聚丙烯中空板抗弯性能研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.0016

石国栋[1] 滑广军[1]
刘奇龙[1] 郭佳龙[1]
周 家[2]

1. 湖南工业大学
材料科学与工程学院
湖南 株洲 412007
2. 湖南航空技师学院
经贸物流系
湖南 株洲 412000

摘 要：针对包装用小厚度聚丙烯（PP）中空板结构设计参数缺失的问题，以市场主流厚度为研究对象，探讨厚度与芯层间隔的耦合作用对其弯曲性能的影响，旨在为包装工程结构设计提供理论支撑与设计依据。选取厚度为 3, 4, 5 mm 的 PP 中空板开展三点弯曲试验，测定其最大弯曲力；并采用 ANSYS 建立有限元模型进行仿真分析，进一步探究不同芯层间隔对弯曲性能的影响。研究结果表明：在相同芯层间隔条件下，中空板的弯曲力随厚度增加显著增强，二者呈正相关关系；在相同厚度条件下，弯曲力随芯层间隔增大而单调递减，呈负相关关系。不同厚度与芯层间隔组合下的中空板弯曲性能呈现规律性变化，仿真结果与试验数据基本吻合，验证了有限元模型的可靠性。通过揭示厚度－芯层间隔耦合作用对小厚度 PP 中空板弯曲性能的影响规律，填补了包装用小厚度 PP 中空板结构设计的参数空白，为绿色包装材料的轻量化与高性能设计提供依据。

关键词：聚丙烯中空板；弯曲力；有限元分析
中图分类号：TB484；TS206.4 **文献标志码**：A
文章编号：1674-7100(2026)03-0142-09
引文格式：石国栋，滑广军，刘奇龙，等 . 聚丙烯中空板抗弯性能研究 [J]. 包装学报，2026，18(3)：142-150.

1 研究背景

随着我国经济的持续发展和物流体系的不断完善，包装材料的使用量大幅增长，可降解、可循环包装材料逐渐受到行业的广泛关注。其中，瓦楞纸板因其成本低、缓冲性能好，在包装领域得到普遍应用。然而，该材料在潮湿环境中易受潮破损，且存在循环利用率低、耐湿性差等问题，限制了其进一步推广使用[1-2]。聚丙烯（PP）作为一种典型的半结晶性塑料，具备质轻、防潮、耐热性强等优点[3]，其制成的中空板材料在运输包装中展现出替代传统瓦楞纸板的潜力，目前已广泛应用于农业、化工、建筑及工程制造等多个行业[4]。抗弯性能作为衡量材料承载能力的核心指标，直接影响聚丙烯中空板在运输装载领域的适用性表现[5]。

在对中空板相关性能的研究方面，朱波[6]以整体织物中空夹层复合材料的最小结构单元为研究对象，对其面内弹性常数进行了预测，并构建了动力有限元分析模型，模拟了不同冲击下材料的损伤情况。何岩明等[7]对单层 E 型瓦楞纸箱托盘进行了稳态分析，以优化其结构设计。通过对比分析结果，发现仿真与理论推导基本吻合，从而为该类托盘的设计提供

收稿日期：2025-11-23
基金项目：国家重点研发计划基金资助项目（2023YFC3904603）；湖南省自然科学基金联合基金资助项目（2023JJ50162）
作者简介：石国栋，男，硕士生，主要研究方向为运输包装，E-mail：1469984621@qq.com
通信作者：滑广军，男，教授，主要从事运输包装研究，E-mail：846620681@qq.com

了理论依据。李洋洋等[8]通过静态压缩实验，分析了瓦楞纸板与正六边形蜂窝纸板的力学性能，发现瓦楞纸板在静态力学性能和缓冲性能方面均优于蜂窝纸板，更加适用于运输包装领域，为新型纸板的开发提供了有益的参考依据。尹芳放等[9]利用光固化 3D 打印技术制备了两种光敏树脂中空试件，并对其进行了抗弯强度与刚度的测试。结果表明，所提出的新型结构显著提升了材料的抗弯性能，为聚合物制品的结构与功能一体化设计提供了理论依据与可行性方案。针对 PP 蜂窝夹芯板在应用中存在的边缘处理难题，郭焕祥等[10]提出了封边与包边相结合的边缘处理方案。该方案不仅有效封闭了板材边缘，更改善了构件的外观与力学强度，进而提升了汽车内饰件的综合性能，拓展了该类材料的应用场景。彭子腾等[11]通过建立 1:1 比例的几何模型，并借助 ANSYS 有限元仿真软件对瓦楞纸板的压缩性能进行了预测，显著缩短了求解时间，并降低了内存资源的占用。滑广军等[12]聚焦于纸板的边压强度，通过建立有限元模型对纸板进行屈曲分析。结果表明，在相同克重条件下，蜂窝纸板在抗压效率方面优于瓦楞纸板，无论是在边压强度还是平压强度方面均表现出更佳的性能。

