一种新型四孔异形蜂窝包装夹层结构力学性能研究

冯砚博*，于太航，于润泽
（哈尔滨商业大学 轻工学院，哈尔滨 150028）

摘要：目的 随着新材料和新结构的发展，包装材料结构要求在包装运输过程中对产品具有更高的保护能力。为了丰富包装材料结构并在保证力学性能条件下设计新型蜂窝结构。**方法** 以传统正六边形蜂窝结构为基础构建新型四孔异形蜂窝结构，通过对可降解树脂材料的试件进行理论分析、仿真分析和实验验证研究其力学特性。**结果** 新型四孔异形蜂窝包装夹层结构横向和纵向的力学性能，相较于传统的正六边形和正八边形蜂窝结构提升了 17%，具有更好的外载荷承载能力。**结论** 本研究对包装材料结构给出了新的思路，对包装行业的发展起到支持作用。

关键词：新型蜂窝结构；可降解树脂材料；包装夹层结构；力学性能；断裂应力
中图分类号：TB34 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-3563(2024)13-0079-10
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.010

Research on Mechanical Properties of a New Four-hole Special-shaped Honeycomb Sandwich Structure

*FENG Yanbo**, *YU Taihang*, *YU Runze*
(School of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

ABSTRACT: With the development of new materials and new structures, the structure of packaging materials requires higher protection capabilities for products during packaging and transportation. Therefore, the work aims to enrich the structure of packaging materials and design new material structures under the condition of ensuring mechanical properties. Based on the traditional hexagonal honeycomb structure, a new four-hole special-shaped honeycomb structure was designed. Through theoretical analysis, simulation analysis and experimental verification, the mechanical properties of degradable resin specimens were studied. The transverse and longitudinal mechanical properties of the new four-hole special-shaped honeycomb packaging sandwich structure were improved by 17% compared with those of traditional hexagonal and octagonal honeycomb structure, so the structure had better external load carrying capacity. This study gives a new idea for the structure of packaging materials, which is of great support to the development of packaging industry.

KEY WORDS: new honeycomb structure; degradable resin material; packaging sandwich structure; mechanical property; breaking stress

随着现代包装行业的快速发展，传统的材料结构已经不能满足行业现阶段的需求，迫切需要性能更佳的新型功能材料[1-3]。相较于较为传统的包装材料结构，蜂窝夹层结构具有更高的强度、刚度，较好的缓冲性能等特性[4-7]。本文提出一种新型四孔异形蜂窝包装夹层结构，从横向、纵向和端向载荷承受能力、

收稿日期：2024-03-31
基金项目：黑龙江省科研项目（22GLB119）；黑龙江博士后科研启动基金（BS0048）；哈尔滨商业大学教学改革项目（HSDJY202221）
*通信作者

各向同性、综合力学性能等方面进行研究。

1　新型四孔异形蜂窝包装夹层结构原理

新型四孔异形蜂窝单胞元设计以传统正六边形蜂窝胞元结构为基础，正六边形的上下两边保留，其他 4 个边分别用 2 段圆弧代替。对每一个边的变化来说，其中一个圆弧为正六边形的外切弧，另一个弧向正六边形内部凹陷。2 个弧相对正六边形的原边对称，通过此方法改进结构使蜂窝结构在纵向具备更好的力学性能，并使其各向外载荷承受能力更趋向于各向同性，结构设计思路如图 1 所示。

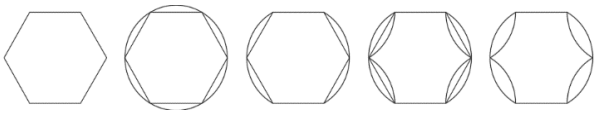


图 1　新型四孔异形蜂窝结构推演过程
Fig.1 Deduction process of new four-hole special-shaped honeycomb structure

在由多个胞元组成蜂窝夹层时，由弧形成的圆孔为公共区域进行组合，多个胞元组合原理如图 2 所示。

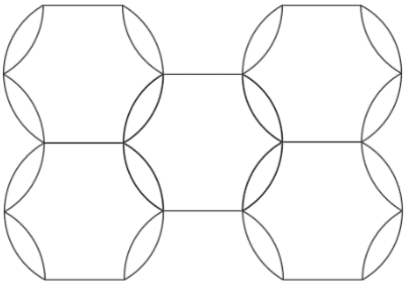


图 2　多个新型四孔异形四孔蜂窝胞元组合原理
Fig.2 Schematic diagram for multiple new four-hole special-shaped cellular cell combination

建立单胞元蜂窝模型，单胞元蜂窝模型以内切于半径 r_2=8 mm 圆为基础，一般蜂窝单元的壁厚边长比为 0.05~0.3，本模型的壁厚边长比为 0.05，因此模型壁厚 t 为 0.4 mm。拉伸厚度 d 为 2 mm。该蜂窝结构采用绿色低碳的可降解环氧树脂材料，其弹性模量为 2.8×10^9 N/m^2，密度为 1 100 kg/m^2，同时它具有抗弯挠、抗压性和密度小等优点，可降解并且回收效率高，符合包装行业对材料关于环境保护和力学性能要求。新型四孔异形蜂窝结构胞元模型尺寸如图 3 所示。

2　单胞元新型蜂窝包装夹层结构力学性能仿真

应用有限元方法分析结构的力学性能，通过压缩表征结构的力学承受能力，对比新型四孔异形蜂窝结构与正六边形和正八边形蜂窝结构的力学性能。

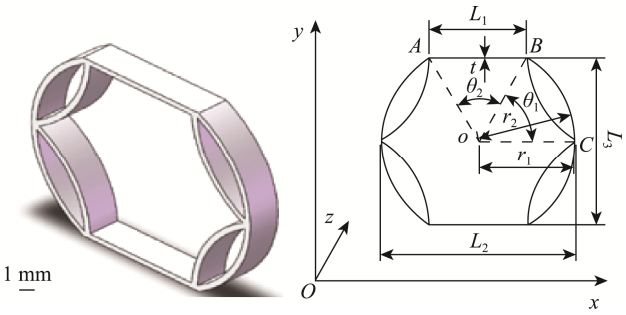


图 3　单个新型四孔异形四孔蜂窝单元尺寸
Fig.3 Size of single new four-hole special-shaped honeycomb cell

