负泊松比结构吸能性能与参数映射表征方法

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.0015

张 勇 晏宇枭 刘水长
连钰轲 蒋运波

湖南工业大学
机械工程学院
湖南 株洲 412007

摘 要：负泊松比结构虽具有卓越的力学性能，但其吸能特性与结构参数之间存在非线性耦合关系，难以通过传统方法有效量化。为此，以V型、凹角星型与内凹六边型3种典型负泊松比结构为研究对象，选取角度θ和壁厚t为关键变量，通过准静态压缩仿真获取总吸能、比吸能和峰值力等吸能指标。进一步，结合层次分析法（AHP）与模糊逻辑算法，构建吸能综合系数S的定量映射模型，并对3种结构的吸能性能进行系统评价。研究结果表明，结构性能与参数之间呈现出非线性映射关系，V型结构的比吸能随θ增大而衰减，而凹角星型结构的比吸能则随θ增大而增强，内凹六边型结构的总吸能对壁厚t变化最为敏感，随t增大显著增强。综合来看，凹角星型结构在θ=60°、t=1.5 mm参数组合下表现最优（S达到90），其总吸能大于40 J、比吸能为550 J/kg，呈现“大角度+厚壁”与高吸能的最优映射。

关键词：负泊松比结构；吸能性能；准静态压缩仿真；层次分析法；模糊逻辑算法

中图分类号：TB484 **文献标志码**：A

文章编号：1674-7100(2026)03-0072-10

引文格式：张 勇，晏宇枭，刘水长，等. 负泊松比结构吸能性能与参数映射表征方法[J]. 包装学报，2026，18(3)：72-81.

1 研究背景

负泊松比结构因其优异的抗压性和断裂韧性，逐渐成为研究热点[1-3]。近年来，各类新型负泊松比结构不断涌现，例如内凹-星型结构[4]、内凹板状结构[5]、四韧带反手性结构[6]及正弦曲边三维结构[7]等。然而，现有研究多聚焦于几何参数与单一性能之间的机理分析与优化，且普遍遵循结构参数与力学性能呈线性关系的假设。例如，吴浩然[8]通过理论分析探讨了箭型负泊松比结构的等效力学参数与胞元几何参数的关联，揭示了其屈服滞后、刚度强化及强度增强等特性；朱旭晨等[9]基于理论力学构建了双V附翼型结构胞元参数与屈服强度的理论模型，并结合轴向压缩试验验证了壁厚对负泊松比蜂窝结构的显著影响；白临奇等[10]通过建立冲击载荷下的能量吸收模型，揭示了箭头型结构几何参数与等效应力之间的定量关系。随着研究的不断深入，复杂工程应用场景对负泊松比结构提出了更高要求。由于结构涉及参数众多，吸能性能评价指标难以有效界定结构的“优”与“劣”，导致结构参数与吸能性能之间难以建立精确的响应关系，而传统方法在处理多目标问题及参数间的非线性耦合关系时，普遍存在建模效率低、优化能力不足等问题[11-14]。例如，Li Q. N.等[15]为提升星形蜂窝结构的吸能性能，采用箭头形结构替代直腹板以增加塑性铰

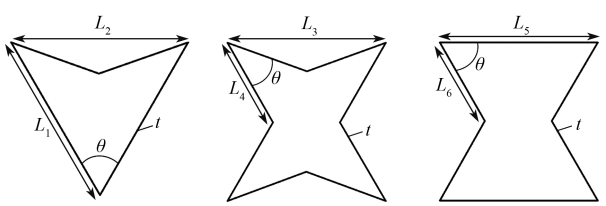
收稿日期：2025-01-20
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52372352）；湖南省重点研发项目（2025JK2070）；湖南省自然科学基金资助项目（2026JJ80113）
作者简介：张 勇，男，教授，主要从事车辆工程、空气动力学研究，E-mail：289714423@qq.com
通信作者：刘水长，女，副教授，主要从事复杂场流动特性研究，E-mail：37709356@qq.com

数量，并通过交叉组合方式调整倾斜壁的长度与角度以增强负泊松比效应。该方法主要通过反复试错来调整结构参数以达到预期目标，存在效率低、工作量大等不足，难以快速建立结构参数与吸能性能之间的映射关系。Wang W. J. 等 [16] 与 Liu X. 等 [17] 同样采用参数调整方式提升结构在冲击载荷下的能量吸收性能，但其优化目标导向较为单一且不够明确，难以有效处理多目标间的冲突关系，导致结构吸能性能的优劣界限模糊不清。因此，为应对不同结构与工况下的参数选择问题，亟须建立一个能够表征负泊松比结构综合吸能性能的模型，以实现结构参数与吸能性能之间的有效关联。基于此，以 3 种典型负泊松比结构为研究对象 [18-19]，通过仿真获取吸能性能指标，进而融合层次分析法（AHP）与模糊逻辑算法，构建吸能性能与结构参数之间的映射模型，旨在实现多参数与多性能指标的精准量化。

2　典型负泊松比结构

2.1　结构参数

3 种典型负泊松比结构的胞元图如图 1 所示。

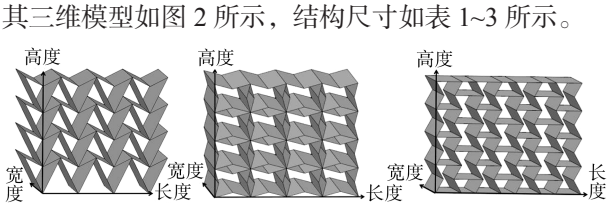


a）V 型　　b）凹角星型　　c）内凹六边型

图 1　负泊松比结构胞元图

Fig. 1　Negative Poisson's ratio structure unit cell

3 种结构的单胞元均具有几何对称特征，壁厚统一设定为 t，内凹夹角设为 θ。其中，V 型结构的大臂长度为 L_1，总长 L_2；凹角星型结构总长为 L_3，小臂长度为 L_4；内凹六边型结构总长为 L_5，小臂长度为 L_6。在上述二维基本构型基础上，通过沿 Z 轴方向进行拉伸扩展，构建了 4×4 阵列形式的负泊松比结构，其三维模型如图 2 所示，结构尺寸如表 1~3 所示。



