

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.008

# 楞向与结构设计对高填充CaCO<sub>3</sub>/PP中空板承载性能的影响

李志强<sup>1,2</sup>, 陈曦<sup>1</sup>, 尹思玥<sup>3</sup>, 尹思雯<sup>3</sup>

(1. 陕西科技大学轻工科学与工程学院, 西安 710021; 2. 轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021;

3. 北京丰德兰志包装技术有限公司, 北京 102000)

**摘要:** 为研究高填充碳酸钙/聚丙烯(CaCO<sub>3</sub>/PP)中空板的力学性能并提升其承载能力, 首先通过高含量CaCO<sub>3</sub>填充PP挤出成型工艺, 制备了CaCO<sub>3</sub>/PP中空板。通过拉伸试验、撕裂试验、垂直压缩试验, 以及针对不同结构形式(十字形、三角形、井字形)、不同楞向(横楞向、竖楞向)及不同克重(800、900、1 000 g/m<sup>2</sup>)的静态压缩试验, 系统考察了板材的力学性能及其不同结构的承载特性。结果表明, 当板材拉伸方向由横楞向转为竖楞向时, 拉伸弹性模量可提升81%; 静态压缩实验中, 当压缩方向由横楞向变为竖楞向时, 压缩峰值载荷提升8倍。随着克重增加, 板材力学性能呈非线性增长趋势, 其中900 g/m<sup>2</sup>板材在拉伸性能、抗撕裂、承载性能方面表现最优。楞向与克重对不同结构构件力学性能的影响规律一致, 三种结构中, 井字形构件的承载性能最优, 较十字形、三角形构件平均高51%。综上所述, 在高填充CaCO<sub>3</sub>/PP中空板结构设计中, 楞向应与受力方向一致, 结构优先选用井字形, 克重优选900 g/m<sup>2</sup>。

**关键词:** 高填充CaCO<sub>3</sub>/PP中空板; 力学性能; 静态压缩; 承载特性; 构件设计

**中图分类号:** TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0063-10

## Effect of flute direction and structural modification on the load-bearing performance of highly filled PP with CaCO<sub>3</sub> hollow boards

LI Zhiqiang<sup>1,2</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, YIN Siyue<sup>3</sup>, YIN Siwen<sup>3</sup>

(1. College of Bioresources Chemical & Materials Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Light Chemistry Engineering, Xi'an 710021, China;

3. Beijing Fengdelanzhi Packaging Technology Co., Ltd., Beijing 102000, China)

**Abstract :** To investigate the mechanical properties of highly filled polypropylene (PP) with calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) hollow board and enhance its load-bearing capacity, high content of CaCO<sub>3</sub> filled PP boards were first prepared by extruding PP filled with high-content CaCO<sub>3</sub>. Through tensile tests, tear tests, vertical compression tests, and static compression experiments with different structural configurations (cross-shaped, triangle-shaped, and grid-shaped), flute directions (across-flute and along-flute), and basis weights (800, 900, and 1 000 g/m<sup>2</sup>), the mechanical properties of the boards and the load-bearing characteristics of their structural components were systematically investigated. Results indicate that when flute direction is changed from across-flute to along-flute in the static compression experiments, the tensile modulus of the board increases by 81%, and the peak compressive load increases by 8 times. The mechanical properties exhibit a nonlinear increase with increasing basis weight, and the 900 g/m<sup>2</sup> board demonstrates the best tensile, tear, and load-bearing performance. The effects of flute direction and basis weight on the mechanical properties of different structural configurations are consistent. Among the three structural configurations, the grid-shaped component exhibits the highest load-bearing capacity, outperforming that of the cross-shaped and triangle-shaped ones by an average of 51%. Therefore, in the structural design of high-calcium PP hollow boards, the flute direction should align with the loading direction, the grid structure is recommended, and a basis weight of 900 g/m<sup>2</sup> is preferred.

**Keywords :** highly filled PP with CaCO<sub>3</sub> hollow board ; mechanical properties ; static compression ; load-bearing characteristics ; component design

**基金项目:** 陕西省科技计划项目(2025JC-GXPT-022)

**通信作者:** 李志强, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为绿色包装技术

**收稿日期:** 2025-12-19

**引用格式:** 李志强, 陈曦, 尹思玥, 等. 楞向与结构设计对高填充CaCO<sub>3</sub>/PP中空板承载性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 63-72.

LI Zhiqiang, CHEN Xi, YIN Siyue, et al. Effect of flute direction and structural modification on the load-bearing performance of highly filled PP with CaCO<sub>3</sub> hollow boards[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 63-72.

目前在全球绿色革命大浪潮的冲击下,尤其是在国际贸易中对环保的要求日渐严格,许多国家对出口类包装材料加以限制,包装缓冲材料诸如聚乙烯发泡棉(EPE)、可发性聚苯乙烯(EPS)等,其废弃物因难回收、难降解等问题给自然环境造成了不可逆转的危害<sup>[1-2]</sup>,因此对不易降解包装材料的替代刻不容缓。

聚丙烯(PP)中空板是以PP为主要原料通过挤出成型的一种具有中空结构的塑料板材<sup>[3]</sup>,具有轻质高强、可循环利用的特性,作为一种环保材料主要替代瓦楞纸板、木板、金属板等被广泛用于包装领域。然而PP中空板相对于纸质瓦楞包装材料存在成本较高、缓冲性能低等缺陷,一直以来并不能完全替代瓦楞纸质包装材料在包装中的使用。

碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )是目前聚烯烃类高分子材料中用量最大的填料,具有较高的性价比<sup>[4]</sup>,通过填充适量的 $\text{CaCO}_3$ 可有效提升PP材料刚性并降低生产成本<sup>[5-9]</sup>。目前,市场上常见的PP板材多采用常规填充比例,其 $\text{CaCO}_3$ 质量分数通常处于30%左右,虽然该比例能在一定程度上改善性能并降低成本,但树脂基体仍为主要组分,材料成本仍有进一步优化的空间。高钙填充PP中空板, $\text{CaCO}_3$ 填充比例提升至50%以上,能够最大限度地减少价格更高的PP树脂的使用,实现材料在刚性、成本与综合性能之间的最优平衡。

PP中空板板材主要通过芯层变形提供支撑,其缓冲性能通常不如瓦楞纸质材料,但PP中空板作为可塑性变形的工程材料,能够承受反复的复杂力学载荷,且通过插合形成的中空板构件,其承载性能显著优于瓦楞纸构件。当前关于PP结构板材的研究文献大多围绕蜂窝板展开<sup>[10-11]</sup>,相比之下,对PP中空板的关注较少,其中对于高填充碳酸钙的PP中空板及其工程构件的研究则近乎空白。随着中空板板材的不断发展和应用领域的不断拓展,现有的研究已不足以解决应用时的结构问题。

