

多层 A 楞瓦楞纸板面内冲击响应特性研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.1010

王明淇 卢富德

湖南工业大学

包装与材料工程学院

湖南 株洲 412007

摘要:采用显式动力有限元法对多层 A 楞瓦楞纸板的面内动力学响应与能量吸收特性进行数值研究,建立多层 A 楞瓦楞纸板的有限元模型,讨论不同冲击速度和相对密度对多层瓦楞结构变形模式、致密化应变、平台应力和质量比吸能的影响。研究表明:冲击速度和相对密度越大,面内变形模式越均匀,致密化应变越大,多层 A 楞瓦楞纸板具有更强的平台应力和能量吸收能力。基于能量效率法和一维冲击波理论给出动态致密化应变和平台应力的经验公式,以表征多层瓦楞结构面内冲击的动态承载能力。基于简化的本构关系,绘制出动态能量吸收图,拟合得到相对密度方程和应变率方程。数值算例表明:在给定条件下,运用相对密度方程和应变率方程可以优化材质选择和结构设计,最大限度发挥包装材料缓冲作用。

关键词:多层 A 楞瓦楞纸板;面内冲击响应;本构关系;能量吸收特性

中图分类号: TB485.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)01-0080-08

引文格式:王明淇,卢富德.多层 A 楞瓦楞纸板面内冲击响应特性研究[J].包装学报,2025,17(1):80-87.

纸质缓冲包装材料是理想的环保型缓冲包装材料。多层瓦楞纸板作为纸质包装材料,由单个瓦楞结构规则复合而成,由于其具有易回收、成本低、优良缓冲吸能特性等优点而在包装中得到广泛应用^[1]。目前对多层瓦楞纸板的研究多集中于瓦楞结构面外(ZD)方向的缓冲能力。如 P. Naganathan 等^[2]通过研究叠合而成的多层瓦楞结构准静态压缩实验,拓宽了瓦楞纸板结构在缓冲设计中的应用范围。Hou S. J. 等^[3]利用有限元数值模拟和试验研究,探究了多层瓦楞结构在不同排列方式下,夹层层数和构型对结构的能量吸收和破坏机理的影响。鄂玉萍^[4]建立了多层瓦楞纸板平台应力的预测模型和能量吸收模型,并考虑了湿度效应和应变率效应的影响。针对于瓦楞纸板面内方向的缓冲性能研究主要集中于横向(CD),

而对纵向(MD)的研究甚少。R. Biagi 等^[5]运用数值和实验方法研究单层瓦楞结构的面内动力学响应,确定失效机制包括面部折叠、剪切屈曲和宏观屈曲,并给出具体的失效公式。P. E. Åslund 等^[6]通过有限元模拟深入揭示了瓦楞纸板面部起皱的失效机理。白海龙等^[7]通过瓦楞纸板面内静态压缩,基于 DIC 方法计算瓦楞纸板的泊松比值。目前在实际的工程应用中,瓦楞纸箱的抗压强度简化公式是以单层瓦楞纸板纵向边压强度为基础,而对多层瓦楞纸板纵向边压强度认识还不够充分。单层瓦楞纸板纵向压缩易发生屈曲失稳,而多层瓦楞纸板纵向压缩不容易失稳,具有较长的平台期、良好的能量吸收能力,因此对多层瓦楞纸板纵向的冲击响应特性展开研究很有必要,有一定的应用前景和实用价值。

收稿日期: 2024-10-15

基金项目:湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目(22A0397);湖南省自然科学基金资助面上项目(2022JJ30223)

作者简介:王明淇,男,硕士生,主要研究方向为产品包装安全与环境,E-mail: 2924904195@qq.com

通信作者:卢富德,男,副教授,博士,主要从事缓冲包装动力学研究,E-mail: lu673153@163.com

本研究拟以多层 A 楞瓦楞纸板为研究对象, 采用显式动力有限元法获取纵向压缩的力学性能参数, 研究不同的相对密度及冲击速度对多层瓦楞纸板的变形模式、致密化应变、平台应力及能量吸收特性的影响, 拟合动态能量吸收曲线族得到应变率方程和相对密度方程, 以期为多层瓦楞纸板面内方向的缓冲包装设计提供参考。

