

# 夹层结构纸板的力学性能测试方法概述

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2018.04.006

温时宝<sup>1</sup> 信支援<sup>1</sup> 李思聪<sup>1</sup>  
曹开化<sup>2</sup> 傅培鑫<sup>2</sup>

1. 青岛科技大学

高分子科学与工程学院

山东 青岛 266042

2. 中迪纸材科技温州股份有限公司

浙江 温州 325016

**摘要:** 为了使相关人员能对夹层结构纸板的力学性能测试方法有较为全面的理解和认识,研究了瓦楞纸板、蜂窝纸板和瓦楞复合纸板的力学性能相关测试标准,阐述了各种力学性能的测试原理,分析了各测试标准之间的差异,并介绍了改进夹层结构的剪切性能测试装置的相关研究成果。通过分析可知,瓦楞纸板、蜂窝纸板和瓦楞复合纸板的力学性能测试标准的要求不同,且各种力学性能测试标准还需要改进和更新,3种纸板的力学性能测试需根据具体的应用环境选择合适的测试标准和方法。

**关键词:** 夹层结构;瓦楞纸板;蜂窝纸板;瓦楞复合纸板;力学性能

**中图分类号:** TB484.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2018)04-0034-09

## 0 引言

夹层结构是由面板与疏松的或较轻的夹芯层组成的板、壳结构,面板与芯材通过胶黏剂黏接<sup>[1]</sup>。其中,芯材可以增大上下面板的距离,使夹层结构的抗弯惯性矩增大,从而产生了较高的抗弯强度<sup>[2]</sup>。因而夹层结构被广泛应用于航天航空、轨道车辆、医疗器械等领域中。

夹层结构纸板即由纸质材料作为面板和芯材构造而成的夹层结构,主要包括瓦楞纸板、蜂窝纸板和瓦楞复合纸板(竖瓦楞纸板)等<sup>[3-4]</sup>。其中瓦楞纸板的用量最大,蜂窝纸板次之。纸板是各向异性材料<sup>[5]</sup>,但是国内外学者主要研究夹层结构纸板的缓冲防振性能<sup>[6-12]</sup>,而较少研究其力学性能。上述3种夹层结构纸板的力学性能测试方法各不相同:瓦楞纸板经过百年的发展,其力学性能测试已形成了完整、规范的国际、国内标准,且有专门测试瓦楞纸板及其制品的相关性能的仪器和设备;蜂窝纸板已经出现数十年,虽然我国于1999年发布了蜂窝纸板性能测试标准

BB/T 0016—1999《包装材料 蜂窝纸板》<sup>[13]</sup>,并于2006年对该标准进行了修订<sup>[14]</sup>,但是蜂窝纸板的性能测试主要还是参照夹层结构材料的测试标准;瓦楞复合纸板<sup>[5]</sup>的出现时间较短,暂无性能测试标准,其测试方法多参照瓦楞纸板和蜂窝纸板进行。为了使相关人员能对夹层结构纸板的力学性能测试方法有较为全面的理解和认识,本课题组对夹层结构纸板的相关力学测试方法进行了研究,分析了国内外相关标准的差异。

## 1 瓦楞纸板的力学性能测试

1874年美国 Oliver Long 发明了双面瓦楞纸板,该纸板是最早的具有夹层结构的纸板。除国际标准化组织外,纸浆和造纸工业技术协会也会持续对瓦楞纸板测试标准进行研究和改进。瓦楞纸板的力学性能指标主要指平压强度、边压强度、黏合强度、戳穿强度和耐破度,其中戳穿强度和耐破度也可以用于其他纸板的力学性能测试。

收稿日期: 2018-06-08

作者简介: 温时宝(1976-),男,山西平遥人,青岛科技大学副教授,博士,主要从事包装材料与运输包装力学方面的研究,  
E-mail: wenshibao@126.com

### 1.1 平压强度

瓦楞纸板受压变形时, 瓦楞芯能使瓦楞纸板保持一定厚度而不易发生损坏。这种纸板受压变形测试称为平压试验 (flat crush test, FCT)。纸板的平压性能用平压强度表示。平压强度是衡量瓦楞纸板保持其原来厚度而不发生压溃的能力, 是指瓦楞纸板试样在其瓦楞被压溃以前所能承受的垂直于纸板平面的最大压力, 单位为 kPa。

平压性能采用压缩强度仪进行测试, 要求可动压板以  $(12.5 \pm 2.5)$  mm/min 的速度加载。裁样时采用圆形裁样刀裁切, 裁样刀与瓦楞纸板面垂直, 同时切边齐整, 试样面积不小于  $50 \text{ cm}^2$ , 一般试样为  $64.5 \text{ cm}^2$  (直径为  $(90.6 \pm 0.5)$  mm) 和  $100 \text{ cm}^2$  (直径为  $(112.8 \pm 0.5)$  mm) 的圆形试样。测试后利用瓦楞纸板被压溃前的最大压力除以试样面积, 即得平压强度。平压强度测试采用国家标准 GB/T 22874—2008《单面和单瓦楞纸板 平压强度的测定》<sup>[15]</sup>, 该标准等效采用了 ISO 3035—1982 *Single-Faced and Single-Wall Corrugated Fibreboard-Determination of Flat Crush Resistance*<sup>[16]</sup>。

