

基于灰关联熵的蜂窝纸板抗弯性能影响研究

黄欣洁^{1,2}, 王冬梅^{1*}

(1. 深圳职业技术大学, 广东 深圳 518000; 2. 齐鲁工业大学, 济南 250000)

摘要: **目的** 探究结构因素对蜂窝纸板抗弯性能的影响, 以及各结构因素对蜂窝纸板抗弯性能的影响程度排序, 优化蜂窝纸板结构设计方法。**方法** 通过三点弯曲试验得到蜂窝纸板的位移-载荷曲线, 结合三点弯曲试验结果及蜂窝纸板结构参数计算蜂窝纸板的弯曲强度和弯曲弹性模量, 并通过灰关联熵分析方法进一步分析面纸厚度、芯层厚度和厚跨比对蜂窝纸板抗弯性能的影响。**结果** 随着面纸厚度和厚跨比的增加, 蜂窝纸板极限弯曲载荷、弯曲强度和弯曲弹性模量均会增加; 随着芯层厚度的增加, 蜂窝纸板极限弯曲载荷增加, 但弯曲强度和弯曲弹性模量减小。**结论** 面纸厚度对蜂窝纸板的极限弯曲载荷影响最大, 厚跨比对蜂窝纸板的弯曲强度和弯曲弹性模量影响最大。

关键词: 蜂窝纸板; 抗弯性能; 结构因素; 灰关联熵

中图分类号: TB48

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)01-0286-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.01.033

Effect of Bending Performance of Honeycomb Paperboard Based on Grey Correlation Entropy

HUANG Xinjie^{1,2}, WANG Dongmei^{1*}

(1. Shenzhen Polytechnic University, Guangdong Shenzhen 518000, China;

2. Qilu University of Technology, Jinan 250000, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the effect of the structural factors of honeycomb paperboard on its bending performance and rank the affecting degree of each structural factor on the bending performance of honeycomb paperboard, to optimize the structural design of honeycomb paperboard. The displacement-load curve of honeycomb paperboard was obtained by three-point bending test, and the bending strength and bending elastic modulus of honeycomb paperboard were calculated by combining the three-point bending test results with the structural parameters. The effects of face paper thickness, core layer thickness and thickness-to-span ratio on the bending performance of honeycomb paperboard were further analyzed by grey correlation entropy analysis. The ultimate bending load, bending strength and bending elastic modulus of honeycomb paperboard increased with the increase of face paper thickness and thickness-to-span ratio, and with the increase of core layer thickness, the ultimate bending load of honeycomb paperboard increased, but the bending strength and bending elastic modulus decreased. The thickness of the face paper has the greatest effect on the ultimate bending load of the honeycomb paperboard, and the thickness-to-span ratio has the greatest effect on the bending strength and bending elastic modulus.

KEY WORDS: honeycomb paperboard; bending performance; structural factors; grey correlation entropy

收稿日期: 2024-07-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51675349)

*通信作者

蜂窝纸板是由上、下 2 层面纸和中间蜂窝芯层粘合而成的轻质环境友好型材料, 具有优良的比刚度、比强度、隔音、隔热性能, 广泛应用于运输包装、车船交通、应急建筑、航空航天等领域^[1-4]。目前, 对于蜂窝纸板的研究主要集中在静态压缩和动态冲击方面^[5-7], 而对其抗弯性能的研究较少, 这使得蜂窝纸板作为板材应用于建筑墙板或蜂窝纸托盘时, 在结构设计和优化选材方面依据较少。

蜂窝纸板的面纸厚度、芯层厚度、厚跨比等结构因素均会对其抗弯性能产生较大影响。李厚民等^[8]类纸蜂窝夹层结构压缩缓冲系数计算方法构建纸蜂窝夹层结构弯曲缓冲系数, 以对其抗弯性能进行直观描述。蔡莹等^[9]基于不同环境湿度对纸蜂窝夹层结构进行三点弯曲测试, 发现纸蜂窝夹层结构的抗弯性能并非随着环境相对湿度的增大而降低, 在相对湿度为 70% 时, 纸蜂窝夹层结构抗弯强度最大。牟信妮^[10]通过三点弯曲试验分析了蜂窝纸板的结构因素对蜂窝纸板抗弯性能的影响。Kmita-Fudalej 等^[11]研究发现, 随着蜂窝纸板厚度的增加, 纸蜂窝芯对其抗弯性能的贡献比例降低。

