

基于数字图像相关法测定瓦楞纸板面内静态压缩泊松比

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.03.009

白海龙 陈南宁

刘争号 谢勇

湖南工业大学

包装与材料工程学院

湖南 株洲 412007

摘要: 目前关于直接测定瓦楞纸板泊松比的方法鲜见报道,传统泊松比测试方法难以满足测试要求。针对传统方法的不足,提出使用数字图像相关法测量瓦楞纸板的泊松比,并选取面内静态压缩作为研究内容。选取4种瓦楞纸板,拍照记录面内压缩变形情况,将获得的变形照片导入MATLAB程序进行处理,获得瓦楞纸板面内静态压缩过程位移和应变分布情况,并计算出泊松比值。研究表明,E、BS、BD和BC型4种瓦楞纸板的泊松比值分别为-3.86,-0.42,-2.09和-1.49,负泊松比的出现主要与瓦楞纸板制备过程中芯层瓦楞起皱工艺以及纤维在压缩过程中发生取向变形有关。通过直接测定瓦楞纸板面内静态压缩的泊松比值,为瓦楞纸板泊松比测试提供了一种新方法,可为包装材料的选择和仿真分析提供参考。

关键词: 数字图像相关法;瓦楞纸板;泊松比

中图分类号: TB487;TB484.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2020)03-0069-12

引文格式: 白海龙,陈南宁,刘争号,等.基于数字图像相关法测定瓦楞纸板面内静态压缩泊松比[J].包装学报,2020,12(3):69-80.

1 研究背景

在运输和堆码过程中,瓦楞纸板受压产生屈曲变形,过大的变形致使纸板超过屈服点而失稳塌陷,损坏产品。目前,关于瓦楞纸板受压变形问题一直是学者们研究的热点^[1],主要包括理论计算和仿真分析等。准确的仿真结果离不开准确的材料属性,因此获得瓦楞纸板准确的材料属性至关重要。

在瓦楞纸板材料属性中,除了弹性模量之外泊松比是一个重要的指标。泊松比是用来评价纸板在拉伸

或压缩状态下变形情况的量,它的取值与体积模量和剪切模量存在密切联系。以各向同性材料为例,材料泊松比的取值范围为-1.0~0.5,随着泊松比的降低,剪切模量得到增强^[2]。但是,关于瓦楞纸板泊松比的研究比较少,也没有相关的测试标准,具体取值范围尚无定论。瓦楞纸板模型如图1所示,瓦楞纸板包含3个方向,分别是 x 向(machine direction, MD)、 y 向(cross direction, CD)与 z 向(zeta direction, ZD)。根据参阅的文献可知,大多数学者将纸板近似等效为各向同性材料,泊松比直接赋值为0.3左

收稿日期:2019-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61170101),中国包装联合会绿色包装与安全专项研究基金资助项目(2016ZBLY06)

作者简介:白海龙(1995-),男,山西忻州人,湖南工业大学硕士生,主要研究方向为智能包装,

E-mail:xbpaper@qq.com

通信作者:谢勇(1964-),男,湖南攸县人,湖南工业大学教授,主要从事包装防伪技术与功能包装材料方面的教学与研究,E-mail:hutxy@126.com

右^[3-4]；也有学者视其为正交异性材料，将泊松比 ν_{xz} 和 ν_{yz} 赋值为0.01， ν_{xy} 赋值为0.03^[5-6]。但以上研究文献并没有给出泊松比具体的计算过程或理论推导。

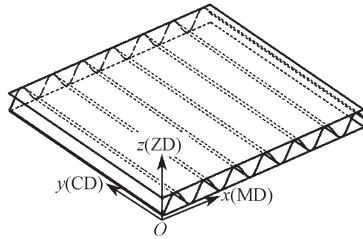


图1 瓦楞纸板三维模型

Fig. 1 3D model of corrugated paperboard

关于泊松比的测量主要包括应变片法、引伸计法、线性可变差动变压器（linear variable differential transformer, LVDT）法、数字图像相关法（digital image correlation, DIC）等，前两种属于接触式测量。应变片法要在材料表面粘贴应变片，由于纸和纸板对水分变化及其敏感，胶水里的水分子会浸入纸板，所以该方法并不适合纸板泊松比测试。引伸计法所使用的夹具，由于夹持力的作用会对试样产生影响，所以该方法也不适合纸板泊松比测试。N. Stenberg等^[7]采用LVDT法对纸张面外应变进行采样记录和数据分析，结果表明纸张拉伸、厚度增加，泊松比值为负，这与传统对纸质泊松比材料的认知不一致；另外，该方法操作繁琐，需要配备专门的高精度位移传感器。DIC法作为一种高效、非接触式测试技术，已经被广泛应用于岩土、高分子材料等的泊松比测试^[8-10]，并取得了较好的测试效果。另外，曹小龙等^[11]将DIC法用于瓦楞原纸泊松比的测量，证明了该技术高效可靠，但目前仅对原纸进行泊松比测量，并未用于瓦楞纸板泊松比测量。C. S. L. Kueh等^[12]使用数字图像相关法，对瓦楞纸箱纵向压缩过程中面板位移和变形情况进行测试，可得到箱体应变分布情况，有助于分析纸箱受压变形情况，这间接表明该技术可用于瓦楞纸板应变测量与泊松比计算。

因此，本文对瓦楞纸板泊松比进行定性和定量分析，以瓦楞纸板面内静态压缩为测试条件，基于DIC方法对4种瓦楞纸板在面内静态压缩条件下的位移变形情况、应变分布进行研究，并计算泊松比值。

2 DIC算法及编程

2.1 DIC算法

DIC算法是根据物体变形前与变形后，图像中心

点位置变化来计算位移，位移变形量与初始位移之比得到应变值，再根据MD与CD的应变之比得出泊松比。DIC算法原理如图2所示，其中I和J分别代表变形前和变形后的两张灰度图像， f 和 g 分别代表图像I和图像J当中的子区域， P 和 Q 是各自子区域内的中心点。如果物体变形之后， f 子区域成功匹配到 g 子区域，表明中心点 $P(x, y)$ 经过变形移动到了中心点 $Q(x', y')$ ，这两个中心点之间的位移向量为 r 。

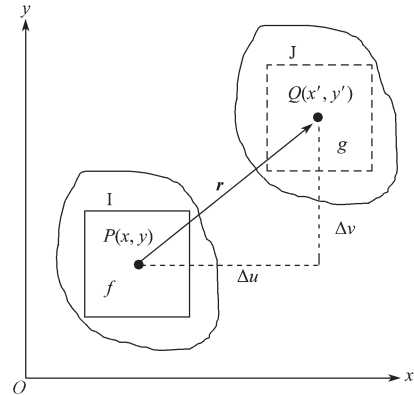


图2 DIC计算原理

Fig. 2 DIC calculation algorithm

图像在MD方向被划分为 m 个子区域，在CD方向被划分为 n 个子区域，每个子区域内包含一个中心点，用中心点位置的变化代表整个子区域位置的变化，变形前与变形后的子区域内中心点集合由矩阵 M 和 N 表示，并定义为^[11-13]

$$M = [P_{ij}], N = [Q_{ij}], i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n,$$

