

装备防护

纸浆模塑品缓冲性能影响因素的仿真研究

巩桂芬^{a,b,c*}, 苏亭亭^{a,b,c}, 闫心怡^{a,b,c}, 杨楠^{a,b,c}, 谭思可^{a,b,c}

(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术与特种纸品开发重点实验室 b.中国轻工业纸基功能材料重点实验室
c.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究形状、结构参数对纸浆模塑品承载和缓冲性能的影响, 为纸浆模塑品缓冲结构设计提供更多参考。**方法** 通过拉伸试验得到材料物理性能参数。对不同形状单元进行静态压缩试验和有限元模拟, 对比验证仿真的可靠性。利用 Ansys Workbench/LS-DYNA 对 3 种不同形状单元以及 3 个结构因素的四棱台进行动态冲击模拟, 评价其承载性能, 并从能量吸收方面评价缓冲性能。**结果** 不同形状单元中, 圆台的承载和缓冲性能最佳; 随着斜度增大, 极限载荷和吸能性能整体呈下降趋势, 1°时四棱台单元极限载荷最大, 4°次之, 1°~4°时吸能性能较好且变化相对稳定; 随着长宽比增大, 极限载荷和能量吸收整体均呈现下降趋势; 极限载荷随着高度增加而减少, 高度在 10~25 mm 时能量吸收不断减少, 在 25~40 mm 时不断增加, 在 30~40 mm 时单位体积吸能较稳定。**结论** 在设计缓冲结构时, 尽可能选择圆台状单元, 斜度在 1°时最佳, 4°次之, 长宽比在 1~1.5 最佳, 高度在 30~40 mm 较好。

关键词: 纸浆模塑品; 形状; 结构参数; 承载; 缓冲性能

中图分类号: TB485.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)05-0301-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.05.036

Simulation Study on Influence Factors of Buffering Properties of Molded Pulp Products

GONG Guifen^{a,b,c*}, SU Tingting^{a,b,c}, YAN Xinyi^{a,b,c}, YANG Nan^{a,b,c}, TAN Sike^{a,b,c}

(a. Key Laboratory of Paper Technology and Special Paper Product Development of Shaanxi Province, b. China Key Laboratory of Light Industry Paper-based Functional Materials, c. National Experimental Teaching Demonstration Center of Light Chemical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of shape and structure parameters on the bearing and cushioning properties of pulp molded products, and to provide more reference for the cushioning structure design of pulp molded products. The physical properties of the material were obtained by a tensile test. The static compression test and finite element simulation of different shape units were carried out to verify the reliability of the simulation. Ansys Workbench/LS-DYNA was used to simulate the dynamic impact of square frustum units with three different shapes and three structural factors to evaluate their load-bearing performance and buffer performance in terms of energy absorption. The results showed that the bearing and buffering performance of the circular truncated cone was the best among the units with different shapes; With the increase of the slope, the ultimate load and energy absorption performance showed a

收稿日期: 2023-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(51575327); 陕西省教育厅重点实验室及基地项目(16JS014); 陕西省教育厅 2014 陕西本科高校专业综合改革试点子项目(陕教高[2014]16号); 中试基地建设项目(2023ZSJD-06)

*通信作者

downward trend. The ultimate load of the square frustum unit was the largest at 1° , followed by 4° , and the energy absorption performance was better and the change was relatively stable at $1^\circ\sim 4^\circ$; With the increasing aspect ratio, the ultimate load and energy absorption overall showed a downward trend; The ultimate load decreased with the increase of height, the energy absorption decreased at the height of 10~25 mm and increased at the height of 25~40 mm, the energy absorption per unit volume was relatively stable at 30~40 mm. Therefore, when designing the buffer structure, the circular truncated cone unit should be selected as far as possible, the best slope is 1° , followed by 4° , the best aspect ratio is 1~1.5, and the best height is 30~40 mm.

KEY WORDS: pulp molded product; shape; structural parameters; bearing capacity; buffer performance

近年来随着物流行业的兴起,包装缓冲材料诸如EPE、EPS等,由于低成本、高性能等优点而得以应用广泛,但难回收、难降解等问题给自然环境带来了不可逆转的危害^[1-2],因此以纸代塑迫在眉睫。纸浆模塑制品不仅环保价廉、可批量生产、对工人要求低,而且可以为商品提供良好的保护和缓冲作用^[3]。因而被广泛地应用在电子产品、农业产品、一次性餐具、特殊物品的包装等方面^[4-5]。

但是目前对纸浆模塑品的研究多集中于模具、成形设备、生产工艺、材料等对性能的影响等方面^[6-8],对结构的缓冲性能测试和评价标准的研究非常少。针对纸浆模塑品结构方面,Hoffmann等^[9]研究了纸浆模塑品结构形状与缓冲强度间的关系,认为圆柱体和锥体单元比立方体单元具有更好的缓冲性能;周防国等通过“L”形单元结构的静态压缩试验,证明了侧壁周长与承压能力之间存在线性关系^[10];计宏伟等^[11]通过研究四棱柱单元在静态压缩载荷下的屈曲行为,发现随着单元壁厚的增加,承载能力随之增加,但缓冲效果变弱。王殿军等^[12]对纸浆模塑品进行动态压缩仿真分析,讨论了纸浆模塑制品的高度、周长、形状的变化对其缓冲性能的影响。

