

开孔缺陷对蜂窝与瓦楞纸板侧向临界屈曲载荷 弱化效应的研究

吴吉平¹, 黄志达¹, 付应海², 唐文评¹, 滑广军¹

(1.湖南工业大学, 湖南 株洲 412007; 2.南京高速齿轮制造有限公司, 南京 211100)

摘要:目的 以蜂窝纸板和瓦楞纸板为对象, 研究2种纸板圆孔缺陷对侧向承载能力的弱化效应。方法 利用 ANSYS Workbench 软件的数值模拟功能, 对2种纸板的开孔模型进行特征值屈曲分析, 研究了2种纸板临界屈曲载荷随孔径大小的变化趋势, 分析了2种纸板侧向承载能力对孔洞缺陷的敏感性。结果 随着孔径的增大, 蜂窝纸板与瓦楞纸板的屈曲临界载荷均呈逐渐下降趋势; 开孔大于临界值后, 瓦楞纸板的屈曲载荷下降率明显高于蜂窝纸板。结论 随着孔径的增大, 蜂窝纸板侧向承载能力的下降速度小于瓦楞纸板, 蜂窝纸板表现出比瓦楞纸板更优的开孔缺陷弱化效应。

关键词: 瓦楞纸板; 蜂窝纸板; 有限元数值计算; 特征值屈曲; 弱化效应

中图分类号: TB48

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)21-0247-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.033

Weakening Effect of Hole Defects on Lateral Critical Buckling Load of Honeycomb and Corrugated Cardboard

WU Jiping¹, HUANG Zhida¹, FU Yinghai², TANG Wenping¹, HUA Guangjun¹

(1. Hunan University of Technology, Hunan Zhuzhou 412007, China;

2. Nanjing High Speed Gear Manufacturing Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

ABSTRACT: The work aims to study the weakening effect of circular hole defects on lateral bearing capacity of honeycomb cardboard and corrugated cardboard. The finite element numerical calculation method was used based on ANSYS Workbench, and an eigenvalue buckling analysis was conducted on both types of cardboard. The tendency of critical buckling load of the two types cardboard with different hole sizes was analyzed, and the sensitivity of lateral bearing capacity to hole defects was explored. As the hole diameter increased, the buckling critical load of both honeycomb cardboard and corrugated cardboard gradually decreased. When the circular hole was greater than the critical value, the buckling load reduction rate of corrugated cardboard was significantly higher than that of honeycomb cardboard. As the hole diameter increases, the decrease rate of the lateral load-bearing capacity of honeycomb cardboard is slower than that of corrugated cardboard, and honeycomb cardboard exhibits a superior weakening effect of hole defects compared with corrugated cardboard.

KEY WORDS: corrugated cardboard; honeycomb cardboard; finite element numerical calculation; eigenvalue buckling; weakening effect

收稿日期: 2024-08-10

基金项目: 湖南省教育厅重点科研项目(21A0353); 湖南省自然科学基金联合基金(2022JJ30223); 国家重点研发计划(2023YFC3904603)

作为最典型的2种夹芯结构,蜂窝结构与瓦楞结构被广泛应用于航空航天、船舶、汽车、建筑、家具及包装领域。瓦楞的波纹状结构及蜂窝的仿生蜂巢结构,使这2种结构材料具有优异的比刚度和比抗压强度^[1]。在物流包装行业,以这2种结构为基础制作的容器能够为货物运输提供可靠的保护,同时具有良好的环保性和经济性^[2]。包装容器常需要加工手孔、通风孔(如图1所示),导致结构侧向承载能力损失,因此研究开孔对夹心纸板侧向承载能力的弱化效应具有重要的工程意义^[3-4]。

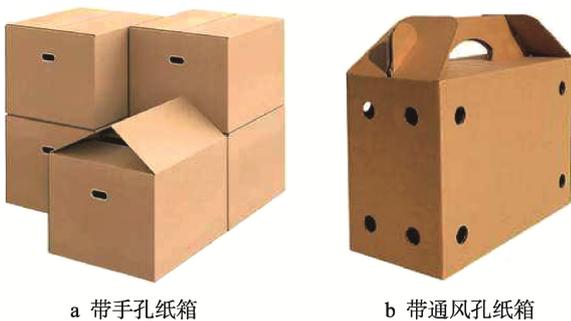


图1 纸箱开孔的工程应用实例
Fig.1 Engineering application examples of opening holes in cardboard boxes

