

# 新型负泊松比结构冲击动力学分析

周长发 林盛

(大连交通大学 辽宁 大连 116028)

**摘要:** 负泊松比的结构具有比其他普通蜂窝结构更加优良的性能, 具有负泊松比特性的结构可以提高能量吸收和减振性能。本文构型了两种负泊松比结构, 并以不同的速度对结构进行动态冲击, 研究了其能量吸收性能。采用比能量吸收和压缩力效率作为吸能性能评价指标, 同时对两个性能指标的概念进行了阐述。使用有限元仿真对两种结构进行了不同速度下的动态冲击模拟, 通过得到的各个冲击过程中的数据和对性能指标的分析, 计算得出了两种结构的性能参数值。研究表明, 结构能量吸收能力随着冲击速度的提高而增加, 所设计的二维负泊松比结构为下一步研究三维负泊松比结构构型和性能分析奠定了基础。

**关键词:** 负泊松比结构; 缓冲吸能; 比能量吸收; 压缩力效率; 有限元仿真

## 0 引言

负泊松比结构是当结构受拉或受压时, 结构在横向发生膨胀或收缩的特性。负泊松比结构具有质轻、吸能、隔声和耐撞性好等优点, 在医疗应用、防护设备、航空航天及建筑材料等领域有着非常广阔的应用前景。由于负泊松比结构自身所具有的这些优势以及独特的变形特性, 因而吸引了越来越多的关注。目前, 负泊松比结构更多应用在碰撞及冲击能量吸收技术等领域。

大多数负泊松比结构都有孔隙, 而且由于其几何形状和变形机制的特点, 这些结构往往比传统的实体结构刚度、硬度要低。因此, 负泊松比结构在一些承重中的使用是有限的。多数结构受到外界撞击时, 抗冲击性以及结构稳定性不足, 很多时候不能满足使用需求。因此, 设计一类可抵抗较强冲击且具备优良吸能特性的结构尤为重要。此外, 结构若被用于减振或吸能场合时, 必然要对结构冲击动力学有一定的认识, 所以研究新型负泊松比结构的冲击动力学对结构的应用来说至关重要。

Lakes 在 1987 年研究制造出了一种负泊松比泡沫材料, 之后负泊松比结构的研究才相继开始, 出现了各式各样的负泊松比结构。目前在众多负泊松比结构的构型和研究中, 由圆球和曲梁组成的负泊松比结构还未进行过相关报道。该特点的结构在受到外界冲击压缩时表现出更高的抗冲击性和稳定性, 增加结构承载能力, 具有很高的实用价值。

本文提出了一类二维负泊松比结构, 结构胞元由圆球和曲梁两部分组成, 通过不同的周期排列方式得到了两种不同的负泊松比结构。采用有限元仿真方法, 将两种负泊松比结构置于六种不同的冲击速度下进行结构冲击动力学分析。通过对能量吸收性能指标的计算确定了结构在不同冲击速度下能量吸收性能, 然后把两种结构的吸