### 1.2 边压强度

瓦楞纸箱的抗压强度主要取决于其边压强度 (edgewise crush test, ECT), 因此边压强度是瓦楞纸板的重要性能指标之一, 也是瓦楞纸板的专业术语。边压强度又称垂直抗压强度, 是指纸板沿瓦楞方向在单位长度所承受压缩载荷的能力, 单位为 N/m。边压强度测试时, 具有各向异性的瓦楞纸板只测试一个方向, 这与纸箱的应用要求一致。

边压强度测试有两种方法: 瓦楞纸板边压强度测定法<sup>[17-18]</sup>和边缘补强法<sup>[19-20]</sup>, 常用的是第一种。在瓦楞纸板边压强度测定法中, 试样是利用专用的取样刀从样箱进行裁切, 矩形试样的瓦楞方向为短边, 试样尺寸为  $(25.0 \pm 0.5)$  mm  $\times$   $(100.0 \pm 0.5)$  mm; 测试时, 使用两块打磨平滑的长方形金属导块 (导块截面为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 长度小于  $100 \text{ mm}$ ) 支持试样, 使试样垂直于压板, 当试验机压板加压近  $50 \text{ N}$  时移开导块, 直至纸板压溃, 记录压溃前的最大值, 该值乘以 10 即为边压强度。瓦楞纸板的边压强度测定法采用国家标准 GB/T 6546—1998《瓦楞纸板边压强度的测定法》<sup>[17]</sup>, 该标准等同采用了 ISO 3037—2007 *Corrugated Fibreboard-Determination of Edgewise Crush Resistance(Unwaxed Edge Method)*<sup>[18]</sup>, 两个标

准都采用压缩强度仪进行测试, 但 GB/T 6546—1998 规定可动压板以  $(12.5 \pm 2.5)$  mm/min 的速度加载。采用边缘补强法<sup>[19-20]</sup>测定边压强度时, 需将裁切的纸板试样的受力边缘进行浸蜡处理后再进行测试, 因此该方法应用较少。边缘补强法采用国家标准 GB/T 2679.17—1997《瓦楞纸板边压强度的测定 (边缘补强法)》<sup>[19]</sup>, 该标准等效采用了 ISO 13821—2002 *Corrugated Fibreboard-Determination of Edgewise Crush Resistance-Waxed Edge Method*<sup>[20]</sup>。

### 1.3 黏合强度

黏合强度, 是测定瓦楞纸板面纸和芯纸黏接程度的性能指标。测试时, 先将一对针形附件分别插入试样的面纸与芯纸之间, 然后对插有针形附件的试样施压, 使其做相对运动, 直至面纸和芯纸分开, 所需的最大作用力即为黏合强度。黏合强度测试采用国家标准 GB/T 6548—1998《瓦楞纸板黏合强度的测定法》<sup>[21]</sup>, 该标准要求试样尺寸为  $(25 \pm 1)$  mm  $\times$   $(80 \pm 1)$  mm, 瓦楞方向与试样的短边方向一致, 黏合强度用压缩强度仪进行测试, 以  $(12.5 \pm 2.5)$  mm/min 的速度加载。GB/T 6548—1998 等效采用了日本标准 JIS Z0402—1988《瓦楞纸板的黏合力的试验方法》<sup>[22]</sup>, 而 JIS Z0402—1988 中, 试样尺寸为  $(50.0 \pm 0.5)$  mm  $\times$   $(85.0 \pm 0.5)$  mm, 加载速度为  $(13 \pm 3)$  mm/min。

### 1.4 戳穿强度

戳穿强度, 是衡量瓦楞纸板受锐利物品冲击发生损坏时的抵抗能力, 是指用一定形状的戳穿头戳穿透纸板所做的功, 单位为 J。测试时, 用戳穿强度仪夹紧试样, 上下夹板的夹持有效面积为  $175 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$ , 夹板的有效夹紧力为  $250 \sim 1\,000 \text{ N}$ , 用连在摆臂上的戳穿头戳穿试样, 测定戳穿试样所消耗的能量。戳穿强度测试采用国家标准 GB/T 2679.7—2005《纸板戳穿强度的测定》<sup>[23]</sup>, 该标准等效采用了 ISO 3036—1975 *Board-Determination of Puncture Resistance*<sup>[24]</sup>。GB/T 2679.7—2005 也可用于蜂窝纸板测试, 不过蜂窝纸板的厚度较大, 可能超出了戳穿强度仪的测试范围。

### 1.5 耐破度

耐破度, 是衡量瓦楞纸板的面纸、芯纸综合性能的指标, 是指纸板在不破裂状态下承受外压的能力, 用一定面积纸板上承受均匀增加直至试样破裂时的载荷值表示。测试时, 试样放置在圆形胶膜的上

