

截面结构对纸箱抗压强度的影响及定量表征

刘强^{1,2}, 钱静^{1,2}, 范慧丽¹

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省先进食品装备制造技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: **目的** 研究截面结构的改变对多边形瓦楞纸箱抗压强度的影响规律。**方法** 改变垂直侧板数量、边长、相邻侧板围成角度进行抗压试验, 分析多边形纸箱变形失效过程及抗压强度的变化规律, 建立以独立的垂直侧板边长代替周长的计算模型。**结果** 当其他影响纸箱抗压强度的条件一定时, 侧板数量的增多会使抗压强度值增大。八边形瓦楞纸箱的侧板边长越接近正多边形、围成角度越接近 135° 时, 抗压强度越大。**结论** 瓦楞纸箱变形失效本质是由侧板结构受压后整体失稳造成的, 所提出的计算模型能较真实地反映纸箱受压的力学特性, 且能有效表征多边形瓦楞纸箱抗压强度。

关键词: 多边形; 瓦楞纸箱; 截面结构; 抗压强度

中图分类号: TB484.1; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)05-0033-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.007

Influence of Section Structure on the Compressive Strength of the Box and Quantitative Characterization

LIU Qiang^{1,2}, QIAN Jing^{1,2}, FAN Hui-li¹
(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence rule of the changed section structure on the compressive strength of polygonal corrugated box. The compression test was done by changing the number of vertical side plates, side length, and enclosed angle of adjacent side plates. The deformation failure process and the change law of compressive strength of the polygonal box were analyzed. The calculation model with its side length of independent vertical side plate replacing the perimeter was established. When other conditions that affected the compressive strength of the box remained constant, the compressive strength was increased with the increase of the number of side plates. When the number of side plates was equal to that of the corrugated box, the side length of side plate was closer to the regular polygon, the enclosed angle was closer to 135°, and the compressive strength was greater. The deformation failure of the corrugated box is essentially caused by the overall instability of the side plate structure under stress. The proposed calculation model can more accurately reflect the mechanical property of the box under stress and effectively characterize the compressive strength of the polygonal corrugated box.

KEY WORDS: polygonal; corrugated box; section structure; compressive strength

瓦楞纸箱作为一种绿色环保的包装容器, 因质量轻、易加工、可折叠等优越性能, 被广泛应用于运输包装中^[1-2]。抗压强度的大小直接影响着被保护商品在流通过程中的安全性, 也是用户在选购纸箱时的重要衡量指标, 而影响纸箱抗压强度的因素较多, 除原材料自身属性、生产制造过程、流通环境外^[3-5], 结

构设计也是其中重要一环^[6-7]。

在结构设计中, 通过改变截面形状, 例如使普通四边形截面结构变成截面呈八边形结构, 从而提高管状结构的抗压能力是一种常见方法, 这种方法在纸箱领域应用较少, 但在建筑领域应用较为广泛。其中 Morishita 等研究了轴压作用下圆钢管混凝土柱、方钢

收稿日期: 2017-10-01

作者简介: 刘强 (1990—), 男, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

通信作者: 钱静 (1968—), 女, 江南大学教授, 主要研究方向为运输包装、包装设计等。

管混凝土柱和八边形截面钢管混凝土柱粘结强度和滑移之间的关系^[8]；查晓雄通过对核心混凝土有效约束面积的折剪，将多边形的不均匀约束力转化为均匀约束力，推导出多边形截面混凝土承载力计算公式^[9]。针对侧板对瓦楞纸箱的承压性能，Singh 等分析了侧板结构上开孔位置、面积、形状对纸箱抗压强度的影响^[10]；李兰芬提到通过切角处理，可提高纸箱抗压强度约 31%^[11]；李洪贵等通过对比试验证实异形结构纸箱能提高抗压强度^[12]；王悦等探讨了有底无盖型八边形纸箱底盛装不同物料时产生的胀鼓现象^[13]。关于多边形纸箱侧板结构对抗压强度的影响规律及定量表征的研究鲜有报道。这里通过改变垂直侧板数量、边长及相邻侧板围成角度，研究不同侧板结构下多边形瓦楞纸箱抗压强度的变化规律，在试验基础上提出适用于多边形瓦楞纸箱的抗压强度计算模型，表征两者间的定量关系，对今后的瓦楞纸箱设计及抗压强度计算具有一定借鉴意义。

