

弧形负泊松比蜂窝结构抗冲击性能的有限元分析

黄绮雯, 张慧华, 韩尚宇, 纪晓磊

(南昌航空大学 土木建筑学院, 南昌 330063)

[摘要] 拉胀蜂窝因其轻质、抗冲击和吸能强等特点, 引起了学者们的广泛关注。采用有限元法探讨一类弧形蜂窝结构 (arc-star-shaped honeycomb, ASSH) 的整体面内冲击动力学行为, 比较冲击速度对 ASSH 和传统星型蜂窝结构 (SSH) 的变形模式、动态响应和能量吸收能力的影响。结果表明, 同等情况下, ASSH 比 SSH 具有更好的抗冲击性能。此外, 还研究了胞元壁厚和弧角等参数对 ASSH 吸能的影响, 相关结果有望为负泊松比材料和结构的设计提供一定的参考。

[关键词] 负泊松比; 弧形蜂窝结构; 能量吸收; 冲击; 有限元

[中图分类号] TB383.4

[文献标志码] A

doi: 10.3969/j.issn.2096-8566.2024.02.010

[文章编号] 2096-8566(2024)02-0076-13

Finite Element Study on the Impact Resistance of Arc-star-shaped Honeycomb with Negative Poisson's Ratio

HUANG Qi-wen, ZHANG Hui-hua, HAN Shang-yu, JI Xiao-lei

(School of Civil and Architectural Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Auxetic honeycombs have drawn broad attention due to their lightweight properties, distinguished impact resistance, and energy absorption capacity. With the finite element method, the overall in-plane dynamic performance of an arc-star-shaped honeycomb (ASSH) is investigated, and the effects of impact velocity on the deformation modes, dynamic response, and energy absorption of ASSH and traditional star-shaped honeycomb (SSH) are compared. This study shows that the ASSH demonstrates superior impact resistance than the SSH under given conditions. Besides, the effects of wall thickness and arc angles on energy absorption of ASSH are explored. The findings herein offers valuable insights for the design of materials and structures with negative Poisson's ratio.

Key words: negative Poisson's ratio; arc-star-shaped honeycomb; energy absorption capacity; crushing impact; finite element method

引言

迄今为止, 人们在生产生活中使用的各种类型功能材料几乎都是在自然材料的基础上加以改进和

提升, 其物理性能往往受到自然材料属性的限制^[1]。因此, 近年来超材料^[2-6]的设计和开发引起了科学界和工业界十分广泛的关注。

作为超材料研究领域的新兴分支, 力学超材

[收稿日期] 2023-10-23 [修回日期] 2023-11-23

[基金项目] 国家自然科学基金 (12062015); 江西省自然科学基金 (20212BAB211016); 南昌航空大学研究生创新专项资金项目 (YC2022-138)

[通信作者] 张慧华 (1982—), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 计算力学。

料^[7-10]广泛应用于建筑、航空航天、化工生产等诸多领域。负泊松比(negative Poisson's ratio, NPR)超材料^[11-12]是一类典型的力学超材料,因其独特的拉胀行为,呈现出较轻的质量、较高的剪切模量、优异的吸能、出色的抗冲击性、良好的吸波隔振等优点。

作为 NPR 结构的典型代表,星型蜂窝(star-shaped honeycomb, SSH)因其正交方向均呈现 NPR 效应,引起了学者们的密切关注。Theocaris 等^[13]首次提出了 SSH 的几何构型。Sigumund 和 Torquato^[14]制备了一种具有极值热膨胀系数(CTE)的 SSH。同样地,学者们围绕具有热力学性能可调的三维 SSH 开展了大量研究^[15-17]。Reis 和 Ganghoffer^[18]利用离散渐近均匀化方法分析了 SSH 的变形机理和等效力学性能,得出等效弹性模量和泊松比(PR)的闭合表达式。黄泽彬等^[19]分析了 SSH 不同方向受荷时的变形行为,运用能量法对结构面内等效力学性能进行了理论推导。基于数值模拟方法,韩会龙等^[20]讨论了冲击速度和几何参数对 SSH 动态响应行为的影响,并基于能量吸收效率法和一维冲击波理论推导了密实应变和动态平台应力的经验公式;杨德庆等^[21]分析了 SSH 的胞元壁厚、层数、胞元泊松比等参数对弹体抗冲击性能的影响;高松林^[22]模拟了局部冲击载荷下几何参数对 SSH 吸能特性的影响;张权等^[23]通过改变冲击速度、厚度梯度和角度梯度,研究了梯度 SSH 的动力响应和能量吸收特性。上述工作从理论、数值模拟等角度对 SSH 的抗冲击性能进行了较系统的研究,可为此类结构的设计和分析提供有益的指导。

为提高能量吸收和抗冲击性能,近年来学者们密切关注 SSH 几何构型的创新设计与发展。诸多学者通过改变结构的形式,讨论不同冲击速度和几何参数对其力学性能和能量吸收特性的影响,由此设计出了一系列性能改进的 SSH。Lu 等^[24]引入双斜杆和薄壁圆,设计出一种新型的组合星形-圆形蜂窝结构;Wei 等^[25-26]提出了一类组合星形-三

角形蜂窝;Lin 等^[27]设计了一种自相似同心星型蜂窝,并讨论了其在倾斜荷载作用下的性能;张子文^[28]构造了一种蝴蝶形拉胀蜂窝,对新型蜂窝夹芯板开展了自由振动分析;Li 等^[29]通过改变倾角提出了两类星形-正方形结构,得到了具有 PR 和 CTE 可调特性的结构;Liu 等^[30]通过在 SSH 中引入不同的尖端凹角,建立了 PR 可调的改进结构(ISSH);Li 等^[31]通过将 SSH 的水平杆和竖直杆替换为双斜杆,提出了一种交叉星型蜂窝,通过改变角度实现 PR 可调;Jin 等^[32]设计了一类内凹六边形嵌套星型胞元,并进行了理论计算;Wang 等^[33]引入双箭头胞元设计出星形-箭头蜂窝结构,并进行面内力学性能分析;An 等^[34]将六边形替代 SSH 的尖角,提出一类具有 2 个平台应力区的双向内凹蜂窝结构,并运用了数值模拟验证平台应力理论;Zhang 等^[35]引入圆弧设计出一种平面弧形-星形结构,并将其扩展到三维结构,得到了 PR 可调的结构。上述研究表明,在传统 SSH 的基础上,通过调整结构的形式可有效地提高其能量吸收能力。因此,围绕改变结构形式提高 SSH 的吸能性能开展研究具有十分重要的科学和实际意义。

本研究基于文献 [30],通过细化设计构造出一类新型弧形蜂窝结构(arc-star-shaped honeycomb, ASSH),进一步系统地研究其在冲击荷载作用下的变形模式、动态响应以及吸能特性,同时分析胞元壁厚和弧角等参数对结构抗冲击性能的影响。本研究旨在设计出吸能更优的蜂窝结构,为 NPR 结构的研发提供一定的参考。

1 胞元模型及耐撞性指标

1.1 胞元几何模型

传统的 SSH 由 4 个尖端角和 4 根连接杆组成(图 1a)。本研究的 ASSH 以文献 [30] 的 ISSH 为蓝本(图 1b),对其进行细化,即令 1/4 胞元中的 2 条斜杆的延长线交点位于方形单胞的顶点,具体见图 1c。由图 1a、图 1c 可以看出,ASSH 和 SSH 均可由 5 个几何参数表示,即斜杆长度 l_1 、连

