

基于 ANSYS 瓦楞纸板等效力学性能研究

彭子腾¹, 郝天照¹, 王瑞², 姜洋³, 张鹏^{1*}

(1.大连工业大学, 辽宁 大连 116000; 2.惠州亿纬锂能股份有限公司, 广东 惠州 516000;
3.大连交通大学, 辽宁 大连 116028)

摘要: **目的** 为提升瓦楞纸板压缩性能仿真效率, 采用有限元方法替代试验测试, 以节省时间与成本, 减少环境污染, 促进可持续发展, 为瓦楞纸箱的优化设计提供决策依据。**方法** 从箱板纸和瓦楞原纸性能出发, 对瓦楞纸板的最小单元进行 1:1 建模分析, 通过 ANSYS 对瓦楞纸板压缩性能进行仿真求解并对结果进行分析, 找到一种瓦楞纸板力学性能的等效方法。利用瓦楞纸板的等效力学性能对瓦楞纸板模型进行一定程度的简化, 以达到在保证一定求解精度的情况下, 提高求解速度的目的。**结果** 箱板纸和瓦楞原纸的力学性能可用双线性等向强化模型等效; 瓦楞纸板压缩过程分为 4 个阶段: 弹性、屈服、平台、密实化。通过 ANSYS Workbench 的 Static Structure 模块进行仿真, 与试验结果对比, 仿真能有效预测其压缩性能。简化瓦楞纸板为均质长方体后, 仿真结果显示, 简化模型平压有限元分析求解时间减少 13%~60%, 内存减少 37%~62%, 且模型尺寸越大, 减少得越多。**结论** 使用该方法对瓦楞纸板的压缩性能进行仿真, 解决了以往通过反复试验来优化包装设计的弊端, 能节约时间, 降低瓦楞纸板的生产成本和减少环境污染, 实现可持续发展。

关键词: 瓦楞纸板; 平压试验; 有限元分析; 简化模型; 等效力学

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)21-0192-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.026

Finite Element Analysis of Corrugated Cardboard and Its Simplified Model Based on ANSYS

PENG Ziteng¹, HAO Tianzhao¹, WANG Rui², JIANG Yang³, ZHANG Peng^{1*}

(1. Dalian Polytechnic University, Liaoning Dalian 116000, China; 2. EVE Energy Co., Ltd., Guangdong Huizhou 516000, China; 3. Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the efficiency of simulating corrugated cardboard and consequently replace experimental testing with finite element methods, so as to save time and cost, reduce environmental pollution, and thus promote sustainable development and provide decision-making basis for the optimization design of corrugated cardboard boxes. Starting from the mechanical properties of linerboard and corrugated medium, the minimum unit of corrugated cardboard was modeled at a 1:1 for analysis. Compression performance of corrugated cardboard was simulated and solved using ANSYS, and the results were analyzed to find an equivalent method for the mechanical properties of corrugated cardboard. By utilizing the equivalent mechanical properties of corrugated cardboard, the model of corrugated cardboard was simplified to some extent to improve the solving speed while ensuring a certain level of accuracy. The mechanical properties of linerboard and corrugated medium could be equivalent using a bilinear isotropic

收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目 (J2019020)

*通信作者

hardening model. The compression process of corrugated cardboard was divided into four stages: elastic, yielding, plateau, and densification. Simulation was carried out using the Static Structure module of the ANSYS Workbench. Compared with experimental results, the simulation could effectively predict its compression performance. After simplifying corrugated cardboard to a homogeneous rectangular prism, simulation results showed that the simplified model reduced the solving time of flat pressing finite element analysis by 13% to 60%, and reduced the memory usage by 37% to 62%, with greater reductions for larger model sizes. Using this method to simulate the compression performance of corrugated cardboard solves the drawbacks of optimizing packaging design through repeated experiments in the past. It saves time, reduces production costs, and environmental pollution of corrugated cardboard, and achieves sustainable development.

KEY WORDS: corrugated cardboard; flat pressing test; finite element analysis; simplified model; equivalent mechanics

瓦楞纸板应用于包装领域时,往往需通过反复试验来验证包装设计的合理性,此过程耗费时间,生产成本高^[1]。这是由于瓦楞纸板作为包装材料虽能有效保护内装物,但在瓦楞纸板材料制作托盘、缓冲垫等领域仍存在很多经验因素^[2]。通过计算机模拟的方式来预测瓦楞纸板的特性和性能,包括承重能力、变形程度、抗压强度等,可在包装设计和制造的过程中优化瓦楞纸板的结构和工艺,提高其使用寿命和效益^[3],同时节约时间,降低瓦楞纸板的生产成本和减少环境污染,实现可持续发展。为响应国家绿色包装、减少碳排放等政策,满足包装轻量化设计的需要^[4],对瓦楞纸板的力学性能进行仿真具有重要的现实意义。

