

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2012.01.004

# 蜂窝纸板力学特性研究进展

徐卓飞<sup>1</sup>, 张海燕<sup>1</sup>, 柏子游<sup>2</sup>, 王冬梅<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 印刷包装工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 深圳职业技术学院 媒体与传播学院, 广东 深圳 518055)

**摘 要:** 蜂窝纸板力学性能的研究主要集中在结构因素、静态力学模型的构建、温湿度和压缩应变率效应、有限元分析等方面。通过对以上各方面的研究现状进行分析发现, 目前还没有能表征蜂窝纸板在实际物流环境中随温湿度变化和应变率变化的力学性能方法, 缺乏合适的蜂窝纸板动态力学性能测试的方法和标准。因此, 构建基于温湿度效应和应变率效应的蜂窝纸板能量吸收模型, 研究适用于研究蜂窝纸板和其他多孔包装材料的动态压缩试验方法, 并将其应用于蜂窝纸板包装优化设计之中是下一步研究的关键。

**关键词:** 蜂窝纸板; 运输包装; 力学特性

**中图分类号:** TB485.1; TB487

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2012)01-0013-06

## Research Progress of Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard

Xu Zhuofei<sup>1</sup>, Zhang Haiyan<sup>1</sup>, Bai Ziyou<sup>2</sup>, Wang Dongmei<sup>2</sup>

(1. School of Printing and Packaging Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Media and Communication School, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen Guangdong 518055, China)

**Abstract :** The research of mechanical properties of honeycomb paperboard is concentrated in structural factors, construction of static mechanical model, effects of temperature and humidity or strain rate effect and finite element analysis. After analyzing the current research status, it shows that at present it is hard to describe the characterization of the mechanical properties of honeycomb in the actual logistics environment with the change of temperature, humidity and strain rate. The appropriate testing methods and standards of dynamic mechanics performance of honeycomb paperboard are needed. The key to next step for the research is building the energy absorption model based on temperature and humidity effects and strain rate effects and designing the dynamic compression test methods of paper honeycomb and other porous materials of packaging. These will be applied in optimizing the design of honeycomb packaging.

**Key words:** honeycomb paperboard; transportation and packing; mechanical properties

## 0 引言

蜂窝纸板在结构破损和塑性形变的过程中会吸

收大量的能量, 且以较低的质量吸收较大的冲击力, 承受一定的载荷, 因此是一种极具发展空间的运输包装材料, 有着替代泡沫塑料的发展趋势, 在运输

收稿日期: 2011-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50905120)

作者简介: 徐卓飞(1985-), 男, 四川都江堰人, 西安理工大学硕士生, 主要研究方向为多孔材料的力学性能, 印刷设备现代设计与系统仿真, E-mail: xzf\_34216606@163.com

通信作者: 王冬梅(1976-), 女, 河北献县人, 深圳职业技术学院副教授, 博士, 主要研究方向为多孔材料的力学性能, 环保型缓冲材料和运输包装, E-mail: sxxawdm@sina.com

包装中占有重要地位<sup>[1-2]</sup>。

蜂窝纸板作为包装运输材料,在多数工作环境中,不会遇到高于 $0.1\text{s}^{-1}$ 的应变速率;但当其处于防压及高性能包装中,或结构发生突然碰撞时,就可能达到 $10^5\text{s}^{-1}$ 应变率的水平。而运输过程中环境的变化会影响包装运输的实际效果<sup>[3]</sup>。因此,在研究材料力学性能时,除了要考虑材料本身的结构参数(如厚度、孔型、相对密度、厚跨比等)外,还需充分研究应变率效应、温湿度效应、黏合剂等多方面因素对其力学性能的影响,并以此为基础构建蜂窝纸板的力学模型,进行包装方案设计等的推广应用<sup>[4-5]</sup>。本文拟对蜂窝纸板的结构特性、力学模型、有限元分析、环境影响效应和实际应用等方面的研究进展进行综述,以便为相关研究提供参考。