针对上述问题,本文以一种高钙PP中空板为研究对象,选择常用克重(800、900、1 000  $\text{g}/\text{m}^2$ )及构件结构(十字形、井字形、三角形),开展高钙PP中空板力学及构件承载性能的研究。通过拉伸试验分析高钙填充中空板的各向异性力学特性;通过撕裂力试验及垂直压缩试验分析构件压溃时破坏模式及承载性能,进而设计十字形、三角形及井字形三种

插合结构,系统研究楞向与克重对压缩性能的影响。

研究结果不仅为PP中空板提供了明确的降本路径,也为PP中空板构件设计提供参考,对促进包装、物流等领域中轻量化、低成本板材的推广应用具有积极的参考价值。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PP:EP300H,金能化学(青岛)有限公司;

$\text{CaCO}_3$ :粒径5  $\mu\text{m}$ ,浙江长兴中弘新材料有限公司;

钛酸酯偶联剂:NDZ-201,东莞市康锦新材料科技有限公司;

色母料:LY-815,苏州琳源塑业科技有限公司;

抗氧剂1010和168:工业级,东莞市鼎海塑胶化工有限公司;

聚乙烯蜡:W501,东莞市康锦新材料科技有限公司。

### 1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:SHJ-35,南京广达橡塑机械厂;

辊筒式牵引机:DY-2,张家港市乐余永邦机械厂;

电子万能材料试验机:CMT4304,美特斯工业系统(中国)有限公司;

压缩强度试验仪:PN-CT300B,杭州品享科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):ZEISS Sigma 300,德国蔡司公司。

### 1.3 材料制备

PP中空板的制备分为四阶段<sup>[12]</sup>。(1)原料预处理。首先,将 $\text{CaCO}_3$ 粉末加入预热至115  $^{\circ}\text{C}$ 的高速混合机中,以250  $\text{r}/\text{min}$ 的转速预混合3 min以去除水分。随后,将钛酸酯偶联剂NDZ-201( $\text{CaCO}_3$ 质量的1%)在1 min内缓慢加入混合机。之后,将主轴转速提升至750  $\text{r}/\text{min}$ ,并开启飞刀(转速2 000  $\text{r}/\text{min}$ ),在115  $^{\circ}\text{C}$ 下持续混合10 min,直到物料达到均匀、干燥、可自由流动的松散粉末状态。之后将原料以质量分数按比例混合:PP(46%)、改性 $\text{CaCO}_3$ (50.7%)、色母料(2%)、聚乙烯蜡(1%)、以及抗氧剂(1010与168复配,总计0.3%)。(2)熔融挤出与成型。预混料经真空吸料机输送至同向平行双螺杆挤出机,从进料口到机头分为7个独立的温控区。挤出机从加料口

至模头各温控区采用梯度升温设置,第1区加料口为170℃,第2、3、4区熔融段分别为185、190、195℃,第5、6区分别为200、200℃,第7区为200℃。温度控制由设备内置多通道PID(比例-积分-微分)智能温控系统实现,确保加工温度全程稳定在设定范围内。(3)冷却定型与牵引。挤出成型的高温板坯立即进入三辊压光机与冷却水箱进行骤冷和定型,随后由牵引机以恒定速率引出,确保板材平整及尺寸稳定。(4)后处理。连续板材经定长裁切或收卷后,进行表面质量、厚度及克重检验。制备的板材如图1所示,公称厚度为3.8 mm,加强筋宽度为0.3 mm,上下面板厚度为0.4 mm,夹芯层高度为3 mm。

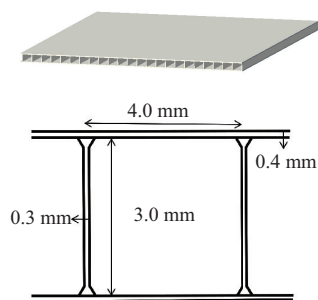


图1 PP夹芯结构及尺寸图

Fig. 1 PP sandwich structure and dimensions diagram

#### 1.4 性能测试

对高钙PP板材进行拉伸、撕裂力、垂直压缩力测试,为后续构件的静态压缩试验分析提供基础。测试均在温度(23±2)℃,相对湿度50%±10%的环境中进行。

##### 1.4.1 拉伸试验

分别对三组克重为800、900、1 000 g/m<sup>2</sup>的试样进行竖楞向与横楞向的拉伸试验。图2为拉伸试样示意图,如图所示,当施加力与楞向垂直时定义为横楞向,施加力与楞向平时定义为竖楞向。下文

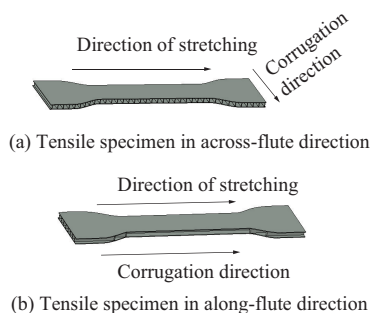


图2 横/竖楞向拉伸试样

Fig. 2 Tensile specimens in across-flute and along-flute directions

所述“横楞向”与“竖楞向”均以此定义。哑铃形拉伸试样尺寸为35 mm×160 mm,标距为70 mm,试验仪器采用万能材料试验机,试验速度为(50±5) mm/min。每组不少于5个样品,以确保得到足够的有效结果,从而获得相关拉伸性能参数。

##### 1.4.2 撕裂试验

为评价高钙PP板材抵抗撕裂的能力,参考QB/T 1130-1991《塑料直角撕裂性能试验方法》的原理,采用直角撕裂法测试。分别对克重800、900、1 000 g/m<sup>2</sup>的试样进行直角撕裂性能试验,对标准试样施加拉伸载荷,使试样在直角口处撕裂,测定试样的撕裂负荷。每组试验样品数量不少于5个,试样尺寸为100 mm×34 mm,试验速度为200 mm/min。

##### 1.4.3 垂直压缩试验

依照GB/T 1041-2008,对横楞向、竖楞向,克重分别为800、900、1 000 g/m<sup>2</sup>的板材进行垂直压缩测试,得到最大垂直压缩力,试样尺寸为100 mm×60 mm,每组试验不少于五个样品。

