

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2015.03.008

# 一种新型蜂窝纸板包边工艺及其制品缓冲性能研究

李光, 樊明

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 提出了一种新型的蜂窝纸板包边工艺, 以实现包边工序的机械化和自动化, 并研究了该包边工艺下制品侧面的缓冲性能。对传统手工包边工艺生产的蜂窝纸板与所提出新型包边工艺生产的蜂窝纸板进行了对比实验, 并采用多次曲线拟合的方法比较所得实验结果。研究表明, 新型蜂窝纸板包边工艺是切实可行的, 蜂窝纸板侧面在受集中载荷时, 新型的包边工艺生产的蜂窝纸板的侧面缓冲吸能能力大于同种规格手工包边方式生产的蜂窝纸板; 当蜂窝纸板的厚度小于40 mm时, 传统手工包边工艺生产的蜂窝纸板的缓冲吸能能力随蜂窝纸板厚度的增加没有明显的变化趋势, 而采用新型包边工艺生产的蜂窝纸板, 其缓冲吸能能力随着蜂窝纸板厚度的增加而增强。

**关键词:** 蜂窝纸板; 包边工艺; 缓冲吸能; 集中载荷

**中图分类号:** TB484.1; TB486.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2015)03-0040-06

## Analysis of a New Overlapping Technique for Honeycomb Paperboard and Its Energy Absorption Performance

Li Guang, Fan Ming

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract :** A new overlapping technique for honeycomb paperboard was presented, which could easily be mechanized and automated. The side energy absorption performance of the overlapped honeycomb paperboard was researched. Comparative experiments were carried out for the new technology processed honeycomb paperboard and traditional manual processed ones, with the experimental results analyzed by multiple curve fitting. The results showed that the new overlapping technique for honeycomb paperboard was feasible. Under concentrated load, the maximum capability of side energy absorption of the new honeycomb cardboard was greater than that of the traditional ones. With the existing traditional manual process, there was no obvious change in side energy absorption performance when the thickness of the honeycomb cardboard was less than 40 millimeter, while the side energy absorption performance of honeycomb cardboard made with the new overlapping technique was enhanced with the increase in thickness.

**Key words:** honeycomb paperboard; overlapping technique; energy absorption performance; concentrated load

收稿日期: 2015-01-12

作者简介: 李光(1963-), 男, 湖北孝感人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事机器人动力学和控制方面的教学与研究,  
E-mail: liguangw@126.com

通信作者: 樊明(1989-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为蜂窝纸板的后道处理及结构分析,  
E-mail: 872168647@qq.com

## 0 引言

蜂窝纸板由于具有平压强度高、质量轻、缓冲性能好、环保等特点,在包装领域得到了较为广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。而随着环保呼声的不断高涨,蜂窝纸板作为一种结构新颖、承载性能好、缓冲性能优的绿色环保材料,越来越受到包装界的关注与重视,并且已经被成功地应用于家电产品、机械零件、陶瓷制品等的缓冲包装领域中<sup>[4-5]</sup>。

国内外学者们对蜂窝纸板的结构与力学性能等方面进行了较多的研究,并且获得了一些蜂窝纸板结构与蜂窝纸板动态性能之间的关系与理论模型。如刘颖等<sup>[6]</sup>利用有限元模拟分析,建立了4种蜂窝结构与其动态性能间的关系。罗昌杰等<sup>[7]</sup>采用塑性铰理论,建立了金属蜂窝结构在静态和动态压缩下的平均平台应力理论模型。王冬梅<sup>[8]</sup>从蜂窝纸板厚度、面纸密度和加载方向等方面,对蜂窝纸板缓冲性能的影响进行了研究。由于蜂窝纸板具优良的平压强度,现有研究和分析多集中于其平压强度方面,而对于蜂窝纸板侧面缓冲性能方面的研究成果不多见,这可能是因该方面的研究有较大难度。然而蜂窝包边后其侧面的缓冲吸能能力也是蜂窝纸板的力学性能指标之一。因蜂窝纸板的侧面缓冲吸能能力相对较差,易被硬物戳穿损坏,而纸板侧面被戳穿后,其平压强度会受到非常大的影响。

