

纸浆模塑非标准结构单元异面缓冲性能研究与应用

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.3003

李国志^{1,2} 黄凯楠¹
李 想¹ 李元吉¹
王常林¹ 李文凤³

1. 陕西科技大学
轻工科学与工程学院
陕西 西安 710021
2. 陕西科技大学
轻化工程国家级实验
教学示范中心
陕西 西安 710021
3. 陕西科技大学
设计与艺术学院
陕西 西安 710021

摘 要: 内装物会造成纸浆模塑结构单元形状局部改变, 导致其性能也随之变化。为给纸浆模塑缓冲设计提供数据支撑, 以正四棱柱纸浆模塑结构单元为例, 沿高度和顶面边长方向构建系列化非标准正四棱柱结构单元, 利用 ANSYS Workbench/LS-DYNA 和试验测试手段, 研究不同高度和切除比例下, 非标准正四棱柱结构单元缓冲性能的变化规律, 并建立相应的数据库。研究表明, 随着切除比例的增加, 正四棱柱结构的最大承载力逐步增强。在高度逐渐降低的过程中, 线弹性变形阶段的总吸能呈递增趋势, 并逐渐趋于稳定。构建的非标准正四棱柱结构单元承载力数据库, 能为优化纸浆模塑缓冲设计提供借鉴。

关键词: 纸浆模塑制品; 最大承载力; 正四棱柱; 仿真; 总吸能

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)03-0019-10

引文格式: 李国志, 黄凯楠, 李 想, 等. 纸浆模塑非标准结构单元异面缓冲性能研究与应用 [J]. 包装学报, 2025, 17(3): 19-28.

1 研究背景

纸浆模塑作为一种环保型塑料替代品, 因其良好的缓冲力学性能在包装领域受到广泛关注。纸浆模塑制品是一种利用草本植物纤维或者废旧纸张作为原料, 经过水和能源加工制成的纸质产品^[1,2]。这些产品具有特定的立体空间结构, 能够提供一定的抗压和缓冲性能^[3,4]。常见的制品包括电子产品的衬垫、易碎物品的隔离垫等^[5]。纸浆模塑制品已成为现代包装行业的重要组成部分^[6]。

在影响纸浆模塑制品性能的研究中, 付志强等^[7]认为纸浆模塑制品的结构形式是决定其缓冲性能的主要因素; J. A. Marcondes 等^[8]提出利用纸浆模塑制品结构的变形特性能够有效抵抗外力损坏; 王高升等^[9]通过静态压缩试验得出, n 个缓冲结构单元的缓冲能力显著高于单个缓冲结构的 n 倍。目前纸浆模

塑结构设计只是针对特定产品进行单一的模具定制, 所设计的纸浆模塑包装结构在通用性方面存在不足, 并且在力学原理的应用上未能充分发挥优势, 导致其强度较低、缓冲性能不佳以及可靠性不足^[10]。现有的解决方法主要有以下两种: 一种是通过纸浆模塑的结构单元、尺寸、材料厚度、温湿度等影响因素进行分析, 不断优化结构设计方法; 另一种是利用实验获取材料参数后, 采用有限元仿真方法, 对设计方案的可靠性进行分析和优化^[11-13]。然而在实际应用中, 由于产品形状各异, 产品边缘的纸浆模塑结构单元需要进行局部随形设计, 因而会产生一定数量的非标准结构单元, 如果按照上述方法设计将存在较大误差。

综上, 本研究以纸浆模塑常用的正四棱柱结构单元为例, 采用纵横方向梯度切除方式形成一些非标准结构单元, 即用建模软件中的布尔运算将模体结构加工成被切除形状, 运用有限元仿真方法, 深入剖析纸

收稿日期: 2025-01-10

作者简介: 李国志, 男, 副教授, 主要从事物流及包装系统设计与优化研究, E-mail: liguozy@sust.com

浆模塑非标准结构单元的静态压缩过程,研究其异面缓冲性能变化规律,以期进一步完善纸浆模塑结构设计的相关理论依据。

2 试验与仿真模型

2.1 材料参数测定

纸质材料的拉伸与压缩性能存在一定差异,但在线弹性阶段差异较小。因此,本研究分析纸浆模塑结构单元在压缩下线弹性阶段的总吸能和极限载荷,为结构与优化提供参考。借鉴 T. Garbowski 等^[14]所提方法,通过拉伸试验测定纸浆模塑的力学性能,得到材料参数数值,然后结合巩桂芬等^[15]所提方法,对纸浆模塑非标准结构单元压缩性能进行仿真分析。

参考 GB/T 12914—2018《纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法(20 mm/min)》^[16]对图1所示试样进行拉伸试验。试样尺寸为 80 mm×15 mm,取 10 个试样进行试验。图2展示了试样的载荷-位移曲线,而图3则是处理图2得到的应力-应变曲线。可见,材料弹性模量为 64.28 MPa,屈服强度为 0.8 MPa,泊松比为 0.01,材料密度为 375 kg/m³。