方,用圆形夹盘夹住,液压系统恒速泵入液体使胶膜凸起,直至试样破裂,施加的最大压力值即为耐破度。试样夹盘系统的上下盘内孔直径为 $(31.5 \pm 0.5)$  mm,上下夹环同心,误差不大于0.25 mm。测试时,为防止试样活动,夹盘的夹持力不低于690 kPa,液压系统以 $(170 \pm 15)$  mL/min的速度泵送液体,测定正反面各10个贴向胶膜的试样,以测定值的算术平均值(kPa)表示耐破度。

关于纸板耐破度有两个国家标准:标准一,GB/T 1539—2007《纸板耐破度的测定》<sup>[25]</sup>适用于所有纸板;标准二,GB/T 6545—1998《瓦楞纸板耐破强度的测定法》<sup>[26]</sup>是针对瓦楞纸板而制定的。两个标准都参考了ISO 2759—2001 *Board-Determination of Bursting Strength*<sup>[27]</sup>,标准一等同采用ISO 2759—2001,标准二等效采用ISO 2759—2001。两个标准的耐破度测试范围都为350~5 500 kPa。

## 2 蜂窝纸板和瓦楞复合纸板的力学性能测试

ASTM (American Society for Testing Materials) D30 复合材料委员会制定了夹层结构材料的性能测试标准,如平压性能、侧压性能、平拉性能、剪切性能、弯曲性能等测试标准<sup>[28]</sup>。这些标准适用于所有的夹层结构材料,如金属材料、纤维材料等。蜂窝纸板和瓦楞复合纸板主要应用于运输包装中,其强度要求没有应用于航天航空、运输工具中的夹层结构材料的高,因此其只需进行平压、侧压和弯曲等力学性能测试。笔者<sup>[29]</sup>测试了蜂窝纸板和瓦楞复合纸板的平压、侧压、弯曲和剪切4个方面的力学性能,并给出了两种纸板的基本数据,这对夹层结构复合纸板的应用和制品设计有一定的参考价值。

### 2.1 平压性能

夹层结构的压缩性能有平压强度和侧压强度两项指标。平压强度,是指垂直于夹层结构面板方向的压缩强度。平压性能测试按照GB/T 1453—2005《夹层结构或芯子平压性能试验方法》<sup>[30]</sup>进行,该标准根据ASTM C365—2000 *Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*<sup>[31]</sup>修改而成。

不同标准对夹层结构的平压性能测试的要求不同。1)按照GB/T 1453—2005,试样取边长为60 mm的正方形或直径为60 mm的圆形,对于蜂窝、

波纹等格子型芯子应至少包括4个完整的格子;测试时,将制作好的试样置于试验机中平行的上下压板之间,压板以0.5~2.0 mm/min的速度加载,直至试样破坏,记录平压强度。2)按照ASTM C365—2000,蜂窝类夹层结构的试样尺寸取决于蜂窝直径,若蜂窝直径小于6 mm,试样的最小面积应为2 500 mm<sup>2</sup>;若蜂窝直径大于等于6 mm,试样的最小面积应该为5 800 mm<sup>2</sup>,试样的形状可取正方形或圆形。测试时,压板的推荐加载速度为0.5 mm/min。3)在包装行业蜂窝纸板标准BB/T 0016—2006《包装材料 蜂窝纸板》<sup>[14]</sup>中,平压强度测试方法参照GB/T 1453—2005,压板加载速度为1.0 mm/min。

### 2.2 侧压性能

夹层结构的侧压测试与瓦楞纸板的边压测试类似,侧压强度也是一项关键的性能指标,其反映平行于夹层结构面板方向的抗压能力<sup>[32-33]</sup>。瓦楞纸板的边压强度测试只测一个方向即瓦楞方向<sup>[32]</sup>,测试时使用两块打磨平滑的长方形金属导块支持试样;蜂窝纸板和瓦楞复合纸板是各向异性材料,用作纸箱时,其侧面要承受侧压载荷,因此侧压测试要测两个方向即横向和纵向<sup>[34]</sup>,测试过程中试样由专门的夹具固定和支撑。通过侧压测试,专家学者可以发现夹层结构是否发生总体屈曲、剪切曲折、面板起皱等破坏现象<sup>[1]</sup>,并据此对产品和材料进行分析与改进。文献[35]对薄蜂窝纸板和A楞瓦楞纸板的侧压和边压性能进行了测试,研究结果表明,薄蜂窝纸板的横向侧压和边压强度略大于纵向,同时相比于A楞瓦楞纸板,薄蜂窝纸板在纵横两个方向上都有较高的侧压和边压强度,应用时可减少对纸板方向考虑。

侧压性能测试按照国家标准GB/T 1454—2005《夹层结构侧压性能试验方法》<sup>[32]</sup>进行,该标准参照ASTM C364—1999 *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*<sup>[33]</sup>。不同标准对夹层结构的侧压性能测试要求不同。1)按照GB/T 1454—2005,对于蜂窝、波纹等格子型芯子,试样的宽度为60 mm,或至少应包括4个完整的格子,试样的厚度、宽度与试样无支承高度应符合1:4:6的比例。侧压测试时,先将试样两端分别固定于支承夹具中,然后置于试验机中平行的上下压板之间,通过试样两端的支承夹具对试样沿面板方向施加压缩载荷,为保证在受压过程中两面板均匀受载不发生偏心,试验机加载部分应带球形支座,压板的加载速