目前,对于蜂窝纸板的包边工序,大多还停留在手工包边方式上,而手工包边方式生产出来的蜂窝纸板,其侧面的缓冲吸能能力相对较差,当蜂窝纸板的侧面受到局部载荷时,很容易出现破损现象。蜂窝的侧面受损,主要是因为蜂窝纸板侧面封边纸变形达到了原纸的伸长极限。因此,本文提出了一种新型的包边方式,以提高蜂窝纸板侧面局部受压时的缓冲吸能能力,同时,该工艺可以实现包边工序的机械化和自动化。并通过对新型包边工艺生产出来的蜂窝纸板与手工工艺生产出来的蜂窝纸板在侧面受集中载荷下受压曲线的测试和分析研究,验证了所提出的新型包边工艺制品的缓冲性能优越性。所提方案为自动化生产性能优越的蜂窝纸板提供了一定的理论参考依据。

## 1 包边工艺介绍

### 1.1 手工包边工艺

现有的手工包边工艺是直接将蜂窝纸裁剪成所需规格的长条,然后上胶,最后以手工方式贴在蜂窝纸板的侧面。这种手工包边方式的生产效率较低,

人工成本较高,同时,蜂窝纸板的侧面强度也较低,缓冲吸能能力较差,较易损坏。特别是当需要包边的蜂窝纸板尺寸较大时,手工包边方式无法很好地完成包边过程。

### 1.2 新型包边工艺

本研究所提出的新型包边工艺主要包含压溃、压痕、上胶、折边、侧面压紧5个关键工序,其具体的工艺原理如图1所示。

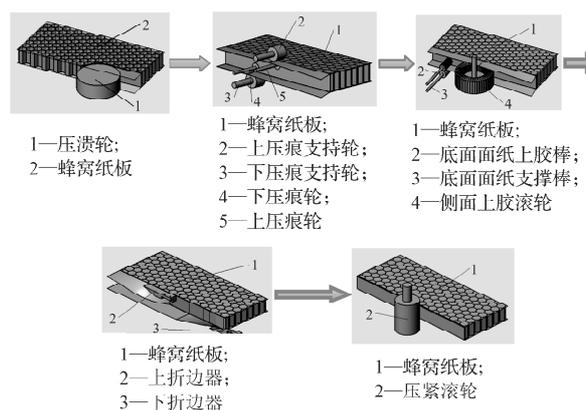


图1 新型包边工艺原理

Fig. 1 Schematic of new overlapping technique

1) 压溃工序。当蜂窝纸板通过传动链板传动到压溃组件时,由于两边压溃轮的圆弧距离小于蜂窝纸板的宽度尺寸,压溃轮会沿着蜂窝纸板侧面法向方向将蜂窝芯压溃。

2) 压痕工序。当蜂窝纸板通过传动链板传动到压痕组件时,上、下压痕轮作用于纸板面纸,压出一条轻微痕迹,以便折边工序能稳定进行。

3) 上胶工序。需要上胶的位置有两处,一处是侧面被压溃蜂窝芯表面,另一处是下面板内侧。当蜂窝纸板通过传动链板传动到上胶组件时,蜂窝纸板压溃层与侧面上胶滚轮接触,同时,蜂窝纸板下面纸与底面面纸上胶棒接触。由于蜂窝纸板压溃层与侧面上胶滚轮之间存在摩擦,蜂窝纸板下面纸与底面面纸上胶棒之间也存在摩擦,因而随着蜂窝纸板的移动,侧面上胶滚轮及底面面纸上的胶棒也随之滚动,从而达到上胶效果。

4) 折边工序。折边工序分为上折边和下折边2道工序。当蜂窝纸板通过传动链板传动到折边组件时,先由上折边器折蜂窝纸板的上面纸,再由下折边器折蜂窝纸板的下面纸,完成整个面纸包边过程。

5) 压紧工序。纸板两边的压紧滚轮最小的圆弧距离应略小于蜂窝纸板包边后的宽度尺寸。当蜂窝纸板通过压紧组件时,两边的压紧滚轮作用于包边后的蜂窝纸板侧面,从而将上胶部分压实,达到胶