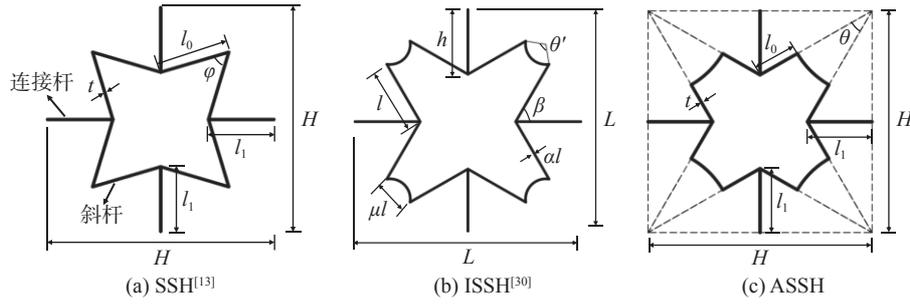


图 1 单胞的几何构型^[13,30]

接杆长度 l_0 、圆心角 θ (ASSH)或尖端角 φ (SSH)、胞元壁厚 t 和面外厚度 b (垂直于纸面)。假设所有胞壁为均质截面,此外,为避免胞壁间的自接触,参数 θ 、 φ 还须满足: $\theta, \varphi \in (0, 90^\circ)$ 。

1.2 耐撞性指标

常见的耐撞性指标有比吸能(Specific Energy Absorption, SEA)、峰值荷载、平均荷载和碰撞效率等,本研究主要关注结构的 SEA ,其定义为^[34]:

$$SEA = \frac{\int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\Delta\rho\rho_s} \quad (1)$$

式中: σ 、 ε 分别为名义应力和名义应变; ρ_s 为材料的密度; $\Delta\rho$ 为结构的相对密度,对 ASSH、SSH, $\Delta\rho$ 可分别记作 $\Delta\rho_{ASSH}$ 、 $\Delta\rho_{SSH}$,相应的表达式为^[20]:

$$\Delta\rho_{ASSH} = \frac{A_1^*}{A_{s1}} = \frac{t \cos^2 \theta [l_1 + l_0(2 - \theta)] + \sqrt{2} \theta t l_1 \cos \theta \left(\cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} \right)}{l_1^2 (1 + \sin \theta)^2} \quad (2)$$

$$\Delta\rho_{SSH} = \frac{A_2^*}{A_{s2}} = \frac{t(l_1 + 2l_0)}{\left(l_1 + \sqrt{2} l_0 \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} \quad (3)$$

$$A_{s1} = A_{s2} = \frac{l_1^2 (1 + \sin \theta)^2}{\cos^2 \theta} \quad (4)$$

式中: A_1^* 、 A_2^* 分别为 ASSH 和 SSH 胞元的实体部分所占面积, A_{s1} 、 A_{s2} 则分别表示相应的有效横截面积。

由于式(1)定义的 SEA 与结构的变形过程有关,即与 ε 的取值相关,为综合衡量各种结构的吸能特性,一般取密实应变 ε_d 对应的 SEA (记作 $SEA-D$)

进行比较^[24, 26-27, 31],即

$$SEA-D = \frac{\int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\Delta\rho\rho_s} \quad (5)$$

其中, ε_d 为结构的应力-应变曲线斜率急速上升所对应的应变^[24],可由能量吸收效率方法得到^[36]:

$$\left. \frac{d\eta(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_d} = 0 \quad (6)$$

式中: $\eta(\varepsilon)$ 为能量吸收效率,即材料在给定的名义应变范围内吸收的能量与名义应力的比值,其表达式为:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \quad (7)$$

2 有限元模型与验证

为考察在不同冲击载荷作用下 ASSH 的变形模式和能量吸收特性,建立面内冲击有限元模型,并对模型的可靠性进行验证。

2.1 有限元模型

为系统分析在面内冲击载荷作用下 ASSH 的动态力学性能,利用有限元软件 ABAQUS 建立如图 2 所示的仿真模型。该模型由蜂窝体、冲击板和固定板组成。建模时,取 $l_0=4$ mm、 $l_1=6$ mm、 $\theta=15^\circ$ 、 $b=2$ mm、 $t=0.3$ mm。蜂窝体选用铝作为基体材料,并假设其为理想弹塑性模型,材料密度 $\rho_s=2700$ kg/m³,杨氏模量为 68 GPa,屈服应力为 80 MPa,泊松比为 0.3。冲击板和固定板均定义为刚性板,其密度和杨氏模量分别为 7800 kg/m³ 和 210 GPa。网格划分时,蜂窝体采用沿厚度方向具有 5 个积分点的 S4R 壳单元,上板和下板采用 R3D4

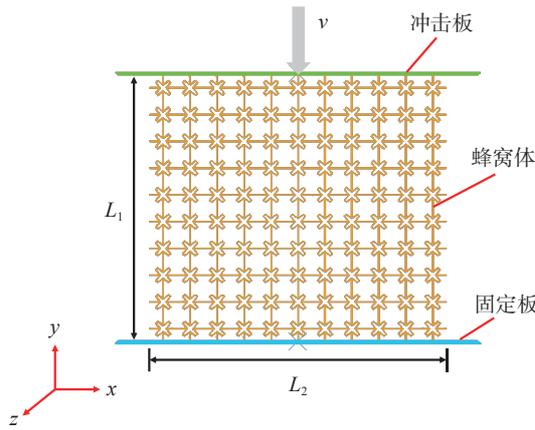
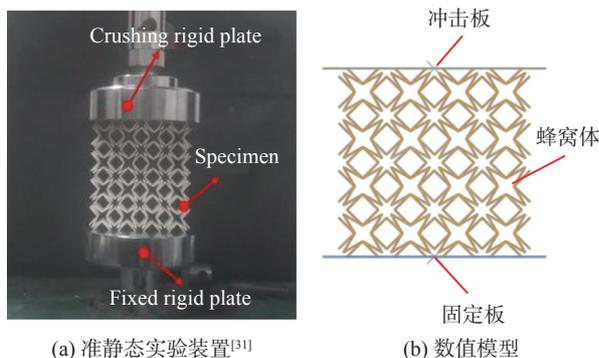


图 2 ASSH 结构面内冲击示意图

单元。研究表明^[31], 当 x 方向和 y 方向上的胞元数量超过 8 时, 其动态响应趋于稳定, 因此, 本研究取 11×10 的胞元阵列(图 2)。此外, 蜂窝体与刚性板之间的接触, 以及蜂窝体内部自身接触均采用通用接触, 摩擦系数为 0.2^[37]。边界条件设置为: 下板完全固定, 上板只存在 y 方向位移, 即 $U_x = U_z = UR_x = UR_y = UR_z = 0$ 。蜂窝体约束面外位移, 两侧自由, 即 $U_z = UR_x = UR_y = 0$ (U_i 表示 i 方向上位移, UR_i 表示绕 i 轴的转角 ($i=x, y, z$))。

