

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2014.03.005

# 蜂窝纸板和蜂窝纸托盘的性能研究进展

曾克俭, 刘珊

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 简述了蜂窝纸板和蜂窝纸托盘的性能研究现状。通过对已有研究的分析, 发现目前对于蜂窝纸板的性能研究主要集中在纸板的性能指标、静态和动态特性、理论建模和有限元建模分析等方面, 而对于蜂窝纸托盘的研究主要集中在力学性能和结构优化等方面。但已有研究缺乏从现实环境考虑的一些动力学方面影响因素的测试和分析, 为提高蜂窝纸板和蜂窝纸托盘的实际应用, 这将是以后对蜂窝纸板和蜂窝纸托盘研究的重点和难点。

**关键词:** 蜂窝纸板; 蜂窝纸托盘; 力学性能; 有限元分析

中图分类号: TB484.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2014)03-0025-06

## Research Progress in Honeycomb Paperboard and Honeycomb Paper Tray

Zeng Kejian, Liu Shan

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** The research status of honeycomb cardboard and honeycomb paper tray was introduced. By analyzing existing researches, it was found the performance study of honeycomb cardboard was mainly focused in the performance index, static and dynamic characteristics, theoretical modeling and finite element modeling analysis, etc., while the research on the honeycomb paper tray mainly concentrated in mechanical properties and structure optimization. But there was a lack of tests and analyses of some dynamics influencing factors from realistic environment, in order to improve the honeycomb cardboard and honeycomb paper tray application, which would be the key and difficult points for future research.

**Key words:** the honeycomb cardboard; honeycomb paper tray; mechanical properties; the finite element analysis

## 0 引言

蜂窝纸板是由两层面纸和一层芯纸复合加工而成的全纸质包装材料, 具有强度高、质量轻、缓冲性能好、环保等特点, 是一种夹层结构的新型环保节能材料<sup>[1-3]</sup>。由于蜂窝纸板具有良好的机械性能, 因而被作为代木材料大量使用, 最初主要被用作建筑和家具材料, 随后扩展到物流领域, 用于制作托盘和托箱等。温时宝等<sup>[4]</sup>对纸质托盘的发展和研究

现状进行了详细分析, 对现有纸托盘结构做了比较详细的说明, 并依据铺板材料结构的不同, 将纸质托盘分为瓦楞托盘、蜂窝托盘、瓦楞蜂窝复合托盘和贝力纸质托盘, 从而使人们从最基本的外在材料和结构上比较全面地了解了纸质托盘。

随着我国经济的不断发展, 蜂窝纸质托盘的使用量迅速增长, 在现今强调绿色环保、降低成本、合理设计的环境下, 对托盘质量和成本提出了更高的要求, 蜂窝纸托盘有望代替木托盘的使用, 但是其

收稿日期: 2014-02-20

作者简介: 曾克俭(1964-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 主要从事产品包装结构设计与检测方面的研究,

E-mail: zengkejian@126.com

研发需要理论依据和指导,尤其是对纸托盘的力学性能研究及其结构的合理设计尤为重要<sup>[5]</sup>。因此,本文拟对蜂窝纸板和蜂窝纸质托盘的研究现状进行总结,并对其后续发展进行展望,以期对蜂窝纸制品的应用提供一定的理论参考。

## 1 蜂窝纸板的研究现状

蜂窝纸板有不同的规格,且即使为同种厚度的蜂窝纸板,因其面纸的定量不同,其性能也会有所差异。蜂窝纸板厚度的变化主要是根据增加或减少其纸芯的厚度来实现的,且纸芯的形状对蜂窝纸板的性能影响很大,常通过孔径比来描述蜂窝芯形状的变化。一般来说,当蜂窝芯形状接近正六边形时,蜂窝纸板的综合性能最优,但是在现实生产条件下,很难生产出规整的正六边形蜂窝芯的蜂窝纸板。