a）V 型　　b）凹角星型　　c）内凹六边型

图 2　负泊松比结构三维模型

Fig. 2　3D model of negative Poisson's ratio structure

表 1　V 型负泊松比结构尺寸

Table 1　V-shaped auxetic structure dimensions

内凹夹角 θ/(°)	长度 /mm	宽度 /mm	高度 /mm
45	38.3	60	36.1
53	44.0	60	35.7
60	51.0	60	33.1

表 2　凹角星型负泊松比结构尺寸

Table 2　Concave star-shaped auxetic structure dimensions

内凹夹角 θ/(°)	长度 /mm	宽度 /mm	高度 /mm
45	51	60	60
53	51	60	60
60	51	60	60

表 3　内凹六边型结构尺寸

Table 3　Re-entrant hexagon structure dimensions

内凹夹角 θ/(°)	长度 /mm	宽度 /mm	高度 /mm
45	71.9	60	40
53	71.9	60	40
60	71.9	60	40

2.2　性能评价指标

负泊松比结构的名义应力与名义应变分别由式（1）和式（2）求得。

$$\sigma_a = \frac{P}{A}, \tag{1}$$

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta h}{h}, \tag{2}$$

式中：σ_a为负泊松比结构的压缩应力；P 为试验测得的压缩载荷；A 为负泊松比结构的横截面积；ε_a为负泊松比结构的压缩应变；h 为负泊松比结构的轴向高度；Δh为试验测得的位移。

对于多孔结构，其相对密度为结构单胞密度与结构基材密度的比值，即

$$\overline{\rho} = \frac{\rho_o}{\rho_s}, \tag{3}$$

式中：ρ_o为结构单胞密度；ρ_s为基体材料密度。

据此，V 型、凹角星型与内凹六边型结构的相对密度分别为式（4）~（6）。

$$\overline{\rho} = \frac{4t}{L_1 \sin\theta}, \tag{4}$$

$$\overline{\rho} = \frac{t(L_3 + 2L_4)}{L_3 L_4 \sin\theta}, \tag{5}$$

$$\overline{\rho} = \frac{t(L_5 + L_6)}{L_5 L_6 \sin\theta}。 \tag{6}$$

负泊松比结构的吸能特性主要取决于曲线中的

平台长度与平台应力水平。为定量评估其能量吸收能力，通常采用总吸能作为评价指标，其值通过对力－位移曲线进行积分求得，表达式为

$$EA=\int_0^{d_{\max}} F\mathrm{d}x, \tag{7}$$

式中：EA 为总吸能；$d_{\max}$ 为压缩位移；F 为位移对应的力。

单位质量吸能用 SEA 来表示，其表达式为

$$SEA=\frac{EA}{m}=\frac{EA}{\rho_s \rho \overline{V}_{总}}, \tag{8}$$

式中：m 为质量；$V_{总}$为结构总体积。

3 仿真与试验

3.1 有限元仿真与压缩试验

基于 SolidWorks 构建内凹夹角 θ=60°，壁厚 t=1.5 mm，长、宽、高分别为 70.77 mm × 70.65 mm × 41.5 mm 的几何模型，并采用 Hypermesh 与 LS-dyna 进行联合仿真。通过网格收敛性分析确定合适的网格尺寸，最终选取 0.5 mm × 0.5 mm 的网格划分方案。将建立的模型置于两块刚性墙之间，接触类型定义为常规单面接触（AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE），接触摩擦因数设为 0.3[20]。材料采用线性弹塑性模型 MAT_LINEAR_PIECEWISE_PLASTICITY（MAT_24）进行定义，计算中采用四边形壳单元。相关材料参数如表 4 所示[21]，所有参数均来源于负泊松比结构测试结果，以确保材料基础性能测试与结构性能测试所用试件的制备工艺保持一致。另外，底部刚性墙施加固定约束，顶部刚性墙以 5 mm/min 的速度对模型进行压缩，以精确模拟准静态加载工况。最后，通过 LS-DYNA 进行求解。

表 4 有限元仿真参数

Table 4 Material parameters

材料	密度 / (kg·mm^{-3})	杨氏模量 / MPa	屈服强度 / MPa	泊松比
尼龙 PA11	1.04×10^{-6}	2004	68	0.35

为验证数值模拟的准确性，搭建了基于万能试验机与高速摄像仪的准静态压缩试验台架（见图 3）。采用尼龙 PA11 材料和 3D 打印技术制备与几何模型尺寸一致的试验件，在与有限元仿真相同加载工况下进行试验件准静态压缩试验。试验与仿真压缩过程中的形变、应力应变及总吸能对比如图 4~5 所示。