##### 1.4.4 静态压缩试验

对PP中空板进行结构设计时,楞向与结构是影响其承载性能的重要因素。中空板内部均匀分布的楞筋可以提高中空板在垂直和非垂直方向上的抗压强度,防止其变形毁坏,使得中空板板材具有更好的抗冲击减震效果。由于中空板具有不易折且回弹性较大的特性,研究中空板结构时应尽量减少黏合以免对试验结果造成干扰。因此,本文试样采用与中空板刀卡相同的卡槽结构进行成型制备。选用三个常用的结构,十字形、三角形、井字形,来研究结构因素对压缩性能的影响,具体实验方案如下。

准备三组克重为800、900、1 000 g/m<sup>2</sup>的板材,用打样机裁切成边长为60 mm的正方形板材,确保每片板材至少有15个加强筋。图3为不同结构的竖楞向压缩试验样品示意图,根据不同结构裁切4 mm的卡槽(十字形卡槽位于板材正中心,三角形、井字形卡槽与板材边缘位置的距离为10 mm),用以达到不同的成型效果。使用万能材料试验机对试样进行静态压缩试验,样品居中放置,上板以12 mm/min的恒定速度向下压缩<sup>[13]</sup>,直到样品密实。为减少实验误差,同一规格试样选取7个进行压缩,剔除异常值,选取5个有效试样的数据,并求得其平均

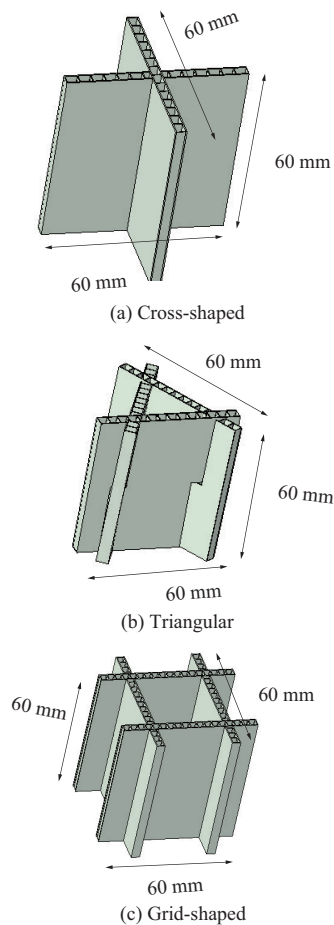


图3 不同结构的竖楞向压缩试验样品

Fig. 3 Compression test specimens of different structures in the along-flute direction.

值。试验完成后得到载荷-位移曲线图及数据并绘制均值曲线,其承载能力的评价指标为极限载荷(在载荷-位移曲线中结构出现首次失效或失稳前所能承受的最大载荷)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 拉伸试验

将试验所得数据偏离组内平均值超过两倍标准偏差的试样予以剔除,保留5个有效试样的数据。并基于剔除后的数据计算出最终的性能平均值。图4为拉伸试验应力-应变曲线。对试验数据进行

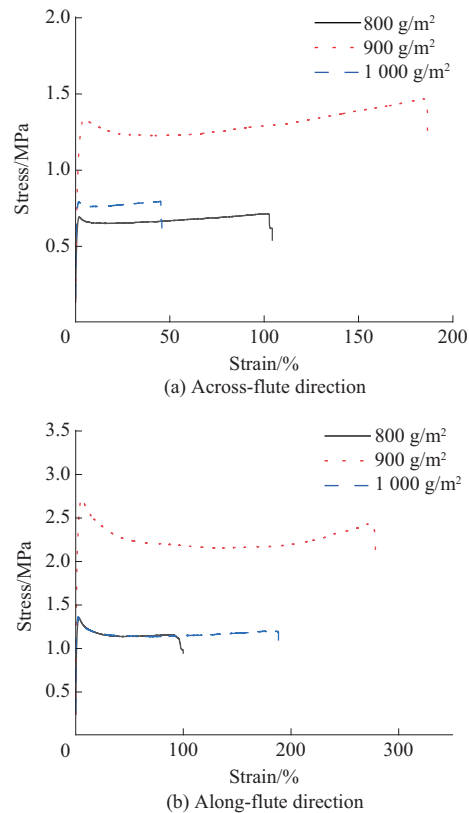


图4 中空板拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Hollow board tensile stress-strain curves

处理,得到材料的力学性能参数,见表1。由表1可知,竖楞向拉伸弹性模量显著高于横楞向(平均高81%),竖楞向拉伸弹性模量随克重增加呈现显著非线性增长,克重由800 g/m<sup>2</sup>增至900 g/m<sup>2</sup>时提升23.8%,克重由900 g/m<sup>2</sup>增至1000 g/m<sup>2</sup>时增幅骤降至3.1%,说明填料增强效应在900 g/m<sup>2</sup>后趋于饱和,而横楞向拉伸弹性模量则表现出加速增长特性。综合表格试验数据来看,两楞向不同克重样品的拉伸性能均表现为:900 g/m<sup>2</sup>板材>1000 g/m<sup>2</sup>板材>800 g/m<sup>2</sup>板材。

### 2.2 撕裂力测试

在撕裂力测试中观察到试样3 s左右在直角处发生破坏,断裂明显且迅速。对试验数据进行分析,剔除异常值的试样,保留5个有效试样数据,算

表1 中空板拉伸性能参数

Tab. 1 Tensile performance parameters of hollow board

| Basis weight/(g·m <sup>-2</sup> ) | Flute direction | Tensile modulus/MPa | Anisotropy coefficient | Breaking force/N | Yield stress/MPa |
|-----------------------------------|-----------------|---------------------|------------------------|------------------|------------------|
| 800                               | Across          | 207.44              | 1.77                   | 107.41           | 1.41             |
|                                   | Along           | 117.18              |                        | 58.16            | 0.73             |
| 900                               | Across          | 256.86              | 1.96                   | 219.32           | 2.60             |
|                                   | Along           | 130.9               |                        | 121.03           | 1.41             |
| 1 000                             | Across          | 264.72              | 1.70                   | 149.08           | 1.74             |
|                                   | Along           | 155.56              |                        | 61.14            | 0.78             |



出平均值作为最终结果。图5为三组不同克重的中空板撕裂力试验的载荷-位移曲线。由图5可以看出900 g/m<sup>2</sup>的板材抗撕裂性能最好,其次是1 000 g/m<sup>2</sup>、800 g/m<sup>2</sup>,不同克重样品的抗撕裂性能表现:900 g/m<sup>2</sup>板材>1 000 g/m<sup>2</sup>板材>800 g/m<sup>2</sup>板材。