建立相同结构尺寸的新型四孔异形蜂窝、正六边形和正八边形单胞元蜂窝模型，胞元尺寸原理如图 4 所示，新型四孔异形蜂窝模型与正六边形蜂窝模型、正八边形蜂窝模型的单胞元外接圆半径相同。以此来确保 3 个胞元所占空间一致。通过改变壁厚使 3 种类型的单胞元模型质量相同。相同质量条件下新型四孔异形蜂窝胞元壁厚为 0.4 mm，正六边形蜂窝胞元壁厚为 0.63 mm，正八边形蜂窝胞元壁厚为 0.61 mm。

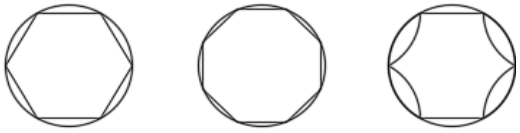


图 4　蜂窝胞元尺寸原理
Fig.4 Schematic diagram of honeycomb cell size

对单胞元新型四孔异形蜂窝施加横向（图 3 中 x 轴方向）、纵向（图 3 中 y 轴方向）和端面方向（图 3 中 z 轴方向）的应力，通过单胞元蜂窝结构在易断点处产生的应力超过材料破坏极限时所施加的应力来判断单胞元蜂窝结构的力学性能。

在蜂窝结构仿真力学性能分析中，模型结构材料属性设置：弹性模量为 70 MN/m^2、泊松比为 0.389 7、抗剪模量为 27 MN/m^2、质量密度为 1 100 kg/m^3、张力强度 320 MN/m、280 MN/m。

新型蜂窝单胞元网络模型和受应力仿真模型如图 5、图 6 所示。

网格划分单元采用大小为 0.25 mm 的 8 节点单元六面体，为缓慢过度模式，过度单元为 6 节点单元五面体。单元总数为 3 426，节点总数为 15 475。

单胞元新型四孔异形蜂窝结构在端面方向、纵向和横向所能承受的最大应力分别为 157、9.8 和 11.3 MPa。同理单胞元正八边形蜂窝结构在端面方向、纵向和横向所能承受的最大应力分别为 155、8.2 和 8.3 MPa，单胞元正六边形蜂窝结构在端面方向、纵向和横向所

能承受的最大应力分别为 154、7.9 和 9.2 MPa。分析上述单胞元仿真结果可知，单个新型四孔异形蜂窝胞元的端面方向上的力学性能近似，横向和纵向外载荷承载能力明显大于其他 2 种结构的力学参数。

图 5　新型四孔异形蜂窝单胞元网络模型
Fig.5 New four-hole special-shaped honeycomb cell network model

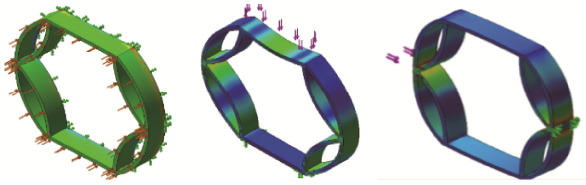
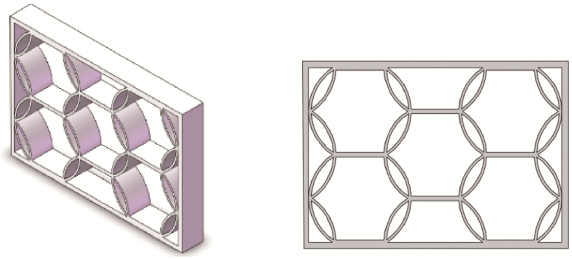


图 6　新型四孔异形蜂窝单胞元受应力仿真模型
Fig.6 Stress simulation model of a new four-hole special-shaped honeycomb cell

由于周期性新型四孔异形蜂窝结构与周期性正八边形蜂窝结构相同的基础胞元组合为五胞元蜂窝组合，周期性新型四孔异形蜂窝结构与周期性正六边形蜂窝相同的基础胞元组合为九胞元蜂窝结构，因此对比蜂窝结构仿真分为 2 组：五胞元新型蜂窝结构和五胞元正八边形蜂窝结构、九胞元新型蜂窝结构和九胞元正六边形蜂窝结构。

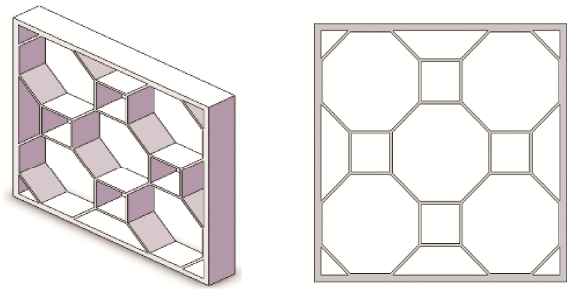
3　五胞元新型蜂窝包装夹层结构力学性能仿真

五胞元新型四孔异形蜂窝结构形式的蜂窝夹层结构，拉伸厚度选择为 5 mm（确定蜂窝胞元组合的情况下整体结构的厚度），符合蜂窝夹层结构尺寸。以与单新型四孔异形蜂窝胞元相同尺寸的正八边形蜂窝胞元为基础，建立五胞元正八边形蜂窝结构，为了与后续实验验证试件的结构和尺寸相吻合，在五胞元组合结构外圈添加薄框，厚度为 1 mm。薄框提高了样件 3D 打印制作中的成功率和精度。不同类型蜂窝结构添加的薄框结构相同，并且薄框占整体模型质量小，可以忽略其对结构有限元分析的影响，模型如图 7、8 所示。



a 等轴测视图　　b 主视图

图 7　五胞元组成新型四孔异形蜂窝包装夹层结构
Fig.7 New five-cell four-hole special-shaped honeycomb packaging sandwich structure



a 等轴测视图　　b 主视图

图 8　五胞元正八边形蜂窝结构等轴测图和主视图
Fig.8 Isometric diagram and main view of five-cell regular octagonal honeycomb structure

对比多胞元新型四孔异形蜂窝和正八边形蜂窝结构的力学性能，对五胞元新型四孔异形蜂窝和正八边形蜂窝结构横向（图 3 中 x 轴方向）和纵向（图 3 中 y 轴方向）施加逐步增大的应力。通过判断蜂窝结构在横向、纵向外部应力下，蜂窝结构在达到材料屈服强度下施加的最大应力对比结果。如图 9、10 分别为五胞元新型四孔异形蜂窝结构和正八边形蜂窝结构纵向外部载荷和约束位置。