式中： P_{ij} 为图像I（即变形前）中第 i 行第 j 列子区域的中心点； Q_{ij} 为图像J（即变形后）中第 i 行第 j 列子区域的中心点。

中心点 $P(x, y)$ 和 $Q(x', y')$ 之间的位置变换关系如下：

$$x' = x + \Delta u, y' = y + \Delta v.$$

式中： Δu 为单个中心点MD位移变形量；

Δv 为单个中心点CD位移变形量。

子区域 f 和 g 的平均灰度值定义如下：

$$f_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} f(x, y)}{n(S)}, g_m = \frac{\sum_{(i,j) \in S} g(x', y')}{n(S)}.$$

式中： f_m 和 g_m 分别为子区域 f 和 g 内的平均灰度值，是所有灰度值的算数平均值；

$f(x, y)$ 和 $g(x', y')$ 分别为子区域 f 和 g 内的灰度值；

$n(S)$ 为子区域之内的数据点数量。

为了描述变形前与变形后子区域之间的相关性, 引入相关系数 C , 计算公式如下:

$$C(x, y) = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(x, y) - f_m) \cdot (g(x', y') - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(x, y) - f_m]^2 \cdot \sum_{(i,j) \in S} [g(x', y') - g_m]^2}}$$

子区域 f 经过变形得到 g , C 越接近于 1, 表明这两个子区域匹配程度越高, 相关性也越高。在获得较高相关性的条件下, 根据子区域内中心点位置的变化计算图像 MD 与 CD 位移的变形量。

U 和 V 分别为图像经过变形之后, MD 与 CD 位移总变形量。首先计算出图像 I 与图像 J 各自在某一列的长度, 用图像 I 的长度减去图像 J 的长度, 得到该列变形前后的位移变形量, 之后计算图像中所有列 CD 位移变形量之和并除以总列数 n , 得到 CD 位移变形量 V ; MD 位移变形量计算方法类似, 在此不再赘述, 变形过程如图 3 所示。

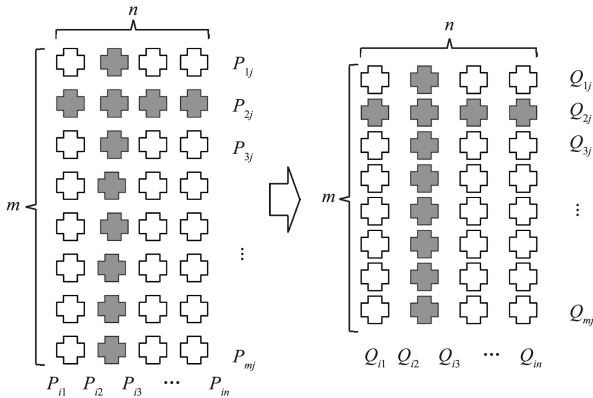


图 3 图像位移变形

Fig. 3 The displacement changing of image

具体位移变形计算如下:

$$V = \Delta v \cdot m =$$

$$\frac{1}{n} \left\{ \sum_{j=1}^n [P_{mj}(x) - P_{1j}(x)] - \sum_{j=1}^n [Q_{mj}(x') - Q_{1j}(x')] \right\},$$

$$U = \Delta u \cdot n =$$

$$\frac{1}{m} \left\{ \sum_{i=1}^m [P_{in}(y) - P_{i1}(y)] - \sum_{i=1}^m [Q_{in}(y') - Q_{i1}(y')] \right\}.$$

通过计算位移变形量与图像原始长度之比得到应变, MD 方向应变与 CD 方向应变之比的反数为泊松比。泊松比计算公式为

$$\nu = -\frac{E_{xx}}{E_{yy}},$$

式中 E_{xx} 、 E_{yy} 分别为 MD 方向和 CD 方向应变, 且 $E_{xx} = \frac{U \cdot k}{d}$, $E_{yy} = \frac{V \cdot k}{l}$, 其中 d 、 l 分别为图像 I 的原始宽度和原始长度, k 为像素位移与真实位移之间的比例关系。

以上所述位移均为像素点位移, 通过尺寸标定将图片像素点位移与真实位移进行转换, 经过计算可得到真实的位移变形值。

2.2 DIC 编程

本研究所有图像处理与数值计算均在 MATLAB 程序中进行, 具体处理流程见图 4。首先是导入图像并处理为灰度图像, 设定图像 I 和图像 J。之后设置图像感兴趣区域 (region of interest, ROI), 以确定变形分析范围。本研究使用正方形网格划分 ROI 区域, 在计算速度和计算精度方面可取得平衡。对图像 I 进行尺寸标定, 使用 MATLAB 程序中等高线命令绘制位移与应变变形图, 分析变化趋势, 最后将计算结果保存为 mat 格式。为验证 DIC 法测试泊松比的准确性, 采用聚丙烯样条进行验证实验, 并与仿真材料数据库进行对比, 结果证明该方法具有较高的可靠性。

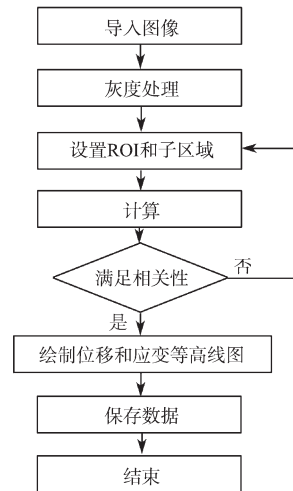


图 4 DIC 编程流程图

Fig. 4 The main flowchart of DIC

3 实验

3.1 样品制备

本研究一共选取 4 组瓦楞纸板 (丹盛包装材料有限公司), 每组测试 3 个样品, 一共 12 个样品, 样品切割成 60 mm × 60 mm 的正方形, 统一用 E、BS、BD、BC 分类命名, 具体见表 1。

表1 瓦楞纸板测试样品分类

Table 1 Classification of test samples of corrugated paperboard

| 类型 | 类型说明 | 厚度 / mm | 各层原纸克重 / (g · m ⁻²) |
|----|------------------|---------|---------------------------------|
| E | E型瓦楞纸板, 3层瓦楞 | 1.78 | 230/140/230 |
| BD | B型瓦楞纸板, 面底不同3层瓦楞 | 3.13 | 250/170/230 |
| BS | B型瓦楞纸板, 面底相同3层瓦楞 | 3.24 | 230/140/230 |
| BC | BC型瓦楞纸板, 5层瓦楞 | 6.96 | 230/120/120/120/230 |

3.2 样品预处理

被测样品均来自同一批次, 并在同一环境下调湿处理 (23 ± 2) °C, (50 ± 5) % RH。对瓦楞纸板喷涂散斑, 使用黑漆喷涂背景层, 然后使用白漆随机喷涂, 形成黑白相间的散斑。使用数码相机 (F-P NIKKOR 18-55 VR, 尼康 D5300) 拍照, 照片分辨率统一设置为 4496×3000 pixel, 相机摆放高度与被测瓦楞纸板平齐, 镜头到试样的距离统一控制为 85 mm。由于瓦楞纸板喷涂散斑后 ROI 区域变暗, 现场采用补光灯 (LED-006A, 斯丹德) 提高现场照明条件, 补光灯色温控制为 3 800 K, 如图 5 所示。