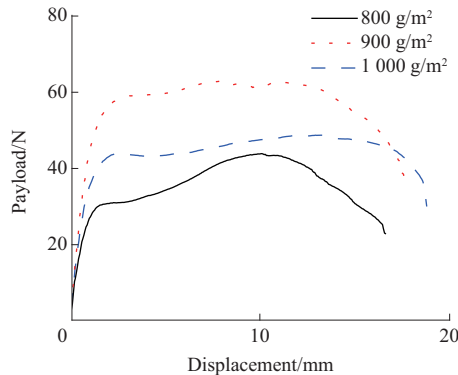


图5 中空板撕裂力载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves for tearing force of hollow board

图6为样品撕裂后的微观形貌照片,图6a和图6b中断面均呈现韧性断裂特征,即观察到大量“丝状”结构与“石头颗粒状”填料(CaCO<sub>3</sub>)。“丝状结构”是由于PP基体在撕裂过程中发生大范围塑性变形,分子链被拉伸、取向直至断裂所形成的韧性纤维。图6c中1 000 g/m<sup>2</sup>样品的断口形貌出现了明显的“蜂窝状坑洞”与填料颗粒,这标志着其断裂机制从韧性主导转变为界面失效主导。“蜂窝状坑洞”是碳酸钙填料与PP基体界面脱黏后,填料颗粒被拔出所留下的孔洞。表明在高克重条件下,填料分散均匀性下降,导致填料-基体界面结合强度成为薄弱环节。受力时,应力在界面处集中并导致快速脱黏,形成孔洞并相互连接,致使材料在未发生充分塑性变形的情况下便发生断裂,因此其撕裂性能反而出现下降。

### 2.3 垂直压缩试验

对试验数据进行处理,剔除异常值,保留5个有效试样,以其测试数据平均值为最终结果,算得两个楞向的垂直压缩力,见表2。从楞向分析:横楞向与竖楞向的实验数值差异明显,相差近5倍。其中楞向为竖楞向时不同克重承载力的差异更加明显,克重为900 g/m<sup>2</sup>的板材比克重为800 g/m<sup>2</sup>、1 000 g/m<sup>2</sup>板材的垂直压缩性能平均高45%。竖楞向时载荷是由密集的筋条承担,筋条发生稳定压缩失效,垂直压缩力高。横楞向时,载荷由大面积薄板面承担,发生薄板弹性失稳,垂直压缩力极低。但两楞

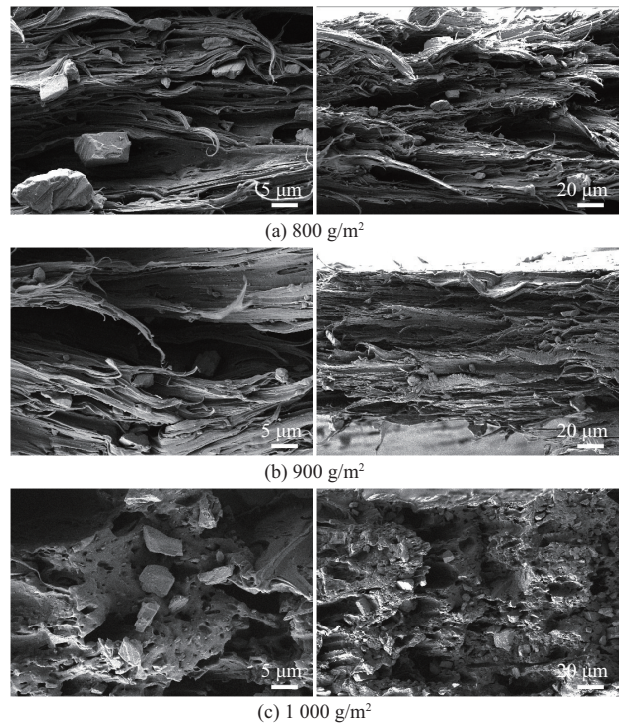


图6 不同克重中空板撕裂断面SEM照片

Fig. 6 SEM micrographs of tear fracture surfaces of hollow boards with different basis weights.

表2 三组克重板材垂直压缩试验结果

Tab. 2 Vertical compression test results for boards in three basis weight groups.

| Basis weight/(g·m <sup>-2</sup> ) | Vertical compressive force/N |                        |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------|
|                                   | Along-flute direction        | Across-flute direction |
| 800                               | 341.82                       | 88.18                  |
| 900                               | 545.94                       | 100.8                  |
| 1 000                             | 423.74                       | 93.44                  |

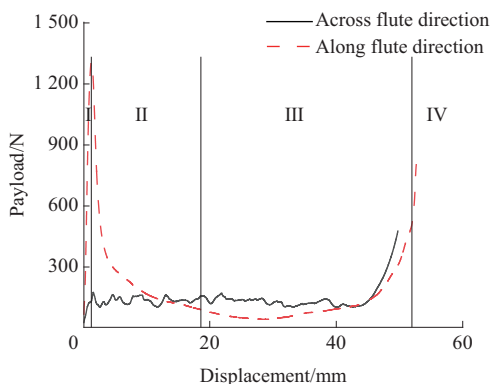
向三组样品在垂直压缩力变化趋势上表现相同,均为900 g/m<sup>2</sup>板材>1 000 g/m<sup>2</sup>板材>800 g/m<sup>2</sup>板材。综上所述,可初步推测构件在不同楞向时承载性能差别会比较明显,其中板材为900 g/m<sup>2</sup>时承载性能最优。

综合以上测试结果来看,可得出以下结论:不同楞向力学性能差异明显,竖楞向显著高于横楞向。不同克重中900 g/m<sup>2</sup>板材力学性能表现最优,其次是1 000 g/m<sup>2</sup>板材、800 g/m<sup>2</sup>板材。楞向为竖楞向时不同克重力学性能差异更加明显。板材抗撕裂性能不好,构件在静态压缩时可能会发生节点处撕裂。

### 2.4 构件承载性能分析

#### 2.4.1 不同楞向十字形构件的静态压缩试验

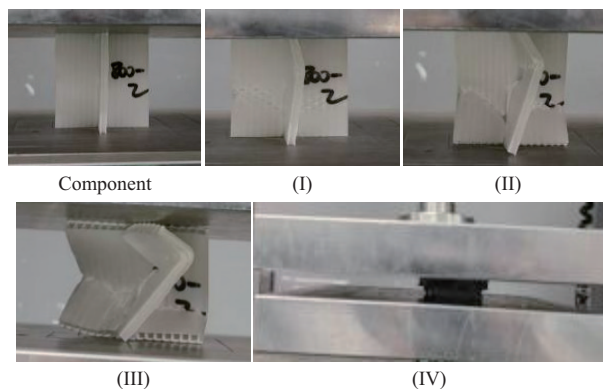
对800 g/m<sup>2</sup>十字形结构的构件进行静态压缩试验,图7为不同楞向的载荷-位移曲线,竖楞向的载