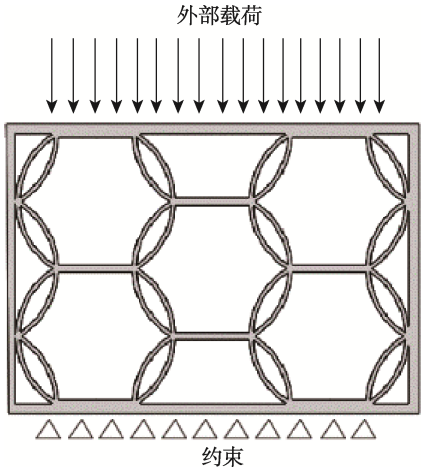


图 9　五胞元新型四孔异形蜂窝结构纵向承力位置
Fig.9 Longitudinal bearing position of a new five-cell four-hole special-shaped honeycomb structure

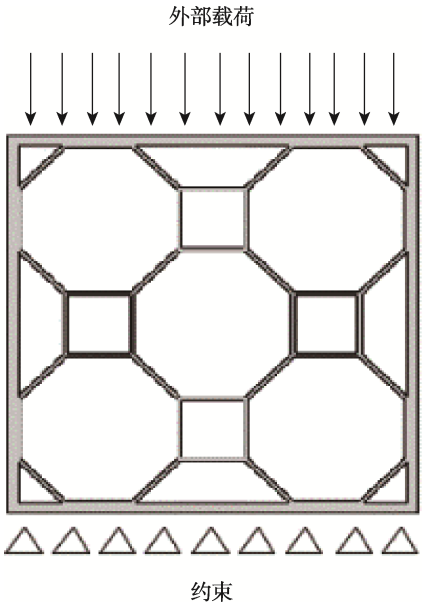


图 10 五胞元正八边形蜂窝结构纵向承力位置

Fig.10 Longitudinal bearing position of five-cell regular octagonal honeycomb structure

如图 11、12 所示分别为五胞元新型蜂窝结构的有限元模型与承受纵向应力下的仿真模型云图。

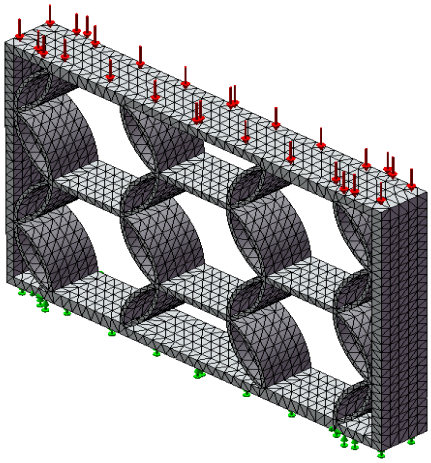


图 11 五胞元新型四孔异形蜂窝结构有限元模型

Fig.11 Finite element model of a new five-cell special-shaped honeycomb structure

网格单元采用同单胞元仿真时相同的形式。单元总数为 12 695，节点总数为 86 532。

设计的五胞元新型蜂窝结构在承受增大的应力过程中，结构对外载荷的承载能力也在增加，直至易断点处产生的应力值达到材料的屈服强度时整体蜂窝结构被破坏。可以通过各类型蜂窝结构在易断点处达到材料许用应力极限时所施加的外部应力大小判断该方向上蜂窝结构的外载荷承载能力。

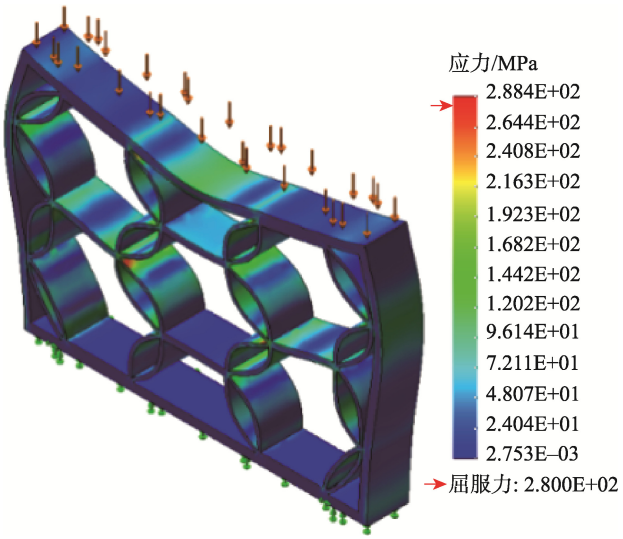


图 12 五胞元新型四孔异形蜂窝结构仿真模型云图

Fig.12 Cloud image of simulation model of a new five-cell special-shaped honeycomb structure

仿真结果如图 13 可知，五胞元新型四孔异形蜂窝结构在纵向承受 1.28 MPa 时结构的易断点处产生的应力为 280 MPa，达到了该模型材料的屈服强度极限。而五胞元正八边形蜂窝结构在纵向承受 1.202 MPa 应力时结构的易断点处产生的应力为 280 MPa。

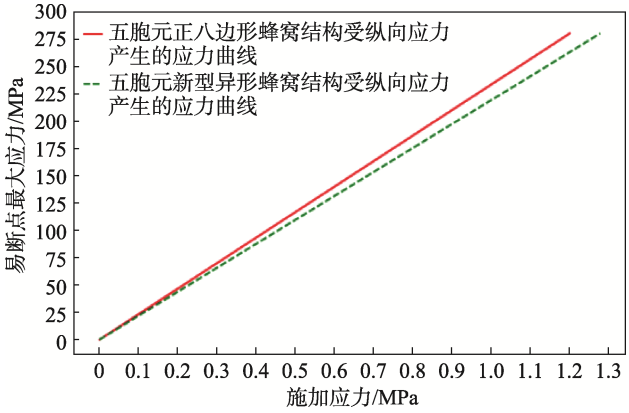


图 13 五胞元蜂窝结构纵向承力应力数据

Fig.13 Longitudinal bearing stress data of a five-cell honeycomb structure

在施加横向应力逐渐增大的过程中，如图 14 所示，模型达到材料的屈服强度极限 280 MPa 时，五胞元新型四孔异形蜂窝结构在横向承受 1.723 MPa 应力，五胞元正八边形蜂窝结构在横向承受 1.207 MPa 应力。同时，由最大应力值的曲线斜率可知，新型四孔异形蜂窝结构拥有良好的外载荷承载能力。

同理在端面方向，模型达到材料的屈服强度 280 MPa 时，五胞元新型四孔异形蜂窝结构承受应力为 1.723 MPa，高于正八边形蜂窝结构的 1.207 MPa。