已有对于蜂窝纸板性能的研究,主要集中在性能指标、静态和动态特性试验、蜂窝纸板性能的理论建模和计算机的有限元分析等方面。

### 1) 性能指标研究

影响蜂窝纸板性能的指标主要包括原纸的定量、纤维的排列方向、含水率、环压强度、平压强度和孔径比等。

刘晓红等<sup>[6]</sup>对一些蜂窝纸板的基本性能指标进行了深入探讨,得出了如下结论:用于制作蜂窝托盘的蜂窝纸板面纸的定量越大,其抗压、抗磨损及防潮能力越好,但是生产成本相对较大;生产蜂窝纸板的过程中,芯纸的纤维排列方向与面纸垂直时,生产出来的蜂窝纸板的抗压强度较大;含水率对纸质材料的各项性能都存在较大的影响,所以蜂窝纸板的含水率应控制在合理的范围内,且当蜂窝纸芯的含水率为3%时,纸板的抗压强度最大;原纸的环压强度对蜂窝制品的耐压性能及承载能力有着较大的影响,而纸板的平压强度随着纸芯的高度增加呈缓慢下降的变化趋势。当蜂窝纸板的孔径比为1时,蜂窝纸芯的形状接近于正六边形蜂窝结构,在这种条件下,蜂窝纸板的各项性能最佳。

此外,王冬梅等<sup>[7]</sup>和鄂玉萍等<sup>[8]</sup>也对包括温湿度效应、应变率效应、黏合剂等影响蜂窝纸板力学性能的因素进行了类似研究。

结合以上已有研究,笔者认为:蜂窝纸板的各项指标对其性能影响的相关结论,尚未被充分利用到蜂窝纸板的结构设计中,所以需要进一步完善,以便使各研究能充分发挥其指导作用,让这些结论能够真正用来指导生产实际。

### 2) 静态和动态特性试验研究

为了能够获得较为准确的材料性能指标,较多的科研工作者利用静态和动态试验对蜂窝纸板的材料特性进行了广泛的研究<sup>[9-15]</sup>。

王兆军等<sup>[9]</sup>通过静态试验和动态冲击试验研究,发现不同材质蜂窝纸板的缓冲性能存在差异,且其对应变率的反应也有很大的差异。在一定的应变率范围内,随着应变率的上升,轻型蜂窝板(面纸为250 g/m<sup>2</sup>牛皮纸,芯纸为80 g/m<sup>2</sup>精致牛皮纸)的屈服强度和屈服区的能量吸收值都增大;而普通型的蜂窝纸板(面纸为140 g/m<sup>2</sup>瓦楞纸,芯纸为100 g/m<sup>2</sup>瓦楞纸),其屈服强度和屈服区的能量吸收值先升高后降低。从而得出:在应变率增大的情况下,韧性好的材料制作的蜂窝纸板,其屈服强度和屈服区能量的吸收值都增大。这一结论对于提高应变率下的缓冲设计安全性很有帮助。

张改梅等<sup>[10]</sup>通过静态压缩试验和动态压缩试验,研究了蜂窝纸板静态和动态的缓冲特性与其蜂窝芯柱和孔径的关系。分析了静态压缩的线弹性阶段、塑性坍塌阶段和密实化阶段3个阶段:在线弹性阶段,纸板厚度越大,其刚性越差,强度越小,因而容易变形,而纸板孔径的大小对其刚度的影响不是很明显;在塑性坍塌阶段,纸板厚度越大,其缓冲性能越好,而纸板孔径越大,在受到外力作用时越容易达到屈服阶段;在密实化阶段,蜂窝纸板的厚度越小或者孔径越小,越容易形成厚的致密层,试样较早变硬,使压溃应力较大。动态试验结果表明,蜂窝纸板的最大加速度-静应力曲线和缓冲系数-静应力曲线都是开口向上且只有一个极值点的曲线。跌落高度一定时,随着孔径的增大,最大加速度增大,曲线极值点向左上方移动。

