纸木蜂窝板面外静态压缩有限元仿真分析

曹敏娜^a,杨国超^b,张求慧^b

(北京林业大学 a.木质材料科学与应用教育部重点实验室 b.木材科学与工程北京重点实验室,北京 100083)

摘要:目的 探究纸木蜂窝板的压溃模式和单个蜂窝单元的变形失效模式,为纸木蜂窝板内部失效机制 提供一定的理论基础。方法 通过有限元仿真模拟,分析面外静态压缩得到变形云图、应力-应变云图和 应力-应变曲线。结果 纸木蜂窝板的受压过程分为4个阶段,应力集中分布在蜂窝芯层,最外侧的蜂窝 最早出现变形且变形较大,随后中间区域的蜂窝逐步变形增大。蜂窝芯层在受压时存在至多1个应力峰, 蜂窝壁弯曲折叠了1~2次,产生了1~2个塑性铰,并在此过程中吸收能量。结论 纸木蜂窝板的压溃 失效趋势为由外侧蜂窝向内部蜂窝,由单层壁向双层壁,由最弱的压溃点向其余位置。

关键词:纸木蜂窝板;蜂窝芯层;面外静态压缩;有限元

中图分类号: TS653.8、O242.21 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)09-0199-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.024

Finite Element Simulation Analysis on Out of Plane Static Compression of Paper-wood Honeycomb Board

CAO Min-na^a, YANG Guo-chao^b, ZHANG Qiu-hui^b

 (a. Key Laboratory of Wood Material Science and Application, Ministry of Education b. Beijing Key Laboratory of Wood Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the collapse mode of paper-wood honeycomb boards and the deformation failure mode of a single honeycomb unit, so as to provide a theoretical basis for the internal failure mechanism of paper-wood honeycomb boards. Through finite element simulation, the out of plane static compression was analyzed and its deformation pattern, stress-strain pattern and stress-strain curve were obtained. The results showed that the compression process of paper-wood honeycomb boards was divided into four stages. The stress was concentrated in the honeycomb core layer. The outer most honeycomb deformed greatly first, and then the deformation of the middle honeycomb gradually increased. There was one or more stress peaks in the honeycomb core layer under compression. The honeycomb wall bent and folded for 1-2 times, generating 1-2 plastic hinges and absorbing energy in this process. In a word, the collapse failure trend of paper-wood honeycomb boards is from the outer honeycomb to the inner honeycomb, from the single wall to the double wall, and from the weakest collapse point to the rest.

KEY WORDS: paper-wood honeycomb board; honeycomb core layer; out of plane static compression; finite element

蜂窝夹层板是一种环境友好的仿生材料,多孔的 蜂窝结构使其具备比强度高、质量小、抗冲击性高、缓 冲隔振好等优点,目前已广泛应用在缓冲包装、运输和 家具领域^[1-3]。在运输传递过程中,蜂窝板会受到静载 荷、冲击振动等作用力,有限元仿真技术已经应用到蜂 窝板平面承载性能和缓冲振动的模拟分析中^[46]。

目前,国内外学者对蜂窝板的研究集中在蜂窝芯 层和面板为同质材料的分析,尤其集中在对蜂窝纸板

收稿日期: 2022-10-24

作者简介:曹敏娜(1998—),女,硕士生,主攻纸木蜂窝板有限元仿真分析。 通信作者:张求慧(1960—),女,博士,教授,研究方向主要为家具材料与包装材料。

和金属蜂窝板的力学性能研究和有限元分析,对关于 采用 2 种材料的复合蜂窝板的研究较为少见^[7-8]。将 纸蜂窝和木板2种基材制备成纸木蜂窝板,其力学性 能和抗弯性能要优于传统蜂窝纸板的,强重比又高于 普通板材的。已有学者对纸木蜂窝板进行了力学性能 研究,但有关有限元仿真的分析还未见报道。在纸木 蜂窝板的各项力学性能中,面外静态压缩机理复杂, 涉及到蜂窝芯层的局部失稳。由于测试手段的限制, 试验只能观察到最外侧的部分蜂窝壁的变形失效,无 法测得蜂窝芯层内部的应力、应变变化和单个蜂窝单元 的失效模式。基于此,本文以正六边形纸蜂窝作为芯层, 以三层杨木胶合板作为结构面板,提出一种纸木复合的 蜂窝板结构。应用试验和有限元分析相结合的方式分析 纸木蜂窝板的面外静态压缩过程,探究纸木蜂窝板的压 溃模式和蜂窝单元的变形失效模式,为纸木蜂窝板的平 面力学性能和后续应用提供理论基础。