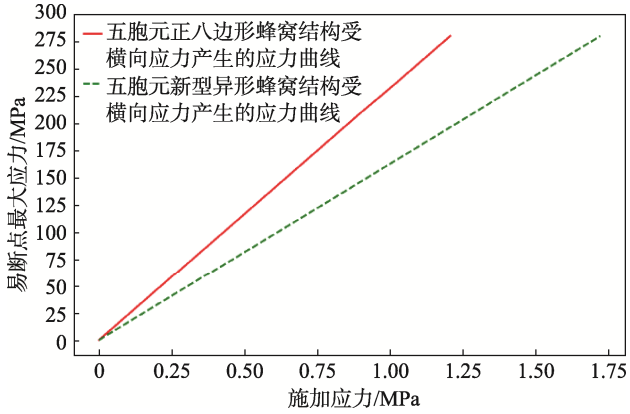
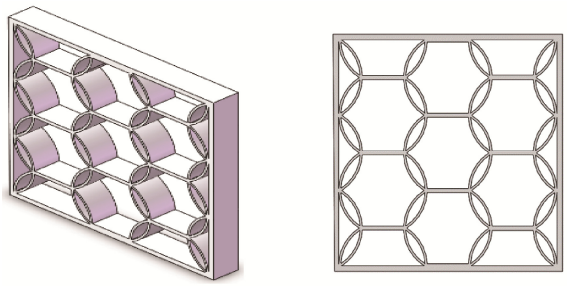


图 14　五胞元蜂窝结构横向承力应力数据
Fig.14 Transverse bearing stress data of a five-cell honeycomb structure

4　九胞元新型四孔异形蜂窝结构各向力学性能仿真

对新型蜂窝结构与正六边形蜂窝结构进行对比分析，如图 15 所示，由 9 个蜂窝基础单位组成相同结构形式的蜂窝夹层结构的等轴测视图与正视图，与正六边形蜂窝结构的横、纵两方向力学承受能力进行比较。夹层厚度为 1 mm，采用拉伸厚度为 5 mm。



a 等轴测图　　b 主视图

图 15　九胞元组成新型四孔异形蜂窝包装夹层结构
Fig.15 New nine-cell four-hole special-shaped honeycomb packaging sandwich structure

网格单元采用同单胞元仿真时相同的形式。单元总数为 18 524，节点总数为 106 476。

图 16 为九胞元新型蜂窝结构承受纵向应力下的仿真模型云图。

如图 17 所示为九胞元新型四孔异形蜂窝结构与九胞元正六边形蜂窝结构在纵向承力下蜂窝结构所产生的最大应力与对应施加应力的数据曲线。在纵向逐步增大的应力影响下，九胞元新型四孔异形蜂窝结构在纵向承受 1.046 MPa 时结构的易断点处产生的应力为 280 MPa，达到了九胞元新型四孔异形蜂窝结构的极限破损状态。而九胞元正八边形蜂窝结构在纵向承受 0.8 MPa 时结构的易断点处产生的应力为 280 MPa，达到了九胞元正八边形蜂窝结构的极限破损状态。

在横向方向上，压缩过程中材料达到断裂极限时，九胞元新型四孔异形蜂窝结构承受的内部峰值应力为 1.057 MPa，九胞元正八边形蜂窝结构材料内部峰值应力为 0.9 MPa。端面方向上九胞元新型四孔异形蜂窝结构和正八边形蜂窝结构的内部峰值应力分别为 1.057 MPa 和 0.9 MPa。

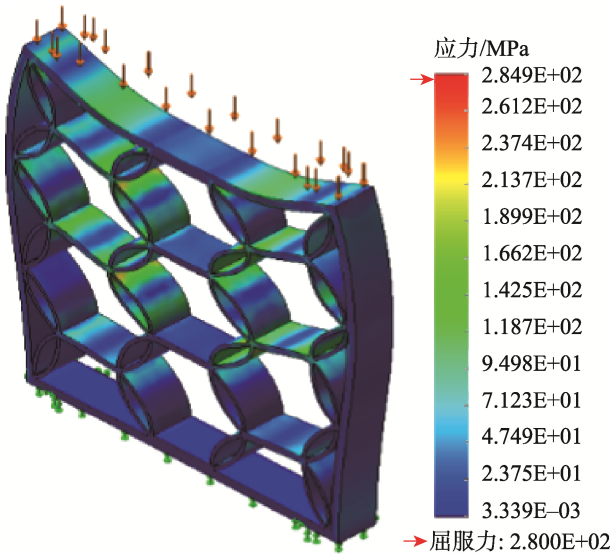


图 16　九胞元新型四孔异形蜂窝结构仿真模型云图
Fig.16 Cloud image of simulation model of a new nine-cell four-hole special-shaped honeycomb packaging sandwich structure

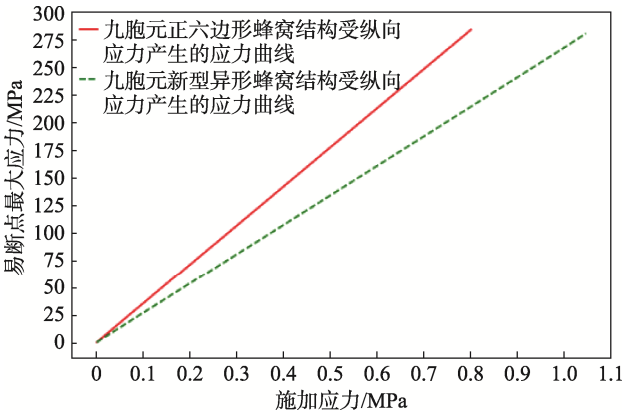


图 17　九胞元蜂窝结构纵向承力应力数据
Fig.17 Longitudinal bearing stress data of nine-cell honeycomb structure

九胞元新型四孔异形蜂窝结构与九胞元正六边形蜂窝结构在纵向承力下蜂窝结构所产生的最大应力与对应施加应力的数据曲线如图 18 所示。

通过比较易断点承受的应力达到了材料屈服强度最大极限时所施加的应力大小，可以判断新型四孔异形蜂窝结构力学性能优于正八边形蜂窝结构和正六边形蜂窝结构。

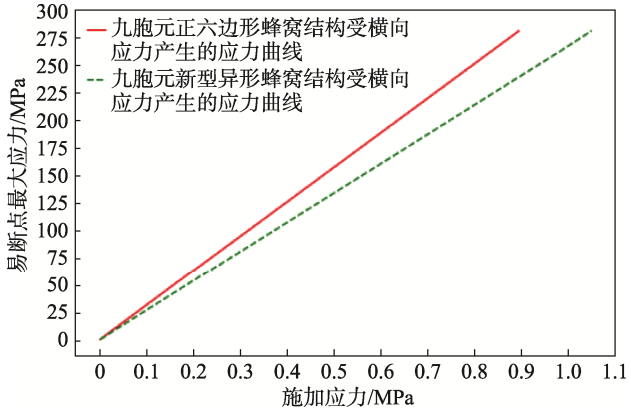


图 18　九胞元蜂窝结构横向承力应力数据
Fig.18 Transverse bearing stress data of nine-cell honeycomb structure