1 试验

1.1 材料与设备

试验材料：样品为宜兴某公司提供的 293/240-150/1C 单层瓦楞纸板（楞型为 C 外面纸，内面纸芯纸定量分别为 293, 240, 150 g/m²），边压强度 P_m 为 4383 N/m，厚度 d 为 4.56 mm。主要设备：DCZ-2516 型纸箱纸盒电脑打样机，澳洲温科；恒温恒湿实验室，GT-700-DS 型电脑伺服纸箱抗压仪，台湾高铁；CT-300A 型压缩强度测定仪，轻通博科。

1.2 方案与条件

为避免箱盖、箱底等结构干扰，试验中纸箱均设置为无底无盖管式结构。接头部分预留 10 mm 用于施胶粘接，为避免对侧板承压性能干扰，接头部分瓦楞结构用滚轮压扁处理，该部分只起粘贴作用而无承压能力。多边形纸箱平面结构见图 1。为使多边形纸箱按照设定形状受压，每个样品均有配套形状定形板，定形板能确保纸箱按照预定形状受压，且对侧板变形无明显干扰。多边形纸箱与定形板见图 2。

当其他影响纸箱抗压强度条件一定时，保持周长 $C=840$ mm，箱高 $H=200$ mm，通过控制变量法，每次改变侧板数量、边长、相邻侧板围成角度的其中 1 个变量，探讨抗压强度变化规律。



图 1 多边形纸箱侧板平面展开
Fig.1 Plane spreading of the polygonal box side plates

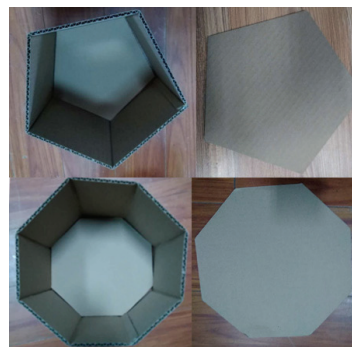


图 2 多边形纸箱与定形板
Fig.2 The polygonal box and the shape board

1) 在探讨侧板数量对抗压强度的影响试验中，改变垂直侧板数量形成截面呈正四边形、五边形、六边形、七边形、八边形的瓦楞纸箱，见图 3。

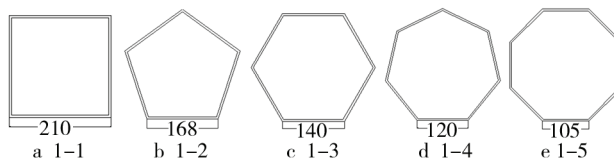


图 3 截面形状为不同的正多边形纸箱
Fig.3 The polygon corrugated box with different structure

2) 在探讨侧板边长对抗压强度的影响试验中，以八边形纸箱为例，保持 4 个直边尺寸相同、4 个斜边尺寸相同、底部直边与斜边围成角度为 135°，其中与底部直边相连的斜边尺寸以 15 mm 为步进值进行改变，见图 4。

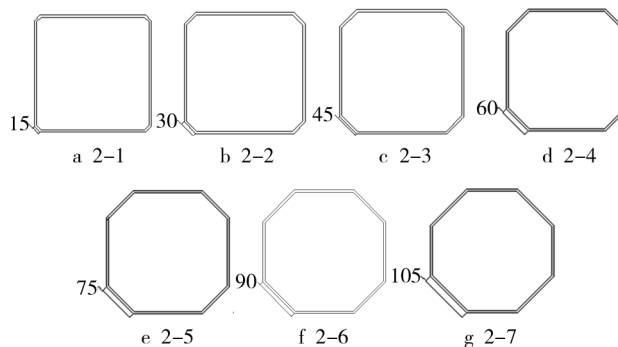


图 4 斜边长度不同的八边形纸箱
Fig.4 The cotagon corrugated box with different size of bevel edge