图1 纸浆模塑拉伸试样

Fig. 1 Tensile test sample of pulp molding

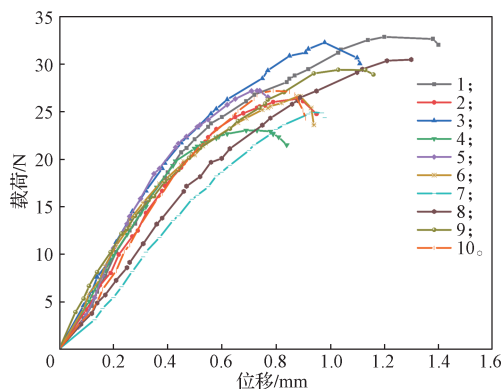


图2 载荷-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curve

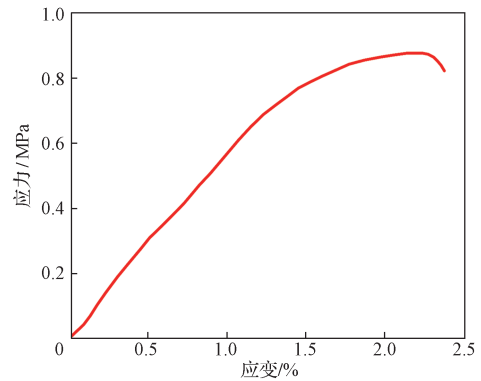


图3 应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve

2.2 有限元模型构建

2.2.1 有限元仿真模型

采用 CREO 软件构建几何模型,并利用 ANSYS Workbench/LS-DYNA 建立有限元模型,再使用 LS-PrePost 作为后处理软件进行数据分析。以拔模斜度为 12° 的四棱柱为研究对象,纸浆模塑材料模型选择各向同性模型,上下压板设置为刚体,纸浆模塑与压板之间的接触定义为摩擦。考虑纸浆模塑的厚度为 2 mm,用壳单元进行建模,并采用四边形单元进行网格划分^[15],网格大小为 1 mm,仿真模型如图4所示。将纸浆模塑试样置于两个刚性板之间,上压板 P1 仅保留垂直方向上的自由度,而下支撑板 P2 代表底面,约束所有方向自由度, P1 以恒定速率向下进行压缩。

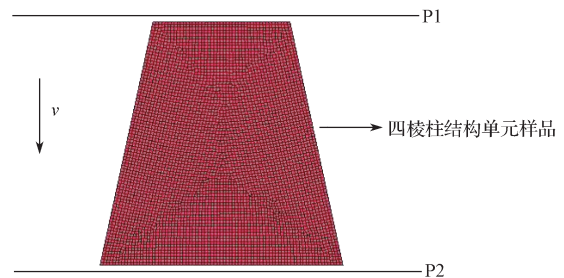


图4 有限元冲击模型

Fig. 4 Finite element impact model

2.2.2 模型尺寸和压缩速度

为了模拟与产品边缘接触的不完整的纸浆模塑结构单元,利用 CREO 软件中的布尔运算工具,将正四棱柱标准结构单元分别从高度、顶面边长两个方向按照设定的梯度进行切除,从而生成一系列的非标准结构单元。切除后的模型如图5所示。

纸浆模塑模型的圆角结构能局部分散应力,起到一定缓冲保护作用,然而在构型复杂且主要力学响应集中于关键部位(如大型纸浆模塑托盘支撑梁与承重

面)的纸浆模塑结构里,圆角结构占比甚微,对整体刚度与强度的贡献可以忽略不计。故在静态压缩仿真中,忽略纸浆模塑模型圆角结构的影响。

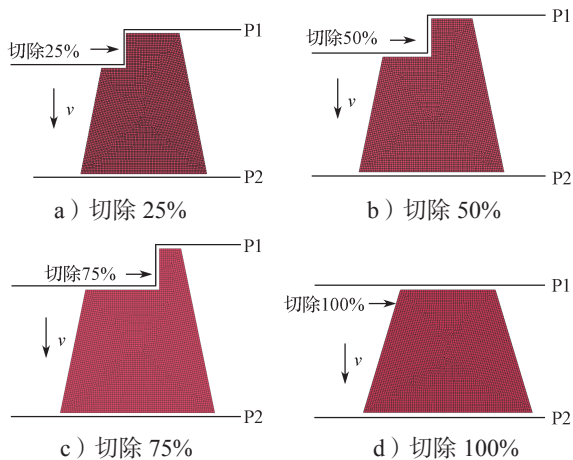


图5 有限元冲击变形模型

Fig. 5 Finite element impact deformation model

图6所示四棱柱结构单元尺寸为:底面尺寸 $l_{\text{底}}=80\text{ mm}$ 、 $b_{\text{底}}=80\text{ mm}$,拔模斜度 $\alpha=12^\circ$,初始顶面边长 $a=45\text{ mm}$,高度 $h=80\text{ mm}$ 。结合静态压缩试验及考虑仿真计算效率,以 20 mm/s 对模型进行准静态压缩仿真。拔模斜度为 12° 的四棱柱结构单元切除示意图如图7所示。不同高度的结构单元切除数据如表1所示。横向按顶面正方形边长比例切除,纵向切除高度为 10 mm 。为保持纸浆模塑结构单元其他影响因素不变,切除后的模型壁厚和拔模斜度保持恒定,分别为 2 mm 和 7° 。