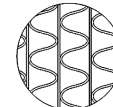
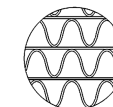


度为 0.5~2.0 mm/min, 直至试样面板发生折断、皱曲破坏或与芯子分离破坏, 记录破坏载荷和破坏形式。对于正交各向异性的夹层结构, 侧压测试应按照纵向和横向分别测试, 两种纸板的的方向示意图如表 1<sup>[29]</sup> 所示。2) 根据 ASTM C364—1999, 对于蜂窝类夹层结构, 试样的宽度应不小于厚度的两倍, 应至少包括 4 个完整的蜂窝, 宽度至少为 50 mm, 而试样无支承部分的长度应不大于厚度的 8 倍, 压板的推荐加载速度为 0.5 mm/min。3) BB/T 0016—2006 没有蜂窝纸板的侧压性能测试要求。

蜂窝纸板和瓦楞复合纸板除用于缓冲定位结构外, 还常用于制作重型纸箱, 此时需要考虑纸箱抗压强度, 纸板不同方向的侧压强度与纸箱的抗压强度密切相关<sup>[36-37]</sup>。因此侧压强度也应作为蜂窝纸板和瓦楞复合纸板的基本指标之一。

表 1 纸板方向

Table 1 Schematic diagram of fiberboard orientation

蜂窝纸板		瓦楞复合纸板	
纵向	横向	纵向	横向
			

### 2.3 平拉性能

平拉性能用于评价面板和芯子之间的黏接能力。如果面板与芯子之间的黏接能力较差, 那么夹层结构的整体性能就很差, 此时夹层结构的平拉性能测试与瓦楞纸板的黏合性能测试效果相同, 但测试夹具完全不同。如果面板与芯子之间的黏接能力足够, 那么夹层结构的平拉性能测试可以确定芯子或者面板的拉伸强度。

平拉性能测试按照国家标准 GB/T 1452—2005 《夹层结构平拉强度试验方法》<sup>[38]</sup> 进行, 该标准修改采用了 ASTM C297—1994 *Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*<sup>[39]</sup>。平拉性能测试所用夹具应具有自调心功能, 试样需要事先与加载块进行黏接即将试样黏接在两个加载块之间, 待黏接剂完全固化后再将其安装到夹具上。平拉性能测试时, 若破坏发生在加载块与试样面层之间, 这属于黏合剂失效, 需要重新选择黏合剂。若非黏合剂失效, 试样拉伸破坏有 3 种形式<sup>[39]</sup>: 1) 夹芯拉伸损坏即芯子损坏; 2) 芯层与面层间黏合剂的损坏, 即从面层与芯层黏合剂处拉伸损坏; 3) 面层拉

伸破坏, 通常是纤维增强复合材料的复合面层发生分层损坏。

不同标准对夹层结构的平拉性能测试的要求不同。1) 根据 GB/T 1452—2005, 试样的边长或直径为 60 mm, 若为蜂窝、波纹等格子型芯子, 试样至少应包括 4 个完整格子。测试时, 拉伸速度为 1.0~2.0 mm/min, 拉伸时采用带万向节的拉伸夹具, 使试样在垂直夹层结构面板方向承受拉伸载荷。2) ASTM C297—1994 对平拉性能测试要求更为详细。试样形状可以为圆形或正方形。对于不同芯材, 试样的要求不同。a. 芯层为类似泡沫塑料、软木的连续性界面材料, 试样面积最小为 625 mm<sup>2</sup> (25 mm × 25 mm)。b. 芯层为类似蜂窝孔的非连续性胞孔界面, 样品面积要考虑胞孔直径, 以确保最小量的胞孔被测试。当最大胞孔直径小于 76.2 mm, 试样的最小面积为 625 mm<sup>2</sup>; 当胞孔直径在 76.2~152.4 mm 之间, 试样的最小面积为 2 500 mm<sup>2</sup> (50 mm × 50 mm); 当胞孔直径在 152.4~228.6 mm 之间, 试样的最小面积为 5 625 mm<sup>2</sup> (75 mm × 75 mm)。推荐的平拉速度是 0.50 mm/min。3) BB/T 0016—2006 没有蜂窝纸板的平拉性能测试要求。原因如下: 一是平拉强度测试的制样繁琐; 二是蜂窝纸板材料应用中较少出现由于面纸与芯子的黏合强度不足而导致其应用失效的现象, 同时较少对芯子的拉伸性能提出要求。关于蜂窝纸板平拉强度的相关研究文献<sup>[40]</sup> 也不多。

### 2.4 剪切性能

剪切, 是指在一对相距很近、大小相同、指向相反的横向外力 (平行于作用面的力) 作用下, 材料的横截面沿该外力作用方向发生的相对错动变形现象。抗剪切能力是夹层结构的基本性能之一<sup>[41-43]</sup>。剪切试验用于测定芯子的剪切性能、面板的剪切变形以及剪切模量, 包括压缩和拉伸两种剪切试验方法。测试时, 通过对与试样胶接的加载金属块施加拉伸或压缩载荷, 沿着夹层结构面板方向对芯子产生平面剪切, 从而测得芯子的剪切强度即平面剪切强度, 由于载荷主要由芯子承受, 也称芯子剪切强度<sup>[42]</sup>。