1 纸木蜂窝板仿真模型及材料参数

1.1 几何结构

纸木蜂窝板的正六边形蜂窝芯层由瓦楞纸沿纵 向施胶黏接后拉伸制成,故蜂窝单元在厚度上会分为 单层壁厚和双层壁厚。规定蜂窝芯层拉伸成型前的长 度方向为纵方向,简称 l,对应空间坐标 x 方向;蜂 窝芯层的拉伸方向为横方向,简称w,对应空间坐标 v方向;蜂窝芯层的厚度方向为 d,对应空间坐标 z方向,如图1所示。除最外层蜂窝单元外壁外,所有 垂直于 w 方向的蜂窝单元壁均为双层壁厚。在 Solidworks 中对纸蜂窝芯层和胶合板面板分别建模, 采用自下而上的方式进行装配体组合,导入 Ansys Workbench 进行有限元仿真分析。由于瓦楞纸芯纸在 厚度方向上的尺寸远远小于其他2个方向,在压缩过 程中会产生失稳导致大变形。为确保仿真精度,蜂窝 芯层采用壳单元 Shell181 建模更为合理, 胶合板面板 采用实体单元 Solid186 建模。根据 GB/T 1453-2022 《夹层结构或芯子平压性能试验方法》^[9]中的规定, 蜂窝芯层尺寸为 60 mm×60 mm, 厚度为 15 mm。在 切割制样过程中为保证纸蜂窝尺寸符合国家标准,蜂 窝芯层在2个侧面会产生非封闭的蜂窝单元,在受力 后会更容易出现局部应力集中现象^[10]。为更好地等效 纸木蜂窝板受力情况,将两侧未封闭的蜂窝单元进行 还原建模,即纸木蜂窝板的4个侧面形状各不相同。 将纸蜂窝芯层全封闭的 2 个侧面记作I,未封闭的 2 个侧面记作II,纸木蜂窝板的模型如图2所示。

1.2 材料参数

纸木蜂窝板的面外静态压缩过程涉及材料非线性、 几何非线性和状态非线性,是一个复杂的非线性响应过 程,还存在压缩后的大变形和接触问题^[11]。采用双线性 正交各向异性弹塑性材料模型定义瓦楞原纸和胶合板



图 2 纸木蜂窝板模型 Fig.2 Model of paper-wood honeycomb board

的材料本构关系。纸蜂窝芯层由定量为 95.2 g/m²的高 强瓦楞纸制备,瓦楞原纸的厚度根据 GB/T 451.3—2002 《纸和纸板的厚度测定》[12]进行测定。由于瓦楞纸原纸 的材料特性,压缩试验难度极大,根据 GB/T 12914—2018《纸和纸板抗张强度的测定 恒速拉伸法 (20 mm/min)》^[13],通过万能力学试验机对瓦楞纸进 行拉伸试验,获得其力学参数。参考 Mann 等^[14]、Baum 等^[15]和 Persson 等^[16]的研究成果,根据经验公式(1) 获得其他参数。面外静态压缩方向为瓦楞纸的纵向,对 应材料参数中的x方向,试验过程中瓦楞纸在此方向发 生屈曲变形。瓦楞纸属于屈服现象不明显的材料,规定 屈服强度为材料产生 0.2%的应变时的应力值, 测得试 验数值为 2.28 MPa。瓦楞纸在厚度方向上的尺寸远远 小于其他 2 个方向的。泊松比 μ_{xy} 取 0.3, μ_{xz} 和 μ_{yz} 在计 算中通常取 0.01。按照 GB/T 17657—2013《人造板及 饰面人造板理化性能试验方法》177对胶合板的密度进行 测定,通过万能力学试验机进行抗压力学试验。根据 GB/T 1453—2022《夹层结构或芯子平压性能试验方法》 [9]对纸木蜂窝板进行面外静态压缩试验。最后获得的材 料参数如表1所示。

$$G_{xy} = 0.387 \sqrt{E_x E_y}$$

$$G_{xz} = \frac{E_x}{55}$$

$$G_{yz} = \frac{E_y}{35}$$

$$E_z = \frac{E_x}{200}$$
(1)