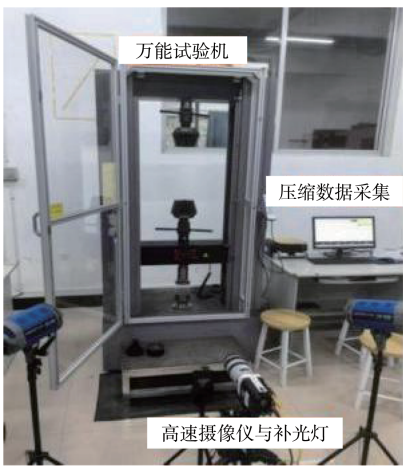
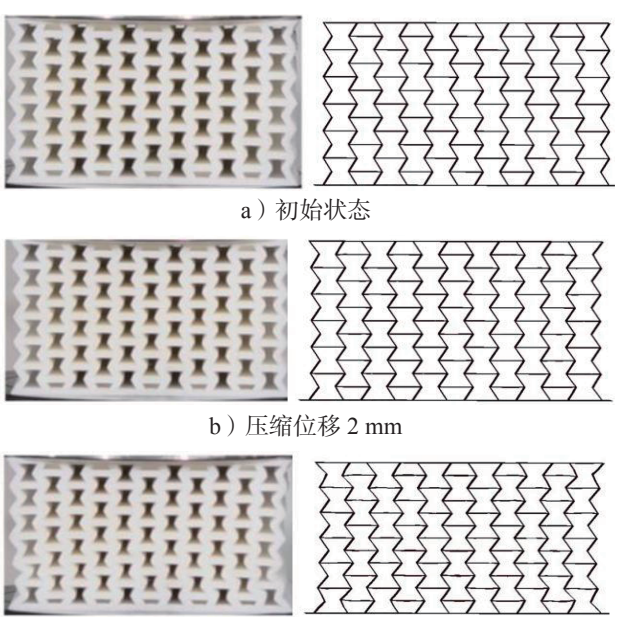


图 3 压缩试验台

Fig. 3 Compression test bench



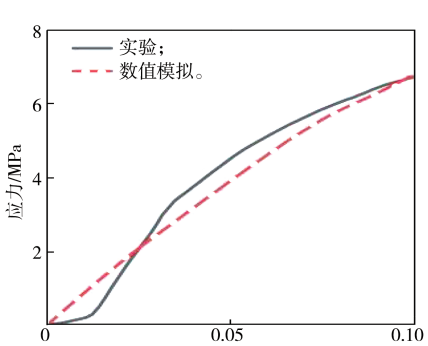
a）初始状态

b）压缩位移 2 mm

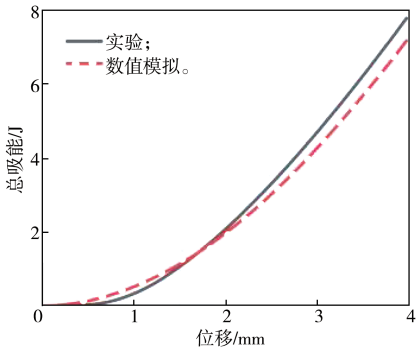
c）压缩位移 4 mm

图 4 压缩试验与仿真形变对比

Fig. 4 Comparison of compression test and simulated deformation



a）应力－应变曲线



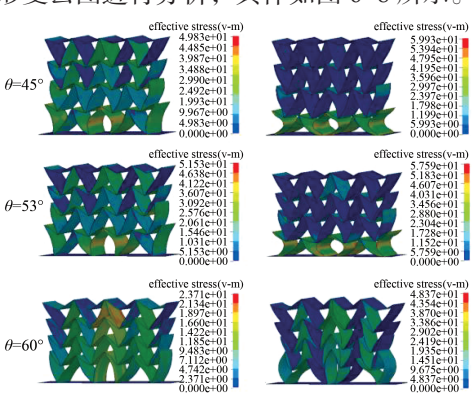
b）总吸能

图 5　应力－应变及总吸能对比

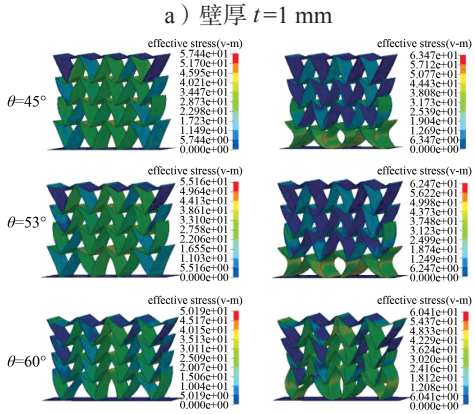
Fig. 5　Comparison of stress, strain and total energy absorption

在应力应变曲线的起始阶段，试验值的名义应力略低于模拟数值，主要因试验件与台架存在间隙，随后在加载过程中间隙消除，两者结果趋于一致，相对误差为 2.86%。此外，总吸能结果表现出良好一致性，相对误差仅 4.92%。

随后，采取有限元方法在不同角度和壁厚条件下对 3 种结构进行数值模拟。因压缩位移为 1 mm 时结构形变不明显，本文选取压缩位移为 2 mm 和 4 mm 时的形变云图进行分析，具体如图 6~8 所示。