剪切性能测试的国家标准 GB/T 1455—2005 《夹层结构或芯子剪切性能试验方法》<sup>[42]</sup> 修改采用了 ASTM C273—2000 *Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials*<sup>[43]</sup>。国家标准 GB/T 1455—2005 的测试要求如下: 试样形状为长方体, 宽度为 60 mm, 若为蜂窝、波纹等格子型芯子,

试样至少应包括4个完整格子,长度大于等于厚度的12倍;加载速度为0.5~1.0 mm/min,对试样的横向、纵向(见表1)分别进行剪切试验。ASTM C273—2000的测试要求如下:样品宽度不小于50 mm,同时长度不小于厚度的12倍,推荐的加载速度是0.50 mm/min。可见,两个标准的测试要求有一些差别。

同平拉性能测试类似,剪切性能测试也需要将试样事先黏接在一对金属加载块上,因此测试时要准备多对金属加载块,试验成本较高。针对该问题,笔者<sup>[44-46]</sup>发明了一种组合式压缩剪切夹具并通过试验验证其效果,试验结果表明:具有多对样品黏合板的夹具可以完成多个剪切试样的测试,减少夹具制作成本,提高剪切测试效率。此外,笔者根据文献[47]中所用剪切夹具的不足之处,发明了一种适应于不同厚度的组合对称式夹层结构压缩剪切测试夹具<sup>[48]</sup>,该夹具解决了在GB/T 1455—2005和ASTM C273—2000中夹具测试时不能采用试验机直接读数的问题,同时实现了实用新型专利<sup>[44]</sup>中组合制作样品的功能,具有测试效率高、试验数据处理简单等优点。

## 2.5 弯曲性能

夹层结构最大的优点是在质量减轻的条件下,增加了材料的弯曲强度。纸板的弯曲性能也是夹层结构重要的性能测试指标。弯曲试验可测定夹层结构承受弯曲载荷时面板的强度和夹层结构的弯曲刚度、剪切刚度,也可测定芯子的剪切强度和剪切模量。弯曲性能测试的国家标准GB/T 1456—2005《夹层结构弯曲性能试验方法》<sup>[49]</sup>修改采用了ASTM C393—2000 *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*<sup>[50]</sup>。

不同标准对夹层结构弯曲性能测试的要求不同。1) GB/T 1456—2005中,弯曲强度和剪切强度采用简支梁三点弯曲法,弯曲刚度则采用简支梁三点外伸法。试样为长方体,试样的宽度小于跨距的一半,对于蜂窝、波纹等格子型芯子,其宽度为60 mm,或至少应包括4个完整的格子,试样的长度为跨距加40 mm或1/2厚度,取其中数值大者。强度测试时,把试样安放在弯曲试验的支座上,加上加载压头,并在压头与试样之间垫上一块硬质橡胶垫片,即可进行弯曲测试。刚度测试时,先施加预加载荷(破坏载荷的15%~20%),消除试样与支座间的空隙,卸至初载(破坏载荷的5%),调整试验机零点,然后以破坏载荷的5%为级差,按规定的加载速度,分

级加载至破坏载荷的40%~50%,记录各级载荷相应的挠度值。一般情况下,强度测试的加载速度为2~5 mm/min,刚度测试的加载速度为0.5~1.0 mm/min。2) ASTM C393—2000中,夹具采用三点或四点简支梁加载配置,试样横跨在下部两个支撑条上,三点弯曲上部载荷位于试样中间,四点弯曲的两个上部载荷有两种形式,载荷分别位于跨距的1/4和1/3处。三点简支梁测试属于标准配置,其跨度为150 mm,试样宽度为75 mm,长度为200 mm;四点简支梁测试属于非标准配置。测试时,加载压头宽度为25 mm,加载时压头可自由转动,同时需要在加载压头与试样之间放置3 mm厚度、肖氏硬度为60的橡胶垫片,弯曲加载速度为6 mm/min。

纸板的弯曲性能有较大影响,因此在承受类似顶盖载荷的应用时,纸板应按照表1所示的纵向和横向分别进行弯曲性能测试。

关于蜂窝纸板和瓦楞复合纸板的弯曲性能的研究文献较少。笔者<sup>[51]</sup>对瓦楞复合纸板的弯曲性能进行了试验研究,给出了不同厚度纸板纵横向弯曲强度数据并进行了对比,这些数据可以为应用设计提供参考;李厚民等<sup>[52]</sup>利用材料静态缓冲的原理及弯曲性能试验推导了蜂窝纸板的弯曲缓冲系数,分析了纸板弯曲跨度对缓冲性能的影响。