表 1 材料参数 Tab.1 Material parameters											
材料	厚度/mm	密度/(g·cm ⁻³)	E_x /MPa	E_y /MPa	E_z /MPa	G_{xy} /MPa	G_{yz}/MPa	$G_{xz}/{ m MPa}$	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}
胶合板	4.5	0.58	1 752	1 366	142	138	66	99	0.33	0.40	0.30
蜂窝芯纸	0.193	0.49	1 146	600	5.73	320.9	17.1	20.8	0.3	0.01	0.01

1.3 分析设定

将纸木蜂窝板上下面板和蜂窝芯层分别建立部 件,部件表示具有相同单元类型的单元集合,可实现 共享网格、节点耦合,每个部件可以单独配置材料属 性,自成一体。纸木蜂窝板的上下面板和蜂窝芯层是 黏接而成的, 在试验过程中未发生脱胶现象, 在有限 元分析的接触定义中选择绑定约束,以便在仿真模拟 过程中实现整体效应,不发生分离。部件内部已默认 接触无须再重复设置,只需对部件间设置绑定接触, 即将蜂窝芯层上表面的所有边与上面板的下表面进 行绑定,将蜂窝芯层下表面的所有边与下面板的上表 面进行绑定。网格划分精度对仿真模拟结果会产生较 大影响, 高质量的网格有更好的边界网格形态, 能够 获取更精确的解。对胶合板面板采用 Hex 六面体网 格划分,对纸蜂窝芯层采用 Qaud 四边形网格划分。 划分后单元质量高达 0.999 6, 共计 82 903 个节点、 20460个单元。

对纸木蜂窝板施加 z 方向的位移载荷,在求解结 果中分别提取支反力与 z 方向定向变形值随时间变化 的曲线,转化整合成仿真的应力--应变曲线。为了更 好地对比试验与仿真结果,本文挑选一组试验的应力 -应变曲线与仿真曲线进行对比,结果见图 3。试验 获得的平压强度均值为 0.153 MPa,有限元模拟值为 0.143 MPa,数值非常接近,如表 2 所示。仿真曲线 相比试验曲线更平滑,尤其是在平台阶段,这主要是 由于实际试验时蜂窝芯层在坍塌堆叠后可能会与周 边蜂窝接触,蜂窝间存在支撑作用,让已经到达平台 阶段的蜂窝,仍有可能产生应力的二次上升。总的来 看,仿真结果与试验结果呈现高度一致性,验证了有 限元仿真的准确性。

2 结果与分析

2.1 整体变形

纸木蜂窝板整体压缩变形过程和应力云图如图 4 所示。从应力分布可以清晰看到,应力集中分布在蜂 窝芯层,面板受到的应力远远小于纸蜂窝芯层的应 力。变形失效破坏的位置发生在纸蜂窝芯层部位,面 板的变形值很小,这也与试验结果相符合。在一定范 围内,纸木蜂窝板的承载能力主要由芯层决定,面板 的强度对蜂窝板性能影响不大^[18]。



图 3 纸木蜂窝板试验与仿真的应力-应变曲线 Fig.3 Test and simulation stress-strain curve of paper-wood honeycomb board

表 2 纸木蜂窝板试验与仿真的平压强度 Tab.2 Test and simulation flatwise compression properties of paper-wood honeycomb board

试样	σ $_{_{{\mathbb Y}{\mathbb H}}}/{ m MPa}$
1	0.155
2	0.142
3	0.156
4	0.165
5	0.149
试验值	0.153
模拟值	0.143