合定型的目的。

此种包边工艺方式将压溃的蜂窝芯纸直接包入蜂窝纸板侧面,再将上下面纸分别叠加包边,相较于现有手工包边工艺,该方式在结构上多了1层蜂窝芯纸的压溃层及1层面纸。此种包边工艺与传统手工包边工艺相比,其优点在于:工作效率较高,根据设计工艺参数,传动链的传动速度可达0.2 m/s;生产成本较低,蜂窝纸板的侧面强度较好,侧面缓冲吸能能力较好,适用的蜂窝纸板尺寸规格较广。

## 2 实验材料与方法

通过上述新型包边工艺的介绍,可知由于压溃层的存在,与现有的手工包边工艺相比,蜂窝纸板的侧压强度有了明显的增强。以下通过具体实验来比较2种工艺方法下制品的性能差异。纸板是由上下面纸和芯纸胶合而成,根据芯纸孔径的不同规格,常用的纸板有A, B, C 3种。因为B型蜂窝纸板既具有较高的强度,又有很好的缓冲特性<sup>[9]</sup>,因此本研究选用B型蜂窝纸板。

### 2.1 材料

所选用蜂窝纸芯厚度为20, 30, 40, 50 mm 4种,且为边长80 mm × 80 mm的正六边形结构,其胞壁定量为140 g/m<sup>2</sup>,相应的蜂窝胞壁厚度为0.25 mm。蜂窝纸板的面纸定量为180 g/m<sup>2</sup>,对应边长为8.2 mm。用于手工包边的包边纸与面纸具有相同的原纸定量,所选用试样的主要结构参数具体见表1。

表1 试样的结构参数  
Table 1 Sample specification

试样编号	芯纸定量 / (g·m <sup>-2</sup> )	面纸定量 / (g·m <sup>-2</sup> )	蜂窝纸板厚度 T/mm	蜂窝胞壁厚度 t/mm	蜂窝胞壁边长 L/mm
1	140	180	20	0.25	8.2
2	140	180	30	0.25	8.2
3	140	180	40	0.25	8.2
4	140	180	50	0.25	8.2

### 2.2 方法

1) 试样的预处理。以前述2种不同的包边工艺分别制备大小为80 mm × 80 mm的试样。在实验之前需要对试样进行预处理,以使实验更符合实际情况,即将蜂窝纸板试样放置在标准环境条件下处理48 h以上<sup>[10]</sup>。在标准实验条件下,测得2种试样的含水率均为9%~10%,且整个过程中基本保持不变。

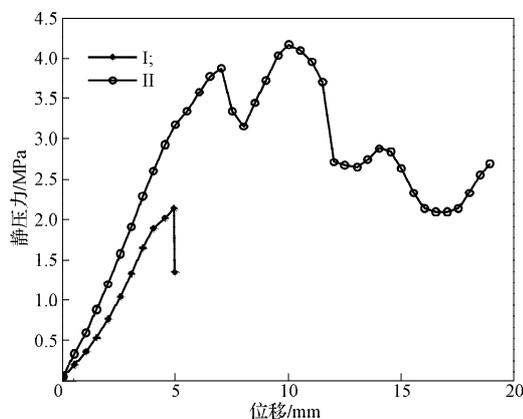
2) 仪器的选取与操作。采用深圳市新三思计量技术有限公司生产的塑料压缩试验机进行实验,且选用直径为3 mm的圆柱压头,其优点是和专业开发的电脑软件powertest兼容,通过该软件可以直接得

到材料的受力与位移曲线,同时可以得到力与位移曲线离散坐标点的值。

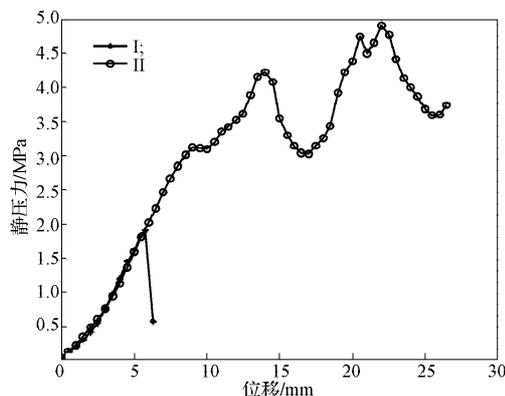
实验时,首先将试样放置在实验工作台上,再将压头调节到靠近试样最上表面处,但是不要触碰到试样的上表面,以确保实验机在没有工作的状态下压力值显示为0,然后将软件所有项清零。实验开始后,圆柱压头开始挤压蜂窝包边处,挤压速度为10 mm/min,经过数据采集和处理系统拟合成曲线,从而在电脑显示屏上能够直观准确地了解位移与力之间的静应力曲线关系。