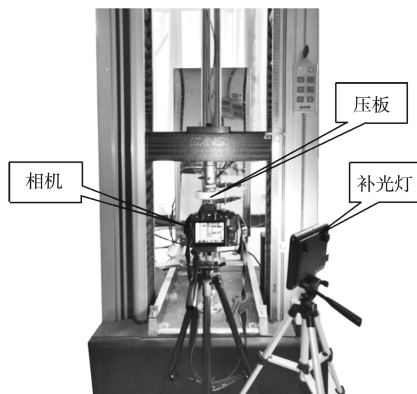
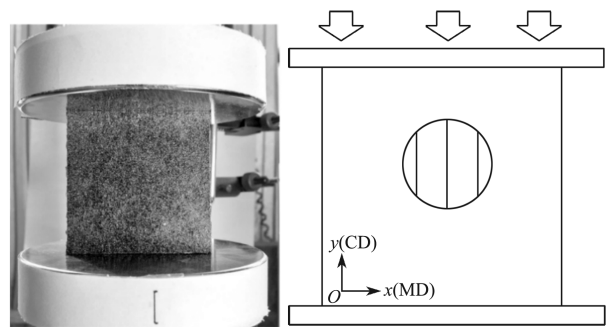


图5 现场测试设备照片

Fig. 5 The picture of test equipment

3.3 静态压缩实验

使用万能测试试验机 (CMT4104, 10 kN) 对瓦楞纸板进行单轴面内静态压缩实验。瓦楞纸板 CD 方向与压缩方向一致, 下压板固定, 上压板施加载荷, 压板速度统一控制为 1 mm/s, 如图 6 所示。首先进行预压实验, 记录载荷峰值时对应的位移与时间, 以确定弹性阶段内的位移区间。瓦楞纸板包含两个弹性阶段, 初始弹性和快速弹性阶段^[12]。选择快速弹性阶段进行等时间间隔拍摄, 瓦楞纸板应力开始快速上升阶段作为初始变形, 即作为图像 I, 选择屈服点前一张照片作为图像 J。



a) 压缩测试照片

b) 压缩测试示意图

图6 瓦楞纸板面内静态压缩图

Fig. 6 Static compression picture of corrugated paperboard under in-plane static compression

4 结果与讨论

4.1 瓦楞纸板的位移变形

对 4 种瓦楞纸板进行面内静态压缩实验, 其位移变形情况分布云图如图 7~10 所示。

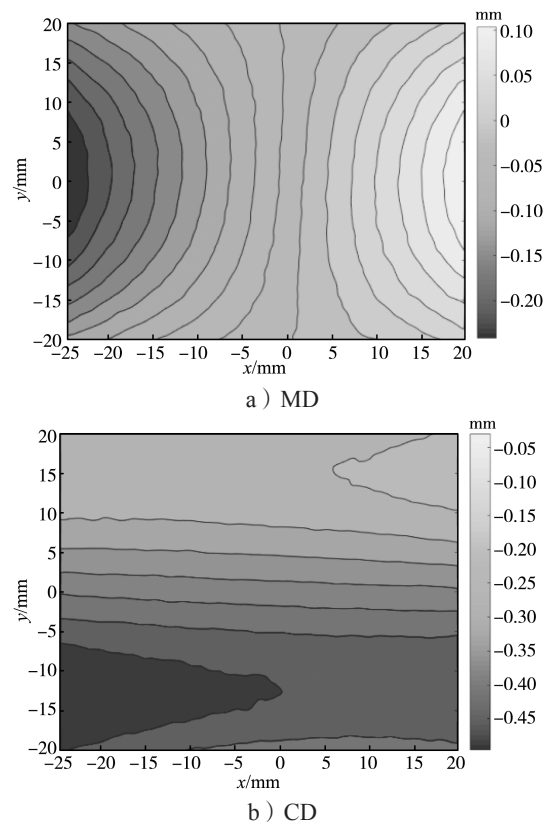
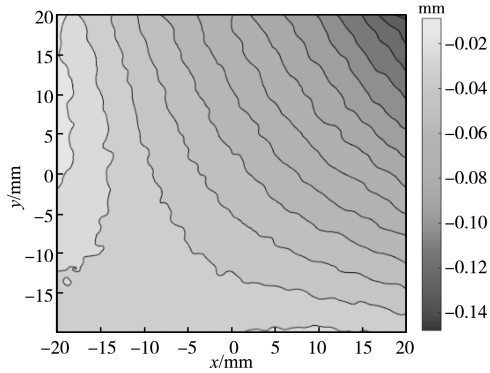


图7 E型瓦楞纸板面内静态压缩位移变形情况

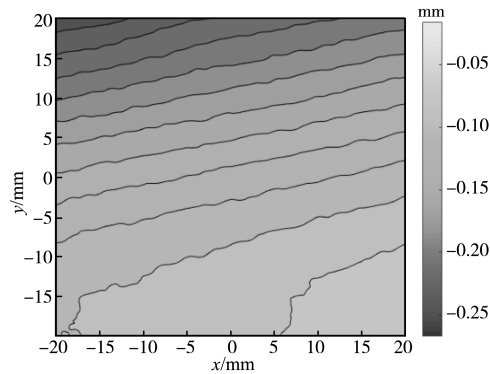
Fig. 7 Displacement changes of E corrugated paperboard under in-plane static compression

由图 7~10 可知: 瓦楞纸板在承受面内载荷时, 位移发生取向变形, MD 大变形区域主要集中在瓦楞

纸板左右两侧边缘部分, 由两端向中间过渡分布。由于左右两侧位移变形方向相反, 导致纸板在压缩过程中向一侧滑移。CD 位移变形统一为负值, 大变形区域集中在瓦楞纸板与万能测试试验机压板接触区域。BD 型瓦楞纸板与 BS 型瓦楞纸板相比, CD 位移呈现一种扭曲非对称变形, 主要原因可能是 BD 型纸板面、底所用的纸张定量不同, 而 BS 型瓦楞纸板面、底层全部使用相同定量的纸张。BC 型瓦楞纸板 CD 出现扭曲变形, 主要原因是 BC 型瓦楞纸板由 B 型与 C 型两种楞形组成, 两种楞形扭曲变形过程不同步。

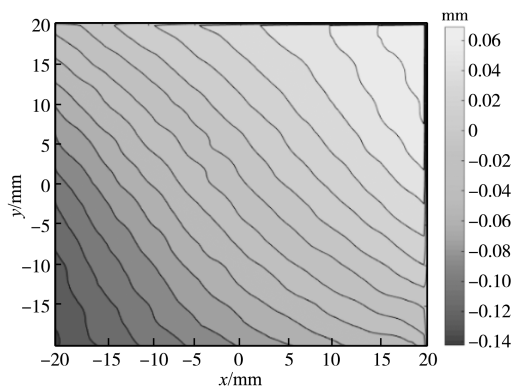


a) MD

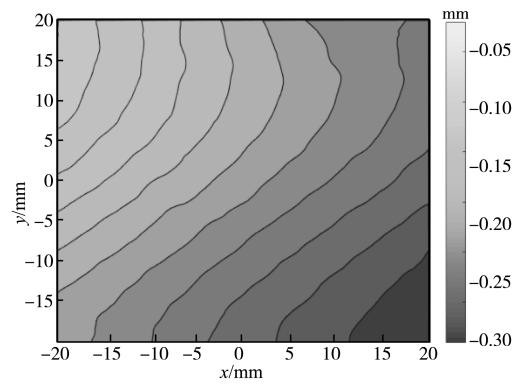


b) CD

图 8 BS 型瓦楞纸板面内静态压缩位移变形情况
Fig. 8 Displacement changes of BS corrugated paperboard under in-plane static compression

