

# Study on Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristics of Double Star Structure with Negative Poison's Ratio

Chao GONG<sup>1,2</sup>, Yansheng WU<sup>1</sup>, Qunchao BA<sup>1</sup>, Bin CHEN<sup>1</sup>, Haochao YUAN<sup>1</sup>, Chang LUO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China

<sup>2</sup>Luzhou Rongda Intelligent Transmission Limited Company, Luzhou 644000, Sichuan, China

Email: gongchao@hfut.edu.cn

**Abstract:** Negative Poison's ratio structures have considerable application prospects in the field of cushioning energy absorption due to their abnormal deformation mechanism. In this paper, a double star structure with negative Poison's ratio is proposed, aiming to improve mechanical properties through structural fusion and multi-parameter coupling. A total of C1, C2 and C3 double star structures with three connection modes are designed. With the help of theoretical analysis and finite element simulation technology, the mechanical behavior and energy absorption characteristics of the three configurations are systematically explored. The results show that C1 configuration has the best performance in all aspects. The further analysis of C1 configuration parameters shows that when the length of the connecting edge is unchanged, the increase of proportion coefficient leads to the decrease of total energy absorption. When the ratio coefficient is constant, the increase of the length of the connecting edge has little effect on the total energy absorption, but the initial peak force has an optimal value.

**Keywords:** Crashworthiness; Negative Poison's ratio; Energy absorption; Star structure

## 基于双星型负泊松比结构的力学性能与能量吸收特性研究

龚超<sup>1,2,\*</sup>, 崇奇<sup>1</sup>, 吴延盛<sup>1</sup>, 霸群超<sup>1</sup>, 陈彬<sup>1</sup>, 袁昊超<sup>1</sup>, 罗畅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 合肥, 中国, 230000

<sup>2</sup>泸州容大智能变速器有限公司, 泸州, 中国, 644000

\*Email: gongchao@hfut.edu.cn

**摘要:** 负泊松比结构因其反常的变形机制在缓冲吸能领域具有可观的应用前景。本文提出了一种双星型负泊松比结构设计, 旨在通过结构融合与多参数耦合提升力学性能, 总共设计了C1、C2、C3三种连接模式的双星型结构, 借助理论分析与有限元仿真技术, 系统探究了三种构型的力学行为及能量吸收特性。结果表明, C1构型在各个方面表现最优; 在对C1构型参数进一步分析发现当连接边长度不变时, 比例系数增加导致总吸能减少; 而比例系数不变时, 连接边长度增加对总吸能影响较小, 但初始峰值力存在最优值。

**关键字:** 耐撞性; 负泊松比; 能量吸收; 星型结构

## 1 引言

具有轻量化、比吸能高特点的结构能够在吸收能量和减低车辆受到碰撞后的零部件破损率方面发挥重大作用。通常负泊松比结构相比一般结构能够在纵向受压时发生横向收缩, 这种特性使得负泊松比结构能在采用相

同材料时表现出更高的比吸能。

随着仿真模拟技术的蓬勃发展,诸多学者已对负泊松比结构展开深入的研究。鞠金龙等<sup>[1]</sup>提出一种采用负泊松比头罩卸载的方法,利用负泊松比结构特殊的拉胀效应,使头罩吸收更多的冲击能量。采用任意朗格朗日-欧拉算法分析了负泊松比头罩对飞行器卸载特性的影响规律,并通过实验数据对数值方法进行了验证。庄晟逸等<sup>[2]</sup>从负泊松比结构的种类和变形机理角度出发,重点论述了不同维度下改进设计后负泊松比材料的结构特点及其性能的变化,同时讨论了负泊松比材料在航空航天领域的应用前景。刘卫东等<sup>[3]</sup>提出了一种易变形、延展性好的新型四手性细胞结构,通过能量法理论推导了梁结构力学性能的数值解,并用有限元方法进行了数值验证。陆欢等<sup>[4]</sup>建立了 3D 负泊松比结构填充方管和圆管型吸能盒的几何模型,利用落锤冲击实验对 3D 打印加工的样件进行了低速冲击,并建立了结构的低速冲击有限元模型。王伟婧等<sup>[5]</sup>设计并表征了一种参数可调的新型负泊松比结构。李娜等<sup>[6]</sup>通过周期性阵列传统星形胞元和星-菱形胞元,构建了内凹星形蜂窝结构(RSH)和新型的面内增强星-菱形蜂窝结构(ESH),通过实验和有限元模拟,系统地研究了 ESH 在不同加载方向的面内力学响应和吸能特性。闫鹏等<sup>[7]</sup>采用有限元数值模拟对不同相对密度的 DAH 材料吸能特性进行分析,发现随着相对密度增加 DAH 材料的比吸能指标逐渐下降。刘涛等<sup>[8]</sup>提出了一种新型的十字形负泊松比蜂窝结构,基于能量法对该结构泊松比的解析式进行了推导,所得解析解与有限元结果吻合良好;针对不同冲击速度和不同杆长比例系数的十字形蜂窝结构的变形模式、冲击载荷下的名义应力应变曲线以及能量吸收特性进行了研究。张晓楠等<sup>[9]</sup>提出了一种变截面内凹蜂窝结构构型,利用 ABAQUS 研究了三维结构的动力学特性,分析了变截面负泊松比蜂窝结构在准静态压缩时的变形模式,并进行了实验验证,实验结果与有限元吻合良好。刘海涛等<sup>[10]</sup>提出一种空竹型负泊松比蜂窝结构。运用一维冲击理论推导出结构的冲击临界速度。罗放等<sup>[11]</sup>研究发现,内爆和外爆连续冲击载荷的作用方式并不相同,负泊松比超材料结构在连续外部及内部爆炸冲击时分别出现了局部坍塌挤压吸能、结构密实化整体弯曲等两种不同变形模式。刘海涛等<sup>[12]</sup>设计了一种具有角度梯度分布的新型内凹负泊松比蜂窝结构,建立了双向递增和双向递减两类角度梯度变化的内凹蜂窝有限元模型。对典型负泊松比蜂窝结构和双向角度梯度蜂窝结构的吸能效果进行了准静态实验研究对比。