2.2 模型验证

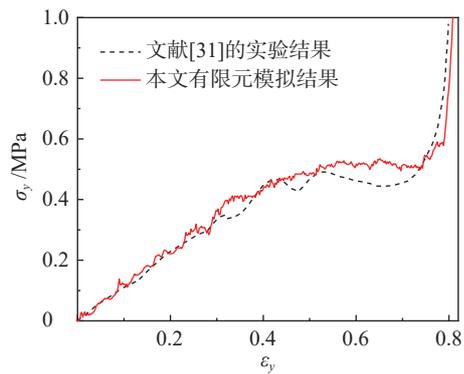
关于 ASSH 结构耐撞性能的研究尚未见报道, 为验证模型的可靠性, 此处选取文献 [31] 中给出的一种蜂窝结构进行分析, 相关模型如图 3 所示。蜂窝材料的密度为 1250 kg/m^3 , 杨氏模量为 1.8 GPa, 泊松比为 0.35, 屈服强度为 27 MPa。胞元壁厚为 1 mm, 面外厚度为 25 mm。蜂窝体网格尺寸为 0.625 mm, 包含 163 840 个单元。边界条件设置与文献 [31] 相同, 即: 下板完全固定, 上板只存在



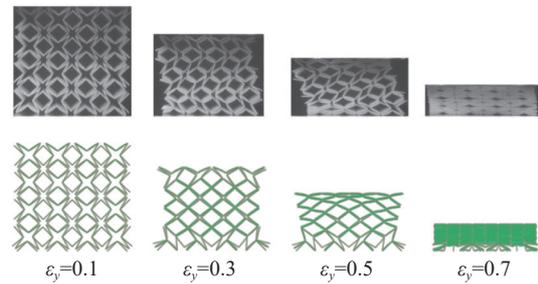
(a) 准静态实验装置^[31]

(b) 数值模型

图 3 模型验证示意图



(a) 应力-应变曲线对比



(b) 变形模式对比

图 4 文献 [31] 实验模型与本文数值模型的结果对比

y 方向的速度, $V_x = V_z = VR_x = VR_y = VR_z = 0$ (V_i 表示 i 方向上速度, VR_i 表示绕 i 轴的转动速度 ($i = x, y, z$)); 蜂窝体面外位移为 0, 两侧自由。为模拟准静态压缩条件, 冲击速度取 1 m/s ^[38]。图 4 显示了有限元模拟和实验结果的对比情况。有限元仿真得到名义应力 (σ_y)-名义应变 (ε_y) 曲线, 其中: $\sigma_y = F_0 / (bL_2)$, F_0 为冲击板的接触反力, L_2 为蜂窝体的初始宽度; $\varepsilon_y = \Delta y / L_1$, Δy 为蜂窝体压缩位移, L_1 为蜂窝体的初始高度。从图 4a 中可观察到, 仿真结果与实验结果一致性较好。此外, 从图 4b 可以看出, 两者整体变形过程较为相似, 即变形最初集中于冲击端和固定端附近, 随着压缩的进行, 变形逐渐向中间区域扩展。实验和有限元模拟结果的差异可能与实验加载及约束条件实现的偏差有关。

总体来说, 本节建立的有限元模型能较好地复现实验结果, 可进一步用于后期对 ASSH 的抗冲击性能的分析。

2.3 有限元网格选取

为兼顾模拟的精度与效率, 需选择合适的有限单元尺寸。为此, 基于 4 种不同的网格尺寸, 即 0.25、0.50、0.75、1.50 mm, 分析图 2 所示的

ASSH 在 25 m/s 冲击速度下的动态性能, 设计网格尺寸为 0.5 mm 时的离散模型(图 5)。图 6a 为相应的 $\sigma_y-\varepsilon_y$ 曲线, 图 6b 则为绘制的 SEA-D 及计算时间。其中, 计算平台基本参数为: Windows 10 系统, i5-7300HQ CPU, 8 GB 内存。从图中可知, 当网格尺寸取 0.25、0.50 mm 时, SEA-D 趋于稳定, 且当网格尺寸为 0.50 mm 时所需计算时间较短。因此, 综合考虑计算时间与仿真精度, 后续均选取 0.50 mm 的网格尺寸进行模拟。

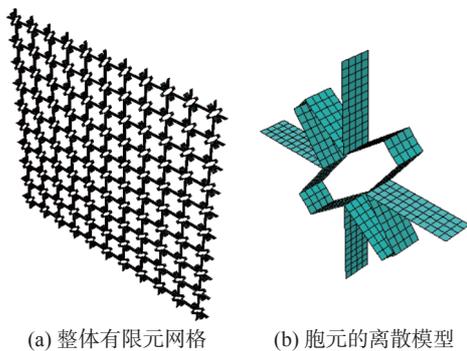
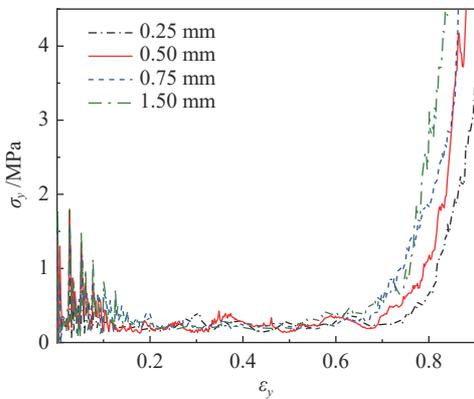
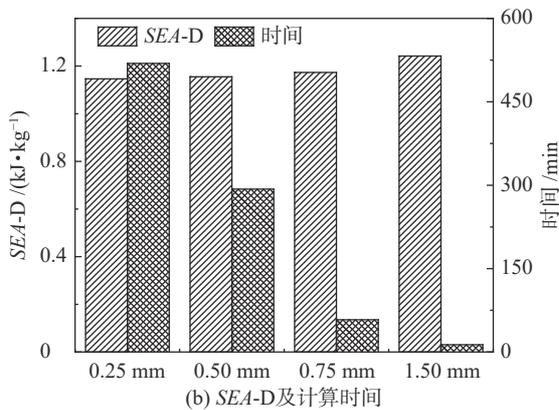


图 5 网格尺寸取 0.50 mm 时的有限元离散



(a) 应力-应变曲线



(b) SEA-D及计算时间

图 6 不同网格尺寸下的应力-应变曲线和 SEA-D

3 ASSH 抗冲击性能的结果与讨论

基于 2.1 节的有限元模型, 重点围绕 ASSH 和 SSH 在不同冲击荷载作用下的变形模式、能量吸收特性和动态泊松比进行对比分析。对 SSH 进行建模时, 取 $\varphi=37.5^\circ$, 并令其相对密度 $\Delta\rho$ 与 ASSH 的相同(即图 1a 中的 $t=0.333$ mm), 材料及其他几何参数同 2.1 节。

3.1 变形模式

研究表明, 冲击速度是影响蜂窝面内冲击变形行为的一个重要参数^[33]。在临界阶段, 引起塑性变形的冲击速度称为第一临界速度。当冲击速度小于第一临界速度时, 蜂窝结构主要表现为整体变形特征; 当冲击速度大于第一临界速度时, 结构将在冲击端处出现局部变形带, 并向固定端传播。Hönig 和 Strong^[39] 定义了第一临界速度, 即

$$v_{cr1} = \int_0^{\varepsilon_{cr}} \sqrt{\frac{\sigma'(\varepsilon)}{\Delta\rho\rho_s}} d\varepsilon \quad (8)$$