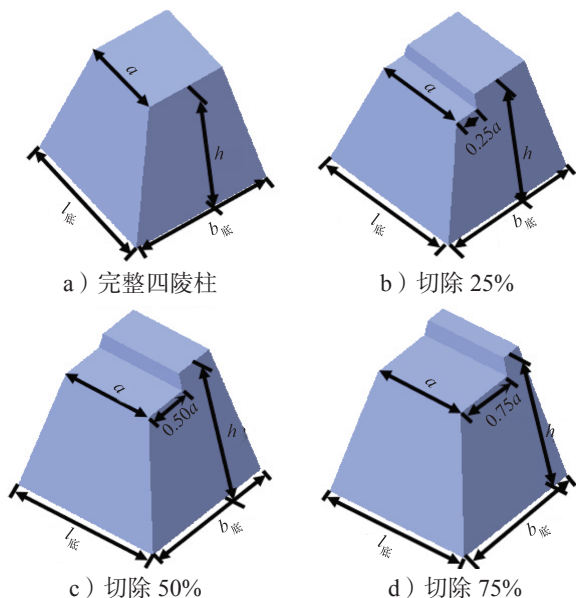


图6 切除变形后单元示意图

Fig. 6 Schematic diagram of deformed element post-excision

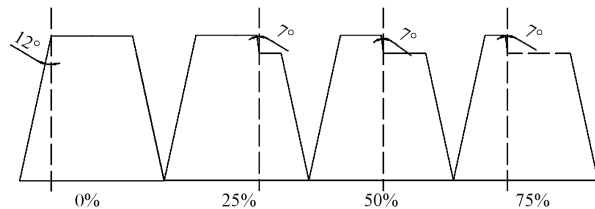


图7 单元切除侧面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the side view of unit resection

表1 切除模型尺寸

Table 1 Resected model dimensions

$l_{\text{底}} \times b_{\text{底}} \times h/\text{mm}^3$	纵向切除高度/mm	横向切除比例/%
$80 \times 80 \times 80$	10	25, 50, 75, 100
$80 \times 80 \times 70$	10	25, 50, 75, 100
$80 \times 80 \times 60$	10	25, 50, 75, 100
$80 \times 80 \times 50$	10	25, 50, 75, 100
$80 \times 80 \times 40$	10	25, 50, 75, 100

2.2.3 切除后模体压缩量

表2为不同高度结构单元切除后的压缩量。由表可知,结构单元的高度不同,其压缩量也不同。

表2 非标准正四棱柱对应的压缩量

Table 2 The compression amount corresponding to the non-standard regular square prism

高度/mm	初始压缩量/mm	切除后压缩量/mm
80	80	70
70	70	60
60	60	50
50	50	40
40	40	30

2.3 可靠性验证

2.3.1 压缩试验

选取高度为 80 mm ,未经切除的8个正四棱柱样品,用万能试验机进行静态压缩试验,如图8所示。将样品放置于试验台中央,以 12 mm/min 的恒定速度进行上下压缩。结束后,8个样品的试验数据使用Origin软件进行处理,取平均值,并绘制载荷-位移图。

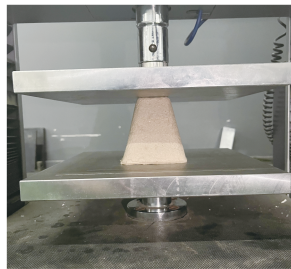


图8 正四棱柱单元压缩试验

Fig. 8 Compression test of a regular square prism unit

2.3.2 仿真分析

构建与压缩试验中样品正四棱柱结构尺寸相同的有限元模型，对其力学行为进行模拟分析，如图 9

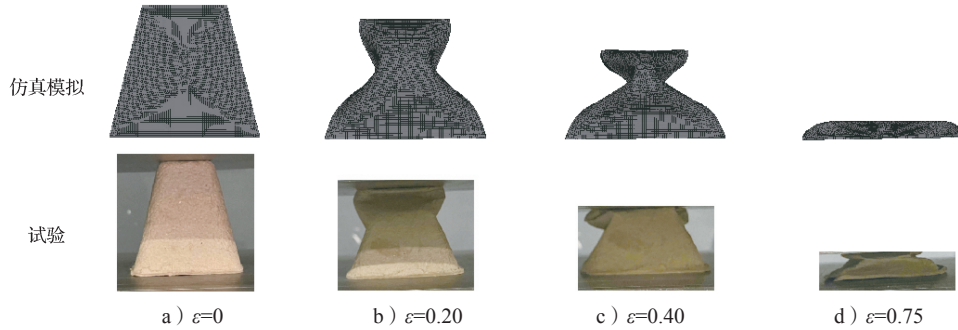


图 9 正四棱柱变形过程

Fig. 9 Deformation process of a regular square prism

图 10 为试验与仿真的载荷 - 位移曲线。由图可知，试验与仿真结果具有较好的一致性。

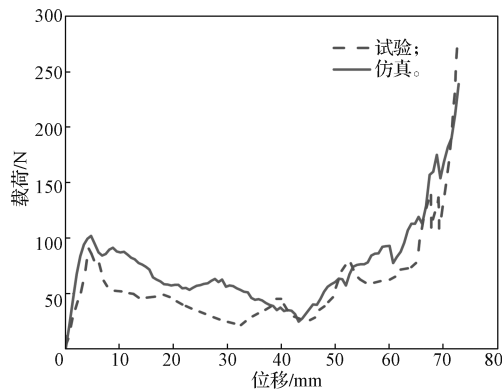


图 10 正四棱柱单元载荷 - 位移曲线

Fig. 10 The unit load-displacement curve of the regular square prism

试验与仿真所得的承载力及误差如表 3 所示。试验承载力为 93.6 N，仿真承载力为 103.0 N，仿真结果稍大于试验结果，误差在 10% 左右。

综合以上结果可知，仿真分析的可靠性较高。

表 3 正四棱柱单元的试验与仿真结果对比

Table 3 Comparison between the test and simulation results of the regular square prism unit