## 3 实验结果与分析

在标准实验环境下,通过静力压缩实验,得到了4种不同规格蜂窝纸板在2种不同包边工艺下的侧面受压曲线,如图2所示。其中曲线I为手工工艺包边样品,II为新型工艺包边样品。由图2可得,各不同厚度下,刚开始时样品纸板的静压力均随位移的增大而增加,直至达最大静压力。蜂窝纸板手工工艺包边试样及新型包边试样侧面分别受集中力时,随着蜂窝纸板厚度的增加,压头戳破包边纸需要的位移有增大的趋势,且新型包边方式试样的位移大于手工工艺包边方式试样的位移。



a) 厚度为20 mm



b) 厚度为30 mm

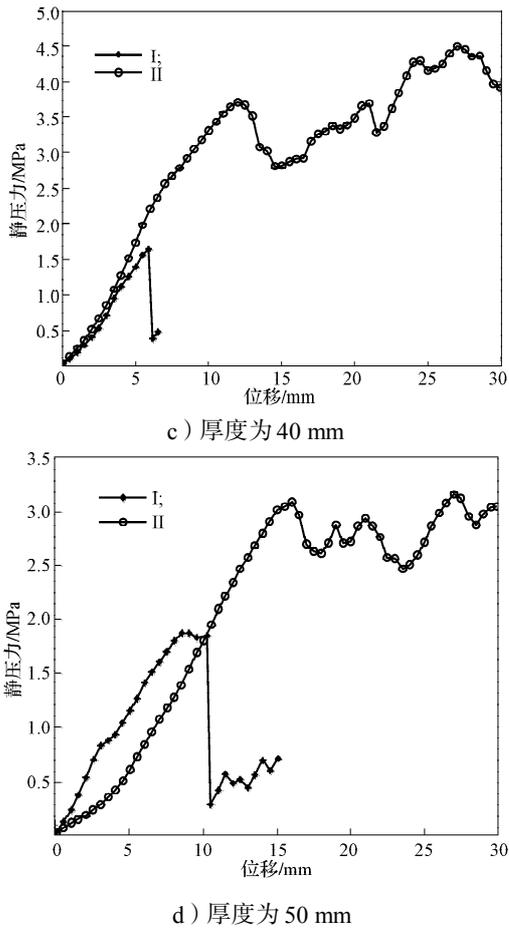


图2 不同厚度下2种包边工艺静压力位移曲线  
 Fig. 2 The static displacement curve of different thickness with the two wrapping technologies

4种厚度下的两种包边工艺包边纸戳破的最大静压力值见表2。

表2 不同厚度下2种包边工艺包边纸戳破的最大静压力  
 Table 2 The maximum static puncture pressure of different thickness with the two wrapping technologies

厚度 / mm	样品	最大静压力 / MPa					平均值
		第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	
20	I	2.128	1.951	1.846	1.762	2.221	1.982
	II	3.866	4.015	3.932	4.149	3.941	3.981
30	I	1.910	1.746	1.666	1.647	1.662	1.726
	II	3.154	3.584	3.737	3.340	3.399	3.444
40	I	1.976	1.959	1.648	1.792	1.879	1.851
	II	3.053	3.513	3.108	3.089	3.717	3.296
50	I	1.423	1.530	1.860	1.316	1.795	1.585
	II	3.088	3.064	3.366	3.024	3.157	3.140

分析表2中的最大静压力实验数据可以得知,压头戳破包边纸需要的最大载荷,随着蜂窝纸板厚度的增加,其通过手工包边方式生产的蜂窝纸板试样没有明显的变化,保持在一定的范围内;但是通过新型包边方式生产的蜂窝纸板试样的却随着厚度的增加,有减小的趋势。

