ6083), 湖南省教育厅基金资助项目(08C278)

作者简介: 曾广胜(1975-), 男, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事包装材料与技术, 高分子材料成型加工方面的研究,

E-mail: guangsheng\_zeng@126.com

复杂<sup>[1-3]</sup>, 不仅涉及到材料的非线性, 还涉及到使用过程中纸板结构的不断变化, 这些因素均给蜂窝纸板的研究和测试带来了较大困难。

本文借助 ANSYS 有限元分析软件, 在普遍采用的特征值屈曲分析基础上, 应用特征值分析与非线性屈曲分析相结合的方法, 研究了蜂窝纸板的屈曲性能, 得出了一种用于预测蜂窝纸板承载能力的新方法, 为蜂窝纸板数值模拟研究和力学性能测试提供了有用的理论参考。

## 1 模型的建立

### 1.1 物理模型的描述与简化

蜂窝纸板的结构如图 1 所示, 它是由面纸、里纸和芯纸组成的夹层结构纸板。

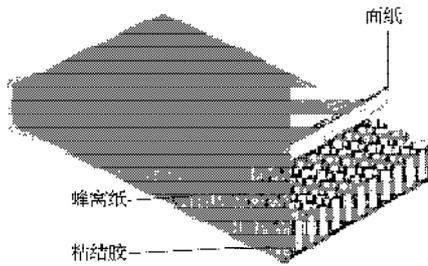


图 1 蜂窝纸板结构示意图

Fig. 1 Sketch of honeycomb paperboard structure

蜂窝纸板的芯纸结构单元通常呈正六边形, 平压状态下是整块纸板的主要承载结构。由于在平压状态下, 主要的承载结构是芯纸, 所以蜂窝纸板的屈曲行为也主要表现为芯纸的屈曲。且因为所有的纸板中的蜂窝结构呈重复性排列, 故为了计算和模拟方便, 可以将研究对象抽象为单个蜂窝结构。同时假设每个蜂窝的芯纸与里纸、面纸间粘接良好, 若取单个蜂窝结构边长为  $a=0.006\text{ m}$ , 高度为  $h=0.005\text{ m}$ , 则根据假设, 单个蜂窝平面面积为:

$$S_{\text{H}} = 3 \times \frac{\sqrt{3}a^2}{2} = 0.000\ 093\ 5\ (\text{m}^2) \quad (1)$$

在本研究中, 设定蜂窝纸板芯纸的厚度为  $t=0.000\ 269\text{ m}$ , 其各项力学性能参数<sup>[5]</sup>如表 1 所示, 其中  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $G$  为剪切模量, 下标表示材料属性分量的方向, 其中,  $x$  方向为蜂窝高度方向,  $y$  方向为蜂窝其中一边所在方向,  $z$  方向为  $x, y$  平面的法向。

表 1 蜂窝纸板原材料的力学性能参数

Table 1 Mechanical parameters of honeycomb paperboard material

弹性模量 /MPa			泊松比			剪切模量 /MPa		
$E_x$	$E_y$	$E_z$	$\nu_{xy}$	$\nu_{xz}$	$\nu_{yz}$	$G_{xy}$	$G_{xz}$	$G_{yz}$
7 600	4 020	38	0.34	0.01	0.01	2 140	20	70

### 1.2 有限元模型的建立

对上述正六边形蜂窝纸板芯纸结构, 采用 4 节点 9 自由度的 shell63 单元进行结构离散, 经合并后, 可得生成节点总数为 2 280。其中, 蜂窝结构的 6 个边均被离散为 20 份, 有限元模型的材料属性设置参照表 1 中的材料参数进行, 所得有限元模型如图 2 所示。

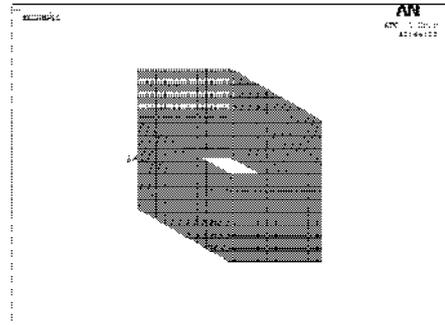


图 2 芯纸蜂窝结构的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of honeycomb structure