试验承载力 / N	仿真承载力 / N	误差 / %
93.6	103.0	10

2.4 缓冲性能分析

弹性恢复率的大小依赖于结构材料的特性和所施加的载荷大小，反映了结构在载荷移除后的可恢复性。对于仅发生弹性变形的结构，弹性恢复率为 100%；而对于经历了塑性变形的结构，弹性恢复率

所示。在相同应变条件下，试验与仿真的变形过程基本一致：顶部首先被压溃，随后四棱柱边缘薄壁不断压缩和叠加吸收能量，最终实现压实。

则低于 100%。

在结构变形过程中，密实化位移点前的总吸能 (E_A) 是评价结构吸能能力的重要因素^[17]。总吸能越大，结构的吸能性能越好。

$$E_A = \int_0^d F dx, \quad (1)$$

式中: x 为位移, mm;

d 为密实化位移, mm;

F 为压缩载荷, N。

3 结果与分析

3.1 承载力分析

不同高度、不同顶面边长切除比例的结构单元承载力分析如图 11 所示。以高度为 80 mm 的结构单元为例 (见图 11a)，当顶面边长切除比例为 25%、50%、75%、100% 时，对应的最大承载力分别为 103.0, 113.9, 118.1, 126.2 N；最大承载力通常出现在位移为 2.8~4.8 mm。其他高度的结构单元与高度为 80 mm 的结构单元具有类似趋势，说明在同一高度下，随着顶面边长切除比例的增大，最大承载力逐步增大。此外，当结构单元的顶面边长切除比例相同、高度不同时，其最大承载力随着高度的降低而逐渐增大。

产生以上趋势的主要原因是：纸浆模塑制品的结构形式是决定其缓冲性能的主要因素。在整体结构不变的情况下，随着高度的降低，四棱柱结构单元侧壁的抗弯强度逐渐提高，整体结构的稳定性得到增强。

3.2 切除后的应力云图

对所有模型均施加 20 mm/s 的垂直向下载荷，并

限制除垂直方向外的其余两个方向自由度, 以确保各模型在相同加载方式、边界条件及加载速率下, 进一步探究结构的应力分布特点及应力值受高度与切除比例的影响规律。图 12 直观地呈现了非标准正四棱柱结构单元在不同高度、不同切除比例下受压时的应力分布。由图 12 可知, 应力云图与压缩时模体变形过程 (见图 9) 相似, 压缩载荷施于顶部致顶面显著压缩变形, 载荷递增则顶面凹陷坍塌; 模体高度从 80 mm 降至 50 mm 时, 等效最大应力渐增, 高度在 40 mm 时趋于稳定; 高度一定时, 切除比例增大等效最大应力亦递增。

总体来看, 压力从顶面沿垂直方向向下传递,

并向侧壁扩散。在压力作用下, 侧壁发生弯曲变形。模体的应力分布呈现出明显特征: 边缘与底部应力较大, 而中部应力相对较小。在边缘与交接部位, 容易产生应力集中现象, 进而导致局部屈服或破坏。切除部分结构后, 应力集中于顶部, 有效缓解了边缘与底部的应力集中情况, 减缓了模体的受损速度, 显著降低了由应力集中造成的损坏。高度在 40~60 mm 的模体能够承受较大应力, 当高度为 50 mm 且切除比例为 75% 或 100% 时, 模体性能达到最佳状态。