综上,国内外对纸浆模塑品结构方面的研究大多数集中于静态压缩和承载性能,不足以解决缓冲结构设计问题。目前缓冲结构设计具有很大盲目性,一般凭借产品形状和设计师的经验^[13],一旦不符合要求就需要重新制造,返工代价大。因此文中将研究不同单元结构纸浆模塑品的承载及在异面动态压缩下的缓冲吸能特性,为纸浆模塑品的缓冲性能评价及相关研究提供更多参考,为缓冲结构设计提供一定依据。

1 试验与仿真模型

1.1 材料力学性能试验

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)》^[14]对图1试样进行拉伸试验,试样尺寸为60 mm×15 mm,进行了16次试验以保证得到10个有效结果。图2为各试样的载荷-位移曲线及均值曲线,对均值曲线处理得到应力-应变

曲线如图3所示。对应力-应变曲线进行处理,可得到材料的力学性能参数,弹性模量为173.5 MPa,屈服应力为0.7 MPa,正切模量为85 MPa,参考文献泊松比取0.01。通过测量、计算得到材料密度为370 kg/m³。



图1 拉伸试样
Fig.1 Tensile test sample

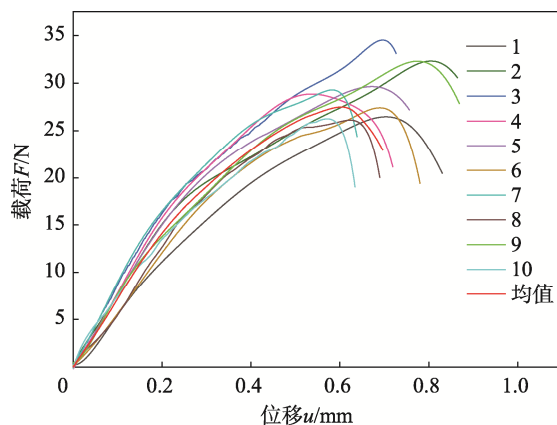


图2 载荷-位移曲线
Fig.2 Load-displacement curve

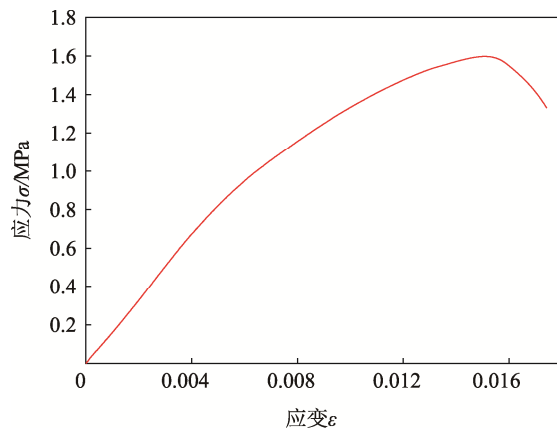


图3 应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curve

1.2 有限元模型

1.2.1 有限元冲击模型

本文使用 Creo 建立几何模型, 使用 Ansys Workbench2020/LS-DYNA 建立有限元模型, 冲击模型示意如图 4 所示。纸浆模塑品试样在 2 个刚性板之间, 上压板 P1 只保留垂直方向的移动自由度, 下支撑板 P2 代表底面, 约束所有方向自由度, P1 以恒定速度 v 向下冲击压缩, 直至样品密实。

纸浆模塑材料模型选择各向同性双线性塑性硬化模型, 材料参数见 1.1 节, 刚性板的弹性模量为 2×10^5 MPa, 泊松比为 0.3, 密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$ 。纸浆模塑品是薄壳类结构, 因此采用 Belytschko-Tsay 壳单元 181 进行网格划分。以底面边长 $a=40\text{ mm}$ 、 $H=40\text{ mm}$, 斜度为 11° 的四棱台单元为研究对象, 对不同网格大小的模型进行计算。如表 1 所示, 网格密度小于 1 mm 时, 仿真等效最大应力值收敛并趋于稳定, 考虑计算时间和精确度, 确定网格大小为 1 mm 。考虑实际试验情况、条件及材料的粗糙度, 定义刚性板与纸浆模塑品之间的接触为摩擦。静、动摩擦因素分别为 0.2 和 0.15。