有限元仿真分析技术因能够控制实验环节造成的分析误差,在工程结构优化中得到了广泛应用。文周等^[5]对不同温湿度的蜂窝纸板进行了静态压缩试验,建立了有限元模型,静态压缩试验结果和有限元仿真结果具有较好的一致性。王慧能^[6]采用对蜂窝纸板芯层开孔的方法,进行了面外静态压缩试验和有限元仿真模拟,探究了温湿度及芯层开孔大小对蜂窝纸板平压强度的影响。李洋洋等^[7]研究了平齐式瓦楞-蜂窝组合纸板和相对式瓦楞-蜂窝组合纸板的静态力学性能和缓冲性能。刘志家^[8]利用有限元技术建立了瓦楞纸板的等效板模型,对比了等效板屈曲载荷与瓦楞纸板边压强度试验载荷,验证了等效板模型的可行性。孙德强等^[9]基于有限元仿真分析和试验,研究了珍珠棉(EPE)与瓦楞纸板组合运输包装系统的安全性。刘伯^[10]系统地研究了瓦楞纸板的数值模拟方法。胡晶晶^[11]建立了3种孔径大小的蜂窝纸板面外准静态压缩有限元模型,研究了蜂窝纸板面外准静态压缩响应和缓冲性能。陈岳铃等^[12]运用有限元方法,分析了不同结构参数下凹六边形蜂窝纸板的面内承载性能。

在蜂窝、瓦楞2种纸板性能比较分析方面,滑广

军等^[13]利用有限元软件建立了蜂窝纸板及重型瓦楞纸板大尺寸规格试样的数值模型,并基于屈曲准则对其侧向抗压强度进行了研究;潘丹等^[14]对比了蜂窝纸板、瓦楞纸板和EPE组成的复合结构的缓冲特性。在缺陷效应研究方面,陈璇^[15]通过试验研究了缺陷对瓦楞纸板和蜂窝纸板力学性能的影响;蒋国庆等^[16]研究了高温环境下凹坑缺陷对蜂窝夹芯板屈曲性能的影响规律,结果表明圆形凹坑缺陷蜂窝夹芯板具有最优的承载性能;赵壮壮等^[17]针对I型夹芯板界面的脱粘失效破坏,开发了适用于三维复杂结构的界面疲劳脱粘模拟程序,并进行了试验和数值模拟研究;张曦^[18]以泡沫铝夹芯板为研究对象,对其典型成形缺陷进行了系统的研究;Hua等^[19]采取实验和数值仿真方法,揭示了瓦楞纸板和蜂窝纸板存在边缘缺陷效应。

夹心结构在成型或再加工时,会对原结构产生不同的影响,研究成型缺陷或再加工对夹心结构性能的影响,对于合理选择夹心结构及制订加工方案具有重要意义。本文通过数值仿真的方法,建立了瓦楞与蜂窝纸板不同开孔方案的模型,对材料参数、试样加工误差、温湿度等因素进行了固定,基于特征值屈曲分析,揭示开孔缺陷对2种纸板侧向承载能力的弱化效应,为夹心结构的选择及开孔方案的制订提供依据。

1 试样参数控制

1.1 材料与结构参数

为突出开孔缺陷的影响,数值建模时,对蜂窝和瓦楞结构的材料性能参数进行了设置。蜂窝与瓦楞纸板的基纸材料均选用200WTK(美国),性能参数如表1^[10]。

分析前,需要对影响纸板侧向承载能力的其他因素进行一致化处理。本文对蜂窝和瓦楞纸板材料及结构参数的设置思路如下:1)蜂窝纸板和瓦楞纸板的的面纸、芯纸、底纸选择同样的材质,如表1所示;2)蜂窝纸板与瓦楞纸板试样厚度方向尺寸相同;3)瓦楞纸板和蜂窝纸板等效用纸量相同,根据瓦楞纸板的相对密度推算蜂窝纸板芯纸结构参数。

