蜂窝纸芯静态压缩性能有限元分析

梁秀,王玉龙,丁辉

(武汉大学,武汉 430079)

摘要:目的 对蜂窝纸芯静态压缩性能进行分析。方法 基于有限元软件对蜂窝芯层静态压缩性能进行 仿真。结果 得到了蜂窝芯层不同位移下的变形图、应力分布图以及后处理曲线。结论 仿真结果与试 验相吻合,芯层的破坏从上端开始,弹塑性阶段有明显的屈服波,屈服波数目随着边长比增大呈阶梯状 上升。蜂窝芯层应力分布显示随位移增加,载荷的承载主体从蜂窝壁板过渡到蜂窝楞,解释了试验中粘 结处易开胶现象。

关键词: 蜂窝纸芯; 静态压缩试验; 有限元分析 中图分类号: TB484.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2015) 19-0059-05

Finite Element Analysis of Static Compression Performance of Honeycomb Paper-core

LIANG Xiu, WANG Yu-long, DING Hui (Wuhan University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: This study analyzed the static compression performance of honeycomb paper-core. Based on the finite element analysis software, the static compression process of honeycomb core layer was simulated. The deformation, stress distribution and other processing pictures in different displacements were obtained. The simulation results were consistent with the experiment results. Crush started at the top of the core layer. There were yield waves in the elastic-plastic stage and the number of yield waves increased in stair-step shape along with the increase of side length. Stress distribution showed that load bearing transferred from the honeycomb panel to the cellular edge along with the increase of displacement, which can explain the tackless at adhesion due to stress concentration in experiment.

KEY WORDS: honeycomb paper-core; static compression experiment; finite element analysis

蜂窝纸板是将瓦楞原纸用胶粘结方法连接成蜂 窝芯层,并在其两面粘合面纸而成。它具有强度大、 刚性好、缓冲、保温、隔热、隔音等优点,经特殊处理后 还能阻燃、防潮、防水、防霉及防静电,因此越来越多 地得到重视和应用¹¹⁻⁴¹。国内学者对蜂窝纸板进行了 许多相关研究。王梅等¹⁵⁻⁷¹通过蜂窝纸板静态压缩试 验研究了蜂窝纸板缓冲特性;孙德强等¹⁸¹利用数值模 拟方法研究了蜂窝芯材静态压缩载荷及其性能;张文 峰等¹⁰¹建立了蜂窝纸板的力学方程,并对蜂窝纸板的 静态特性进行计算,得出了应力分布特点;王志伟等^[10] 对蜂窝纸板动态压缩过程进行了仿真研究。Chung J 等^[11-13]利用有限元法研究了单元蜂窝结构的静态屈曲 载荷。由于蜂窝纸板面纸厚度相对于蜂窝纸板的厚 度很薄,可以看成是一层薄膜,所以通常将蜂窝纸板 的轴向压缩简化为蜂窝纸芯^[14]。文中利用有限元软件 对蜂窝纸芯静态压缩性能进行研究,可更好地观察到 蜂窝纸芯应力变化与变形情况,从而为蜂窝纸板的研 究提供一种新思路。

收稿日期: 2015-02-03

基金项目: 武汉大学开放实验(201505)

作者简介:梁秀(1992—),女,江苏人,武汉大学硕士生,主攻运输包装和包装结构优化设计。 通讯作者:丁辉(1970—),女,湖北人,本科,武汉大学图书馆馆员,主要研究方向为信息管理。

1 有限元建模

简化模型求解是有限元分析的原则。在静态压 缩试验中,为了更好地观察到蜂窝纸板结构变形和应 力分布,文中将蜂窝结构简化为正六边形,并建立蜂 窝芯层的仿真模型。

1.1 蜂窝芯层的建模

在Ansys软件中采用"自底向上"法建立30 mm厚的蜂窝芯层模型。先定义关键点,然后连接成线,再拉伸生成面,使用镜像、复制命令便可得到芯纸模型。由于蜂窝结构的粘结部分较为复杂,为保证网格划分时能形成规则的网格形状,此处采用布尔操作中的搭接命令,蜂窝芯层模型见图1。