## 1 结构参数对力学特性的影响

蜂窝纸板的结构参数与其力学特性有着密切而复杂的联系,国内相关学者针对这一问题展开了广泛的试验研究,但研究成果较分散。

辛成龙等<sup>[6]</sup>研究了材料结构参数中胞壁和纸板厚度等对蜂窝纸板静态缓冲性能的影响。其结果表明:随着芯纸胞壁厚度的增加,蜂窝纸板的缓冲性能有所提高,但厚度对蜂窝纸板缓冲性能的影响不明显。王冬梅<sup>[7]</sup>进一步研究了蜂窝纸板的结构参数对力学特性的影响,通过压缩试验证明了蜂窝胞元厚跨比是影响蜂窝纸板能量吸收能力的关键因素,压缩临界载荷和平台应力随胞元厚跨比的增加而增加,密实化应变随胞壁厚跨比的增加而减少。潘道津等<sup>[8]</sup>考虑到蜂窝纸板的各向异性,通过静态压缩试验与动态压缩试验,研究了蜂窝纸板不同方向上的缓冲性能,并绘制了其不同方向上的应力-应变曲线和最大加速度-静应力曲线。

孟宪文等<sup>[9]</sup>通过对不同厚度的蜂窝纸板的隔振和静态压缩性能进行测试,获得了蜂窝纸板的动态缓冲曲线和振动传递率曲线。张改梅等<sup>[10]</sup>通过静态压缩和动态压缩试验,研究了蜂窝纸板的静态缓冲特性和动态缓冲特性与它的蜂窝芯、蜂窝孔径的关系,试验结果表明:蜂窝纸板的厚度越大,其刚度越差,强度越低;在其塑性坍塌阶段,随着蜂窝纸板厚度的增加,材料屈服点的应力值降低。Wang D. M.<sup>[11]</sup>对蜂窝纸板的动态缓冲特性进行了研究,发现蜂窝纸芯的壁厚和孔径影响了材料特性,能量吸收能力与材料的相对密度呈线性关系;同时发现,纸芯厚度对性能的影响会随着厚度的增加不断降低。

国内学者详尽分析了孔径、厚度、壁厚等多组参

数对蜂窝纸板力学性能的影响;国外有关蜂窝结构的研究很少涉及纸板,而主要对金属蜂窝材料进行了较为完善的理论分析和建模<sup>[12-13]</sup>。考虑到纸张材料的特殊性,结合已有相关研究,笔者认为:蜂窝结构参数对力学特性影响方面的相关结论,未能有效地应用于蜂窝纸板包装方案设计中,因而需要进一步完善,建立起更适用于实际应用的蜂窝纸板力学模型。

## 2 蜂窝纸板力学模型

在对蜂窝纸板结构参数研究的基础上,许多学者进一步建立了理论模型,从而求解出其本构关系,进而预测蜂窝纸板的力学性能。

王梅等<sup>[14]</sup>通过对蜂窝纸板力学性能的研究,从弹塑性角度建立了蜂窝纸板的力学模型和相关的本构关系。孙聚杰等<sup>[15]</sup>通过 Gauss 拟合函数,获得了蜂窝纸板应力应变模型,比较了纸板厚度、材质对平压强度的影响。朱大鹏等<sup>[16]</sup>将蜂窝纸板建模为具有黏弹性的线弹性材料,并在蜂窝纸板的动态特性模型中引入了松弛算子,推导出了蜂窝纸板参数识别的方法和振动传递率公式,并将实验值和利用该公式的模拟值进行了比较。王冬梅等<sup>[4]</sup>分析了蜂窝纸板准静态加载下的压缩特性,认为蜂窝纸板的应力应变曲线可大致分为线弹性区、平台应力区和致密化区,并采用分段函数的方法根据蜂窝纸板压缩过程中的主要变形机制建立了蜂窝纸板的理论模型,并用实验进行了验证。朱大鹏等<sup>[17]</sup>考虑了蜂窝纸板的黏弹性,将蜂窝纸板-质量系统建模为具有黏弹性的线性系统,并将系统的松弛核表达为指数函数和的形式,构造了识别蜂窝纸板-质量系统参数的实验系统,在不同的外载荷条件下分别对系统进行冲击激励,获得相应实验数据和系统参数,利用参数构造了模拟蜂窝纸板-质量系统在冲击激励条件下的自由响应。Lu Lixin 等<sup>[18]</sup>通过剥离强度和环压强度建立蜂窝纸板平压强度的力学模型,通过理论计算和试验对比,将两种力学特性相结合,揭示了蜂窝纸板的压溃机制并且预测了屈服应力。Wang Dongmei 等<sup>[19]</sup>研究了孔壁厚跨比、纸板厚度对蜂窝纸板平压性能的影响,并给出了应力评估方程。