根据瓦楞纸板的结构,A型瓦楞纸板的相对密度为:

$$P_w = \frac{(2L + 2\pi h)G}{L} \quad (1)$$

其中, h 为瓦楞纸板的厚度,mm; L 为瓦楞纸板的波纹周期长,mm; G 为原纸定量, g/m^2 。

表1 原纸材料属性
Tab.1 Properties of raw paper material

杨氏模量/MPa			剪切模量/MPa			泊松比			厚度/mm	定量/(g·m ⁻²)
E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{xz}	G_{yz}	μ_{xy}	μ_{xz}	μ_{yz}		
7 600	4 020	38	2 140	20	70	0.34	0.01	0.01	0.186	120

根据蜂窝纸板的结构特点, 可知正六边形蜂窝纸板的相对密度为:

$$P_f = \frac{(6\sqrt{3}a + 8h)G}{3\sqrt{3}ah} \quad (2)$$

其中, a 为正六边形边长, mm。当 $P_w = P_f$ 时, 则有:

$$\frac{(2L + 2\pi h)G}{L} = \frac{(6\sqrt{3}a + 8h)G}{3\sqrt{3}ah} \quad (3)$$

A 型瓦楞纸板的高度 $h = 5$ mm, 则 $L = 2h = 10$ mm, 如图 2 所示。根据式 (3), 可得 $a = 5$ mm, 如图 3 所示。

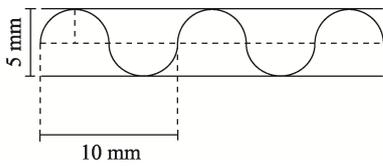


图 2 瓦楞纸板截面结构
Fig.2 Cross-sectional structure of corrugated cardboard

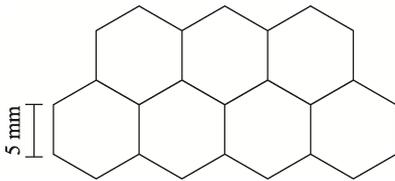


图 3 蜂窝纸板内部结构
Fig.3 Internal structure of honeycomb cardboard

1.2 开孔方案

本文主要研究圆孔对蜂窝和瓦楞纸板承载性能的影响。考虑到实际应用的纸箱尺寸规格较大, 试样规格选定为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。开孔方案为阵列式开 4 个圆孔, 圆孔的直径分别为 2、5、8、10、12、15、18 和 20 mm 的有孔模型, 以及无孔模型, 如图 4 所示。

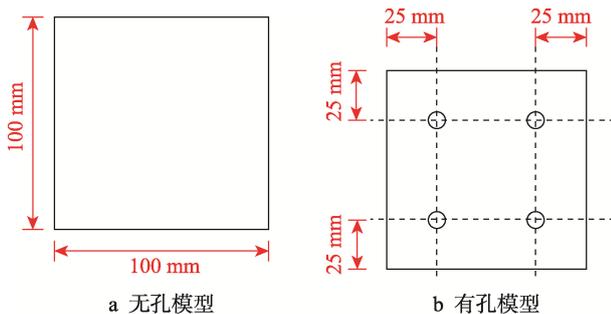


图 4 蜂窝纸板模型
Fig.4 Honeycomb cardboard model

2 仿真模型的建立

模型的屈曲分析模拟边压强度的实验工况, 分别建立蜂窝结构与瓦楞结构及上、下压板的几何模型, 然后对模型进行离散化, 得到有限元模型。

2.1 建立几何模型

根据式 (1) ~ (3) 确定蜂窝纸板与瓦楞纸板的基本结构尺寸, 建立试样的几何模型, 2 种纸板都是面纸-芯纸-面纸的夹芯结构。将纸板试样和上、下压板装配, 如图 5 所示。

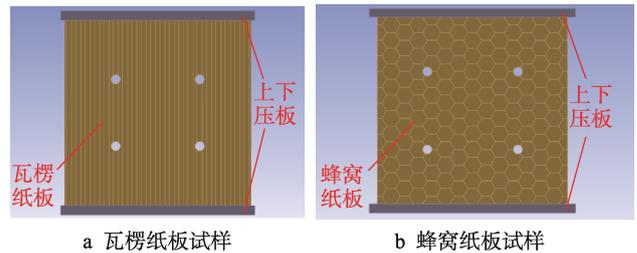


图 5 试样的承载状态
Fig.5 Load-bearing condition of specimen

2.2 材料模型定义

将原纸设置为各向异性的材料属性, 将表 1 中的数据输入模型, 完成原纸材料模型的定义。

2.3 接触状态和连接方式模拟

上、下压板与试样的接触方式定义为摩擦接触, 摩擦因数为 0.2; 瓦楞纸板与压板定义为线-面接触; 蜂窝纸板的面纸与压板定义为线-面接触, 芯纸与压板定义为面-面接触。为了模拟面纸和芯纸的粘合关系, 瓦楞纸板的芯纸和面纸采用绑定接触并采用模型预测控制 (MPC) 算法, 蜂窝纸板采用共享拓扑法进行共节点处理。