虽然已有学者对蜂窝纸板抗弯性能影响因素进行研究, 但目前的研究尚未涉及各结构因素对蜂窝纸板抗弯性能的影响程度排序, 虽然 Matta 等^[11]利用实验设计软件通过大量的试验对影响蜂窝夹层结构抗弯性能的结构因素进行排序, 但这种方法需要利用大量的试验结果进行分析, 并且无法以数值的形式明确指出各结构参数对蜂窝纸板抗弯性能的影响程度。

张岐山等^[12]提出的灰关联熵分析方法是灰色系统分析方法中十分重要的一种, 可以有效地分析贫信息系统, 探究不同影响因素与事件发展趋势之间的相对强弱关系, 揭示不同因素对事件发展趋势的影响程

度。灰关联熵分析方法在建筑、机械等工程领域被广泛应用^[13-14]。

本研究以不同规格的蜂窝纸板为研究对象, 通过三点弯曲试验得到蜂窝纸板的极限弯曲载荷, 并根据结构参数计算其弯曲强度和弯曲弹性模量, 分析蜂窝纸板面纸厚度、芯层厚度和厚跨比对蜂窝纸板抗弯性能的影响, 并通过灰关联熵分析进一步探究各结构因素对蜂窝纸板抗弯性能影响的重要程度, 为蜂窝纸板结构设计和优化提供参考。

1 试验

1.1 材料与仪器

主要材料: 长 200 mm、宽 60 mm 的不同规格的蜂窝纸板试样, 所有蜂窝纸板试样均用正六边形纸蜂窝芯, 购自惠州锦旺包装环保材料有限公司, 蜂窝纸板试样的基本参数见表 1。蜂窝纸板的厚跨比为芯纸原纸厚度与蜂窝胞元边长的比值, 其中蜂窝胞元边长 4、6、8 mm 的蜂窝纸板厚跨比分别为 0.045 0、0.030 0、0.022 5。

主要仪器: LB-CB80 恒温恒湿箱, 深圳蓝博仪器有限公司; M-3050 万能试验机, 深圳市瑞格尔仪器有限公司。

1.2 三点弯曲试验方法

首先将蜂窝纸板试样置于恒温恒湿箱内, 在温度 23 °C、相对湿度为 50% 的环境条件下处理 48 h。然后将试样从恒温恒湿箱取出, 在 5 min 内以 160 mm 跨距、5 mm/min 的加载速度对具有不同结构参数的蜂窝纸板进行三点弯曲试验, 得到蜂窝纸板三点弯曲的位移-载荷曲线。

表 1 蜂窝纸板试样基本参数

Tab.1 Basic parameters of honeycomb paperboard samples

试样	面纸定量/(g·m ⁻²)	面纸厚度/mm	芯纸定量/(g·m ⁻²)	芯纸原纸厚度/mm	纸板厚度/mm	蜂窝胞元边长/mm
160-100-10-4	160	0.26	100	0.18	10	4
160-100-10-6	160	0.26	100	0.18	10	6
160-100-10-8	160	0.26	100	0.18	10	8
160-100-20-6	160	0.26	100	0.18	20	6
160-100-30-6	160	0.26	100	0.18	30	6
160-100-40-6	160	0.26	100	0.18	40	6
160-100-50-6	160	0.26	100	0.18	50	6
350-100-20-6	350	0.42	100	0.18	20	6
520-100-20-6	520	0.58	100	0.18	20	6
600-100-20-6	600	0.67	100	0.18	20	6
1000-100-20-6	1000	1.04	100	0.18	20	6

1.3 试验结果处理方法

1.3.1 极限弯曲载荷

极限弯曲载荷是蜂窝纸板在弹性阶段内所能承受的最大载荷,超过此数值会使蜂窝纸板产生不可恢复的损伤。本研究涉及的结果均在弹性范围内,取每种蜂窝纸板的5个试样的三点弯曲极限载荷值的平均值为蜂窝纸板的极限弯曲载荷。

1.3.2 弯曲强度

弯曲强度是蜂窝纸板达到弹性极限所能承受的最大应力,取5个试样的弯曲强度的平均值为蜂窝纸板的弯曲强度,试样弯曲强度计算见式(1)。

$$\sigma_f = \frac{3P_B L}{2bd^2} \quad (1)$$

式中: σ_f 表示蜂窝纸板的弯曲强度, MPa; P_B 表示蜂窝纸板极限弯曲载荷, N; L 为三点弯曲试验的跨距, mm; b 为蜂窝纸板试样的宽度, mm; d 为蜂窝纸板试样厚度, mm。

