

一种纸浆模塑蜂窝板材缓冲性能的研究

李国志, 张美琦, 孙德强*, 周健民, 何兴娟
(陕西科技大学 轻工科学与工程学院, 西安 710021)

摘要: **目的** 为了解决因技术水平制约, 纸蜂窝材料芯纸构型单一、单层厚度受限等瓶颈问题, 开发一种通用型缓冲结构板材。**方法** 以纸浆模塑为原材料, 以六棱柱结构为例, 设计并加工出一种通过正反插方式组合而成的蜂窝板材, 并采用有限元方法进行仿真, 得到关键结构参数和相关最优参数组合。**结果** 正反插结构的纸浆模塑板材具有较好的耦合效应, 承载能力相较于单层板材大幅提高; 结合极限载荷、比吸能等评价指标对板材性能进行定量分析, 初始压缩载荷最大可达到 73.7 kN, 满足托盘等重型包装器具的承载需求。通过极差和方差分析可知, 各结构参数对板材承载性能和缓冲性能的影响程度, 研究表明单元壁厚、中截面边长对该板材承载性能和缓冲性能影响显著。**结论** 正反插结构解决了现有纸蜂窝材料高度、厚度受限, 构型单一等瓶颈问题, 提高了纸浆模塑蜂窝板材的承载性能和缓冲性能, 可以满足重载要求。与之相关的其他正多边形锥形薄壁管单元亦可以使用同样的正反插设计理念和研究方法。

关键词: 纸浆模塑; 蜂窝板材; 正交试验; 承载性能; 缓冲性能

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)21-0086-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.011

Cushioning Property of Pulp Molded Honeycomb Boards

LI Guo-zhi, ZHANG Mei-qi, SUN De-qiang*, ZHOU Jian-min, HE Xing-juan

(School of Light Industry and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to develop a new general-purpose cushioning structure board to solve the bottleneck problems such as single core paper configuration and limited thickness of a single layer in honeycomb boards due to the limit of technological level. With molded pulp as raw material and hexagonal prism structure as an example, a honeycomb board was designed and processed by combining forward and reverse insertion method, and the finite element method was used for simulation to obtain key structural parameters and related optimal parameter combinations. The pulp molded board with forward and reverse insertion structure had good coupling effect. Its load carrying capacity was greatly improved compared with that of a single layer boards. The board performance was quantitatively analyzed by combining the evaluation indexes of ultimate load and specific energy absorption. The initial compressive load could reach a maximum of 73.7 kN, which met the load carrying requirements of heavy packaging apparatus such as trays. The effect of each structural parameter on the load carrying and cushioning property of the board was known by range and variance analysis. The study showed that the cell wall thickness and the edge length of the middle section had significant effect on the load carrying and cushioning property. The forward and reverse insertion structure solves the bottleneck problems of the existing paper honeycomb material with limited height and thickness and single configuration, and improves the load carrying and

收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575327); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16JS014); 陕西省教育厅陕西本科高校专业综合改革试点子项目(陕教高[2014]16号)

*通信作者

cushioning property of the pulp molded honeycomb board, which can meet the heavy load requirements. The same design concept and research method can be used for other regular polygon tapered thin-walled tube cells.

KEY WORDS: molded pulp; honeycomb board; orthogonal experiment; load carrying property; cushioning property

纸浆模塑制品是以草本植物纤维浆料或废弃纸品为原材料制成的具有特定几何空腔结构和一定抗压缓冲性能的纸制品^[1], 广泛应用于工业产品的缓冲包装, 如电子产品衬垫、易碎品隔垫等^[2]。

相关研究表明, 纸浆模塑制品是通过自身结构的变形, 即组成制品结构单元侧壁的弯曲、破裂等来吸收能量、实现缓冲目的^[3]。对其性能的研究主要有以下 3 个方面: 对纸浆模塑材料力学性能的研究^[4-7]; 对纸浆模塑单元结构进行研究或开发, 讨论成型参数对其自身承载能力和缓冲性能的影响规律^[1, 8-13]; 对纸浆模塑缓冲包装性能的研究, 主要集中在对具体产品的缓冲包装结构设计和缓冲性能研究 2 个方面^[14-16]。

由于纸浆模塑制品是针对具体产品的个性化包装, 只有需求量达到一定规模后才具有价格优势。为缩短产品开发周期和降低模具加工成本, 若可以开发一种通用型纸浆模塑蜂窝板材用于产品缓冲防护, 则将进一步拓展纸浆模塑的应用市场。本文设计并制备一种正反插式纸浆模塑蜂窝板材, 运用有限元仿真技术从单元结构参数、排列方式等方面, 确定出关键结构参数和最优参数组合, 为纸浆模塑制品通用化模块化设计提供理论依据。