以手工工艺方式包边的蜂窝纸板,当其侧面受到集中载荷作用时,整个侧面的戳穿过程如下:首先,压头接触蜂窝包边纸,当压头下压时,包边纸产生一定的挠度,导致蜂窝包边纸产生拉伸变形;然后,当蜂窝包边纸的变形量达到其极限伸长长度时,包边纸处于短暂的屈曲状态,此时,静压力达到最大值;最后,当压头继续下压时,包边纸被戳穿,整个戳穿过程完成。

采用新型工艺包边的蜂窝纸板,当其侧面受到集中载荷时,整个侧面的戳穿过程如下:首先,压头接触蜂窝包边纸,当压头下压时,包边纸产生一定的挠度,导致蜂窝包边纸产生相应的拉伸变形,由于新型工艺包边的蜂窝纸板的包边纸是通过上、下两边的面纸折叠胶合而成的,其强度较大;当包边纸变形量达到一定的程度时,包边纸牵动面纸,但由于面纸有芯纸的支撑,此时包边纸到达极限伸长长度,包边纸处于短暂的屈曲状态,且静压力达到最大值;当压头继续下压时,包边纸被戳穿,整个戳穿过程完成。由于新型工艺包边的蜂窝纸板侧面有压溃层,强度较高,当压头持续下压时,压溃层会破坏芯纸,导致面纸被拉溃变形,此时静压力又一次达到最大值。然而蜂窝纸板中有很多个芯纸并排,所以压头持续下压时,静压力曲线将呈现出波峰波谷交替的变化趋势。

在实际应用过程中,包边纸的表面被戳穿,通常是因为在物品运输过程中,路面的颠簸导致了带有棱角的硬物将蜂窝侧面戳穿,蜂窝面纸的戳穿性能是其吸能能力性能的评判指标。本文只对包边纸戳穿过程进行研究,即仅研究蜂窝纸被戳穿的一瞬间。因考虑到包边后产品结构的特殊性,在此用静态压缩实验来研究纸板的动态缓冲吸能特性,故 $\sigma-\epsilon$ 曲线下的积分面积为缓冲材料变形时单位体积所吸收的能量 $E$ ,即

$$E = \int_0^{\epsilon} \sigma \epsilon d\epsilon \quad (1)$$

对以上4种厚度的蜂窝纸板侧面戳穿过程的实验数据进行多项式拟合。在matlab软件中,利用多项式拟合函数polyfit拟合实验数据,多项式次数越高,拟合精度越好。本文采用6次多项式拟合,所得拟合效果见图3。图3中,I-I为手工包边工艺样品的实验数据,I-II为手工包边工艺样品的拟合曲线,II-I为新型包边工艺样品的实验数据,II-II为新型包边工艺样品的拟合曲线。