1.3.3 弯曲弹性模量

弯曲弹性模量是蜂窝纸板在弹性极限内抵抗弯曲变形的能力,取5个试样的弯曲弹性模量的平均值为蜂窝纸板弯曲弹性模量值,试样弯曲弹性模量的计算见式(2)。

$$E_{fc} = \frac{L^3 P_B}{4b\omega d^3} \quad (2)$$

式中: E_{fc} 为蜂窝纸板的弯曲弹性模量, MPa; ω 为蜂窝纸板极限弯曲载荷所对应的位移, mm。

1.4 蜂窝纸板抗弯性能影响因素灰关联熵分析方法

灰关联熵分析方法作为一种统计分析方法,可以分析系统中影响因素和被影响因素之间的密切程度,灰熵关联度越大,影响因素对系统的影响越大,从而判断引起该系统发生变化的主要因素和次要因素,这种方法计算量小且对样本的数量和样本的规律性没有要求。根据已有文献的研究,下文描述灰关联熵分析方法具体步骤^[15-16]。

1.4.1 建立参考序列和比较序列

在对某系统进行灰关联熵分析时,通常将被影响因素建立为参考序列,将影响因素建立为比较序列,参考序列和比较序列分别如式(3)~(4)所示,其中 $j=1,2,\dots,n$ 。

$$Y_0 = \{y_0(k), k=1,2,\dots,r\} \quad (3)$$

$$Y_j = \{y_j(k), k=1,2,\dots,r\} \quad (4)$$

1.4.2 参考序列和比较序列的无量纲化处理

由于参考序列和比较序列具有不同的量纲,在分析计算过程中会出现数据差异过大的情况,所以需要

对数据进行无量纲化处理。无量纲化处理也叫归一化处理,是将数据统一到近似的范围内,然后分析数据变化及规律的方法。参考序列和比较序列的无量纲化处理有2种方法:一种是均值化,即将该序列的数据除以该序列数据的均值得到无量纲数据;另一种是初值化,即将该序列的数据统一除以最开始的数据值得到无量纲数据。本章采用初值化方式对参考序列和比较序列进行无量纲化处理,初值化方式如式(5)~(6)所示,初值化后的参考序列和比较序列分别为 X_0 、 X_j 。

$$X_0 = \{x_0(k), k=1,2,\dots,r\} = \left\{ \frac{y_0(k)}{y_0(1)}, k=1,2,\dots,r \right\} \quad (5)$$

$$X_j = \{x_j(k), k=1,2,\dots,r\} = \left\{ \frac{y_j(k)}{y_j(1)}, k=1,2,\dots,r \right\} \quad (6)$$

1.4.3 计算关联系数

根据式(7)计算参考序列与比较序列的绝对值差值 $\Delta_j(k)$,并根据式(8)、式(9)确定两级最小差 Δ_{\min} 和两级最大差 Δ_{\max} ,然后根据式(10)计算关联系数 ξ_j 。

$$\Delta_j(k) = |x_0(k) - x_j(k)| \quad (7)$$

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k \Delta_j(k) \quad (8)$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k \Delta_j(k) \quad (9)$$

$$\xi_j[x_0(k), x_j(k)] = \frac{|\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}|}{|\Delta_j(k) + \rho \Delta_{\max}|} \quad (10)$$

式中: ρ 为分辨系数,取值区间为[0, 1],一般取0.5。

1.4.4 计算灰关联系数分布密度

设 $R_{\xi_j} = \{\xi_j[x_0(k), x_j(k)], \dots, k=1,2,\dots,r\}$, 则映射 $\text{Map}: R_{\xi_j} \rightarrow P_j$, 见式(11)。

$$p_h \triangleq \frac{\xi_j[x_0(h), x_j(h)]}{\sum_{k=1}^r \xi_j[x_0(k), x_j(k)]}, p_h \in P_j, h=1,2,\dots,r \quad (11)$$