本文聚焦于通过理论分析与数值模拟相结合的方式,系统探究双星型负泊松比结构的力学行为及能量吸收特性。首先,基于现有的力学理论,建立双星型结构模型,并通过仿真技术,对不同连接模式的双星型结构进行性能评估。进而,结合仿真数据,选取关键参数进行优化设计,以获得性能最优的双星型负泊松比结构。

## 2 结构设计

### 2.1 结构描述

现有研究结果表明,星型结构是具有良好的吸能特性的负泊松比蜂窝结构,鉴于此,本文提出了一种双星型负泊松比结构设计理念,旨在通过结构的融合与多参数耦合,进一步提升其力学性能。具体而言,该设计将内层小型星型结构嵌入到外层大型星型结构之中,二者之间通过肋边进行连接,这种独特的设计不仅保留了星型结构的基本特性,还通过双层结构的相互作用,实现了对力学性能的进一步优化。而根据肋边添加方式的不同,本文提出如图 1 所示的三种双星型结构,记为 C1、C2、C3,分别表示通过水平连接边连接,通过斜向连接边连接,两者完全连接。

三种结构示意图如图 2 所示,三种构型外部尺寸均约束在边长为  $2D = 29\text{mm}$  的正方形中,星型内凹角度  $2\alpha = 135^\circ$ ,且外层星型外接于半径为  $r_1 = 25\text{mm}$  的圆,内层星型外接于半径为  $r_2 = 6\text{mm}$  的圆,相邻胞元距离为  $2d = 14.36\text{mm}$ ,并对三种结构保证同等质量,对于 C1 构型,连接边长度  $s_1 = 4.84\text{mm}$ ,  $t_1 = 0.50\text{mm}$ ,对于 C2 构型,连接边长度  $s_2 = 11.68\text{mm}$ ,  $t_1 = 0.44\text{mm}$ ,对于 C3 构型,连接边长度为  $s_1$  与  $s_2$  之和,厚度  $t_1 = 0.40\text{mm}$ 。

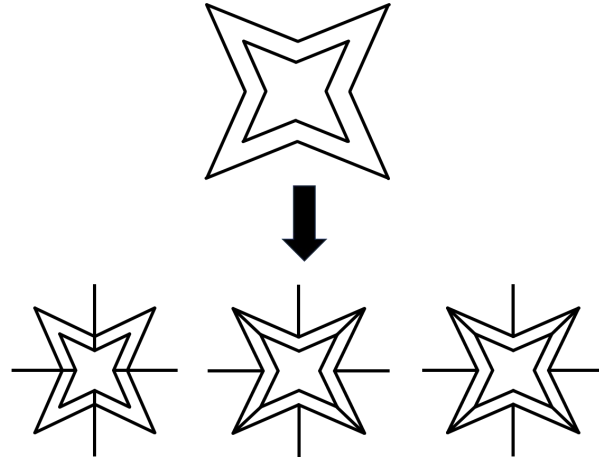


Figure 1. Design of double star negative Poisson's ratio constructure  
图 1. 双星型负泊松比胞元结构设计

