

· 研究进展 ·

高应变率下三种典型蜂窝结构力学特性及参数优化研究

卫禹辰¹ 黄春阳^{1,2} 袁梦琦^{1*}

1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

2. 北京理工大学 重庆创新中心, 重庆 400044

[摘要] 本文研究了动态冲击下具有不同设计特征的蜂窝结构的能量吸收效率和力学性能。讨论了拓扑形状、细胞角度和细胞高度对结构影响行为的影响。研究确定,在高速冲击条件下,正方形结构和内凹蜂窝结构具有明显的应变率效应,正蜂窝结构未显示明显的应变率效应。由于独特的负泊松比效应,内凹蜂窝结构的能量吸收密度明显大于正蜂窝结构和正方形蜂窝结构。针对内凹蜂窝结构进行细观参数设计,其胞元角度为 30° 时相比其他胞元角度具有更大的能量吸收密度。当胞元高度从2.58 mm增加到5.05 mm时,结构的峰值应力逐渐降低,达到50%以上,能量吸收密度逐渐降低,达到60.3%以上。在未来高应变冲击环境下优先考虑内凹蜂窝结构,选取满足轻量化前提的最小胞元尺寸,最佳胞元角度为 30° 。该项研究成果将为高应变冲击环境下抗震结构的设计和选择提供参考。

[关键词] 动态冲击;内凹蜂窝;拓扑形状;参数优化;能量吸收密度

仿生自然蜂窝结构具有轻质、高剪切强度、良好的抗冲击和吸能等优异力学性能。蜂窝结构越来越多地应用于汽车、航空航天、生物医学和防护结构等一系列工程领域^[1,2]。

大多数天然材料具有正泊松比,并在受压时横截面变薄。具有负泊松比的材料在压缩下轴向拉伸时会横向膨胀^[3,4]。Lakes^[5]在将传统的开孔泡沫转化为泊松比为负的泡沫时发现这种现象。刘等^[6]发现负泊松比效应提高了屈服强度,韩等^[7-9]发现负泊松比可明显提高刚度和能量吸收。在理论研究上,万等^[9]提出了一种基于大挠度理论计算蜂窝泊松比的理论方法,张等^[10]从理论上评估了负泊松比蜂窝夹层板在冲击动态载荷下的非线性瞬态响应。在设计参数研究中,邢等^[11]利用计算机进行了蜂窝结构的拓扑优化,El-Rich等^[12]通过实验研究了具有负泊松比的蜂窝微孔板的面内动态破碎行为和能量吸收,Evans等^[13]发现几何灵敏度对单元结构至关重要,许多研究已经建立了结构几何与性能之间的关系,包括单元壁纵横比和重射角的影响。张等^[1]



袁梦琦 北京理工大学教授、博士生导师。2018年入选中国科协青年人才托举计划、2020年获得国家自然科学基金优秀青年科学基金项目资助。从事危化品爆炸机理与个体防护技术研究,作为负责人主持多项国家自然科学基金项目、“十三五”国家重点研发计划课题;以第一作者发表SCI论文30余篇,获授权发明专利20余项,出版“十三五”规划教材2部,获得省部级科技进步奖一等奖3项、教学一等奖1项等近10项科研与教学奖励。



卫禹辰 北京理工大学博士研究生。从事个体防护材料与结构设计研发。

研究了总厚度、芯厚比、泊松比、单元倾角和爆炸类型对内凹蜂窝板瞬态响应的贡献。过去的研究主要通过静态压缩下的微观变形机制和坍塌模式来研究内凹六边形结构的参数和材料的影响。较少关注多

收稿日期:2021-07-21;修回日期:2021-09-26

* 通信作者,Email: myuan@bit.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(5187404,52202012)的资助。

参数和高速冲击环境的综合影响。在动态冲击响应下,内凹蜂窝结构的能量吸收特性是至关重要的,特别是在安全防护和军事应用中。

本研究旨在探讨高速冲击作用下,拓扑形状、单元角度和单元高度对蜂窝结构抗冲击性和能量吸收的影响。在四种应变率下进行了动态冲击实验,获得了不同细观设计参数下结构的应力应变-曲线,计算获得结构的最大峰值应力与能量吸收密度。该研究结果有望为高速冲击防护提供新思路。

1 样品介绍

图 1 展示了样品设置情况。主要探究了拓扑结构、胞元高度、胞元角度三种设计参数对力学特性影响。拓扑形状包括内凹蜂窝、正方形和正蜂窝三种,表示为 SM1、SMT2 和 SMT3。胞元角度设置为 20°、30°和 40°表示为 SMA2、SM1 和 SMA3。胞元高度设置为 2.58 mm、3.4 mm、4.22 mm 和 5.05 mm,表示为 SMH2, SM1, SMH3 和 SMH4。具体的样品设计列于表 1 中。