1 正反插式纸浆模塑蜂窝板材结构

正反插式纸浆模塑板材是由两层单面蜂窝板材通过错位插接的方式构成的复合双壁厚蜂窝。两层单面蜂窝板材上的锥形薄壁管单元侧壁紧密接触, 该结构不需要胶黏, 生产工艺流程简单, 且易于实现对多种蜂窝构型和不同厚度板材的加工。这种蜂窝板材可以根据不同需求将其切割、组装, 用于工业产品缓冲包装等多个领域。本文以薄壁管单元横截面为正六边形的纸浆模塑蜂窝板材为例, 结构见图 1。

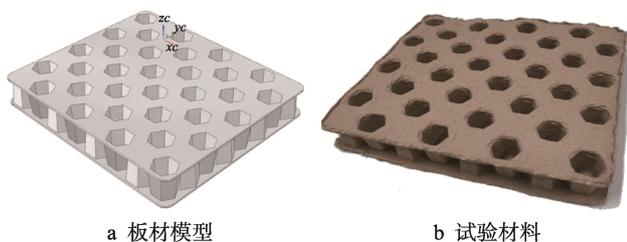


图 1 新型纸浆模塑蜂窝板材正反插结构
Fig.1 Forward and reverse insertion structure of new pulp molded honeycomb boards

结合张新昌等^[1]对圆台状单元结构参数的定义, 将该板材锥形薄壁管单元结构参数定义为中截面边长 R_0 、拔模斜角 α 、制品高度 H 和单元壁厚 t , 如图 2 所示。

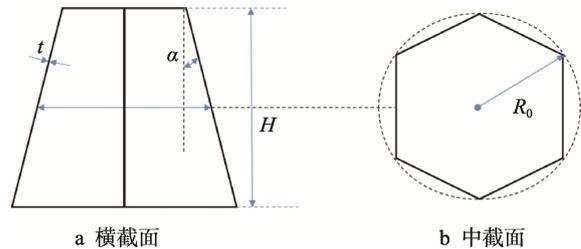


图 2 锥形薄壁管单元几何模型
Fig.2 Geometry model of conical thin-walled tube cells

中截面是指与底面平行且与两底面等距离的平面截几何体所得的截面。设棱台上下底面面积分别为 S_1 和 S_2 , 底面的外接圆半径分别为 R_1 和 R_2 , 则棱台的中截面面积 S_0 的计算见式 (1)。

$$\sqrt{S_0} = \frac{1}{2}(\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2}) \quad (1)$$

则棱台中截面边长, 即中截面的外接圆半径 R_0 定义见式 (2)。

$$R_0 = \frac{1}{2}(R_1 + R_2) \quad (2)$$

2 有限元建模

2.1 材料参数测定

本文试验所用纸浆模塑制品及模具均委托陕西环赛工贸有限公司定制加工, 制品原料为 100%回收瓦楞纸浆。参照 GB/T 12914—2018《纸和纸板 抗张强度的测定》进行拉伸试验, 得到纸浆模塑材料的应力-应变曲线如图 3 所示, 测得所用纸浆模塑材料弹性模量和屈服极限的大小分别为 50.37 MPa 和 0.075 MPa。

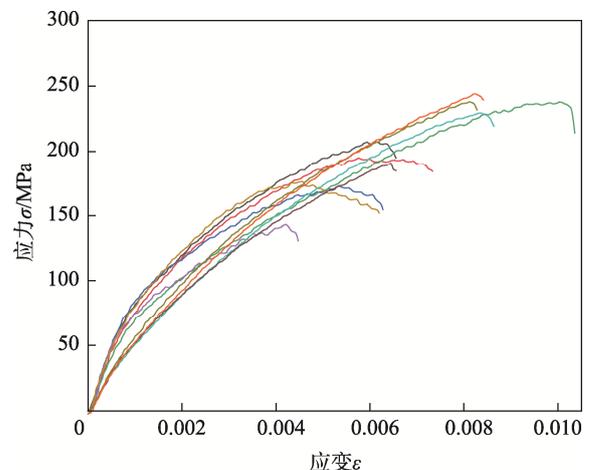


图 3 纸浆模塑材料拉伸应力-应变曲线
Fig.3 Tensile stress-strain curves of pulp molded materials

2.2 有限元模型建立

利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了异面冲击下单元阵列为 10×10 的正反插式纸浆模塑蜂窝板材的有限元模型。如图 4 所示，板材置于上下 2 个钢板之间，异面方向上冲击板 P_1 以恒定速度 v 向下均匀冲击试样至板材密实，下支撑板 P_2 固定。