式中: P_j 为灰关联系数分布映射; p_h 为映射,也称灰关联系数分布密度,满足对于任意 h , 映射值均 ≥ 0 , 且所有映射值相加等于1。

1.4.5 计算灰关联熵及灰熵关联度

根据灰关联系数分布映射,可计算序列 X_j 的灰关联熵 $H(R_{\xi_j})$ 和灰熵关联度 $E(X_j)$, 灰熵关联度越大表示该影响因素对系统的影响越显著。灰关联熵及灰熵关联度计算方法如式(12)~(14)所示。

$$H(R_{\xi_j}) \triangleq - \sum_{h=1}^r p_h \ln p_h \quad (12)$$

$$E(X_j) \triangleq \frac{H(R_{\xi_j})}{H_m} \quad (13)$$

$$H_m = \ln r \quad (14)$$

2 结果与讨论

2.1 结构因素对蜂窝纸板抗弯性能影响分析

蜂窝纸板三点弯曲试验得到的位移-载荷曲线如图 1 所示。从图 1a~c 可以得出, 随着蜂窝纸板蜂窝

胞元边长的增加, 即随着蜂窝纸板厚跨比的减小, 蜂窝纸板的极限弯曲载荷减小, 超过弹性极限后弯曲载荷趋于平稳阶段的剩余承载能力也减小。这是因为蜂窝胞元边长的增加导致蜂窝芯刚度减小, 芯层对弯曲的抵抗变弱, 导致蜂窝纸板的抗弯性能减弱。从图 1b 及图 1d~g 可以得出, 随着蜂窝纸板芯层厚度的增加,