3.3 弹性阶段的总吸能

张业鹏^[18]通过深入剖析纸浆模塑典型结构单元的弹性极限载荷与极限载荷之间的关联, 得出当弹性

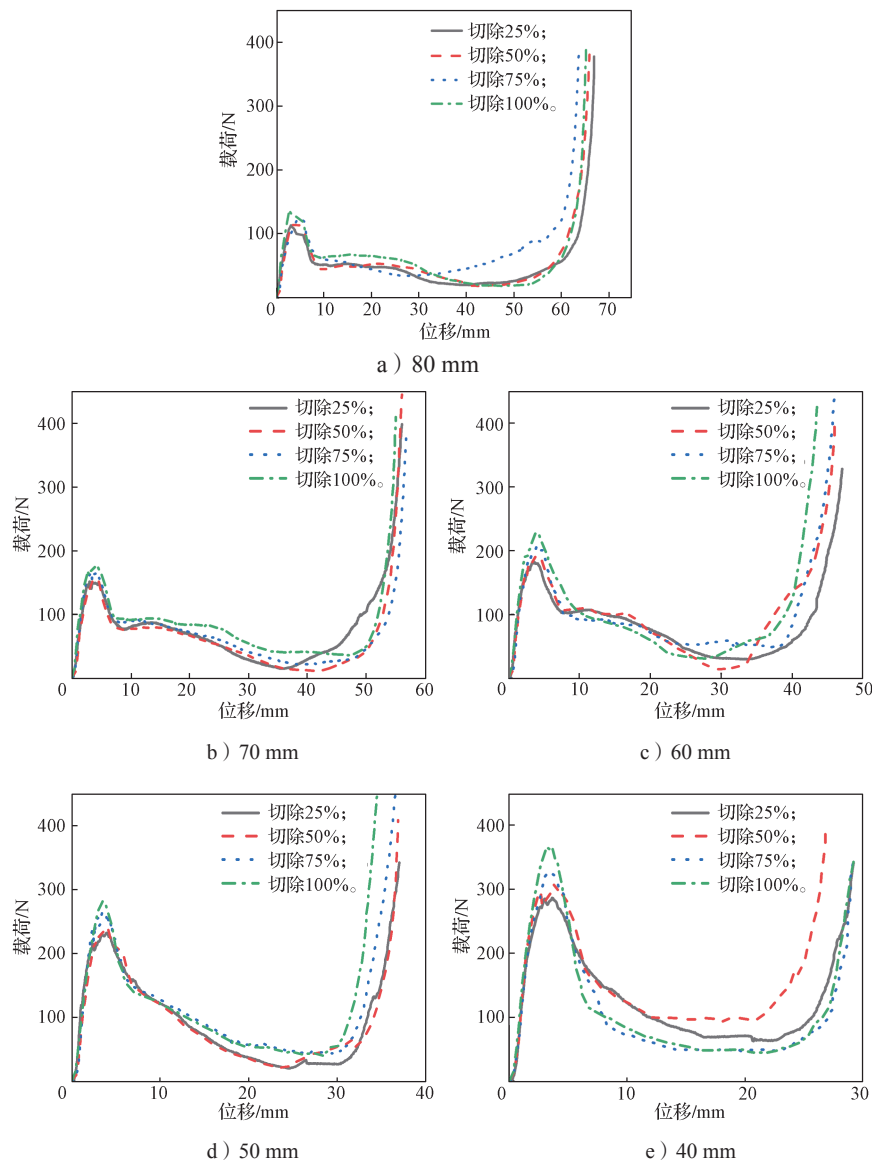


图 11 不同高度的非标准正四棱柱结构单元载荷-位移曲线

Fig. 11 The load-displacement curves of structural units of non-standard regular square prisms with different heights

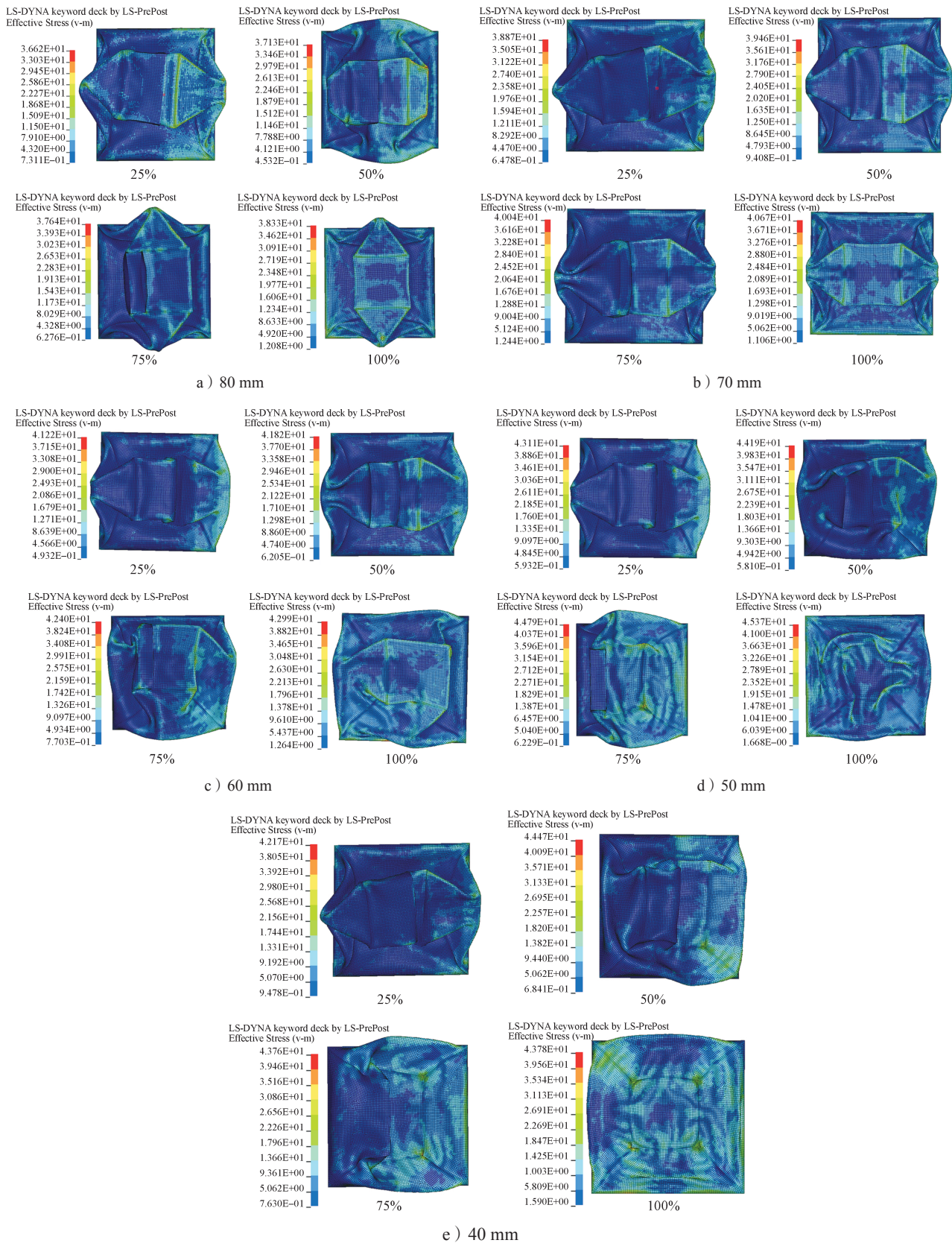


图 12 不同高度切除部分应力云图

Fig. 12 Stress contour maps for different heights of the cut-off sections

载荷逼近最大载荷的 80% 时, 模体将发生弹性变形, 且该变形量具备弹性恢复能力。表 4 展示了不同高度、不同切除比例的结构单元在弹性变形量下的总吸能。由表 4 可知, 高度从 80 mm 降至 50 mm 时, 总吸能随切除比例增加而递增, 表明此变形量条件下, 模体结构的能量吸收能力增强; 高度减至 40 mm 时, 虽总吸能随切除比例增加而略降, 但整体吸能性能良好, 缓冲性能趋于稳定; 当高度为 50 mm、切除比例为 100% 时, 总吸能达最大值 0.223 19 J。因此, 结构设计时, 可以选用高度为 40~60 mm、不同切除比例的结构单元, 以获得优异的缓冲性能。