1 计算模型

1.1 有限元模型

基于非线性有限元软件 ABAQUS/Explicit 对多层 A 楞瓦楞纸板的面内冲击响应特性进行分析。多层 A 楞瓦楞纸板的有限元模型如图 1 所示。

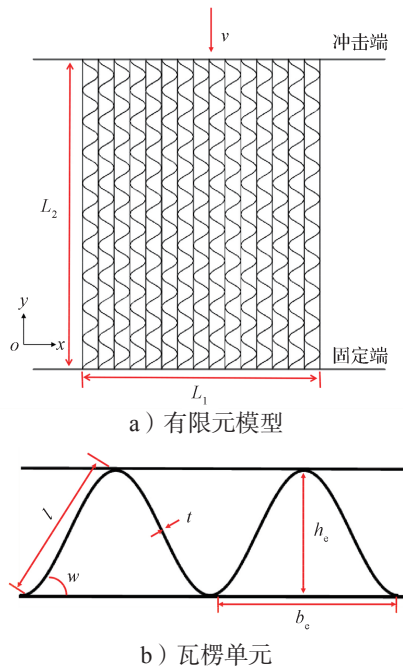


图 1 多层 A 楞瓦楞纸板的计算模型示意图

Fig. 1 Schematic calculation model of multi-layer A-flute corrugated cardboard

上下压板采用离散刚体, 单元类型为 R3D4 单元, 上压板以一定的速度向下移动, 下压板自由度全约束, 由于瓦楞纸板在包装应用领域多处于中低应变率冲击范围内, 故冲击速度 (v) 取 0~10.00 m/s 之间, 其中包括常见的跌落高度 (H) 60 cm (对应 $v=3.43$ m/s) 和 90 cm (对应 $v=4.20$ m/s)。多层 A 楞瓦楞纸板置于上下压板之间, 瓦楞高度 $h_c=4.5$ mm, 瓦楞宽度 $b_c=8.8$ mm, 下压板与多层 A 楞瓦楞纸板之间采用绑定约束^[8], 采用 S4R 壳单元进行离散。研究表明, 在 x 、 y 方向上的胞元数目超过 10 时, 多层 A 楞瓦

楞纸板的动力学响应趋于稳定^[9], 故瓦楞结构在 x 、 y 方向胞元数量设置为 15 和 10, 总尺寸宽度 $L_1=67.5$ mm, 高度 $L_2=88$ mm。为提高仿真数值精度以及收敛速度, 网格尺寸设置为 0.5 mm, 厚度方向取 5 个积分点, 面外厚度 $d=0.5$ mm, 同时约束面外位移, 以保证变形处于平面状态下。根据 GB/T 22895—2008《纸和纸板 静态和动态摩擦系数的测定平面法》, 测得瓦楞纸板的摩擦系数通常位于 0.3~0.6 之间^[10]。为防止模型的初始穿透, 将切向接触属性设为 0.3 的罚摩擦, 采用通用接触算法定义全局接触。瓦楞原纸的属性如表 1 所示。

表 1 原纸材料属性参数

Table 1 Base paper material property parameters

材料	纸密度 ρ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E / GPa	屈服强度 σ_{ys} / MPa	泊松比 μ
芯纸	700	3	15.15	0.3
面纸	700	5	60	0.3

1.2 几何结构和相对密度

以正弦曲线作为瓦楞纸板芯层的形状, 曲线方程为 $y=2.25\sin(0.714x)$ 。多胞材料的力学性能与其相对密度有关, 瓦楞夹层的相对密度可由式 (1) 给出^[11],

$$\Delta\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2t}{l \sin 2\omega}, \quad (1)$$

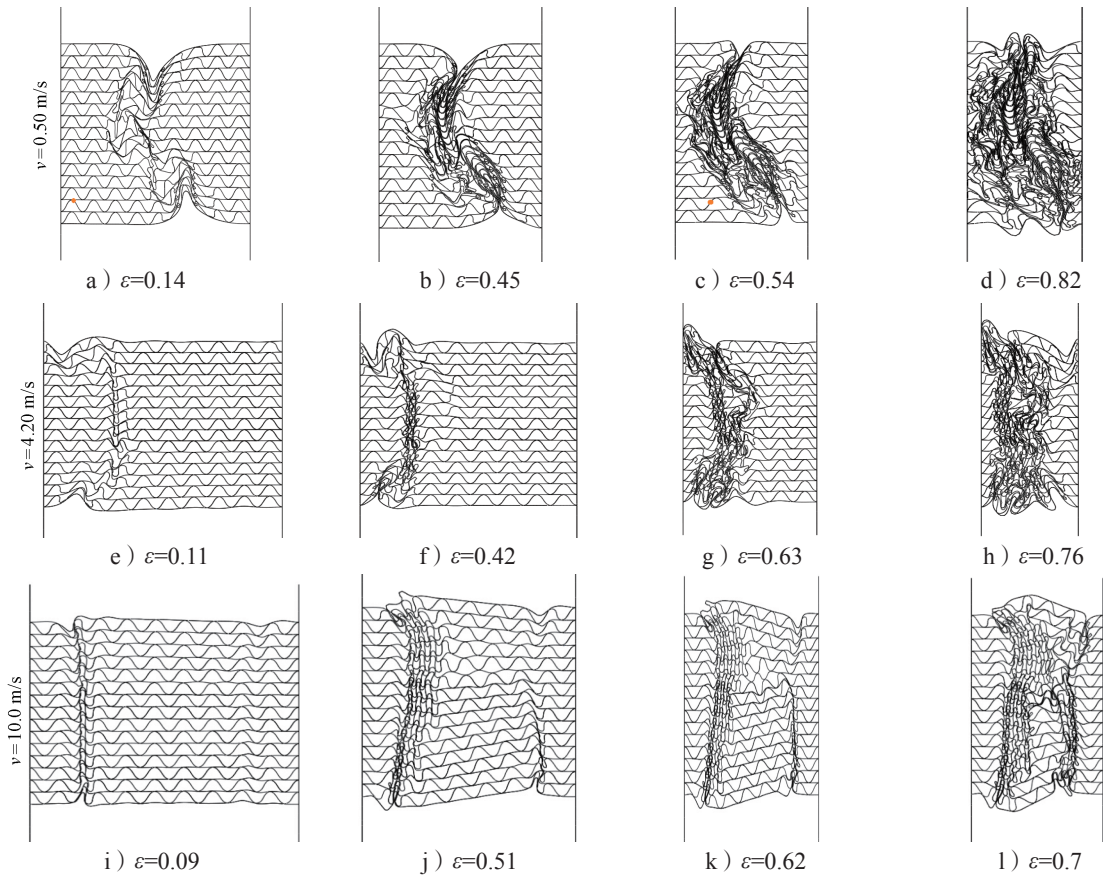
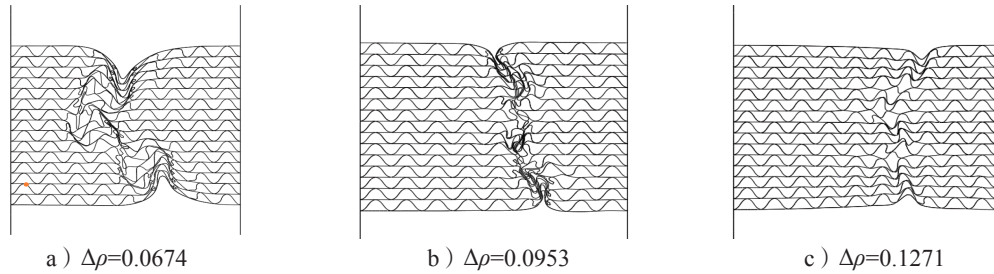
式中: ρ^* 为瓦楞结构的表观密度; ρ_s 为原纸材料的密度; t 为基材的厚度; l 为瓦楞结构的壁长; ω 为夹角度数。