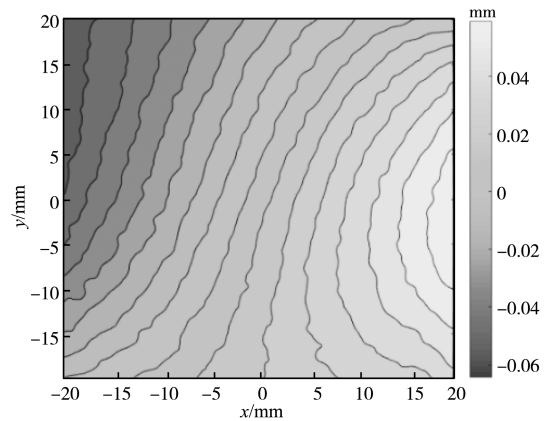


a) MD

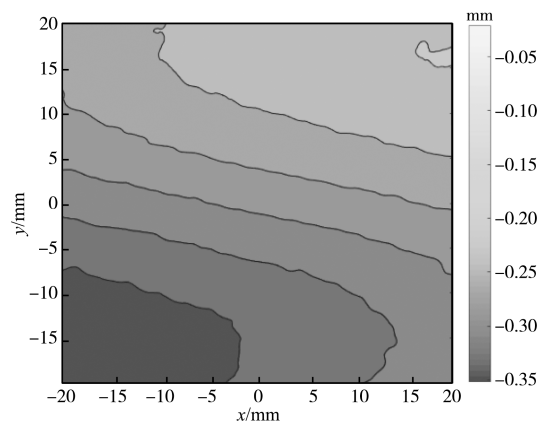


b) CD

图 9 BD 型瓦楞纸板面内静态压缩位移变形情况
Fig. 9 Displacement changes of BD corrugated paperboard under in-plane static compression



a) MD



b) CD

图 10 BC 型瓦楞纸板面内静态压缩位移变形情况
Fig. 10 Displacement changes of BC corrugated paperboard under in-plane static compression

4 种瓦楞纸板的位移变形值如图 11 所示。由图 11 可知: 所有纸板 MD 位移整体小于 CD 位移, 随着纸板厚度增加, MD 位移变形值随之增大。BS 型纸板 CD 位移变形在 4 种瓦楞纸板中最小, 但是 MD

位移变形值最大。与BD型纸板相比,BS型纸板出现差异的主要原因可能是面底使用相同原纸。

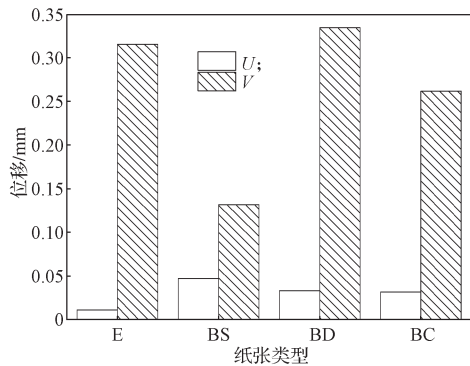


图 11 4种瓦楞纸板位移变形值对比图

Fig. 11 The comparison picture of four corrugated paperboards about displacement changes

4.2 瓦楞纸板的应变变化

对4种瓦楞纸板进行面内静态压缩实验,当瓦楞纸板达到屈服点时的应变分布情况如图12~15所示。

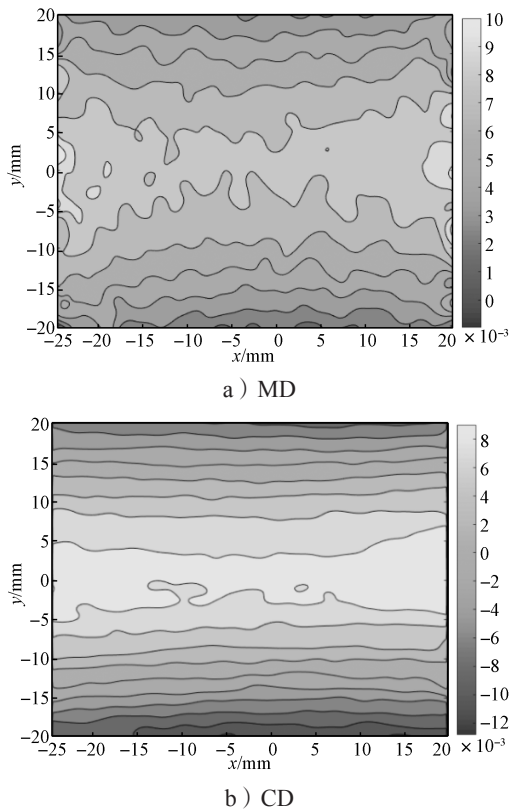


图 12 E型瓦楞纸板面内静态压缩应变变化情况

Fig. 12 Strain changes of E corrugated paperboard under in-plane static compression

由图12~15可知:4种瓦楞纸板压缩时,MD与CD方向应变具有对称性。E型纸板芯层较薄,可等效为一块薄板,应变分布更加集中;MD方向高应变

区域主要集中在水平轴向,并向上下两端逐渐减小,表现出一种膨胀状态;CD方向应变具有明显的对称性,上下两端为负值,中间为正值。造成这种应变分布的主要原因是纸板受压屈曲膨胀变形所致,瓦楞纸板中间纤维向上下两端拉伸,出现正应变。BS、BD、BC型瓦楞纸板的应变分布规律与E型瓦楞纸板类似,但是相比于E型纸板,其它种类纸板的厚度增加,应变分布较为分散,集中并不明显。值得注意的是,BS型瓦楞纸板CD方向应变出现异常(图13b),并非对称分布,可能原因是瓦楞纸板与下压板接触区域发生滑移,导致出现失稳。

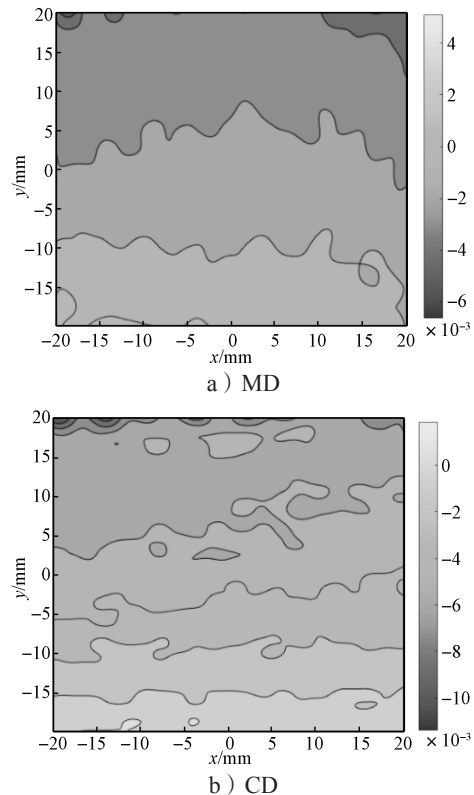
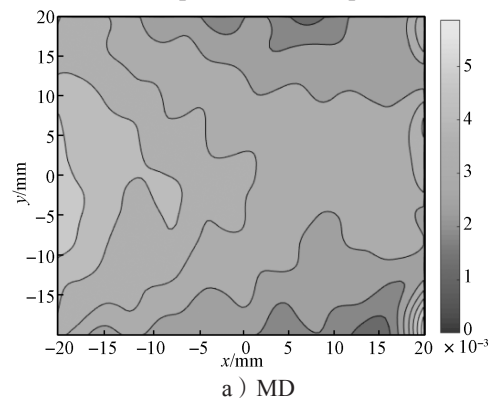


图 13 BS型瓦楞纸板面内静态压缩应变变化情况

Fig. 13 Strain changes of BS corrugated paperboard under in-plane static compression