能性能进行了对比, 为研究三维负泊松比结构的性能分析提供了理论基础。

## 1 负泊松比结构建模

设计的两种结构胞元是相同的, 仅周期排列方式不同, 结构排列层数均为  $5 \times 5$  层, 图 1 所示为两种负泊松比结构示意图。

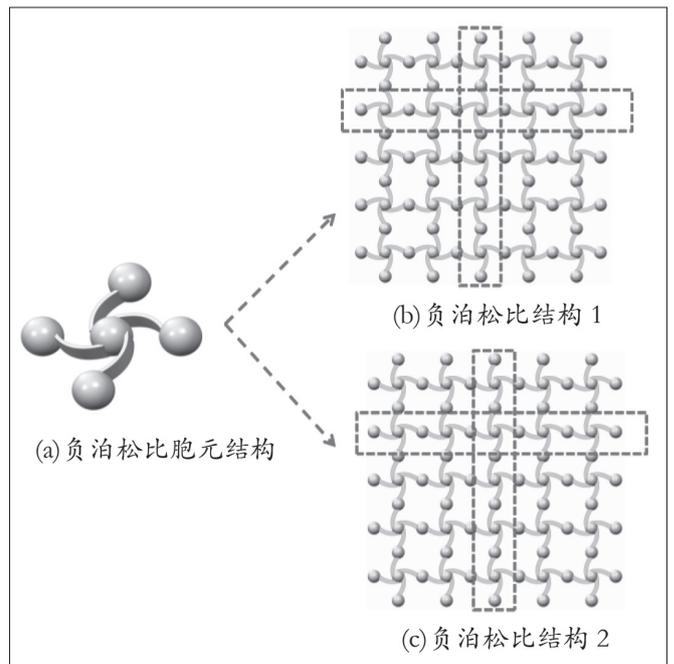


图 1 两种负泊松比结构示意图

## 2 两种负泊松比结构吸能性能分析

上述两类负泊松比结构具有优良的缓冲吸能特性, 可被应用在负泊松比免充气轮胎、吸能基座和军事防弹衣等方面。对两类负泊松比结构进行冲击仿真, 进而分析负泊松比结构的缓冲吸能特性。以六种不同的速度冲

击两类负泊松比结构，得到冲击后结构的应力应变关系。同时，我们选用比能量吸收以及压缩力效率作为负泊松比结构吸能性能的评价指标，通过对两个指标的分析计算来综合评估结构的缓冲吸能性能。

### 2.1 结构冲击有限元模型

结构模型进行有限元分析，两种结构分别置于固定刚性板上，上冲击端钢板分别以 1m/s、2m/s、4m/s、5m/s、8m/s、10m/s 六种不同的速度沿 Z 轴方向向下冲击结构，刚性板弹性模量 210GPa，密度  $7.85 \times 10^{-9}t/mm^3$ 。选用分析材料的弹性模量 730MPa，密度  $1.2 \times 10^{-9}t/mm^3$ ，泊松比 0.3；采用显示动力分析，为避免冲击过程中结构之间相互穿透，设定上钢板与试件之间面 - 面自动接触算法，无摩擦，结构底端固定，左右两侧自由，分析模型如图 2 所示。

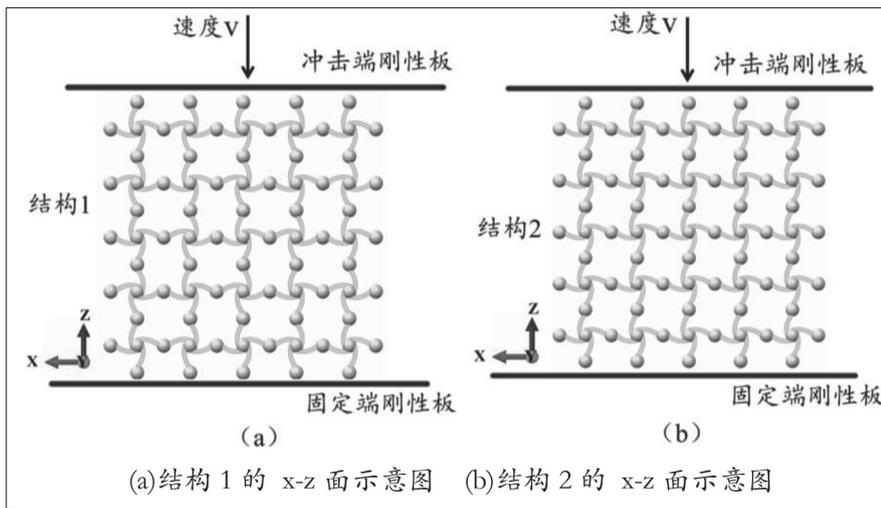


图2 结构 1、2 有限元分析模型

### 2.2 比能量吸收

单位质量结构所吸收的能量称为结构的比能量吸收 (SEA)，也称为比吸能，它是评价结构能量吸收的重要指标之一。结构的比能量吸收体现了结构受到外界冲击压缩时所吸收的能量，也说明了结构能量吸收的能力。其表达式为：

$$SEA = \frac{EA}{M} \tag{1}$$

$$EA = V \cdot \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon \tag{2}$$