图7 800 g/m<sup>2</sup>不同楞向十字形试样的载荷-位移曲线Fig. 7 Load-displacement curves of 800 g/m<sup>2</sup> cross-shaped specimens in different flute directions

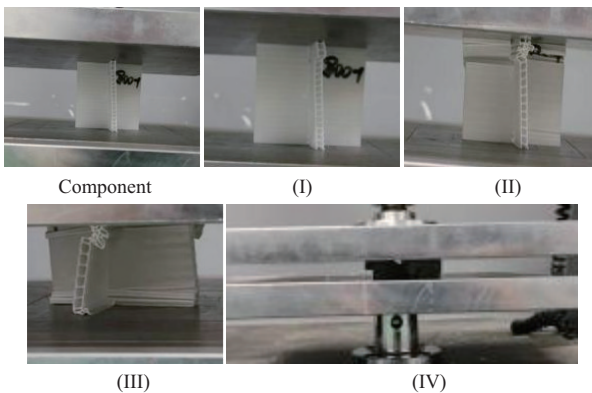
荷-位移曲线峰值显著高于横楞向,与板材力学性能测试结果有很好的一致性。两者承载能力相差将近8倍,表明竖楞向的结构承载能力远强于横楞向的结构。

竖楞向载荷-位移曲线可以划分为4个阶段:线弹性阶段、屈服阶段、平台阶段、密实化阶段。图8展示了竖楞向、横楞向的构件压缩过程,在线弹性阶段(I段),曲线呈现出线性增长的部分,其过程较短,承载力迅速增加,逐渐加压到峰值,应力在结构内部线性传递。由于是薄壁中空结构,板件在应力下迅速失去稳定性,发生局部弹性屈曲。构件达到极限载荷时的压缩状态如图8a(I)所示,沿压缩方向的构件在插槽附近部位有轻微的波浪形折痕,垂直压缩方向的构件向右侧略微弯曲。屈服阶段时,载荷曲线表现为迅速下降,构件变形越来越明显,构件开始发生塑性变形,如图8a(II)所示,构件沿着压痕及弯曲处持续变形。在平台阶段,竖楞向结构的位移不断增加,但载荷值保持在一个平稳的范围之内,呈现出一个平台现象。此时结构吸收能量,构件以折痕为中心向内或右侧弯曲,被压缩至原高度的一半,变形严重,但是平台期的载荷特别低,说明一旦构件裂纹产生并扩展,结构完整性被破坏,承载能力会瞬间崩溃。这个过程吸收的能量很少,载荷也非常低。在密实化阶段,十字形结构已被完全压溃,每个单胞结构相互挤压紧密接触聚集到一起,构件材料本身被剧烈压缩,此时构件的刚度变得极大,载荷急剧飙升。

横楞向构件具有横向构造,各楞的依次坍塌导致曲线在极限载荷处呈现上下波动的情况,曲线前期只有线弹性和屈服这两个阶段,显现出锯齿形波动曲线<sup>[14]</sup>,并且随着位移的增大不断重复,平台阶段



(a) Diagram of the static compression process for a structural member in the along-flute direction



(b) Diagram of the static compression process for a structural member in the across-flute direction

图8 不同楞向十字形试样在压缩下的变形过程

Fig. 8 Deformation process of cross-shaped specimens with different flute directions under compression

表现为持续的锯齿形波动曲线,力与变形波动稳定,构件被叠层压缩,最后进入密实强化阶段。在横楞向结构渐进弯曲变形的引导下,呈现出稳定的塑性坍塌渐进屈曲模式,直到结构被压缩密实到达密实化阶段,随着变形量的增大载荷直线上升。鉴于中空板特殊的夹层结构,当承载力与芯层中空方向垂直时,变形模式可能是由一系列快速的、非连续的局部断裂或失稳破坏造成的,呈现出由高到低的压缩坍塌,破坏模式表现为手风琴式变形<sup>[15]</sup>。

通过分析可知,竖楞向结构构件载荷-位移曲线呈现出四个阶段,其中线弹性及屈服阶段过程很短,主要集中在平台阶段,平台阶段曲线长而低,说明构件吸能效果差,这点与撕裂力测试时结论一致,但是两组构件在变形过程中都没有发生拼插节点处撕裂,说明结构的特征使压缩过程中的力集中在各方向的构件上而非节点。由于两组试验样品高度一致,所以到达密实化阶段位移几乎相同,同时试验证明竖楞向发生稳定的塑性屈曲和折叠,抗

初始冲击能力强;横楞向发生非稳定的断裂、脆性破坏,作为包装构件,自身易损,吸能效率低,过程不稳定,不可预测。

#### 2.4.2 不同克重、结构试样的静态压缩试验

图9为不同克重、结构横楞向试样的载荷-位移曲线,三种结构的曲线峰值及走势都没有明显不同,说明对三种结构而言,横楞向时克重对承载性能的影响较小。十字形构件曲线波动较稳定,三角形构件与井字形构件在压缩至节点附近会有载荷提高的现象。

图10为不同克重、结构竖楞向试样的载荷-位

移曲线,综合三种结构的图像来看,900 g/m<sup>2</sup>的极限载荷最大,尤其是井字形结构呈现得更为直观,与拉伸试验时900 g/m<sup>2</sup>的屈服应力较大一致。对材料进行力学性能测试时,1 000 g/m<sup>2</sup>的材料性能优于800 g/m<sup>2</sup>,构件压缩试验极限载荷结果却相反,说明1 000 g/m<sup>2</sup>时刚度过大引发不稳定整体屈曲,失稳临界力低,800 g/m<sup>2</sup>时刚度低,易发生局部屈曲,极限载荷适中但低于900 g/m<sup>2</sup>。