综上所述，现有的研究虽然从中空板的结构、刚度及强度等方面进行了深入探讨，但是仍然缺乏针对 PP 中空板的专题研究，其主要体现在以下两个方面：1）缺乏针对厚度－芯层间隔耦合作用的探究。2）缺乏适用于包装用小厚度 PP 中空板的高精度预测模型。为此，本文从理论分析、试验验证与仿真分析 3 个层面深入探讨不同厚度与芯层间隔下 PP 中空板的弯曲性能。具体而言，引入考虑芯层间隔修正的抗弯惯性矩公式，结合三点弯曲试验数据，建立有限元模型并拓展参数范围。该模型在保证数据准确性的基础上，为包装结构优化设计提供了实用工具，对推动 PP 中空板在绿色包装领域的应用具有积极意义。

2 PP 中空板理论分析

2.1 结构特性

包装用 PP 中空板是一种兼具轻质与多功能特性的塑料板材，目前市场上的主流厚度规格为 3, 4, 5 mm。其典型结构如图 1 所示，由上下面板和中间芯层组成，其中上下面板厚度均为 0.2 mm，芯层厚度为 0.2 mm，芯层间隔为 3 mm。

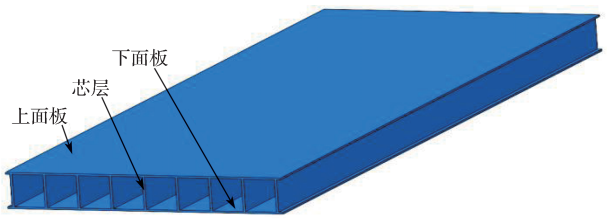


图 1 PP 中空板结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of PP hollow board

2.2 抗弯惯性矩

在小变形条件下，材料应力与应变呈线性关系，遵循胡克定律[13]。假定 PP 中空板弯曲变形后截面始终保持平面[14]，则中空板的抗弯惯性矩主要来源于上下两层面板，而中间芯层惯性矩可通过引入有效密度进行修正。相关计算如下：

1）面板横截面积计算。面板横截面积由宽度与厚度决定。单层面板的横截面积计算式为

$$A_{\text{face}}=bh_{\text{face}}, \tag{1}$$

式中：b 为板件宽度，mm；h_{face} 为单层面板厚度，h_{face}=0.2 mm。

2）惯性矩计算。芯柱的间距对其惯性矩具有一定的影响，可通过在宽度方向引入有效密度来修正影响[15]。芯柱对中性轴的惯性矩（I_{core}）和面板惯性矩（I_{eq}）计算公式分别为：

$$I_{\text{core}}=\frac{h_{\text{face}}\left(h-2h_{\text{face}}\right)^3}{12}+t\left(h-2h_{\text{face}}\right)\left(\frac{h}{2}\right)^2, \tag{2}$$

$$I_{\text{eq}}=2A_{\text{face}}\times\left(\frac{d}{2}\right)^2=\frac{h_{\text{face}}bd^2}{2}, \tag{3}$$

式中：h 为中空板厚度，mm；d 为两块面板中心面间的距离，mm。

3）总惯性矩计算。总惯性矩（I）为

$$I=I_{\text{eq}}+I_{\text{core}}\times\frac{h_{\text{face}}}{s}, \tag{4}$$

式中，s 为芯层间隔，mm。

芯柱惯性矩远小于面板惯性矩，因此芯柱惯性矩可忽略不计。因此，结构的总惯性矩为

$$I=I_{\text{eq}}=2A_{\text{face}}\times\left(\frac{d}{2}\right)^2=\frac{bh_{\text{face}}d^2}{2}。 \tag{5}$$

4）最大弯曲力预测。基于经典梁弯曲理论[16]，并结合三点弯曲载荷下的弯矩，最大弯曲力 F 为

$$F=\frac{8\sigma I}{Lh}, \tag{6}$$

$$\sigma=\frac{My}{I}, \tag{7}$$

$$M=\frac{LF}{4}, \tag{8}$$

式（6）~（8）中：σ为 PP 材料弯曲强度，MPa；M 为最大弯矩，N·mm；y 为中性轴到面板外表面的距离，mm；L 为跨距（两端弯曲支撑点距离），mm。

综上所述，PP 中空板的弯曲性能由截面总惯性矩 I 决定。总惯性矩 I 随厚度 h 的增加而增大，从而提升其抗弯承载能力；总惯性矩 I 随芯层间隔 s 的增加而降低；芯层间隔 s 越大，芯柱有效密度越低，总惯性矩 I 越小，抗弯能力相应减弱。这一规律揭示了结构参数对弯曲性能的影响，为后续的试验验证与有限元仿真奠定了理论基础[17]。

3 试验

3.1 试验仪器与材料

试验所用主要仪器包括恒温恒湿箱和万能试验机。为保证测试结果的稳定性与可靠性，试样在制备时严格控制其方向与尺寸，确保中空结构的均匀性。试验采用厚度不同、芯层间隔相同的 PP 中空板，其尺寸为 80 mm × 25 mm，具体参数见表 1。

表 1 PP 中空板试验试样参数

Table 1 Parameters of PP hollow board experimental samples

编号	定量 /(g·m^{-2})	试样厚度 /mm	面板厚度 /mm
A	584.76	3	0.2
B	696.83	4	0.2
C	934.92	5	0.2

3.2 温湿度处理

为降低环境因素对材料力学性能的影响，本研究依据 GB/T 4857.2—2005《包装 运输包装件基本试验 第 2 部分：温湿度调节处理》[18] 的规定，将试样置于恒温恒湿箱中预处理 24 h，箱中温度为 23 ℃、相对湿度为 50%。