2 面内冲击响应

2.1 面内冲击变形模式

多层 A 楞瓦楞纸板随应变 (ε) 的变形过程如图 2 所示。在低速冲击下, 瓦楞结构受压发生屈曲变形, 在纸板中间部分向内凹, 诱导相邻瓦楞结构层层递进, 产生 U 字的变形带, 呈现出负泊松比特性, 宏观上表现为轴向压缩-横向收缩现象。随着冲击速度的增加, 收缩位置逐渐靠近冲击端, 随后在固定端出现局部变形带, 自两端向中间收拢压实^[12]。冲击速度越高, 瓦楞结构在冲击端的局部变形越显著, 这是由负泊松比变形效应减弱和惯性效应增强所致^[13]。

图 3 是相对密度分别为 0.0674, 0.0953, 0.1271 的多层 A 楞瓦楞纸板在 $v=0.50$ m/s 时的动力学响应图。由图可知, 随着相对密度的提高, 瓦楞结构局部应力分布越分散, 局部变形减弱, 变形模式更均匀。故相

图 2 多层 A 楞瓦楞纸板在不同冲击速度下面内变形模式 ($\Delta\rho=0.0674$)Fig. 2 Multi-layer A-flute corrugated cardboard deformation patterns at different impact velocities($\Delta\rho=0.0674$)图 3 多层 A 楞瓦楞纸板在不同相对密度下面内变形模式 ($v=0.50$ m/s)Fig. 3 Deformation patterns of multi-layer A-flute corrugated cardboard at different relative densities ($v=0.50$ m/s)

对密度对多层瓦楞纸板面内冲击变形模式影响很大。

2.2 应力 - 应变曲线和致密化应变

瓦楞纸板的应力 (σ)、应变 (ε) 可由下式给出

$$\sigma = \frac{F}{L_1 \times d}, \quad (2)$$

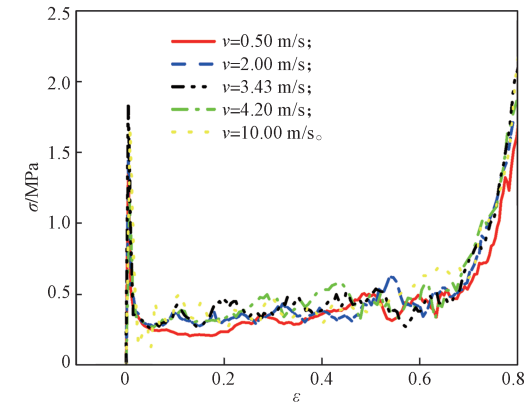
$$\varepsilon = \frac{x}{L_2}, \quad (3)$$