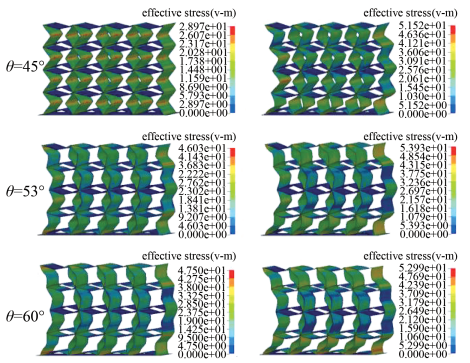
a）壁厚 t=1 mm



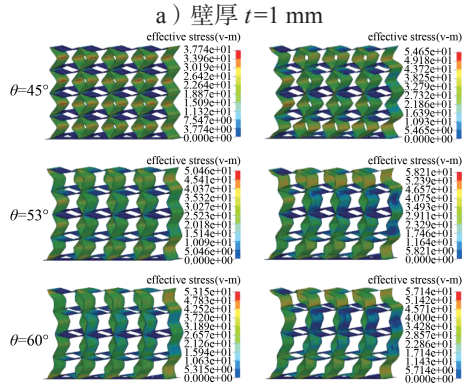
b）壁厚 t=1.5 mm

图 6　V 型结构形变云图

Fig. 6　V-shaped structure deformation cloud map



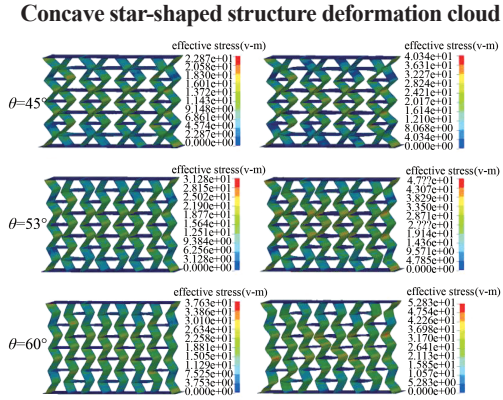
a）壁厚 t=1 mm



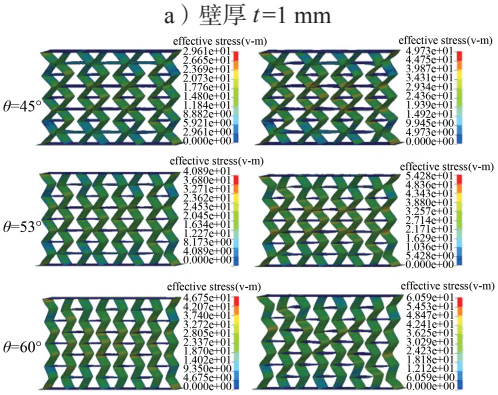
b）壁厚 t=1.5 mm

图 7　凹角星型结构形变云图

Fig. 7　Concave star-shaped structure deformation cloud map



a）壁厚 t=1 mm



b）壁厚 t=1.5 mm

图 8　内凹六边型结构形变云图

Fig. 8　Internal re-entrant hexagon structure deformation cloud map

由图 6 可知，当 V 型结构壁厚 t=1 mm 时（见图 6a），结构刚度偏低，应力分布对内凹夹角变化高度敏感。其中，θ=45° 时应力分布最均匀；θ=53° 时出现单侧应力偏载；θ=60° 时高应力集中于凹角区域的力传递节点，局部区域存在提前失效风险。当壁厚提升至 1.5 mm 后（见图 6b），结构刚度与力流均匀化能力显著增强，虽在相同角度下应力极值较薄壁有所升高，但高应力区从局部凹角区域扩散至整体胞元，有效规避了薄壁结构中局部失效问题，承载稳定性大幅提升。

由图 7 可知，当凹角星型结构壁厚 t=1 mm 时（见图 7a），θ=45°、位移为 2 mm 工况下力传递分散均衡，形变规整，高应力区小且对称；θ=53°、位移为 4 mm 工况下力流偏右，形变不对称，高应力区扩大，等效应力达到最大值；θ=60° 工况下应力定向强化，形变极端化，凹角接近失效临界。壁厚 t=1.5 mm 时（见图 7b），刚度提升使应力分布更均匀，高应力区范围与极值均减小，有效抑制应力集中与失效趋势。综上所述，薄壁结构应力集中更为显著，且随壁厚增加有所减轻，失效风险呈非线性增长。

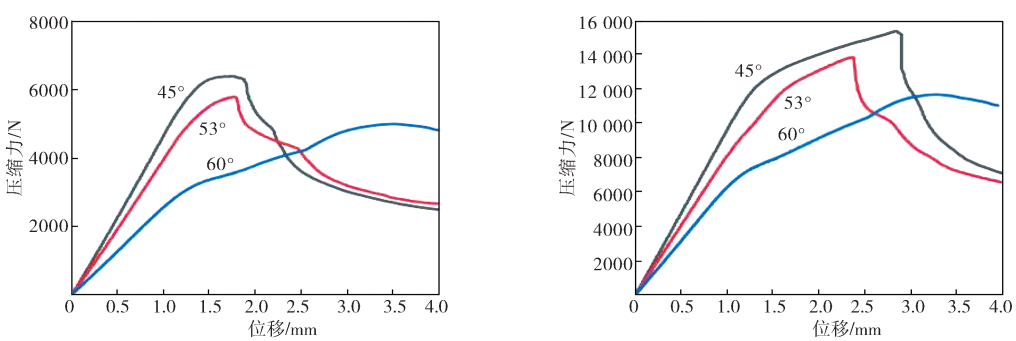
由图 8 可知，当内凹六边型结构壁厚 t=1 mm 时（见图 8a），结构刚度较弱，载荷易局部集中，高应力区明显。其中，θ=45° 时应力分布较规整；θ=53° 时力流呈单侧偏好，形成“应力热点”；θ=60° 时高应力区覆盖关键传力路径，凹角出现失效趋势。当壁厚 t=1.5 mm 时（见图 8b），力流传递更顺滑，低应力区占比增大，有效抑制应力集中。虽 θ=60° 时应力集中加剧，但应力极值较薄壁降低 10%~15%，表明厚壁可通过提高刚度来提升承载能力。

3.2 性能分析

基于上述数值模拟结果，绘制出 3 种结构在不同壁厚与角度下的压缩力－位移曲线，如图 9~11 所示。

由图 9~11 可知，尽管在壁厚与角度的耦合作用下，3 种结构压缩力的峰值表现出明显的非线性特征，但随着壁厚增加，各结构的压缩力－位移曲线趋势趋于一致。因此，本文后续以壁厚 t=1.5 mm 为例，对比评估 3 种结构的关键指标（见图 12）。