## 2.6 剥离性能

剥离性能用采用滚筒剥离试验测得面板与芯子分离时单位宽度上的抗剥离力矩表示。夹层结构的剥离性能在某种程度上与其平拉性能类似,但剥离性能测试要求试样的面板为挠性材料,而平拉性能除可以反映面板与芯子的黏接能力,还可以反映夹层结构或芯子的抗拉伸能力。

剥离性能测试标准有GB/T 1457—2005《夹层结构滚筒剥离强度试验方法》<sup>[53]</sup>。BB/T 0016—1999引用了GB/T 2791—1995《胶粘剂T剥离强度试验方法挠性材料对挠性材料》<sup>[54]</sup>作为剥离强度的测试方法,但蜂窝纸板并非完全挠性材料,剥离拉伸时带蜂窝芯的一侧难于夹持固定,因而该方法不适合蜂窝纸板的剥离测试。因此,BB/T 0016—2006去除了剥离强度测试。

## 3 结论

为了使相关人员对纸板的力学性能测试有一个较全面的了解,本课题组从夹层结构复合材料的力学

性能角度介绍了瓦楞纸板、蜂窝纸板和瓦楞复合纸板各自的测试标准及不同标准之间的区别, 分析了部分标准中测试方法存在的不足, 介绍了专家学者对测试中不足之处提出的改进措施。所得结论如下:

1) 相对于完整的、可操作性强的瓦楞纸板力学性能测试标准, 借用夹层结构材料测试标准的蜂窝纸板和瓦楞复合纸板在测试的可操作性方面还需要加强; 2) 3种纸板的力学性能测试需根据应用环境合理选择测试标准和方法。

#### 参考文献:

- [1] 王兴业, 杨孚标, 曾竟成, 等. 夹层结构复合材料设计原理及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 182-215.  
WANG Xingye, YANG Fubiao, ZENG Jingcheng, et al. Design Principles and Applications of Sandwich Structure Composite Material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 182-215.
- [2] GAY D. Composite Materials: Design and Applications[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015: 69.
- [3] PFLUG J, IGNACE V. Folded Honeycomb Structure Consisting of Corrugated Paperboard and Method and Device for Producing: EP1165310[P]. 2003-01-15.
- [4] 付云岗, 郭彦峰, 王忠民, 等. 纸瓦楞夹层板的压缩变形与塑性吸能特性研究[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 89-94.  
FU Yungang, GUO Yanfeng, WANG Zhongmin, et al. Compressive Deformation and Plastic Energy Absorption Property of Paper Corrugated Sandwich Panel[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 89-94.
- [5] 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 & Food Machinery, 2011, 29(2): 56-59.
- [6] ROUILLARD V, SEK M A. Behaviour of Multi-Layered Corrugated Paperboard Cushioning Systems Under Impact Loads[J]. Applied Mechanics and Materials, 2005, 3/4: 383-390.
- [7] GUO Yanfeng, ZHANG Jinghui. Shock Absorbing Characteristics and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Shock & Vibration, 2014, 11(5/6): 521-531.
- [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] 王志伟, 王立军, 徐晨翼. 多次低强度冲击对蜂窝纸板缓冲性能的影响[J]. 应用力学学报, 2015, 32(3): 441-445.  
WANG Zhiwei, WANG Lijun, XU Chenyi. Effects of Low-Strength Repeated Impacts on Cushioning Performance of Honeycomb Paperboard[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(3): 441-445.
- [10] 卢富德, 雷树锋, 肖宁建, 等. 简支梁式关键部件在蜂窝纸板缓冲作用下的冲击响应研究[J]. 包装学报, 2018, 10(1): 20-26.  
LU Fude, LEI Shufeng, XIAO Ningjian, et al. Study on Shock Response of Critical Component of Simply Supported Beam Under Cushion Action of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2018, 10(1): 20-26.
- [11] 吴月, 王桂英. 基于物流过程的蜂窝纸板缓冲性能研究进展[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 83-88.  
WU Yue, WANG Guiying. Research Progresses of Cushioning Performance of Honeycomb Paperboard Based on Logistic Process[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 83-88.
- [12] 范志庚, 卢立新, 王军, 等. 蜂窝纸板疲劳累积损伤模型实验研究[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 59-63.  
FAN Zhigeng, LU Lixin, WANG Jun, et al. Experimental Research on Honeycomb Paperboard Fatigue Cumulative Damage Model[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 59-63.
- [13] 中国包装总公司. 包装材料 蜂窝纸板: BB/T 0016—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 1-6.  
China National Packaging Corporation. Packaging Material-Honeycomb Fiberboard: BB/T 0016—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999: 1-6.
- [14] 中国包装总公司. 包装材料 蜂窝纸板: BB/T 0016—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 1-6.  
China National Packaging Corporation. Packaging Material-Honeycomb Fiberboard: BB/T 0016—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999: 1-6.
- [15] 中国轻工业联合会. 单面和单瓦楞纸板 平压强度的测定: GB/T 22874—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-3.  
China Light Industry Council. Single-Faced and Single-Wall Corrugated Fibreboard-Determination of Flat Crush Resistance: GB/T 22874—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-3.
- [16] ISO. Single-Faced and Single-Wall Corrugated Fibreboard-Determination of Flat Crush Resistance: ISO 3035—1982[S]. [S. l.]: Switzerland, 1982: 1-2.