H. Kobayashi等<sup>[11]</sup>也同样通过静态和动态压缩试验对蜂窝纸板进行了研究。通过试验得出了蜂窝纸板在动态条件下要比静态条件下吸收能量多的结论,并得出了蜂窝纸板最大应力、吸收能量及平均应力与压缩速率之间的关系。

对蜂窝纸板静态和动态特性的研究,为蜂窝纸板包装设计方案提供了重要的理论指导,这些理论在实际运用中具有一定的可靠性。相对而言,蜂窝纸板静态性能的理论研究较为完善。

### 3) 理论建模

为了能有效地利用材料的性能指导选材,科研工作者们利用各关系对蜂窝纸板的材料特性进行了理论建模分析与研究。

Wang Zhiwei<sup>[16]</sup>和E Yuping等<sup>[17]</sup>对蜂窝纸板压缩

过程中的能量吸收和外部环境湿度之间的关系进行了数学建模分析,研究了蜂窝纸板压缩过程中蜂窝的各阶段变化情况,并将其能量吸收表示为蜂窝单元孔厚度-高度比的函数,该数学模型的建立对于蜂窝纸材的选用和优化有着重要作用。

郭彦峰等<sup>[18]</sup>通过研究,得出了蜂窝纸板最大加速度-静应力曲线的特征系数和经验公式。当蜂窝纸板的厚度和跌落高度一定时,峰值加速度 $G_m$ 只与静应力 $\sigma_s$ 有关,所以可以得出蜂窝纸板最大加速度与静应力曲线的经验公式,为 $G_m=a_0+a_1\sigma_s+a_2\sigma_s^2+a_3\sigma_s^3$ ,其中 $a_0, a_1, a_2, a_3$ 为特征系数。根据该公式,并采用最小二乘法拟合,可为蜂窝纸板的缓冲防震设计提供基本数据。

骆光林等<sup>[19]</sup>从流变学及力学性能的角度出发,分析了蜂窝纸板的缓冲机理,指出了蜂窝纸板中气体的重要作用和对性能的影响。Yoshiaki Yasui<sup>[20]</sup>研究了多层蜂窝板拉伸对动态冲击破坏性能的影响,确定了蜂窝结构的冲击特性。

这些理论模型的建立与分析,为更好地利用蜂窝纸板的性能提供了重要指导,但是这些理论上的研究与实际的运用之间尚存在一些差距,所以需要在在使用过程中进一步修正和完善这些理论。

#### 4) 计算机的有限元分析

计算机仿真技术已成为现代重要的研究方法之一,其中,有限元分析的应用也越来越广泛。研究过程中将试验与计算机仿真相结合,可以简化理论分析,对蜂窝纸板的性能研究有着重要意义。

王志伟等<sup>[21]</sup>利用试验与有限元分析,比较全面地研究了不同湿度下、不同厚跨比的蜂窝纸板对冲击的承载能力和能量吸收能力。发现当湿度增大时,单层瓦楞原纸和双层蜂窝胞壁的弹性模量和屈服强度都呈指数下降,且双层蜂窝胞壁的弹性模量和屈服强度要比单层的高。有限元分析和试验结果均能体现蜂窝纸板冲击压缩时的初始峰值应力、平台应力和吸收能量的性能,得出在不同湿度下、不同厚跨比的蜂窝纸板冲击能量吸收曲线,为蜂窝纸板缓冲包装设计提供了重要的参考依据。

朱大鹏等<sup>[22]</sup>从蜂窝纸板的粘弹特性考虑,构造了识别蜂窝纸板-质量系数参数的实验系统,并用不同的载荷条件对系统进行冲击激励,可根据实验的数据识别出不同载荷下的系统参数。利用这些数据能够比较精确地模拟系统的自由响应,对蜂窝纸板的合理利用很有意义。