式中: ε_{cr} 为初始峰值应力对应的应变; $\sigma'(\varepsilon)$ 表示应力的一阶导数, 即弹性变形阶段的杨氏模量。

当冲击速度持续增大时, 蜂窝结构在冲击端的局部变形将更加明显。当变形带的传播方式表现出冲击波特征时, 此时的冲击速度称为第二临界速度^[40], 计算公式为

$$v_{cr2} = \sqrt{\frac{2\sigma_0\varepsilon_d}{\Delta\rho\rho_s}} \quad (9)$$

式中, σ_0 为蜂窝结构的静态屈服应力。

根据式(8)、式(9)可求得 ASSH 和 SSH 的 v_{cr1} 分别为 5、4 m/s, v_{cr2} 分别为 37、27 m/s。故分别选取 3 种冲击速度, 即 $v=2$ m/s ($v < v_{cr1}$, 低速)、 $v=25$ m/s ($v_{cr1} < v < v_{cr2}$, 中速) 以及 $v=90$ m/s ($v > v_{cr2}$, 高速) 进行分析, 探究冲击速度对 ASSH 及 SSH 动态响应的影响情况。

图 7 给出了两种结构在不同冲击速度下的变形模式。从图 7a 可以看出, 在低速冲击作用下, ASSH 和 SSH 首先发生整体变形, 且变形同时出现在冲击端和固定端, 冲击端附近变形较小。由于胞

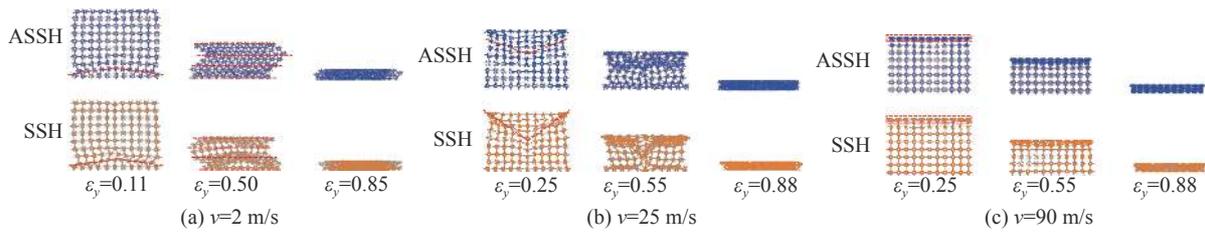


图 7 ASSH 和 SSH 在不同冲击速度下的变形模式

壁的旋转和弯曲, 逐渐在固定端附近形成 V 型变形带。随着压缩进行, 结构发生整体屈曲, 胞壁出现明显的横向收缩。此外, SSH 出现了压缩失稳, 这是由于压缩过程中垂直连杆发生弯曲, 导致相邻层星形胞元的尖端角出现错位接触从而呈现整体结构向一侧倾斜的结果。从图 7b 中观察到, 中速冲击时, 两者的局部变形首先出现在冲击端, 并逐渐形成 V 型变形带。与 SSH 相比, ASSH 的横向变形相对较小。随着压缩位移增加, V 型带逐渐向固定端延伸, 固定端附近的胞元开始横向收缩, 出现局部变形带, 呈现负泊松比效应。从图 7c 中看

到, 结构受高速冲击时, 首先在冲击端发生明显的局部变形, 并逐渐产生 I 型变形带。随着压缩的推进, 结构从冲击端到固定端发生逐层压溃, 这是由于冲击端附近胞元在高速冲击荷载作用下没有足够的时间进行收缩变形导致的。此外, 在 3 种速度下, 最后胞壁均相互接触, 达到密实化状态。

进一步分析在不同冲击速度下两种结构的动态压缩应力-应变曲线(图 8)。低速冲击下两者应力差异较小, 同时低速冲击下结构以整体变形为主, 使得平台区应力稳定且波动较小。在中速冲击时的密实化阶段, ASSH 的应力明显高于 SSH。高

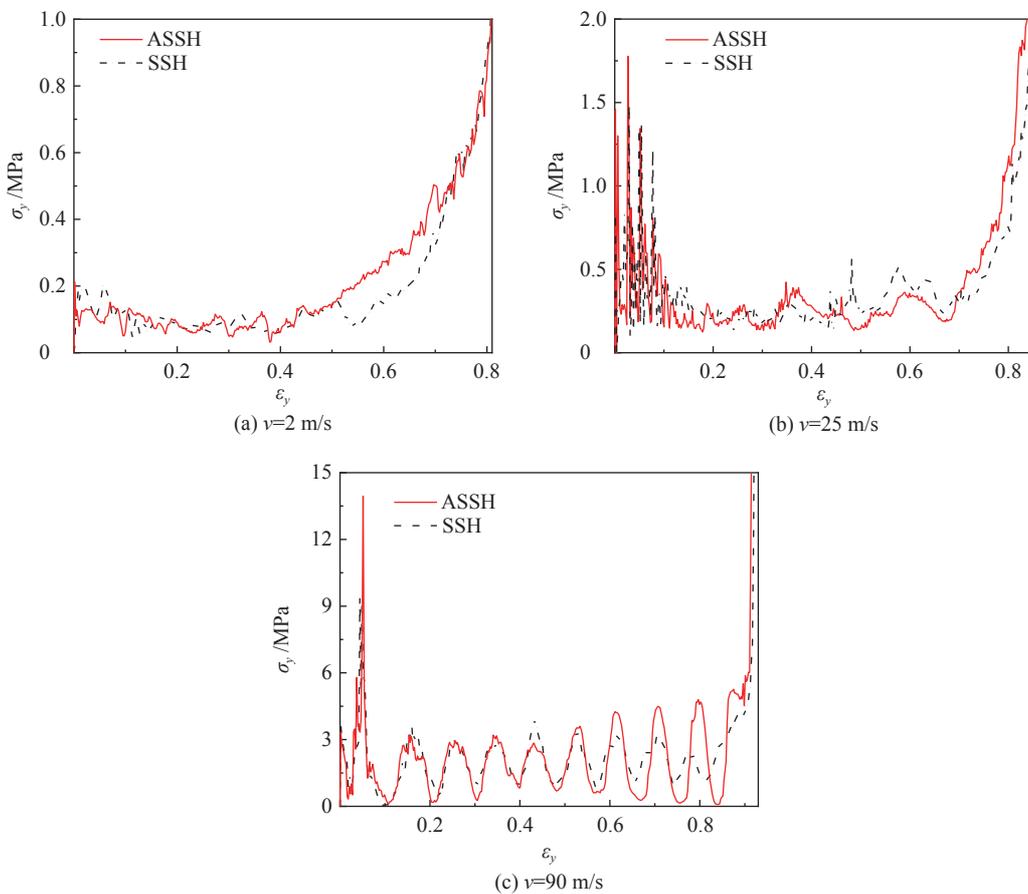


图 8 ASSH、SSH 在不同冲击速度下的应力-应变曲线

速冲击作用下由于惯性效应的显著影响, 平台区出现较大的周期性波动, 可以观察到, 波峰个数与蜂窝结构的层数相同。

3.2 能量吸收

根据式(1)一式(7), 得到 *SEA* 的结果, 见图 9。可以看出, 在不同的冲击速度下, ASSH 和 SSH 的 *SEA* 曲线差异很小。为进一步衡量两者的吸能特性, 表 1 列出了 *SEA-D* 的具体数值。可以看出, 在低速、中速和高速冲击下, ASSH 的 *SEA-D* 比 SSH 分别高约 26.09%、7.34% 和 2.33%。由此可知, 在不同冲击速度作用下, ASSH 吸收能量

的能力均强于 SSH, 且在低速冲击的优势最为明显。吸能性能的提升程度随着冲击速度的增加有所降低, 这主要是因为惯性效应增加致使结构无法及时收缩变形和吸收更多能量。