2.4 约束及载荷施加

为便于快速算出临界屈曲载荷, 在上压板上表面施加向下 1 个单位的载荷, 对下压板下表面施加固定约束。蜂窝纸板的承载方向为 MD 方向, 瓦楞纸板承载方向为 CD 方向, 蜂窝与瓦楞纸板方向如图 6 与图 7 所示。

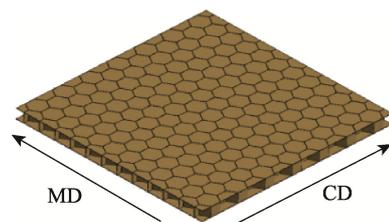


图 6 蜂窝纸板方向定义
Fig.6 Definition of honeycomb cardboard direction

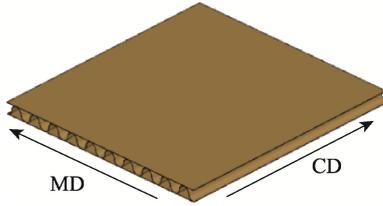


图7 瓦楞纸板方向定义
Fig.7 Definition of corrugated cardboard direction

3 特征值屈曲分析结果

选用 Workbench 的特征值屈曲分析模块进行分析。瓦楞纸板和蜂窝纸板裁切后，其边缘均为不完整的蜂窝结构和瓦楞结构，存在边缘效应，其屈曲模态均包含局部屈曲模态和整体屈曲模态。图 8a 为开孔部位局部屈曲，图 8b 为侧面局部屈曲。由图 8a、图 8b 可知，局部屈曲只发生在试样很小的区域，表征的是试样局部的承载能力，不能体现试样整体的承载能力。由于纸箱在实际堆码时的鼓包现象以及抗压试验中承载峰值出现时的失效形式更接近于整体屈曲，因此以整体屈曲模态表征各试样的侧向承载能力，瓦楞纸板的第 1 阶整体屈曲模态如图 8c 所示。

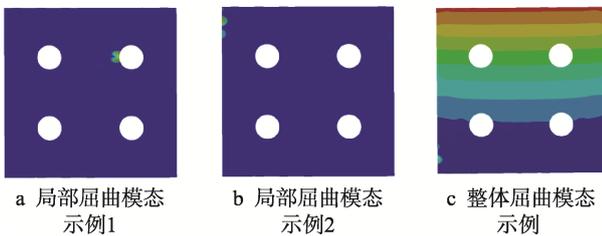


图8 局部屈曲模态与整体屈曲模态示例
Fig.8 Examples of local buckling modes and global buckling modes

3.1 应力云图

每一阶屈曲模态都有对应的负载系数，由于施加的载荷是单位载荷，第 1 阶整体屈曲模态所对应的负载系数即为侧向屈曲载荷值。瓦楞纸板的应力云图如图 9 所示，无孔试样的应力带呈“X”形分布，如图 9a 所示；开孔试样会以各个孔为中心形成“X”形应力带，如图 9b 所示；随着孔径的增大，开孔位置出现沿着受力方向的低应力带，如图 9c 所示。蜂窝纸板的应力分布与瓦楞纸板相似，如图 10 所示。

图 10 为瓦楞与蜂窝纸板试样第 1 阶整体屈曲模态应力云图。分析表明，瓦楞纸板开孔后，开孔部位出现了较大的低应力区，如 5 mm 开孔时，低应力区已贯通上下孔；15 mm 开孔时，低应力带接近贯通上下接触面；20 mm 开孔时，低应力带完全贯通上下接

触面。蜂窝纸板开孔后，开孔部位的低应力区比瓦楞纸板小，如 5 mm 开孔时，孔洞周围的低应力区域相隔较远；达到 15 mm 开孔时，低应力带才贯通 2 个孔；20 mm 开孔时，低应力带仍未彻底贯通上下接触面。分析认为，对于蜂窝纸板和瓦楞纸板，当承受侧向载荷时，蜂窝纸板表现出比瓦楞纸板更优的孔洞缺陷抑制能力。