3.3 三点弯曲试验

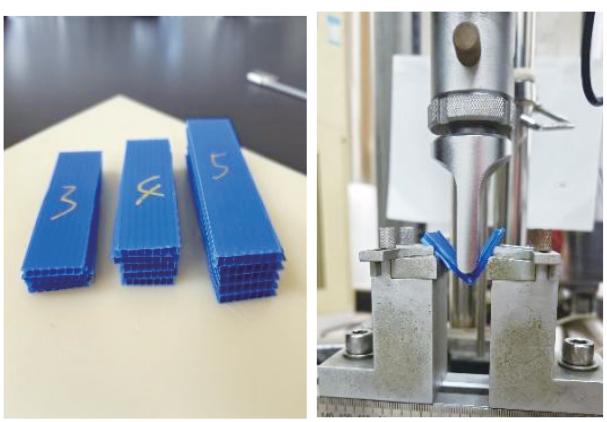
根据 GB/T 1456—2021《夹层结构弯曲性能试验方法》[19]、GB/T 9341—2008《塑料 弯曲性能的测定》[20] 及 HG/T 3840—2006《塑料弯曲性能小试样试验方法》[21]，对中空板开展三点弯曲试验，以模拟其在实际使用过程中承受弯曲载荷的工况。将试样两端置于固定支座上，在试样中点施加垂直于试样的匀速位移载荷，测定材料的弯曲强度和弯曲模量。试验关键参数如跨距（64 mm）、压头速度（4 mm/s）及试样宽度（25 mm）均严格遵循相关标准要求。具体试验步骤如下：

1）测量试样。使用千分尺或游标卡尺测量试样厚度 h、宽度 b 和长度 L，并记录数据。

2）装夹试样。将三点弯曲夹具安装在万能试验机上，调整跨距至规定值，平稳放置试样，确保试样中点与压头对齐。

3）设置参数。根据标准及试样尺寸，设定弯曲速度、长度、宽度和跨距等试验参数。

4）启动测试。分别对厚度为 3, 4, 5 mm 的试样进行测试，每种厚度测试 5 个试样，剔除异常值后取平均值，以获得材料的力学性能参数[20]。不同厚度试验试样如图 2a 所示，试样在试验机中的弯曲状态如图 2b 所示。



a）不同厚度试验试样　　b）三点弯曲试验状态

图 2 三点弯曲试验

Fig. 2 Three-point bending test

三点弯曲试验结果如表 2 所示。由表 2 可知，随着试样厚度从 3 mm 增加至 5 mm，弯曲力均值由 27.07 N 增至 72.67 N，增幅达 168.5%，而弯曲模量则先增加后趋于稳定，在 4 mm 时其均值为 1540.49 MPa，5 mm 时为 1647.03 MPa；变异系数作为衡量数据相对离散程度的统计指标，各测试组的变异系数均小于 8%，表明试验数据离散度较小，可靠性高。为进一步直观展示厚度对弯曲性能的影响，将试验数据取平均值后绘制柱状图并标注误差棒，如图 3 所示。

由试验结果可知：在固定芯层间隔下，随着厚度增加，中空板面板惯性矩显著提升，从而增强其抗弯性能。同时，弯曲模量在 4 mm 厚度时趋于饱和，表明该厚度可能是结构刚度提升的阈值点。此外，试验获取的弯曲强度均值可作为有限元模型的材料参数，为后续仿真验证提供参考。

表 2　试验测得不同厚度下 PP 中空板的力学性能

Table 2　Experimentally measured mechanical properties of PP hollow plates at different thicknesses

试样厚度 / mm	弯曲力 /N	弯曲模量 / MPa	弯曲强度 / MPa	弯曲力均值 /N	变异系数 /%
3	28.058	936.082	11.971	27.07	4.14
	25.927	825.958	11.062		
	27.848	590.573	11.971		
	28.058	621.608	10.857		
	25.446	568.398	11.882		
4	47.298	1730.520	11.352	43.76	7.34
	42.340	1511.273	10.162		
	47.625	1610.175	11.430		
	39.969	1437.197	9.592		
	41.556	1413.268	9.973		
5	68.811	1639.802	10.569	72.67	3.23
	73.781	1727.257	11.333		
	71.515	1615.596	11.492		
	74.818	1647.654	11.425		
	74.380	1604.839	10.985		