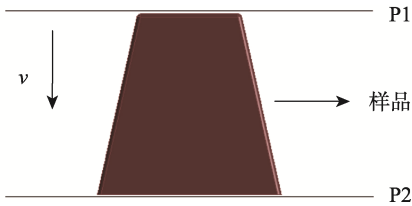


图 4 有限元冲击模型
Fig.4 Finite element impact model

表 1 不同网格大小的最大应力值
Tab.1 Maximum stress values for different grid sizes

网格尺寸	最大应力/MPa
1.5	85.04
1.35	98.95
1.2	106.52
1	115.59
0.85	118.32
0.7	117.62

1.2.2 模型尺寸和冲击速度

为了研究形状对纸浆模塑品性能的影响, 建立了与实物尺寸一致的四棱台和圆台单元几何模型, 并建立了与四棱台上、下面周长尺寸一致的十字单元模型。图 5 所示为 3 种形状单元的结构示意图。四棱台单元尺寸: $a=80\text{ mm}$ 、 $L=45\text{ mm}$ 、 $H=80\text{ mm}$, 圆台单元尺寸: $D=80\text{ mm}$ 、 $d=50\text{ mm}$ 、 $H=80\text{ mm}$, 壁厚 $t=1.1\text{ mm}$ 。综合考虑计算时间与实际情况, 以 20 mm/s

对以上模型分别进行准静态压缩仿真, 动态冲击速度为 $2\,425.7\text{ mm/s}$ 。

在研究结构参数的影响时, 以四棱台为基础单元, 厚度 $t=1.1\text{ mm}$ 。不同斜度单元的底面边长 $a=40\text{ mm}$, 斜度取 $1^\circ\sim 11^\circ$, 试样 1 和试样 2 的高 H 分别为 40 mm 和 30 mm ; 不同高度单元的底面边长 $a=40\text{ mm}$, 高度取 $10\sim 50\text{ mm}$, 试样 1 和试样 2 的拔模斜度分别为 4° 和 1° 。不同长宽比单元的长宽尺寸见表 2。 $H=30\text{ mm}$ 时, 试样 1 和试样 2 的拔模斜度分别为 4° 和 1° 。长宽比为 1.5 的棱台单元见图 6。以上模型的动态冲击速度为 $2\,425.7\text{ mm/s}$ 。

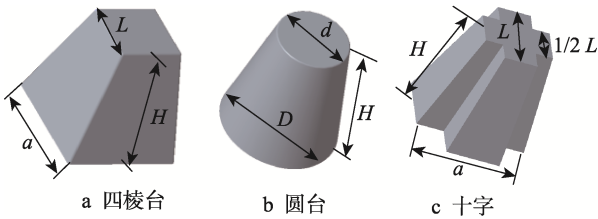


图 5 不同形状单元示意图
Fig.5 Schematic diagram of different shape units

表 2 不同长宽比单元的底面尺寸
Tab.2 Bottom dimensions of units with different aspect ratios

长宽比	底面尺寸 ($a \times b$) /mm
1	40×40
1.5	48×32
2	53×27
2.5	57×23
3	60×20
3.5	62.3×17.7

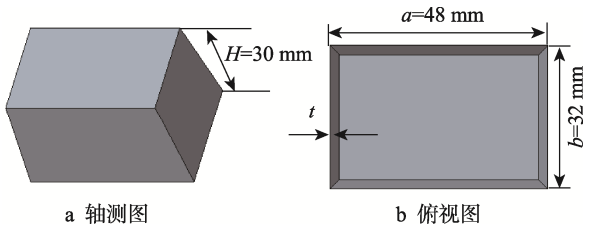


图 6 长宽比为 1.5 的棱台单元结构
Fig.6 Frustum unit structure with aspect ratio of 1.5

1.3 可靠性验证

1.3.1 压缩试验

使用万能试验机对四棱台和圆台 2 种单元进行静态压缩试验, 以验证仿真结果的可靠性。各取 6 个试样, 样品居中放置, 上板以 12 mm/min 的恒定速度向下压缩, 如图 7 所示。试验完成后得到载荷-位移曲线图及数据, 利用 origin 软件绘制均值曲线。

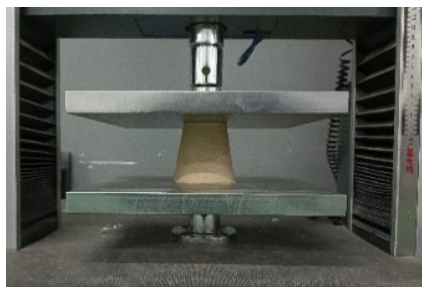


图7 圆台状单元压缩试验
Fig.7 Compression test of circular truncated cone unit

1.3.2 仿真模型可靠性分析

建立与四棱台和圆台同尺寸、同参数的有限元模型进行静态压缩仿真。四棱台单元有限元模拟与试验变形过程对比如图8所示。可以看到变形模式基本一致，顶部首先被压溃，随后四棱台边缘薄壁不断被压缩叠加以吸收能量，最后被压实，进入密实化阶段。

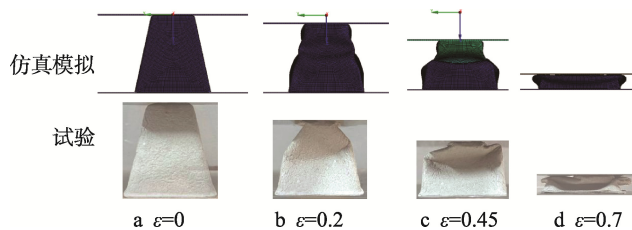


图8 四棱台变形过程
Fig.8 Deformation process of square frustum

表3列出了2种单元试验与仿真的极限承载力及误差。可以看到四棱台单元的仿真结果比试验结果大，圆台单元的仿真结果比试验结果小，2种形状的单元试验与仿真的相对误差均在10%以内。