相对其他领域的计算机仿真技术,国内蜂窝纸板的仿真研究程度还不高,如何将计算机仿真与蜂

窝纸板的包装设计有效结合起来,深化并完善已有理论模型,尚需进一步研究。

分析以上已有研究可知,科研工作者们在基础理论上对蜂窝纸板的性能分析研究已较为充分,但是与实际的联系较少。例如,对于动态的震动和跌落,在实际运输过程中,蜂窝纸板受到外力和外在环境的影响会使其性能发生怎样的变化;还有一些关于蜂窝纸板结构优化的方式,运用到实际中究竟能达到什么效果;蜂窝纸板作为一种能够代替泡沫塑料的缓冲材料,在其使用过程中如何保证没有使用过量,其缓冲系数如何确定等。这些实际运用的研究都较少,这可能是以后逐步完善蜂窝纸板运用和研究的重点。

## 2 蜂窝纸托盘的研究现状

随着物流的快速发展,托盘作为衔接运输、仓储、包装、装卸、搬运等物流各环节的关键要素,与叉车匹配,为物流效率化、低成本化开辟了宽广的道路,成为企业降低成本、提高客户服务水平的重要器具。对中国这样一个森林资源短缺的国家来说,木托盘的材料来源是个大问题。一方面,由于国家环保法规要求越来越严格,全社会的环保意识不断增强,防止水土流失、减少土地沙漠化、抑制沙尘暴等呼声日益高涨,国家明令禁止滥砍滥伐森林资源;另一方面,中国出口的木托盘曾发现有天牛虫,从1998年起,美国、加拿大和欧盟等国家相继对中国出口货物的木质包装材料,要求采取熏蒸或高温消毒处理,否则拒绝入境<sup>[5]</sup>。这就给纸质托盘的发展提供了机会,蜂窝纸板作为一种新型的绿色环保产品,其原料丰富,成本低,质量轻,弹性好,缓冲性能优良,可以回收利用,符合国际包装发展的趋势。

相对于国内而言,国外对托盘的力学特性的研究较早。例如 Guntram Scheithauer等<sup>[23]</sup>利用一种标准正交方法研究了托盘承载问题;再如 Walter B. Wallin<sup>[24]</sup>对托盘集中载荷和均布载荷条件下的弯曲性能进行了研究。但是已有关于托盘的研究大多数集中在提高其载货率方面,如 R. Alvarez-Valdes等<sup>[25]</sup>提出的分支裁剪算法, Gustavo H. A. Martins等<sup>[26]</sup>提出的新启发式拓扑发现算法等,都着重强调了如何优化托盘的载货率。

国内对于托盘的力学特性的研究相对较晚,但也取得了较多的研究成果<sup>[27-29]</sup>,这些成果是从其他托盘的基础性能研究开始,从托盘整体来说,对蜂

窝纸托盘的研究具有较多的参考价值。已有对于蜂窝纸托盘的研究,主要表现在力学性能试验、结构优化的试验和理论分析等方面。

### 1) 力学性能研究

为了研究蜂窝纸托盘的特性,科研工作者们对纸质托盘的力学性能进行了广泛的研究,主要包括均布荷载下的承载力分析、抗弯力学分析、抗压试验分析等。

徐炜峰<sup>[30]</sup>按照 GB/T 1995—1996《联运通用平托盘性能要求》,对蜂窝纸托盘进行了抗弯试验,发现其抗弯合格率仅为 16.2%,并得出如下结论:当托盘铺板面纸克重增加,其抗弯强度也随之增加,说明托盘的抗弯强度与铺板表面材料有着较大的关系;表面材料的弹性模量越大,托盘的抗弯强度越大;铺板表面越厚,托盘的抗弯强度也越大。但是单靠这些简单的变化无法从根本上解决蜂窝托盘抗弯性能较差的问题。