式中：EA 为结构总吸收能量值；V 为结构的表观体积；M 为结构的质量。

其中， $\int_{\epsilon_0}^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon$  为单位体积结构吸收的能量， $\epsilon_d$  为锁定应变（密实化应变），表示多孔材料压缩至密实化前的最大应变值。密实应变受惯性等因素影响较大，因此很多时候我们采用能量吸收效率方法确定密实应变。多孔结构的能量效率曲线中有很多局部的极大值，定义最后的极大值点，即能量效率曲线开始迅速下降的点所

对应的名义应变作为密实化点，该方法在一定程度上避免了人为选择因素的影响。基于能量吸收效率方法，冲击过程中各应变处的能量效率参数由式 (3) 得到。

$$E = \frac{\int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon)} \tag{3}$$

式中：E 为结构的能量吸收效率参数，通过计算能量吸收效率参数的值，可以很容易确定能量效率曲线开始迅速下降的点，即为密实化应变值； $\epsilon_0$  为与初始应力峰值相对应的初始应变，在整个冲击过程中， $\epsilon_0$  值很小，取  $\epsilon_0 = 0$ 。

对以上两类结构使用有限元进行冲击仿真分析，设置一系列参数完成分析后，通过分析得到了两类结构在 6 种不同速度冲击下整个过程中的动态响应变化曲线如图 3、图 4 所示。

图 3、图 4 的结构动态响应曲线能够反映出结构在整个冲击过程中的各类性能参数变化。两类结构的不同速度下的名义应力 - 应变曲线大致可分为三个阶段：第一阶段为弹性上升阶段，当冲击一开始，初始响应线性上升到一定值；第二阶段为应力稳定阶段，当应力增加到一定值后，随着应变的增加，应力值不再发生大的变化，进入应力平台区；第三阶段为密实阶段，随着压缩的进行，应力值再次增加，直到结构模型被压密后，其应力值达到最大。