分析不同结构构件受克重的影响。十字形/三角形结构,克重影响极限载荷,但对平台载荷影响不大。平台期普遍“低而长”。这种行为的根源在

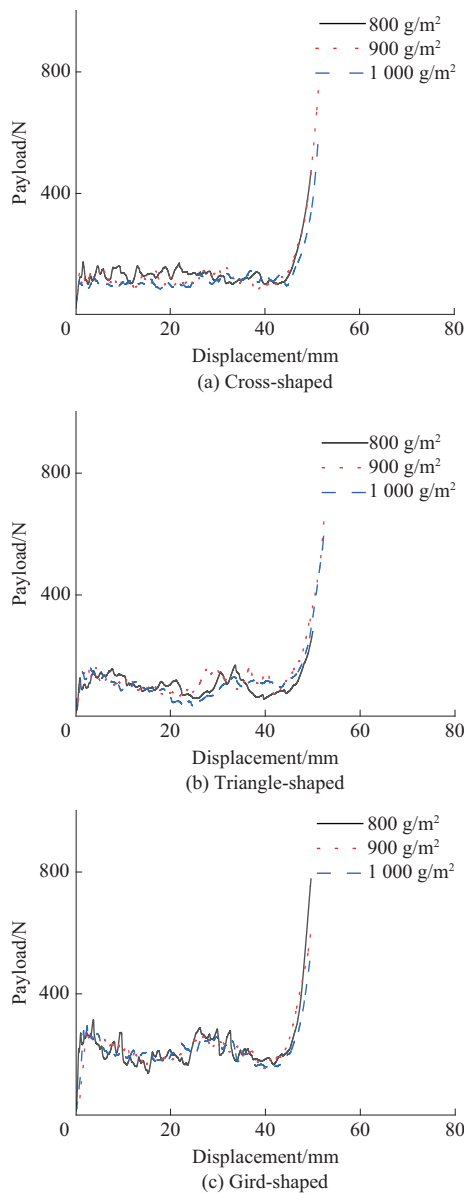


图9 不同克重、结构横楞向试样的载荷-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves for across-flute specimens with varying basis weights and internal structures.

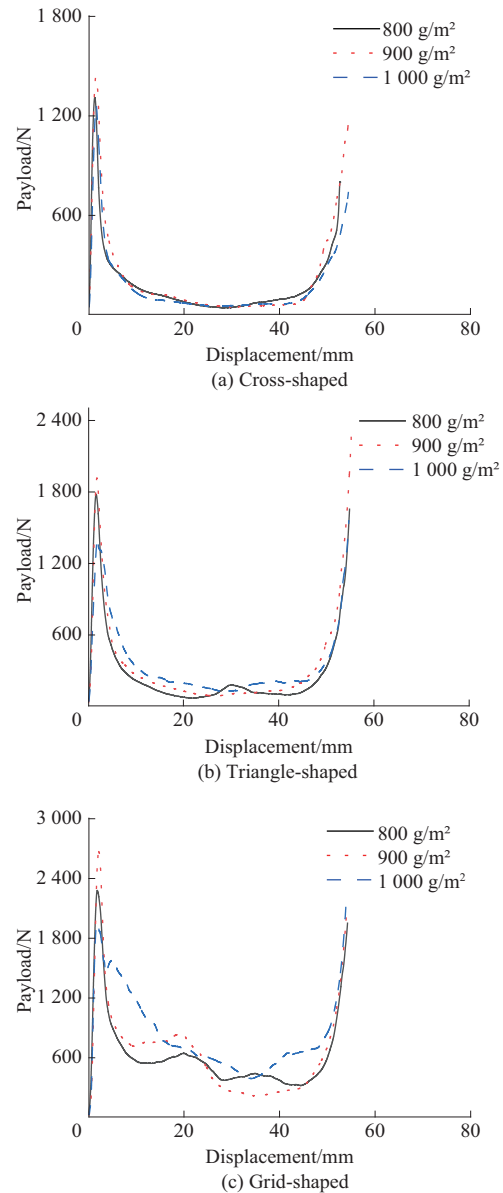


图10 不同克重、结构竖楞向试样的载荷-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves for along-flute specimens with varying basis weights and internal structures.



于,它们的失效是由“几何不稳定性”主导的,而不是由“材料屈服强度”主导的。井字形时克重对极限载荷和平台载荷均有影响,且平台期“波动大,差距大”。井字形的性能是由“材料强度/刚度”和“稳定的局部屈曲”共同主导的。

综上分析可以看出,克重的改变对横楞向构件性能没有明显变化,竖楞向时克重的改变对三种结构构件的极限载荷都有明显变化,均表现为  $900 \text{ g/m}^2$  板材  $> 800 \text{ g/m}^2$  板材  $> 1000 \text{ g/m}^2$  板材,  $900 \text{ g/m}^2$  的构件力学性能最优与前面材料力学性能测试结果一致,但  $800 \text{ g/m}^2$  与  $1000 \text{ g/m}^2$  克重表现与前面力学性能测试相反,因为在板材测试中,失效由材料强度主导,而在构件中,失效由结构稳定性主导,过高的刚度( $1000 \text{ g/m}^2$ )反而会引发不稳定的整体屈曲,导致其性能甚至不如更柔的构件( $800 \text{ g/m}^2$ )。这也说明在实际中空板结构设计时不能直接根据材料的性能表现去推测结构性能。

十字形、三角形结构平台期没有改变,而井字形的平台期有明显变化:其中克重为  $1000 \text{ g/m}^2$  时平台期最不稳定,其次是  $900 \text{ g/m}^2$ ,  $800 \text{ g/m}^2$ 。原因是  $1000 \text{ g/m}^2$  的板材高刚度导致高弹性应变能积累,引发突发性、不稳定的失效,如多重屈曲或微观断裂。所以板材为横楞向时可以选用低克重板材,用于节省成本。板材为竖楞向时,选择  $900 \text{ g/m}^2$  板材最好。

#### 2.4.3 不同结构试样在不同楞向的静态压缩试验

以  $800 \text{ g/m}^2$  的中空板为例,研究十字形、三角形、井字形三种结构的静态缓冲性能,如图 11 所示。由图 11 可以看出,竖楞向时结构的极限载荷从大到小依次为井字形、三角形、十字形,三种结构的极限载荷呈线性增长趋势。三种结构的曲线走势相似,都经历线弹性阶段、屈服阶段、平台阶段、密实化阶段,前两个阶段过程短暂且迅速,平台阶段稳定性排序为十字形、三角形、井字形。井字形由于特殊结构,在压溃到原高度的一半时,垂直于压缩方向的构件组成支撑在压缩平面,形成一个新的承受单元,如图 12b(III)所示,在平台期曲线会出现上升下降的趋势。三角形本身结构具有稳定性,但是由于网格密度低于井字形,单元面积小于井字形,因此平台载荷较低,承载性能次于井字形,曲线在平台期阶段经历一次波动是由于构件被压缩一半时形成一个新的支撑面,如图 12a(III)所示。