3.3 动态泊松比

动态泊松比是反映结构变形的重要力学参数, 其定义为:

$$\nu' = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (10)$$

式中: 横向应变 ε_x 为:

$$\varepsilon_x = \Delta\bar{x}/L_2 \quad (11)$$

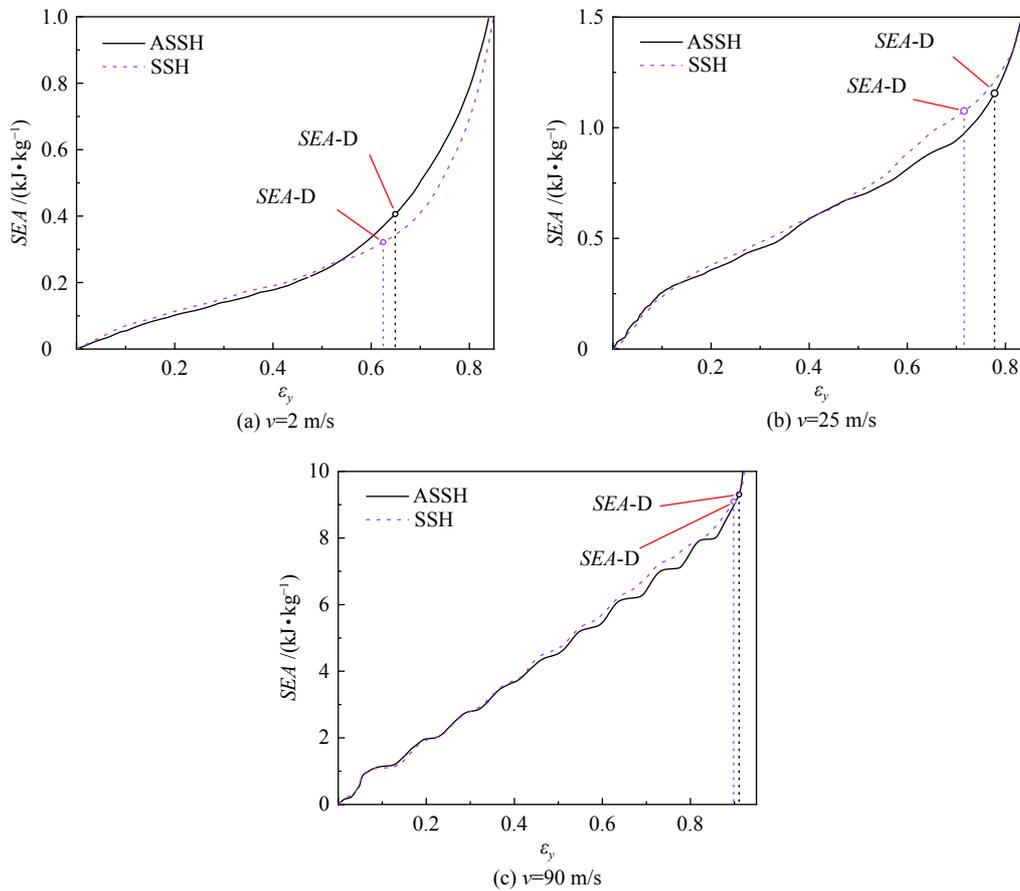


图 9 不同冲击速度下 ASSH、SSH 的 *SEA*

表 1 不同冲击速度下 ASSH、SSH 的密实应变和 *SEA-D*

$v/(m\cdot s^{-1})$	ε_d		<i>SEA-D</i> /(kJ·kg ⁻¹)		<i>SEA-D</i> 增长率/%
	ASSH	SSH	ASSH	SSH	
2	0.649	0.625	0.406	0.322	26.09
25	0.778	0.716	1.155	1.076	7.34
90	0.911	0.898	9.308	9.096	2.33

其中, 横向压缩位移 $\Delta\bar{x}$ 取结构左右两侧对称节点位移之和的平均值。按图 10 的方式选取节点。据此, $\Delta\bar{x}$ 可表示为^[27]:

$$\Delta\bar{x} = \frac{\sum_{i=A}^E (\Delta x_i + \Delta x'_i)}{5} \quad (12)$$

其中, Δx_i 、 $\Delta x'_i$ 分别为蜂窝体两侧对称节点 i 和 i' ($i=A\sim E$) 的横向位移。

图 11 为在不同冲击速度下 ASSH、SSH 的动态泊松比和横向应变。从图 11a、图 11c 中均可以观察到, 两种结构在冲击荷载作用下都表现出拉胀行为, 即呈现 NPR 效应。在 3 种冲击速度下, 随着纵向变形的增加, ASSH 的横向应变均呈现先增大后减小的趋势, 说明变形主要发生在压缩初期。另外, 随着冲击速度的增加, 动态泊松比的绝对值呈下降趋势, 即 NPR 效应减弱。此外, 从图 11c 中还可以看出, 在高速冲击下 ASSH 的动态泊松比曲线总体高于 SSH, 表明 SSH 比 ASSH 呈现更明显的