式中: d 为多层瓦楞纸板的厚度; x 为压缩位移; F 为压缩过程的施加载荷。

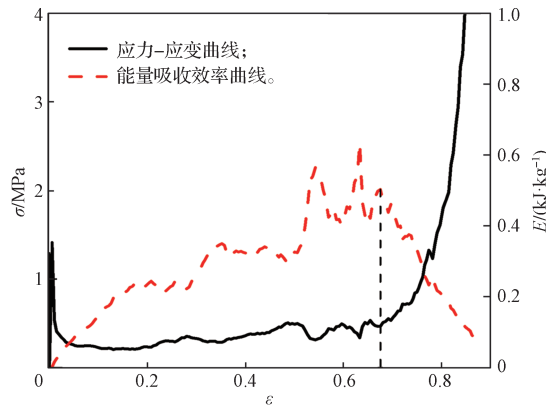
面内冲击下多层 A 楞瓦楞纸板的应力 - 应变曲

线如图 4 所示。应力 - 应变曲线可分为 4 个阶段: 线弹性阶段、屈服阶段、平台应力阶段、致密化阶段。在线弹性阶段, 应力随应变线性增长; 在屈服阶段, 瓦楞结构发生塑性屈曲失稳, 应力迅速下降从而形成尖峰; 在平台应力阶段, 应力趋于稳定; 在致密化阶段, 应力迅速提高, 瓦楞结构被压实, 失去缓冲效果。低速冲击下, 平台应力阶段在一段平缓区后波动上升, 这是因为在低速压缩下纸板横向收缩现象显著, 导致出现较高的局部刚度区, 从而产生一定的平台应力增强效应。在相对密度相同条件下, 相对于低

速冲击, 中速冲击下的平台应力阶段波动起伏更大, 平台应力更高, 结构的承载能力更强。



a) 不同冲击速度下的应力-应变曲线



b) 能量吸收效率曲线

图 4 面内冲击下多层 A 楞瓦楞纸板的应力-应变曲线

Fig. 4 Nominal stress-strain curves of multi-layer A-flute corrugated cardboard under in-plane impact

致密化应变 (ε_d) 是平台应力阶段与致密化阶段的转折点, 表征瓦楞纸板的压缩行程。本研究采用能量吸收效率法计算致密化应变, 如图 4 (b) 所示。能量吸收效率公式^[14]为

$$E(\varepsilon) = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \quad (4)$$

为避免人为选择的随机性, 取吸能效率-应变曲线的最后一个极值点作为致密化应变, 即

$$\left. \frac{dE(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \quad (5)$$

表 2 为多层 A 楞瓦楞纸板在不同冲击速度下的动态致密化应变。随着相对密度的增大, 瓦楞胞元之间更容易发生干涉重叠, 导致其内部可供变形的空间变小, 致密化应变减小^[15]。而冲击速度的提高会使结

构坍塌变形的惯性增大, 致密化应变提高。因此, 致密化应变是一个与冲击速度相关联的变量。故在相对密度函数的基础上引入冲击速度相关系数, 得到多层瓦楞纸板在中低速冲击下的致密化应变经验公式, 即

$$\varepsilon_d = a(1+bv)(1-c\Delta\rho), \quad (6)$$

式中: a 、 b 为与冲击速度相关的系数; c 为与相对密度相关的系数。

表 2 不同冲击速度下多层 A 楞瓦楞纸板的致密化应变

Table 2 Densification strain of multi-layer A-flute corrugated board under different impact velocities

$v/(m \cdot s^{-1})$	ε_d		
	$\Delta\rho=0.0674$	$\Delta\rho=0.0953$	$\Delta\rho=0.1271$
0.50	0.6700	0.6488	0.6245
2.00	0.6800	0.6550	0.6270
3.43	0.6850	0.6686	0.6376
4.20	0.6980	0.6721	0.6456
7.00	0.7121	0.6926	0.6616
10.00	0.7385	0.7152	0.6871

基于最小二乘法计算参数, 得 $a = 0.717$, $b = 0.01112$, $c = 1.1$ 。在不同速度下对不同相对密度的瓦楞纸板进行冲击模拟, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 仿真结果与经验公式 (6) 吻合较好, 证明经验公式 (6) 在预测面内冲击下多层瓦楞纸板的动态致密化应变的有效性。

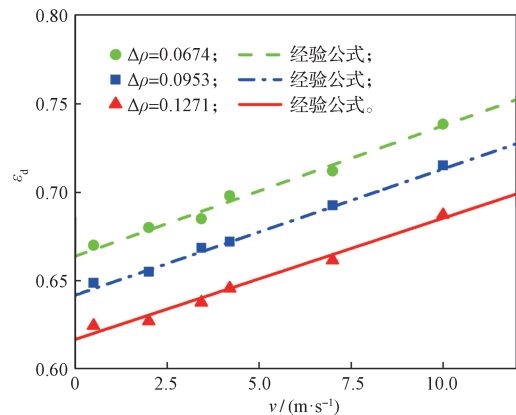


图 5 不同冲击速度下多层 A 楞瓦楞纸板致密化应变

Fig. 5 Relationship between densification strain and impact velocity of multi-layer A-flute corrugated cardboard