国外学者对蜂窝结构的力学模型研究形成了较为完善的理论体系。如 Gibson<sup>[3]</sup>对多孔固体材料进行深入研究,出版了 *Cellular Solids: Structure and Properties*,该专著成为蜂窝结构和泡沫材料领域的经典著作。研究者不但总结了之前这两大类材料的力学特性和本构关系,而且还给出了相应的力学计

算公式和主要理论推导过程,并结合材料变形机制,分析了泡沫材料的应变率效应。T. Wierzbicki<sup>[20]</sup>利用能量守恒定律和最小能量原理,推导出了正六边形金属蜂窝结构的压溃载荷预测模型,这一研究方法已被广泛应用。

蜂窝纸板力学模型的建立,为科学设计蜂窝纸板包装方案提供了重要的理论支撑,具有一定的可靠性。这些结论在研究中大都得到了证实,为相关领域研究提供了重要的参考依据,其中关于多孔结构的力学模型仍被广泛应用。相较而言,蜂窝纸板静态试验理论模型较为完善,而动态性能的研究相对不够完善。

### 3 蜂窝纸板温湿度及应变率效应

蜂窝纸板的力学特性除了与其本身结构参数有关外,还与外在环境有着密切的联系:1)温度和湿度会在很大程度上影响纸张的性能,进而改变蜂窝纸板的力学性能;2)纸张主要由纤维构成,在不同的应变率下会呈现出不同的力学特性。

如果忽略材料的应变率和温湿度效应,将会给包装运输带来不可预期的损失。实际运输中的环境影响了材料的性能,超出了传统包装设计的考虑范畴。目前,国内学者对蜂窝纸板受环境因素的影响多基于实验和定性研究。

在应变率影响研究方面:王兆军等<sup>[21]</sup>对2种不同材质的蜂窝纸板静态动态试验进行了分析,发现不同材料制成的蜂窝纸板应变率敏感性差异较大,韧性好的材料制成的蜂窝纸板随应变率的提高,屈服强度和屈服区能量吸收增大。张安宁等<sup>[22]</sup>在不同速率下对蜂窝纸板进行了静态压缩试验,认为蜂窝纸板在较大的应变速率下的静态压缩特性曲线与较小应变率下的情况一致,但所选应变率范围变化较小,这与文献<sup>[21]</sup>的结论不同。计宏伟等<sup>[23]</sup>分析了温度、湿度、加载速率等因素对蜂窝纸板侧压强度的影响,发现当相对湿度提高时,蜂窝纸板的侧压强度随之降低;当加载速率增大时,蜂窝纸板的侧压强度随之增大(该研究充分证实了材料的温湿度效应和应变率效应)。邵文泉等<sup>[24]</sup>研制了相应的加载装置,分析了温度、湿度、加载速率等因素对蜂窝纸板剪切强度的影响。结果表明,随着加载速率的增加,温度的升高和湿度的降低,蜂窝纸板剪切强度都随之增加。徐革玲等<sup>[25]</sup>研究了蜂窝纸板的平拉强度,讨论了多种因素对蜂窝纸板平拉强度的影响,认为试件厚度和环境的温度对蜂窝纸板的平拉强度有一定