表3 试验与仿真的误差
Tab.3 Error of test and simulation

形状	试验承载力/N	仿真承载力/N	误差/%
四棱台	106.99	117	9.36
圆台	217.61	202.04	7.71

图9、图10分别为2种结构试验与仿真的力-位移曲线对比。从曲线趋势来看具有很好的一致性。综合以上3个方面，可以证明仿真模拟的可靠性。

1.4 性能评价指标

极限载荷：在载荷-位移曲线中结构出现疲劳破坏前所能承受的最大载荷，是评价承载能力的重要指标。

能量吸收与单位体积能量吸收：以应力-应变曲线进行积分，并对应力 σ 作图，两者均除以弹性模量 E_s 进行标准化，所得到的曲线即为能量吸收曲线^[15]。能量吸收曲线肩点代表最佳吸能点，肩点纵坐标的值即为标准化单位体积最佳吸能值。

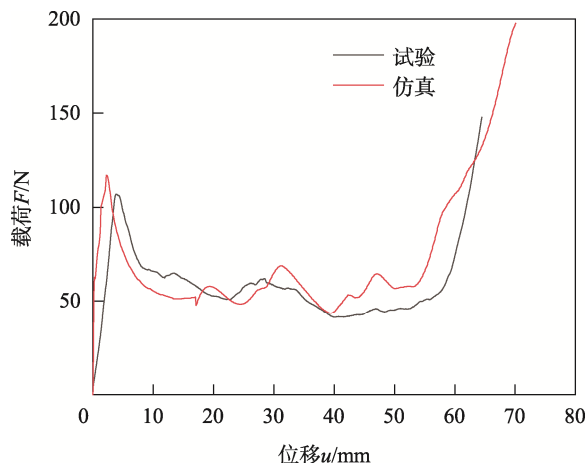


图9 四棱台单元载荷-位移曲线
Fig.9 Load-displacement curve of square frustum unit

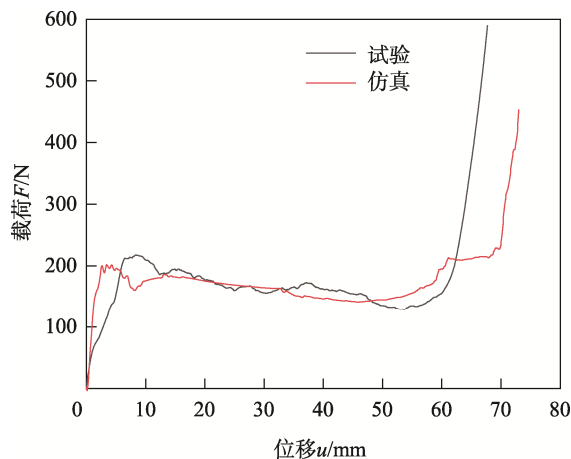


图10 圆台单元载荷-位移曲线
Fig.10 Load-displacement curve of circular truncated cone unit

总能量吸收 E_A ：是评价结构吸能能力的重要因素，结构变形过程密实化位移点前的总吸能量，计算公式为^[16]：

$$E_A = \int_0^{u_D} F du \quad (1)$$

式中： u 为位移； u_D 为密实化位移。

2 结果与分析

2.1 不同形状纸浆模塑品的性能

四棱台、圆台、十字3种不同形状单元纸浆模塑品的静态压缩和动态冲击模拟的载荷-位移曲线如图11所示，能量吸收图如图12所示。可以看出，在静态情况下，极限载荷从大到小依次为圆台、十字、四棱台；在动态情况下，极限载荷从大到小依次为圆台、四棱台、十字，由此看来圆台状单元的承载能力是最好的。静态压缩时，能量吸收曲线的肩点从左下到右上依次是四棱台、十字、圆台；动态冲击下，曲线的肩点从左下到右上依次为十字、四棱台、圆台。综合考虑承载和缓冲性能，圆台单元是最佳选择。