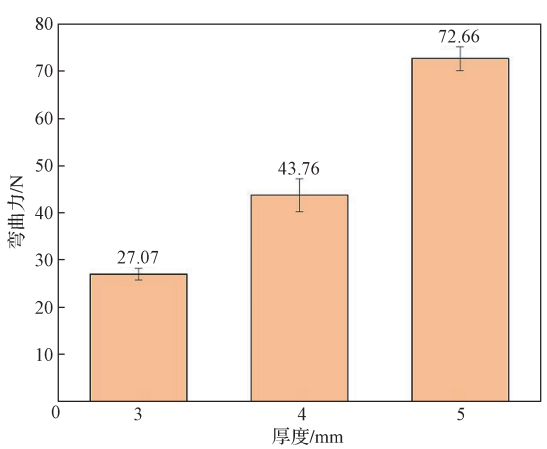


图 3　不同厚度下 PP 中空板的弯曲力柱状图

Fig. 3　Bar chart of bending force of PP hollow plates at different thicknesses

4　有限元分析

本研究采用先试验后仿真的研究思路，其核心价值主要体现在以下两个方面：1）在试验层面，通过三点弯曲试验获取厚度为 3, 4, 5 mm 的 PP 中空板的基础力学数据（包括弯曲力、弯曲模量及弯曲强度），为有限元模型提供真实的材料参数，从而避免仿真分析脱离实际。2）在仿真层面，基于试验数据验证不同厚度、相同芯层间隔的模型可靠性，并进一步拓展芯层间隔参数（2, 3, 4 mm），以弥补试验仅能测试单一芯层间隔的局限性 [22]。同时，通过仿真获得的应力云图，直观揭示中空板弯曲失效的核心区域（主要集中于中间部位），为后续结构优化提供明确方向。综上，试验与仿真的有机结合，既保证了研究结论的可靠性，又显著提升了研究的应用价值。

4.1　不同厚度 PP 中空板仿真

4.1.1　仿真模型建立

基于前述试验的试样尺寸，建立了 3 种厚度不同的 PP 中空板有限元模型。模型的上下面板厚度均为 0.2 mm，中间芯层厚度为 0.2 mm，中空芯层间隔为 3 mm，厚度分别为 3, 4, 5 mm，其他结构参数保持一致（见图 4 和表 3）。模型中设定了固定跨距支座，其装配如图 5 所示。

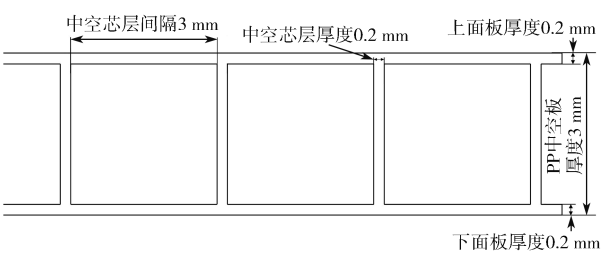


图 4　PP 中空板部分结构尺寸

Fig. 4　Partial structural dimensions of PP hollow board

表 3　PP 中空板仿真结构参数

Table 3　PP hollow board simulation structure parameters　mm

中空板	长 × 宽 × 高	芯层间隔
A	80 × 25 × 3	3
B	80 × 25 × 4	3
C	80 × 25 × 5	3

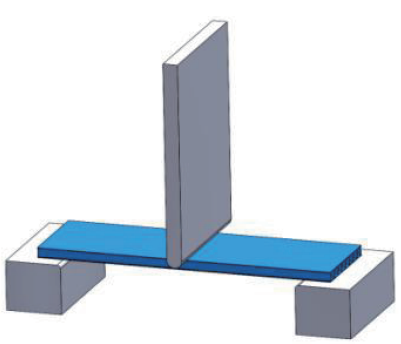


图 5　三点弯曲仿真装配示意图

Fig. 5　Three-Point bending simulation assembly diagram

4.1.2　仿真及结果分析

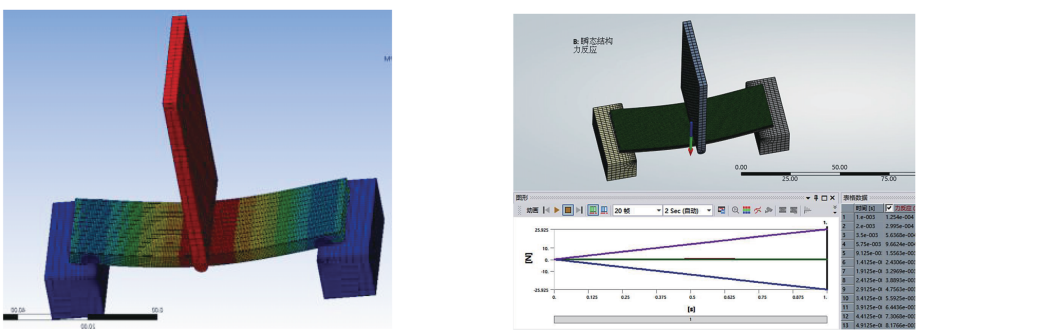
在 ANSYS 中定义新材料，材料名称为聚丙烯中空板，并从左侧工具箱中依次添加密度 [21]、弹性

模量、泊松比、屈服强度、切线模量等参数（见表4）。将PP中空板模型导入瞬态动力学分析模块。在SpaceClaim中完成中间面抽壳，并通过共享节点将几何模型传递至Workbench，为支撑座和压头分配结构钢材料，为PP中空板赋予已定义的材料参数。随后，设置网格划分参数：总模型全局尺寸为2 mm，中空板局部尺寸为0.5 mm，采用六面体主导网格划分，确保关键区域的计算精度[23]。网格生成后，接触模式设为摩擦，摩擦因数设为0.2。对支撑底座施加固定约束，在半径为2 mm的压头上沿y方向施加4 mm/s的速度载荷，求解仿真的力响应（见图6），并与试验值、理论值进行对比（见图7）。