瓦楞纸箱在包装行业中应用广泛,压缩强度和蠕变性能是评估其质量和可靠性的重要指标。McKee 等^[5]提出了瓦楞纸箱的压缩强度公式,该公式为瓦楞纸箱设计提供了重要的理论支持,并在实际生产中得到了验证和广泛使用。徐朝阳和徐奕超^[6]研究了瓦楞楞型对瓦楞纸箱蠕变性能的影响,发现楞型设计对纸箱的长期性能具有显著影响。他们的研究表明,不同楞型在承受长期负荷时表现出不同的变形行为,这对于优化瓦楞纸箱的设计具有重要意义。Fadji 等^[7]通过数值模拟和实验验证,研究了通风瓦楞纸箱的压缩强度,并探讨了通风口几何设计的影响。他们的研究为改善瓦楞纸箱通风设计提供了新的思路,同时也验证了数值模拟在瓦楞纸箱设计中的可行性和有效性。Luong 等^[8]使用有限元仿真技术,研究了瓦楞纸箱在冲击动态条件下的强度表现,他们的研究为瓦楞纸箱在复杂载荷条件下的性能评估提供了新的方法和数据支持。Minh^[9]采用均匀化方法,对双层瓦楞纸板在横向载荷下的行为进行了建模和数值模拟。这一研究揭示了复杂结构瓦楞纸板在横向载荷下的力学特性,为瓦楞纸板的设计和优化提供了新的视角。Biancolini^[10]则评估了瓦楞纸板的等效刚度特性,为瓦楞纸板的力学性能研究提供了基础数据。这一研究对于理解瓦楞纸板在不同载荷条件下的表现具有重要参考价值。

以上研究从不同角度对瓦楞纸箱的压缩强度和蠕变性能进行了深入探讨,涵盖理论分析、数值模拟和实验验证等多个方面,为瓦楞纸箱的设计和应用提供了有力的科学依据。

本文对瓦楞纸板发挥缓冲作用的厚度方向的压缩性能进行研究。考虑瓦楞纸板在实际生产生活中的应用,3层瓦楞纸板和5层瓦楞纸板的使用量比较大^[11]。通过对工厂使用最多的2种3层瓦楞纸板和2种5层瓦楞纸板的等效力学性能的研究,对瓦楞纸板有限元模型进行简化,对其力学性能做出快速准确的预测,为瓦楞纸板产品设计提供决策依据。通过对其等效力学性能进行计算和仿真,解决以往方法中计算量大、耗时长的问题,并期待可将这种方法广泛应用于瓦楞纸板的包装设计领域,代替通过反复试验来优化设计的方法,为轻量化设计、结构优化提供决策依据,节约时间,降低瓦楞纸板的生产成本和减少环境污染,实现可持续发展。

1 瓦楞纸板平压试验

1.1 试验材料

从企业提供的纸板中选出最常用的2种3层瓦楞纸板、2种5层瓦楞纸板以及组成这些瓦楞纸板的箱板纸和瓦楞原纸进行测试。试验所用材料及其对应的编号如表1所示。

表 1 瓦楞纸板的组成
Tab.1 Composition of corrugated board

材料编号	纸板组成
602	F110/F110(B)/L130
641	L130/F90(C)/L130
955	L200/F160(C)/F110/F140(B)/L250
965	L130/F110(C)/F110/F110(B)/F160

其中 F90、F110、F140、F160 为瓦楞原纸, L130、L200、L250 为箱板纸。

1.2 试验方案

瓦楞纸板平压试验采用微机控制电子万能试验机配合压缩附件进行,如图1所示。设备最大载荷为5 kN,上下压板为直径100 mm的圆柱形钢板,压缩速率设置为12.5 mm/min。



图1 瓦楞纸板平压试验图
Fig.1 Flat pressing test diagram for corrugated board

对4种瓦楞纸板进行取样,根据国家标准GB/T 22874—2008《单面和单瓦楞纸板平压强度的测定》^[12]在瓦楞纸板上取15个样品,得出最少10个有效数据,所取样品尺寸为64.5 cm²的圆形瓦楞纸板,根据GB/T 10739—2023《纸、纸板和纸浆试样处理和试

验的标准大气条件》,将试样放入温度为(23±1) °C,相对湿度为50%±2%的恒温恒湿箱中处理24 h以上。试验过程按照国家标准GB/T 22874—2008进行。

1.3 试验结果

将处理得到602、641、955以及965的平压试验的应力-应变数据记录并画图,如图2所示。

2 瓦楞纸板平压性能的有限元分析

2.1 平压试验有限元分析模型

建模软件采用Solidworks。瓦楞纸板的几何模型以602、955纸板为例,如图3、图4所示。

2.2 确定材料参数

ANSYS Workbench的Engineering Data材料库中并没有瓦楞纸板的相关参数,因此需通过外部设定自行定义材料参数。由于瓦楞原纸属于典型的非线性材料,其变形有弹塑性特点,属于大应变型。采用双线性等向强化模型,需要定义的参数有:密度、弹性模量、屈服强度、切线模量、泊松比。按照国家标准GB/T 22811—2008《瓦楞纸板分离后组成原纸定量的测定》^[13]对箱板纸和瓦楞原纸进行定量测定,并计算得出所需瓦楞纸板的相对密度。之后通过拉伸实验确定所需瓦楞纸板的弹性模量、屈服强度、切线模量、泊松比。瓦楞原纸材料参数如表2所示。