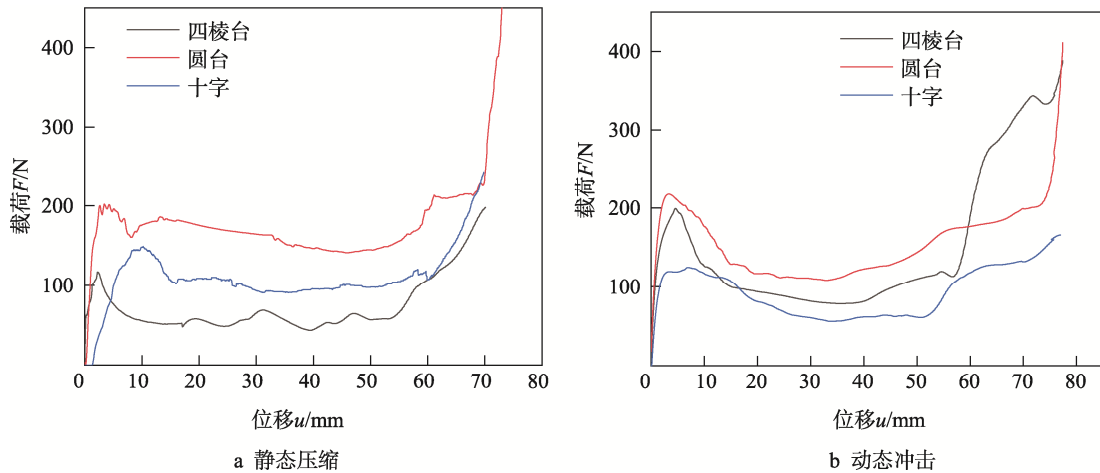


图 11 不同形状单元载荷-位移曲线

Fig.11 Load-displacement curves of different shape units

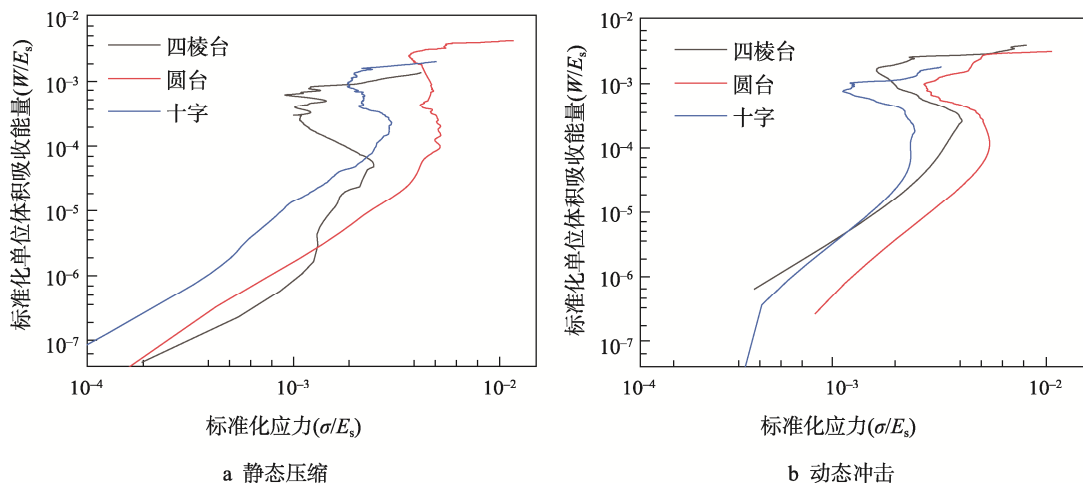


图 12 不同形状单元能量吸收

Fig.12 Energy absorption diagram of different shape units

2.2 不同结构参数对性能的影响

2.2.1 斜度对承载及缓冲性能的影响

图 13 为极限载荷随拔模斜度变化的曲线。从图 13 中可以看出斜度为 1° 时, 承载能力最强,

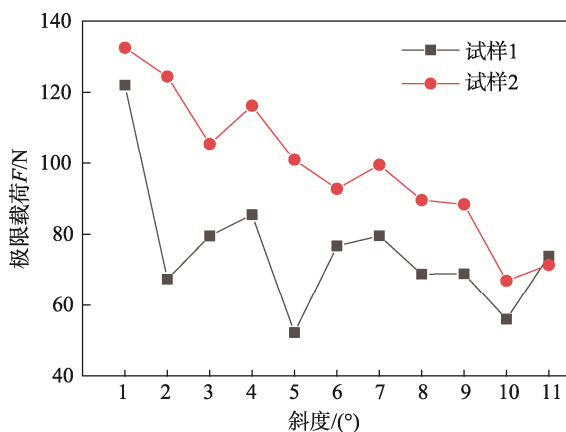


图 13 极限载荷-斜度曲线

Fig.13 Ultimate load-slope curve

接下来是 4° , 在 7° 之后承载能力有缓慢下降趋势。整体来看, 随着拔模斜度的增加, 极限载荷呈下降趋势。在结构设计时若重点考虑承载性能, 选择 1° 最佳, 如若 1° 脱模困难可选择 4° 。

标准化单位体积能量吸收随单元斜度的变化趋势如图 14 所示, 总能量吸收值见表 4。可以看出 2 个指标的变化趋势具有很好的一致性。试样 1 在 8° 和 1° 时吸能效果突出, 但在这 2 点周围吸能变化幅度较大, 而试样 2 在 8° 之后吸能量持续下降, 原因是拔模斜度过大或过小时, 纸浆模塑薄壁结构在被冲压时不稳定, 容易瞬间弯曲, 且薄壁叠加效果不佳, 不能达到很好的缓冲效果。综合分析 2 个试样的变化曲线可得, 拔模斜度过大时产品的缓冲保护效果不佳; 拔模斜度为 2° 时, 2 个试样的结果可能存在一定误差。总体来看斜度在 $1^\circ \sim 4^\circ$ 时吸能较多且变化相对稳定, 是缓冲结构设计的最佳斜度范围。