2.3 平台应力

多层瓦楞纸板在平台应力阶段通过塑性变形去吸收冲击能量, 从而达到缓冲减振效果^[4]。平台应力可由下式计算得出:

$$\sigma_p = \frac{\int_{\varepsilon_{cr}}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d(\varepsilon)}{\varepsilon_d - \varepsilon_{cr}}, \quad (7)$$

式中 ε_{cr} 为准静态平台应力 σ_{cr} 对应的应变值, 为确保计算的精度, 取 $\varepsilon_{cr}=0.02$ 。

基于一维冲击波理论, Tan P. J. 等^[16] 给出了动态平台应力公式, 即

$$\sigma_p = \sigma_{cr} + A v^2, \quad (8)$$

式中 A 为与表观密度相关的参数。

在有限元模拟中, 动能不超过内能的 5% 即可等效于准静态压缩实验, 而 0.50 m/s 速度下的动能远远小于内能, 故此速度下的平台应力可视为准静态平台应力^[17]。研究表明, 多胞材料的准静态平台应力与相对密度有关, 基于最小二乘法拟合得到:

$$\sigma_{cr} = 3.5621 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{0.88915}, \quad (9)$$

$$A = 1.4233 \times 10^{-6} \rho^* + 0.0012. \quad (10)$$

故面内冲击下多层 A 楞瓦楞纸板的平台应力经验公式为

$$\sigma_p = 3.5621 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{0.88915} + (1.4233 \times 10^{-6} \rho^* + 0.0012) v^2. \quad (11)$$

不同相对密度下多层 A 楞瓦楞纸板的平台应力与冲击速度关系如图 6 所示。

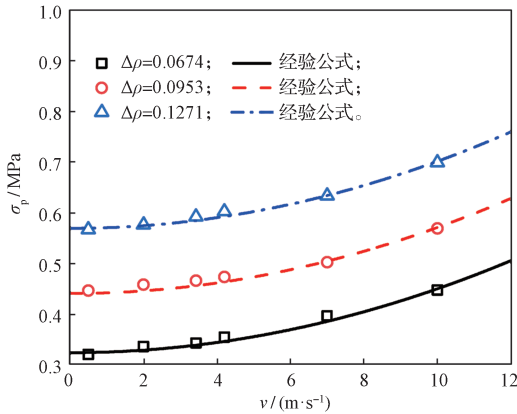


图 6 不同相对密度下多层 A 楞瓦楞纸板平台应力与冲击速度的关系

Fig. 6 Relationship between stress and impact velocity of multi-layer A-flute corrugated cardboard platform under different relative densities

由图 6 可知, 多层 A 楞瓦楞纸板的平台应力随冲击速度和相对密度的增大而增大^[17], 经验公式 (11) 与数值模拟结果拟合较好, 印证了式 (11) 的准确性。

3 能量吸收特性

3.1 质量比吸能

质量比吸能 E_m 表示单位质量的材料所吸收的能量, 是多孔材料评价能量吸收特性的重要指标^[18]。其表达式为

$$E_m = \frac{W}{\Delta \rho \rho_s}, \quad (12)$$

式中 W 为单位体积吸收能量, 即

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d(\varepsilon). \quad (13)$$

图 7 为不同相对密度的多层 A 楞瓦楞纸板在不同冲击速度下的质量比吸能。由图可知, 质量比吸能随着应变的增大而增大, 且在密实化后其增幅迅速增大。相对密度越大的多层瓦楞纸板, 在相同的应变下, 质量比吸能越大^[19]; 在相同应变、相对密度下, 冲击速度提高引起的质量比吸能增幅较小。

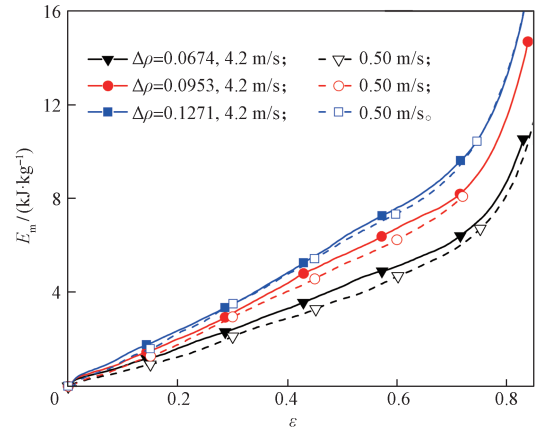


图 7 不同相对密度和冲击速度下多层 A 楞瓦楞纸板的质量比吸能对比

Fig. 7 Comparison of mass specific energy absorption of multi-layer A-flute corrugated board with different relative densities and impact velocities

3.2 能量吸收理论模型

能量吸收图是与物理模型相结合的经验方法。瓦楞纸板的本构关系可以采用“四段式”函数模型^[20]来描述:

$$\begin{cases} \sigma_j = E_1 \varepsilon_j, & 0 \leq \varepsilon_j \leq \varepsilon_0; \\ \sigma_p \leq \sigma_j \leq \sigma_{pk}, & \varepsilon_j = \varepsilon_0; \\ \sigma_j = \sigma_p, & \varepsilon_0 \leq \varepsilon_j \leq \varepsilon_d; \\ \sigma_j \geq \sigma_p, & \varepsilon_j = \varepsilon_d. \end{cases} \quad (14)$$