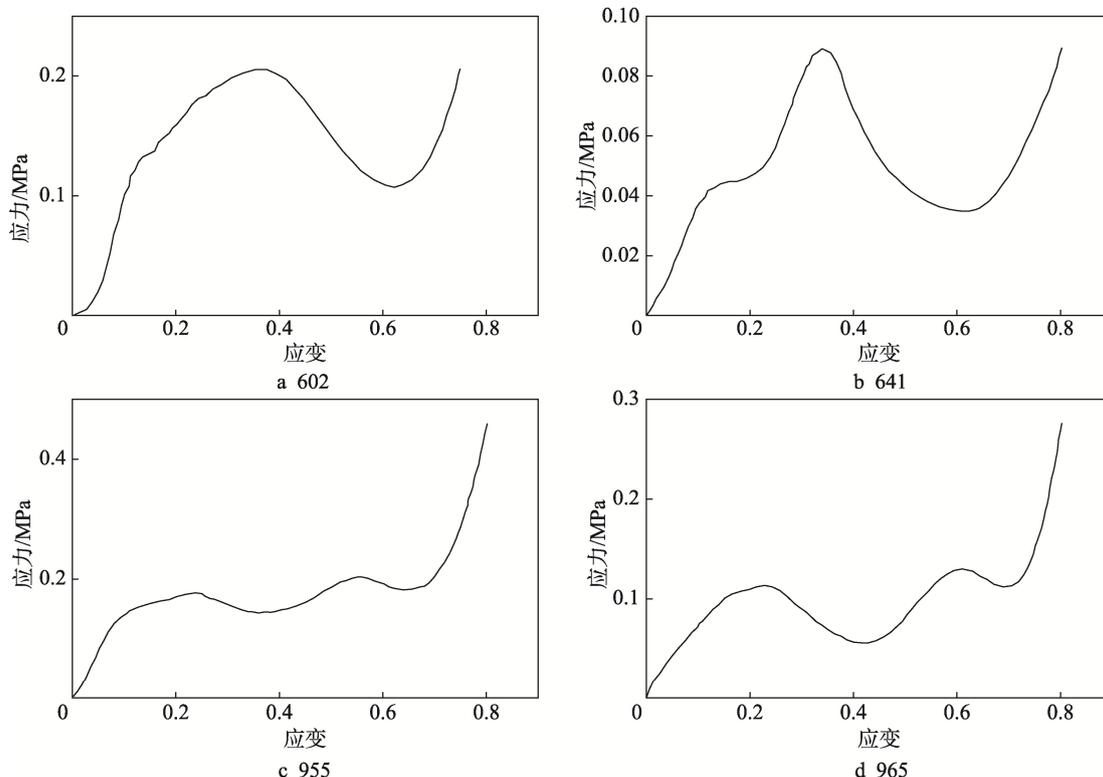


图2 瓦楞纸板平压试验应力-应变曲线
Fig.2 Flat pressing test stress-strain curve of corrugated board

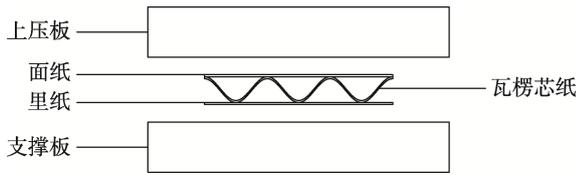


图 3 602 平压模型线框图

Fig.3 Wireframe diagram of 602 flat pressing model

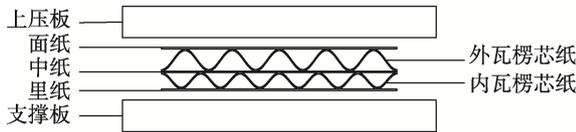


图 4 955 平压模型线框图

Fig.4 Wireframe diagram of 955 flat pressing model

表 2 瓦楞原纸的材料参数

Tab.2 Material parameters of corrugated medium

原纸 编号	弹性 模量/MPa	泊松比 μ	屈服 强度/MPa	切线 模量/MPa	相对密度/ ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$)
F90	2 193.84	0.34	14.48	980	6.21×10^{-7}
F110	2 044.68	0.34	11.36	856	5.55×10^{-7}
L130	2 395.33	0.34	13.02	1 129.29	6.63×10^{-7}
F140	1 941.26	0.34	13.08	954.67	5.68×10^{-7}
F160	2 020.03	0.34	11.36	889.86	6.13×10^{-7}
L200	2 613.58	0.34	14.41	1 066.53	6.90×10^{-7}
L250	2 543.17	0.34	18.77	1 030.98	8.30×10^{-7}

2.3 约束及求解设置

根据瓦楞纸板平压试验, 上下刚体与瓦楞纸板的接触设置为摩擦接触, 摩擦因数设定为 0.3, 内部各层间为绑定接触。刚体支撑板被固定, 不许移动; 刚体压块则限定仅能沿厚度方向向下移动, 压块位移量设定为 2.3 mm, 对应时间为 11.5 s。为模拟真实静态压缩情景, 上方设置了以 12 mm/min 速度向下移动的刚体压板, 下方配以固定支撑板。对瓦楞纸板平压有限元模型施加的载荷及约束设置如图 5 所示。