图 1 蜂窝芯层模型 Fig.1 Model of honeycomb core layer

1.2 前处理设置

Ansys分析中前处理设置包括选择单元类型、定 义单元实常数、设置材料属性、网格划分和设置边 界条件。由于蜂窝纸板是典型非线性材料,其变形 具有粘弹塑性特点,属于大应变类型,设置材料属 性时选择双线性等向强化选项,芯纸基本材料参 数:单层壁板厚度为0.2 mm,屈服应力为5.926 MPa, 弹性模量为1.833 GPa, 泊松比为0.3, 剪切模量为 0.705 GPa。

在对模型进行网格划分时,为使划分形成的网 格规则,采用映射网格划分,选择划分的实体是面, 单元尺寸设置为2mm,划分单元见图2。位移约束是 对模型在空间中的自由度进行约束。此处将蜂窝芯 层上端所有节点施加*x*,*y*方向位移约束,并在*z*方向 施加位移耦合,保证上端面各节点垂直位移相同;下 端面各节点施加全约束,施加位移约束后的模型见 图3。







图 3 施加位移约束模型 Fig.3 The model with displacement constraint

2 有限元模拟计算结果及分析

2.1 蜂窝芯层变形和等效应力云图

此处利用Ansys软件模拟蜂窝纸板静态压缩试验 条件。采用对节点施加载荷的方法对有限元模型的 上表面施加不同位移载荷,蜂窝芯层变形和等效应力 云图见图4。

通过以上变形图可以看出,图4a为线弹性变形阶 段,图4b—c为弹塑性阶段,图4d—e为塑性坍塌阶段, 若位移继续增大会进入密实化阶段,可见有限元仿真 的变形过程与试验结果吻合。在线弹性阶段,变形起 始于芯层上端(图4a);在弹塑性阶段,蜂窝壁上出现 明显的屈服波(图4b—c);在塑性坍塌阶段,屈服波中 突起和凹陷量快速增加,规则的屈服波逐渐转成大挠 度变形。随着压缩的进行,大变形从上端逐渐向下传 递,最后达到密实,结果与压缩试验一致(图4d—e); 随着塑性坍塌的进行,蜂窝结构逐渐向芯层中心挤 压,大位移下变形朝向芯层中心(图f)。

在线弹性阶段,蜂窝芯层的等效应力均匀分布在 整个蜂窝壁板上,仅在上端面附近有少量应力集中,





此时由蜂窝壁承担载荷(图4a);在弹塑性阶段,粘结 处的楞和边沿的楞都有应力集中区域,且应力集中区 域的分布与屈服波相对应,而壁板上应力分布较均 匀,此时载荷承载由蜂窝壁板承载逐渐变为蜂窝楞承 载(图4b—c);在塑性坍塌阶段,仅在粘结处的蜂窝楞 上有应力集中区域,壁板上应力较小(图4d—e)。仿 真试验中粘结处楞上的应力集中,所以在压缩试验中 试样的粘结处易开胶。

2.2 有限元分析后处理曲线图

为了更好地观察蜂窝结构受力情况,分析蜂窝芯 层静态压缩性能,现研究位移为13 mm时的等效 Von mises应力图及x,y剪应力随高度分布图,见图5。

由位移为13 mm时的等效Von mises应力随受压 高度变化图可以看出,蜂窝芯层的高度为0~10 mm,应 力稳定,变形较小;高度为10~30 mm时,应力波动幅 度大,出现2个应力峰值和谷底,大变形主要在该区 域。由位移为13 mm时的xy方向上的剪应力在z方向 上的分布图可以看出,高度为0~9 mm时,xy剪应力均 匀减少;高度为9~22 mm时,剪应力在0附近小幅波 动,此时中间部分弯曲变形很大,已塑性坍塌。