式中: σ_j 、 ε_j 分别为任意点的应力和应变值; ε_0 为线弹性阶段末期应变; σ_p 、 σ_{pk} 分别为平台应力和初始

峰应力; E_1 为多层 A 楞瓦楞纸板压缩载荷作用下的弹性模量。

ε_0 、 σ_{pk} 、 E_1 可由图 4 应力-应变曲线直接获得。用标准环境下测试的芯纸弹性模量 E 对各阶段的单位体积吸收能量进行标准化。各阶段能量吸收理论模型如下。

线弹性阶段的单位体积吸收能量为

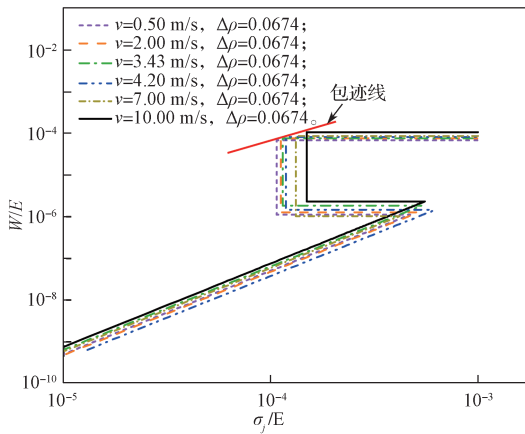
$$\frac{W}{E} = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_j \varepsilon_j}{E} = \frac{1}{2} \times \frac{(\sigma_j)^2}{E_1 E}, \frac{\sigma_j}{E} \leq \frac{\sigma_{pk}}{E} \quad (15)$$

屈服阶段几乎不吸收能量, 故只需将线弹性阶段的应力换为初始峰应力, 即

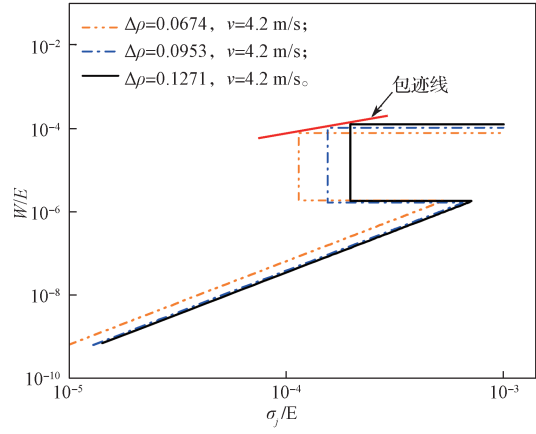
$$\frac{W}{E} = \frac{1}{2} \times \frac{(\sigma_{pk})^2}{E_1 E} \frac{\sigma_p}{E}, \leq \frac{\sigma_j}{E} \leq \frac{\sigma_{pk}}{E} \quad (16)$$

平台应力阶段的单位体积吸收能量为

$$\frac{W}{E} = \frac{\sigma_p (\varepsilon_j - \varepsilon_0)}{E}, \frac{\sigma_j}{E} = \frac{\sigma_p}{E} \quad (17)$$



a) $\Delta\rho=0.0674$



b) $v=4.2 \text{ m/s}$

图 8 不同条件下多层 A 楞瓦楞纸板的模型化能量吸收曲线

Fig. 8 Modeling energy absorption curves of multi-layer A-flute corrugated cardboard under different conditions

3.3 动态能量吸收图

将不同相对密度、冲击速度下多层 A 楞瓦楞纸板的包迹线绘制在同一坐标系之中, 得到其面内冲击的动态能量吸收图。由图 9 可知, 不同相对密度条件下的包迹线相互平行, 其间距与相对密度有关 (见图 9 中实线)。引入相对密度参数修正, 得到相对密度方程

$$\frac{W_{\max}}{E} = 0.9439 \frac{\sigma_{\max}}{E} - 3.073 \times 10^{-5} - 5.5 \times 10^{-4} (\Delta\rho - 0.0674) \quad (19)$$

不同应变率 ($\dot{\varepsilon}$) 下的包迹线也相互平行, 其间距与应变率有关 (见图 9 中虚线)。引入应变率参数

致密化阶段已失去缓冲效果, 单位体积吸收能量可忽略不计, 故保持平台阶段总吸能量, 即

$$\frac{W}{E} = \frac{\sigma_p (\varepsilon_d - \varepsilon_0)}{E}, \frac{\sigma_j}{E} \geq \frac{\sigma_p}{E} \quad (18)$$