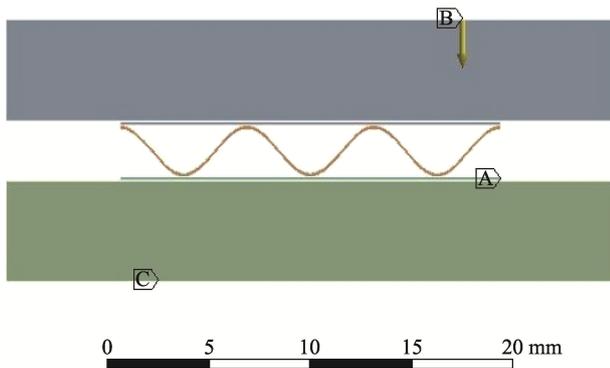


图 5 平压有限元模型载荷设定

Fig.5 Load setting of flat pressing finite element model

2.4 仿真结果及其分析

通过计算将输出的等效应力 σ_{FE} 数据转化为纸板的应力 σ 数据, 而应变 ε 则根据之前设定的压板运动的速度以及应力对应的时间来求得。求解后得到各瓦楞纸板平压有限元模型的应力云图如图 6~9 所示。

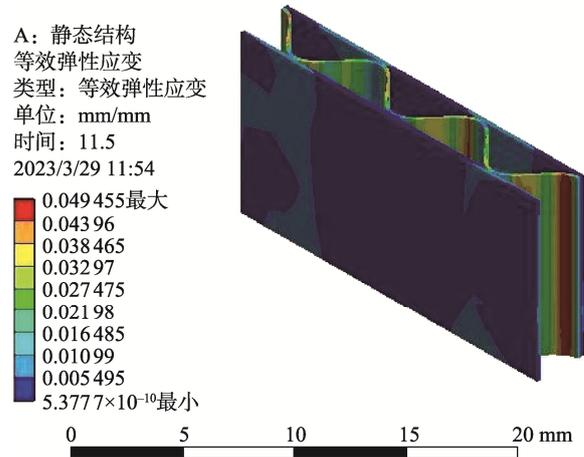


图 6 602 平压有限元应力云图

Fig.6 Stress pattern of 602 flat pressure finite element

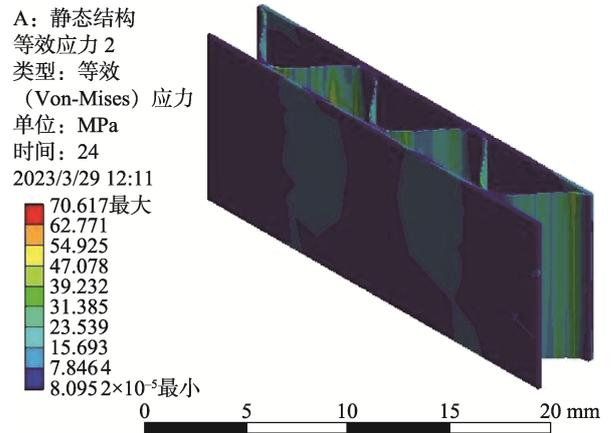


图 7 641 平压有限元应力云图

Fig.7 Stress pattern of 641 flat pressure finite element

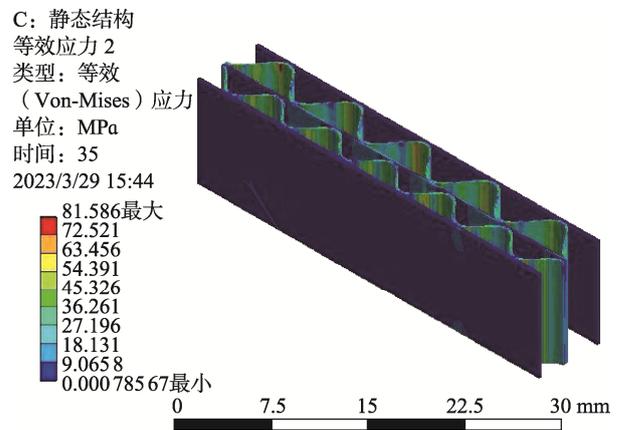


图 8 955 平压有限元应力云图

Fig.8 Stress pattern of 955 flat pressure finite element

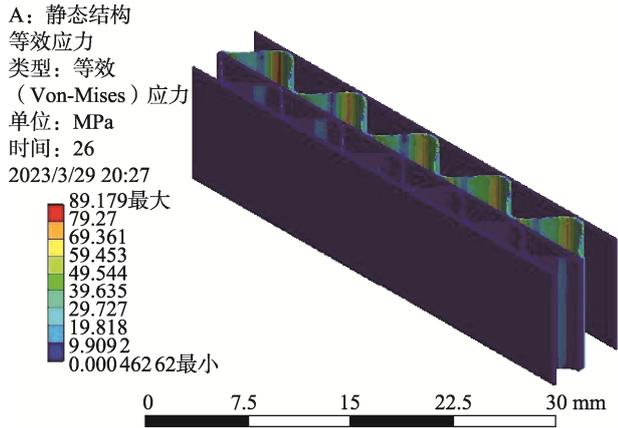


图9 965平压有限元应力云图

Fig.9 Stress pattern of 965 flat pressure finite element

从图6~9中可以得出,在对瓦楞纸板进行平压试验时,瓦楞部分发挥了绝大部分支撑作用。对输出时间-等效应力数据进行处理后得到瓦楞纸板压缩的应力-应变曲线。瓦楞纸板平压有限元模型的网格数、求解时间以及求解使用的MAPDL内存资源如表3所示。