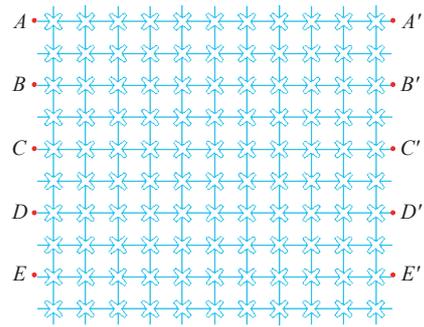


图 10 横向位移计算示意图

NPR 效应, 但由于惯性效应两种结构均发生明显的局部变形, 冲击端附近的胞元来不及收缩变形即被压实(图 7c), 因此两者的动态泊松比的绝对值均较小。

4 参数分析

前面比较了不同冲击速度对 ASSH 和 SSH 吸能的影响, 为进一步分析 ASSH 的抗冲击性能, 本节讨论胞元几何参数对应力变化过程和 SEA 的

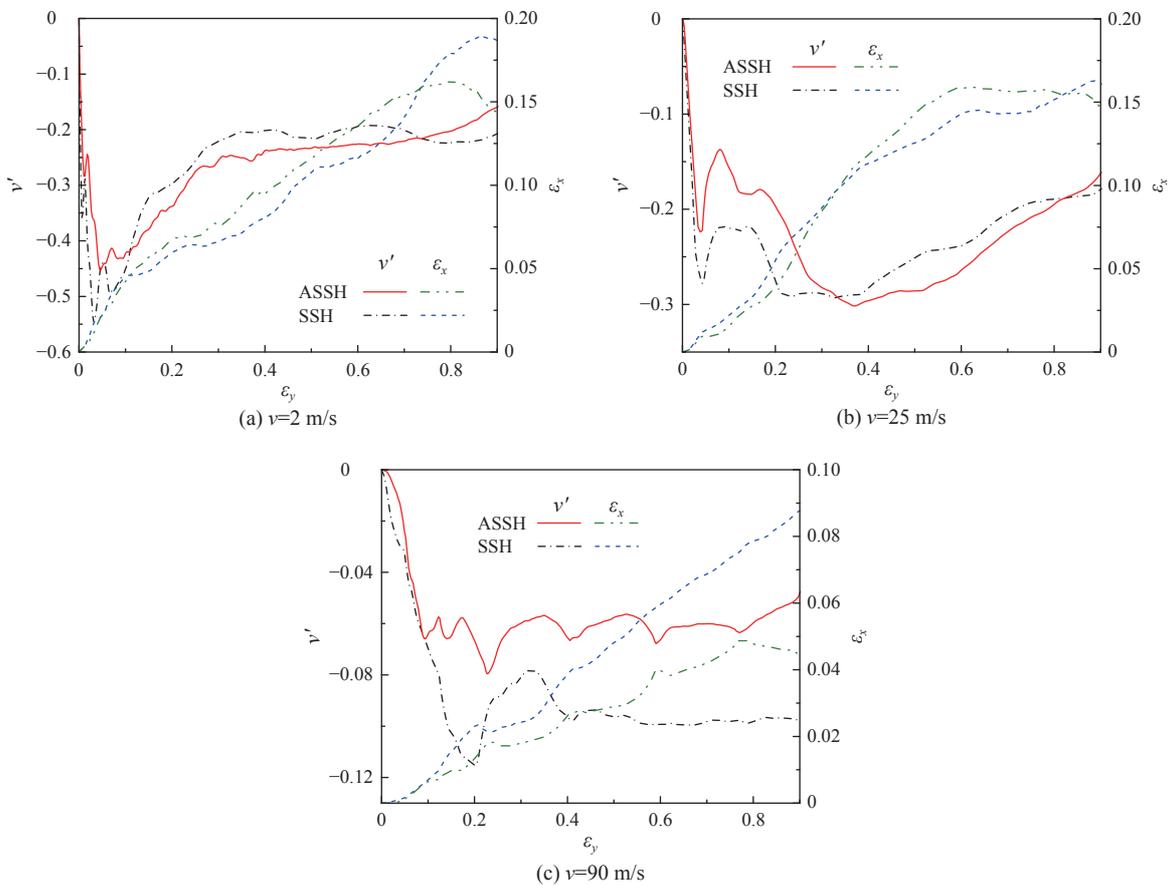


图 11 不同冲击速度下 ASSH、SSH 的动态泊松比与横向应变

影响。

4.1 胞元壁厚的影响

在保持图 1c 中其他参数不变的情况下, 先后取壁厚 t 为 0.2、0.3、0.4 mm。图 12 为不同冲击速度和壁厚下的应力-应变曲线和 SEA 曲线。不难发现, 在整个压缩过程中, 随着 t 的增加, 应力呈明显上升趋势, 同时 SEA 与 t 呈正相关。此外, 表 2 还列出了不同壁厚下的 SEA-D 及其变化率, 可以看

出: 在低速冲击下, 壁厚的增加对 SEA-D 的影响最为明显, 而随着速度的增加, 差异逐渐减小。由此可见, 合理增加壁厚可有效提高结构的抗冲击性能。

4.2 胞元弧角的影响

进一步分析弧角 θ 的影响, 分别取 θ 为 10° 、 15° 和 20° , 对应的应力-应变和 SEA 曲线见图 13, 相应的 SEA-D 见表 3。可以观察到, 在整个压缩过程中, 随着 θ 的增加, 应力曲线无明显差异。由表 3

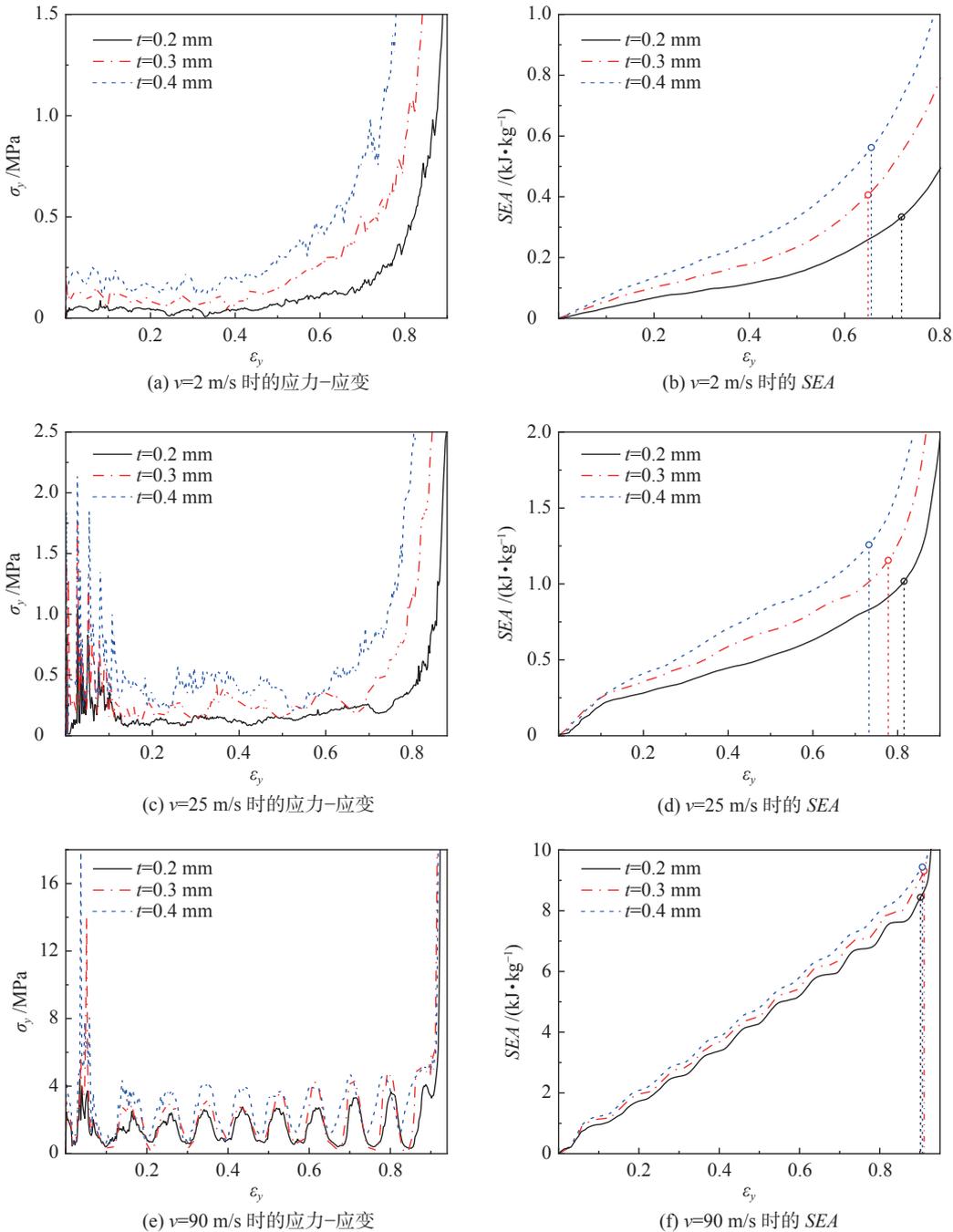


图 12 不同冲击速度和壁厚下 ASSH 的应力-应变和 SEA 曲线 (空心点表示对应的 SEA-D 值)

表 2 不同壁厚下的 SEA-D

$v/(m \cdot s^{-1})$	SEA-D / (kJ · kg ⁻¹)			SEA-D增长率 / % (相对于 $t = 0.2$ mm)	
	$t = 0.2$ mm	$t = 0.3$ mm	$t = 0.4$ mm	$t = 0.3$ mm	$t = 0.4$ mm
2	0.333	0.406	0.562	21.92	68.77
25	1.017	1.155	1.257	13.57	23.60
90	8.438	9.308	9.437	10.31	11.84