表4 PP中空板仿真材料参数

Table 4 Simulation material parameters of PP hollow board

密度 / (kg·m^{-3})	弹性模量 / MPa	泊松比	屈服强度 / MPa	切线模量 / MPa
185	1800	0.35	20	1500



a）应力分布云图　b）数值分析示意图

c）厚度为3 mm　d）厚度为4 mm　e）厚度为5 mm

图6 不同厚度、相同芯层间隔的PP中空板有限元仿真弯曲力

Fig. 6 Finite element simulation bending force of PP hollow plates with different thicknesses and the same core layer spacing

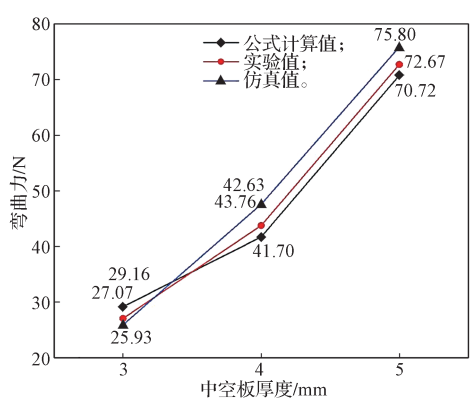


图7 不同厚度PP中空板弯曲力对比

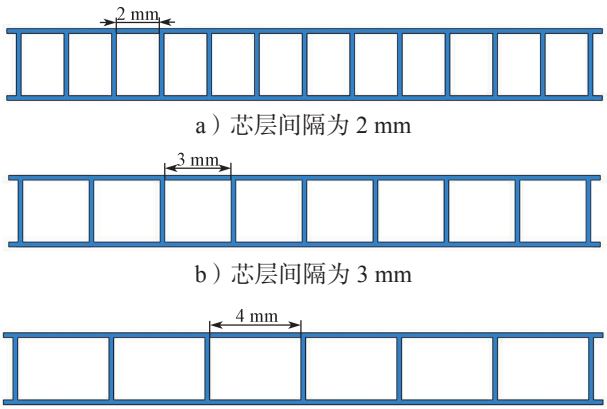
Fig. 7 Comparison of bending force of PP hollow boards of different thicknesses

如图6a和图6b所示，PP中空板的应力和变形主要集中在中间区域。图6c~e展示了3种不同厚度下，PP中空板的弯曲力仿真结果。当芯层厚度为3 mm时，弯曲力仿真值为25.93 N，对应的试验值为27.07 N，相对误差为4.2%；厚度为4 mm时，仿真值为42.63 N，试验值为43.76 N，误差为2.6%；厚度为5 mm时，仿真值为75.80 N，试验值为72.67 N，误差为4.3%。从仿真所得弯曲力与试验值、理论值的对比可知，数据偏差均不超过8%，处于工程实践可接受的误差范围之内。这一结果验证了理论公式推导的合理性、试验数据的可靠性，以及所建立的有限元仿真模型的准确性[24]。

4.2 不同芯层间隔 PP 中空板仿真

4.2.1 仿真模型建立

为探究芯层间隔对 PP 中空板弯曲性能的影响，本研究通过调控芯层间隔参数，系统构建了包含 2, 3, 4 mm 芯层间隔的结构模型（见图 8），涵盖 9 种不同参数组合的 PP 中空板（见表 5），并定量分析各结构在弯曲载荷作用下的力学响应特性 [25]。



a）芯层间隔为 2 mm

b）芯层间隔为 3 mm

c）芯层间隔为 4 mm

图 8 不同芯层间隔 PP 中空板结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of PP hollow board structure with different core layer spacing

表 5 不同厚度、不同芯层间隔的 PP 中空板试样参数

Table 5 PP hollow board sample parameters with different thicknesses and different core layer spacing

编号	试样厚度 /mm	中空芯层间隔 /mm
3–2	3	2
3–3	3	3
3–4	3	4
4–2	4	2
4–3	4	3
4–4	4	4
5–2	5	2
5–3	5	3
5–4	5	4

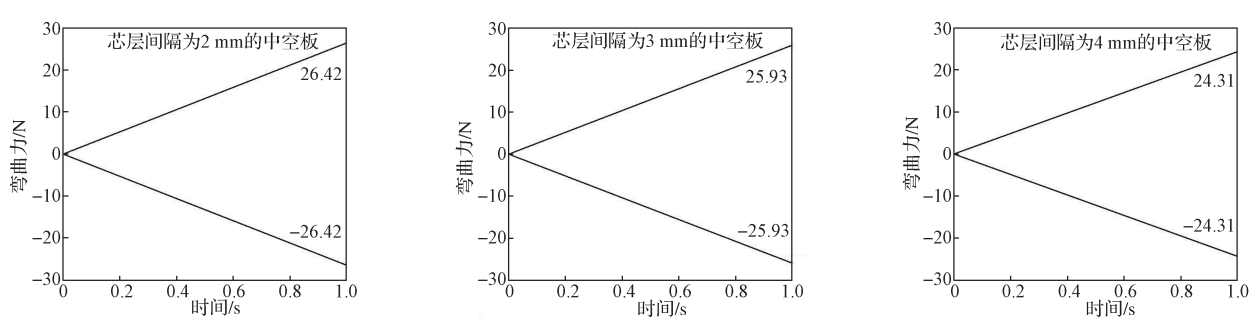
4.2.2 仿真及结果分析

在 ANSYS Workbench 中导入模型，按照 3.1.2 节所述步骤进行有限元仿真，分析厚度与芯层间隔对弯曲力的耦合作用，仿真结果及对比如图 9~10 所示。