对瓦楞纸板平压仿真得出的时间 t 和等效应力 σ_{FE} 数据进行处理,得出对应瓦楞纸板模型的应力-应变数据。

应变:

$$\varepsilon = t \times \left(\frac{x_i}{t_i} \right) \quad (1)$$

应力:

$$\sigma = \sigma_{FE} \times \frac{S_{压板}}{S_{纸板}} \quad (2)$$

其中, $S_{压板}$ 表示与纸板接触的压板面的面积, $S_{纸板}$ 表示与压板接触的纸板面的面积, 单位均为 mm^2 。

表3 平压有限元模型的网格数量和求解时间
 Tab.3 Number of meshes and solving time of flat pressing finite element model

纸板编号	单元数量	节点数量	翘曲系数	求解时间/s	MAPDL内存/M
602	1 627	9 455	4.36×10^{-5}	163	316
641	1 410	8 315	3.71×10^{-9}	236	311
955	4 787	33 488	1.77×10^{-4}	836	682
965	3 717	24 469	5.34×10^{-5}	838	669

根据式(1)~(2)对数据进行处理,得出瓦楞纸板模型的应力-应变数据,与平压试验的结果对比,如图10所示。

通过与瓦楞纸板的平压试验数据进行对比发现,仿真结果与试验数据较吻合,数据相关性较好。证明了该模型的有效性,且ANSYS对于瓦楞纸板的平压仿真有较好的效果。

但从表3可以得出,由于瓦楞纸板模型复杂程度高,求解速度慢,求解占用的内存资源多,对计算机的配置要求较高。因此,要想快速准确地对其平压性能进行仿真,必须对模型进行合理的简化。

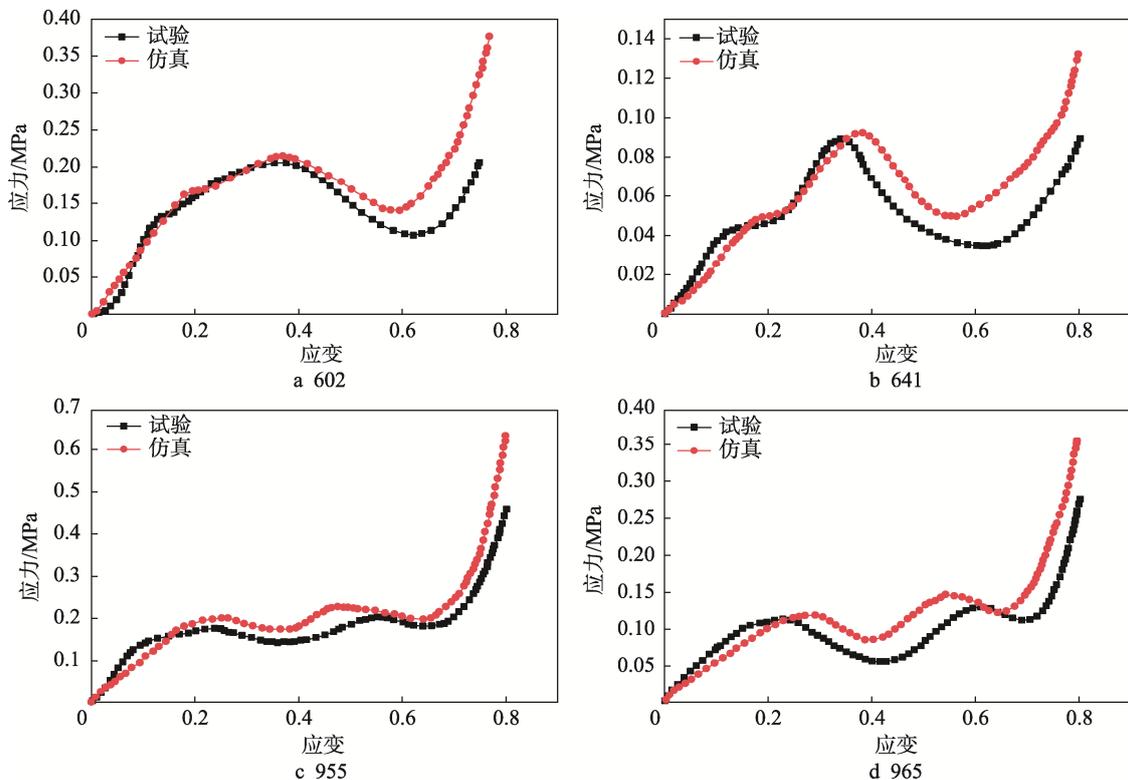


图10 瓦楞纸板平压仿真与试验数据的对比

Fig.10 Comparison of flat pressing simulation and experimental data of corrugated board