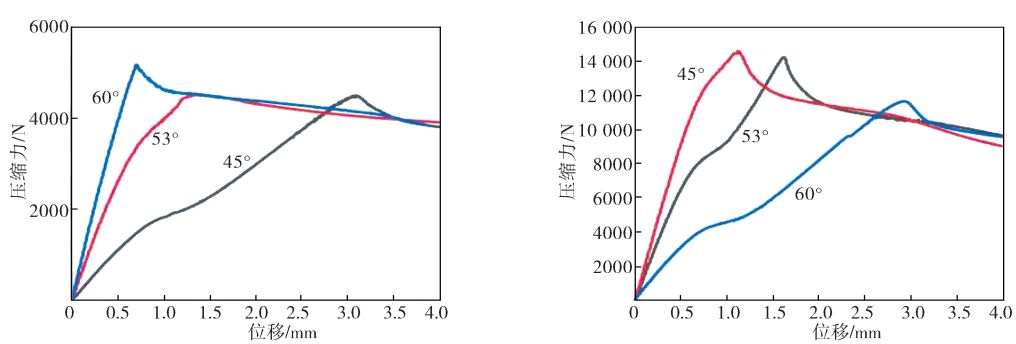
由图 9~12 可知，单参数分析与多参数耦合分析共同揭示了不同结构力学性能的演变规律，且各结构对设计参数的响应特征存在显著差异。在单参数作用



a）壁厚 t=1 mm　　b）壁厚 t=1.5 mm

图 9　V 型结构压缩力－位移曲线

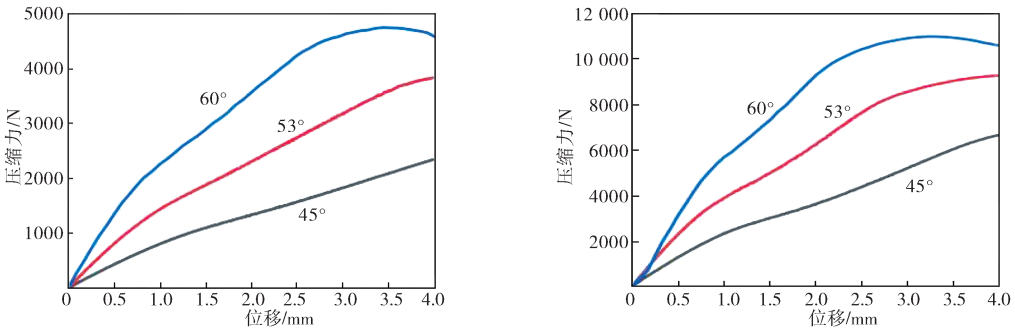
Fig. 9　Force-displacement curve of V-shaped structure



a）壁厚 t=1 mm　　b）壁厚 t=1.5 mm

图 10　凹角星型结构压缩力－位移曲线

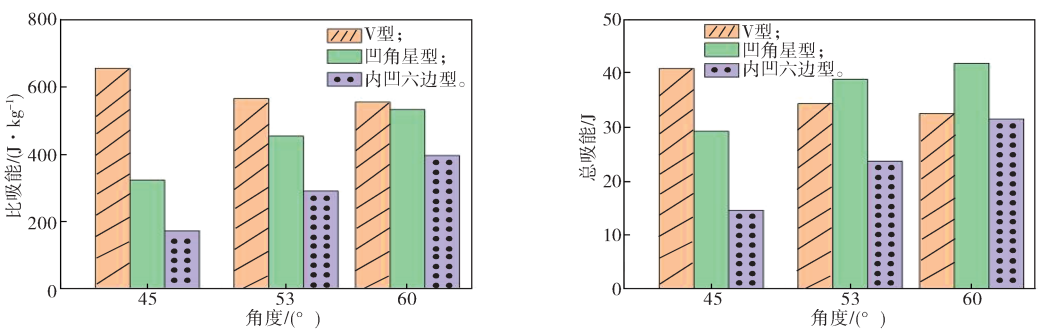
Fig. 10　Force-displacement curve of concave star-shaped structure



a）壁厚 t=1 mm　　b）壁厚 t=1.5 mm

图 11　内凹六边型结构压缩力 – 位移曲线

Fig. 11　Force-displacement curve of re-entrant hexagon structure



a）比吸能对比图　　b）总吸能对比图

图 12　壁厚 t=1.5 mm 的 3 种结构比吸能和总吸能对比图

Fig. 12　Comparison of total energy absorption and specific energy absorption for the three structures with a wall thickness of 1.5 mm

下，角度 θ 对 3 种结构的 *SEA* 表现出截然不同的作用趋势：V 型结构 *SEA* 随 θ 增大单调下降；凹角星型 *SEA* 随 θ 增大稳步提升；内凹六边型 *SEA* 随 θ 增大显著上升。而壁厚 t 对 3 种结构的影响具有一致性，*EA* 随 t 增大显著提升，t=1.5 mm 较 t=1.0 mm 平均提高 42%。值得注意的是，F_{max} 与 θ 无单调关系，由此衍生出“吸能提升与峰值力过高”的核心矛盾。

在多参数耦合作用下，各结构的力学响应进一步分化。V 型结构在 θ=45° 时表现出最优吸能性能，且随 θ 增大，*EA* 与 *SEA* 持续降低，至 60° 时 *EA* 降至 30 J 左右，说明大角度不利于其发挥吸能性能。凹角星型在 θ=45°、压缩位移为 0.5~1 mm 时达到最高值 F_{max}，而后随位移增大逐渐衰减。此外，其 *EA* 与 *SEA* 随 θ 增大持续提升，在 θ=60° 时 *EA* 超 40 J、*SEA* 接近 550 J/kg，展现出显著的吸能总量优势。内凹六边型的压缩力 – 位移曲线受壁厚 – 角度耦合作用影响显著，相同角度下，厚壁的初始刚度、峰值力及吸能参数均优于薄壁（如 θ=60° 时厚壁峰值力约为薄壁的 2.4 倍），且 θ=60° 时力学性能最优。

上述分析表明，传统优化方法如正交实验法与响应面法 [22-23]，虽能高效构建参数与单一指标间的映射关系，却难以处理 *EA*、*SEA*、F_{max} 三者之间的关系，导致无法获得兼顾多目标的全局最优解。鉴于此，本文引入模糊逻辑算法，通过 AHP 对 3 项性能指标进行权重分配，构建相应的模糊规则库，建立吸能参数 *S* 与结构参数间的映射关系，进而实现对各结构综合性能的量化评价。