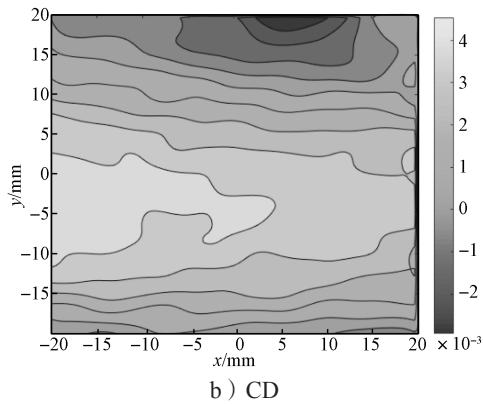


图 14 BD 型瓦楞纸板面内静态压缩应变变化情况

Fig. 14 Strain changes of BD corrugated paperboard under in-plane static compression

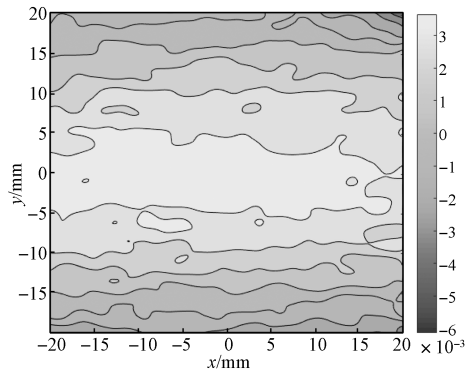
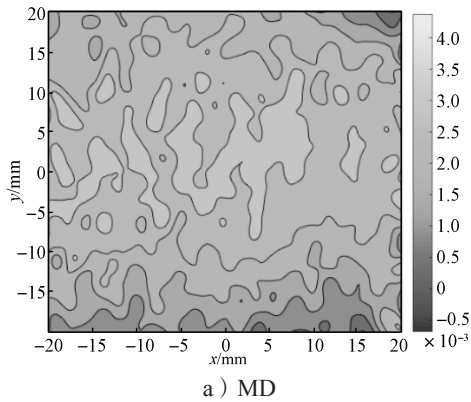


图 15 BC 型瓦楞纸板面内静态压缩应变变化情况

Fig. 15 Strain changes of BC corrugated paperboard under in-plane static compression

4.3 泊松比计算结果

4 种瓦楞纸板泊松比计算结果如表 2 所示。由表 2 可知：所有结果均为负值，表明纸板面内静态压缩，沿着 y 方向承受面外载荷，在 xOy 平面内出现负泊松比现象，即纸板在受压缩过程中 MD 出现收缩变形。负泊松比材料也称为拉胀材料，即在拉伸过程中 MD 膨胀，压缩过程 MD 收缩^[14-16]。BS 型瓦楞纸板 MD

与 CD 方向应变均为负值，而其它 3 组纸板应变值均为正值，具体原因并不清楚，有待进一步研究。

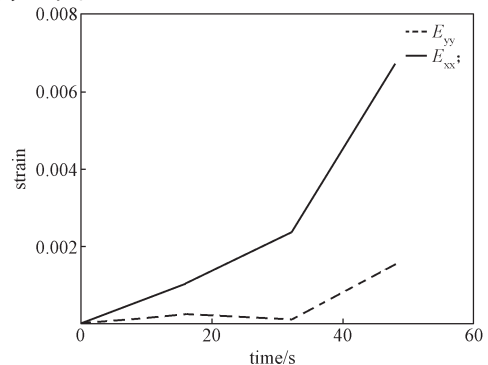
表 2 4 种瓦楞纸板泊松比计算结果

Table 2 The Poisson's ratio of corrugated paperboard

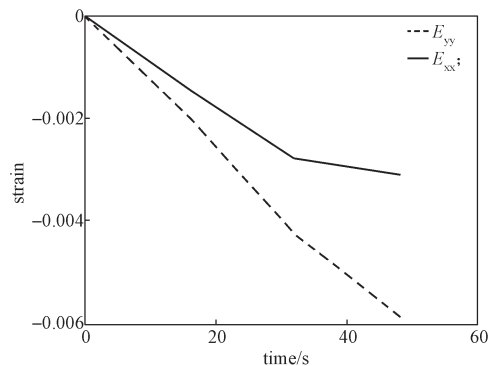
| 纸板类型 | 样品编号 | E_{xx} | E_{yy} | ν | ν 的平均值 |
|------|------|----------|----------|-------|------------|
| E | 1 | 0.005 0 | 0.001 2 | -4.17 | |
| | 2 | 0.005 8 | 0.001 4 | -4.17 | -3.86 |
| | 3 | 0.006 8 | 0.002 1 | -3.24 | |
| BS | 1 | -0.003 0 | -0.005 8 | -0.52 | |
| | 2 | -0.001 3 | -0.004 3 | -0.29 | -0.42 |
| | 3 | -0.001 5 | -0.003 3 | -0.45 | |
| BD | 1 | 0.005 5 | 0.002 8 | -1.96 | |
| | 2 | 0.005 4 | 0.003 3 | -1.64 | -2.09 |
| | 3 | 0.004 0 | 0.001 5 | -2.67 | |
| BC | 1 | 0.002 5 | 0.001 3 | -1.92 | |
| | 2 | 0.002 2 | 0.001 7 | -1.29 | -1.49 |
| | 3 | 0.004 4 | 0.003 5 | -1.26 | |

4.4 瓦楞纸板变形机理

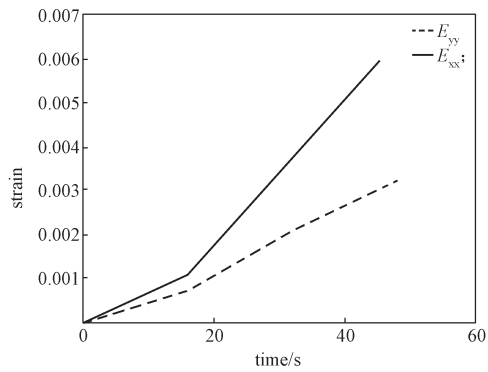
4 种瓦楞纸板应变随时间的变化如图 16 所示。由图可知：MD 方向应变与 CD 方向应变都随时间的变化而增大。E、BD、BC 型瓦楞纸板 MD、CD 方向应变都为正值，且 MD 方向应变值大于 CD 方向应变值；但是 BS 型瓦楞纸板 MD 与 CD 方向应变值为负，且 MD 方向应变绝对值小于 CD 方向应变绝对值，应变随着时间变化而增大，但总体变形趋势与其它 3 组保持一致。