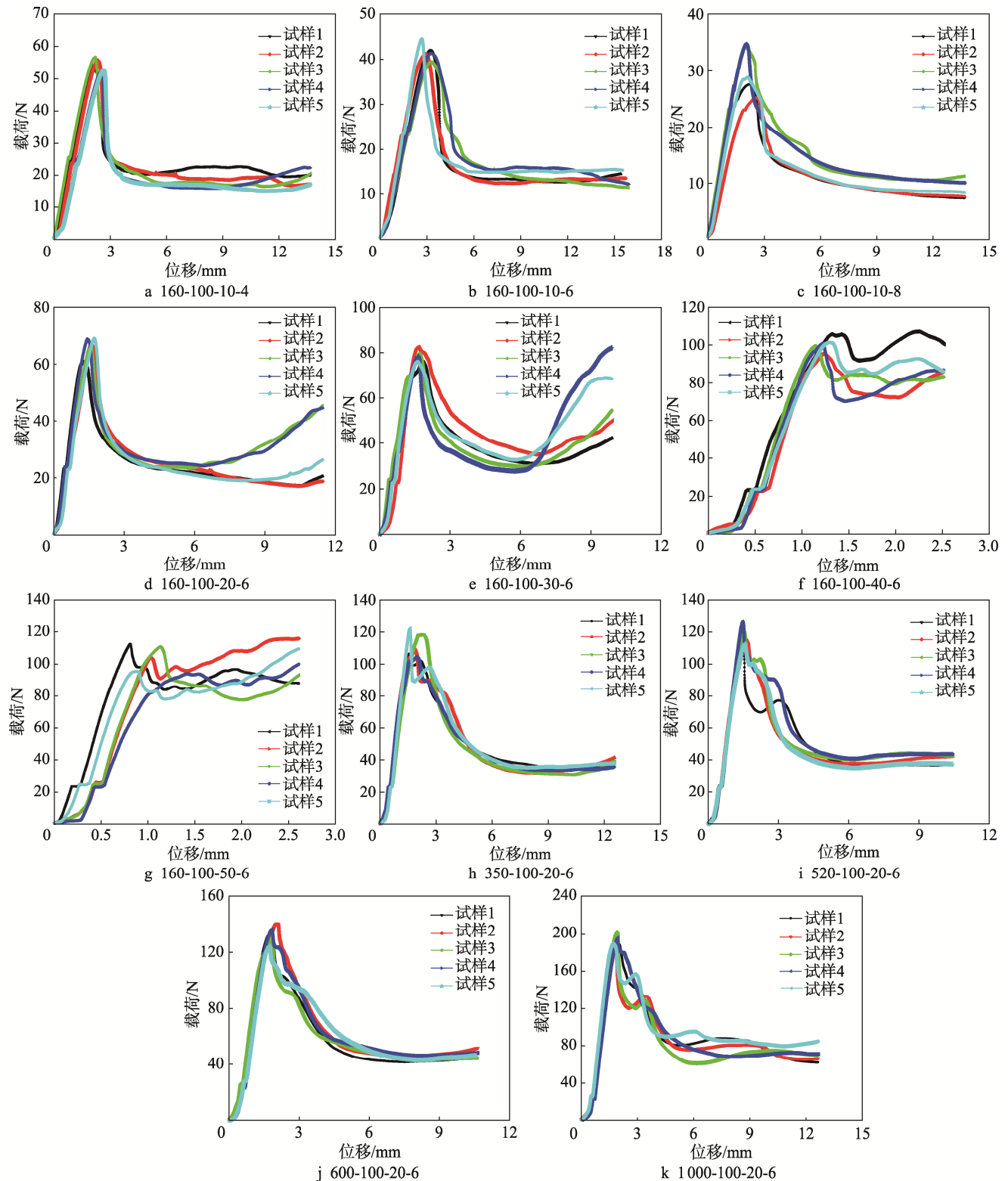


图 1 蜂窝纸板三点弯曲位移-载荷曲线

Fig.1 Displacement-load curve of honeycomb paperboard in three-point bending

蜂窝纸板的极限弯曲载荷增大, 剩余承载能力也增大。这是因为随着蜂窝纸板芯层厚度的增加, 蜂窝纸板的截面惯性矩增大, 使蜂窝纸板承受弯曲载荷的能力增加, 并且对于芯层较薄的蜂窝纸板, 其位移-载荷曲线中蜂窝纸板极限弯曲载荷峰值的出现及弯曲载荷大小的变化比较明显; 对于芯层厚度较大的蜂窝纸板, 其位移-载荷曲线中极限弯曲载荷达到峰值不太明显。从图 1b 及图 1h~k 可以得出, 随着蜂窝纸板面纸厚度的增加, 蜂窝纸板的极限弯曲载荷增大, 剩余承载能力也有所增加。这是因为随着蜂窝纸板面纸厚度的增加, 面纸的强度增加, 抵抗弯曲变形的能力也增强。

表 2 为不同蜂窝纸板的极限弯曲载荷、弯曲强度和弯曲弹性模量, 为更直观地观察蜂窝纸板结构因素对其抗弯性能的影响, 绘制图 2。从图 2a 可以直观得出, 厚跨比增加使蜂窝纸板极限弯曲载荷、弯曲强度和弯曲弹性模量均增加; 从图 2b 可以得出, 蜂窝纸板芯层厚度增加, 使蜂窝纸板极限弯曲载荷增大, 但是蜂窝纸板的弯曲强度和弯曲弹性模量会减小, 尤其是当纸板芯层厚度由 9.48 mm 增加到 19.48 mm 时, 蜂窝纸板的弯曲强度和弯曲弹性模量急剧减小; 从图 2c 可以得出, 面纸厚度的增加也会使蜂窝纸板极限弯曲载荷、弯曲强度和弯曲弹性模量增加, 同时在图 2c 中, 蜂窝纸板极限弯曲载荷、弯曲强度和弯曲弹性模量的变化出现 2 个斜率差异较大的区间, 这是由于定量为 160 g/m² 和 350 g/m² 的蜂窝纸板原纸是牛皮纸, 定量为 520、600、1 000 g/m² 的蜂窝纸板原纸为草纸板, 2 种原纸生产原料及生产工艺不同造成原纸弹性模量存在较大差别。

表 2 蜂窝纸板抗弯性能指标测试结果

Tab.2 Honeycomb paperboard bending performance index test results

试样	极限弯曲载荷/mm	弯曲强度/MPa	弯曲弹性模量/MPa
160-100-10-4	56.68	2.50	479.64
160-100-10-6	43.39	1.97	422.55
160-100-10-8	30.07	1.33	278.59
160-100-20-6	67.2	0.71	99.16
160-100-30-6	79.36	0.37	30.06
160-100-40-6	98.24	0.26	21.60
160-100-50-6	110.52	0.18	17.84
350-100-20-6	116.95	1.16	142.73
520-100-20-6	121.57	1.18	158.46
600-100-20-6	136.19	1.28	159.37
1000-100-20-6	199.20	1.70	178.63