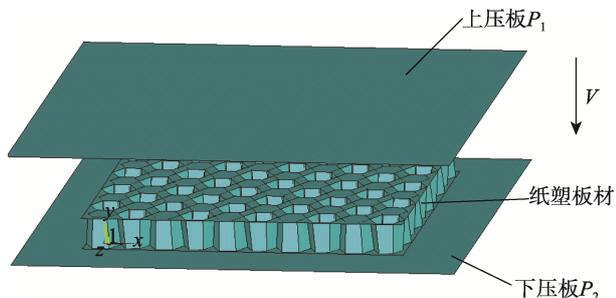


图 4 新型纸浆模塑蜂窝板材异面冲击有限元模型
Fig.4 Finite element model on out-of-plane impact of a new pulp molded honeycomb board

纸浆模塑制品属于典型的薄壳结构，选用 4 节点的 shell163 薄壳单元进行网格划分。本文选择了各向同性的双线性塑性模型近似表征纸浆模塑材料弹黏塑性模型，上下压板定义为刚性体材料模型，具体参数如表 1 所示。

为确保仿真结果的准确性，采用基于单元阵列的

方式建立同实物一致的几何模型，上下板材之间不做布尔运算，基板与对应单元在共用边界处连接。对形状较为复杂的蜂窝板材采用自由划分网格的方式，网格大小为 1.5 mm，对上下压板则采用映射网格划分，网格大小为 2 mm。结合相关文献^[7]并综合考虑计算效率和结果准确性，设置上压板压缩速度为 1 m/s。下压板采用全约束，板材与上下压板之间定义为自动面面接触，蜂窝板材胞壁间定义为自动单面接触。最后利用后处理软件 LS-PREPOST 对计算结果进行分析和评价。

2.3 模型可靠性验证

依据 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》对试验样品进行静态压缩试验。试样选用单元阵列为 8×8 的正反插式纸浆模塑蜂窝板材，中截面边长为 15 mm，拔模斜角为 5°，制品高度为 30 mm，单元壁厚为 2 mm，样品数量为 5 件。试验前将所有试样按 GB/T 10739—2002 规定进行预处理。试验过程中，上压板以 12 mm/min 的速度沿异面方向对试样施加载荷，当载荷急剧增加时停止试验。

如图 5 所示建立与试样结构完全相同的有限元模型进行静态压缩试验仿真，将仿真结果与试验结果进行对比分析，发现试样的变形模式具有明显一致性。蜂窝板材的上下基板首先出现微小局部变形，随着压缩载荷的进一步增大，两端逐渐向中间折叠变形直至完全密实。

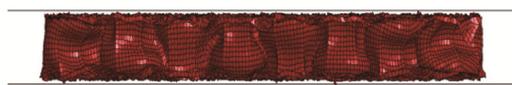
表 1 有限元分析所用材料的基本物理参数

Tab.1 Basic physical parameters of materials used for finite element analysis

材料名称	弹性模量 E_s /MPa	泊松比 μ	屈服极限 σ /MPa	剪切模量 E_t /MPa	密度 ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
纸浆模塑	50.37	0.01	0.075	25	345
刚体	2×10^5	0.3			7 800



a 静态压缩试验



b 有限元仿真

图 5 静态压缩试验和仿真变形模式
Fig.5 Static compression experiment and simulation deformation patterns

纸浆模塑蜂窝板材试验结果和仿真结果的负载-伸长量曲线也呈现相同的变化趋势, 如图 6 所示。试样在静态压缩过程中主要经历了 4 个变形阶段: 线弹性阶段、屈服阶段、平台阶段和密实化阶段。其中试验结果和仿真结果的平均平台应力分别为 18 926.01 N 和 20 280.04 N, 相对误差为 6.68%, 具有较好的一致性。因此, 从变形模式、负载-伸长量曲线和平均平台应力值这三方面都说明了该正反插式纸浆模塑蜂窝板材有限元模型具有较好的可靠性。