5　新型四孔异形蜂窝包装夹层结构力学性能实验验证

通过对 2 种不同材料的蜂窝结构试件进行压缩实验，验证有限元仿真结果的有效程度。实验采用 Instron 公司的 5967 型号万能材料力学试验机，如图 19 所示。该双立柱台式试验机可用于最大载荷 30 kN 的测力实验，运行速度为 0.001~1 016 mm/min，位移控制精度为 0.044 6 μm，垂直实验空间为 1 212 mm，载荷传感器的精度为示值读数的±0.4%，断裂时间误差为±0.01 s，在隔距 25~250 mm 之间任意调节。

图 19　拉伸试验机
Fig.19 Tensile testing machine

对不同蜂窝胞元结构进行实体压缩实验[8]。用 GREY、PLA TOUGH 材料制作蜂窝试件，实验试件采用与仿真分析相应蜂窝结构相同的形状和尺寸。2 种材料皆为生物基组成，可在利用后降解或回收，可有效地降低不可再生资源的消耗，具有绿色低碳性[9-12]。在生产过程中对人体和环境的危害低[13]，在包装方面操作方便简单、轻质，在运输过程中可降低成本[14]。

5.1　PLA TOUGH 材料新型四孔异形蜂窝夹层结构力学性能实验

用 PLA TOUGH 材料制作蜂窝试件，其各试件尺寸与相应有限元仿真模型的尺寸一致，如图 20 所示。

单胞元蜂窝试件受力实验中，对单个异形胞元单元、单个正六边形蜂窝单元和单个正八边形蜂窝单元试件分别进行 3 个方向的压缩实验。

在端面方向（z 向）上，PLA TOUGH 材料样件的实验本构应力应变结果如图 21 所示。单个新型四孔异形蜂窝胞元端面受力的峰值应力为 54.780 MPa，对应的应变为 0.298；单个正八边形蜂窝胞元端面受力的峰值应力为 50.657 MPa，相应的应变为 0.243；单个正六边形蜂窝胞元端面受力的峰值应力为 53.144 MPa，此时的应变为 0.168。可以得到，3 种结构能承受的断裂强度相近，新型四孔异形蜂窝的应力上升段的弹性模量最大，正六边形蜂窝结构次之，正八边形的弹性模量最小。应力变化平台段显示新型异性蜂窝结构的吸能能力最大。

在横向方向上（x 向），3 种蜂窝结构的应力应变如图 22 所示。单个新型四孔异形蜂窝胞元的峰值应力为 0.249 MPa，此时应变为 0.322；单个正六边形蜂窝胞元的峰值应力为 0.059 MPa，与单个正八边形蜂窝胞元峰值应力 0.048 MPa 较接近；单个新型四孔异形蜂窝胞元的断裂强度和弹性模量大于其他 2 种结构。

图 20　不同蜂窝结构 PLA TOUGH 材料制作的试件
Fig.20 Specimens made from PLA TOUGH materials with different honeycomb structures

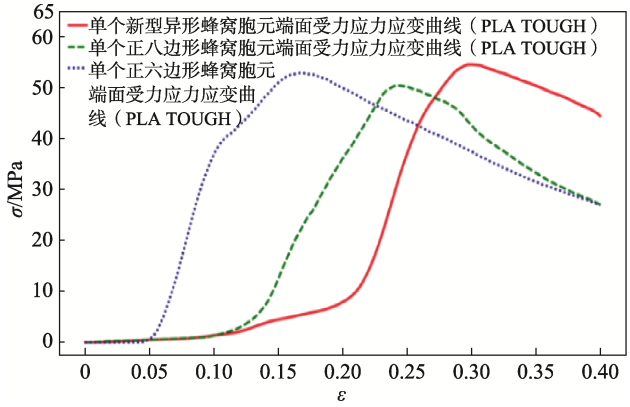


图 21　PLA TOUGH 材料单胞元蜂窝试件端面受力的应力应变

Fig.21 Stress-strain diagram of the end face of specimen made from PLA TOUGH materials with single cell honeycomb structure

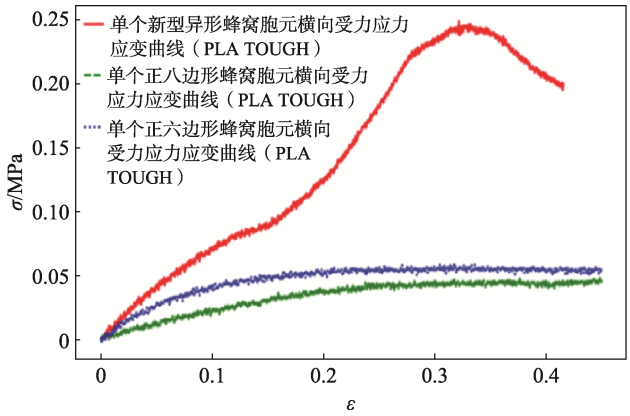


图 22　PLA TOUGH 材料单胞元蜂窝试件横向受力的应力应变

Fig.22 Transverse stress-strain diagram of specimen made from PLA TOUGH materials with single cell honeycomb structure

在纵向方向（y 向）上，各单胞元蜂窝结构的应力应变如图 23 所示。单个新型四孔异形蜂窝胞元纵向受力的应力峰值为 0.090 MPa，此时的应变为 0.116。单个新型四孔异形蜂窝胞元的断裂强度和弹性模量明显大于其他 2 种结构的力学参数。3 种结构都是端面方向的断裂强度最高，纵向方向的断裂强度最低。

在五胞元蜂窝试件力学性能实验中，对新型四孔异形蜂窝五胞元组合结构和正八边形蜂窝五胞元组合结构试件分别进行 3 个方向的压缩实验，测试其力学性能。

在端面方向（z 向）上，由 PLA TOUGH 材料样件的实验本构应力应变图 24 可知，五胞元新型四孔异形蜂窝夹层结构端面受力的峰值应力为 32.131 MPa。五胞元正八边形蜂窝夹层结构端面受力的应力峰值为 22.838 MPa。五胞元新型四孔异形蜂窝结构的断裂强度高于五胞元正八边形蜂窝结构的强度。