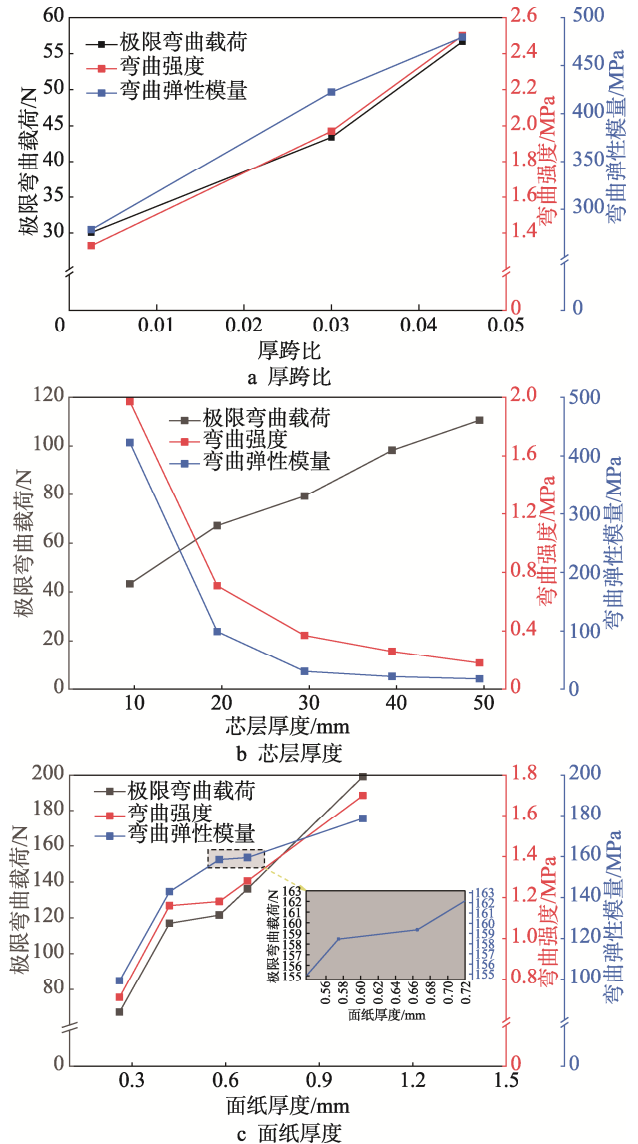


图 2 结构因素对蜂窝纸板抗弯性能的影响
Fig.2 Effect of structural factors on the bending performance of honeycomb paperboard

通过分析结构因素对蜂窝纸板抗弯性能的影响发现, 在蜂窝纸板结构设计时, 不能一味增加面纸厚度、芯层厚度和厚跨比来提高蜂窝纸板的抗弯性能, 应综合考虑蜂窝纸板的使用情景以及结构因素对蜂窝纸板抗弯性能的影响来进行蜂窝纸板结构设计。但是上述分析并不能得到哪种结构因素对蜂窝纸板抗弯性能的影响程度更大, 所以对影响蜂窝纸板抗弯性能的结构因素进行灰关联熵分析, 以期得到蜂窝纸板抗弯性能影响因素排序。

2.2 灰关联熵分析结果

根据三点弯曲试验所得到的试验结果, 按照上述方法将蜂窝纸板的极限弯曲载荷作为参考序列, 将芯层厚度、面纸厚度、厚跨比作为比较序列进行灰关联熵分析。如表 3 所示, 首先构建参考序列和比较序列。利用初值化方法对参考序列和比较序列进行无量纲

化处理, 初值化处理后的参考序列和比较序列如表 4 所示。根据式 (7) 得到比较序列与参考序列的绝对值差值, 结果如表 5 所示。根据式 (8) 得到两极最小差为 0.000 0, 根据式 (9) 得到的两级最大差为 3.269 5, 根据式 (10) 计算灰关联系数, 结果如表 6 所示。根据式 (11), 利用上述计算结果计算系统中灰关联系数分布密度值, 计算结果见表 7, 并结合式 (12)~(14) 计算灰关联熵和灰熵关联度, 计算结果如表 8 所示, 灰熵关联度计算结果如表 9 所示。从表 9 可知, 影响蜂窝纸板极限弯曲载荷的结构因素从大到小依次为面纸厚度、厚跨比、芯层厚度。

表 3 参考序列和比较序列
Tab.3 Reference and comparison sequences

参考序列		比较序列	
$Y_{\text{极限弯曲载荷}}$	$Y_{\text{面纸厚度}}$	$Y_{\text{芯层厚度}}$	$Y_{\text{厚跨比}}$
56.68	0.26	9.48	0.045
43.39	0.26	9.48	0.03
30.07	0.26	9.48	0.022 5
67.20	0.26	19.48	0.03
79.36	0.26	29.48	0.03
98.27	0.26	39.48	0.03
110.52	0.26	49.48	0.03
116.95	0.42	19.48	0.03