2.3 屈曲波数目分析

对物体在某个方向施加载荷,当施加的载荷在 某一临界值处于平衡状态时,如果再施加一个很小 的干扰力,物体就会失去平衡而产生大的变形,导致 屈曲^[15]。屈曲波数目可用来表征蜂窝纸板变形程度, 数目越多变形越大,蜂窝纸板稳定性则越差。根据仿 真结果可以看出蜂窝壁板在压缩过称中会出现明显 的屈曲波。为了能更好地探究蜂窝纸板变形时的屈 曲波数目,文中对4种不同规格的单蜂窝进行仿真压 缩试验,结果见图6。

仿真中蜂窝上下两端受到约束的限制,挠度等于 0,因此蜂窝结构的屈曲波数目不会连续变化,应为m/2



图5 位移13 mm时等效Von mises应力、xy剪应力随高度分布 Fig.5 Vonmises stress and xy shear stress maps at different heights with 13 mm displacement



图6 仿真压缩试验

Fig.6 Compression experiment of simulation

表1 不同蜂窝结构的屈曲波数目

Tab.1 The number of yield waves of different honeycomb structures

编号	蜂窝高度/mm	蜂窝边长/mm	边长比	屈曲波数目
1	20	8.12	2.46	1.5
2	30	8.7	3.45	2
3	30	7.12	4.2	3
4	30	6.12	4.9	3.5

(m为正整数)。不同蜂窝结构的屈曲波数目见表1, 由表1可知,边长比(高度/边长)越大,屈曲波数目越 多。综上所述,蜂窝结构的屈曲波数目随边长比的增 大呈阶梯状上升。

3 结语

 1)文中将蜂窝纸板简化为蜂窝纸芯,利用有限元 法对其静态压缩试验进行仿真,其分析结果与试验结 论基本吻合,且可更好地观察到蜂窝纸板静态压缩性 能,故认为该分析方法是方便可行的。

2)在有限元仿真过程中,对上端节点施加z位移 耦合,实际上限制了芯纸与面纸的脱胶分离,故该模 型可进行一定的改进。

参考文献:

[1] 骆光林. 包装材料学[M]. 第2版. 北京:印刷工业出版社, 2011.

LUO Guang-lin. Packaging Materials[M]. 2nd Edition. Beijing: Printing Industry Press, 2011.

- [2] AMINANDA Y, CASTANIE B, BARRAU J J, et al. Experimental Analysis and Modeling of the Crushing of Honeycomb Cores[J]. Applied Composite Materials, 2005, 12 (3/4) : 213-227.
- [3] WANG Dong-mei. Impact Behavior and Energy Absorption of Paper Honeycomb Sandwich Panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1):110-114.
- [4] 唐勇,黄利强.蜂窝结构对蜂窝纸板平压性能影响的研究 [J].包装工程,2012,33(5):56—58.

TANG Yong, HUANG Li-qiang. Influence of Honeycomb Structure on Flatwise Compressive Performance[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5):56–58.

[5] 王梅.蜂窝纸板缓冲性能的研究及应用[J].包装工程, 2000,21(4):5-12.

WANG Mei. The Research of the Honeycomb Fibreboard Cushioning Performance and the Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(4):5—12.

[6] 王冬梅,廖强华.蜂窝纸板静态压缩力学性能建模研究[J]. 包装工程,2006,27(4):129—132.

WANG Dong-mei, LIAO Qiang-hua. Research on the Mechanical Performance Modeling of Honeycomb Paperboard under Quasistatic Compression[J]. Packaging Engineering, 2006,27(4):129—132.

[7] 辛成龙,郭彦峰.蜂窝纸板静态缓冲特性的实验研究与分析[J].包装工程,2008,29(1):56—58.

XIN Cheng-long, GUO Yan-feng. Experimental Research and Analysis on Static Cushioning Properties of Honeycomb

63

Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1):56–58.