3) 在探讨侧板围成角度对抗压强度的影响试验中，保持斜边尺寸与横边尺寸相等，底部直边与相邻斜边围成的底边夹角为 θ ，以 15° 为步进值进行改变，见图 5。

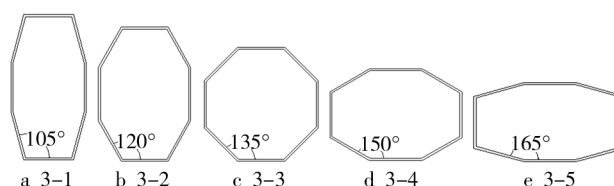


图 5 底边夹角不同的八边形纸箱
Fig.5 The cotagon corrugated box with different bottom angle

所有样品参照 GB/T 4857.2—1992 在温度为 $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(50 \pm 2)\%$ 的恒温恒湿实验室预处理 24 h，并在该温湿度环境下进行抗压测试，样品均采用平行试验方式，试验中抗压强度为 5 次试验均值。

2 结果与分析

2.1 试验现象分析

多边形瓦楞纸箱所受垂直载荷增大到一定值时，箱体侧板部分将出现“弯鼓现象”，此时每个侧板中部承载能力将减小，但相邻侧板垂直边附近仍能保持平直，多边形纸箱依旧具有一定的承载能力。当载荷继续增大，相邻侧板围成的角结构发生破坏，即侧板结构受压后整体失稳造成纸箱最终被压溃失效，见图 6。



图 6 多边形瓦楞纸箱受压失效

Fig.6 Failure of polygonal corrugated box under compression

2.2 试验数据分析

1) 侧板数量对抗压强度的影响见图 7。当侧板数量从 4 增加到 8 时，抗压强度从 3123 N 增大到 4480 N，增大了 1357 N，强度提高了 43%。这表明当其他影响纸箱抗压强度的条件都一定时，周长相同的多边形纸箱的抗压强度并不相等，而是随着侧板数量的增多呈现增大趋势。

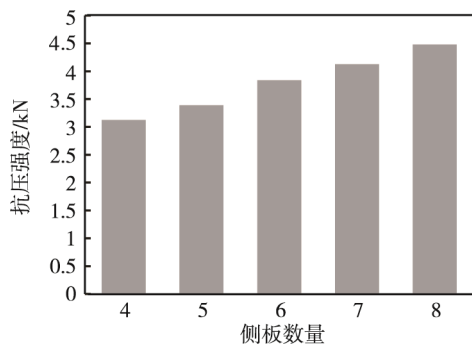


图 7 抗压强度随侧板数量变化结果

Fig.7 The result of compressive strength varying with the number of side plates

2) 侧板边长对抗压强度的影响见图 8。当斜边尺寸从 15 mm 增加到 105 mm 时，抗压强度从 3895 N

增加到 4480 N，提高约 15%。这表明当其他影响纸箱抗压强度的条件都一定时，周长相同的瓦楞纸箱即使侧板数量相同，抗压强度也有所差异，且当八边形纸箱截面形状越接近正八边形时，其抗压强度最大。

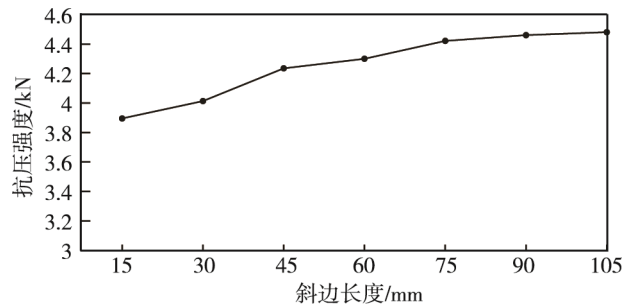


图 8 抗压强度随斜边边长变化结果

Fig.8 The result of compressive strength varying with different sizes of bevel edge