表 4 初值化后的参考序列和比较序列
Tab.4 Reference and comparison sequences after initialization

参考序列		比较序列	
$X_{\text{极限弯曲载荷}}$	$X_{\text{面纸厚度}}$	$X_{\text{芯层厚度}}$	$X_{\text{厚跨比}}$
1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.765 5	1.000 0	1.000 0	0.666 7
0.530 5	1.000 0	1.000 0	0.500 0
1.185 6	1.000 0	2.054 9	0.666 7
1.400 1	1.000 0	3.109 7	0.666 7
1.733 2	1.000 0	4.164 6	0.666 7
1.949 9	1.000 0	5.219 4	0.666 7
2.063 3	1.615 4	2.054 9	0.666 7

表 5 比较序列与参考序列的绝对值差计算结果
Tab.5 Absolute value difference between the comparison sequence and the reference sequence

$\Delta_{\text{面纸厚度}}$	$\Delta_{\text{芯层厚度}}$	$\Delta_{\text{厚跨比}}$
0.000 0	0.000 0	0.000 0
0.234 5	0.234 5	0.098 9
0.469 5	0.469 5	0.030 5
0.185 6	0.869 2	0.518 9
0.400 1	1.709 6	0.733 5
0.733 8	2.430 8	1.067 1
0.949 9	3.269 5	1.283 2
0.448 0	0.008 5	1.396 7

表 6 灰关联系数计算结果
Tab.6 Calculation result of the grey correlation coefficient

$\xi_{\text{面纸厚度}}$	$\xi_{\text{芯纸厚度}}$	$\xi_{\text{厚跨比}}$
1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.874 6	0.874 6	0.943 0
0.776 9	0.776 9	0.981 7
0.898 0	0.652 9	0.759 0
0.803 4	0.488 8	0.690 3
0.690 2	0.402 1	0.605 0
0.632 5	0.333 3	0.560 2
0.784 9	0.994 8	0.539 3

表 7 灰关联系数分布密度值
Tab.7 Density of distribution of grey correlation coefficient

$Ph_{\text{面纸厚度}}$	$Ph_{\text{芯纸厚度}}$	$Ph_{\text{厚跨比}}$
0.154 8	0.181 0	0.164 5
0.135 4	0.158 3	0.155 1
0.120 3	0.140 7	0.161 5
0.139 0	0.118 2	0.124 9
0.124 3	0.088 5	0.113 6
0.106 8	0.072 8	0.099 5
0.097 9	0.060 3	0.092 2
0.121 5	0.180 1	0.088 7

表 8 灰关联熵计算结果
Tab.8 Calculation results of grey correlation entropy

$H(X_{\text{面纸厚度}})$	$H(X_{\text{芯层厚度}})$	$H(X_{\text{厚跨比}})$
2.070 3	2.013 0	2.051 6

表 9 灰熵关联度计算结果
Tab.9 Calculation results of grey entropy correlation

$E(X_{\text{面纸厚度}})$	$E(X_{\text{芯层厚度}})$	$E(X_{\text{厚跨比}})$
0.995 6	0.968 0	0.986 6

按上述方法分别以蜂窝纸板的弯曲强度和弯曲弹性模量为参考序列, 将芯层厚度、面纸厚度、厚跨比作为比较序列进行灰关联熵分析, 得到的灰关联熵计算结果如表 10 所示。

表 10 以弯曲强度、弯曲弹性模量为参考序列的灰熵关联度计算结果
Tab.10 Calculation results of grey entropy correlation with bending strength and bending elastic modulus as reference sequence

参考序列	$E(X_{\text{面纸厚度}})$	$E(X_{\text{芯层厚度}})$	$E(X_{\text{厚跨比}})$
弯曲强度	0.996 5	0.967 7	0.998 5
弯曲弹性模量	0.996 4	0.965 8	0.998 4

从表 10 可知, 影响蜂窝纸板弯曲强度的结构因素从大到小依次为厚跨比、面纸厚度、芯层厚度, 影响蜂窝纸板弯曲弹性模量的结构因素从大到小依次为厚跨比、面纸厚度、芯层厚度。

3 结论

通过对蜂窝纸板三点弯曲试验结果进行分析,并结合灰关联熵分析方法,研究了结构参数对蜂窝纸板抗弯性能的影响,结论如下。

1) 蜂窝纸板的极限弯曲载荷随着芯层厚度、面纸厚度、厚跨比的增加而增加;蜂窝纸板的弯曲强度和弯曲弹性模量随着蜂窝纸板面纸厚度和厚跨比的增加而增加;但是随着芯层厚度增加,蜂窝纸板的弯曲强度和弯曲弹性模量则会下降,因为随着纸板厚度增加,芯层对抗弯性能的贡献比例降低。