- [8] 孙德强,孙玉瑾,郑波波,等. 六边形蜂窝芯异面类静态压缩力学行为的仿真分析[J]. 包装工程,2014,35(1):18—22.
 SUN De-qiang, SUN Yu-jin, ZHEN Bo-bo, et al. Simulation Analysis the Out-of-plane Quasistatic Compression of Hexagonal Honeycomb Cores[J]. Packaging Engineering, 2014, 35 (1):18—22.
- [9] 张文峰,张安宁. 基于 ANSYS 8.0 的蜂窝纸板力学性能研究[J]. 包装工程,2006,27(2):57—58.
 ZHANG Wen-feng, ZHANG An-ning. Research on Static Properties of Honeycomb Paperboard Based on ANSYS 8.0[J].
 Packaging Engineering,2006,27(2):57—58.
- [10] 王志伟,姚著.蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J]. 机械工程学报,2012,48(12):49—55.
 WANG Zhi-wei, YAO Zhu. Experimental Investigation and FEM Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paper-boards[D]. Journal of Mechanical Engineering, 2012,48(12): 49—55.
- [11] CHUNG J, WAAS A M. Compressive Response of Circular Cell Polycarbonate Honeycombs Under Inplane Biaxial Static

and Dynamic Loading, Part I: Simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(10):1015—1047.

- [12] CHUNG J, WAAS A M. Compressive Response of Circular Cell Polycarbonate Honeycombs Under Inplane Biaxial Static and Dynamic Loading, Part II: Simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(7):729-754.
- [13] TIMOSHENKO S P, GERE J M. Theory of Elastic Stability[M]. New York; Dover Publications, 2009.
- [14] 王冬梅,廖强华. 蜂窝纸板静态压缩力学性能建模研究[J]. 包装工程,2006,27(4):129—132.
 WANG Dong-mei, LIAO Qiang-hua. Research on the Mechanical Performance Modeling of Honeycomb Paperboard under Quasi-static Compression[J]. Packaging Engineering, 2006,27(4):129—132.
- [15] 高士龙. 基于 FEM 的不规则纸芯结构的蜂窝纸压缩性能分析[J]. 包装工程,2008,29(1):53—55.
 GAO Shi-long. Analysis of Compression Performance of the Paper Honeycomb Core With Anomalistic Structure Based on FEM[J]. Packaging Engineering,2008,29(1):53—55.

(上接第26页)

Inverse Substructuring Method for Multi-component Coupled Packaging System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014 (7):58—62.

- [11] 洪翔,王军,卢立新,等. 多点耦合包装系统动态逆子结构 理论试验验证[J]. 包装工程,2013,34(3):1—4.
 HONG Xiang, WANG Jun, LU Li-xin, et al. Experimental Verification of Inverse Substructure Theory for Multipoint Coupled Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3):1—4.
- [12] WANG J, HONG X, QIAN Y, et al. Inverse Sub-structuring Method for Multi-coordinate Coupled Product Transport System[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 27: 385-408.
- [13] 王军,卢立新,王志伟,等. 多级耦合系统界面动态特性预测的间接逆子结构理论[J]. 包装工程,2011,32(21):1—3.
 WANG Jun, LU Li-xin, WANG Zhi-wei, et al. Indirect In-

verse Substructure Method for Dynamic Characteristic Prediction of Multi-level Coupled System Interface[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(21):1-3.

- [14] 孙中振,王军,卢立新. 二级多点刚性耦合包装系统逆子结构理论及验证[EB/OL]. 北京:中国科技论文在线[2015]. http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201503—245. SUN Zhong-zhen, WANG Jun, LU Li-xin. The Dynamic Characteristics of Washing Machine Transport System Based on Inverse Sub-structuring Theory[EB/OL]. Beijing: Sciencepaper Online[2015]. http://www.paper.edu.cn/releasepaper/ content/201503—245.
- [15] 王军. 产品破损评价及其防护包装动力学理论研究[D]. 无 锡:江南大学,2009.
 WANG Jun. Theoretical Study on Product Damage Evaluation and Protective Packaging Dynamics[D]. Wuxi: Jiangnan University,2009.