3) 相邻侧板围成角度对抗压强度的影响见图 9。当相邻侧板围成角度从 105° 增加到 135° 时，纸箱抗压强度在 4365~4480 N 的范围内变化，仅增大 115 N 左右，可见角度在该范围变化时对抗压强度的影响不显著。这表明当其他影响纸箱抗压强度的条件一定，八边形纸箱的周长、侧板数、侧板边长均相同，其相邻侧板围成角度为 135° 时的承压能力较强。

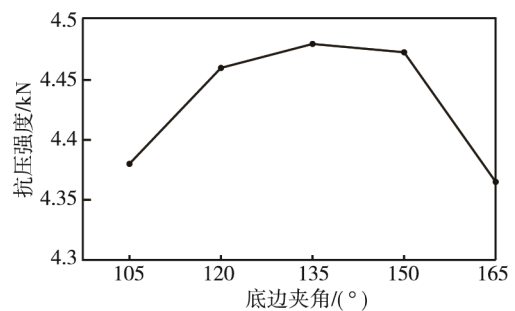


图 9 抗压强度随底边夹角变化结果

Fig.9 The result of compressive strength varying with different bottom angles

综合试验结果可知，当其他影响纸箱抗压强度的条件一定时，周长相同的多边形截面纸箱其抗压强度值随着侧板数量、边长、围成角度的变化会发生规律性改变，其中侧板数量、边长变化对强度的影响较为显著。传统的经验公式（如凯里卡特公式、马基公式等）以周长作为度量的计算方法无法表征纸箱周长相同情况下侧板数量、边长、围成角度改变对抗压强度的影响，因此在计算多边形纸箱抗压强度时应寻找一种新的计算模型。

2.3 多边形纸箱抗压强度的定量表征

多边形瓦楞纸箱在受到自顶向下的垂直载荷时，这部分载荷实质上被纸箱各侧板所共同分担^[14-15]，并且侧板结构受压后整体失稳导致纸箱最终被压溃。由此，可将纸箱总载荷看作各个侧板所分担的载荷累

加效应, 若将瓦楞纸板简化为正交各项异性的薄板, 相邻侧板连接简化为简单支撑边, 结果见图 10。

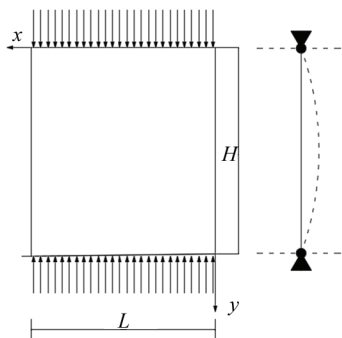


图 10 侧板受压模型简化

Fig.10 Simplification of the side plate compression model

设 P_{Ln} 为边长为 L 的第 n 个侧板在纸箱压溃失效时所承受的抗压强度, P_{zn} 为对应侧板压溃时单位长度平均载荷, 则对于多边形纸箱的抗压强度 P 可表示为:

$$P = \sum_1^n P_{Ln} = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} + \dots + P_{Ln} \quad (1)$$

$$P_{Ln} = L_n P_{zn} \quad (2)$$

参照 Norris 与 Mark 等对于正交各向异性材料结构稳定性手册^[16-17]纸箱压溃时单位长度平均载荷 P_{zn} 与纸板临界载荷 P_{cr} 、边压强度 P_m 存在幂函数关系, 其中临界载荷 P_{cr} 可由板壳理论确定:

$$P_{zn} = c P_m^b P_{cr}^{1-b} \quad (3)$$

$$P_{cr} = K \sqrt{D_x D_y} / L_n^2 \quad (4)$$

式中: c, b 为参数; K 为翘曲系数; D_x, D_y 分别为瓦楞纸板在 x, y 方向的抗弯刚度。将式 (2—4) 代入式 (1), 结合 Mckee^[18] 提出抗弯刚度 D_x, D_y 与边压强度 P_m 和厚度 d 的关系, 见式 (5), 并令常数项 $cK^{1-b} = \beta$, 得到任意多边形抗压强度计算模型 (6)。

$$\sqrt{D_x D_y} = A P_m d^2 \quad (5)$$

$$P = \sum_1^n P_{Ln} = \beta P_m d^{2-2b} (L_1^{2b-1} + L_2^{2b-1} + \dots + L_n^{2b-1}) \quad (6)$$