多层 A 楞瓦楞纸板的动态能量吸收曲线如图 8 所示。图中, 致密化应变所对应的左上角肩点即为最佳吸能点, 表征材料的动态缓冲特性^[20]。最佳吸能点随着冲击速度和相对密度的增大而向右上方偏移。连接各速度下的最佳吸能点, 即可绘制相同相对密度下不同冲击速度的多层瓦楞纸板包迹线 (见图 8a), 同理也可绘制相同冲击速度下不同相对密度的多层瓦楞纸板包迹线 (见图 8b)。包迹线描述了不同冲击速度和相对密度条件下, 瓦楞纸板的最佳单位体积吸收能量 $W_{\max}$ 与最大许用应力 $\sigma_{\max}$ 的关系。由图 8 可知, 最佳单位体积吸收能量与最大许用应力成正比, 证明动态冲击下瓦楞纸板的能量吸收能力有所增强。

修正, 得到应变率方程

$$\frac{\sigma_{\max}}{E} = 0.55 \frac{\sigma_{\max}}{E} + 1.089 \times 10^{-5} + 1.366 \times 10^{-7} (\dot{\varepsilon} - 5.68) \quad (20)$$

借助动态能量吸收图, 能够优化缓冲包装的选材和设计, 提高缓冲效率^[4]。具体的用途有两种: 第一种用途是依据纸板结构参数来求纸板厚度。如给定重物质量 $m=10 \text{ kg}$ 、跌落高度 $H=0.6 \text{ m}$ 、接触面积 $A=0.01 \text{ m}^2$ 、产品脆值 $G=60g$, 选择 A 楞型瓦楞纸板, 若给定芯纸弹性模量 $E=2 \text{ GPa}$ 、纸板相对密度, 以及初始峰应力约为平台应力的 3 倍, 可得最大许用应力为 $\sigma_{\max}=mG/3A=0.2 \text{ MPa}$ 。将以上条件代入式

(19) 得最佳单位体积吸收能量 $W_{\max}=36\,460\text{ kJ/m}^3$, 纸板吸收全部冲击动能, 故纸板厚度可设计为 $L_2=mgH/(W_{\max}A)=0.165\text{ m}$ 。第二种用途是依据纸板厚度来优化芯纸选材。若芯纸弹性模量和纸板相对密度未知, 已知瓦楞纸板厚度 $L_2=0.05\text{ m}$, 最大许用应力 $\sigma_{\max}=0.2\text{ MPa}$, 应变率 $\dot{\varepsilon}=\sqrt{2gH}/L_2=69.3\text{ s}^{-1}$, 瓦楞纸板的最佳单位体积吸收能量 $W_{\max}=mgH/(AL_2)=120\text{ MJ/m}^3$ 。将以上条件代入式 (20) 反求出所需的芯纸最佳弹性模量 $E=0.5107\text{ GPa}$, 代入式 (19) 得相对密度 $\Delta\rho=0.256$, 最后结合式 (1) 得到最佳瓦楞楞型。

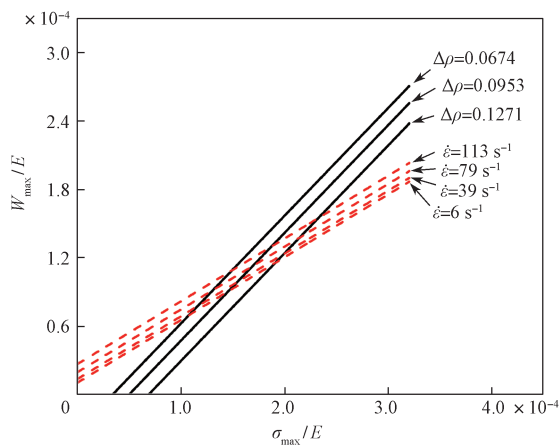


图 9 动态能量吸收图应用

Fig. 9 Dynamic energy absorption diagram application

4 结论

本文采用显式动力有限元法, 研究多层 A 楞瓦楞纸板在不同速度下的面内冲击响应特性。从动力学响应、变形模式、能量吸收特性方面得出以下结论:

1) 多层 A 楞瓦楞纸板的面内变形模式受冲击速度和相对密度的影响。冲击速度增大时, 横向收缩现象变弱, 负泊松比特性减弱, 此时惯性效应占据主导地位。瓦楞纸板相对密度增大时, 局部应力分散, 局部变形均匀, 从而变形模式更稳定。

2) 在中低应变率范围内, 致密化应变是一个与相对密度和冲击速度有关的变量。基于能量吸收效率法得到动态致密化应变的经验公式。冲击速度越大时, 致密化应变越大; 相对密度增大时, 致密化应变反而变小。基于一维冲击波理论得到动态平台应力经验公式。平台应力随冲击速度和相对密度的增大而增大, 数值模拟结果与经验公式结果保持高度一致性, 证明了经验公式的有效性。

3) 多层 A 楞瓦楞纸板的质量比吸能随应变和冲击速度的增大而增大; 相对密度越大的多层 A 楞瓦楞纸板, 其能量吸收能力越强, 质量比吸能受冲击速度的影响越小。

4) 根据致密化应变和平台应力经验公式, 构建动态能量吸收理论模型, 拟合得到相对密度方程和应变率方程。动态能量吸收理论模型综合考虑了不同因素对缓冲性能的影响, 为更有效地选择材质和设计结构提供依据。