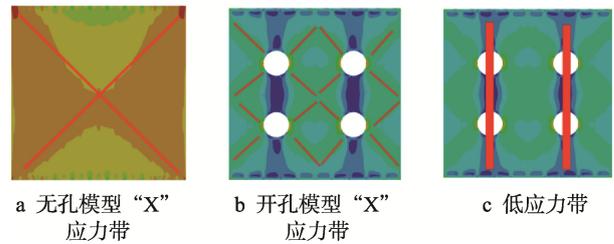


图9 瓦楞纸板应力云图
Fig.9 Stress pattern of corrugated cardboard

3.2 临界屈曲载荷

Workbench 的特征值屈曲分析使用 MAPDL 的线性摄动分析法，将静态分析结果作为预应力，给结构侧向施加微小初始扰动后，结构保持稳定时所能承受的最大载荷，其问题方程是刚度矩阵 $[K]$ 和应力刚度矩阵 $[S]$ 有关的特征方程，如式 (4) 所示。

$$([K] + \lambda [S])\{\psi_i\} = \{0\} \tag{4}$$

临界屈曲载荷为特征值屈曲模态对应的负载系数与施加总载荷的乘积，为方便计算，静力学分析时一般对结构施加 1 N 载荷，则有：

$$F_{cr} = 1 \times \lambda \tag{5}$$

其中， F_{cr} 为临界载荷； λ 为负载系数。

2 种纸板第 1 阶整体屈曲模态对应的屈曲载荷如图 11a 所示。图 11a 表明，瓦楞纸板 CD 方向承载能力优于蜂窝纸板；随着孔径的增大，2 种纸板的临界屈曲载荷均呈减小的趋势。为分析 2 种纸板有孔模型承载能力下降率，将图 11a 中的屈曲载荷进行归一化处理，方式为各组开孔试样的屈曲载荷值分别除以无孔试样的屈曲载荷，得到如图 11b 的归一化曲线图。由图 11b 可知，开孔尺寸较小时，蜂窝与瓦楞纸板承载能力下降的速度均较慢；开孔尺寸达到一定临界值时，随开孔尺寸的增加，蜂窝与瓦楞纸板承载能力下降速度加快，蜂窝纸板承载能力下降的速度小于瓦楞纸板，表现出更优的开孔缺陷抑制能力。

图 11 与文献[15]的实验结果具有相同的趋势。本研究进行数值建模分析，对模型材料参数、结构参数、环境参数等进行了统一的设定，能够将开孔缺陷对纸板侧向承载能力的弱化效应从众多影响因素中解耦出来。