由冲击过程中的结构应力 - 应变曲线变化，结合式 1、式 2 可得到结构在不同冲击速度下的比能量吸收曲线。图

5 为两类结构的不同冲击速度下的比能量吸收变化曲线，

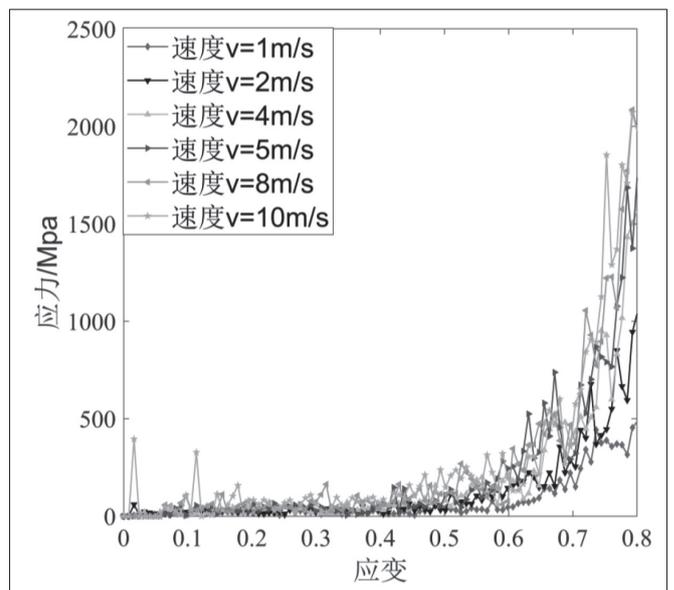


图3 结构 1 在不同冲击速度下的应力 - 应变曲线

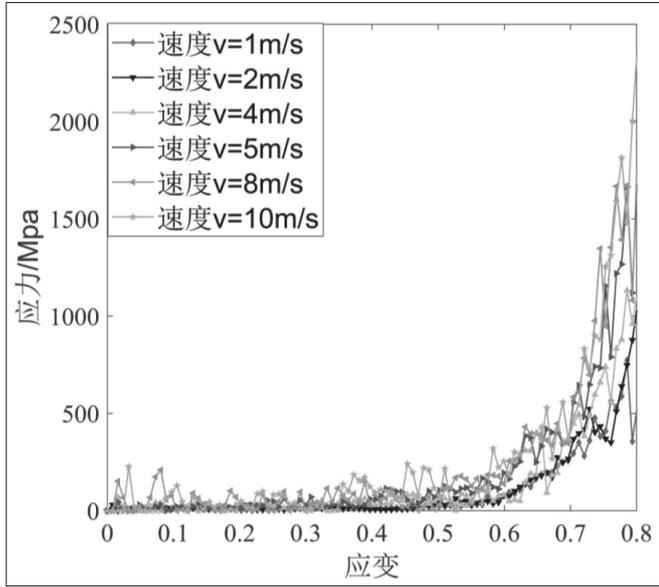


图4 结构2在不同冲击速度下的应力-应变曲线

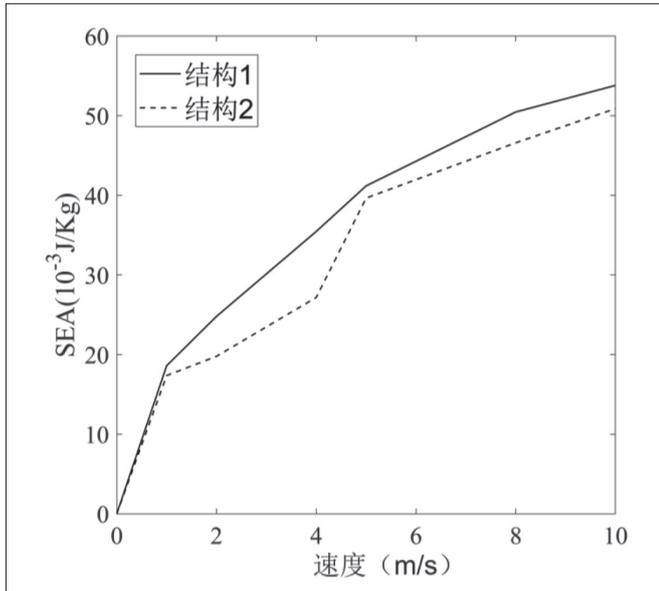


图5 两类结构在不同冲击速度下的比能量吸收变化曲线

图中反映出两类结构能量吸收随速度的增大呈非线性增长趋势，整个过程中，结构1的比能量吸收值都高于结构2的比能量吸收值，进一步说明了结构1所吸收能量比结构2多，具有更好的缓冲吸能特性。

### 2.3 压缩力效率

压缩力效率是衡量结构缓冲吸能性能的又一重要指标。压缩力效率体现了结构在受到外界冲击压缩时能量吸收的效率，即结构能否更有效地吸收能量，其表达式如下：

$$CLE = \frac{F_p}{F_m} \times 100\% = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} \times 100\% \tag{4}$$

$$\sigma_p = \frac{1}{\epsilon_d - \epsilon_0} \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon \tag{5}$$

式中， $F_p$ 、 $F_m$ 分别为平台载荷、初始峰值载荷； $\sigma_p$ 、 $\sigma_m$ 分别为平台应力、初始峰值应力。

压缩力效率的值越高，说明在冲击过程中结构的平稳性更好。由于 $\sigma_p \leq \sigma_m$ ，因此， $0 < CLE \leq 1$ ， $CLE$ 的值越接近1越好。通过比能量吸收和压缩力效率两个指标来评价结构的缓冲吸能性能。在分析结构的压缩力效率时，初始峰值应力可由应力-应变曲线得到，而对平台应力可根据式(5)来计算获得。

图6为两类结构在不同冲击速度下的压缩力效率变化曲线，图中反映出两种结构在受到不同速度冲击时压缩力效率曲线呈现出上下波动的趋势。通过对结构压缩力效率的分析可知：结构1与结构2在承受相同的瞬时大载荷后，结构1能更有效地吸收能量，即结构1吸能效率高于结构2，在冲击过程结构1表现出的性能更好。