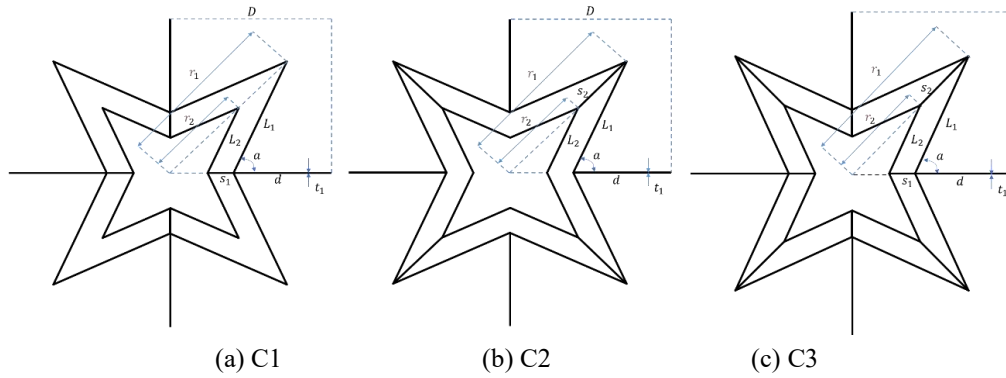


Figure 2. Schematic structure of double star negative Poisson's ratio single cell  
图 2. 双星型负泊松比单胞结构示意图

## 2.2 相对密度

负泊松比结构属于多孔蜂窝结构，蜂窝结构的相对密度<sup>[13]</sup>是影响其力学性能的重要因素。根据多胞材料理论<sup>[14]</sup>，本文所提结构的相对密度 $\rho$ 可以表示其等效密度与结构基体材料密度的比值，即：

$$\rho = \frac{\rho_a}{\rho_b} = \frac{\frac{M}{V_a}}{\frac{M}{V_b}} = \frac{V_b}{V_a} = \frac{A_b}{A_a} \quad (1)$$

式中： $\rho_a$ 为负泊松比蜂窝结构的等效密度， $\rho_b$ 为基体材料密度， $M$ 为单个胞元的质量， $V_a$ 为负泊松比蜂窝结构所围空间区域体积， $V_b$ 为结构实体体积， $A_a$ 为胞元总横截面积（图中虚线所围面积）， $A_b$ 为胞元实体所占面积（图中黑色连续线的面积）。

由于高度对称性，整体结构的相对密度可以由 1/4 单胞的相对密度等效替代，可以得出三种双星型负泊松比结构的相对密度，如下表所示：

Table 1. Relative densities of binary stellar negative Poisson's ratio structures

表 1. 双星型负泊松比结构相对密度

构型名称	总横截面积	实体面积	相对密度
C1	$D^2$	$(2L_1 + 2L_2 + d + s_1) * t_1$	$\frac{(2L_1 + 2L_2 + d + s_1) * t_1}{D^2}$
C2		$(2L_1 + 2L_2 + d + s_2) * t_1$	$\frac{(2L_1 + 2L_2 + d + s_2) * t_1}{D^2}$
C3		$(2L_1 + 2L_2 + d + s_1 + s_2) * t_1$	$\frac{(2L_1 + 2L_2 + d + s_1 + s_2) * t_1}{D^2}$

### 2.3 耐撞性评价指标

为了比较这三种负泊松比蜂窝结构的吸能特性，本文选取总吸能 $EA$ 、比吸能 $SEA$ 、峰值压溃力 $PCF$ 、平均压溃力 $MCF$ 、压溃效率 $CFE$ 为评价指标。

总吸能 $EA$ 是指结构在压溃变形时吸收的总碰撞能量，其值与变形量和压溃力有关， $EA$  越大则说明吸能特性越好。计算公式为：

$$EA = \int_0^d F(\delta) d\delta \quad (2)$$

式中： $F(\delta)$ —瞬时压溃力； $d$ —最大压溃变形量； $\delta$ —压溃变形量。

比吸能 $SEA$ 表示结构单位质量吸收的能量，计算公式为：

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (3)$$

式中： $m$ —负泊松比蜂窝结构胞元质量。

峰值压溃力 $PCF$ 指结构受到冲击时产生的最大瞬时冲击力， $PCF$ 越小结构安全性越高，抗冲击能力越强，计算公式为：

$$PCF = F_{max}(\delta) \quad (4)$$

平均压溃力 $MCF$ 为总吸能 $EA$ 与压溃变形量 $\delta$ 的比值， $MCF$ 越大结构的承载能力越好，计算公式为：

$$MCF = \frac{EA}{\delta} \quad (5)$$

压溃效率 $CFE$ 为平均压溃力 $MCF$ 与峰值压溃力 $PCF$ 的比值，压溃效率越高，表明压溃过程中对整体结构的加速度变化影响越小，计算公式为：

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \quad (6)$$

## 3.有限元模型

### 3.1 双星型负泊松比结构有限元模型建立

为了探究双星型负泊松比结构的耐撞规律，本文以 CATIA 软件为基础，使用 HyperMesh 软件行前处理，使用 LS-Dyna 软件采用显式分析方法进行模拟计算。模型主要由冲击端、约束端、中间芯体结构组成，整体结构如图 3 所示，冲击端赋予向下的恒定速度 10 m/s，并约束除 Z 方向以外的速度方向，下面板全约束处理。