综合考虑承载及缓冲性能, 在进行缓冲结构设计时, 斜度在 $1^\circ \sim 4^\circ$ 较好, 选择 1° 最佳, 但需考虑实际生产条件, 4° 次之。

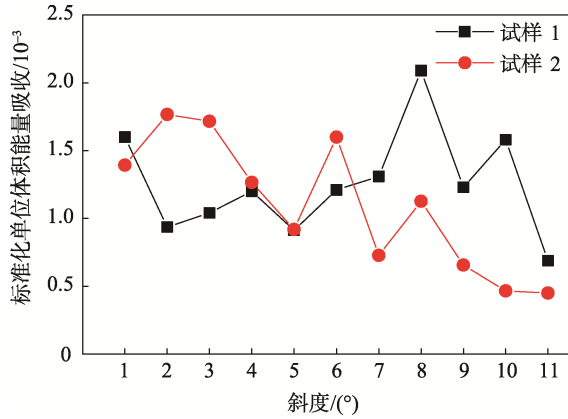


图 14 不同斜度单元的能量吸收
Fig.14 Energy absorption of different slope units

表 4 不同斜度单元总能量吸收
Tab.4 Total energy absorption of units with different slopes

斜度/(°)	总能量吸收/J	
	试样 1	试样 2
1	1.92	1.26
2	1.1	1.57
3	1.2	1.51
4	1.37	1.1
5	1.02	0.79
6	1.32	1.35
7	1.41	0.6
8	2.19	0.92
9	1.26	0.52
10	1.59	0.37
11	0.68	0.35

2.2.2 长宽比对承载及缓冲性能的影响

图 15 所示为极限载荷随长宽比变化的曲线。可以看出在高度、等效承载周长、厚度、斜度等不变的情况下,随着长宽比的增大,承载能力总体呈现下降趋势。说明在长宽比增大时,四棱台侧面 4 个面的约束效果有所减弱。在长宽比为 1.5 时,极限载荷最大,长宽比在 2.5 之后极限载荷变化幅度较大,说明此时结构不稳定。四棱台单元长宽比不断增大时,其逐渐变成肋状单元,可见肋状单元承载能力弱于四棱台单元。

图 16 为标准化单位体积能量吸收随长宽比增大的变化趋势。总能量吸收值如表 5 所示。可以看出随着长宽比的增加,总吸能和单位体积吸能总体呈现下降趋势,缓冲性能逐渐减弱,分析认为在长宽比不断增大时,结构更加不稳定,容易出现瞬间失稳现象并产生巨大变形,导致缓冲效果不佳。2 个试样分别在

长宽比为 1 和 1.5 时,吸能性能最好。长宽比为 3.5 时,极限载荷和能量吸收皆是最低。

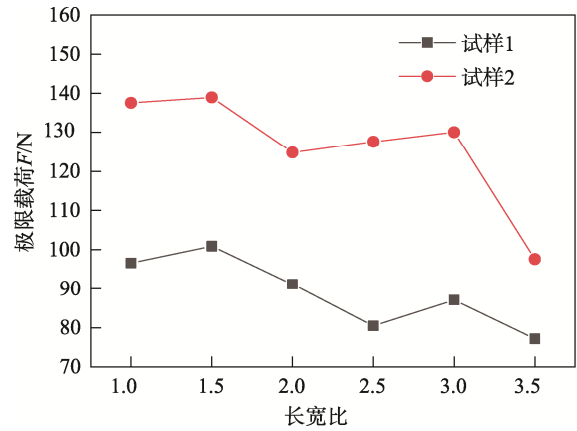


图 15 极限载荷-长宽比曲线
Fig.15 Ultimate load-aspect ratio curve

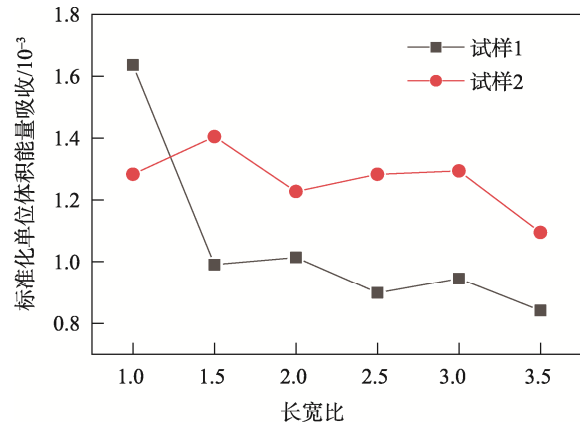


图 16 不同长宽比单元的能量吸收
Fig.16 Energy absorption of different aspect ratio units

表 5 不同长宽比单元总能量吸收
Tab.5 Total energy absorption of units with different aspect ratios

长宽比	总能量吸收/J	
	试样 1	试样 2
1	1.42	1.16
1.5	0.86	1.27
2	0.88	1.11
2.5	0.78	1.16
3	0.82	1.17
3.5	0.73	0.99