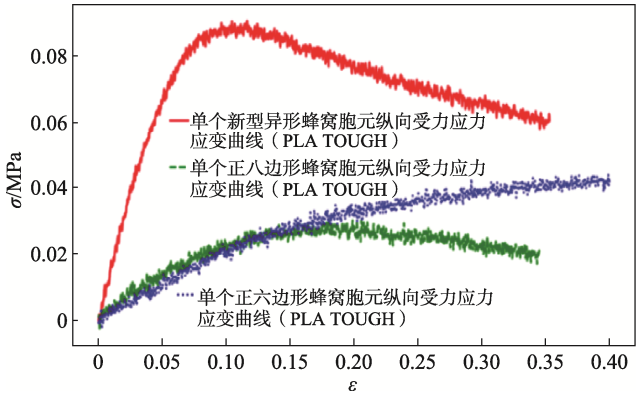


图 23　PLA TOUGH 材料单胞元蜂窝试件纵向受力的应力应变

Fig.23 Longitudinal stress-strain diagram of specimen made from PLA TOUGH materials with single cell honeycomb structure

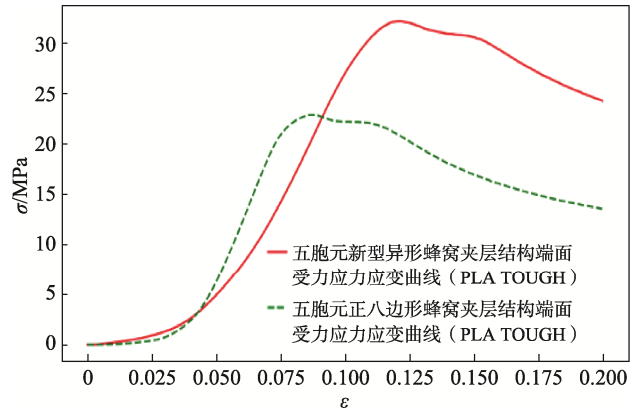


图 24　PLA TOUGH 材料五胞元蜂窝试件端面受力的应力应变

Fig.24 Stress-strain diagram of the end face of specimen made from PLA TOUGH materials with five-cell honeycomb structure

在横向（x 向）和纵向（x 向）上，2 种蜂窝结构的应力应变本构特性如图 25、26 所示。五胞元新型四孔异形蜂窝结构横向受力的应力峰值为 0.484 MPa，结

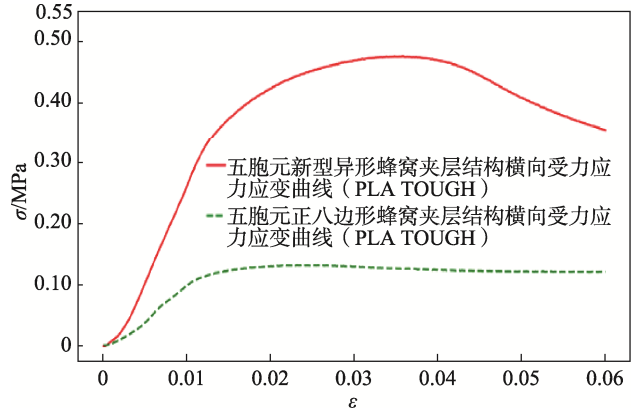


图 25　PLA TOUGH 材料五胞元蜂窝试件横向受力的应力应变

Fig.25 Transverse stress-strain diagram of specimen made from PLA TOUGH materials with five-cell honeycomb structure

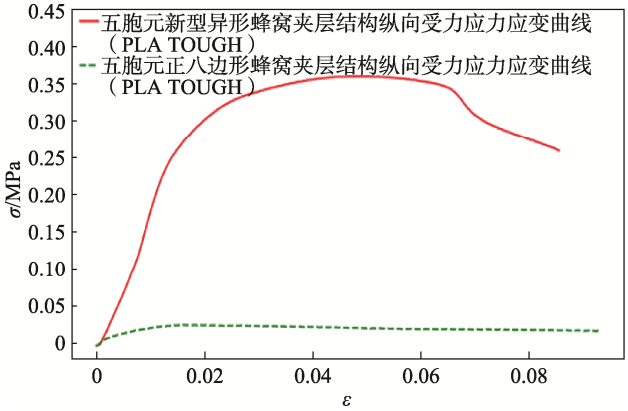


图 26　PLA TOUGH 材料五胞元蜂窝试件纵向受力的应力应变

Fig.26 Longitudinal stress-strain diagram of specimen made from PLA TOUGH materials with five-cell honeycomb structure

构纵向受力的应力峰值为 0.362 MPa。两方向上新型四孔异形蜂窝五胞元组合结构的断裂强度和弹性模量都高于正八边形蜂窝五胞元结构的相应参量。

在端面方向（z 向），九胞元新型四孔异形蜂窝结构和九胞元正六边形蜂窝结构的试件压缩实验应力应变关系如图 27 所示。九胞元新型四孔异形蜂窝夹层结构端面受力的应力峰值为 34.824 MPa。九胞元正六边形蜂窝夹层结构端面受力的应力峰值为 19.673 MPa。另外可以知道，新型四孔异形蜂窝结构的断裂强度和弹性模量都高于正六边形蜂窝结构的相应参数。

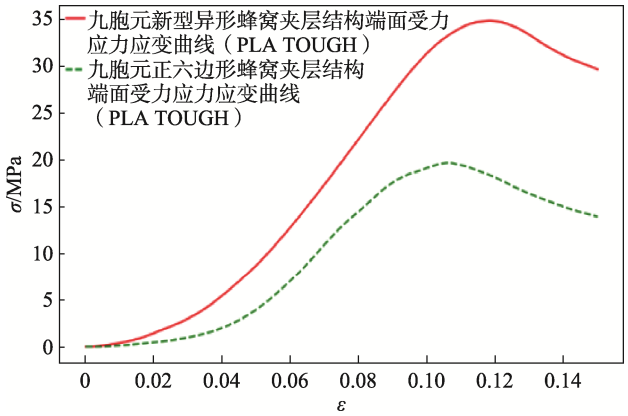


图 27　PLA TOUGH 材料九胞元蜂窝试件端面受力的应力应变

Fig.27 Stress-strain diagram of the end face of specimen made from PLA TOUGH materials with nine-cell honeycomb structure