影响,而加载速率对其影响不大。张志昆<sup>[26]</sup>研究了相对湿度对蜂窝纸板静态压缩性能的影响。研究结果表明,相对湿度对蜂窝纸板静态压缩性能的影响较为明显,随着相对湿度的增加,蜂窝纸板线弹性阶段最大应力值和屈服阶段应力值均有所下降。王军等<sup>[27]</sup>研究了不同厚跨比、不同湿度条件下的蜂窝纸板应力应变曲线,并以此为基础构建了含应变速率、蜂窝结构等信息的能量吸收图。同时发现,随着厚跨比的增大,蜂窝纸板最佳能量吸收点向右上方偏移,其单位体积吸收能量的能力增强;随湿度的增大,蜂窝纸板最佳能量吸收点向左下方偏移,其单位体积吸收能量的能力减弱。H. Kobayashi等<sup>[28]</sup>对聚丙烯和聚酯材料制成的热塑性塑料蜂窝芯进行了研究。对其进行动静态压缩实验,通过对比,发现材料在动态下的能量吸收特性要强于静态。Yu J. L.等<sup>[29]</sup>对蜂窝铝的应变率效应进行了深入分析,选取了不同的应变速率对材料进行共面压缩实验,通过分析冲击速度对材料局部化形变的影响,发现不同应变率下的平台应力表现为动态压缩的平台应力要高于静态压缩。E Yuping等<sup>[30]</sup>利用能量守恒原理推断了蜂窝纸板的平台应力,并结合含水率模型,从理论上推导了不同温湿度下蜂窝纸板的应力计算公式,从理论上完善了环境影响因素。Wang Zhiwei等<sup>[31]</sup>研究了不同温湿度下蜂窝纸板的能量吸收特性,建立了对应的理论模型,以分段函数的形式分别推导了能量吸收计算关系,并通过实验进行了验证,最终构建了不同厚跨比以及温湿度下的蜂窝纸板能量吸收模型。

综上所述,对于蜂窝纸板的应变率效应、温湿度效应研究多基于实验,而理论研究较少。因此,构建蜂窝纸板率相关本构关系和数学模型将是今后研究的方向。

### 4 蜂窝纸板力学性能有限元分析

计算机仿真技术已成为现代工业生产中所采用的重要研究方法,其中有限元分析得到了广泛的应用。如果将有限元仿真分析与试验结合起来,将会简化理论分析,对蜂窝纸板的研究及实际应用有着重要意义。

蜂窝纸板的变形和破坏是一个复杂的过程,基于计算机仿真技术和相关试验,国内包装研究领域对蜂窝纸板的力学特性进行了多方面的研究。如李厚民<sup>[32]</sup>利用有限元程序对蜂窝纸板的压缩进行了模拟,得到了蜂窝纸板在不同压缩量下的应力分布规

律和变形特点,研究说明:蜂窝芯子决定纸板的承载能力;吕原君等<sup>[33]</sup>建立了多夹层蜂窝纸板模型,对夹层数不同的蜂窝纸板进行压溃性能分析,得到夹层数对其抗压性能的影响,并在有限元软件中分析压溃过程,得到压力变化曲线。郭彦峰等<sup>[34]</sup>对蜂窝纸板结构的实体建模、单元属性、网格划分等有限元建模方法进行研究,并基于该有限元模型分析了蜂窝纸板结构的平压性能,有限元分析结果与试验结果吻合良好。李鹏芳等<sup>[35]</sup>对蜂窝纸板的平压特性进行了有限元分析,得到了纸芯和面纸的距离与屈曲变形的关系,得出了黏结处变形比各面上变形量大,中间部位易产生向内变形,两端易产生向外变形等结论。张媛<sup>[36]</sup>利用有限元分析软件(ansys)对蜂窝纸板的压缩特性进行了计算,得到了中面受均布载荷时无衬垫和带有蜂窝纸板衬垫2种情况下蜂窝纸板箱的应力图和变形图,同时结合箱体的应力和变形特点研究了抗压性能。滑广军等<sup>[37]</sup>通过将结构对纸板边压强度的影响从众多影响因素中解耦,建立了蜂窝纸板和典型瓦楞纸板的有限元模型,并进行了屈曲分析,得到蜂窝纸板2个方向的边压强度和典型瓦楞纸板的边压强度。张文峰等<sup>[38]</sup>建立了蜂窝纸板的基本力学方程,利用ansys计算了其静态受均布载荷时的应力分布,结果表明:应力集中主要在面纸和纸芯的胶接处。陈琼等<sup>[39]</sup>分析了正六边形纸芯的边长值对蜂窝纸压溃性能的影响,研究证明了边长的增加会造成平台应力的下降,为对蜂窝纸板的进一步分析提供了帮助。Ying Fuqiang等<sup>[40]</sup>利用软件分析了蜂窝纸板的力学特性,研究认为随着材料孔径的减小及孔壁厚度的增加,蜂窝纸板的应力会有所增强。