纸木蜂窝板的静态压缩过程可以分成 4 个阶段。 第 1 阶段是弹性阶段,这个阶段分为 2 个部分:在 压缩初期,蜂窝壁在轴向发生弹性变形,此时应力 随应变线性增加;若继续加载超过弹性极限后,就 变成非线性的弹性变形,直至达到蜂窝芯层的临界 最大屈曲载荷,试件发生破坏。第 2 阶段是弹塑性 屈曲阶段,应力随应变的增加而减少,此时由弹性 变形导致的局部坍塌转变为以塑性铰为特征的屈 曲;屈曲首先发生在单层壁上,随后发生在双层壁 上。第 3 阶段是塑性坍塌阶段,应变持续增加,应 力基本保持不变,呈现出近似平台的区域,平台的 宽度代表了蜂窝板缓冲吸能的能力。此阶段表现为 以蜂窝壁塑性坍塌为主的持续压溃过程,压溃载荷 随应变的增加呈现一定的上下波动,直至完全被压 塌。第 4 阶段是密实化阶段,蜂窝壁充分坍塌变形 发生接触,直至蜂窝芯层完全被压实,此时微小应 变将引起应力急剧增大^[19]。纸木蜂窝板的压缩过程 以蜂窝芯层单层壁的失稳为开始,以双层壁达到最 大承载力发生破坏为结束。

为更清楚地了解纸蜂窝芯层的压溃过程,将上 下面板进行隐藏,观察蜂窝芯层在持续载荷作用下 的应力云图。如图 5 所示,蜂窝芯层的变形不同步, 呈现一定的先后顺序。从总体来看,应力集中最早 出现在最外侧的蜂窝单层壁的中心区域,而后逐渐 向中间区域的蜂窝单元扩展,外侧相对自由的蜂窝 单层壁应力较大。有限元模拟的变形过程与试验图 相对应,可见试验过程中蜂窝芯层最外侧首先发生 变形, 尤其是 4 个角落的处的蜂窝变形明显。这是 由于最外侧存在未封闭的单层壁蜂窝,其抗压能力 要弱于全封闭的蜂窝,也弱于双层壁的蜂窝,因此 首先出现应力集中和大变形。随着位移载荷的增大, 中间区域的单层壁蜂窝也发生较大的变形, 主要载 荷由中间区域的双层壁蜂窝承担,出现大应力,最 终全部蜂窝都被屈服压溃[20]。对应试验图同样可以 看到变形逐步由最外侧向中心处的蜂窝移动,随着 位移载荷的持续增大,中间区域蜂窝变形值也逐步 增加。对每个独立的蜂窝单元而言,应力集中最早 出现在蜂窝的上下节点连线的中心区域,随着位移 载荷的增加先沿着竖直方向由中心区域向上下节点 扩展;然后在水平方向上由各节点和节点连线向周 围扩展,直至全部被压溃变形。对于单个独立的蜂 窝的变形,实际试验不能达到有限元模拟的理想状 态,其屈服并非一定发生在蜂窝上下节点连线的中 心区域,也有可能在蜂窝芯层最上端或最下端首先 发生屈服变形。试验过程中屈服压溃顺序取决于对 应区域压溃点的强弱,最弱的压溃点所在区域首先 被压溃。

2.2 单个蜂窝变形

为进一步探究受压时处于不同位置的单个蜂窝 单元在直立壁高度方向上的变形情况,分别在纸蜂窝 芯层的中心蜂窝上取一条平行 z 轴的路径,4 个侧面 L₁、L₁₁、W₁、W₁的蜂窝上同样各取一条平行 z 轴的同 名路径。路径方向由节点1 指向节点2,节点1代表 起始位置0,分析5条异面路径的等效应力和应变的 分布情况。其中等效总应变是包括弹性应变和塑性应 变在内的应变总和。

如图 6 所示,单个蜂窝单元的受压变形主要表 现为在近似节点 1 和节点 2 的连线中心处对称面发 生弯曲、局部的变形折叠。根据 Wierzbicki^[21]的研究 表明,蜂窝壁每弯曲折叠一次都会产生一个塑性铰, 按照波长 λ 进行渐进折叠,而波长约等于蜂窝单元边 长。因此蜂窝单元高度越大,边长越小,产生的塑 性铰会越多,能量吸收就越多。本研究中纸蜂窝芯 层的蜂窝单元边长为 6 mm,故在压缩过程中将按照 λ=6 mm 进行渐进折叠,蜂窝单元高度为 15 mm,蜂 窝芯层将折叠 1~2次,如图 6 可见蜂窝壁产生了 1~ 2 个塑性铰。外侧的封闭蜂窝单元折叠弯曲对称度更 高,发生折叠的区域相对小而集中;外侧的未封闭