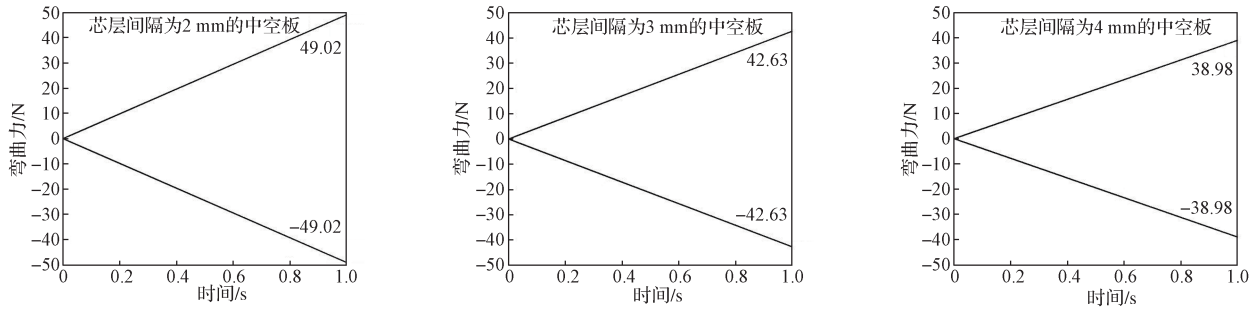
1）芯层间隔对弯曲力呈现负相关效应。在相同厚度条件下，弯曲力随芯层间隔增大而呈单调下降趋势，且厚度越大，弯曲力衰减越明显 [26]。具体而言，当板厚为 3 mm 时，芯层间隔从 2 mm 增至 4 mm，弯曲力由 26.42 N 下降至 24.31 N，衰减幅度为 8.0%，如图 9a 所示；当板厚为 4 mm 时，芯层间隔从 2 mm 增至 4 mm，弯曲力由 49.02 N 下降至 38.98 N，衰减幅度达 20.5%，如图 9b 所示；当板厚为 5 mm 时，芯层间隔从 2 mm 增至 4 mm，弯曲力由 78.17 N 下降至 52.77 N，衰减幅度达 32.5%，如图 9c 所示。

2）厚度对弯曲力呈现正相关性。在相同芯层间隔下，弯曲力随厚度增加而显著提升，且芯层间隔越小，厚度对弯曲力的增强作用越突出。具体而言，当芯层间隔为 2 mm 时，厚度从 3 mm 增至 5 mm，弯曲力由 26.42 N 提升至 78.17 N，增幅达 196.0%；当芯层间隔为 3 mm 时，厚度从 3 mm 增至 5 mm，弯曲力由 25.93 N 提升至 75.80 N，增幅为 192.3%；当芯层间隔为 4 mm 时，厚度从 3 mm 增至 5 mm，弯曲力由 24.31 N 提升至 52.77 N，增幅为 117.1%。

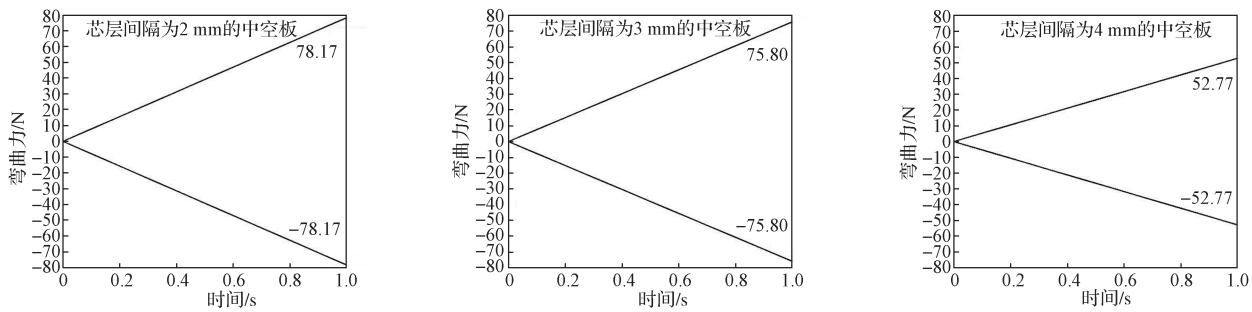
PP 中空板的弯曲行为可通过伯努利－欧拉梁理论加以解释。弯曲过程中，PP 中空板上下面板主要承受拉压应力，而芯柱则起支撑作用。当板材厚度较小（如 3 mm）时，面板刚度占据主导地位，芯柱支撑的缺失对整体刚度影响相对有限 [27]。因此，当芯层间隔由 2 mm 增加至 4 mm 时，弯曲力仅下降 8.0%。而当板材厚度增大至 5 mm 时，面板的悬臂长度随之增加，芯柱的支撑作用变得尤为关键。芯层间隔的增大会导致支撑点减少，面板在弯曲作用下更易发生挠曲变形，从而使弯曲力显著衰减 32.5%[28]。



a）3 mm 厚度不同芯层间隔的弯曲力



b）4 mm 厚度不同芯层间隔的弯曲力



c）5 mm 厚度不同芯层间隔的力

图 9　不同厚度、不同芯层间隔的 PP 中空板有限元仿真弯曲力值

Fig. 9　Finite element simulation bending force values of PP hollow board with different thicknesses and different core layer intervals