纸板类缓冲包装材料及其结构具有各向异性,压缩变形过程具有非线性特征,包括材料非线性、结构非线性和状态非线性。在进行仿真分析时需要将其近似处理为具有各向异性的夹层板结构或构建孔穴模型,进而研究蜂窝纸板结构的实体建模、单元属性、网格划分等有限元建模方法。目前的研究进展及计算机仿真技术在其他工程技术中的应用表明:国内蜂窝纸板仿真研究程度较低。如何将计算机仿真技术与蜂窝纸板的实际运输包装设计联合起来,进而深化并且完善理论模型,需要进一步开展研究。

## 5 展望

蜂窝纸板作为一种缓冲材料,研究其力学特性

对其推广应用有着重要意义。通过以上综述,不难发现当前相关领域研究存在需要解决的问题:蜂窝纸板厚度和规格的选取缺乏理论依据;应变率和温湿度对其力学性能的影响没有系统的考虑到包装设计方案中;目前蜂窝纸板包装设计多基于经验,存在过度包装和包装设计不合理等问题,设计过程缺乏理论依据的支持;蜂窝纸板力学性能的研究多基于静态试验,较少考虑温湿度效应和应变率效应,无法模拟实际物流环境,从而给包装方案优化设计带来困难。

为了保证蜂窝纸板包装设计的正确性和可靠性,建立模拟物流环境且包含温湿度效应和应变率效应的蜂窝纸板力学模型和能量吸收模型,并将其应用于蜂窝纸板包装的优化设计之中将是今后的研究方向,具体从以下方向深入研究:

1) 研究蜂窝纸板缓冲性能表征方法,综合考虑蜂窝纸板的结构因素、应变率效应和温湿度效应,构建蜂窝纸板压缩本构力学模型和能量吸收模型,并编制相关软件,应用于蜂窝纸板缓冲包装优化设计之中。这些将是解决蜂窝纸板优化设计理论依据不足的关键。

2) 现有的包装缓冲材料动态压缩试验方法明显不适合蜂窝纸板、瓦楞纸板等,而模拟实际物流中的各种冲击事件进行包装设计需要对蜂窝纸板、瓦楞纸板进行充分的动态压缩性能试验研究。因此,研究适合蜂窝纸板、瓦楞纸板等多孔材料的动态压缩试验方法将是解决这类材料测试问题的重点。

## 参考文献:

- [1] 王冬梅.六角纸蜂窝夹层板能量吸收研究进展[J].包装学报, 2009, 1(1): 23-25.  
Wang Dongmei. Energy Absorption Figure of Hexagonal Paper Honeycomb Sandwich Structures[J]. Packaging Journal, 2009, 1(1): 23-25.
- [2] 周彩霞,刘建宁.蜂窝纸板的结构、性能及应用[J].包装与食品机械, 2009, 27(4): 61-63.  
Zhou Caixia, Liu Jianning. Constructor Mechanical Performance and Appliance of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(4): 61-63.
- [3] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 48-50.
- [4] 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 Dongmei, Liao Qianghua. Research on the Mechanical Performance Modeling of Honeycomb Paperboard under