在横向方向（x 向），九胞元新型四孔异形蜂窝结构断裂强度应力为的 0.202 MPa，高于九胞元正六边形蜂窝结构断裂强度应力 0.084 MPa（图 28）。

在纵向方向（y 向），九胞元新型四孔异形蜂窝结构在材料压缩实验中显示，与九胞元正六边形蜂窝结构具有相近的断裂强度应力（≈0.13 MPa）、相应应变值（≈0.025）和弹性模量（图 29）。

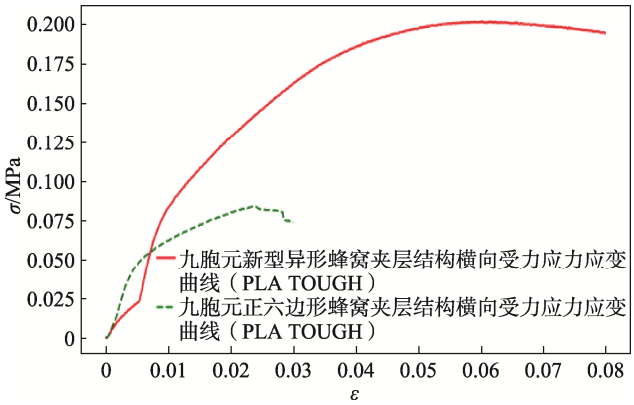


图 28　PLA TOUGH 材料九胞元蜂窝试件横向受力的应力应变

Fig.28 Transverse stress-strain diagram of specimen made from PLA TOUGH materials with nine-cell honeycomb structure

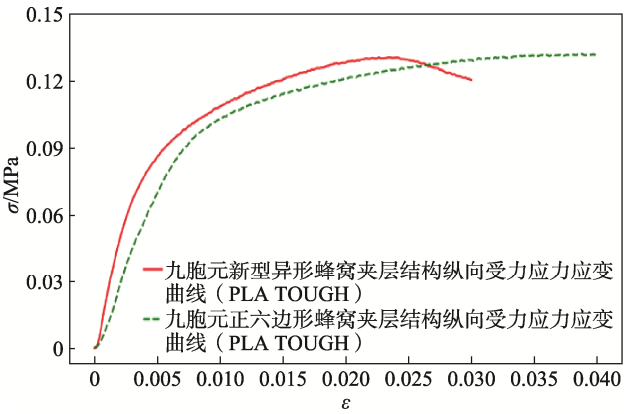


图 29　PLA TOUGH 材料九胞元蜂窝试件纵向受力的应力应变

Fig.29 Longitudinal stress-strain diagram of specimen made from PLA TOUGH materials with nine-cell honeycomb structure

综上所述，对标定的坐标系中，单胞元基本单元端面力学性能相近的情况下，在横向和纵向 2 个方向，新型四孔异形蜂窝结构的力学抗压抗断性能优于正六边形蜂窝结构和正八边形蜂窝结构。对于多胞组合单元，新型四孔异形蜂窝结构的总体的抗压抗断性能和各向性能的同性或均匀性都优于或相近于正六边形多胞元蜂窝结构和正八边形多胞元蜂窝结构。

5.2　GREY 材料新型四孔异形蜂窝夹层结构力学性能实验

制作 GREY 树脂材料的蜂窝结构样件，进行承载能力测试。同理 5.1 节有应用意义各蜂窝结构多胞元组合的情况。

在端面方向（z 向）上，测得 GREY 样件的本构

应力应变（图 30）。五胞元新型四孔异形蜂窝夹层结构端面受力的应力峰值为 25.119 MPa。五胞元正八边形蜂窝夹层结构端面受力的应力峰值为 18.632 MPa。五胞元新型四孔异形蜂窝结构的断裂强度高于五胞元正八边形蜂窝结构的强度。

在横向方向上（x 向），如图 31 所示，五胞元新型四孔异形蜂窝夹层结构横向受力的应力峰值为 0.171 MPa。五胞元正八边形蜂窝夹层结构横向受力的应力峰值为 0.117 MPa。此方向上新型四孔异形蜂窝五胞元组合结构的断裂强度和弹性模量都高于正八边形蜂窝五胞元结构的。

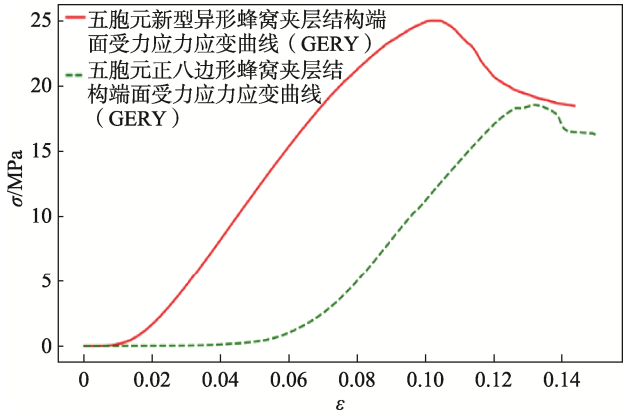


图 30　GREY 材料五胞元蜂窝结构试件端面受力的应力应变

Fig.30 Stress-strain diagram of the end face of specimen made from GREY materials with five-cell honeycomb structure

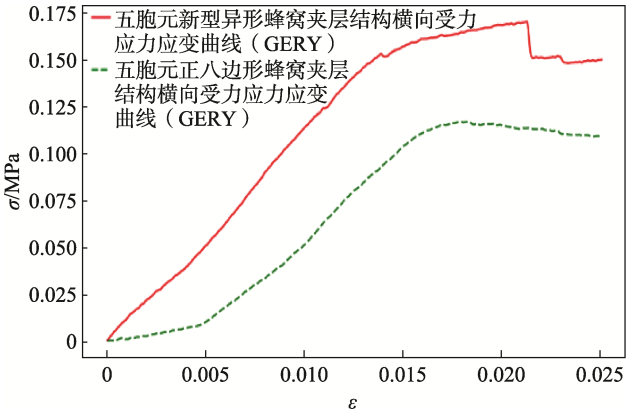


图 31　GREY 材料五胞元蜂窝结构试件横向受力的应力应变

Fig.31 Transverse stress-strain diagram of specimen made from GREY materials with five-cell honeycomb structure

在纵向方向上（y 向），新型四孔异形蜂窝五胞元组合结构的断裂强度和弹性模量都高于正八边形蜂窝五胞元结构的相应参量（图 32）。在压缩变形至断裂的过程中，正八边形蜂窝五胞元结构的吸能性能略好。