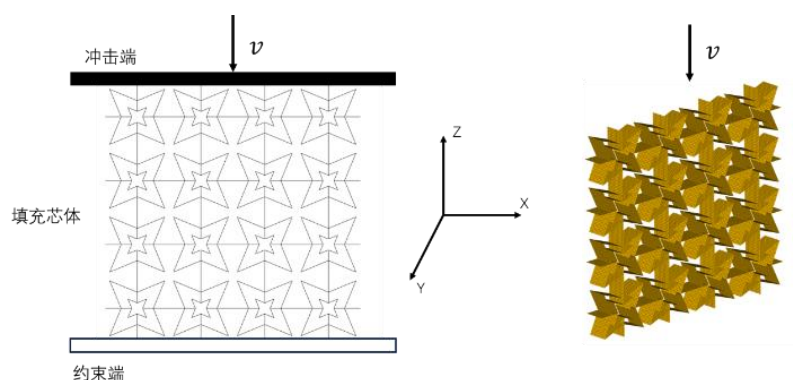


Figure 3. Schematic diagram of finite element model

图 3. 有限元模型示意图

在双星型结构与冲击端之间的接触用“node to surface”接触算法来模拟,双星型负泊松比填充芯体内部采用“automatic single surface”接触算法来模拟,各个接触的动摩擦系数与静摩擦系数分别设置为 0.3、0.2,薄壁结构材料为铝合金 AL6060,其主要的材料参数如下: $\rho = 2700\text{kg/m}^3$ ,杨氏模量 $E = 68.2\text{Gpa}$ ,泊松比 $\nu = 0.3$ 。通过网格收敛性验证,考虑模型精度和运算效率,设定其网格尺寸为 1mm。

### 3.2 有限元模型验证

为了验证所建立的有限元模型的准确性和可靠性,将 Yu<sup>[15]</sup>的试验结果与所建立的有限元模型进行对比,结果如图 4 所示。仿真和试验的结构力位移曲线具有较好的一致性,并且在不同压缩距离下结构的变形模式也很相似,可以证明有限元模型的准确性。

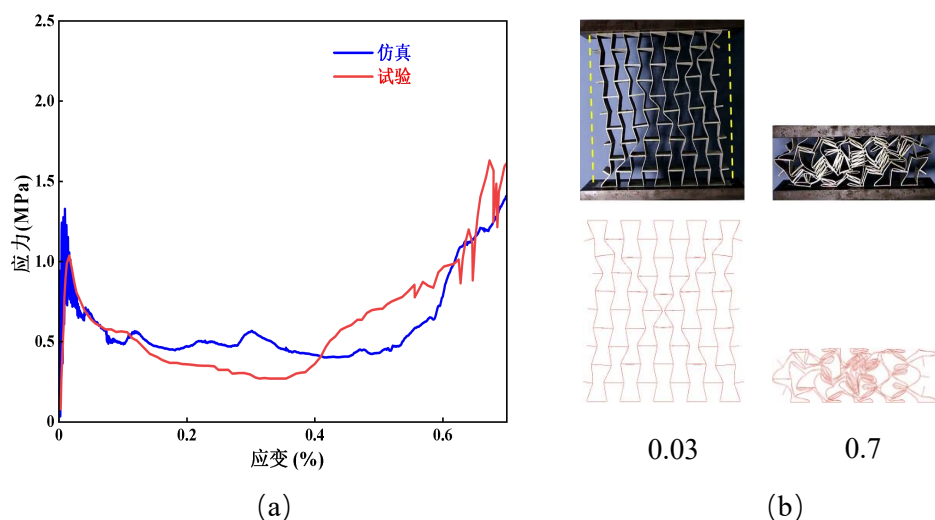


Figure 4. Finite element model validation

图 4. 有限元模型验证

### 4. 仿真结果分析

图 5-6 分别给出了上述三种模型在压缩速度为 10m/s 条件下的力-位移曲线与压缩变形曲线,结合两张图片可以看出,双星形结构在承受初始冲击时,压缩力呈现出明显的线性增长趋势,这一过程中胞元的连接边首先发生屈服变形,变形模式以结构整体变形为主,当  $X=20\text{mm}$  时, C1 构型显著呈现出内向收缩行为,内部星型