从图3中可以看出,各厚度下,2种包边工艺样品的实验数据基本上位于拟合曲线上,其拟合精度可达0.05,可以用于实验分析。

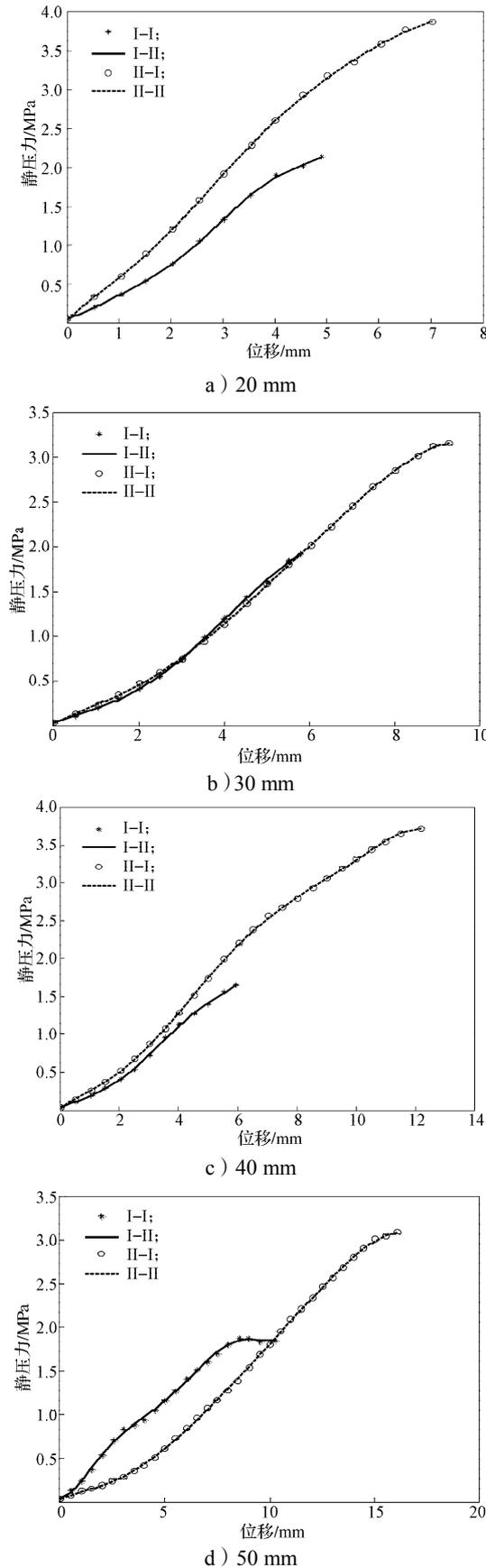


图3 不同厚度下2种包边工艺样品的多次曲线拟合图  
Fig. 3 Multiple curve fitting of different thickness with the two overlapping techniques

根据图3拟合出来的4种不同规格、2种不同包边工艺的蜂窝纸板样品的6次多项式静力位移曲线方程分别如下:

20 mm 手工包边工艺样品纸板的静力位移曲线方程为

$$\sigma = 0.0023\varepsilon^6 - 0.0317\varepsilon^5 + 0.1514\varepsilon^4 - 0.3055\varepsilon^3 + 0.3007\varepsilon^2 + 0.1888\varepsilon + 0.0477;$$

20 mm 新型包边工艺样品纸板的静力位移曲线方程为

$$\sigma = -0.0003\varepsilon^6 + 0.0066\varepsilon^5 - 0.0569\varepsilon^4 + 0.2130\varepsilon^3 - 0.3023\varepsilon^2 + 0.6861\varepsilon + 0.0283;$$

30 mm 手工包边工艺样品纸板的静力位移曲线方程为

$$\sigma = 0.0004\varepsilon^6 - 0.0071\varepsilon^5 + 0.0389\varepsilon^4 - 0.0860\varepsilon^3 + 0.1079\varepsilon^2 + 0.0983\varepsilon + 0.0401;$$

30 mm 新型包边工艺样品纸板的静力位移曲线方程为

$$\sigma = 0.0008\varepsilon^5 - 0.0096\varepsilon^4 + 0.0521\varepsilon^3 - 0.0984\varepsilon^2 + 0.2695\varepsilon + 0.0174;$$

40 mm 手工包边工艺样品纸板的静力位移曲线方程为

$$\sigma = 0.0004\varepsilon^6 - 0.0050\varepsilon^5 + 0.0223\varepsilon^4 - 0.0291\varepsilon^3 + 0.0194\varepsilon^2 + 0.1519\varepsilon + 0.0306;$$

40 mm 新型包边工艺样品纸板的静力位移曲线方程为

$$\sigma = 0.0010\varepsilon^5 - 0.0134\varepsilon^4 + 0.0768\varepsilon^3 - 0.1574\varepsilon^2 + 0.3513\varepsilon - 0.0009;$$

50 mm 手工包边工艺样品纸板的静力位移曲线方程为

$$\sigma = 0.0001\varepsilon^6 - 0.0021\varepsilon^5 + 0.0257\varepsilon^4 - 0.1414\varepsilon^3 + 0.3489\varepsilon^2 - 0.0695\varepsilon + 0.0717;$$

50 mm 新型包边工艺样品纸板的静力位移曲线方程为

$$\sigma = 0.0001\varepsilon^5 - 0.0011\varepsilon^4 + 0.0089\varepsilon^3 - 0.0163\varepsilon^2 + 0.0774\varepsilon + 0.0427。$$

所得4种厚度下2种包边工艺样品的侧面缓冲吸能能力结果见表3。

表3 不同厚度下2种包边工艺样品的侧面缓冲吸能能力

Table 3 Side energy absorbing ability of different thickness with the two overlapping techniques N · mm