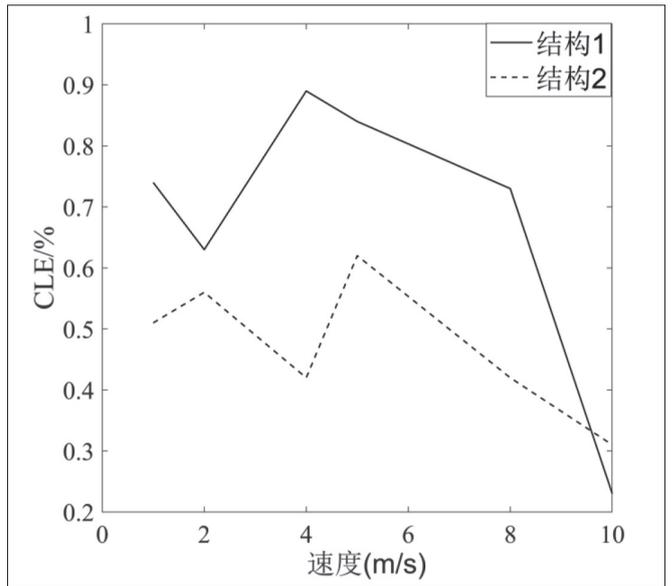


图6 两种结构在不同冲击速度下的压缩力效率变化曲线

### 3 结语

本文构建了两种负泊松比结构，采用有限元分析软件对结构进行了动态冲击仿真，得到了结构在不同速度下的应力-应变曲线。根据应力-应变曲线变化，可以获得结构的比能量吸收和压缩力效率的变化情况。当结构受到外界冲击压缩时，结构1的比能量吸收能力高于结构2，同时结构1较结构2可以更有效地吸收能量。由此说明，结构1的缓冲吸能性能要优于结构2，在受到相同的瞬时载荷冲击时，结构1能更有效地吸收能量。今后，随着微纳制造技术的进步，提出的此类负泊松比结构在未来的工业应用中将表现出良好的性能，如纳米手性金属玻璃、负泊松比变体机翼、形状记忆驱动器和生物力学装置等。

参考文献:

[1] 孙国恩, 宋相军. 不同冲击速度对铝蜂窝板冲击力响应的影响 [J]. 工程与试验, 2019, 59(1): 18-20.

[2] 樊喜刚, 尹西岳, 陶勇等. 梯度蜂窝面外动态压缩力学行为与吸能特性研究 [J]. 固体力学学报, 2015, 36(2): 114-122.

[3] 张新春, 祝晓燕, 李娜. 六韧带手性蜂窝结构的动力学响应特性研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 1-7.

[4] 邓小林. 分层梯变负泊松比蜂窝结构的面内冲击动力学分析 [J]. 机械设计与制造, 2016(4): 219-113.

[5] 郭亚鑫, 袁梦琦, 钱新明等. 内凹型蜂窝结构在冲击载荷作用下的力学行为及响应特性研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 5-10.

[6] 高玉魁. 负泊松比超材料和结构 [J]. 材料工

程, 2021, 49(5): 38-47.

[7] 卢子兴, 李康. 四边手性蜂窝动态压溃行为的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 181-187.

[8] 邓小林, 刘旺玉. 一种负泊松比正弦曲线蜂窝结构的面内冲击动力学分析 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 103-109.

[9] 沈振峰, 张新春, 白江畔等. 负泊松比内凹环形蜂窝结构的冲击响应特性研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(18): 89-95.

**作者简介:** 周长发 (1995.06-), 男, 汉族, 山东枣庄人, 硕士研究生, 研究方向: 柔顺机构; 林盛 (1979-), 男, 满族, 辽宁大连人, 博士研究生, 教授, 研究方向: 柔顺机构、软体机器人。

# 广告征订



版位 Format	价格 Price (RMB)
<b>特殊版位 Specified Ads. Position</b>	
封面	25,000
封二	16,000
封三	12,000
封底	18,000
扉一	15,000
扉二	10,000
后扉一	12,000
后扉二	9,000

版位 Format	价格 Price (RMB)
<b>正常版位 Editorial Page</b>	
编辑页	10,000
编辑页跨页	15,000
1/2编辑页	5,000
1/3编辑页	3,500
1/4编辑页	2,500

**注:** 所有特殊版位广告均为4C广告, 正常版位广告均为黑白; 所有广告需提供成熟设计稿, 如需编辑部制作需单独收费。

**优惠说明:**

在原价格基础上, 连续预定3期, 优惠8%; 连续预定6期, 优惠15%; 连续预定12期, 优惠20%; 连续预定18期, 优惠30%; 连续预定36期, 优惠40%。另, 如提前一次性付款, 可在享受优惠的基础上享受8%的额外折扣。

**广告预定热线: 010-6741 0664 / 1368 332 6370**