2.4 正反插式组合蜂窝板材与单层板材承载性能比较

通过对正反插式纸浆模塑蜂窝板材及其单层板材进行静态压缩试验, 试样数量均为 5 件, 共得到 10 组压缩载荷-位移曲线和对应数值, 如图 7 所示。

整理试验数据得到各组纸浆模塑试样所能承受的最大载荷, 并计算出平均承载力分别为 19 595.03 kN

和 9 279.11 kN。可以发现在材料、单元结构参数和试验条件相同的情况下, 正反插式纸浆模塑蜂窝板材相较单层板材其承载能力提升了 1.11 倍。这是由于错位插接的方式使上下两层单板上的结构单元之间交替形成线接触和面接触, 使结构单元之间的结合强度增大, 因而在受到压缩载荷作用时, 插接的单元表面之间形成摩擦和移动阻力, 在一定程度上提高了蜂窝板材的承载能力。

3 试验方案设计

为研究单元结构参数对纸浆模塑蜂窝板材承载能力和缓冲性能的影响, 采用 4 因素 4 水平的正交试验设计法。选择中截面边长、拔模斜角、制品高度和单元壁厚这 4 个对板材性能影响较大的因素。考虑到实际加工工艺的局限性, 各因素选取的 4 个水平值见表 2。

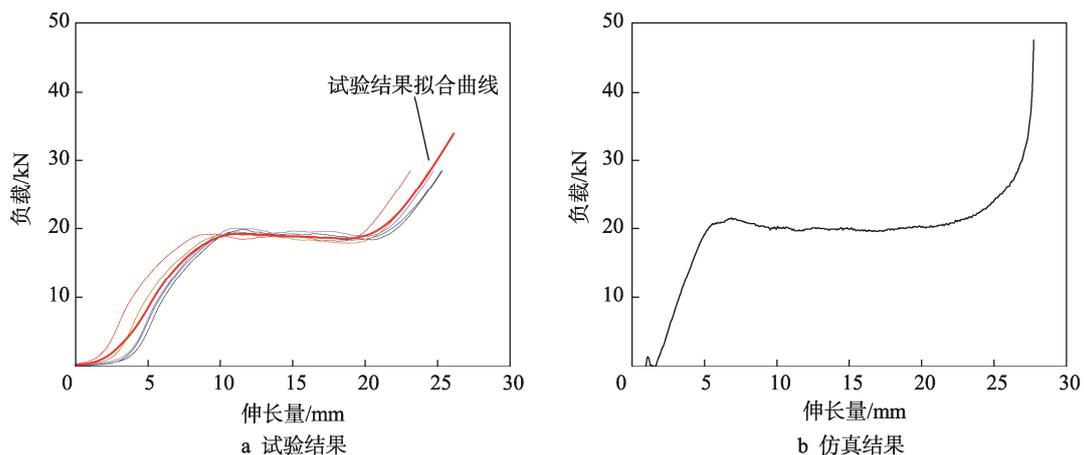


图 6 静态压缩试验结果与仿真结果对比
Fig.6 Comparison between static compression experiment results and simulation results

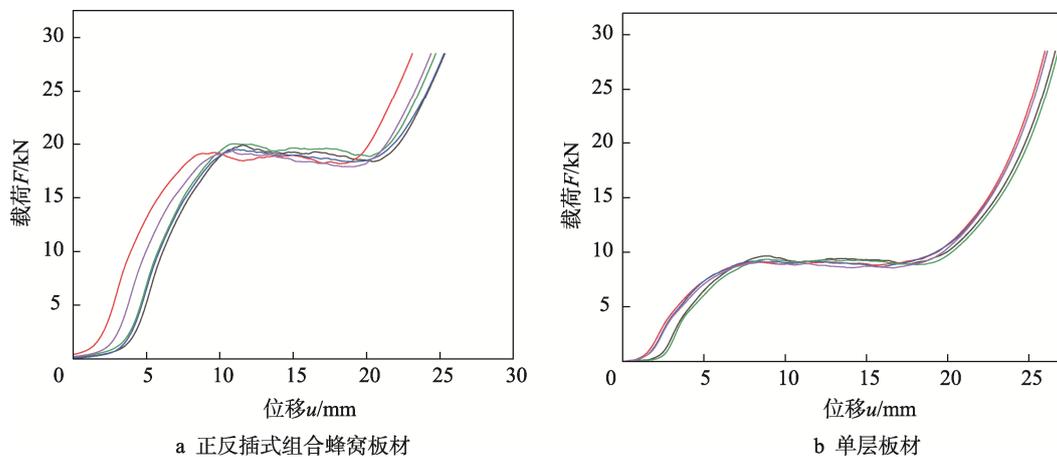


图 7 正反插蜂窝板材与单板静态压缩试验曲线对比
Fig.7 Comparison of static compression experiment curves of forward and reverse inserted honeycomb boards and veneers