- Quasi-Static Compression[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 129-132.
- [5] 鄂玉萍, 王志伟. 纸质缓冲材料能量吸收特性研究进展[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 40-45.
- E Yuping, Wang Zhiwei. Advance in Study on Energy-Absorbing Property of Paper-Based Cushion Packing Materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 40-45.
- [6] 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 Chenglong, Guo Yanfeng. Experimental Research and Analysis on Static Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 56-58.
- [7] 王冬梅. 蜂窝纸板和瓦楞纸板缓冲性能及表征研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007: 51-59.
- Wang Dongmei. Cushioning Property and Characteristic Studies on Honeycomb Paper Boards and Corrugated Paperboards[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007: 51-59.
- [8] 潘道津, 罗鹏, 温芮. 蜂窝纸板缓冲性能方向性的研究[J]. 包装工程, 2005, 26(1): 48-51.
- Pan Daojin, Luo Peng, Wen Rui. The Study of Cushioning Property of Honeycomb Paperboard in Different Directions[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(1): 48-51.
- [9] 孟宪文, 李连进, 武斌斌. 蜂窝纸板的隔振缓冲性能测试[J]. 包装工程, 2006, 27(5): 72-73.
- Meng Xianwen, Li Lianjin, Wu Binbin. Test of Vibration Isolation and Buffering Capability of Honeycomb Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 72-73.
- [10] 张改梅, 胡玉玲. 不同规格的蜂窝纸板缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 77-79.
- Zhang Gaimei, Hu Yuling. Study on the Performance of Honeycomb Paperboard with the Different Size[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 77-79.
- [11] Wang D M. Impact Behavior and Energy Absorption of Paper Honeycomb Sandwich Panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 110-114.
- [12] Radford D D, McShane G J, Deshpande V S, et al. Dynamic Compressive Response of Stainless-Steel Square Honeycombs[J]. Journal of Applied Mechanics, 2007, 74(4): 658-667.
- [13] Paul A, Ramamurty U. Strain Rate Sensitivity of a Closed-Cell Aluminum Foam[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 281(1): 17.
- [14] 王梅, 李克天, 赵荣丽. 蜂窝纸板力学模型的建立和缓冲性能的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(8): 29-31.
- Wang Mei, Li Ketian, Zhao Rongli. Mechanical Model Establishment and Cushioning Performance Study of Honeycomb Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(8): 29-31.
- [15] 孙聚杰, 郝笑梦. 准静态压缩下蜂窝纸板的应力-应变模型[J]. 中国印刷包装与研究, 2009, 6(1): 59-63.
- Sun Jujie, Hao Xiaomeng. Model for Stress-Strain of Honeycomb Paperboard under Quasi-Static Compression[J]. China Printing and Packaging Study, 2009, 6(1): 59-63.
- [16] 朱大鹏, 张志昆. 蜂窝纸板动态特性建模及参数识别[J]. 兰州交通大学学报, 2009, 28(1): 101-103.
- Zhu Dapeng, Zhang Zhikun. Modeling for Dynamic Properties of Honeycomb Paperboard and Parameter Identification[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2009, 28(1): 101-103.
- [17] 朱大鹏, 周世生, 张志昆. 蜂窝纸板动态特性建模与参数识别[J]. 振动与冲击, 2010, 29(4): 213-217.
- Zhu Dapeng, Zhou Shisheng, Zhang Zhikun. Dynamic Properties Modeling and Parameter Identification for a Honeycomb Fibreboard[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(4): 213-217.
- [18] Lu Lixin, Sun Yaping, Wang Zhiwei. Critical Buckling Load of Paper Honeycomb under Out of Plane Pressure[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(3): 141-150.
- [19] Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Out-of-Plane Compressive Properties of Hexagonal Paper Honeycombs[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 115-119.
- [20] Wierzbicki T. Crushing Analysis of Metal Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 1983, 1(2): 157-174.
- [21] 王兆军, 鞠国良. 材质对蜂窝纸板缓冲性能的影响[J]. 包装工程, 2003, 24(6): 50-53.
- Wang Zhaojun, Ju Guoliang. Cushioning Properties of Honeycomb Corrugated Fiberboards Effected by the Properties of Materials[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(6): 50-53.
- [22] 张安宁, 童小燕, 刘晓云, 等. 不同速率下蜂窝纸板静态压缩特性的试验研究[J]. 包装工程, 2004, 25(3): 19-20.
- Zhang Anning, Tong Xiaoyan, Liu Xiaoyun, et al. The Research on Static Compression Properties of Honeycomb Paperboard at Different Compression Rates[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(3): 19-20.
- [23] 计宏伟, 徐革玲, 李俊超, 等. 蜂窝纸板侧压强度实验研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 90-91.
- Ji Hongwei, Xu Geling, Li Junchao, et al. Experimental Research on the Edgewise Compressive Strength of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 90-91.
- [24] 邵文泉, 计宏伟, 李砚明, 等. 蜂窝纸板剪切强度实验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 10-11.
- Shao Wenquan, Ji Hongwei, Li Yanming, et al. Experimental Research on the Shear Strength of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 10-11.