图 4 纸木蜂窝板静态压缩过程 Fig.4 Static compression process of paper-wood honeycomb board



图 5 纸蜂窝静态压缩过程 Fig.5 Static compression process of paper honeycomb

蜂窝单元弯曲扭曲度更高,发生折叠的区域更大, 并呈现出一定的非对称性,这可能与较弱的承载能 力所导致的应力分布不均有关;处在中心区域的蜂 窝单元虽承受较大应力,但整体变形较小,未见其 在高度方向发生弯曲折叠。外侧的蜂窝壁比中心处 的蜂窝壁有更大的变形,首先发生弯曲失效,这也 与试验结果相匹配。

图 7 为 5 条路径由节点 1 至节点 2 的应力和应变 曲线,处在封闭蜂窝单元的路径 l_i和 w_i分别在靠近上下 面板 6 mm 左右的位置,即在距离为 6 mm 和 9 mm 处 产生了应力峰值,这与上文提及的塑性铰产生的位置 对应。应力峰处对应的位置代表可能压溃的点,虽然 在 7.5 mm 处,即 1/2 处的应力较小,但由于塑性铰的存在,在此产生了最大变形和应变。未封闭的蜂窝单元/n和wn在靠近上下面板的位置和 1/2 处均产生了应力峰,这些均为可能的压溃点。压溃点并非同时被压溃,往往是较弱的首先被压溃,然后逐步向其他的压溃点扩展^[15]。由应变曲线可见,未封闭的蜂窝单元也在约 1/2 处压溃点发生了大变形,可见 1/2 处的压溃点相对较弱。处在中心处的蜂窝单元的压溃点更多,应力–应变分布更为均匀。处在外侧的封闭的蜂窝单元可承受的应力峰值最大,约为外侧未封闭的蜂窝单元可承受应力的 2 倍,中心的蜂窝单元应力承受能力次之。



图 6 单个蜂窝的应力应变云图 Fig.6 Stress-strain pattern of single honeycomb



图 7 单个蜂窝的应力-应变曲线 Fig.7 Stress-strain curves of single honeycomb

3 结语

通过试验测试和有限元仿真模拟,研究了纸木蜂 窝板在面外静态压缩下的整体压溃机制和单个蜂窝 单元的变形失效模式。纸木蜂窝板的受压过程分为4 个阶段,应力集中分布在蜂窝芯层,面板受到的应力 很小,承载能力主要由蜂窝芯层决定。蜂窝芯层的变 形最早出现在最外侧的蜂窝,随着位移载荷的增大中 间区域的蜂窝变形逐步增大,直至全部蜂窝屈服压 溃。处在外侧的蜂窝相比于中心的蜂窝会发生更大的 变形,蜂窝在受压时会按照波长约等于蜂窝单元边长 进行渐进折叠,每折叠一次产生一个塑性铰,在此过 程中吸收能量。压缩过程中蜂窝壁存在1到多个应力 峰,这些应力峰代表着可能的压溃点,较弱的首先被 压溃, 文中多为 1/2 处的压溃点首先被压溃, 然后逐 步向其他的压溃点扩展。综上,纸木蜂窝板的压溃失 效规律总的趋势为由外侧向内部,由单层壁向双层 壁,由最弱的压溃点向其余位置。本文探究了蜂窝芯 层内部的应力--应变和单个蜂窝的失效模式,为纸木 蜂窝板的平压性能探究和后续应用提供一定的理论 和技术支持。

参考文献:

- OZEN I, AVA K, GEDIKLI H, et al. Low-energy Impact Response of Composite Sandwich Panels with Thermoplastic Honeycomb and Reen-Trant Cores[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 156: 106-989.
- [2] ZHANG Xiao-ming, XIE Juan, CHEN Jin-xiang, et al. The Beetle Elytron Plate: A Lightweight, High-Strength and Buffering Functional-Structural Bionic Material[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 4440.
- [3] 王强,王宁,王铃伟,等. 轻质蜂窝形仿生材料在家 具设计中的应用与发展研究[J]. 家具与室内装饰, 2020(10): 82-84.
 WANG Qiang, WANG Ning, WANG Ling-wei, et al. Study on Application and Development of Lightweight Honeycomb Bionic Materials in Furniture Design[J].
- Furniture & Interior Design, 2020(10): 82-84.
 [4] 李娜, 尤青文. 蜂窝夹层复合材料小质量冲击接触力的分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5558-5565.
 LI Na, YOU Qing-wen. Analysis on Contact Force of Small-Mass-Impact on Honeycomb Sandwich Composites[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5558-5565.
- [5] 杨震,李赐生. 实木家具包装箱的设计与探讨[J]. 家 具与室内装饰, 2018(12): 110-111.
 YANG Zhen, LI Ci-sheng. Design and Discussion of

Solid Wood Furniture Packaging Cases[J]. Furniture & Interior Design, 2018(12): 110-111.