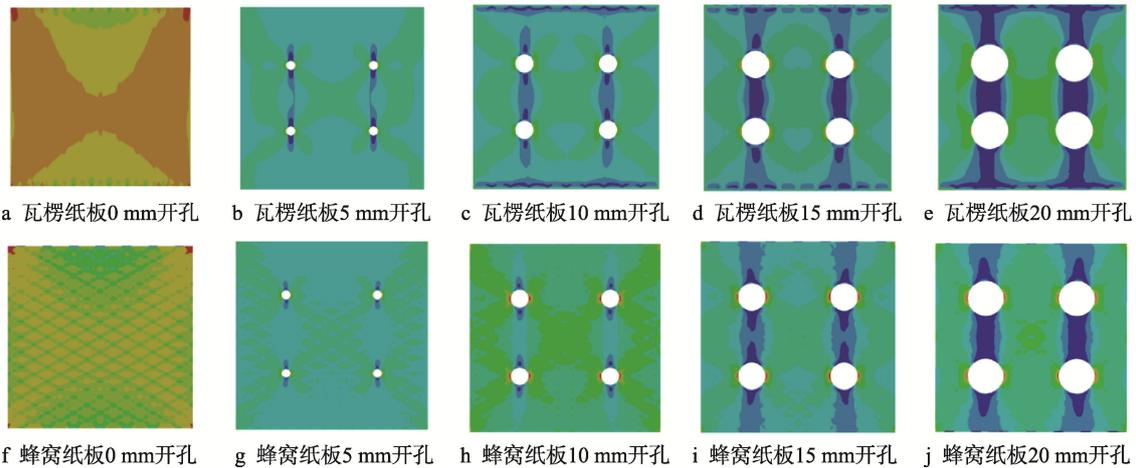


图 10 应力云图结果
Fig.10 Results of stress pattern

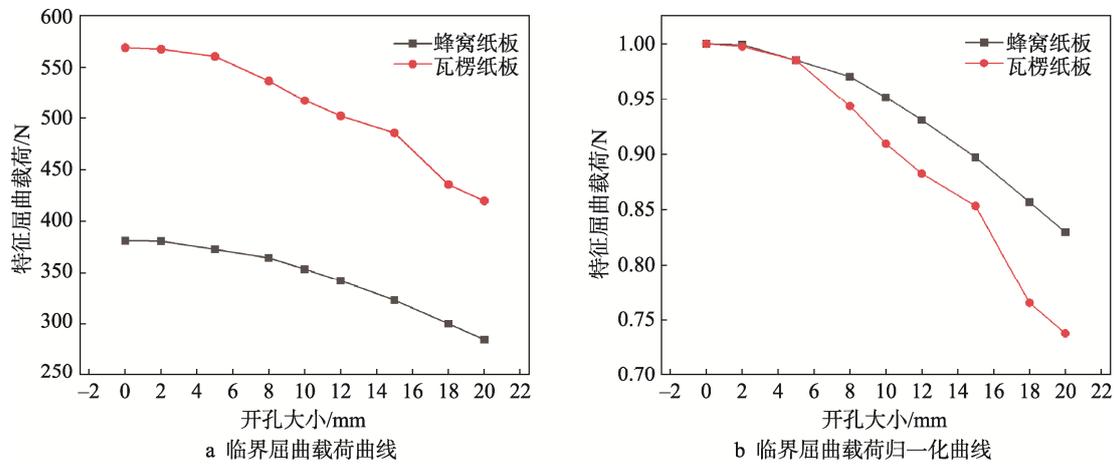


图 11 临界屈曲载荷变化趋势
Fig.11 Trend of critical buckling load variation

4 结论

本文以蜂窝纸板和瓦楞纸板为研究对象,建立了 2 种纸板不同开孔方案的有限元模型,基于特征值屈曲分析,探究了 2 种夹心纸板对开孔缺陷的抑制能力。主要结论如下:

1) 应力云图结果表明,瓦楞纸板开孔后,开孔部位的低应力影响区域要大于蜂窝纸板的低应力影响区域,过大的低应力区域说明有较多的材料没有充分发挥承载能力。

2) 特征值屈曲分析结果表明,瓦楞纸板 CD 方向的承载能力优于蜂窝纸板,开孔尺寸小于一定临界值时,开孔对蜂窝纸板与瓦楞纸板的整体承载能力的影响均较小。

3) 对蜂窝纸板与瓦楞纸板屈曲特征值的归一化结果表明,开孔尺寸大于一定临界值时,随着开孔尺寸的增加,蜂窝纸板承载能力减小的速度小于瓦楞纸板,表现出更优的开孔缺陷抑制能力。

参考文献:

[1] 吉美娟, 郭彦峰, 付云岗, 等. 纸瓦楞-蜂窝复合夹层结构的跌落冲击缓冲性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 247-256.
JI M J, GUO Y F, FU Y G, et al. Study on Drop Impact Cushioning Performance of Paper Corrugated-Honeycomb Composite Sandwich Structure[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 247-256.

[2] 袁晓宝, 刘雅婷, 陈妮, 等. 绿色包装材料研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 87-94.
YUAN X B, LIU Y T, CHEN N, et al. Research Progress on Green Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 87-94.

[3] ARCHAVIBOONYOBUL T, CHAVEESUK R, SINGH J, et al. An Analysis of the Influence of Hand Hole and Ventilation Hole Design on Compressive Strength of Corrugated Fiberboard Boxes by an Artificial Neural