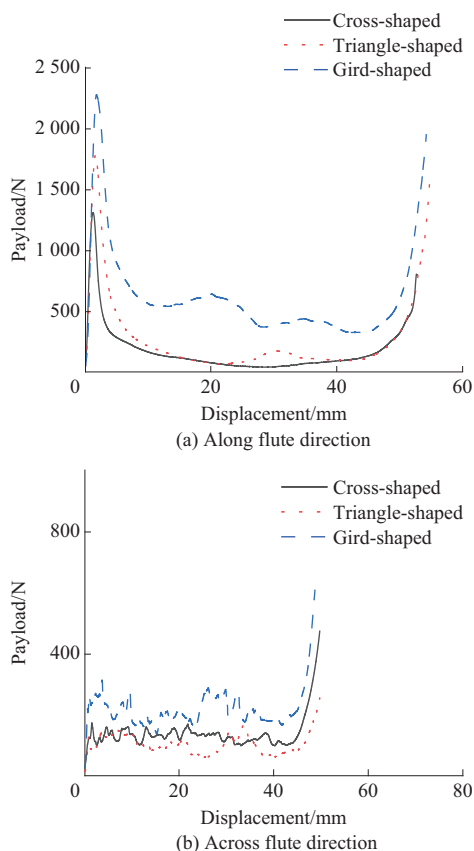


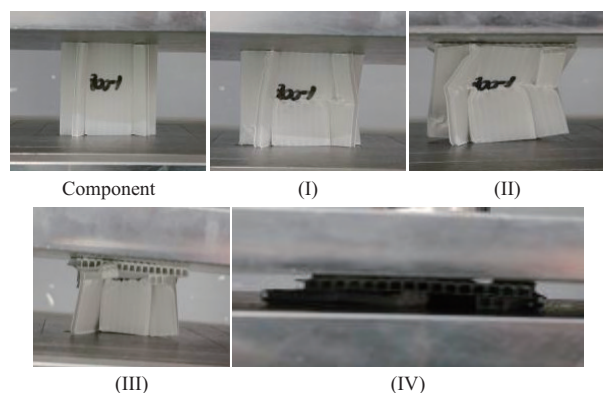
图 11  $800 \text{ g/m}^2$  不同结构、楞向试样的载荷-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of  $800 \text{ g/m}^2$  specimens with different structures and flute directions

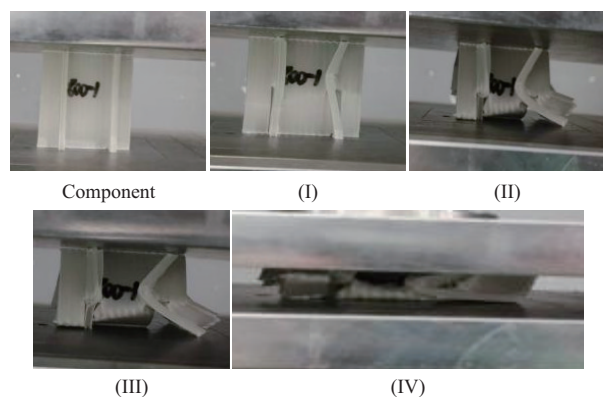
横楞向时结构的极限载荷从大到小依次为井字、十字、三角;三结构曲线均为锯齿形,井字形上下波动特征更加明显,整条曲线主要有三次上升峰值,前两次集中在试验刚开始时,当构件压缩至原高度一半时载荷有个明显的提升,说明在节点处井字形构件的承载性能变高。三角形构件整体没有另外两个结构的承载性能好,在压缩至原高度一半时和井字形一样表现出载荷突然升高的现象。

综上分析可以看出,井字形的力学性能最优,无论载荷从竖楞向还是横楞向施加,其密集的网格都能提供均匀且强大的支撑,有效抑制局部屈曲。三角形构件在竖楞向时性能优于十字形,横楞向时次于十字形,原因可能在于,竖楞向下三角形的底边与加载板平行,形成一个稳定的“拱形”或“A字形”支撑体系,能有效地将载荷传递到边界,抗屈曲能力很强。横楞向时,三角形的斜边对防止板件屈曲的贡献变小,板件更容易在相对较长的无支撑区域内发生屈曲,三角结构的优势被削弱。所以三角形在两楞向会呈现出不同的结果。





(a) Static compression process diagram of triangle-shaped component



(b) Static compression process diagram of grid-shaped components

图 12 800 g/m<sup>2</sup>不同结构竖楞向试样的静态压缩过程Fig. 12 Static compression process of 800 g/m<sup>2</sup> along-flute specimens with different structures

#### 2.4.4 构件承载性能总结

对不同构件从楞向、克重、结构方面进行分析,通过静态压缩试验结果来看可得到以下结论。(1)不同楞向构件的承载性能差异明显,竖楞向显著高于横楞向,与板材力学性能测试结果一致。(2)对于不同构件结构,克重表现一致,900 g/m<sup>2</sup>板材力学性能表现最优,其次是800 g/m<sup>2</sup>、1 000 g/m<sup>2</sup>。这与板材的力学性能试验结果不一致,其原因为从板材到结构,其力学行为的主导机制不同,结果会出现差异。板材中力学行为主要由材料的刚度和柔性决定,材料的性能并非随克重增加而单调递增。800 g/m<sup>2</sup>试样因绝对材料用量最低,性能最差。而1 000 g/m<sup>2</sup>试样性能的反常,归因于过高的填料含量引发了界面缺陷与基体脆化。相比之下,900 g/m<sup>2</sup>的克重实现了填料与PP基体的最佳协同,在保证高刚度的同时维持了良好的韧性,从而获得了最优的综合力学性能。在构件方面,结构稳定性与失效模式成为性能的主导因素。1 000 g/m<sup>2</sup>构件因其刚度过大、脆性显著,发生了不稳定的整体屈曲或节点脆性断

裂,导致其能量吸收能力最差。800 g/m<sup>2</sup>构件虽强度较低,但由于良好的韧性实现了稳定的压溃,性能优于1 000 g/m<sup>2</sup>。而900 g/m<sup>2</sup>构件具有最佳的刚韧平衡,实现了稳定且高载荷的渐进压溃,表现出最优的综合性能。(3)竖楞向时不同克重的构件极限载荷差异更加明显,对于横楞向的构件克重增加对三种结构的承载性能影响较小。(4)虽然板材的抗撕裂性能不好,但构件在静态压缩时并没有发生节点处撕裂,说明结构的特征使压缩过程中力集中在各方向的构件上而非节点。(5)不同结构中,结构为井字形时的构件承载性能最好,比结构为十字形、三角形的承载性能平均高51%。

### 3 结论

(1)力学性能试验中,不同楞向力学性能差异明显,竖楞向显著高于横楞向。撕裂力测试中板材撕裂迅速且短暂,推测构件压缩时可能发生节点处断裂,综合分析得出900 g/m<sup>2</sup>的板材力学性能最好,其次是1 000 g/m<sup>2</sup>,800 g/m<sup>2</sup>,力学性能由材料的刚度和柔性决定。