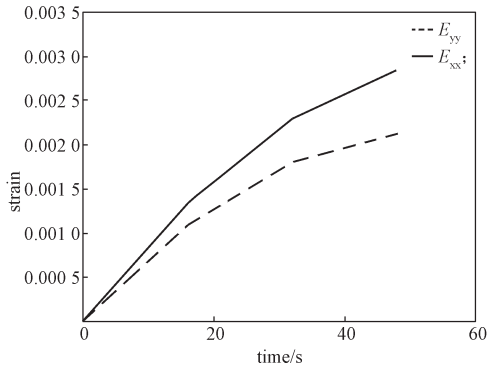
a) E 型



b) BS 型



c) BD 型

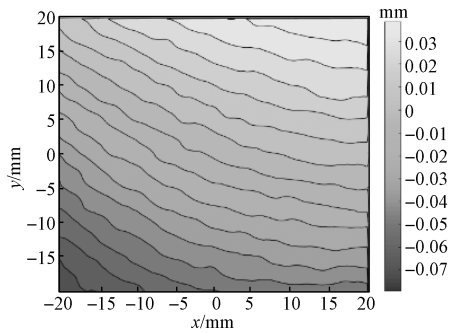


d) BC 型

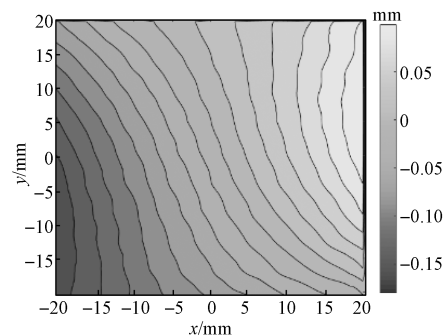
图 16 4 种瓦楞纸板应变随时间的变化趋势

Fig. 16 The strain change trend of four corrugated paperboards varied with time

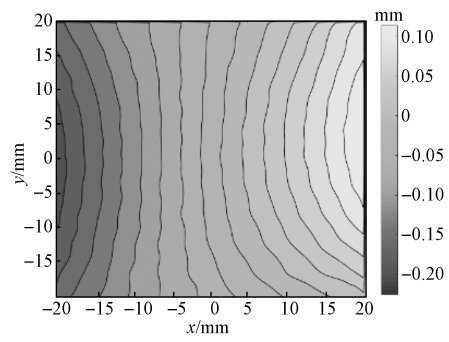
以 BD 型瓦楞纸板为例, 分析瓦楞纸板扭曲变形机理。该瓦楞纸板位移随时间的变化如图 17~19 所示。



a) 开始阶段

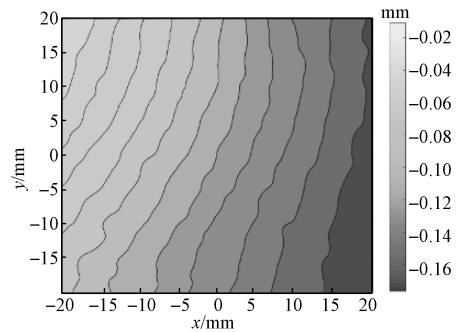


b) 变形阶段

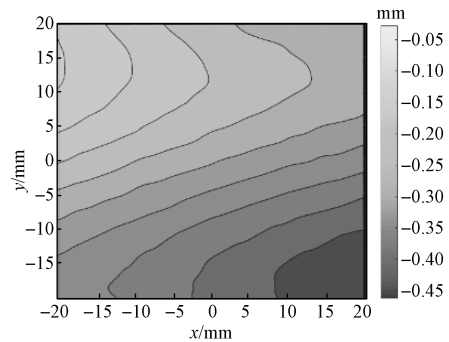


c) 结束阶段

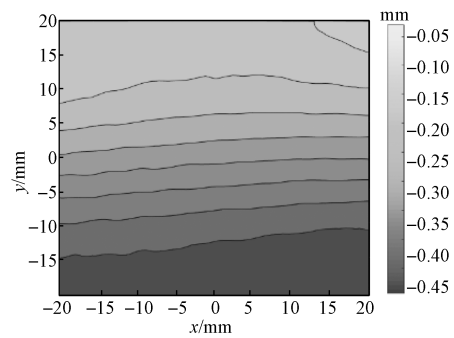
图 17 BD 型瓦楞纸板 MD 方向位移随时间的变化图
Fig. 17 BD corrugated paperboard MD direction displacement changes with time



a) 开始阶段



b) 变形阶段



c) 结束阶段

图 18 BD 型瓦楞纸板 CD 方向位移随时间的变化图
Fig. 18 BD corrugated paperboard CD direction displacement changes with time

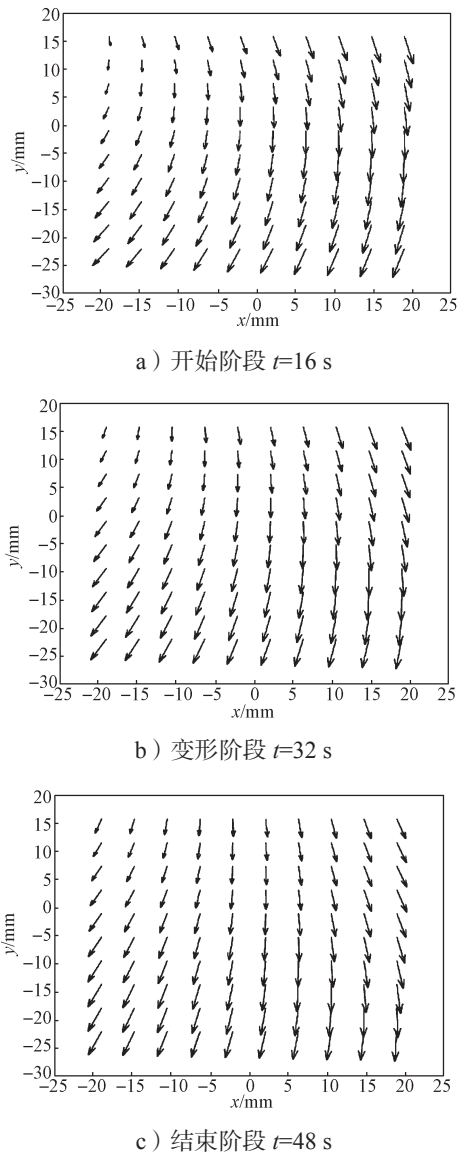


图 19 BD 型瓦楞纸板整体位移随时间的变化图

Fig. 19 BD corrugated paperboard total displacement changes with time

由图 17 可以看出: MD 变形最开始出现在左下角, 随着载荷继续加大, 大变形区域转向左右两侧, 并沿着垂线对称分布。由图 18 可以看出: CD 变形出现在右下角, 随着载荷继续加大, 上下两端变形区域反向运动, 最终沿着垂线方向呈现梯度分布。图 19 是整体位移变形趋势图, 包含了 MD 与 CD 方向位移变形, 分为开始阶段、变形阶段和结束阶段。开始阶段瓦楞纸板整体向左侧弯曲直到变形结束阶段, 左右两侧变形一致并达到平衡状态。

BD 型瓦楞纸板应变随时间变化如图 20~21 所示。由图 20 可知, MD 方向应变最开始出现在左侧并向

右侧扩散, 中间区域得到加强。由图 21 可知, CD 方向应变最开始出现在左侧边缘并向上下两端传递, 中间水平区域同样得到强化; 无论是 MD 还是 CD, 中央狭长条带区域应变不断得到强化。