中的 SEA-D 的增长率可以看出, 低速冲击下弧角的增加对 SEA-D 的影响最为显著, 而随着速度增

加, 影响逐渐减弱, 且 SEA-D 与弧角呈负相关, 即 SEA-D 随着弧角的增大呈下降趋势。由此可推断

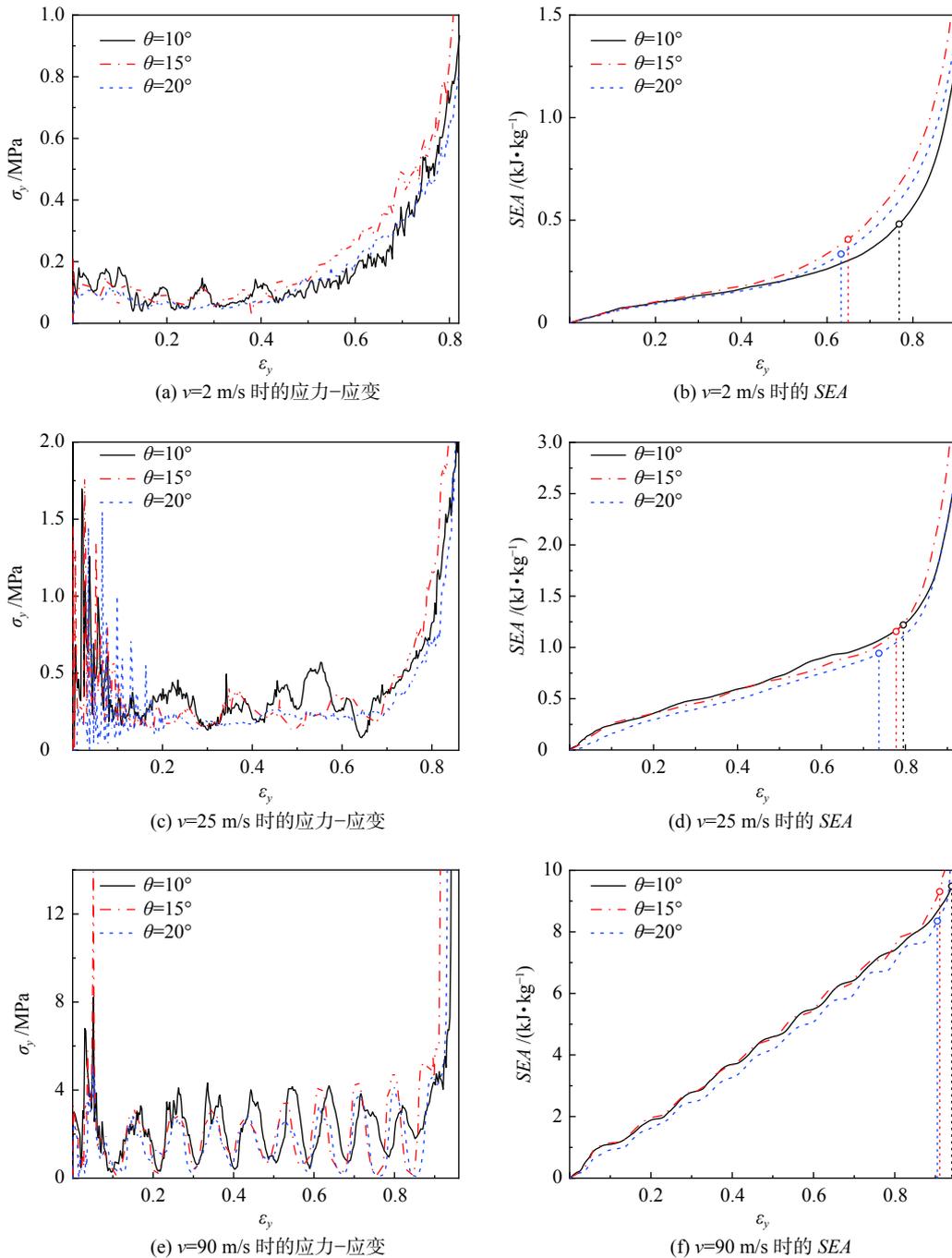


图 13 不同冲击速度和弧角下 ASSH 的应力-应变和 SEA 曲线 (空心点表示对应的 SEA-D 值)

表 3 不同弧角下的 SEA-D

$v/(m \cdot s^{-1})$	SEA-D $/(kJ \cdot kg^{-1})$			SEA-D 增长率 $\%(\text{相对于 } \theta = 10^\circ)$	
	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 20^\circ$
2	0.481	0.406	0.335	15.59	30.35
25	1.219	1.155	0.943	5.25	22.64
90	9.482	9.308	8.349	1.84	11.95

出, 弧角越小, NPR 效应越明显。

5 结 论

鉴于弧形蜂窝结构 (ASSH) 可有效避免常规蜂窝结构 (SSH) 因尖端角的存在易产生应力集中的问题, 构造了一类弧形蜂窝结构, 并利用有限元法研究了其在冲击荷载作用下的整体面内抗冲击性能, 比较了不同面内冲击速度对 ASSH 和 SSH 的变形失效模式、动态响应和能量吸收能力的影响, 同时进行了参数分析。主要结论如下:

1) 冲击速度对蜂窝的变形行为有着至关重要的影响。低速冲击下, 固定端首先发生变形, 随即出现明显的横向变形, 结构呈现整体变形; 中速冲击下, 冲击端产生局部变形带, 进而传递到固定端; 高速冲击下, 结构逐层压溃, 固定端无明显变形。

2) 结构变形初始阶段, 应力-应变曲线均呈线性变化, 随着冲击速度的改变, 曲线发展趋势出现

差异: 低速下平台区应力波动较小, 而高速下曲线呈较大的周期性波动。

3) 与 SSH 相比, 在不同的冲击速度下, ASSH 均具有更高的能量吸收能力。在低速、中速和高速冲击下, ASSH 的 SEA-D 分别比 SSH 高 26.09%、7.34% 和 2.33%。此外, 随着冲击速度的增加, 能量吸收能力呈上升趋势。

4) 通过参数分析可知: 随着胞元壁厚的增加, SEA 稳定增长, 而弧角与 SEA 呈负相关。因此, 适当增加壁厚或减小弧角可以有效提升蜂窝结构的能量吸收性能。

本研究探讨了 ASSH 的抗冲击性能, 相关工作可为新型蜂窝结构的设计和分析提供一定的参考。后期将进一步关注星型结构尖端角和连接杆的形式等变化, 并围绕相应的梯度结构开展研究, 以期设计出具有更优异能量吸收能力的超材料与超结构。

【参考文献】

- [1] 郑隆, 江五贵, 吴志凯. 多级蜂窝弹性参数的有限元模拟 [J]. 南昌航空大学学报 (自然科学版), 2016, 30(2): 22-27.
- [2] 于相龙, 周济. 智能超材料研究与进展 [J]. 材料工程, 2016, 44(7): 119-128.
- [3] 杜云峰, 姜交来, 廖俊生. 超材料的应用及制备技术研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30(9): 115-121.
- [4] 吕通, 张辰威, 刘甲, 等. 吸波超材料研究进展 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(1): 25-35.
- [5] 柏林, 张信歌, 蒋卫祥, 等. 光控电磁超材料研究进展 [J]. 雷达学报, 2021, 10(2): 240-258.
- [6] 刘晓丽, 刘崇锐, 吴九汇. 吸声超材料研究进展 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(9): 1241-1251.
- [7] 竺清, 张海军, 韩磊, 等. 机械超材料研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(10): 3786-3796.
- [8] 尹剑飞, 蔡力, 方鑫, 等. 力学超材料研究进展与减振降噪应用 [J]. 力学进展, 2022, 52(3): 508-586.
- [9] 苏继龙, 吴金东, 刘远力. 蜂窝结构力学超材料弹性及抗冲击性能的研究进展 [J]. 材料工程, 2019, 47(8): 49-58.
- [10] 方虹斌, 吴海平, 刘作林, 等. 折纸结构和折纸超材料动力学研究进展 [J]. 力学学报, 2022, 54(1): 1-38.
- [11] 于靖军, 谢岩, 裴旭. 负泊松比超材料研究进展 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 1-14.
- [12] 任鑫, 张相玉, 谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展 [J]. 力学学报, 2019, 51(3): 656-87.