(2)竖楞向的载荷-位移曲线峰值显著高于横楞向,两者承载能力相差将近8倍,由于横楞向构件在压缩过程中表现出承载能力极低、吸能效果差和不可预测的脆性破坏模式,在包装结构设计中,应尽量避免使用楞向与主要受力方向垂直的构件。设计时应优先选择竖楞向即楞向与受力方向一致的构件,以确保包装具有稳定且高效的承载与缓冲性能。

(3)对于竖楞向试样,克重变化显著影响性能;而对于不稳定的横楞向试样,增加克重并不能有效提升其承载能力。在竖楞向下,900 g/m<sup>2</sup>的构件表现出最佳的承载与吸能平衡,其性能优于800 g/m<sup>2</sup>和1 000 g/m<sup>2</sup>。过高克重可能导致不稳定性。1 000 g/m<sup>2</sup>的构件因刚度过高,在受压时(尤其是井字形结构)易积累过多弹性应变能,引发突发性的脆性破坏或整体屈曲,导致平台期不稳定。当构件不得不以横楞向承载时,可选用低克重板材,在保证基本性能的同时节约成本。当构件以竖楞向承载时,应优先选用900 g/m<sup>2</sup>的板材,以实现最优的结构性能。

(4)不同结构的承载性能由构件稳定性主导。三种结构中,平台期稳定性对比,十字形>三角形>井字形。但井字形结构具有最优且最可靠的综合

力学性能,其核心优势在于结构无论在横竖楞向下都能提供稳定一致的强支撑,因此,在包装结构设计若考虑承载性能,应将井字形作为首选方案。

本研究结论基于60 mm×60 mm标准试样得出,明确了不同结构的承载力与失效机理。但是研究具有局限性,实际大尺寸构件因边界条件不同,可能存在尺度效应。后续研究需结合产品标准进行测试与模拟,以验证从试样到产品的性能规律,推动工程应用。

### 参考文献

- [1] MACLEOD M, ARP H P H, TEKMAN M B, et al. The global threat from plastic pollution[J]. *Science*, 2021, 373(6550):61–65.
- [2] HOREJS C. Solutions to plastic pollution[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(9). DOI:10.1126/science.abg5433.
- [3] 苏洁,于良建,崔维明,等.中空板环保包装在洗衣机产品中的应用[C]//中国家用电器协会.2025年中国家用电器技术大会论文集(3).北京:《电器》杂志社,2025:73–77.  
SU Jie, YU Liangjian, CUI Weiming, et al. Application of eco-friendly hollow board packaging in washing machine products[C]// China Household Electrical Appliances Association. Proceedings of the 2025 China Household Electrical Appliances Technology Conference (3). Beijing: Electrical Appliances Magazine Press, 2025:73–77.
- [4] 胡明磊,张维,胡斌,等.聚甲基丙烯酸异辛酯包覆CaCO<sub>3</sub>增韧聚丙烯复合材料的制备和性能[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(10): 8–16.  
HU Minglei, ZHANG Wei, HU Bin, et al. Preparation and properties of polypropylene composites toughened by CaCO<sub>3</sub> coated with polyisooctyl methacrylate[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(10):8–16.
- [5] 范木良.不同填充物改性聚丙烯复合材料的研究[J]. *广东化工*, 2020, 47(9):79–80.  
FAN Muliang. Study on polypropylene composites modified with different fillers[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(9): 79–80.
- [6] BUDIYANTORO C, SOSIATI H, KAMIEL B P, et al. The effect of CaCO<sub>3</sub> filler component on mechanical properties of polypropylene[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 432. DOI:10.1088/1757-899x/432/1/012043.
- [7] 雷祖碧,王飞,王浩江,等.填料对聚丙烯力学性能的影响[J]. *合成材料老化与应用*, 2020, 49(4):36–38.  
LEI Zubi, WANG Fei, WANG Haojiang, et al. Effect of filler on mechanical properties of polypropylene[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2020, 49(4):36–38.
- [8] 禹世康,陈轲,薛平,等.无机填料粒径对口模拉伸PP/CaCO<sub>3</sub>复合材料性能的影响[J]. *塑料工业*, 2022, 50(8):89–94.  
YU Shikang, CHEN Ke, XUE Ping, et al. Effect of inorganic filler particle size on properties of die-drawn PP/CaCO<sub>3</sub> composites[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(8):89–94.
- [9] 柳晨醒,杨睿.碳酸钙高填充聚丙烯复合材料的制备及性能研究[J]. *广东化工*, 2018, 45(19):49–50.  
LIU Chenxing, YANG Rui. Preparation and properties of calcium carbonate highly filled polypropylene composites[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(19):49–50.
- [10] 竺宇洋.纤维增强聚丙烯蜂窝板力学性能研究[D].上海:上海工程技术大学,2021.  
ZHU Yuyang. Study on mechanical properties of fiber reinforced polypropylene honeycomb panel[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2021.
- [11] 孟姗姗,秦永利,范欣愉,等.改善聚丙烯蜂窝夹芯板高温弯曲性能的研究[J]. *材料研究与应用*, 2019, 13(2):115–118.  
MENG Shanshan, QIN Yongli, FAN Xinyu, et al. Research on improving high temperature bending property of polypropylene honeycomb core sandwich panel[J]. *Materials Research and Application*, 2019, 13(2):115–118.
- [12] 邢紫玉,宋海燕,王立军,等.聚丙烯夹芯板动态缓冲性能的研究[J]. *包装与食品机械*, 2021, 39(6):26–30.  
XING Ziyu, SONG Haiyan, WANG Lijun, et al. Study on dynamic cushioning characteristics of polypropylene sandwich panel[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2021, 39(6):26–30.
- [13] 巩桂芬,苏亭亭,闫心怡,等.纸浆模塑品缓冲性能影响因素的仿真研究[J]. *包装工程*, 2024, 45(5):301–308.  
GONG Guifen, SU Tingting, YAN Xinyi, et al. Simulation study on influence factors of buffering properties of molded pulp products[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(5):301–308.
- [14] 齐宏伟,杨颖,秦杰,等.瓦楞纸板方管柱力学性能与压溃模式研究[J]. *包装工程*, 2024, 45(19):325–333.  
QI Hongwei, YANG Ying, QIN Jie, et al. Mechanical properties and crushing mode of corrugated cardboard square tubular columns[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(19):325–333.
- [15] 潘丹.纸瓦楞管的轴向动态缓冲吸能特性试验研究[D].西安:西安理工大学,2018:24–25.  
PAN Dan. Cushioning energy absorption of paper corrugation tubes under axial dynamic compression[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018:24–25.