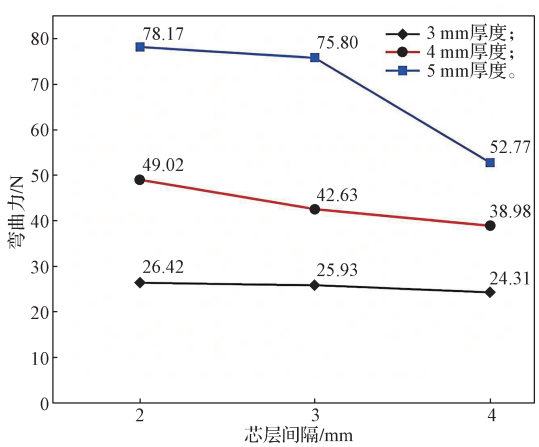


图 10　不同厚度、不同芯层间隔的 PP 中空板弯曲力对比

Fig. 10　Comparison of bending force of PP hollow board with different thicknesses and different core layer spacing

5　结论

本研究从理论推导、试验验证与仿真分析 3 个层面深入探讨了不同厚度与芯层间隔下 PP 中空板的弯曲性能。所得结论如下：

1）推导了考虑芯层间隔修正的 PP 中空板抗弯惯性矩计算公式。相较于传统模型，本模型的预测精度提升了 8%，适用于厚度 3~5 mm、芯层间隔 2~4 mm 范围内板材弯曲力的初步预测。

2）揭示了厚度－芯层间隔耦合规律。在相同芯层间隔下，弯曲力随厚度增加而增强；相同厚度下，弯曲力随芯层间隔增大而递减。进一步分析表明，厚度越大，芯层间隔对弯曲力的衰减作用越明显；芯层间隔越小，厚度对抗弯性能的增强效果越突出。此外，研究发现 PP 中空板弯曲模量的饱和厚度为 4 mm，超过该值后弯曲模量增幅显著减缓。该规律为小厚度 PP 中空板的结构设计提供了关键参数依据。

3）试验与仿真数据误差控制在 8% 以内，验证了仿真模型的可靠性，为 PP 中空板在包装工程中的结构优化提供了有效的辅助工具。

基于上述结论，提出如下针对性选型方案。

1）轻型包装（ ≤ 5 kg）：推荐 3 mm 厚度 +4 mm 芯层间隔组合，实测弯曲力达 24.31 N，满足承载要求，同时较 3 mm 厚度 +2 mm 芯层间隔组合，实现显著减重与 15% 成本下降；