4　模糊逻辑算法

4.1　隶属度函数构建

以壁厚 t=1.5 mm 的 3 种结构作为研究对象，选取 *EA*、*SEA*、F_{max} 作为输入变量，其取值范围分别为 15~45 J、200~650 J/kg、6~16 kN。采用三角形隶属度函数对各指标进行模糊化处理，依据其数值范围将每个输入变量划分为低、中、高 3 个模糊子集，相应的隶属度函数分布如图 13~15 所示。

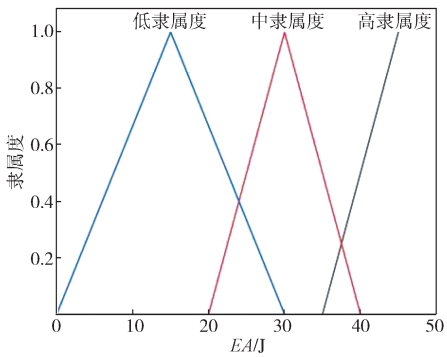


图 13　*EA* 隶属度函数

Fig. 13　Membership function of *EA*

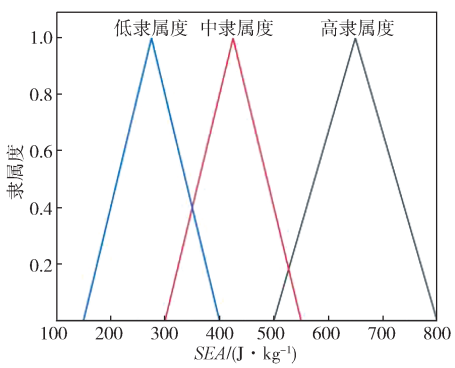


图 14　*SEA* 隶属度函数

Fig. 14　Membership function of *SEA*

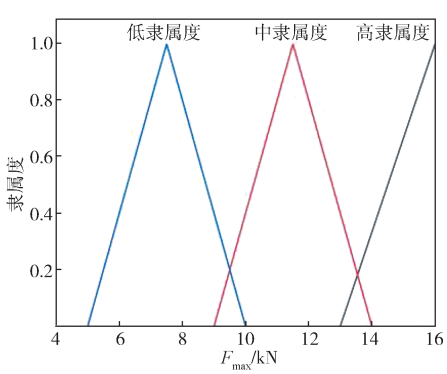


图 15　F_{max} 隶属度函数

Fig. 15　Membership function of F_{max}

基于上述隶属度函数得到指标的隶属度值 μ 后，需进一步确定各指标的权重。为契合负泊松比结构在安全防护领域的功能特性，本文以 *EA* 为首要目标，同时兼顾 *SEA* 与 F_{max} 之间的平衡，采用 AHP 将定性判断转化为定量权重。具体而言，以结构综合性能为目标层（O），以 *EA*（C1）、*SEA*（C2）、F_{max}（C3）为准则层（C），采用 1~9 标度法（1 表示同等重要，3 表示稍重要，5 表示明显重要，7 表示强烈重要，9 表示极端重要，倒数表示反向比较）对指标进行两两比较，构造判断矩阵，结果如表 5 所示。

表 5　判断矩阵

Table 5　Judgment matrix

准则层	C1	C2	C3
C1	1	3	3
C2	1/3	1	1
C3	1/3	1	1

从表中可以看出，在 *EA*（C1）、*SEA*（C2）和 F_{max}（C3）的两两比较中，*EA* 相对于 *SEA* 稍重要，标度为 3；*EA* 相对于 F_{max} 稍重要，标度也为 3；而 *SEA* 与 F_{max} 同等重要，标度为 1。接下来，采用求和法对判断矩阵进行归一化处理。首先计算各列之和，第 1 列、第 2 列、第 3 列的和分别为 1.66、5、5。然后将矩阵中每一行的元素分别除以对应列的和，再按行求和，得到第 1 行为 1.8，第 2 行为 0.6，第 3 行为 0.6，三者之和为 3。最后，对各行之和进行归一化处理，得到各指标的权重：*EA* 为 0.6，*SEA* 为 0.2，F_{max} 为 0.2。

为验证逻辑的合理性，需进行一致性检验，计算公式为

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}, \tag{9}$$

式中：*CI* 为一致性判断指标；*n* 为矩阵阶数；λ_{max} 为矩阵最大特征值。

又因判断矩阵为一致性矩阵，其 λ_{max} 与 *n* 值相同，均为 3，所以 *CI*=0。查表可知，当 *n*=3 时，随机一致性指标 *RI*=0.58, 所以一致性比例 *CR* 为

$$CR=\frac{CI}{RI}。 \tag{10}$$

计算得出一致性比例 *CR*=0 < 0.1，表明判断矩阵具有完全一致性，初始权重分配合理。在此基础上，参考工程实际应用中 AHP 允许对权重进行微调的做法 [24-25]，将权重进行优化，可得 *EA*=0.4，*SEA*=0.3，F_{max}=0.3。

最后，引入吸能性能综合系数 *S* 作为综合评价指标，其取值范围设定为 0~100。根据 *S* 的取值，可对照其模糊集进行评价，具体对应关系如表 6 所示。

表 6　吸能性能综合参数 *S* 的模糊集

Table 6　Fuzzy set of the comprehensive energy absorption parameter *S*

模糊集	*S* 的取值范围	中心值	物　理　意　义
S1（优）	70~100	90	吸能性能优异，满足高防护、轻量化需求。
S2（良）	50~<70	60	吸能性能良好，适用于常规工作场景。
S3（中）	30~<50	40	吸能性能一般，需优化结构参数。
S4（差）	0~<30	20	吸能性能较差，无法满足基本防护需求。

4.2　模糊规则库建立

结合指标权重（EA∶SEA∶F_{max}=4∶3∶3）及吸能性能的工程判断，首先定义各输入指标的模糊子集，即 EA、SEA、F_{max} 的隶属度等级：低（L）、中（M）、高（H）；同时定义输出变量的模糊集，即综合吸能隶属度等级：优（S1）、良（S2）、中（S3）、差（S4）。在此基础上，建立输入输出的模糊映射关系，最终得到完整的模糊规则库，如表 7 所示。