表2 试验因素与水平
Tab.2 Factors and corresponding levels in test

水平	因素			
	R/mm	$\alpha/(\text{°})$	H/mm	t/mm
1	15	2	20	1
2	20	4	30	2
3	25	6	40	3
4	30	8	50	4

根据表2的方案,基于SPSSAU软件生成 $L_{16}(4^4)$ 正交表,将256次模拟试验简化为16次。建立相应的几何参数模型进行有限元仿真模拟,结合极限载荷、比吸能等评价指标对不同参数组合板材的承载能力和缓冲性能进行定量分析,绘制出参数图表,从而确定板材的最优参数组合和关键结构参数。

4 结果分析

4.1 承载性能

本次模拟试验的目标是得到各参数组合纸浆模塑蜂窝板材的极限载荷值。对16组模拟试验结果进行分析,得到各参数组合蜂窝板材的极限载荷如表3所示。由表3可知,15号试样承受载荷的能力最佳,所能承受的最大载荷达到73.7 kN,能够满足市场上绝大多数产品的承载需求。

另外,为了研究中截面边长、拔模斜角、制品高度和单元壁厚这4个因素对承载性能的影响程度,并分析其关键结构参数,采用SPSS统计分析软件进行极差和方差分析。分析结果见表4、表5。

由表4可以看出,结合R值(因素极差值)对比可知,各结构参数对板材承载性能的影响程度从大到小为单元壁厚、中截面边长、制品高度、拔模斜角。其中单元壁厚、中截面边长对承载性能影响最大,最优参数组合为 $R_4\alpha_3H_1t_4$,即中截面边长为30 mm、拔模斜角为 6° 、制品高度为20 mm和单元壁厚为4 mm,其中脚标表示试验水平。

结合表5的多因素方差分析结果可知,中截面边长R和单元壁厚t的显著性水平P值均小于0.05。说

明这2个因素均为板材承载性能的显著性影响因素,会与承载性能产生显著性差异关系。其中 R^2 值为0.976,意味着中截面边长、拔模斜角、制品高度和单元壁厚4项因素可以解释承载性能97.6%的变异原因。

表3 纸塑蜂窝板材的承载性能仿真结果
Tab.3 Simulation results of load carrying property of pulp molded honeycomb boards

编号	R/mm	$\alpha/(\text{°})$	H/mm	t/mm	F/N
1	15	2	20	1	6 280
2	15	4	30	2	10 923
3	15	6	40	3	12 095
4	15	8	50	4	17 380
5	20	2	30	3	28 276
6	20	4	20	4	48 813
7	20	6	50	1	9 314
8	20	8	40	2	11 415
9	25	2	40	4	47 163
10	25	4	50	3	32 238
11	25	6	20	2	34 118
12	25	8	30	1	12 323
13	30	2	50	2	33 290
14	30	4	40	1	13 161
15	30	6	30	4	73 735
16	30	8	20	3	50 974

表4 极差分析结果
Tab.4 Results of range analysis

结构参数	R/mm	$\alpha/(\text{°})$	H/mm	t/mm
K_1	11 670	28 770	35 045	10 272.5
K_2	24 452	26 275	31 300	22 425
K_3	31 450	32 302.5	20 975	30 900
K_4	42 800	23 025	23 052.5	46 775
R	31 130	9 277.5	14 070	36 502.5

注： K_i 代表不同因素在水平*i*时的平均值；R代表极差值。

表5 多因素方差分析结果
Tab.5 Results of multivariate variance analysis

变异源	平方和	自由度	均方差	F	显著性水平
R	2 038 135 869	3	679 378 622.9	14.667	0.027
α	184 673 868.8	3	61 557 956.25	1.329	0.41
H	534 752 868.8	3	178 250 956.3	3.848	0.149
t	2 822 373 269	3	940 791 089.6	20.311	0.017