### 1.3 分析方法的确定

传统的屈曲分析主要以特征值屈曲分析为主, 即在预应力选项开启条件下, 加载 1 个微小载荷, 求得各阶特征值, 再以预加载荷与各阶特征值做积作为各阶临界载荷。特征值屈曲分析所得临界载荷是理想线弹性结构和材料的理论屈曲强度, 材料与结构的非线性往往使得真实屈曲强度与理论值相差较大。非线性屈曲分析实际上是一种非线性的静态分析, 具体而言, 载荷随着时间逐渐增加, 直至结构不能再承受额外载荷为止, 进而得到结果收敛的屈曲解。

本文以特征值——屈曲分析的结果, 来确定蜂窝结构屈曲临界载荷的大致范围, 并在此基础上, 有针对性地对蜂窝纸板进行非线性屈曲分析。分析过程中, 在蜂窝结构的侧面施加 1 个使结构偏离中性位置的微小偏载, 并开启大变形和自动时间步选项。设置微小偏载的目的是为了使结构产生 1 个侧向位移, 以保证模拟的顺利进行。在分析过程中设置的时间, 实际上是一个虚变量, 主要用来跟踪所加载的载荷量的变化情况, 设置时间步数的目的是为了从众多解中找出 1 个收敛解。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 特征值屈曲分析

分析过程中, 在模型上端与面纸接触的节点上, 施加 1 个大小为  $f_0=1\text{ MN}$  的单位力, 分析结果只取第一阶特征值, 也是结构发生第一次屈曲时的特征值, 图 3 是对蜂窝纸板芯纸的蜂窝结构特征值进行屈曲分析的结果。从图 3 中可看出, 蜂窝结构发生一阶屈曲时的特征值  $F_{\text{actor}}=0.235 \times 10^{-5}$ , 则蜂窝首次发生屈曲时每



- [4] 周廷美, 毛凌. 基于神经网络的蜂窝纸板缓冲特性建模[J]. 计算机工程, 2003, 29(18): 109-111.  
Zhou Tingmei, Mao Ling. Cushion Properties Modeling of Honeycombed Paperboard Based on Artificial Neural Networks[J]. Computer Engineering, 2003, 29(18): 109-111.
- [5] 刘伯. 瓦楞纸板力学性能的有限元分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.  
Liu Bo. The Finite Element Analysis of the Mechanical Properties of Corrugated Paperboard[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.
- [6] 孙亚平, 卢立新, 蔡和平. 纸蜂窝结构平压性能的实验研究[J]. 包装工程, 2003, 24(1): 14-15.  
Sun Yaping, Lu Lixin, Cai Heping. A Study to the Strength to the Paper Honeycomb Core under Axial Compression[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(1): 14-15.
- [7] 郭彦峰, 张景绘, 许文才, 等. 蜂窝纸板及其衬垫缓冲特性研究[J]. 包装工程, 2002, 23(5): 110-112.  
Guo Yanfeng, Zhang Jinghui, Xu Wencai, et al. Research on the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard and Its Cushion[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 110-112.
- [8] 曾克俭, 吕翔. 蜂窝纸板综合性能研究[J]. 株洲工学院学报, 2002, 16(6): 6-8, 22.  
Zeng Kejian, Lv Xiang. A Study of the Comprehensive Features of Honey-Comb Boards[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2002, 16(6): 6-8, 22.

(责任编辑: 廖友媛)

## 增补《包装学报》企业界编委启事

《包装学报》(PACKAGING JOURNAL)于2009年10月创刊,是由湖南省教育厅主管、湖南工业大学主办,国内外公开发行人,具有国际视野的包装行业学术型期刊(季刊),国际刊号为ISSN 1674-7100,国内刊号为CN 43-1499/TB。本刊立足学术研究,以科学发展观为指导,及时报道和刊发包装科技领域的新技术、新成果,促进包装科技进步与交流,繁荣包装文化,搭建包装产学研结合的桥梁,推动我国包装产业可持续发展和包装工业科技进步。主要栏目有:基础研究、设备及过程控制、运输包装、商品包装链循环、销售包装、绿色包装、文化与教育、发展论坛等。《包装学报》具有刊登广告的资质(批准号:090003),欢迎各公司、企业来《包装学报》宣传企业及产品。为了进一步完善《包装学报》编委成员结构,扩大刊物影响,促进产学研交流,提高办刊实力与刊物质量,经我社研究,并报请学校领导批准,现决定增补一批具有较强经济实力或技术力量的包装企业专家担任《包装学报》编委。编委单位享有刊登广告的优先权,并享受广告版面费优惠待遇。有意者请与我社联系。

联系电话: 0731-22622036 廖老师 0731-22622037 张老师

E-mail: baozhuangxuebao@163.com

湖南工业大学期刊社