3 基于 ANSYS 的有限元模型简化

3.1 瓦楞纸板模型简化

本文将瓦楞纸板的整体性能通过多线性等向强化模型进行近似, 因此可忽略瓦楞纸板的结构细节, 将瓦楞纸板简化为一个长方体^[14]。厚度设定为瓦楞纸板的实际厚度, 长宽与 1:1 模型相同, 上下压板也与 1:1 仿真模型尺寸相同, 得到简化后的瓦楞纸板平压模型, 以 602 模型为例, 如图 11 所示。

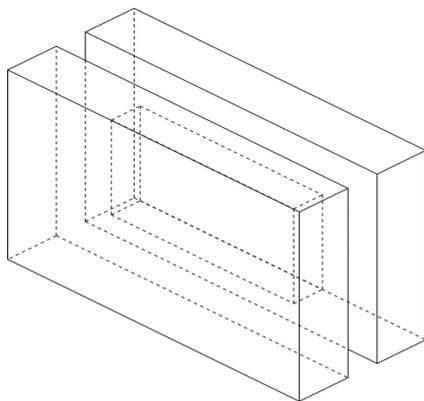


图 11 602 平压有限元简化模型
Fig.11 Simplified finite element model for 602 flat pressing

3.2 瓦楞纸板平压简化有限元仿真

对于平压性能, 3 层瓦楞纸板与 5 层瓦楞纸板 2 种类型瓦楞纸板的区别表现在平台阶段, 3 层瓦楞纸板的应力-应变曲线在平台阶段表现出 1 个明显的峰值, 而 5 层瓦楞纸板在平台阶段表现出 2 个明显的峰值。对于这种情况, 本文根据规律将瓦楞纸板整体平压性能采用多线性等向强化模型进行近似。多线性等向强化模型适用于进行大应变模型的仿真^[15]。通过输入多个应力点对应的应变值来确定整条应力-应变曲线, 其中第一点必须是屈服点。多线性等向强化模型必须与弹性模型配合使用, 且输入的应力应变数

据必须是单向增加的。

3.2.1 等效材料性能求解及设定

根据仿真数据的规律, 多线性等向强化模型的特点以及参数要求, 通过反复实验验证, 要想更好地模拟瓦楞纸板的整体性能, 需确定 A、B、C、D、E 共 5 个点, A 点为原点, B 点为第 1 个峰值处, C 点为第 2 个峰值处, E 点处应变为 0.75, D 点为 C、E 之间最低点横坐标在 CE 连线上的对应的点, 根据经验认为 E 点处瓦楞纸板已达到密实化阶段, 应力呈现指数级上升, 这里统一设定为 100 MPa。以 602 纸板为例, A(0, 0)、B(0.192 16, 0.166 52)、C(0.368 31, 0.214 85)、D(0.592 5, 0.278 1)、E(0.736 62, 100) 位置如图 12 所示。

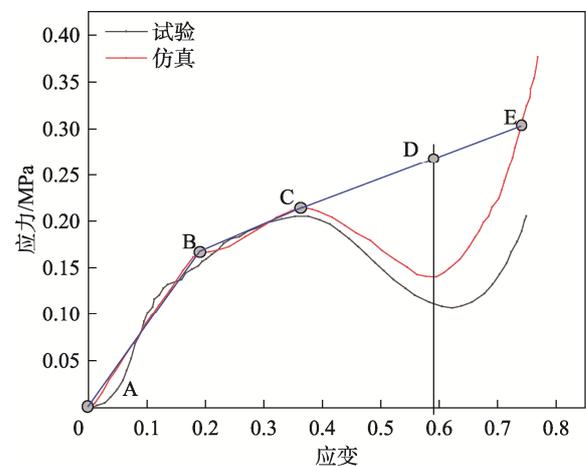


图 12 602 纸板对应的 A、B、C、D、E 的位置
Fig.12 602 positions of A, B, C, D and E corresponding to the cardboard

多线性等向强化模型所需参数有: 密度、弹性模量、泊松比以及多组塑性阶段的应力-应变值。其中, 由弹性模量的定义可知, AB 段的斜率即为弹性阶段的弹性模量; 泊松比为 0.01; 多组塑性阶段的应力应变值为 B、C、D、E 点对应的值。用多线性等向强化模型对瓦楞纸板性能进行近似, 该材料模型所需的参数计算后汇总如表 4 所示。

表 4 瓦楞纸板厚度方向的等效力学性能参数

Tab.4 Equivalent mechanical properties of corrugated board thickness direction

参数	602	641	955	965
密度/($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$)	1.38×10^{-7}	1.15×10^{-7}	1.36×10^{-7}	1.13×10^{-7}
弹性模量/MPa	0.863	0.273	1.130	0.438
弹性模量系数	1.3	1.5	1.5	1.8
泊松比 μ	0.01	0.01	0.01	0.01
应变, 应力/MPa	0, 0.167	0, 0.048	0, 0.181	0, 0.118 4
应变, 应力/MPa	0.167, 0.215	0.2, 0.092 5	0.3, 0.227	0.27, 0.146 5
应变, 应力/MPa	0.4, 0.28	0.383 5, 0.093 55	0.463, 0.25	0.385, 0.15
应变, 应力/MPa	0.588, 100	0.574 23, 100	0.59, 100	0.479 7, 100