4.2 缓冲性能

结合二维多孔材料缓冲性能的评价方法, 分析纸浆模塑蜂窝板材的吸能特性。描述的基本参数主要有动态平台应力、总吸能和比吸能等。

设上压板 P_1 与蜂窝板材之间的接触载荷为 F , 位移为 u , 在异面冲击时蜂窝板材的等效接触面积和高度分别为 A 和 h , 应力 σ 与应变 ε 的计算见式 (3)。

$$\sigma = \frac{F}{A}, \varepsilon = \frac{u}{h} \quad (3)$$

在动态冲击条件下, 平台阶段的应力均值称为动态平台应力 $\sigma_m^{[18]}$, 动态平台应力是评价缓冲材料吸能特性的一个重要指标, 计算式见式 (4)。

$$\sigma_m = \frac{1}{\varepsilon_D - \varepsilon_0} \left(\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon \right) \quad (4)$$

式中: ε_0 、 ε_D 分别为初始应变和密实化应变。

比吸能 $S_{ca}^{[19-21]}$ 指缓冲材料在压缩至密实化阶段时单位质量所吸收的能量值, 是比较不同结构吸能特性的一个关键参数。可以通过总吸能 E_a 与试样质量 m 的比值来确定, 其中蜂窝板材的总吸能可通过对载荷-位移曲线进行积分得到, 计算式见式 (5) ~ (6)。

$$S_{ca} = \frac{E_a}{m} \quad (5)$$

$$E_a = \int_0^{u_D} F du \quad (6)$$

式中: u_D 为密实化应变为 ε_D 时所对应的位移值。

利用上述评价方法对 16 组模拟试验结果进行分析, 得到正反插式纸浆模塑蜂窝板材在不同参数组合下的动态平台应力和比吸能, 如表 6 所示。

由表 6 可知, 6 号试样和 3 号试样的吸能特性最佳, 其动态平台应力和比吸能分别为 0.683 161 MPa、1 792.74 J 和 0.549 944 MPa、2 194.35 J。为了研究中

截面边长、拔模斜角、制品高度和单元壁厚这 4 个因素对缓冲性能的影响程度, 并分析其关键结构参数, 采用 SPSS 统计分析软件进行极差和方差分析。分析结果见表 7、表 8。

表 6 纸塑蜂窝板材的缓冲性能仿真结果
Tab.6 Simulation results of cushioning property of pulp molded honeycomb boards

编号	σ_m /MPa	S_{ca} /J
1	0.115 858	1 143.82
2	0.340 043	2116.63
3	0.549 944	2 194.35
4	0.629 357	1 970.81
5	0.426 331	1 801.16
6	0.683 161	1 792.74
7	0.044 369	579.83
8	0.185 904	1 478.93
9	0.450 153	1 753.36
10	0.267 819	1 636.02
11	0.226 392	1 888.80
12	0.040 542	655.11
13	0.087 712	868.96
14	0.026 826	454.74
15	0.333 378	1 325.77
16	0.150 928	584.97

结合表 7 的极差分析结果可知, 各结构参数对动态平台应力的影响程度从大到小为单元壁厚、中截面边长、拔模斜角、制品高度, 而结构参数对比吸能的影响程度从大到小为中截面边长、单元壁厚、拔模斜

表 7 极差分析结果
Tab.7 Results of range analysis

目标参数	结构参数	R /mm	α /(°)	H /mm	t /mm
动态平台应力	K_1	0.408 800	0.270 014	0.294 085	0.056 899
	K_2	0.334 941	0.329 462	0.285 074	0.210 013
	K_3	0.246 227	0.288 521	0.303 207	0.348 755
	K_4	0.149 711	0.251 683	0.257 314	0.524 012
	R	0.259 089	0.077 779	0.045 893	0.467 113
比吸能	K_1	1 856.40	1 391.83	1 352.58	708.37
	K_2	1 413.17	1 500.03	1 474.67	1 588.33
	K_3	1 483.32	1 497.19	1 470.35	1 554.12
	K_4	808.61	1 172.45	1 263.90	1 710.67
	R	1 047.79	327.58	210.77	1 002.30

注: K_i 代表不同因素在水平 i 时的平均值; R 代表极差值。

表8 多因素方差分析结果
Tab.8 Results of multivariate variance analysis

目标参数	变异源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	显著性水平
动态平台应力	<i>R</i>	0.151	3	0.05	3.82	0.15
	α	0.013	3	0.004	0.337	0.802
	<i>H</i>	0.005	3	0.002	0.12	0.943
	<i>t</i>	0.475	3	0.158	12.066	0.035
比吸能	<i>R</i>	2 259 168.762	3	753 056.254	15.384	0.025
	α	283 700.755	3	94 566.918	1.932	0.301
	<i>H</i>	123 696.887	3	41 232.296	0.842	0.554
	<i>t</i>	2 534 852.227	3	844 950.742	17.261	0.021