- [17] 中国制浆造纸工业研究所. 瓦楞纸板边压强度的测定法: GB/T 6546—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 1-2.  
China National Pulp and Paper Industry Research Institute. Corrugated Fibreboard-Determination of Edgewise Crush Resistance: GB/T 6546—1998[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998: 1-2.
- [18] ISO. Corrugated Fibreboard-Determination of Edgewise Crush Resistance (Unwaxed Edge Method): ISO 3037—2007[S]. [S. l.]: Switzerland, 2007: 1-4.
- [19] 中国制浆造纸工业研究所, 南京林业大学. 瓦楞纸板边压强度的测定(边缘补强法): GB/T 2679.17—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 357-358.  
China National Pulp and Paper Industry Research Institute, Nanjing Forestry University. Corrugated Fibreboard-Determination of Edgewise Crush Resistance (Edge Reinforced Method): GB/T 2679.17—1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997: 357-358.
- [20] ISO. Corrugated Fibreboard-Determination of Edgewise Crush Resistance-Waxed Edge Method: ISO 13821—2002[S]. [S. l.]: Switzerland, 2002: 1-4.
- [21] 中国制浆造纸工业研究所. 瓦楞纸板黏合强度的测定法: GB/T 6548—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 247-248.  
China National Pulp and Paper Industry Research Institute. Corrugated Fibreboard-Determination of Ply Adhesive Strength: GB/T 6548—1998[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998: 247-248.
- [22] 日本工业标准调查会. 瓦楞纸板的黏合力的试验方法: JIS Z0402—1995[S]. 东京: [s. n.], 1995: 1-2.  
Japanese Industrial Standards Committee. Test Method for Adhesion of Corrugated Fibreboard: JIS Z0402—1995[S]. Tokyo: [s. n.], 1995: 1-2.
- [23] 中国轻工业联合会. 纸板戳穿强度的测定: GB/T 2679.7—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-3.  
China Light Industry Council. Board - Determination of Puncture Resistance: GB/T 2679.7—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-3.
- [24] ISO. Board-Determination of Puncture Resistance: ISO 3036—1975[S]. [S. l.]: Switzerland, 1975: 1-3.
- [25] 中国轻工业联合会. 纸板耐破度的测定: GB/T 1539—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 1-5.  
China Light Industry Council. Paperboard-Determination of Bursting Strength: GB/T 1539—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007: 1-5.
- [26] 中国轻工业联合会. 瓦楞纸板耐破强度的测定法: GB/T 6545—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 1.  
China Light Industry Council. Corrugated Fibreboard-Determination of Bursting Strength: GB/T 6545—1998[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998: 1.
- [27] ISO. Board-Determination of Bursting Strength: ISO 2759—2001[S]. [S. l.]: Switzerland, 2001: 1-5.
- [28] SAWICKI A J. Development of Standard Test Methods for Sandwich Composites Under ASTM Committee D30[C]//17th International Conference on Composite Materials. Edinburgh: [s. n.], 2009: 1-11.
- [29] 温时宝, 曹开化, 王斌, 等. 高强瓦楞蜂窝复合纸板及其力学性能研究[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(3): 32-35.  
WEN Shibao, CAO Kaihua, WANG Bin, et al. Corrugated Composite Paperboard and Its Mechanical Properties[J]. Packaging & Food Machinery, 2012, 30(3): 32-35.
- [30] 中国建筑材料工业协会. 夹层结构或芯子平压性能试验方法: GB/T 1453—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-4.  
China Building Material Federation. Test Method for Flatwise Compression Properties of Sandwich Constructions or Cores: GB/T 1453—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-4.
- [31] ASTM. Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores: ASTM C365—2000[S]. ASTM: West Conshohocken, 2000: 1-3.
- [32] 中国建筑材料工业协会. 夹层结构侧压性能试验方法: GB/T 1454—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-4.  
China Building Material Federation. Test Method for Edgewise Compressive Properties of Sandwich Constructions: GB/T 1454—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-4.
- [33] ASTM. Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions: ASTM C364—1999[S]. ASTM: West Conshohocken, 1999: 1-3.
- [34] 彭明军, 孙勇, 段永华, 等. 钎焊蜂窝铝板侧压变形模式分析研究[J]. 材料导报, 2010, 24(3): 75-77.  
PENG Mingjun, SUN Yong, DUAN Yonghua, et al. Study on Lateral Compression Deformation Mode of Brazing Aluminum Honeycomb Panel[J]. Materials Review, 2010, 24(3): 75-77.
- [35] WEN Shibao, CHU Xiaoke, SUN Jujie. Experimental Investigation of Influence Factors for Compression Strength of Thin Honeycomb Paperboard Box[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2017, 417: 581-588.
- [36] 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 Gelin, LI Junchao, et al. Experimental