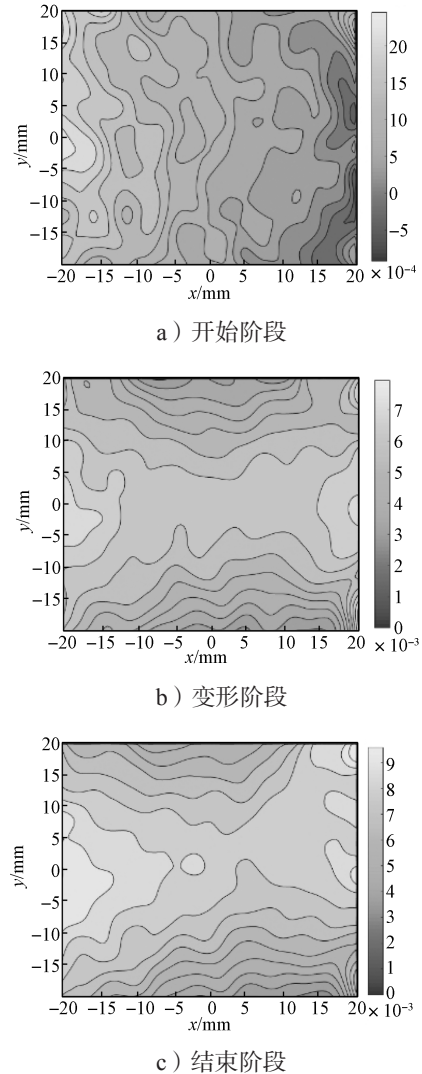
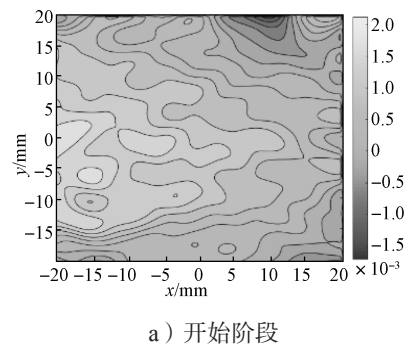


图 20 BD 型瓦楞纸板 MD 方向应变随时间的变化图
Fig. 20 MD direction strain changes with time about BD corrugated paperboard



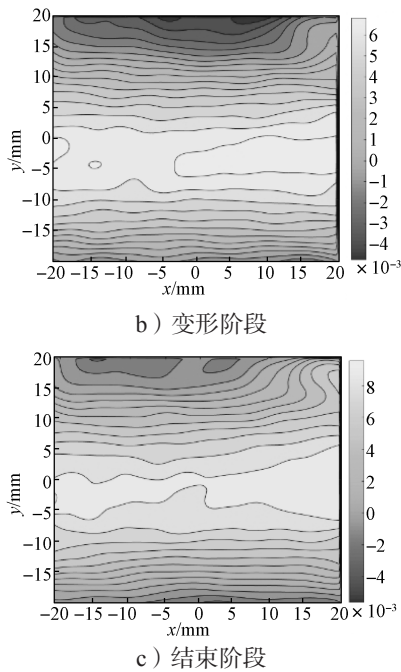
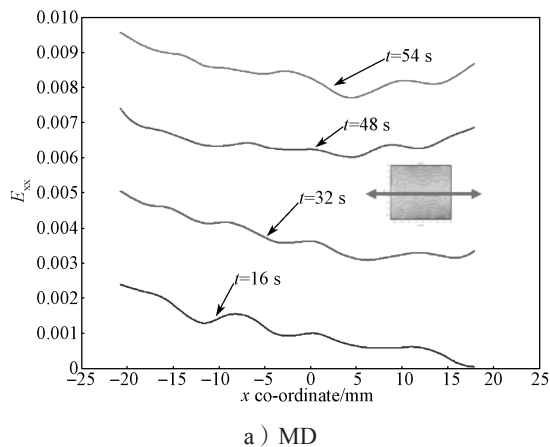


图 21 BD 型瓦楞纸板 CD 方向应变随时间的变化图

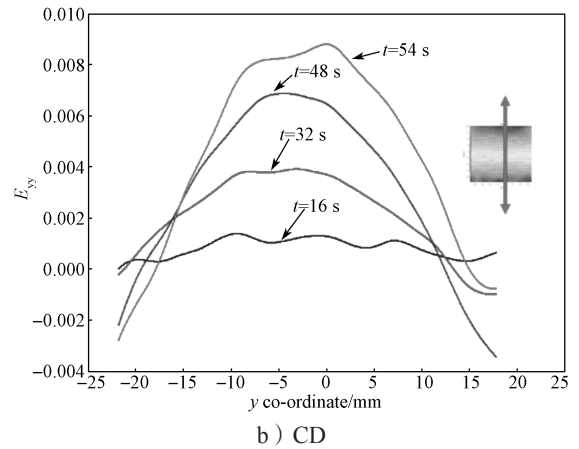
Fig. 21 CD direction strain changes with time about BD corrugated paperboard

BD 型瓦楞纸板在压缩过程中，提取 MD 与 CD 位置的应变值，绘制应变随时间分布图，如图 22 所示，其中红色双箭头表示为提取应变所在位置。由图 22 可知：随着压缩过程持续进行，MD 方向应变与 CD 方向应变得到强化；MD 左上角应变值整体高于右下角，CD 方向应变中央位置高于瓦楞纸板边缘两侧。这表明瓦楞纸板在压缩过程中，MD 方向应变向一侧集中，CD 方向应变向水平中央区域不断强化，直至纸板发生滑移翻转。

出现负泊松比主要与瓦楞纸板制造工艺有关。芯层在起皱过程中楞型并非标准的 UV 形，而是沿着 MD 方向具有一定的倾角，如图 23 所示。



a) MD



b) CD

图 22 BD 型瓦楞纸板平均应变随时间变化

Fig. 22 BD corrugated paperboard average strain changes with time

瓦楞纸板在受压过程中，首先会沿着倾角最先达到屈服，表现在 MD 方向发生侧向滑移，致使瓦楞纸板两端分别出现正变形与负变形区域。CD 方向变形往往开始于侧边缘的某个角点，并逐渐扩大直至纸板发生屈曲，瓦楞纸板中央区域纤维沿着轴向膨胀拉伸，对应区域产生正应变（见图 24），这与图 22 的结果相符合。当然，关于瓦楞纸板出现负泊松比的原因还有待进一步研究。

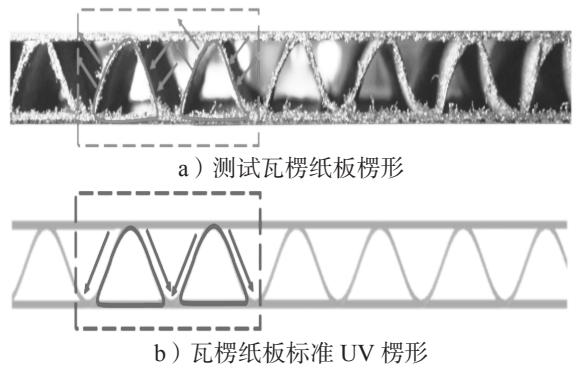


图 23 瓦楞纸板测试楞形与标准 UV 楞形对比

Fig. 23 Comparison between test corrugated shape and standard UV corrugated shape

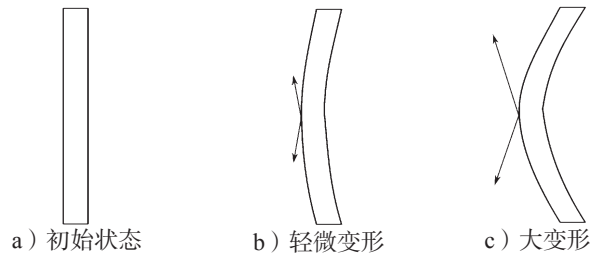


图 24 瓦楞纸板弯曲变形示意图

Fig. 24 Schematic diagram of bending deformation of corrugated paperboard

4.5 泊松比计算影响因素

瓦楞纸板泊松比测试过程受多种因素影响, 导致计算结果存在一定偏差, 具体包括以下几个方面:

1) 瓦楞纸板自身的差异性。瓦楞纸板是一种多相复合体结构, 面层提供抗弯刚度, 芯层提供剪切刚度, 面层与芯层通过胶黏剂组合成三明治夹芯结构^[17], 主要成分除了纤维本身之外, 还有各种化学助剂、填料以及纸板之间的胶黏剂。瓦楞原纸在抄造过程中, 纤维从流浆箱喷射而出顺着网布扩展, 形成了 MD 和 CD 两个纤维流向, 纤维在纸浆当中的湍流产生更多的不确定性。国内瓦楞纸板所用原纸大多是由废旧纸箱经过二次抄造而成, 纤维经过多次剪切和分丝帚化, 整体形态产生了很大变化, 增加了泊松比的分析误差。

2) 瓦楞纸板制造过程的差异性。瓦楞纸板的施胶、瓦楞成型以及环境温湿度都会对其力学性能产生影响。

3) 瓦楞纸板裁切过程的差异性。切纸机在走刀过程中并不能保证边缘平齐, 在 4 个边角处尤其明显。

4) 瓦楞纸板仓储和运输环境的差异性。瓦楞纸板在仓储以及运输过程中, 已经对纸板施加了外界载荷, 外界载荷会有差异。

5) 图像获取以及处理过程的差异性。例如在拍照过程中镜头畸变、外界环境的微小振动、参数设置等难以保证每次测试数据准确无误。

为了提高测量结果的准确性, 应从以下两个方面加以改进: 1) 改善现有测试仪器设备, 采用多机位、多角度同时测量瓦楞纸板泊松比。2) 增加测试样本数据量, 降低样品误差。

5 结论

本文研究了瓦楞纸板面内静态压缩条件下的泊松比问题, 采用 DIC 法测试 4 种瓦楞纸板面内压缩泊松比值, 可得如下结论:

1) 将 DIC 法用于测试聚丙烯样条泊松比, 将应变片测量值和 Ansys 仿真材料数据库进行对比, 二者较为接近, 证明了 DIC 法测量泊松比较为可靠;

2) 瓦楞纸板受面内压缩, E、BS、BD、BC 型 4 种瓦楞纸板泊松比值为负, 分别为 -3.86、-0.42、-2.09 和 -1.49;

3) 瓦楞纸板出现负泊松比, 主要与瓦楞制备方式以及纤维在压缩过程中发生取向变形有关。通过直

接测定瓦楞纸板面内压缩的泊松比值, 为瓦楞纸板泊松比测试提供了一种新方法, 可为包装材料的选择和仿真分析提供参考。

参考文献:

- [1] PATHARE P B, OPARA U L. Structural Design of Corrugated Boxes for Horticultural Produce: A Review[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 125: 128-140.
- [2] GREAVES G N, GREER A L, LAKES R S, et al. Poisson's Ratio and Modern Materials[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(11): 823-837.
- [3] CHEN Q. Research on Compressive Performance of Honeycomb Paperboard[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 44/45/46/47: 2818-2821.
- [4] 王鹤腾, 高德, 常江. 基于非线性有限元的瓦楞纸板静态压缩性能仿真研究[J]. *包装工程*, 2006, 27(5): 1-3.
WANG Heteng, GAO De, CHANG Jiang. Research on Simulation of Static Compression Performance of Corrugated Board with Nonlinear Finite Element[J]. *Packaging Engineering*, 2006, 27(5): 1-3.
- [5] FADIJI T, AMBAW A, COETZEE C J, et al. Application of Finite Element Analysis to Predict the Mechanical Strength of Ventilated Corrugated Paperboard Packaging for Handling Fresh Produce[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 174: 260-281.
- [6] HUA G J, SHEN Y, ZHAO D, et al. Experimental and Numerical Analysis of the Edge Effect for Corrugated and Honeycomb Fiberboard[J]. *Strength of Materials*, 2017, 49(1): 188-197.
- [7] STENBERG N, FELLERS C. Out-of-Plane Poisson's Ratios of Paper and Paperboard[J]. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2002, 17(4): 387-394.
- [8] ZHU Q Q, LI D Y, HAN Z Y, et al. Mechanical Properties and Fracture Evolution of Sandstone Specimens Containing Different Inclusions Under Uniaxial Compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 115: 33-47.
- [9] ZHOU X P, WANG Y T, ZHANG J Z, et al. Fracturing Behavior Study of Three-Flawed Specimens by Uniaxial Compression and 3D Digital Image Correlation: Sensitivity to Brittleness[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(3): 691-718.
- [10] DEL REY CASTILLO E, ALLEN T, HENRY R, et al. Digital Image Correlation (DIC) for Measurement of Strains and Displacements in Coarse, Low Volume-

- Fraction FRP Composites Used in Civil Infrastructure[J]. *Composite Structures*, 2019, 212: 43–57.
- [11] 曹小龙, 谢勇, 毕中臣, 等. 应用数字图像相关法测定瓦楞原纸的泊松比[J]. *包装学报*, 2011, 3(3): 31–35.
- CAO Xiaolong, XIE Yong, BI Zhongchen, et al. Use of Digital Image Correlation Method for Poisson's Ratio of Corrugated Paper[J]. *Packaging Journal*, 2011, 3(3): 31–35.
- [12] KUEH C S L, DAHM K, EMMS G, et al. Digital Image Correlation Analysis of Vertical Strain for Corrugated Fiberboard Box Panel in Compression[J]. *Packaging Technology and Science*, 2019, 32(3): 133–141.
- [13] CAO X L, BI Z C, WEI X, et al. Determination of Poisson's Ratio of Kraft Paper Using Digital Image Correlation[J]. *Mechanical Engineering and Technology*, 2012, 125: 51–57.
- [14] 任鑫, 张相玉, 谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展[J]. *力学学报*, 2019, 51(3): 656–687.
- REN Xin, ZHANG Xiangyu, XIE Yimin. Research Progress in Auxetic Materials and Structures[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(3): 656–687.
- [15] YANG C H, VORA H D, CHANG Y. Behavior of Auxetic Structures Under Compression and Impact Forces[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2): 1–12.
- [16] ZHAO L, QIAN X M, SUN Y L, et al. Ballistic Behaviors of Injection-Molded Honeycomb Composite[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(20): 14287–14298.
- [17] WANG D M, BAI Z Y. Mechanical Property of Paper Honeycomb Structure Under Dynamic Compression[J]. *Materials & Design*, 2015, 77: 59–64.

(责任编辑: 邓光辉)

Poisson's Ratio Calculation of Corrugated Paper Board Under in-Plane Static Compression Using Digital Image Correlation

BAI Hailong, CHEN Nanning, LIU Zhenghao, XIE Yong

(College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The method of direct determination of Poisson's ratio about corrugated paperboard is rarely reported currently. However, traditional Poisson's ratio test method is difficult to meet the test requirements. In view of the shortcomings of traditional methods, digital image correlation method was adopted to measure the Poisson's ratio of corrugated board under in-plane static compression. The deformations were recorded of four kinds of corrugated board under in-plane compression. The obtained deformation photos were imported into MATLAB program for processing, so as to obtain the displacement and strain distribution for calculating the Poisson's ratio under in-plane static compression. The results showed that Poisson's ratios of E, BS, BD and BC corrugated paperboards were -3.86 , -0.42 , -2.09 and -1.49 respectively. The showing of negative Poisson's ratio was mainly related to craft of corrugated paperboards and orientation deformation of fiber during compression. By directly measuring Poisson's ratio of corrugated paperboards under in-plane static compression, a new way to get Poisson's ratio of corrugated paperboard was provided. In addition, it could be of reference to packaging material selection and simulation analysis.

Keywords: digital image correlation; corrugated paper board; Poisson's ratio