综合考虑承载和缓冲性能,进行缓冲结构设计时长宽比在 1~1.5 时最佳。

2.2.3 高度对承载及缓冲性能的影响

图 17 为极限载荷随高度变化的曲线。可以看出高度从 10 mm 增加到 35 mm 时,极限载荷逐步降低,

35 mm 之后极限载荷变化较不稳定。高度从 10 mm 升高到 15 mm 时, 2 个试样的极限载荷均降低了近 30%。由于高度变化幅度过大, 导致出现极限载荷骤变。高度在 15~25 mm 时, 极限载荷降低幅度比较平缓, 此时高度的变化幅度相对在减小。整体来看, 承载能力随着单元高度的增加而逐渐下降。

标准化单位体积能量吸收和总能量吸收随单元高度的变化趋势如图 18 所示。可以看出高度在 10~25 mm 时, 总能量吸收和单位体积能量吸收均逐渐降低, 总吸

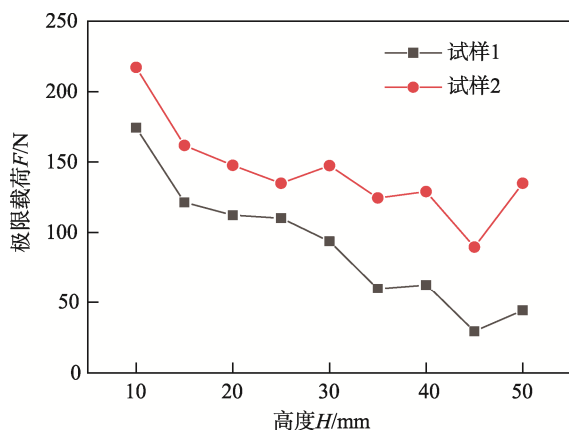
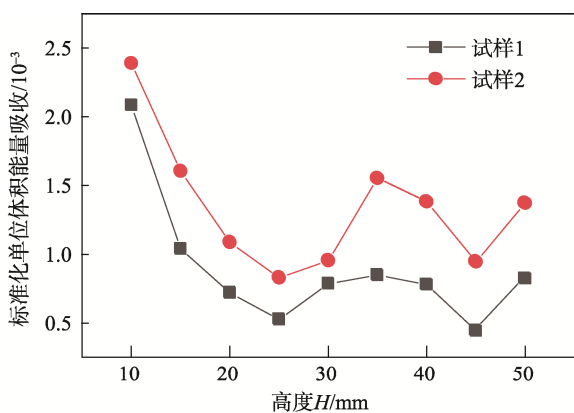
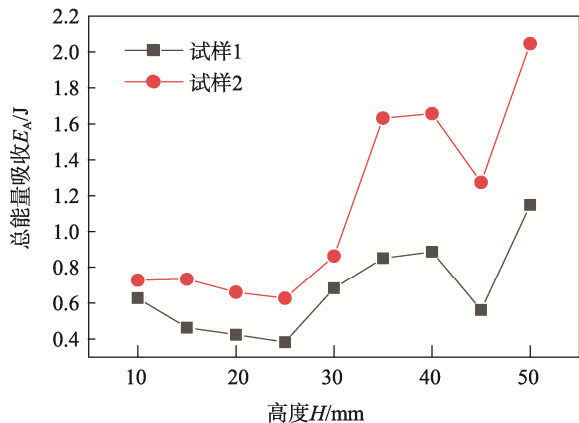


图 17 极限载荷-高度曲线
Fig.17 Ultimate load-height curve



a 标准化单位体积能量吸收曲线



b 总能量吸收曲线

图 18 不同高度单元的能量吸收
Fig.18 Energy absorption of units at different heights

能降低幅度很小; 在 25~40 mm 时, 随着高度增加总能量吸收不断增加, 这是由于此时高度的增加会延长制品被压缩至极限时的时间, 从而吸收更多的能量; 在 30~40 mm 时, 试样 1 的单位体积吸能量比较稳定, 试样 2 的单位体积吸能量虽然有些波动, 但整体表现出较好的吸能性能, 因此考虑该高度范围为较优选择; 40 mm 之后能量吸收变化幅度过大, 此时高度超过了底边长, 高度过高时在载荷作用下会产生弯曲现象, 缓冲效果反而会减弱。总体来看, 随着高度增加总能量吸收不断增加, 但结构设计需考虑高度与底边长的关系, 在一定范围内增加高度以达到更好的缓冲作用。

综合来看, 高度在 10~25 mm 时, 承载和缓冲性能均在下降, 不宜在此区间增加高度来达到吸能缓冲的作用。高度在 30~40 mm 时, 总能量吸收随高度增加而增加, 且具备一定承载能力, 在此区间设计缓冲结构可以达到很好的结果。

3 结语

本文通过异面动态压缩仿真, 研究了 3 种不同形状、不同斜度、长宽比、高度的纸浆模塑品的承载和缓冲吸能性能, 得出以下结论:

1) 将四棱台和圆台单元的静压仿真和试验结果进行对比, 极限载荷误差在 10% 以内, 验证了仿真的可靠性。从静态和动态两方面比较 3 种形状单元的性能, 圆台单元兼具较好的承载和缓冲性能。