表 4 非标准正四棱柱结构单元总吸能

Table 4 The total energy absorption of non-standard square prism structural units

结构单元 尺寸/mm ³	切除比例/%				
	0	25	50	75	100
80×80×80	0.059 43	0.068 57	0.077 93	0.090 32	0.095 29
80×80×70	0.095 29	0.099 92	0.106 71	0.112 38	0.119 64
80×80×60	0.119 64	0.128 14	0.139 29	0.151 02	0.165 63
80×80×50	0.165 63	0.178 54	0.182 74	0.203 41	0.223 19
80×80×40	0.223 19	0.205 55	0.194 61	0.192 99	0.186 54

3.4 构建切除后承载力数据库及相应计算公式

在实际应用中, 纸浆模塑制品通常不会处于“极限压缩状态”, 而是在低于极限承载能力的负荷范围内稳定运行, 以保证其长期的可靠性、安全性和使用寿命。极限压缩状态主要用于研究和设计阶段, 旨在评估材料的最大承载能力, 并为实际应用中的安

全系数和性能参数提供依据。

基于 2.2 节的仿真结果, 获取了不同高度纸浆模塑制品切除后的承载力数据, 如表 5 所示。依据表 5 构建纸浆模塑制品承载力数据库, 以有效预测特定切除条件下结构的承载能力, 帮助设计人员做出更合理的决策, 有针对性地优化设计, 提升结构承载力并减轻质量。

假设某产品的大小为 $L \times B \times H$ (长 × 宽 × 高), 质量为 m , 纸浆模塑制品用作衬垫, 其结构单元大小为 $l \times b \times h$ (长 × 宽 × 高), 若只受到静态压缩力的情况下, 纸浆模塑结构所承受的最大载荷为 p_i 。王高升等^[9]通过试验及仿真得到, n 个纸浆模塑缓冲结构单元所能承受的最大载荷是单个缓冲结构单元所能承受的最大载荷的 n 倍。当产品从 h' 高度跌落时, 所受到的最大冲击力 $P=G \times W$, 要想产品免受损坏, 此时缓冲衬垫至少要吸收冲击力 P 所产生的能量, 即

$$P = G \times W = a \sum_{i=1}^n p_i, \quad (2)$$

式中: G 为产品许用脆值;

W 为产品净重;

a 为弹性恢复率, $a=80\%$;

n 为结构单元数。

假设运用在缓冲结构设计时每个结构单元均匀排列, 使用不同高度任意切除比例的结构单元个数为 N_i (i 代表不同切除比例), 且所对应的最大载荷为 p_i , 求得所需结构单元个数 N 满足下式:

表 5 非标准正四棱柱结构单元的极限位移、载荷

Table 5 The ultimate displacement load of non-standard square prism structural units

结构单元尺寸/mm ³	参数	切除比例/%				
		0	25	50	75	100
80×80×80	极限位移/mm	3.3	3.5	4.1	4.8	2.9
	极限载荷/N	103.0	113.9	118.1	126.2	137.5
80×80×70	极限位移/mm	2.9	3.5	3.8	4.1	4.3
	极限载荷/N	137.5	151.5	156.9	164.8	175.7
80×80×60	极限位移/mm	4.3	3.4	4.0	4.1	4.1
	极限载荷/N	175.7	182.7	193.5	208.0	226.0
80×80×50	极限位移/mm	4.1	3.9	4.0	3.5	3.5
	极限载荷/N	226.0	232.1	243.3	263.8	282.0
80×80×40	极限位移/mm	3.5	3.7	3.8	3.3	3.2
	极限载荷/N	282.0	286.2	306.6	326.1	365.7

$$\frac{P}{ap_i} = \frac{GW}{ap_i} = N, \quad (3)$$

$$N = \sum_i^n N_i. \quad (4)$$

设结构单元间隙为 t ，长度方向单元数为 x ，宽度方向单元数为 y ，则：

$$L = xl + (x-1)t, \quad (5)$$

$$B = yb + (y-1)t. \quad (6)$$

可得：

$$x = \frac{L+t}{l+t}, \quad (7)$$

$$y = \frac{B+t}{b+t}. \quad (8)$$

又由

$$xy = N, \quad (9)$$

可得

$$\frac{L+t}{l+t} \times \frac{B+t}{b+t} = \frac{GW}{ap_i}. \quad (10)$$

由式 (7) 和 (8) 得到缓冲结构单元在长度和宽度方向上的个数，再根据其承载力确定选用哪种切除比例的结构单元，最终根据产品形状和要求设计具体结构。

3.5 应用举例

某产品最大外尺寸为 1458 mm × 212 mm × 212 mm，质量为 8.3 kg，脆值为 80g。设计缓冲结构时需考虑放入两个产品所能承受的最大冲击力，根据式