2) 影响蜂窝纸板极限弯曲载荷大小的影响因素依次排序为面纸厚度、厚跨比、芯层厚度,影响蜂窝纸板弯曲强度的影响因素依次排序为厚跨比、面纸厚度、芯层厚度,影响蜂窝纸板弯曲弹性模量大小的影响因素依次排序为厚跨比、面纸厚度、芯层厚度。

参考文献:

- [1] KMITA-FUDALEJ G, KOŁAKOWSKI Z, SZEWCZYK W. Method for Calculating the Bending Stiffness of Honeycomb Paperboard[J]. *Materials*, 2024, 17(4): 878.
- [2] WANG D M, BAI Z Y, LIAO Q H. 3D Energy Absorption Diagram Construction of Paper Honeycomb Sandwich Panel[J]. *Shock and Vibration*, 2018(Pt.2): 43.1-43.6.
- [3] 张雪, 张红杰, 程芸, 等. 纸基包装材料的研究进展、应用现状及展望[J]. *中国造纸*, 2020, 39(11): 53-69.
ZHANG X, ZHANG H J, CHENG Y, et al. Research Progress, Application Status and Prospects of Paper-Based Packaging Materials[J]. *China Pulp & Paper*, 2020, 39(11): 53-69.
- [4] CZECHOWSKI L, ŚMIECHOWICZ W, KMITA-FUDALEJ G, et al. Flexural Damage of Honeycomb Paperboard: A Numerical and Experimental Study[J]. *Materials*, 2020, 13(11): 2601.
- [5] GU Z Q, HUI J, WANG J, et al. Modeling Multiple Impacts on the Out-of-Plane Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard[J]. *Packaging Technology and Science*, 2021, 34(9): 541-556.
- [6] E Y P, WANG Z W. Plateau Stress of Paper Honeycomb as Response to Various Relative Humidities[J]. *Packaging Technology and Science*, 2010, 23(4): 203-216.
- [7] WANG Z W, WANG L J, XU C Y, et al. Influence of Low-Intensity Repeated Impacts on Energy Absorption and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. *Packaging Technology and Science*, 2016, 29(11): 585-600.
- [8] 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): 186-189.
LI H M, ZHU R Y, GUO Y Z. Discussion on Bending Cushioning Performance of Honeycomb Paperboard[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2008, 29(Sup.1): 186-189.
- [9] 蔡莹, 卢立新. 环境湿度对蜂窝纸板面外强度的影响[J]. *机电信息*, 2004(17): 41-43.
CAI Y, LU L X. Effect of Environmental Humidity on Out-of-Plane Strength of Honeycomb Paperboard[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2004(17): 41-43.
- [10] 牟信妮. 蜂窝纸板面内承载与面外抗弯机理及其模型表征[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 67-72.
MOU X N. Mechanism and Model Characterization of In-Plane Bearing and Out-of-Plane Bending of Honeycomb Paperboard[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 67-72.
- [11] MATTA V, SURESH KUMAR J, VENKATARAVITEJA D, et al. Flexural Behavior of Aluminum Honeycomb Core Sandwich Structure[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 197: 012046.
- [12] 张岐山, 邓聚龙, 邵勇. 均衡接近度灰关联分析方法[J]. *华中理工大学学报*, 1995, 23(11): 94-98.
ZHANG Q S, DENG J L, SHAO Y. Grey Relational Analysis Method of Equilibrium Proximity[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 1995, 23(11): 94-98.
- [13] ZHANG M, YAO X H, GUAN J F, et al. Study of Concrete Strength and Pore Structure Model Based on Grey Relation Entropy[J]. *Materials*, 2021, 14(2): 432.
- [14] CHEN F, CAO H, ZHANG B L, et al. A Diagnosis Method of Vibration Fault of Steam Turbine Based on Information Entropy and Grey Correlation Analysis[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 714(4): 042055.
- [15] 郭晓凡, 韩杰, 米婷婷, 等. 基于灰关联熵的再生混凝土力学性能分析[J]. *混凝土*, 2022(12): 11-16.
GUO X F, HAN J, MI T T, et al. Analysis of Factors Influencing Mechanical Properties of Recycled Concrete Based on Gray Relational Entropy[J]. *Concrete*, 2022(12): 11-16.
- [16] 念腾飞. 季节性冻土区陡坡段沥青路面层间粘结材料及抗剪切性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019: 83-84.
NIAN T F. Study on Interlayer Bonding Materials and Shear Resistance of Asphalt Pavement on Steep Slope in Seasonal Frozen Soil Area[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019: 83-84.