式中: 边压强度、厚度共同表征瓦楞纸板本身材料属性对抗压强度影响; 侧板数量、边长表征截面形状对抗压强度影响。将式 (6) 取对数结合实验数据进行回归分析, 并代入纸板参数得模型系数 $\beta=5.95, b=0.75$, 则该试验中多边形纸箱抗压强度计算模型可表征为:

$$P = \sum_1^n P_{Ln} = 5.95 P_m d^{0.5} \sum_1^n L_n^{0.5} \quad (7)$$

这是一种通用模型, 不同侧板数量与边长的纸箱可进一步具体化, 如第 1 组试验中正多边形纸箱抗压强度可用式 (8) 表征, 第 2 组试验中八边形纸箱可用式 (9) 表征:

$$P = 5.95 n P_m d^{0.5} L^{0.5} \quad (8)$$

$$P = 23.8 P_m d^{0.5} (L^{0.5} + W^{0.5}) \quad (9)$$

式中: W 为斜边边长。

若进一步结合第 3 组试验中的角度 θ , 仅针对等边八边形纸箱引入角度系数 λ 并用二次函数进行拟合, 用以表征角度对抗压强度的影响, 则有:

$$\lambda = -3.11 \times (\theta - 135^\circ)^2 \times 10^{-5} + 1 \quad (10)$$

2.4 模型的验证

根据多边形瓦楞纸箱对应的抗压强度模型计算出抗压强度预测值并与试验环境下的测量值进行比较, 计算出误差百分比, 见图 11。

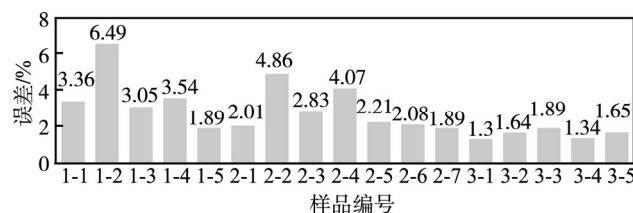


图 11 误差分析

Fig.11 Error analysis

由上述数据分析可知, 多边形瓦楞纸箱抗压强度预测值和试验值基本接近, 最大误差为 6.49%, 最小误差为 1.30%, 误差均小于 10%。在引入角度系数修正后, 八边形纸箱计算模型精度进一步提高。可见, 计算模型能有效表征侧板数量、边长、相邻侧板围成的角度改变时截面形状对多边形纸箱抗压强度的影响规律。

3 结语

通过试验与理论相结合的方法, 探讨了侧板结构对多边形瓦楞纸箱抗压强度的影响, 研究表明: 周长相等的多边形纸箱, 抗压强度随侧板结构的不同而改变, 其中侧板数量、边长对抗压强度的影响较为显著; 同等条件下, 八边形纸箱抵抗变形能力优于四边形, 且截面越接近正八边形、角度越接近 135° 时, 承压性越好; 多边形纸箱计算模型能较好地表征侧板数量、边长对强度的影响规律。此外, 因时间与条件限制, 这里对多边形纸箱抗压强度的研究尚处于初步阶段, 有待进一步完善, 如接下来可探讨同一截面形状下, 不同箱高、不同周长多边形瓦楞纸箱抗压强度的变化规律, 以及同等条件下, 不同瓦楞类型、不同纸板层数等因素对模型系数的综合影响, 以寻求更为合理的计算模型与更为可靠的模型系数。

参考文献:

[1] 彭国勋, 吴舟平, 吴琰. 瓦楞包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2007.
PENG Guo-xun, WU Zhou-ping, WU Yan. Corrugated

- Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2007.
- [2] 陈希荣. 瓦楞包装节能减排与发展低碳经济的新途径——冷定型瓦楞纸板生产线[J]. 中国包装工业, 2010(7): 41—42.
CHEN Xi-rong. Corrugated Packaging Energy Saving and Emission Reduction and the Development of a New Approach to Low-carbon Economy-cold-shaped Corrugated Board Production Line[J]. China Packaging Industry, 2010(7): 41—42.
- [3] 陈安江, 刘军. 瓦楞原纸性能对瓦楞纸箱强度的影响及其改进措施[J]. 中国造纸, 2007, 26(7): 60—61.
CHEN An-jiang, LIU Jun. Effects of Corrugated Paper on the Strength of Corrugated Box and Its Improvement Measures[J]. China Paper, 2007, 26(7): 60—61.
- [4] 潘家杰. 瓦楞纸箱抗压强度影响因素及改善之研究[J]. 中国包装, 2016, 36(6): 56—60.
PAN Jia-jie. Corrugated Box Compressive Strength Influencing Factors and Improvement[J]. China Packaging, 2016, 36(6): 56—60.
- [5] 郝晓秀, 魏娜, 周云令, 等. 湿度对瓦楞纸箱抗压强度的影响研究[J]. 造纸科学与技术, 2017(3): 33—35.
HAO Xiao-xiu, WEI Na, ZHOU Yun-ling, et al. Effects of Humidity on Compressive Strength of Corrugated Boxes[J]. Paper Science and Technology, 2017(3): 33—35.
- [6] NORDSTRAND T. On Buckling Loads for Edge-loaded Orthotropic Plates Including Transverse Shear [J]. Composite Structures, 2004, 65(1): 1—6.
- [7] LEE M H, PARK J M. Flexural Stiffness of Selected Corrugated Structures[J]. Packaging Technology and Science, 2004, 17(5): 275—286.
- [8] MORISHITA Y, TOMII M, YOSHIMARO K. Experimental Studies on Bond Strength between Square Steel Tube and Encased Concrete Core under Cyclic Shearing Force and Constant Axial force[J]. Transaction of Japan Concrete Institute, 1982, 4: 363—370.
- [9] 查晓雄, 余敏, 黎玉婷, 等. 实空心钢管混凝土轴压承载力的统一理论和公式[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(1): 1—7.
ZHA Xiao-xiong, YU Min, LI Yu-ting, et al. Unified Theory and Formula of Bearing Capacity of Concrete Filled Hollow Steel Tube under Axial Load[J]. Progress in Steel Building Construction, 2011, 13(1): 1—7.
- [10] SINGH J, OLSEN E, SINGH S P, et al. The Effect of Ventilation and Hand Holes on Loss of Compression Strength in Corrugated Boxes[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2008(6): 277—238.
- [11] 李兰芬. 瓦楞纸箱抗压强度及纸板边压强度的国内外研究[J]. 中国包装工业, 1997(12): 16—19.
LI Lan-fen. Corrugated Box Compressive Strength and Cardboard Edge Pressure Intensity at Home and Abroad[J]. China Packaging Industry, 1997(12): 16—19.
- [12] 李洪贵, 苏婷, 张新昌. 一种异形多边形瓦楞纸箱的抗压性能研究[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 52—55.
LI Hong-gui, SU Ting, ZHANG Xin-chang. Compressive Properties of an Irregular Polygonal Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 52—55.
- [13] 王悦, 张惠忠. 重型有底无盖八角箱研究[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 137—140.
WANG Yue, ZHANG Hui-zhong. Heavy-duty Uncovered Octagonal Carton with Bottom[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(13): 137—140.
- [14] FRANK B. Corrugated Box Compression: A Literature Survey[J]. Packaging Technology & Science, 2014, 27(2): 105—128.
- [15] COFFIN D W. Some Observations towards Improved Predictive Models for Box Compression Strength[J]. Tappi Journal, 2015, 14(8): 537—545.
- [16] NORRIS C B. Strength of Orthotropic Materials Subjected to Combined Stresses[R]. Wisconsin: Forest Products Laboratory Madison, 1950.
- [17] MARK R E. Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard[J]. Textile Research Journal, 1985, 55(8): 511.
- [18] MCKEE R C, GANDER J W, WACHUTA J R. Compression Strength Formula for Corrugated Boxes[J]. Paperboard Packaging, 1963, 48(8): 149—159.