表 7　模糊规则库

Table 7　Fuzzy rule base

规则序号	EA	SEA	F_{max}	综合评价 S
1	H	H	L	S1
2	H	H	M	S1
3	H	H	H	S2
4	H	M	L	S2
5	H	M	M	S2
6	H	M	H	S3
7	H	L	L	S3
8	H	L	M	S3
9	H	L	H	S4
10	M	H	L	S2
11	M	H	M	S2
12	M	H	H	S3
13	M	M	L	S3
14	M	M	M	S3
15	M	M	H	S3
16	M	L	L	S3
17	M	L	M	S4
18	M	L	H	S4
19	L	H	L	S3
20	L	H	M	S3
21	L	H	H	S4
22	L	M	L	S4
23	L	M	M	S4
24	L	M	H	S4
25	L	L	L	S4
26	L	L	M	S4
27	L	L	H	S4

当 EA 为高（H）时，以规则 1 为例，说明总吸能充足时，配合高比吸能与低峰值力，可实现最优防护，满足航空航天等领域对轻量化与高防护的需求。当 EA 为中（M）时，以规则 10 为例，说明总吸能处于中等水平，需依靠高比吸能与低峰值力的协同作用来弥补，适用于常规工业防护场景。当 EA 为低（L）时，以规则 19 为例，说明总吸能不足时，即便吸能效率与损伤控制表现优异，综合评级仍难以突破中等，体现了总吸能的基础性作用。

4.3　负泊松比结构系统评估

为验证模糊规则库的有效性，以内凹六边型结构为例进行分析。当结构参数 θ=53°、t=1.5 mm 时，由图 9 与图 12 可得 EA=25 J，SEA=300 J/kg，F_{max}=9 kN。根据三角形隶属度函数对各输入指标进行模糊化，EA 对应的隶属度为：$\mu_{低}$=0.33、$\mu_{中}$=0.5；SEA 对应的隶属度为：$\mu_{低}$=0.8；F_{max} 对应的隶属度为：$\mu_{低}$=0.4。由表 7 可知，该输入组合符合规则 16 和规则 25，并通过“与运算”可得规则 16 符合度为 0.4，规则 25 符合度为 0.33。最后，采用重心法对模糊输出进行聚合与去模糊化，可得到该工况下吸能综合参数 S。

$$S=\sum_{i=1}^{n}(w_i\times c_i)\Big/\sum_{i=1}^{n}w_i\,, \tag{11}$$

式中：w_i 为第 i 条规则的符合度；c_i 为第 i 条规则模糊集的中心值；n 为被激活的规则数量。

由此可得出内凹六边型结构在 θ=53°，t=1.5 mm 的吸能综合系数 S 约为 31，与模糊规则库的逻辑一致。同理，在同等壁厚下，当 θ=45°，EA=15 J 时，隶属度 $\mu_{低}$=0.4；当 SEA=200 J/kg 时，隶属度 $\mu_{低}$=0.4；当 F_{max}=6 kN 时，隶属度 $\mu_{低}$=0.4。符合规则 25，其符合度为 0.4，吸能综合系数 S 为 20。当 θ=60°，EA=30 J 时，隶属度 $\mu_{中}$=1；当 SEA=400 J/kg，隶属度 $\mu_{中}$=0.8；F_{max}=9 kN 时，隶属度 $\mu_{低}$=0.4，符合规则 13，符合度为 0.4，吸能综合系数 S=40。

同样，可计算出凹角星型与 V 型结构相关数据（见表 8），在不同角度下，内凹六边型结构吸能性能综合系数 S 小于另外两种结构，而凹角星型结构中又以 θ=60° 时的性能最为优异。

表 8　3 种结构数据集

Table 8　Three types of structured data graphs

结构类型	θ/(°)	EA/J	SEA/(J·kg^{-1})	F_{max}/kN
V 型	45	40	650	16
	53	35	580	14
	60	33	550	12
凹角星型	45	30	320	15
	53	38	480	14
	60	40	550	12
内凹六边型	45	15	200	6
	53	25	300	9
	60	30	400	9

5 结论

本研究揭示了角度 θ 和壁厚 t 对 3 种典型负泊松比结构吸能性能的非线性耦合映射规律，建立了量化映射关系的方法并明确了最优参数组合，得以下结论：

1）构建了基于层次分析法与模糊逻辑算法的综合评价模型，并确定各指标权重 EA=0.4、SEA=0.3、F_{max}=0.3，进而建立三角形隶属度函数与模糊规则库，实现从结构参数到吸能性能的定量映射。

2）揭示了结构参数对吸能性能的影响规律。随着角度增大，V 型结构的 SEA 呈衰减趋势，凹角星型结构的 SEA 稳步提升，内凹六边型结构的 SEA 显著增长。壁厚增加可显著提升 EA（t=1.5 mm 时较 t=1.0 mm 时平均提升 42%），但与 F_{max} 无单调相关性，体现出“吸能提升与峰值力过高”的矛盾映射特征。

3）明确了各类结构的最优参数组合及其映射关系。V 型结构在 θ=45° 时，S=60（良），体现了“小角度”与高 SEA 的特征映射；凹角星型结构在 θ=60°、t=1.5 mm 时，S 达 90（优），其 EA>40 J、SEA=550 J/kg，呈现“大角度 + 厚壁”与高吸能的最优映射；内凹六边型结构整体映射性能中等，需通过参数优化进一步突破。