- Research on the Edgewise Compressive Strength of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 90-91.
- [37] 温时宝. 高强瓦楞复合纸板侧压性能实验研究[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 62-65.  
WEN Shibao. Experimental Investigation of Edgewise Compression Properties of High-Strength Composite Corrugated Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 62-65.
- [38] 中国建筑材料工业协会. 夹层结构平拉强度试验方法: GB/T 1452—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-3.  
China Building Material Federation. GB/T 1452—2005, Test Method for Flatwise Tension Strength of Sandwich Constructions[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-3.
- [39] ASTM. Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions: ASTM C297—1994[S]. ASTM: West Conshohocken, 1994: 1-2.
- [40] 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 Gelin, JI Hongwei, CAO Jian, et al. Experimental Research on the Flatwise Tensile Strength of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 96-97.
- [41] 刘鸿文. 材料力学: I[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 60-61.  
LIU Hongwen. Material Mechanics: I[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 60-61.
- [42] 中国建筑材料工业协会. 夹层结构或芯子剪切性能试验方法: GB/T 1455—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-6.  
China Building Material Federation. Test Method for Shear Properties of Sandwich Constructions or Cores: GB/T 1455—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-6.
- [43] ASTM. Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials: ASTM C273—2000[S]. ASTM: West Conshohocken, 2000: 1-3.
- [44] 温时宝. 一种快速更换试样的夹层结构压缩剪切测试夹具: CN201120160447.7[P]. 2011-05-11.  
WEN Shibao. A Compression Shear Test Fixture with Rapid Replacement Sample for Sandwich Structure: CN201120160447.7[P]. 2011-05-11.
- [45] 温时宝. 夹层结构纸板压缩剪切夹具的改进及其验证[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 72-76.  
WEN Shibao. Improvement and Verification of Compression Shear Fixture for Sandwich Structure Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 72-76.
- [46] 梁宁宁, 温时宝. 夹层结构纸板压缩剪切性能试验研究[J]. 包装与食品机械, 2013, 31(6): 29-32.  
LIANG Ningning, WEN Shibao. Experimental Investigation of Compression Shear Property for Sandwich Structure Paperboard[J]. Packaging & Food Machinery, 2013, 31(6): 29-32.
- [47] 邵文全, 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.
- [48] 温时宝, 于广水, 宫兆睿. 一种对称式夹层结构压缩剪切测试夹具: CN201210174592.X[P]. 2012-05-23.  
WEN Shibao, YU Guangshui, GONG Zhaorui. Symmetrical Sandwich Structure Compression Shear Test Fixture: CN201210174592.X[P]. 2012-05-23.
- [49] 中国建筑材料工业协会. 夹层结构弯曲性能试验方法: GB/T 1456—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-6.  
China Building Material Federation. Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions: GB/T 1456—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-6.
- [50] ASTM. Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions: ASTM C393—2000[S]. ASTM: West Conshohocken, 2000: 1-3.
- [51] WEN Shibao. Experimental Investigation of Flexure Properties for High-Strength Corrugated Composite Paperboard[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 175-179.
- [52] 李厚民, 朱若燕, 郭玉智. 蜂窝纸板弯曲缓冲性能的探讨[J]. 固体力学学报, 2008, 29(增刊1): 186-188.  
LI Houmin, ZHU Ruoyan, GUO Yuzhi. Research



- on Flexional Behavior of Honeycomb Paperboard[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(S1): 186-188.
- [53] 中国建筑材料工业协会. 夹层结构滚筒剥离强度试验方法: GB/T 1457—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-4.
- China Building Material Federation. Test Method for Climbing Drum Peel Strength of Sandwich Constructions: GB/T 1457—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-4.
- [54] 中华人民共和国化学工业部. 胶粘剂 T 剥离强度试验方法: 挠性材料对挠性材料: GB/T 2791—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995: 1-3.
- Ministry of Chemical Industry of the People's Republic of China. Adhesives, T Peel Strength Test Method for a Flexible-to-Flexible Test Specimen Assembly: GB/T 2791—1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995: 1-3.

## Overview of Mechanical Property Test Methods of Sandwich Paperboard

WEN Shibao<sup>1</sup>, Xin Zhiyuan<sup>1</sup>, LI Sicong<sup>1</sup>, CAO Kaihua<sup>2</sup>, FU Peixin<sup>2</sup>

( 1. School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266042, China; 2. Zhongdi Paper Materials Technology of Wenzhou Co., Ltd., Wenzhou Zhejiang 325016, China )

**Abstract:** The testing standards of the mechanical properties of corrugated paperboard, honeycomb paperboard and corrugated composite paperboard were studied in order to have a comprehensive understanding of the mechanical properties test methods of sandwich structural paperboard for the relevant personnel. The testing principles of various mechanical properties were explained, and the differences among the test standards were analyzed. At the same time, the relevant research results for improving test device of the shear performance for the sandwich structure were introduced. Through analysis, the various standards of corrugated paperboard, honeycomb paperboard and corrugated composite paperboard had different requirements, and standard test methods should be improved and updated, the mechanical property test of the three kinds of sandwich paperboard should adopt appropriate test standards and methods based on the application environment.

**Keywords:** sandwich structure; corrugated paperboard; honeycomb paperboard; corrugated honeycomb paperboard; mechanical property