2) 随着斜度增大, 极限载荷和吸能性能整体呈下降趋势。1° 时四棱台单元极限载荷最大, 1°~4° 时吸能性能较好且变化相对稳定。因此进行缓冲结构设计时斜度为 1°~4° 比较理想, 选择 1° 时最佳, 但需考虑实际生产条件, 4° 次之。

3) 总体来看, 随着长宽比的增大, 承载能力和吸能性能均呈现下降趋势。长宽比为 1.5 时, 单元承载能力最强, 长宽比为 1~1.5 时, 吸能效果较好。因此, 进行结构设计时选择长宽比在 1~1.5 时最佳。

4) 整体来看, 承载能力随高度增加而下降。总吸能在 25~40 mm 内逐步升高, 且在 30~40 mm 时单位体积吸能比较稳定, 是缓冲结构设计的最佳选择。在增加高度时需要考虑高度与底边长的关系, 高度过高缓冲效果反而减弱。

参考文献:

- [1] MACLEOD M, ARP H P H, TEKMAN M B, et al. The Global Threat from Plastic Pollution[J]. Science, 2021, 373(6550): 61-65.
- [2] HOREJS C. Solutions to Plastic Pollution[J]. Nature Reviews Materials, 2020, 5: 641.
- [3] 黄昌海. 纸浆模塑制品的生产与设计要点[J]. 印刷技

- 术, 2016(24): 34-36.
- HUANG C H. Key Points of Production and Design of Pulp Molding Products[J]. Printing Technology, 2016(24): 34-36.
- [4] DEBNATH M, SARDER R, PAL L, et al. Molded Pulp Products for Sustainable Packaging: Production Rate Challenges and Product Opportunities[J]. BioResources, 2022, 17(2): 3810.
- [5] 佚名. 2022 年中国纸浆模塑发展现状与市场规模分析[J]. 纸和造纸, 2021, 40(6): 63.
- Anon. Analysis of Development Status and Market Size of Pulp Molding in China in 2022[J]. Paper and Paper-making, 2021, 40(6): 63
- [6] QIN C, LI J, WANG W, et al. Improving Mechanical Strength and Water Barrier Properties of Pulp Molded Product by Wet-end Added Polyamide Epichlorohydrin/Cationic Starch[J]. ACS omega, 2022, 7(26): 22173-22180.
- [7] 张海艳, 张红杰, 程芸, 等. 无氟有机硅乳液改善纸浆模塑包装材料防水防油性能研究[J]. 中国造纸学报, 2022, 37(3): 94-101.
- ZHANG H Y, ZHANG H J, CHENG Y, et al. Study on Improving Water and Oil Resistance of Molded Pulp Packaging Materials with Organic Fluorine-Free Silicone Emulsion[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2022, 37(3): 94-101.
- [8] DISLAIRE C, GROHENS Y, SEANTIER B, et al. The Impact of Molded Pulp Product Process on the Mechanical Properties of Molded Bleached Chemi-Thermo-Mechanical Pulp[J]. Functional Composite Materials, 2021, 2(1): 7.
- [9] HOFFMANN J. Compression and Cushioning Characteristics of Moulded Pulp Packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2000, 13(5): 211-220.
- [10] 周防国, 袁东亮, 张新昌. 纸浆模塑制品单元结构侧壁周长与承压能力的关系[J]. 包装工程, 2005, 26(4): 12-14.
- ZHOU F G, YUAN D L, ZHANG X C. The Relationship between Side Perimeters and Carrying Capacity of the Unit Structure in Molded Pulp Product[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(4): 12-14.
- [11] 计宏伟, 王和敏, 陈金龙. 纸浆模塑制品结构单元承载能力的数值分析[C]// 中国力学学会北方七省市自治区第十三届学术大会论文集, 郑州, 2010: 246-250.
- JI H W, WANG H M, CHEN J L. Numerical Analysis of Bearing Capacity of Structural Units of Molded Pulp Products[C]// Proceedings of the 13th Academic Conference of Seven Northern Provinces and Cities of Chinese Mechanics Society, Zhengzhou, 2010: 246-250.
- [12] 王殿君, 耿东伟, 曹国荣. 纸浆模塑结构参数对其缓冲性能影响的仿真研究[J]. 包装工程, 2008, 29(6): 4-5.
- WANG D J, GENG D W, CAO G R. Simulation Research on the Influence Structural Parameter of Paper-Pulp Moulding on Cushion Performance[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 4-5.
- [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] 国家市场监督管理总局. 纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法(20 mm/min): GB/T 12914—2018[S]. 北京: 质检出版社, 2018: 1-6.
- The State Administration for Market Regulation. Determination of Tensile Strength of Paper and Cardboard by Constant Speed Tensile Method (20 mm/min): GB/T 12914-2018[S]. Beijing: Quality Inspection Press, 2018: 1-6.
- [15] 王志伟, 姚著. 蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 49-55.
- WANG Z W, YAO Z. Experimental Investigation and Finite Element Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paperboards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 49-55.
- [16] LIU Q, SHEN H, WU Y, et al. Crash Responses Under Multiple Impacts and Residual Properties of CFRP and Aluminum Tubes[J]. Composite Structures, 2018, 194: 87-103.