刘映平<sup>[31]</sup>对纸质托盘进行了几种受压部位的抗压强度试验,得出纸质托盘整体受压的抗压强度、两支角间跨度方向的强度、抗弯曲能力必须达到相应的要求才能满足使用要求的结论。

张丽<sup>[32]</sup>通过对蜂窝纸托盘的振动传递率的研究得知:托盘在振动时都先发生一次共振,接着发生第二次共振,同样的托盘在不同的情况下(一种是单个托盘,另外的是两个托盘堆码在固定较松和较紧的情形下)发生第一次共振的频率几乎是一样的;且固定较松时其振动传递率较大,固定较紧时其振动传递率较小。因此在运输包装中使用蜂窝纸托盘时,将货物与托盘固定较紧,可以降低托盘系统的振动传递率,从而更好地保护货物不被损坏。

### 2) 结构优化

为了获得结构合理、力学性能优异、生产成本低而环保的蜂窝纸托盘,需要不断对已生产的托盘结构进行改进。因此,科研工作者们在研究蜂窝纸托盘的力学性能的基础上,利用试验和各种软件结合,对已有托盘结构进行性能优化设计。

李厚民等<sup>[33]</sup>从蜂窝纸质托盘的基本结构出发,考虑到使用过程中托盘的支脚易与盘体发生脱落,因此对托盘结构进行优化。通过对托盘支脚进行加固的几种方案试验,最后得出了选用牛皮纸加固托盘支脚的为最佳方案。但是其对试样的考虑不够周全,所以存在较大的偏差;而且试验为静载试验,未考虑动态载荷和冲击载荷等因素的影响。

此外,朱永辉等<sup>[34]</sup>利用 ANSYS 有限元分析软件分析了柱脚对蜂窝纸质托盘承重的影响情况,得出

了在满足稳定性的基础上,适当地改变边距可以增加蜂窝纸质托盘的承载能力的结论。李杨等<sup>[35]</sup>利用 SolidWorks 的优化功能对纸质托盘结构进行了优化设计,得出了在满足安全系数条件下托盘上连板的最优厚度值。

目前,对于蜂窝纸托盘性能的研究还较少,由于纸质材料的特性,纸托盘的性能还存在较大的局限性。已有研究表明,蜂窝纸托盘在动态承载性能、抗弯性能、整体结构的完整性(特别是在使用过程中柱脚比较容易脱落)等方面,其性能都比不上其他材质的托盘。鉴于纸材料的特殊性,可以考虑加入一些别的材质来改善纸质托盘的结构与性能。例如,可用加强筋来提高蜂窝纸托盘的抗弯能力,这可能是解决现阶段蜂窝纸托盘性能局限性的有效方法之一。

## 3 展望

蜂窝纸板作为一种性能优越的代木首选环保材料,它不仅能节约木材,更能打破美国、加拿大、欧盟等对我国贸易所设置的障碍。蜂窝纸板作为代木材料也符合价格规律,木材价格总趋势上升不会变,而蜂窝纸板结构科学合理,成本较低,在以后的材料选择和应用过程中将会被越来越多的人重视,其应用范围将会越来越广,所衍生的蜂窝纸制品也将更广泛地替代现今一些不环保产品。

托盘作为重要的现代物流装备,对现代物流的发展有着极其重要的作用。从市场需求角度看,我国对托盘的需求量巨大;随着全球经济的快速发展,人类对可持续发展、绿色环保概念的意识逐渐加强,全球经济与国际贸易领域的绿色问题尤其突出,研究并开发绿色材料的代木纸质托盘,加速我国托盘联运体系的建立进程,是现代物流技术发展的必然趋势和要求。蜂窝纸托盘的深入研究对蜂窝纸基托盘的推广有着极其重要的作用,为后期蜂窝纸托盘的应用奠定了基础。