结构急剧收缩，而 C2 构型展现出完全相反的外胀趋势。随着压缩深度的不断增大，胞元间距逐步缩减，C2 构型的单元率先发生坍塌，随后 C3 构型的单元相继发生坍塌变形，整个过程自约束端向上逐渐传递，此阶段内，三种模型的力-位移曲线均步入了一个相对稳定的平台期，压缩力在特定范围内波动。直至压缩位移达到 80mm 时，C2 与 C3 逐渐达到承载极限，逐步进入密实化阶段，变形空间较小，之后 C1 构型开始出现整体坍塌变形，此时三种结构的有效变形相继结束，压缩力数值急剧上升。

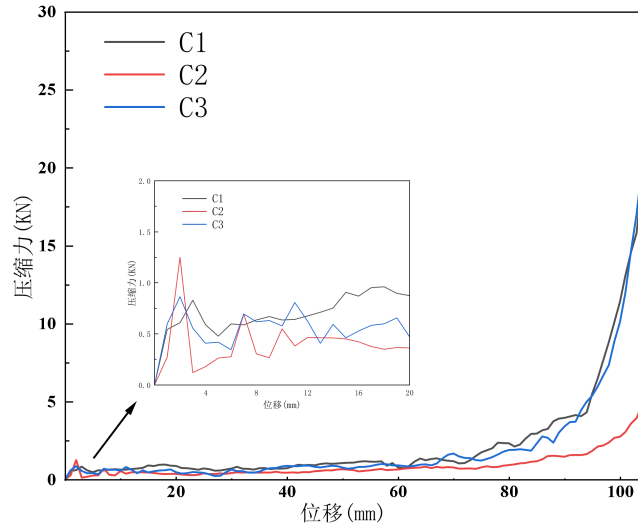


Figure 5. Force-displacement curves for C1, C2 and C3  
图 5. C1、C2、C3 构型力-位移曲线

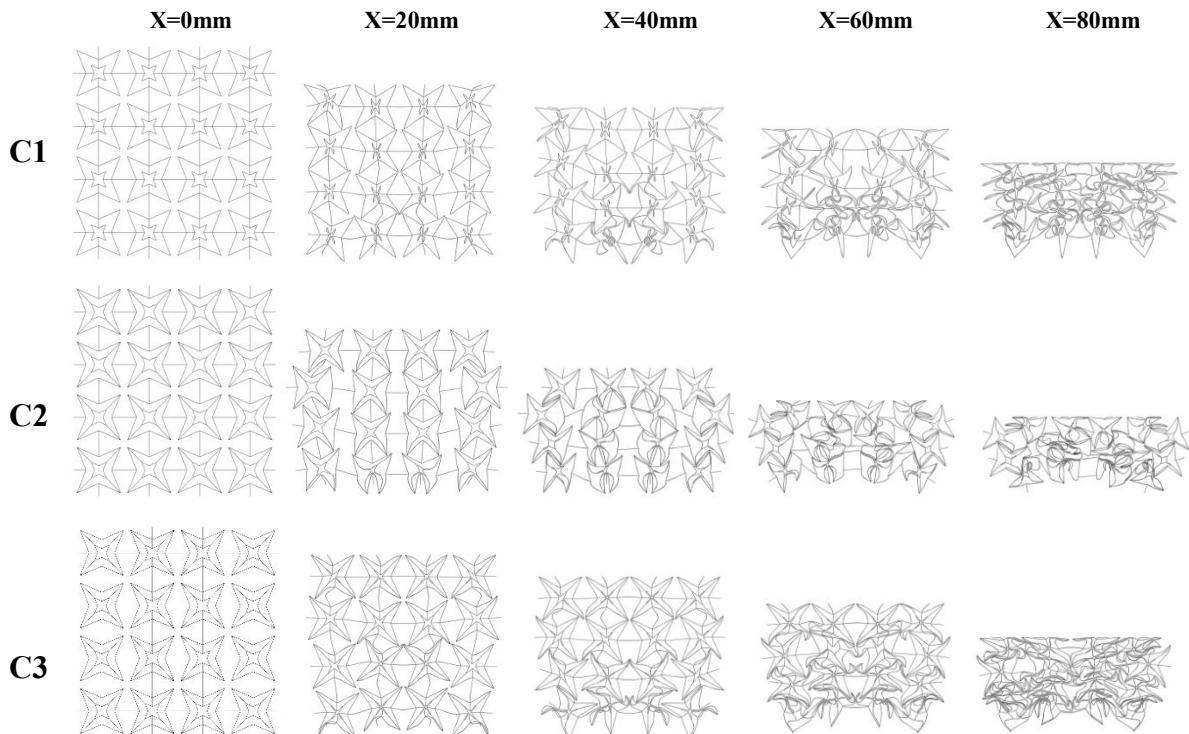


Figure 6. Deformation diagram of C1, C2 and C3  
图 6. C1、C2、C3 变形模式图

按照耐撞性的要求，理想的结构设计旨在同时实现高比吸能 SEA 与高效压溃效率 CFE，并有效控制初始碰撞峰值力 PCF 至较低水平。通过有限元仿真分析三种结构的变化过程，在 65% 的压缩率条件下，得到三种双星型负泊松比结构的耐撞性评价指标，结果如表 1 所示