参考文献：

[1] 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.
[2] 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.
[3] 卢富德，雷树锋，肖宁建，等 . 简支梁式关键部件在蜂窝纸板缓冲作用下的冲击响应研究 [J]. 包装学报，2018，10(1)：20-26，2.
[4] 王玮婧，张伟明，郭孟甫，等 . 内凹 - 星型三维负泊松比结构设计及冲击吸能特性 [J]. 振动与冲击，2024，43(6)：75-83.
[5] 吴 澳，付条奇，曹 立，等 . 三维内凹板状负泊松比点阵结构抗冲击力学特性 [J]. 复合材料学报，2025，42(11)：6660-6672.
[6] 石南南，张伟晨，李振宝，等 . 泡沫填充四韧带反手性结构和内凹结构的面内压缩性能 [J]. 复合材料学报，2024，41(6)：2935-2946.
[7] 蒋舟顺，徐峰祥，邹 震，等 . 爆炸载荷下正弦曲边三维负泊松比夹芯板的动态响应和吸能特性 [J]. 爆炸与冲击，2024，44(2)：1-18.
[8] 吴浩然 . 舰船箭型负泊松比门体结构抗爆性能研究 [D]. 武汉：武汉理工大学，2020.
[9] 朱旭晨，王 典，刘晋浩，等 . 双 V 附翼型负泊松比蜂窝结构参数与原木接触面积耦合关系 [J]. 华中农业大学学报，2021，40(2)：253-260.
[10] 白临奇，史小全，刘宏瑞，等 . 冲击载荷下箭头型负泊松比蜂窝结构动态吸能性能研究 [J]. 振动与冲击，2021，40(11)：70-77.
[11] 邹贻权，黄浩洲，夏绪勇，等 . 成本导向下基于遗传算法的曲面幕墙设计优化 [J]. 浙江大学学报 (工学版)，2022，56(10)：2049-2056.
[12] LI Y C，HWANG J R，FUNG C P. Study on the Reasonability of Single-Objective Optimization in Miniscrew Design[J]. Materials，2025，18(5)：973.
[13] 王 锴，罗俊杰，姚如洋，等 . 碳纤维增强复合材料结构吸能机理及其高效建模方法研究 [J]. 复合材料科学与工程，2025(8)：24-32.
[14] 匡 柯，孙跃东，任东生，等 . 车用锂离子电池电化学 - 热耦合高效建模方法 [J]. 机械工程学报，2021，57(14)：10-22.
[15] LI Q N，CAO X F，WU X X，et al. Investigation of the Energy Absorption Characteristics and Negative Poisson's Ratio Effect of an Improved Star-Shaped Honeycomb[J]. Journal of Marine Science and Engineering，2023，11(9)：1799.
[16] WANG W J，ZHANG W M，GUO M F，et al. Energy Absorption Characteristics of a Lightweight Auxetic Honeycomb Under Low-Velocity Impact Loading[J]. Thin-Walled Structures，2023，185：110577.
[17] LIU X，YANG P Y，YUAN Y，et al. Sandwich Structure with Negative Poisson's Ratio of Periodic Rectangular Tube: Mechanical Properties and Energy Absorption[J]. Journal of Sandwich Structures & Materials，2022，24(7)：2065-2082.
[18] 魏路路，许世维，朱国华，等 . 星型 - 三角形负泊松比结构的面内压缩刚度可调控特性 [J]. 振动与冲击，2024，43(4)：105-114.
[19] 马芳武，梁鸿宇，赵 颖，等 . 内凹三角形负泊松比材料的面内冲击动力学性能 [J]. 振动与冲击，2019，38(17)：81-87，127.
[20] 邹锦豪 . 负泊松比夹层结构设计与抗冲击力学性能研究 [D]. 镇江：江苏科技大学，2023.
[21] 刘 赫 . 动力电池包高倍率热特性预测与防护技术研究 [D]. 株洲：湖南工业大学，2024.
[22] 刘富初，王 妙，张 驰，等 . 响应面法协同优化 3D 打印氧化铝多孔陶瓷的气孔率和抗弯强度 [J]. 机械工程学报，2025，61(19)：386-396.
[23] 刘进一，陈 龙，王 巧，等 . 基于响应面与遗传算法的固体氧化物燃料电池集成系统多目标优化 [J]. 化

工学报，2025，76(11)：5965−5979.
[24] 张志雄，许汝康，廖承立，等 . 基于非线性模糊层次分析法的爆破安全评价 [J]. 工程爆破，2025，31(3)：161−169.
[25] 曹　泽，邓欣然 . 基于改进 AHP-FCE 法的装配式建筑安全风险分析 [J]. 西昌学院学报 (自然科学版)，2023，37(4)：69−75.

（责任编辑：廖带莲）

Energy Absorption Performance and Parameter Mapping Characterization Method of Negative Poisson's Ratio Structures

ZHANG Yong，YAN Yuxiao，LIU Shuichang，LIAN Yuke，JIANG Yunbo

（School of Mechanical Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：Negative Poisson's ratio structures offer excellent mechanical properties, but the relationship between their energy absorption and structural parameters is nonlinear coupling and hard to quantify through traditional methods. Three typical negative Poisson's ratio structures, namely V-shaped, concave star-shaped, and re-entrant hexagon, were taken as the research objects. Using the angle θ and wall thickness t as variables, quasi-static compression simulations were performed to measure the total energy absorption, specific energy absorption, and the peak force. Furthermore, an energy absorption comprehensive coefficient S was established through the analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy logic algorithm for performance evaluation of the three structures. The results show that there is a nonlinear mapping relationship between structural performance and parameters. For V-shaped structures, the specific energy absorption decreases as θ increases, while for concave star-shaped ones, it improves with the increase of θ. Total energy absorption of the re-entrant hexagon rises significantly with the increase of t. The concave star-shaped structure performs best at θ=60° and t=1.5 mm (S value reaching 90), with a total energy absorption greater than 40 J and a specific energy absorption of 550 J/kg, presenting the optimal mapping of "large angle + thick wall" and high energy absorption.

Keywords：negative Poisson's ratio structure；energy absorption performance；quasi-static compression simulation；analytic hierarchy process；fuzzy logic algorithm