目前,制约蜂窝纸板发展的两个主要难题:一是技术,二是市场。技术问题显而易见,不仅是生产设备方面,还有对于蜂窝纸板本身性能的改进等。虽然蜂窝纸板潜在的市场很大,但是其生产技术水平还较低,好的产品还没有大量生产出来,且市场占有率还比较低,这些问题严重阻碍了我国蜂窝纸板行业的发展。为解决这些问题,首先,国家和政府部门要重视起来,给予该材料的研发适当扶持;其次,应加强人才的培养和技术交流,将问题从根本

上解决,相信未来的蜂窝纸行业会充满生机。

#### 参考文献:

- [1] 张宇,王志伟.蜂窝纸板动态缓冲特性的试验研究[J].包装学报,2012,4(1):9-12.  
Zhang Yu, Wang Zhiwei. Experimental Research on Dynamic Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Journal, 2012, 4 (1): 9-12.
- [2] 毕中臣,曹小龙,谢勇.蜂窝纸板缓冲机理探讨[J].湖南工业大学学报,2011,25(6):38-41.  
Bi Zhongchen, Cao Xiaolong, Xie Yong. Research on the Cushioning Mechanism of Honeycomb Paperboard[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(6): 38-41.
- [3] 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.
- [4] 温时宝,薛蕾,刘翠.纸板托盘的发展及其结构概述[J].包装与食品机械,2011,29(2):56-59.  
Wen Shibao, Xue Lei, Liu Cui. Overview of Development and Structure of Cardboard Pallet[J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(2): 56-59.
- [5] 吴清一.中国托盘手册[M].北京:中国物资出版社,2010:43-48.  
Wu Qingyi. China Pallet Handbook[M]. Beijing: China Material Press, 2010: 43-48.
- [6] 刘晓红,王文明.蜂窝板托盘的技术条件及生产工艺[J].木材工业,2005,19(6):21-24.  
Liu Xiaohong, Wang Wenming. Application and Production Techniques of Honeycomb Panels Used in Wooden Pallets[J]. China Wood Industry, 2005, 19(6): 21-24.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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):50-52.  
Wang Zhaojun, Ju Guoliang. Cushioning Properties of Honeycomb Corrugated Fiberboards Effected by the Properties of Materials[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(6): 50-52.
- [10] 张改梅,胡玉玲.不同规格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] Kobayashi H, Dainaruya M, Kobayashi T. Dynamic and Static Compression Tests for Paper Honeycomb Cores and Absorbed Energy[J]. JSME International Journal. Series A, Solid Mechanics and Material Engineering, 1998, 41(3): 338-344.
- [12] 王冬梅.蜂窝纸板压缩破坏机理研究[J].包装工程,2006,27(1):37-39.  
Wang Dongmei. Compression Breakage Properties Research on the Honeycomb Fibreboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 37-39.
- [13] Guo Yanfeng, Zhang Jinghui. Shock Absorbing Characteristics and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Shock and Vibration, 2004, 11(5): 521-531.
- [14] Wang Dongmei, Wang Zhiwei. Experimental Investigation into the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(6): 309-316.
- [15] Wang Dongmei. Impact Behavior and Energy Absorption of Paper Honeycomb Sandwich Panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 110-114.
- [16] Wang Zhiwei. Mathematical Modeling of Energy Absorption Property for Paper Honeycomb in Various Ambient Humidities[J]. Materials and Design, 2010, 31(9): 4321-4328.
- [17] E Yuping, Wang Zhiwei. Plateau Stress of Paper Honeycomb as Response to Various Relative Humidities [J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(4): 203-216.
- [18] 郭彦峰,张景绘,付云岗,等.蜂窝纸板动态缓冲特性曲线测试分析[J].包装工程,2002,23(6):6-8.  
Guo Yanfeng, Zhang Jinghui, Fu Yungang, et al. Test and Analysis of Dynamic Cushioning Property of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(6): 6-8.
- [19] 骆光林,朱大鹏.蜂窝纸板缓冲机理[J].包装工程,2002,23(5):118-120.  
Luo Guanglin, Zhu Dapeng. The Cushion Mechanism of the Honeycomb Fibreboard[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 118-120.
- [20] Yasui Y. Dynamic Axial Crushing of Multi-Layer Honeycomb Panels and Impact Tensile Behavior of the Component Members[J]. International Journal of Impact Engineering,