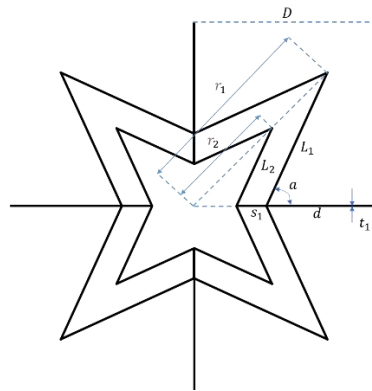
**Table 2. Simulation results: crashworthiness evaluation indexes**  
**表 2. 仿真结果：耐撞性评价指标**

名称	m/kg	IPF/kN	EA/J	SEA/(kJ/kg)	MCF/kN	CFE/%
C1	0.0417	0.83	66.1	1.58	0.88	1.06
C2	0.0417	1.25	38.8	0.93	0.45	0.41
C3	0.0417	0.86	56.2	1.35	0.65	0.87

观察上述数据，可以看出，就初始碰撞峰值力 PCF 方面，C1 构型与 C3 构型展现出了显著的优化效果，相较于 C2 构型，该值取得明显下降，分别下降了 33.6% 与 31.2%，在总吸能 EA 方面，C1 结构较 C2 结构增加了 70.6%，较 C3 结构增加了 17.6%，同时 C1 结构的平均压溃效率 CFE 相较于 C2 与 C3 均取得大幅度提升，综上所述，C1 构型通过显著降低初始碰撞峰值力、大幅增加总吸能量以及显著提升平均压溃效率，在耐撞性优化方面展现出了卓越的综合性能。

## 5 结构参数分析

由上述分析结果，选择 C1 构型为优化对象，其结构示意图如图 7 所示，针对该构型，以降低初始峰值碰撞力 PCF、提高总吸能 EA 以及提高平均压溃效率 CFE 为目标，引入比例系数  $\gamma = r_2/r_1$ ，取  $\gamma$ 、 $d$  为优化参数，分别取  $\gamma=0.5$ 、 $0.6$ 、 $0.7$ ， $d=7$ 、 $8$ 、 $9$ ，参数  $D$ 、 $a$  的值均与前文保持一致，通过  $\gamma$ 、 $d$  的组合变化，共构建出 9 种 C1 构型的优化结构。



**Figure 7. Schematic structure of the C1 configuration**  
**图 7. C1 构型结构示意图**

图 8 展示了 9 种模型的力-位移曲线，可以看出，9 种模型在变形过程中展现出高度的一致性，整个变形过程可分为三个阶段，分别为线性阶段，平台阶段，致密化阶段。在初始线性阶段，整个结构发生弹性变形，这是由于相邻胞元之间的连接边发生屈服变形导致的，随着压缩深度的不断加大并到达一定的临界值，变形模式进入第二阶段，此时相连胞元之间空隙减小，单个胞元发生坍塌并压缩，力-位移曲线显现出平台期，进一步压缩，



连接边长度急剧下降，压缩力数值急剧上升，结构进入致密化阶段，标志着结构的刚度达到最大。

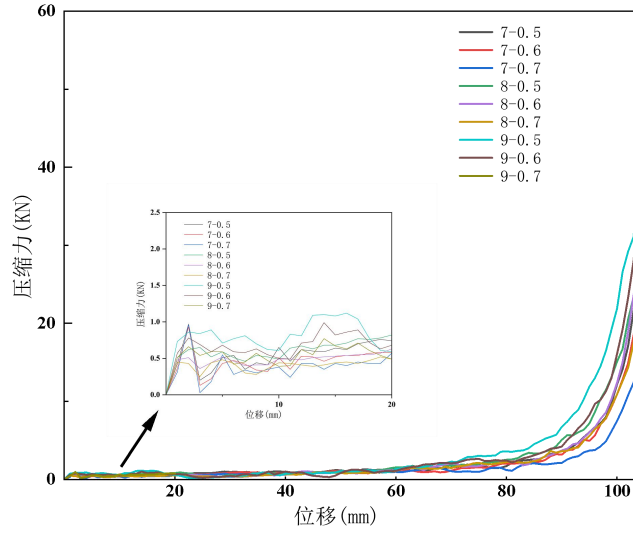


Figure 8. Force-displacement curves of double star negative Poisson's ratio structure with different parameters