包边方式	厚度/mm			
	20	30	40	50
手工工艺包边	17.286	19.311	18.774	78.113
新型工艺包边	71.776	89.225	200.799	259.130

分析表3中的数据可以得出,以手工工艺包边的样品,在其厚度小于40 mm时,包边纸缓冲吸能

力随着厚度的变化基本稳定不变,但是当其厚度为50 mm时,样品的吸能能力急剧增加。这是因为50 mm的包边跨度较大,受静压力时面纸易变形且较大,导致包边纸的法向位移较大,从而引起其吸能能力加剧。同时也说明,在手工工艺包边方式中,50 mm厚的包边纸具有较好的吸能特性。因而在实际使用过程中,对那些侧面吸能能力要求较高的场合,如果采用手工方式包边,在成本允许的情况下,应优先考虑使用50 mm或50 mm以上厚度的蜂窝纸板。

观察表3中的数据还可以得知,对于新型工艺包边的样品,随着蜂窝纸板厚度的增加,其包边纸的缓冲吸能能力也随之增加。而且新型工艺包边方式生产的蜂窝纸板,其侧面缓冲吸能能力远大于相应厚度手工工艺包边方式蜂窝纸板的,在实际使用过程中,对那些侧面缓冲吸能能力要求较高的场合,可以发挥巨大的作用。

## 4 结论

由以上实验结果与分析可知:

1) 以新型包边工艺生产的蜂窝纸板,在受集中载荷时,其戳穿缓冲吸能极限载荷及缓冲吸能能力均大于同一规格手工包边方式生产的蜂窝纸板;

2) 当手工包边工艺生产的蜂窝纸板的厚度小于40 mm时,其缓冲吸能能力随蜂窝纸板厚度的增加没有明显的变化趋势;而新型包边工艺生产的蜂窝纸板的缓冲吸能能力随蜂窝纸板厚度的增大而增强。因此,在某些要求蜂窝纸板侧面戳穿强度较高的场合,可优先选择新型包边工艺生产的蜂窝纸板,并根据实际情况,选择合适的蜂窝纸板规格。

3) 所提出的新型蜂窝纸板包边工艺是切实可行的,该工艺不仅可以提高蜂窝纸板侧面局部受压时的缓冲吸能能力,还可以实现包边工序的机械化和自动化,为自动化生产性能优越的蜂窝纸板提供了理论参考依据。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [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] 曾克俭,刘珊.蜂窝纸板和蜂窝纸托盘的性能研究进展[J].包装学报,2014,6(3):25-30.  
Zeng Kejian, Liu Shan. Research Progress in Honeycomb Paperboard and Honeycomb Paper Tray[J]. Packaging Journal, 2014, 6(3): 25-30.
- [4] 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.
- [5] 韦伽.包装用瓦楞纸板的性能研究及发展趋势[J].中国包装工业,2012(19):9-11.  
Wei Jia. The Performance Research and Development Trend of Wrapping Corrugated Paperboard[J]. China Packaging Industry, 2012(19): 9-11.
- [6] Liu Ying, Zhang Xinchun. The Influence of Cell Micro-topology on the In-Plane Dynamic is Crushing of Honeycombs [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 98-109.
- [7] 罗昌杰,周安亮,刘荣强,等.金属蜂窝异面压缩下平均压缩应力的理论模型[J].机械工程学报,2010,46(18):52-59.  
Luo Changjie, Zhou Anliang, Liu Rongqiang, et al. Average Compressive Stress Constitutive Equation of Honeycomb Metal Under Out-of-Plane Compression[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 52-59.
- [8] Wang Dongmei. Impact Behavior and Energy Absorption of Paper Honeycomb Sandwich Panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 110-114.
- [9] 曾克俭,刘珊.蜂窝纸板动态缓冲性能分析研究[J].包装工程,2014,35(17):15-18.  
Zeng Kejian, Liu Shan. Analysis on Dynamic Cushioning Property of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(17): 15-18.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 10739—2002 纸、纸板和纸浆试样处理和实验的标准大气条件[S].北京:中国标准出版社,2002:498-500.  
The State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 10739—2002 Paper, Board and Pulps—Standard Atmosphere for Conditioning and Testing[S]. Beijing: The China Standard Publishing House, 2002: 498-500.

(责任编辑:廖友媛)