- Network Model[J]. *Packaging Technology and Science*, 2020, 33(4/5): 171-181.
- [4] 谢勇, 胡亚萍. 瓦楞纸箱提手孔形状对抗压强度的影响[J]. *包装工程*, 2013, 34(21): 31-34.
XIE Y, HU Y P. Effect of Handing Hole's Shape on Compressive Strength of Corrugated Box[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(21): 31-34.
- [5] 文周, 薛美贵, 李伟. 温湿度对蜂窝纸板静力学性能影响及有限元分析[J]. *包装工程*, 2020, 41(23): 129-134.
WEN Z, XUE M G, LI W. Impact of Temperature and Humidity on Static Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard and Finite Element Analysis[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(23): 129-134.
- [6] 王慧能. 侧向开孔纸蜂窝芯层抗压性能的模拟分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
WANG H N. Simulation Analysis of Compressive Properties of Honeycomb Core Layer with Lateral Opening Paper[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [7] 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(27): 82-83.
LI Y Y, SHI W, JIANG X C, et al. Study on Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard Formed by Corrugated Paperboard[J]. *Science & Technology Vision*, 2016(27): 82-83.
- [8] 刘志家. 瓦楞纸板家具有限元分析及其结构优化设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
LIU Z J. Research on Finite Element Analysis and Structural Optimization Design of Corrugated Board Furniture[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [9] 孙德强, 石威, 李彬, 等. 基于Ansys Workbench的投影仪运输包装仿真分析[J]. *包装工程*, 2021, 42(9): 11-16.
SUN D Q, SHI W, LI B, et al. Simulation Analysis of Projector Transport Packaging Based on Ansys Workbench[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(9): 11-16.
- [10] 刘伯. 瓦楞纸板力学性能的有限元分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
LIU B. Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Corrugated Board[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.
- [11] 胡晶晶. 蜂窝纸板面外承载及能量吸收性能研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2023.
HU J J. Study on Out-of-Plane Load Bearing and Energy Absorption Performance of Honeycomb Paperboard[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2023.
- [12] 陈岳铃, 王军, 卢立新, 等. 凹六边形蜂窝纸板面内承载性能有限元仿真分析[J]. *包装工程*, 2021, 42(13): 174-179.
CHEN Y L, WANG J, LU L X, et al. Finite Element Simulation Analysis of In-Plane Load-Bearing Performance of the Paperboard with re-Entrant Hexagonal Honeycomb Core[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(13): 174-179.
- [13] 滑广军, 廖泽顺, 费伟民. 重型夹芯纸板侧压强度数值仿真分析[J]. *包装工程*, 2016, 37(15): 107-110.
HUA G J, LIAO Z S, FEI W M. Numerical Simulation on Edgewise Compressive Strength of Heavy Sandwich Fiberboard[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(15): 107-110.
- [14] 潘丹, 郭彦峰, 付云岗, 等. 新型瓦楞-蜂窝复合结构的缓冲吸能机制及应用研究[Z]. 陕西省, 西安理工大学, 2019-12-01.
PAN D, GUO Y F, FU Y G, et al. Research and Application of the Buffering and Energy Absorption Mechanism of the New Corrugated-Honeycomb Composite Structure[Z]. Shaanxi Province, Xi'an University of Technology, 2019-12-01.
- [15] 陈琬. 纸质点阵式薄壁结构缺陷对其力学性能影响[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2020.
CHEN W. The Influence of Defects in Paper Dot Matrix Thin-Walled Structures on Their Mechanical Properties[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2020.
- [16] 蒋国庆, 陈万华, 马斌, 等. 高温环境下含典型凹坑缺陷蜂窝夹芯板特征值屈曲性能[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(14): 5797-5803.
JIANG G Q, CHEN W H, MA B, et al. Eigenvalue Buckling Performance Analysis of Honeycomb Sandwich Panel with Typical Pit Defects in High Temperature Environment[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(14): 5797-5803.
- [17] 赵壮壮, 杨军, 刘刚, 等. 钢制金属I型夹芯板界面疲劳脱粘特性分析[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(2): 165-172.
ZHAO Z Z, YANG J, LIU G, et al. Analysis of Interface Fatigue Debonding Characteristics of Type-I Steel Sandwich Plate[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(2): 165-172.
- [18] 张曦. 泡沫铝夹芯板曲面的塑性成形与典型成形缺陷研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
ZHANG X. Study on Plastic Forming and Typical Forming Defects of Surface of foam Aluminum Sandwich Panel[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [19] HUA G J, SHEN Y, ZHAO D, et al. Experimental and Numerical Analysis of the Edge Effect for Corrugated and Honeycomb Fiberboard[J]. *Strength of Materials*, 2017, 49(1): 188-197.