- [6] 杨稳,张胜兰,李莹.蜂窝夹层结构等效模型研究进展[J].复合材料科学与工程,2020(10): 122-128.
 YANG Wen, ZHANG Sheng-lan, LI Ying. Research Progress of Equivalent Model of Honeycomb Sandwich Structure[J]. Composites Science and Engineering, 2020(10): 122-128.
- [7] 王宏磊. 蜂窝夹芯复合材料的力学性能研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2019: 1-3.
 Wang Hong-lei. Mechanical Properties of Honeycomb Sandwich Composites[D]. Jilin: Jilin University, 2019: 1-3.
- [8] 杨雨恒,张周锁,史文博,等. 铝蜂窝夹层板动力学 建模仿真与试验验证[J]. 机械设计, 2021, 38(8): 9-16. YANG Yu-heng, ZHANG Zhou-suo, SHI Wen-bo, et al. Dynamic Modeling Simulation and Experimental Verification of the Aluminum Honeycomb Sandwich Panel[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(8): 9-16.
- [9] GB/T 1453—2022, 夹层结构或芯子平压性能试验方法[S].
 GB/T 1453—2022, Test Method for Flatwise Compression Properties of Sandwich Constructions or Cores[S].
- [10] 潘凤丽,李光. 基于 Ansys Workbench 的塑料蜂窝板 仿真分析及优化[J]. 包装工程, 2016, 37(23): 44-49.
 PAN Feng-li, LI Guang. Ansys Workbench-Based Simulation Analysis and Optimization of Plastic Perforated Board[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 44-49.
- [11] 汤金若,朱瑾,于江祥.曲面蜂窝板的弯曲特性仿真 分析研究[J].现代防御技术,2016,44(5):186-193.
 TANG Jin-ruo, ZHU Jin, YU Jiang-xiang. Simulations on Buckling Characteristics of Curving Honeycomb[J].
 Modern Defense Technology, 2016, 44(5): 186-193.
- [12] GB/T 451.3—2002, 纸和纸板的厚度测定[S].
 GB/T 451.3—2002, Paper and Board-Determination of Thickness[S].
- [13] GB/T 12914—2018, 纸和纸板抗张强度的测定 恒速 拉伸法(20 mm/min)[S].
 GB/T 12914—2008, Paper and Board-Determination of Tensile Properties-Constant Rate of Elongation Method(20 mm/min)[S].
- [14] MANN R W, BAUM G A, HABEGER C C, et al. Determination of All Nine Orthotropic Elastic Constants for Machine-made Paper[J]. Appleton Wisconsin the Institute, 1980, 63(2): 163-166.
- [15] BAUM G A, BRENNAN D C, HABEGER C C. Orthotropic Elastic-constants of Paper[J]. Tappi Journal, 1981, 64(8): 97-101.
- [16] PERSSON K. Material Model for Paper: Experimental and

Theoretical Aspects[D]. Lund: Lund University, 1991.

[17] GB/T 17657—2013, 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S].

GB/T 17657—2013, Test Methods of Evaluating the Properties of Wood-based Panels and Surface Decorated Wood-based Panels[S].

- [18] 李厚民. 蜂窝纸板受压时的有限元分析[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 34-36.
 LI Hou-min. FEM Analysis of the Compression Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 34-36.
- [19] 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 Yue-ling, WANG Jun, LU Li-xin, 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.

- [20] 李杨, 贲小军, 袁建东, 等. 热塑性蜂窝板的平压性能分析[J]. 包装学报, 2022, 14(2): 93-97.
 LI Yang, BEN Xiao-jun, YUAN Jian-dong, et al. Analysis of Flat Compression Performance of Thermoplastic Honeycomb Panel[J]. Packaging Journal, 2022, 14(2): 93-97.
- [21] WIERZBICKI T. Crushing Analysis of Metal Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 1983, 1(2): 157-174.

责任编辑:曾钰婵