角、制品高度,两者具有明显的一致性。其中单元壁厚、中截面边长对动态平台应力和比吸能的影响最大,最优参数组合为 $R_1\alpha_2H_3t_4$,即中截面边长为 15 mm、拔模斜角为 4°、制品高度为 40 mm 和单元壁厚为 4 mm 时,纸浆模塑蜂窝板材结构缓冲性能最强。结合表 8 的多因素方差分析结果可知,只有中截面边长 *R* 和单元壁厚 *t* 的显著性水平 *P* 值小于 0.05,才说明这 2 个因素均为板材缓冲性能的显著性影响因素,会对板材吸能特性产生显著性差异。

在实际应用中,可根据具体需求利用正交试验方法快速确定板材性能的显著性影响因素和最优参数组合,来确保所使用板材的力学性能最佳,从而达到保护产品的目的。但仅依靠正交模拟试验无法直接判定各结构参数对正反插式纸浆模塑蜂窝板材缓冲性能的影响规律,还需要增加补充模拟试验,对其进行进一步分析。

5 结语

基于传统蜂窝结构,设计并制备出一种新型正反插式纸浆模塑蜂窝板材,通过试验和有限元仿真 2 种手段对其承载性能和缓冲性能进行研究,结论如下:

1) 在保证材料、单元结构参数和试验条件相同的情况下,正反插式纸浆模塑蜂窝板材相较于单层板材,其承载能力提升了 1.11 倍,具有一定的应用价值。

2) 基于正交试验设计法安排的模拟试验方案,结合极限载荷、比吸能等评价指标通过最少次数试验快速确定影响该板材承载能力和缓冲性能的关键结构参数和最优参数组合,以确保所使用板材的力学性能最佳,达到保护产品的目的。其中单元壁厚对板材承载性能的影响最大,中截面边长对板材缓冲性能的影响最大,因此在工艺条件允许的情况下,应尽可能选择较大的厚度来确保板材的承载性能最佳,选择较小的中截面边长来保证板材具有较好的缓冲性能。板材承载性能和缓冲性能的最优参数组合分别为 $R_4\alpha_3H_1t_4$ 和 $R_1\alpha_2H_3t_4$ 。

综上,该正反插式纸浆模塑蜂窝板材具有缓冲性能良好、通用性强等优点,最大程度缩短了纸浆模塑制品的设计周期,使纸浆模塑制品的生产制造实现连续化、规模化,为推广纸浆模塑制品结构多样化提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 张新昌,潘梦洁,林冬鸣.基于 ANSYS 模拟分析的纸浆模塑单元结构参数研究[J].包装工程,2007,28(9): 11-13.
ZHANG Xin-chang, PAN Meng-jie, LIN Dong-ming. Research on Structural Parameters of Molded Pulp Unit Using ANSYS Simulation[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(9): 11-13.
- [2] 黄俊彦.纸浆模塑生产实用技术(第二版)[J].数字印刷,2021(3): 171.
HUANG Jun-yan. Practical Technology of Pulp Molding Production (Second Edition)[J]. Digital Printing, 2021(3): 171.
- [3] 曹世普,郭奕崇,马玉林.纸浆模塑工业包装制品缓冲机理研究及有限元模拟[J].中国包装工业,2002(7): 34-37.
CAO Shi-pu, GUO Yi-chong, MA Yu-lin. Study on Buffering Mechanism and Finite Element Simulation of Pulp Molding Industrial Packaging Products[J]. China Packaging Industry, 2002(7): 34-37.
- [4] 林冬鸣,陈永铭,张新昌.纸浆模塑材料的弹黏塑性模型及实验验证[J].中国造纸学报,2008,23(2): 91-95.
LIN Dong-ming, CHEN Yong-ming, ZHANG Xin-chang. Nonlinear Elastic Viscoplastic Model of Molded Pulp Material and Its Experimental Verification[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2008, 23(2): 91-95.