(2) 可知其最大冲击力至少为 16 268 N。由于产品形状不规则，缓冲结构设计需采用非标准结构单元，尺寸为 1535 mm × 420 mm × 142 mm。上述研究表明，在 40~60 mm 范围内，切除比例越大，极限载荷和具有弹性恢复作用下的总吸能逐渐增加。故在此选用高度为 60 mm、切除比例为 0% 的结构单元作为基础，并根据产品形状进行局部切除，形成高度为 60 mm 及以下、切除比例不同的多种结构单元，确保其最大承载力高于产品能承受的最大冲击力。

将已知数据代入式 (2)~(10) 中，得出： $t=4$ ， $x=19$ ， $y=5$ ， $N=95$ 。在缓冲结构设计中，至少需 95 个高度为 60 mm、切除比例为 0% 的非标准结构单元。因产品较长，若按产品长度设计对应的纸浆模塑结构，开模会有困难，所以将缓冲结构分为 3 部分且相互连接，上下缓冲结构呈镜像对称。图 13a 呈现了产品放入缓冲结构并装入外包装箱的状态。目前，所设计的纸浆模塑结构已完成开模并投产，图 13b 展示了其跌落试验过程。

参考 GB/T 4857.5—1992《包装 运输包装件 跌落试验方法》^[19]，确定跌落高度为 1000 mm。使用零跌落试验机 and TP3 采集系统完成三面、二棱、一角共 6 种跌落工况的包装件跌落试验及数据采集，结果如图 14 所示。试验结果显示，底面跌落时的响应加速度最大，产品最大响应加速度为 57.68g，低于产品脆值 80g，这证明缓冲结构具有良好的缓冲性能，能够有效保护产品。

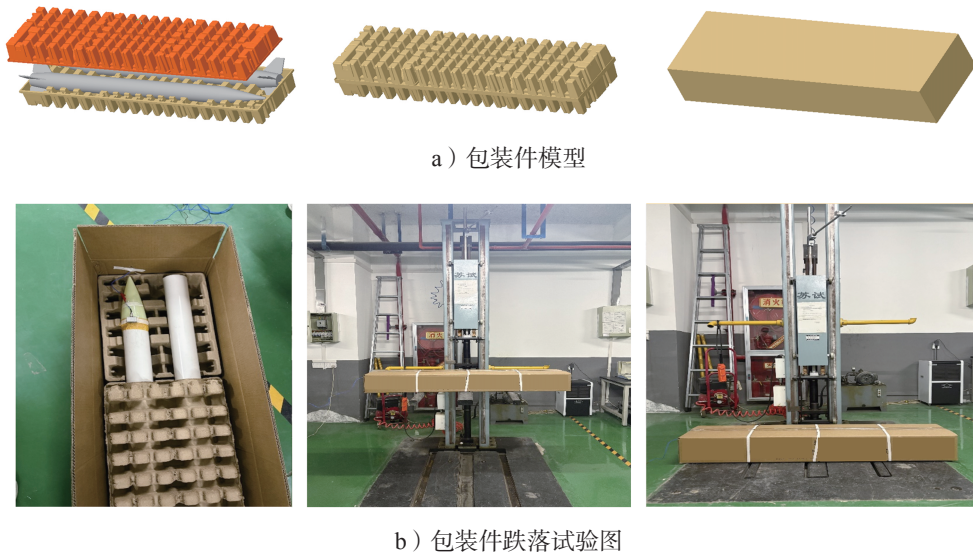


图 13 包装件及其跌落试验图

Fig. 13 Packaging components and their drop test diagrams

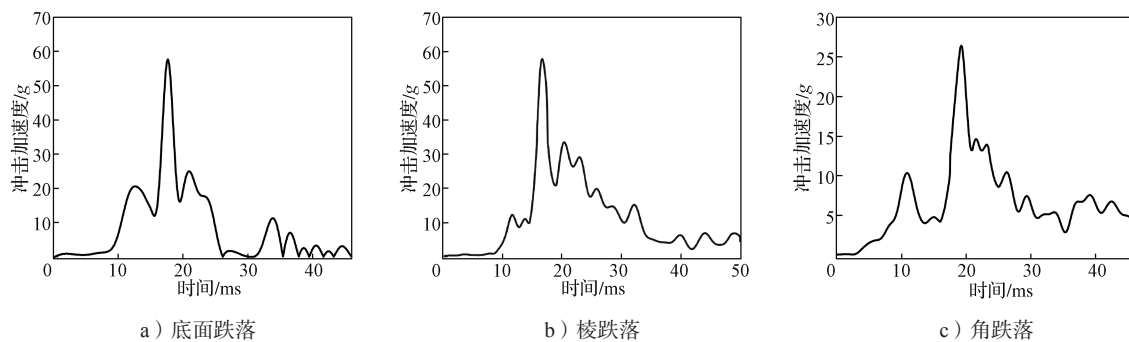


图 14 不同工况下最大响应加速度-时间曲线

Fig. 14 Maximum response acceleration-time curves under different working conditions

4 结论

本研究通过异面压缩仿真,研究了以正四棱柱为例的结构单元在不同高度阶段经过切除后的缓冲性能。得出以下结论:

1) 将四棱柱纸浆模塑结构单元的静态压缩试验结果与仿真结果进行对比,发现二者的极限载荷误差在 10% 左右,吻合度良好,从而验证了有限元模型的可靠性,并通过仿真获取结果。