参考文献:

- [1] 邱士庆, 王 燕, 张 阳. 基于 CiteSpace 的瓦楞纸包装研究热点与趋势知识图谱可视化分析 [J]. 北京印刷学院学报, 2024, 32(6): 61-66.
- [2] NAGANATHAN P, HE J M, KIRKPATRICK J. The Effect of Compression of Enclosed Air on the Cushioning Properties of Corrugated Fibreboard [J]. Packaging Technology and Science, 1999, 12(2): 81-91.
- [3] HOU S J, SHU C F, ZHAO S Y, et al. Experimental and Numerical Studies on Multi-Layered Corrugated Sandwich Panels Under Crushing Loading [J]. Composite Structures, 2015, 126: 371-385.
- [4] 鄂玉萍. 湿度和应变率对纸质缓冲材料能量吸收特性的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [5] BIAGI R, BART-SMITH H. In-Plane Column Response of Metallic Corrugated Core Sandwich Panels [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(26): 3901-3914.
- [6] ÅSLUND P E, HÄGGLUND R, CARLSSON L A, et al. Modeling of Global and Local Buckling of Corrugated Board Panels Loaded in Edge-to-Edge Compression [J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2014, 16(3): 272-292.
- [7] 白海龙, 陈南宁, 刘争号, 等. 基于数字图像相关法测定瓦楞纸板面内静态压缩泊松比 [J]. 包装学报, 2020, 12(3): 69-80.
- [8] 孙德强, 方众望, 罗显洲, 等. 多层 U 形 A 瓦楞结构材料的共面力学性能 [J]. 包装工程, 2014, 35(13): 8-12.
- [9] 罗 耿, 莫端钰, 刘浚哲, 等. 星型拉胀蜂窝材料在压剪复合加载下的力学特性研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(13): 183-192.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 纸和纸板 静态和动态摩擦系数的测定 平面法: GB/T 22895—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-2.

- [11] REJAB M R M, CANTWELL W J. The Mechanical Behaviour of Corrugated-Core Sandwich Panels[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 47: 267–277.
- [12] 黄欣洁, 王冬梅, 郭红革, 等. 蜂窝纸板弯曲破坏模式和机理研究 [J]. 包装学报, 2023, 15(4): 68–74.
- [13] 余 阳, 付 涛. 圆弧形蜂窝夹芯板在低速冲击下的动力响应研究 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(5): 214–222, 238.
- [14] WEI Y C, TIAN M J, HUANG C Y, et al. Topological Study About Failure Behavior and Energy Absorption of Honeycomb Structures Under Various Strain Rates[J]. Defense Technology, 2023, 24: 214–227.
- [15] MOU X Z, LU L X, ZHOU Y. Evaluation of In-Plane Compressive Densification Strain of Honeycomb Paperboard[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(4): 216528581.
- [16] TAN P J, REID S R, HARRIGAN J J, et al. Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminium Foams. Part I: Experimental Data and Observations[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53(10): 2174–2205.
- [17] ZHANG J X, YE Y, QIN Q, et al. Dynamic Compressive Response of Sinusoidal Corrugated Core Sandwich Plates[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2018, 10: 1850075.
- [18] CHEN H C, ZHANG Y, LIN J M, et al. Crushing Responses and Optimization of Novel Sandwich Columns[J]. Composite Structures, 2021, 263: 113682.
- [19] 滑广军, 陈 琬, 卢富德, 等. 蜂窝纸板缓冲曲线特征分析 [J]. 包装学报, 2018, 10(1): 1–7.
- [20] WANG D M, BAI Z Y, LIAO Q H. 3D Energy Absorption Diagram Construction of Paper Honeycomb Sandwich Panel[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018(1): 4067062.

(责任编辑: 邓 彬)

Research on In-Plane Impact Characteristics of Multi-Layer Corrugated Cardboard

WANG Mingqi, LU Fude

(College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The explicit dynamic finite element method was used to study the in-plane dynamic response and energy absorption characteristics of multi-layer A-flute corrugated cardboard. The finite element model of multi-layer A-flute corrugated cardboard was established, and the effects of different impact velocities and relative densities on the deformation mode, densification strain, platform stress and mass specific energy absorption of multi-layer corrugated structure were discussed. The results show that the higher the impact velocity and relative density, the more uniform the in-face deformation pattern and the greater the densification strain, the stronger platform stress and energy absorption capacity are equipped in the multi-layer A-flute corrugated cardboard. Empirical equations for dynamic densification strains and platform stresses are given based on the energy efficiency method and one-dimensional shock wave theory to characterize the dynamic load carrying capacity of multi-layer corrugated structures for in-plane impacts. Based on the simplified constitutive relationship, a dynamic energy absorption diagram is drawn, and the relative density equation and strain rate equation are fitted. Numerical examples show that the use of relative density and strain rate equations can optimize material selection and structural design to maximize the cushioning effect of the packaging material under given conditions.

Keywords: multi-layer A-flute corrugated cardboard; in-plane shock response; ontological relationship; energy absorption characteristics