- 2000, 24(6): 659-671.
- [21] 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 Zhiwei, Yao Zhu. Experimental Investigation and Finite Element Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paperboards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 49-55.
- [22] 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.
- [23] Scheithauer G, Terno J. A New Heuristic for the Pallet Loading Problem[M]//Operations Research Proceedings 1995. Heidelberg: Springer, 1996: 84-89.
- [24] Walter W B, Stern E G. Deformation of Flexural Behavior of Stringer-Type Pallets and Skids[M]. Madison: USDA Forest Products Marketing Laboratory, 1976: 57-61.
- [25] Alvarez-Valdes R, Parreño F, Tamarit J M. A Branch-and-Cut Algorithm for the Pallet Loading Problem[J]. Computers and Operations Research, 2005, 32(11): 3007-3029.
- [26] Martins G H A, Dell R F. Solving the Pallet Loading Problem [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 184(2): 429-440.
- [27] 李 玲, 李大纲, 徐 平, 等. 竹木复合材料托盘力学性能的研究[J]. 包装工程, 2005, 26(3): 8-9, 16.  
Li Ling, Li Dagang, Xu Ping, et al. Study on the Mechanical Properties of Wood-Bamboo Composite Pallets [J]. Packaging Engineering, 2005, 26(3): 8-9, 16.
- [28] 何为宏, 卢立新. 木质托盘铺板的受力分析与设计[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 70-72, 87.  
He Weihong, Lu Lixin. Stress Analysis and Design of Wooden Pallet Plank[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 70-72, 87.
- [29] 刘锋枫, 陆佳平. 均布载荷下木质托盘抗弯力学性能研究[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 33-35.  
Liu Fengfeng, Lu Jiaping. Study on the Anti-Bending Mechanical Performance of Wooden Pallets Under Uniformly Distributed Load[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 33-35.
- [30] 徐伟峰. 关于蜂窝纸托盘性能的研究与探讨[J]. 株洲工学院学报, 2000, 14(5): 17-19.  
Xu Weifeng. Research and Discussion on the Performance of Bee Nest Paperboard Pallets[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2000, 14(5): 17-19.
- [31] 刘映平. 新型纸托盘的抗压强度试验研究[J]. 包装工程, 2007, 28(6): 47-49.  
Liu Yingping. Study on Compression Strength of New Type of Paper Pallet[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6): 47-49.
- [32] 张 丽. 蜂窝纸托盘的堆码动态特性试验分析[J]. 中国现代教育装备, 2010(13): 68-71.  
Zhang Li. Honeycomb Paper Pallet Stacking Experimental Analysis of Dynamic Characteristics[J]. China Modern Educational Equipment, 2010(13): 68-71.
- [33] 李厚民, 李小飞, 毛关勇, 等. 托盘支脚加固优化的试验研究[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(11): 251-252, 285.  
Li Houmin, Li Xiaofei, Mao Guanyong, et al. Structure Optimization of Honeycomb Paperboard Pallets[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2007, 26(11): 251-252, 285.
- [34] 朱永辉, 陆佳平. 纸基蜂窝托盘柱脚对堆码承载性能的影响[J]. 包装工程, 2009, 30(7): 30-32.  
Zhu Yonghui, Lu Jiaping. Influences of Pallet Pedestal on Bearing Capacity of Honeycomb Paperboard Pallet in the Stack[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 30-32.
- [35] 李 杨, 李 光. 基于 SolidWorks 的托盘结构有限元分析及优化设计[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 1-4.  
Li Yang, Li Guang. Structural Finite Element Analysis and Optimum Design of Pallet via SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 1-4.

(责任编辑: 廖友媛)