2) 采用相同的切除方式对不同高度的四棱柱纸浆模塑结构单元进行切除。仿真结果表明:随着切除比例上升,模体结构最大承载力呈逐步增大态势;不同高度与切除比例下,载荷-位移曲线形态趋同,揭示结构达最大承载力前基本响应行为相似;高度较低(如 40 mm)时,较小切除比例即可使最大承载力显著增长。此外,不同高度,位移范围各异,最大承载力常现于较小位移区间。

3) 在具有弹性恢复作用的变形量下,高度为 50 mm、切除比例为 100% 时,总吸能达到最大值,为 0.223 19 J;在结构设计过程中,综合承载力及总吸能两方面考虑选用高度在 40~60 mm 的不同切除比例的结构单元,其缓冲性能较为优异。

4) 通过建立非标准正四棱柱结构单元的承载力数据库,推导了纸浆模塑制品结构设计的理论公式,以精确计算非标准结构单元的承载能力。基于数据库设计的缓冲结构经跌落试验验证,可有效保护产品。

在接下来的研究工作中,通过仿真技术进一步精细化结构设计,并且通过一系列的测试来验证其可靠性,确保设计的结构能够满足预期的性能要求。

参考文献:

- [1] 张新昌,潘梦洁,林冬鸣. 基于 ANSYS 模拟分析的纸浆模塑单元结构参数研究[J]. 包装工程, 2007, 28(9): 11-13.
- [2] GURAV S P, BEREZNITSKI A, HEIDWEILLER A, et al. Mechanical Properties of Paper-Pulp Packaging[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(9): 1325-1334.
- [3] SENGUPTA P, DEY A, ALAM P, et al. Paper and Other Pulp Based Eco-Friendly Moulded Materials for Food Packaging Applications: A Review[J]. Journal of Postharvest Technology, 2020, 8(3): 1-21.
- [4] HOFFMANN J. Compression and Cushioning Characteristics of Moulded Pulp Packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2000, 13(5): 211-220.
- [5] 黄俊彦. 纸浆模塑生产实用技术(第二版)[J]. 数字印刷, 2021(3): 171.
- [6] DESHWAL G K, PANJAGARI N R, ALAM T. An Overview of Paper and Paper Based Food Packaging Materials: Health Safety and Environmental Concerns[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(10): 4391-4403.
- [7] 付志强,李芸,杜昱雯,等. 纸浆模制波状结构缓冲性能的仿真影响因素[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 34-39.
- [8] MARCONDES J A, SCHUENMAN H. Molded Pulp Protecting High-Tech Production[C]//Proceedings of the 11th LAPRI Word Conference on Packaging. Singapore: IAPRI, 1999: 564-570.
- [9] 王高升,付春英,金海鹰,等. 纸浆模塑缓冲结构设计原理的研究[J]. 中国造纸, 2001, 20(4): 25-28.
- [10] HUANG J P. Sustainable Development of Green Paper Packaging[J]. Environment and Pollution, 2017, 6(2): 1-5.
- [11] WANG Z P, CAI Y X, JING Y J. Molded Pulp Material Structure Parameters on the Performance of the Buffer[J]. Energy Procedia, 2012, 17: 1872-1877.
- [12] WANG Z W, LI X F. Effect of Strain Rate on Cushioning Properties of Molded Pulp Products[J]. Materials &

- Design, 2014, 57: 598–607.
- [13] BAHLAU J, LEE E. Designing Moulded Pulp Packaging Using a Topology Optimization and Superimpose Method[J]. Packaging Technology and Science, 2022, 35(5): 415–423.
- [14] GARBOWSKI T, KNITTER-PIĄTKOWSKA A, WINIARSKI P. Simplified Modelling of the Edge Crush Resistance of Multi-Layered Corrugated Board: Experimental and Computational Study[J]. Materials, 2023, 16(1): 458.
- [15] 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.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法: GB/T 12914—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 1–6.
- [17] LIU Q, SHEN H, WU Y H, et al. Crash Responses Under Multiple Impacts and Residual Properties of CFRP and Aluminum Tubes[J]. Composite Structures, 2018, 194: 87–103.
- [18] 张业鹏. 纸浆模塑包装结构的缓冲性能及其可靠性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [19] 国家技术监督局. 包装 运输包装件 跌落试验方法: GB/T 4857.5—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 1–3.

(责任编辑: 邓 彬)

Research and Application of Anisotropic Cushioning Performance of Non-Standard Structural Units in Paper Pulping Molded Products

LI Guozhi^{1,2}, HUANG Kainan¹, LI Xiang¹, LI Yuanji¹, WANG Changlin¹, LI Wenfeng³

(1. College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi' an 710021, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University of Science & Technology, Xi' an 710021, China;
3. College of Art and Design, Shaanxi University of Science & Technology, Xi' an 710021, China)

Abstract: The contents inside can cause local shape changes in the pulp molded structure units, leading to variations in their performance. To provide data support for the design of pulp molded cushioning, taking the regular square prism pulp molded structure unit as an example, a series of non-standard square prism structure units were constructed along the height and top surface edge length directions. Using ANSYS Workbench/LS-DYNA and experimental testing methods, the variation laws of the cushioning performance of the non-standard square prism structure units under different heights and cutting ratios were studied, with the corresponding database established. The research shows that as the cutting ratio increases, the maximum load-bearing capacity of the square prism structure gradually increases. In the process of gradually reducing the height, the total energy absorption in the linear elastic deformation stage shows an increasing trend and gradually tends to stabilize. The load-bearing capacity database of the constructed non-standard square prism structure units can provide reference for optimizing the design of pulp molded cushioning.

Keywords: pulp molded product; maximum load capacity; regular square prism; simulation; total energy absorption