3.2.2 约束及求解设置

将压板、支撑板与纸板的接触设定为摩擦接触，摩擦因数为 0.3。将支撑板设定为固定，限制其在 x 、 y 、 z 方向上的运动，对于压板，设定为沿厚度方向的运动， x 、 y 方向位移量设定为 0，限制其在 x 、 y 方向上的移动。位移设定为纸板模型厚度的 80%，压缩速度为 12 mm/min，设定相对应的时间。输出压板与瓦楞纸板接触的面的等效应力，并计算出对应的瓦楞纸板应力-应变数据。

3.2.3 仿真结果及其分析

将平压有限元简化模型仿真的应力-应变数据、平压有限元模型仿真的应力-应变数据以及平压试验所得的应力-应变数据进行对比，如图 13 所示。瓦楞纸板平压有限元简化模型的网格数、求解时间以及求解使用的 MAPDL 内存资源如表 5 所示。

简化模型对于瓦楞纸板平压性能的仿真有较好的效果，且在求解速度上有很大的提升，对于求解所占用

的内存资源在很大程度上有所减少。平压有限元简化仿真在求解时间以及占用内存上的对比如表 6 所示。

从图 13 中显示的仿真结果与试验结果的对比分析可以得出，有限元仿真模型对瓦楞纸板力学性能的预测有较好的有效性。并且，从表 6 中可以得出，在对瓦楞纸板平压进行应变 0.8 的有限元仿真中，简化后的有限元模型的求解时间相对于瓦楞纸板的平压有限元模型减少了 13%~60%，使用内存减少了 37%~62%，且模型尺寸越大，减少的越多。

对于瓦楞纸板的平压性能，有限元仿真结果能实现较好的预测，通过仿真数据求得瓦楞纸板平压方向的等效力学性能，简化后有限元模型能较好地反映瓦楞纸板的应力-应变性能，在求解速度以及占用的计算机内存资源上有很大的改善，且该方法对 5 层瓦楞纸板的仿真效果更好，证明了该方法对多层瓦楞纸板的平压性能仿真有较好的效果。

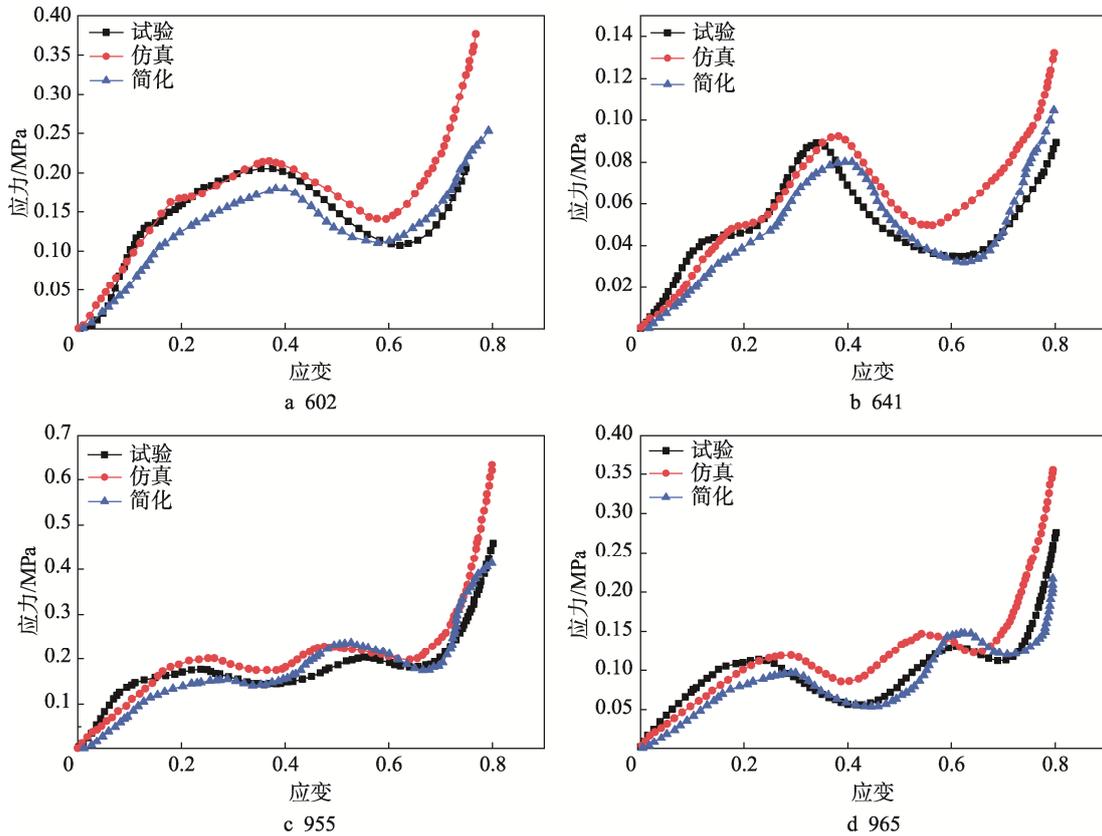


图 13 平压数据对比图
Fig.13 Comparison of flat pressing data

表 5 平压有限元简化模型的网格数量和求解时间

Tab.5 Number of meshes and solving time of flat pressing finite element simplified model