- [13] THEOCARIS P S,STAVROULAKIS G E,PANAGIOTOPOULOS P D. Negative Poisson's ratios in composites with star-shaped inclusions:a numerical homogenization approach [J]. *Archive of applied mechanics*,1997,67(4):274-286.
- [14] SIGMUND O,TORQUATO S. Composites with extremal thermal expansion coefficients [J]. *Applied physics letters*,1996,69(21):3203-3205.
- [15] AI L,GAO X L. Three-dimensional metamaterials with a negative Poisson's ratio and a non-positive coefficient of thermal expansion [J]. *International journal of mechanical sciences*,2018,135:101-113.
- [16] XU N,LIU H T. A novel 3-D structure with tunable Poisson's ratio and adjustable thermal expansion [J]. *Composites communications*,2020,22:100431.
- [17] LIU H T,XU N,WANG Y B,et al. Three-dimensional enhanced star-shaped honeycombs with negative thermal expansion [J]. *Composite structures*,2022,279:114772.
- [18] DOS REIS F,GANGHOFFER J F. Equivalent mechanical properties of auxetic lattices from discrete homogenization [J]. *Computational materials science*,2012,51(1):314-321.
- [19] 黄泽彬,蓝林华,孙静. 一种星形蜂窝结构面内等效力学性能的计算方法 [J]. *应用力学学报*,2022,39(5):922-931.
- [20] 韩会龙,张新春. 星形节点周期性蜂窝结构的面内动力学响应特性研究 [J]. *振动与冲击*,2017,36(23):223-231.
- [21] 杨德庆,吴秉鸿,张相闻. 星型负泊松比超材料防护结构抗爆抗冲击性能研究 [J]. *爆炸与冲击*,2019,39(6):124-135.
- [22] 高松林. 星形负泊松比结构抗冲击性能研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2019.
- [23] 张权,高松林,杜志鹏,等. 星形梯度负泊松比蜂窝结构面内冲击动态响应 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*,2020,44(5):886-891.
- [24] LU H,WANG X,CHEN T. In-plane dynamics crushing of a combined auxetic honeycomb with negative Poisson's ratio and enhanced energy absorption [J]. *Thin-walled structures*,2021,160:107366.
- [25] WEI L L,ZHAO X,YU Q,et al. Quasi-static axial compressive properties and energy absorption of star-triangular auxetic honeycomb [J]. *Composite structures*,2021,267:116850.
- [26] WEI L L,ZHAO X,YU Q,et al. A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength [J]. *Thin-walled structures*,2020,149:106623.
- [27] LIN H B,LIU H T,AN M R. In-plane dynamic impact behaviors of a self-similar concentric star honeycomb with negative Poisson's ratio [J]. *Materials today communications*,2022,33:104474.
- [28] 张子文. 蝴蝶形负泊松比蜂窝结构的力学性能研究 [D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2021.
- [29] LI X,GAO L,ZHOU W,et al. Novel 2D metamaterials with negative Poisson's ratio and negative thermal expansion [J]. *Extreme mechanics letters*,2019,30:100498.
- [30] LIU H T,WANG L. Design 3D improved star-shaped honeycomb with different tip angles from 2D analytical star-shaped model [J]. *Composite structures*,2022,283:115154.
- [31] LI X L,LI Z Z,GUO Z Y,et al. A novel star-shaped honeycomb with enhanced energy absorption [J]. *Composite structures*,2023,309:116716.
- [32] JIN Y T,QIE Y H,LI N N,et al. Study on elastic mechanical properties of novel 2D negative Poisson's ratio structure:re-entrant hexagon nested with star-shaped structure [J]. *Composite structures*,2022,301:106065.
- [33] WANG H,LU X X,YANG Z Y,et al. In-plane dynamic crushing behaviors of a novel auxetic honeycomb with two plateau stress regions [J]. *International journal of mechanical sciences*,2019,151:746-759.
- [34] AN M R,WANG L,LIU H T,et al. In-plane crushing response of a novel bidirectional re-entrant honeycomb with two plateau stress regions [J]. *Thin-walled structures*,2022,170:108530.
- [35] ZHANG Z Y,LI J,LIU H T,et al. Novel 2D arc-star-shaped structure with tunable Poisson's ratio and its 3D configurations [J]. *Materials today communications*,2022,30:103016.

[36] ZHANG X C,AN L Q,DING H M,et al. The influence of cell micro-structure on the in-plane dynamic crushing of honeycombs with negative Poisson's ratio [J]. Journal of sandwich structures and materials,2015,17(1):26-55.

[37] INGROLE A,HAO A,LIANG R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement [J]. Materials & design,2017,117:72-83.

[38] QIAO J X,CHEN C Q. Analyses on the in-plane impact resistance of auxetic double arrowhead honeycombs [J]. Journal of applied mechanics,2015,82(5):051007.

[39] HÖNIG A,STRONG W J. In-plane dynamic crushing of honeycomb. Part I: crush band initiation and wave trapping [J]. International journal of mechanical science,2002,44:1665-1696.

[40] ZOU Z,REID S R,TAN P J,et al. Dynamic crushing of honeycombs and features of shock fronts [J]. International journal of impact engineering,2009,36(1):165-176.

=====

(上接第 60 页)

[5] BOCCARDO L,ORSINA L. Existence results for Dirichlet problems in L^1 via minty's lemma [J]. Applicable analysis,2000,76:309-317.

[6] ARCOYA D,BOCCARDO L. Regularizing effect of the interplay between coefficients in some elliptic equations [J]. Journal of functional analysis,2015,268(5):1153-1166.

[7] ARCOYA D,BOCCARDO L. Regularizing effect of L^q interplay between coefficients in some elliptic equations [J]. Journal de mathématiques pures et appliquées,2018,111(9):106-125.

[8] ARCOYA D,BOCCARDO L,ORSINA L. Regularizing effect of the interplay between coefficients in some nonlinear Dirichlet problems with distributional data [J]. Annali di matematica pura ed applicata,2020,199(5):1909-1921.

[9] BUCCHERI S. Some nonlinear elliptic problems with $L^1(\Omega)$ coefficients [J]. Nonlinear analysis,2018,177:135-152.

[10] MORENO-MERIDA L,PORZIO M M. Existence and asymptotic behavior of a parabolic equation with L^1 data [J]. Asymptotic analysis,2020,118(3):143-159.

[11] OLIVA F. Regularizing effect of absorption terms in singular problems [J]. Journal of mathematical analysis and applications,2019, 472(1):1136-1166.