- [25] 徐革玲, 计宏伟, 曹 健, 等. 蜂窝纸板平拉强度实验研究[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 96-97.  
Xu Geling, Ji Hongwei, Cao Jian, et al. Experimental Research on the Flatwise Tensile Strength of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 96-97.
- [26] 张志昆. 相对湿度对蜂窝纸板静态压缩特性影响的试验研究[J]. 包装工程, 2008, 29(9): 12-13.  
Zhang Zhikun. Experiment Research on the Effects of Relative Humidity on the Static Compression Properties of Paper Honeycomb Panel[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(9): 12-13.
- [27] 王 军, 卢立新, 王 军. 基于湿度影响的蜂窝纸板静态压缩能量吸收图[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 5-7.  
Wang Jun, Lu Lixin, Wang Jun. Energy-Absorption Diagrams of Honeycomb Paperboards under Static Compression in Different Relative Humidity[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 5-7.
- [28] Kobayashi H, Daimaruya M, Kobayashi T. Dynamic and Static Compression Tests for Paper Honeycomb Cores and Absorbed Energy[J]. Muroran Institute of Technology, 1998, 41(3): 338-344.
- [29] Yu J L, Li J R, Hu S S. Strain-Rate Effect and Micro-Structural Optimization of Cellular Metal[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38(1): 160-170.
- [30] E Yuping, Wang Zhiwei. Plateau Stress of Paper Honeycomb as Response to Various Relative Humidities[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23: 203-216.
- [31] Wang Zhiwei, E Yuping. Mathematical Modelling of Energy Absorption Property for Paper Honeycomb in Various Ambient Humidities[J]. Materials and Design, 2010, 31(9): 4321-4328.
- [32] 李厚民. 蜂窝纸板受压时的有限元分析[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 34-36.  
Li Houmin. FEM Analysis of the Compression Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 34-36.
- [33] 吕原君, 陈 琼. 多夹层蜂窝纸板压溃性能分析[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(2): 61-64.  
Lü Yuanjun, Chen Qiong. Research on Crushing Performance of Combined Honeycomb Paperboard[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(2): 61-64.
- [34] 郭彦峰, 辛成龙, 许文才, 等. 蜂窝纸板结构平压性能有限元分析[J]. 包装工程, 2009, 30(1): 34-36.  
Guo Yanfeng, Xin Chenglong, Xu Wencai, et al. Finite Element Analysis on Flat Crush Property of Honeycomb Paperboard Structure[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(1): 34-36.
- [35] 李鹏芳, 张 珏, 卢朝晖, 等. 蜂窝纸板静态压缩试验研究及其模拟分析[J]. 包装工程, 2010, 31(1): 34-37.  
Li Pengfang, Zhang Jue, Lu Zhaohui, et al. Static Compression Test and Simulation Analysis of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(1): 34-37.
- [36] 张 媛. 蜂窝纸板箱的静态压缩特性研究[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 54-56.  
Zhang Yuan. Research on Static Compression Properties of Honeycomb Paperboard Box[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 54-56.
- [37] 滑广军, 谢 勇. 蜂窝纸板与瓦楞纸板边压强度有限元分析[J]. 包装工程, 2009, 30(5): 1-2.  
Hua Guangjun, Xie Yong. Finite Element Analysis of Honeycomb and Corrugated Fiberboard Side Compression Strength[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5): 1-2.
- [38] 张文峰, 张安宁. 基于ANSYS8.0的蜂窝纸板力学性能研究[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 57-58.  
Zhang Wenfeng, Zhang Anning. Research on Static Properties of Honeycomb Paperboard Based on ANSYS 8.0[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 57-58.
- [39] 陈 琼, 吕原君. 基于FEM的蜂窝纸压溃分析[J]. 工程设计学报, 2008, 15(3): 233-236.  
Chen Qiong, Lü Yuanjun. Analysis of Buckling about Paper Honeycomb Core by MARC[J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(3): 233-236.
- [40] Ying Fuqiang, Zhou Linhang, Wang Li. Analysis of the Structural Performance and Stretching Process of the Honeycomb Paper Core[J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2008, 7(1): 187-192.

(责任编辑: 蔡燕飞)