图 8. 不同参数双星型负泊松比结构力-位移曲线

图 9 展示了初始峰值力、总吸能与连接边长度、比例系数 $\gamma$ 的关系，图中蓝色曲线展示了压缩位移  $X=75\text{mm}$  时不同模型的总吸能，纵向观察图像可知当保持连接边长度不变，比例系数 $\gamma$ 的递增将导致总吸能 EA 呈现下降趋势，在 $\gamma=0.5$  时，各个模型的吸能效果最好，这表明单一提升内层胞元的大小非但不能提升结构的吸能能力，反而会产生显著的抑制作用。而若保持比例系数 $\gamma$ 不变，通过增大单一连接边长度，结构总吸能变化不大，表明连接边长度对结构总吸能的增强效应不明显。

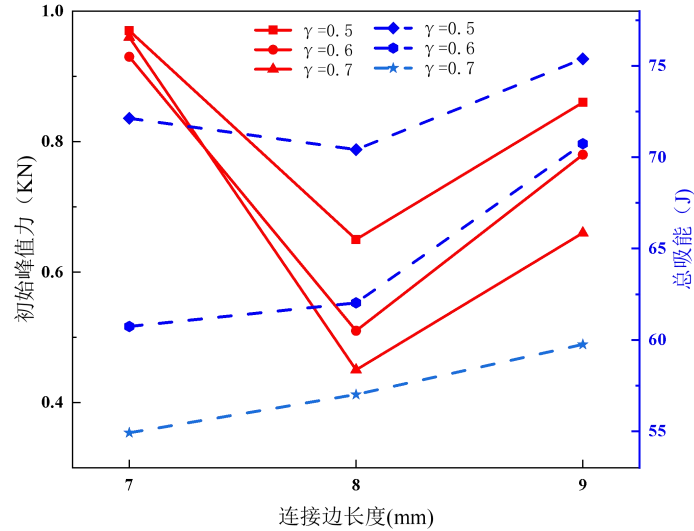


Figure 9. Crashworthiness indicators under different structural parameters

图 9. 不同结构参数下的耐撞性指标

观察图 9 中初始峰值力变化趋势，不同比例系数 $\gamma$ 下，初始峰值力的变化相对平缓，显现 $\gamma$ 对初始峰值力的降低效应并不显著，这表明在一定参数范围内，改变比例系数 $\gamma$ 对于降低初始峰值力不是一个有效手段，另一



方面,保持比例系数 $\gamma$ 不变,随着连接边长度  $d$  的逐渐增大,三条曲线的初始峰值力均经历了一个先下降后上升的过程,形成了一个明显的极值点。特别地,在连接边长度达到  $d=7\text{mm}$  时,初始峰值力达到了其最小值。

## 6 结论

本文以一种双星型负泊松比结构为基础,通过改变肋边的连接方式设计计出 C1、C2、C3 三种基本构型,通过有限元仿真对这三种构型进行耐撞性指标分析,并对 C1 构型进行结构优化,建立了与构型有关的理论分析模型,主要结论如下:

(1) 相较于 C2 构型, C1、C3 构型在压缩过程中展现了明显的负泊松比效应,在比吸能、平均压溃效率方面 C1、C3 比之 C2 均有大幅度的提高,对比三种结构, C1 的提升幅度最大,综合性能更加卓越。

(2) C1 构型在整个变形阶段可以分为三个阶段,在接触冲击的初始阶段,相邻胞元之间的连接边产生变形发生弹性形变,以结构的整体变形为主,在第二阶段中发生单个胞元的坍塌压缩与相邻胞元的挤压,最后阶段中结构进入致密化阶段,结构有效变形结束。

(3) 当连接边长度不变时,随着比例系数 $\gamma$ 增加,总吸能 EA 减少,当 $\gamma=0.5$ 时模型的吸能效果最好,这表明仅提升内层胞元大小对提升吸能能力促进作用较小;当比例系数 $\gamma$ 不变时,随着连接边长度增加,在总吸能 EA 变化不大的情况下,初始峰值力经历先下降后上升的阶段,并在连接长度  $d=8\text{mm}$  时取得最小初始峰值力。