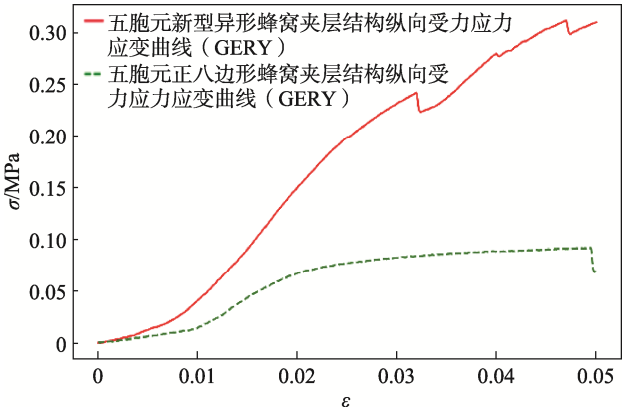


图 32　GREY 材料五胞元蜂窝结构试件纵向受力的应力应变

Fig.32 Longitudinal stress-strain diagram of specimen made from GREY materials with five-cell honeycomb structure

在端面方向（z 向），试件被压缩时，九胞元新型四孔异形与正六边形蜂窝夹层结构断裂强度分别为 25.708、15.214 MPa，弹性模量差异不大。在横向方向（x 向），九胞元新型异形蜂窝结构横向峰值应力为 0.199 MPa，高于九胞元正六边形蜂窝结构 0.056 MPa。在纵向方向（y 向），九胞元新型异形蜂窝结构的抗压抗断能力大于九胞元正六边形蜂窝结构，所示的 2 种结构的应力峰值分别为 0.218 MPa 和 0.081 MPa。GREY 材料九胞元实验结果与九胞元仿真分析有一样的结论。

综合分析可知，多胞组合单元作为实际应用中蜂窝夹心结构的基本组成，新型四孔异形蜂窝结构的总体抗压抗断性能和各向性能的同性或均匀性，都优于或相近于正六边形多胞元蜂窝结构和正八边形多胞元蜂窝结构的等级。有效地验证了有限元分析的合理性的同时，说明新型异性蜂窝结构具有实际应用的价值。

6　结语

以传统蜂窝结构为基础设计新型四孔异形蜂窝结构。通过有限元仿真分析和实验验证相结合的方式，得到新型蜂窝结构的单胞元与多胞元结构力学性能相较于传统正六边形与正八边形蜂窝结构有明显提升，新型异形蜂窝结构具有优越的力学性能。

新型四孔异形蜂窝包装夹层结构保证了对物品的基础包装，更提供了保护物品的保障，在包装行业领域具有广泛的应用前景，包装产品所需的材料也将作为下一步选择和优化的研究方向。

参考文献：

[1]　李娅. 基于绿色低碳理念的日化包装设计研究[J]. 日用化学工业, 2022, 52(3): 316-321.
LI Y. Research on Daily Chemical Packaging Design

Based on Green and Low-Carbon Concept[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2022, 52(3): 316-321.

[2] 姚英. 虚拟现实技术下产品包装低碳环保的绿色设计[J]. 现代电子技术, 2019, 42(24): 163-166.
YAO Y. Green Design of Low-Carbon Environmental Friendly Product Packaging under Virtual Reality Technology[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(24): 163-166.

[3] 张备. 再生塑料包装设计及评价模型构建[J]. 合成树脂及塑料, 2019, 36(6): 86-90.
ZHANG B. Design and Evaluation Model of Recycled Plastic Packaging[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(6): 86-90.

[4] LIU C, SHEN L Y, LIU H R, et al. Improvement of Temperature Distribution Uniformity of Ready-to-Eat Rice during Microwave Reheating via Optimizing Packaging Structure[J]. Foods, 2023, 12(15): 2938.

[5] 李响, 潘志宇, 李锐, 等. 轻质高强类蜂窝夹层结构力学性能分析及优化[J]. 机械, 2021, 48(11): 1-9.
LI X, PAN Z Y, LI R, et al. Parameter Analysis and Optimization Design of Light-Weight and High-Strength Honeycomb Sandwich Structure[J]. Machinery, 2021, 48(11): 1-9.

[6] WANG J T, ZHONG J, XIN T, et al. Design and Fabrication of Leadless Package Structure for Pressure Sensors[J]. Journal of Electronic Packaging, 2021, 144(4) : 2-4.

[7] LI C, ZHOU J D, SONG J L, et al. Non-Fullerene Acceptors with Branched Side Chains and Improved Molecular Packing to Exceed 18% Efficiency in Organic Solar Cells[J]. Nature Energy, 2021, 6: 605-613.

[8] 雷鸣, 吴颖, 彭芳, 等. 基于 ANSYS 强度仿真与动力学测试的包装结构优化设计[J]. 包装工程, 2023, 44(21): 253-259.
LEI M, WU Y, PENG F, et al. Optimization DESIGn of Packaging Structure Based on ANSYS Strength Simulation and Dynamic Testing[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(21): 253-259.

[9] FARZINAZAR S, REN Z, LIM J, et al. Thermomechanical Topology Optimization of Three-Dimensional Heat Guiding Structures for Electronics Packaging[J]. Journal of Electronic Packaging, 2022, 144(2): 3-7.

[10] 徐星晔. 新型夹芯结构包装材料的缓冲性能研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022: 3-12.
XU X Y. Research on Cushioning Properties of New Sandwich Structure Packaging Materials[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022: 3-12.

[11] 陆佳平, 卢立新, 丘晓琳, 等. 包装工程专业《包装材料与结构》课程群建设[J]. 包装工程, 2021, 42(增刊1): 81-84.
LU J P, LU L X, QIU X L, et al. Course Group Construction of Packaging Materials and Structure for Packaging Engineering Major[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(Supp.1): 81-84.

[12] WAGH V R, RIAHI Z, KIM T J, et al. Carrageenan-Based Functional Films Hybridized with Carbon Dots and Anthocyanins from Rose Petals for Smart Food Packaging Applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 272: 132817-132817.

[13] ZHANG S M, YU Y, HU X Y, et al. Design of OMC-Sagnac Loop Using PDMS and Different Package Structures to Improve Sensing Performance and Optimize the Ill-Conditioned Matrix[J]. Sensors, 2023, 23(10): 4655.

[14] 陈联. 生态理念下的包装设计策略[J]. 包装工程, 2023, 44(14): 320-322.
CHEN L. Packaging Design Strategy under Ecological Concept[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(14): 320-322