- [5] HUA Guang-jun, YANG Mao-teng, FEI Wei-min, et al. Poisson's Ratios of Molded Pulp Materials by Digital Image Correlation Method and Uniaxial Tensile Test[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2020, 15(4): 1-10.
- [6] SHI Hong-jian, JI Hong-wei, YANG Guo-biao, et al. Shape and Deformation Measurement System by Combining Fringe Projection and Digital Image Correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(1): 47-53.
- [7] 张海艳, 张红杰, 程芸, 等. 无氟有机硅乳液改善纸浆模塑包装材料防水防油性能研究[J]. *中国造纸学报*, 2022, 37(3): 94-101.
ZHANG Hai-yan, ZHANG Hong-jie, CHENG Yun, et al. Study on Improving Water and Oil Resistance of Molded Pulp Packaging Materials with Organic Fluorine-Free Silicone Emulsion[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2022, 37(3): 94-101.
- [8] HOFFMANN J. Compression and Cushioning Characteristics of Moulded Pulp Packaging[J]. *John Wiley & Sons, Ltd*, 2000, 13(5): 211-220.
- [9] 杜江毅, 王章苹, 陈轶萌. 基于ANSYS的纸浆模塑制品缓冲性能的仿真分析[J]. *湖北工业大学学报*, 2006, 21(4): 121-123.
DU Jiang-yi, WANG Zhang-ping, CHEN Yi-meng. Applying the ANSYS Simulation to Study the Cushion Performance of Paper-Pulp on the Structural Unit[J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2006, 21(4): 121-123.
- [10] GURAV S P, BEREZNIITSKI A, HEIDWEILLER A, et al. Mechanical Properties of Paper-pulp Packaging[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(9): 1325-1334.
- [11] WANG Zhang-ping, CAI You-xing, JING Yu-jie. Molded Pulp Material Structure Parameters on the Performance of the Buffer[J]. *Energy Procedia*, 2012, 17: 1872-1877.
- [12] 冒银彧, 纪玉梁, 顾玉祥, 等. 重载纸浆模塑制品的结构及其承载性能分析[J]. *包装工程*, 2010, 31(19): 1-5.
MAO Yin-yu, JI Yu-liang, GU Yu-xiang, et al. Analysis of Structure and Load Carrying Properties of Heavy-Duty Molded Pulp[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(19): 1-5.
- [13] 周防国, 袁东亮, 张新昌. 纸浆模塑制品单元结构侧壁周长与承压能力的关系[J]. *包装工程*, 2005, 26(4): 12-14.
ZHOU Fang-guo, YUAN Dong-liang, ZHANG Xin-chang. The Relationship between Side Perimeters and Carrying Capacity of the Unit Structure in Molded Pulp Product[J]. *Packaging Engineering*, 2005, 26(4): 12-14.
- [14] 常江. 打印机缓冲包装设计及其力学性能仿真分析[J]. *包装学报*, 2021, 13(5): 60-67.
CHANG Jiang. Cushioning Packaging Design and Mechanical Property Simulation Analysis of Printer[J]. *Packaging Journal*, 2021, 13(5): 60-67.
- [15] JARUPAN L, HUNSA-UDOM R, BUMBUDSANPHAROKE N. Potential Use of Oil Palm Fronds for Papermaking and Application as Molded Pulp Trays for Fresh Product under Simulated Cold Chain Logistics[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2021, 19(7): 1-13.
- [16] BAHLAU J, LEE E. Designing Moulded Pulp Packaging Using a Topology Optimization and Superimpose Method[J]. *Packaging Technology and Science*, 2022, 35(5): 415-423.
- [17] 王青春, 范子杰. 利用 Ls-Dyna 计算结构准静态压溃的改进方法[J]. *力学与实践*, 2003, 25(3): 20-23.
WANG Qing-chun, FAN Zi-jie. Improvement in Analysis of Quasi-Static Collapse with Ls-Dyna[J]. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25(3): 20-23.
- [18] 孙玉瑾, 孙德强, 谭一, 等. EPE 泡沫填充圆形纸蜂窝异面缓冲性能的试验研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(13): 82-89.
SUN Yu-jin, SUN De-qiang, TAN Yi, et al. Experimental Study on the Out-of-Plane Cushioning Performance of Circular Paper Honeycomb Filled with EPE Foam[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(13): 82-89.
- [19] HAO Peng, DU Jian-xun. Energy Absorption Characteristics of Bio-Inspired Honeycomb Column Thin-Walled Structure under Impact Loading[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 79: 301-308.
- [20] XIANG Jin-wu, DU Jian-xun. Energy Absorption Characteristics of Bio-Inspired Honeycomb Structure under Axial Impact Loading[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 696: 283-289.
- [21] HU Da-yong, WANG Yong-zheng, SONG Bin, et al. Energy Absorption Characteristics of a Bionic Honeycomb Tubular Nested Structure Inspired by Bamboo Under Axial Crushing[J]. *Composites Part B*, 2019, 162: 21-32.