## 致 谢 (Acknowledgement)

本研究得到合肥工业大学青年教师科研创新启动专项 (JZ2023HGQA0135) 和四川省博士后科研特别资助项目 (TB2024053) 的资助支持。

## 参考文献 (References)

- [1] J.L. Ju, N.N. Yang, L. Yu, et al. Simulation of Water-impact Characteristics of Auxetic Structure Buffer Device[J/OL]. Acta Armamentarii, 1-9. 鞠金龙, 杨娜娜, 余雷, 等. 负泊松比结构缓冲装置入水冲击特性数值仿真[J]. 兵工学报, 1-9.
- [2] S.Y. Zhang, C.W. Li, W.C. Xiang, et al. Improved design of negative Poisson's ratio structure and its application in aerospace[J/OL]. Journal of Chemical Engineering, 1-37. 庄晟逸, 李成伟, 向文超, et al. 负泊松比结构的改进设计及其在航空航天中的应用[J/OL]. 化工学报, 1-37.
- [3] W.D. Liu, H.B. Chen, S. Guo, et al. Design and mechanical analysis of novel chiral honeycomb structures[J/OL]. Journal of Composite Materials, 1-14.
- [4] 刘卫东, 陈浩波, 郭苏, 等. 新型手性蜂窝结构设计力学分析[J/OL]. 复合材料学报, 1-14.
- [5] H. Lu, X.P. Wang, T.Y. Chen. Design and crashworthiness of a new type of energy-absorbing box with 3D negative Poisson's ratio structural filling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(10): 188-198.
- [6] 陆欢, 王小鹏, 陈天宁, 具有 3D 负泊松比结构填充的新型吸能盒设计与耐撞性研究[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(10): 188-198.
- [7] W.J. Wang, W.M. Zhang, M.F. Guo, et al. Design of concave-star three-dimensional negative Poisson's ratio structure and impact energy absorption characteristics[J]. Vibration and Shock, 2024, 43(06): 75-83.
- [8] 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其冲击吸能特性[J]. 振动与冲击, 2024, 43(06): 75-83.
- [9] N. Li, S.Z. Liu, X.C. Zhang, et al. Dynamic mechanical properties of novel star-rhombic negative Poisson's ratio honeycomb structures[J/OL]. Journal of Composite Materials, 1-12.
- [10] 李娜, 刘述尊, 张新春, 等. 新型星-菱形负泊松比蜂窝结构的动态力学特性[J/OL]. 复合材料学报, 1-12.
- [11] P. Yan, G.P. Zhao, Performance and application of double-arrow negative Poisson's ratio materials and structures for impact protection[J]. Vibration and Shock, 2023, 42(22): 241-247+311.
- [12] 闫鹏, 赵桂平. 双箭头负泊松比材料与结构抗冲击防护性能及应用[J]. 振动与冲击, 2023, 42(22): 241-247+311.
- [13] T. Liu, Z.M. Xiao, J.C. Huang, et al. Impact resistance of new cross-shaped negative Poisson's ratio honeycomb structures[J]. Vibration and Shock, 2023, 42(11): 183-192.
- [14] 刘涛, 肖正明, 黄江成, 等. 新型十字形负泊松比蜂窝结构的抗冲击性能[J]. 振动与冲击, 2023, 42(11): 183-192.
- [15] X.N. Zhang, S.L. Yan, Y.X. Ou, et al. Gradient design and dynamic impact response of inner concave honeycomb structures with negative Poisson's ratio[J]. Vibration and Shock, 2023, 42(03): 193-198.
- [16] 张晓楠, 晏石林, 欧元勋, 等. 负泊松比内凹蜂窝结构梯度设计与动态冲击响应[J]. 振动与冲击, 2023, 42(03): 193-198.

- [17] H.T. Liu, J.Y. Liu, D.Q. Zhang. Study on the in-plane impact performance of air-bamboo-type negative Poisson's ratio honeycomb structures[J]. *Vibration and Shock*, 2022, 41(17): 262-267.
- [18] 刘海涛, 刘佳岳, 张德权. 空竹型负泊松比蜂窝结构的面内冲击性能研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(17): 262-267.
- [19] F. Luo, D.Q. Yang. Study on the performance of negative Poisson's ratio metamaterial protective structure under continuous blast impact[J]. *Vibration and Shock*, 2022, 41(02): 74-78+112.
- [20] 罗放, 杨德庆. 连续爆炸冲击下负泊松比超材料防护结构性能研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(02): 74-78+112.
- [21] H.T. Luo, M.R. An, L. Wang, et al. Study on in-plane inclined impact performance of bi-directional angular gradient in-concave honeycomb structures[J]. *Vibration and Shock*, 2021, 40(23): 159-165.
- [22] 刘海涛, 安明冉, 王梁, 等. 双向角度梯度内凹蜂窝结构的面内倾斜冲击性能研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(23): 159-165.
- [23] Wu H X, Liu Y, Zhang X C. In-plane crushing behavior and energy absorption design of composite honeycombs[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2018, 34: 1108-1123.
- [24] Gibson L J, Ashby M F, Harley B A. *Cellular materials in nature and medicine*[M]. Cambridge University Press, 2010.
- [25] Yu R., Mechanical properties of foamed filled structures with negative Poison ratio and their application to side crash-resistance[D], Huazhong universiy of Science and Technology, 2021.