纸板编号	单元数量	节点数量	翘曲系数	求解时间/s	使用的 MAPDL 内存/M
602	1 470	8 240	5.49×10^{-16}	141	198
641	1 820	9 905	6.28×10^{-16}	148	182
955	4 160	21 183	1.13×10^{-15}	354	276
965	4 160	21 183	1.09×10^{-15}	328	248

表 6 平压有限元仿真与平压有限元简化仿真对比
Tab.6 Comparison of flat pressing finite element simulation and plat pressing finite element simplified simulation

纸板编号	求解时间 减少比例/%	MAPDL 内存减少 比例/%
602	13.5	37.34
641	37.28	41.48
955	57.65	59.53
965	60.86	62.93

4 结语

本文通过对瓦楞原纸、箱板纸、瓦楞纸板进行试验测试, 1:1 有限元模型仿真以及简化有限元模型仿真 3 种方法进行研究, 验证通过有限元仿真来代替试验的有效性。对常用的 2 种 3 层瓦楞纸板、2 种 5 层瓦楞纸板进行了平压试验, 通过计算瓦楞纸板压缩性能的等效力学性能来简化有限元模型。对试验测试、1:1 有限元模型仿真以及简化有限元模型仿真 3 种方法得到的结果对比, 验证了有限元简化模型对瓦楞纸板的压缩性能预测的有效性。

通过对比简化有限元模型仿真结果与试验结果, 发现简化有限元模型和瓦楞纸板的压缩试验结果有较好的相关性。此外, 对比了有限元简化模型与 1:1 有限元模型在瓦楞纸板压缩试验仿真中的性能提升, 发现简化后的模型在保证一定精度的同时, 能大幅提升仿真速度。

参考文献:

- [1] 寇新宇, 孙一凡, 马乐, 等. 瓦楞纸板托盘结构及性能研究综述[J]. 包装世界, 2017(3): 34-35.
KOU X Y, SUN Y F, MA L, et al. Review on Structure and Performance of Corrugated Board Tray[J]. Packaging World, 2017(3): 34-35.
- [2] 寇新宇, 董巧艺, 马浩云, 等. 瓦楞纸板托盘结构及性能研究[J]. 包装工程, 2018, 39(7): 49-53.
KOU X Y, DONG Q Y, MA H Y, et al. Structure and Property of Compressing Paperboard Pallet[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(7): 49-53.
- [3] 周丽娜. 新型结构瓦楞纸板的设计及缓冲性能研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2023: 5-10.
ZHOU L N. Study on Design and Cushioning Performance of New Structure Corrugated Board[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2023: 5-10.
- [4] 范猛. 现代城市绿色包装设计理念的研究意义与发展趋势分析[J]. 绿色包装, 2024(3): 59-62.
FAN M. Research Significance and Development Trend Analysis of Modern Urban Green Environmental Protection Design Concept[J]. Green Packaging, 2024(3): 59-62.
- [5] MCKEE R C, GANDER J W, WACHUTA J R. Compression Strength Formula for Corrugated Boxes[J].

Paperboard Packaging, 1963, 48(8): 149-159.

- [6] 徐朝阳, 徐奕超. 瓦楞楞型对瓦楞纸箱蠕变性能的影响[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 50-53.
XU Z Y, XU Y C. Effect of Flute-Type on Creep Performance of Corrugated Box[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 50-53.
- [7] FADIJI T, COETZEE C, OPARA U L. Compression Strength of Ventilated Corrugated Paperboard Packages: Numerical Modelling, Experimental Validation and Effects of Vent Geometric Design[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 231-247.
- [8] LUONG V D, ABBÈS F, ABBÈS B, et al. Finite Element Simulation of the Strength of Corrugated Board Boxes under Impact Dynamics[M]//Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2018: 369-380.
- [9] MINH D P T. Modeling and Numerical Simulation for the Double Corrugated Cardboard under Transverse Loading by Homogenization Method[J]. The International Journal of Engineering and Science (IJES), 2017, 6: 16-25.
- [10] BIANCOLINI M E. Evaluation of Equivalent Stiffness Properties of Corrugated Board[J]. Composite Structures, 2005, 69(3): 322-328.
- [11] 尹兴, 陈志强, 崔久刚, 等. 快递包装 EPE/瓦楞纸板动态缓冲性能[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 52-57.
YIN X, CHEN Z Q, CUI J G, et al. Dynamic Buffering Performance of EPE/Corrugated Board Used in Express Packaging[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 52-57.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 单面和单瓦楞纸板 平压强度的测定: GB/T 22874—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Single-Faced and Single-Wall Corrugated Fibreboard- Determination of Flat Crush Resistance: GB/T 22874—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [13] 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.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrugated Fibreboard-Determination of the Grammage of the Component Papers after Separation: GB/T 22811—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [14] PARK J, CHANG S, JUNG H M. Numerical Prediction of Equivalent Mechanical Properties of Corrugated Paperboard by 3D Finite Element Analysis[J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 7973.
- [15] ELDAHSHAN H, BOUCHARD P O, ALVES J, et al. Phase Field Modeling of Ductile Fracture at Large Plastic Strains Using Adaptive Isotropic Remeshing[J]. Computational Mechanics, 2021, 67(3): 763-783.