2）中型包装（5~10 kg）：推荐 4 mm 厚度 +3 mm 芯层间隔组合，实测弯曲力为 42.63 N，实现抗弯性能与经济性兼顾；

3）重型包装（10~15 kg）：推荐 5 mm 厚度 +2 mm 芯层间隔组合，实测弯曲力达 78.17 N，抗弯性能最优，有效防止运输过程中的板材弯曲失效。

未来将进一步拓展参数区间以验证耦合规律，并

考察其他因素对弯曲性能的影响，以优化 PP 中空板的力学性能，为其在绿色包装领域的规模化应用提供更系统的理论支撑。

参考文献：

[1] 韩 霖，贺 军，张新昌 . 基于 PP 蜂窝板的可折叠循环复用包装箱关键技术研究 [J]. 塑料工业，2019，47(5)：89-93.
[2] 王明淇，卢富德 . 多层 A 楞瓦楞纸板面内冲击响应特性研究 [J]. 包装学报，2025，17(1)：80-87.
[3] 宋 科 . PP 材料疲劳损伤性能的研究 [D]. 昆明：昆明理工大学，2015.
[4] MORAIS D S，CRUZ J，FANGUEIRO R，et al. Mechanical Behavior of Ropes Based on Polypropylene (PP) and Poly(Ethylene Terephthalate) (PET) Multifilament Yarns for Achilles Tendon Partial Substitution[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials，2020，106：103734.
[5] 戴宏民，戴佩华，周 均 . 碳减排与绿色包装 [J]. 包装学报，2010，2(2)：48-51.
[6] 朱 波 . 整体中空夹层复合材料低速冲击性能及剩余强度研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2010.
[7] 何岩明，何玉安 . 基于 FEM 的单层 E 型瓦楞纸箱托盘稳态数值分析 [J]. 包装工程，2016，37(9)：40-43，73.
[8] 李洋洋，石 威，姜欣岑，等 . 瓦楞：蜂窝纸板力学性能研究 [J]. 科技视界，2016，6(27)：82-83.
[9] 尹芳放，党开放，杨卫民，等 . 基于可靠性的中空板结构－功能一体化设计与性能研究 [J]. 中国塑料，2021，35(2)：52-57.
[10] 郭焕祥，李海帆，朱维珍，等 . PP 蜂窝夹芯板的边缘处理方案 [J]. 汽车工艺与材料，2019(3)：22-25.
[11] 彭子腾，郝天照，王 瑞，等 . 基于 ANSYS 瓦楞纸板等效力学性能研究 [J]. 包装工程，2024，45(21)：192-199.
[12] 滑广军，谢 勇 . 蜂窝纸板与瓦楞纸板边压强度有限元分析 [J]. 包装工程，2009，30(5)：1-2，12.
[13] 罗培林 . Hooke's Law(胡克定律) 的革新与“强度稳定综合理论”的创建和发展 [J]. 哈尔滨工程大学学报，2008，29(7)：641-650.
[14] 莫淇茗，杨小蝶，李腾飞，等 . 不同梁理论下功能梯度梁的自由振动分析 [J]. 山西建筑，2021，47(20)：50-52.
[15] CZARNECKI T，PFLUG J. Polypropylene Honeycomb Boards from EconCore Provide High Performance at Minimal Costs[J]. Reinforced Plastics，2019，63(2)：90-92.
[16] 刘鸿文 . 材料力学Ⅱ [M]. 6 版 . 北京：高等教育出版社，2017：120-150.
[17] RAN J H，SONG Z P，WANG X F. Preparation and Performance Tests of Wood-Plastic Composite Panels with Cotton Stalk Meal/Residual Film Particles[J]. JOM，2025，77(8)：6180-6190.
[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会 . 包装 运输包装件基本试验 第 2 部分：温湿度调节处理：GB/T 4857.2—2005[S]. 北京：中国标准出版社，2005：1-5.
[19] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会 . 夹层结构弯曲性能试验方法：GB/T 1456—2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021：5-10.
[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会 . 塑料 弯曲性能的测定：GB/T 9341—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009：1-16.
[21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会 . 塑料弯曲性能小试样试验方法：HG/T 3840—2006[S]. 北京：中国标准出版社，2006：2-5.
[22] MOHAMMADABADI M，YADAMA V，SMITH L. The Effect of Plate Theories and Boundary Conditions on the Bending Behavior of a Biaxial Corrugated Core Sandwich Panel[J]. Composite Structures，2020，241：112133.
[23] ADAMOV A A，TOROPITSINA A V. Experimental Study and Simulation of Deformation of Multilayer Honeycomb Panels During Shear Test[J]. Mechanics of Solids，2025，60：4548-4556.
[24] BELLAHKIM M，BENBOURAS Y，MAZIRI A，et al. The Effect of Boundary Conditions and Stacking Sequence on the Nonlinear Behavior of Laminated Composite Plates in Bending[J]. International Journal of Engineering Research in Africa，2021，57：33-47.
[25] 宋卫生，薛 阳，边文慧，等 . 瓦楞纸板楞形参数对力学性能的影响 [J]. 包装工程，2020，41(17)：147-151.
[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会 . 瓦楞纸板 分离后组成原纸定量的测定：GB/T 22811—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009：1-11.
[27] 薄晓莉 . 整体中空夹层复合材料力学性能的数值分析与实验研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2009.
[28] 杨 稳 . 蜂窝夹层结构复合材料的性能仿真与应用 [D]. 十堰：湖北汽车工业学院，2021.

(责任编辑：廖带莲)

Study on Bending Properties of Polypropylene Hollow Board

SHI Guodong[1], HUA Guangjun[1], LIU Qilong[1], GUO Jialong[1], ZHOU Jia[2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Department of Economics, Trade and Logistics, Hunan Aviation Technician College, Zhuzhou Hunan 412000, China)

Abstract: Aiming at the lack of structural design parameters for small-thickness polypropylene (PP) hollow boards used in packaging, the mainstream thicknesses in the market was taken as the research object, and the coupling effect of thickness and core layer spacing on their bending performance was explored, with the aim of providing theoretical support and design basis for the structural design of packaging engineering. PP hollow boards with thicknesses of 3, 4, 5 mm were selected to conduct three-point bending tests for determining their maximum bending force. ANSYS was adopted to establish a finite element model for simulation analysis, so as to further explore the influence of different core layer spacings on bending performance. The research results indicate that under the same core layer spacing, the bending force of the hollow board increases significantly with the increase of thickness, presenting a positive correlation between them, while under the same thickness, the bending force decreases monotonically with the increase of core layer spacing, showing a negative correlation. The bending performance of hollow boards under different combinations of thickness and core layer spacing exhibits regular changes, and the simulation results are basically consistent with the experimental data, verifying the reliability of the finite element model. By revealing the influence law of the thickness-core layer spacing coupling effect on the bending performance of small-thickness PP hollow boards, the gap in the structural design parameters of small-thickness PP hollow boards for packaging is filled, providing a basis for the lightweight and high-performance design of green packaging materials.

Keywords: polypropylene hollow board; bending force; finite element analysis