图 2 中展示了样品的实物图。所有的样品均由华曙高科提供。采用选择性激光熔炼 3D 打印技术制备。

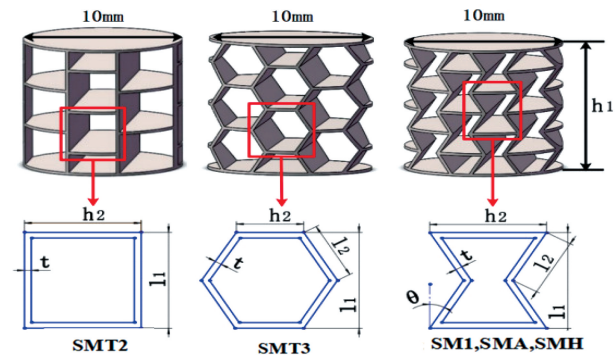


图 1 样品几何模型

表 1 样品细观设计系数

编号	角度	高度	材料	泊松比
SM1	30	3.40	TC4	-1.49
SMT2	—	3.40	TC4	0.00
SMT3	—	3.40	TC4	1.00
SMA2	20	3.40	TC4	-1.00
SMA3	40	3.40	TC4	-2.38
SMH2	30	2.58	TC4	-1.49
SMH3	30	4.04	TC4	-1.49
SMH4	30	5.05	TC4	-1.49

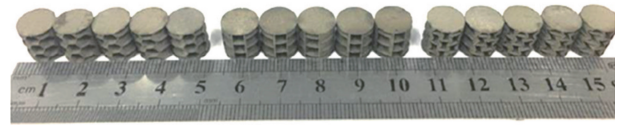


图 2 样品实物图

2 实验设备

图 3 显示了用于动态冲击的 SHPB 装置。利用发射系统控制高压气体推动冲击杆移动,撞入射杆,在入射杆中形成加载波传播。在入射杆表面的应变片记录入射信号 ϵ_i 和反射信号 ϵ_r ,在透射杆上的应变片记录透射信号 ϵ_t 。应变信号经超动态应变仪放大,由示波器存储记录,最后通过接口传输到计算机进行处理。通过控制气室压力从 0.1 MPa 变化到 0.25 MPa,在四种不同的应变率 (900 s^{-1} 、 1100 s^{-1} 、 1300 s^{-1} 和 1500 s^{-1}) 下使用 SHPB 装置。所有杆的直径均为 15 mm,由杨氏模量 210 GPa 和弹性波速 $5000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高强度钢制成。使用气泵对长度为 200 mm 的冲击杆进行加速。入射杆和透射杆的长度均为 1200 mm。样品夹在入射杆和透射杆之间,应变片安装在两个杆上。

3 结果分析

3.1 抗冲击性评价指标

峰值应力 (P_{max}) 和能量吸收密度 ($SEAv$) 是根据实验所得到的应力-应变曲线计算得到,以评估每个样本的抗冲击性。峰值应力被定义为整个撞击期间的最大应力峰值。压缩过程中的能量吸收密度 ($SEAv$) 是通过整合应力应变曲线获得的:

$$SEAv = \int_0^{\epsilon_0} \sigma d\epsilon$$

其中, ϵ_0 是样品的密实应变,而 σ (MPa) 是应变

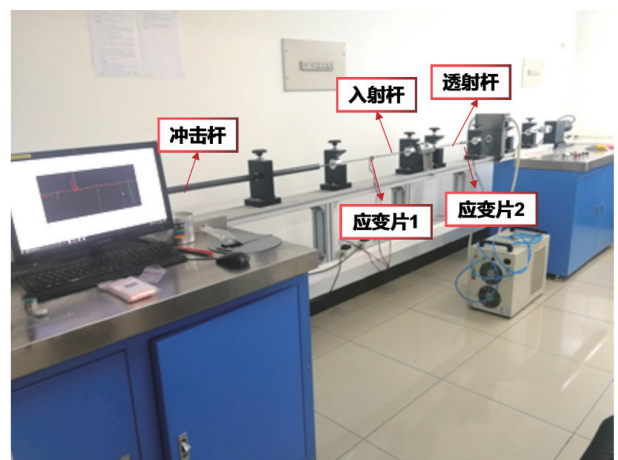


图 3 SHPB 实验系统

ϵ (%)的压力。

3.2 拓扑形状的影响

图4展示了SM1、SMT2和SMT3在 900 s^{-1} 、 1100 s^{-1} 、 1300 s^{-1} 和 1500 s^{-1} 四种应变速率下的动态冲击实验结果。SMT3的应力-应变曲线始终小于SM1和SMT2,因此SMT3在动载荷下的强度低于SM1和SMT2。在应变速率为 900 s^{-1} 、 1100 s^{-1} 、 1300 s^{-1} 和 1500 s^{-1} 时,SM1的动态峰值应力分别为10.61 MPa、15.03 MPa、21.04 MPa和15.13 MPa, SMT2分别为41.98 MPa、58.25 MPa、43.04 MPa和45.45 MPa。SM1在应变率为 1300 s^{-1} 时达到最大峰值应力,峰值应变为7.9%。SMT2在应变率为 1100 s^{-1} 时达到最大峰值应力,峰值应变为3.5%。SMT2的峰值应力分别是SM1的3.96倍、3.87倍、2.06倍和3.36倍。原因是SMT3为正蜂窝结构,结构的胞元形成向外扩展角,收到冲击时会将结构直接沿梁向外拓展变形,没有对冲击产生强的抵御作用。所以SMT3结构的峰值应力小,结构强度低。SMT2的支撑梁的构造方向与冲击方向平行,使结构梁在施加瞬时载荷时能垂直抵抗冲击,从而形成应力集中状态,使得结构峰值应力增大,而SM1梁与冲击方向形成夹角,在瞬时受到载荷时容

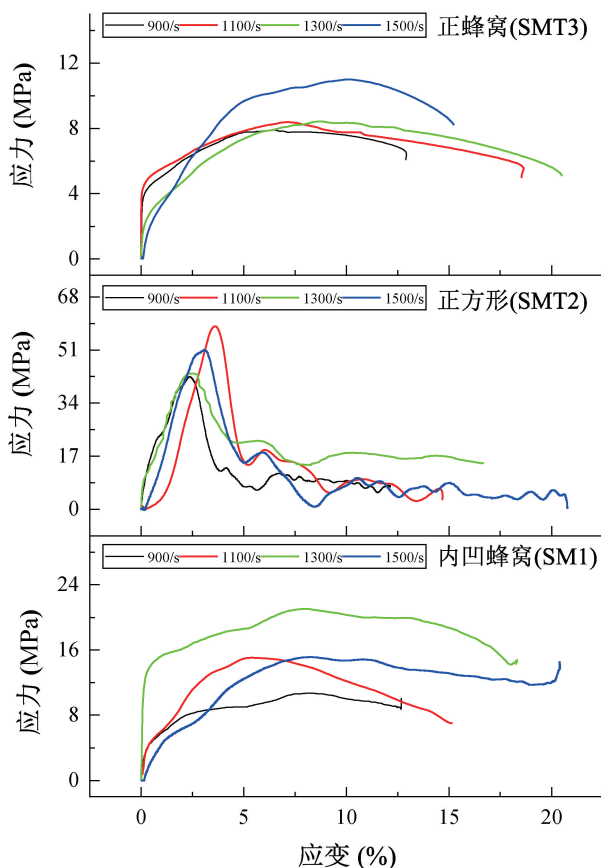


图4 动态冲击下不同拓扑结构应力-应变曲线

易发生向内凹陷形变,所以在初始阶段其峰值应力小于SMT2。随着冲击的进行,SMT2在垂直方向上发生剪切形变,梁直接断;SM1由于独特的负泊松比效应,使得在冲击中心集聚,等效面密度增大,结构抗力增加。

图5显示了SM1、SMT2和SMT3在 900 s^{-1} 、 1100 s^{-1} 、 1300 s^{-1} 和 1500 s^{-1} 时的能量吸收密度。在应变速率为 1500 s^{-1} 时,SMT3达到最大能量吸收效率,为 1.3446 J/cm^3 ,比 900 s^{-1} 高56.43%。其能量吸收密度低于SM1和SMT2,从能量吸收密度的变化情况看出SMT3对应变速率的敏感性较低。在应变速率为 1300 s^{-1} ,SM1和SMT2均达到最大能量吸收密度,为 3.3763 J/cm^3 和 3.4259 J/cm^3 ,比 900 s^{-1} 时高198.42%和93.38%。原因是SM1和SMT2在高速冲击条件下对应变率的变化更敏感。从应力-应变曲线可以看出,随着应变的增加,SM1的应力保持稳定。SMT2在应变为3%时达到最大值,然后应力迅速下降,SMT2比SM1更容易失效破坏。尽管SMT2比SM1具有更大的峰值应力和强度,但是SM1的能量吸收密度高于SMT2。这是由于吸能特性,即做功是力与行程两者耦合影响的。SMT2瞬时受力较大,但是其属于剪切形变,无法在冲击过程中保持足够的行程,而SM1尽管瞬时受力小,但是其压缩内凹的特性使得整体想挤压区域收缩,形成更致密的结构,在冲击过程中可以维持更长时间的形变过程。因此,SM1比SMT2具有更好的力学性能。

3.3 胞元角度的影响

图6显示了在 900 s^{-1} 、 1100 s^{-1} 、 1300 s^{-1} 和 1500 s^{-1} 四种应变速率下对样品SMA2和SMA3进行的动态冲击实验的结果。SM1在应变速率为 1300 s^{-1} 时达到最大峰值应力(21.04 MPa),此时

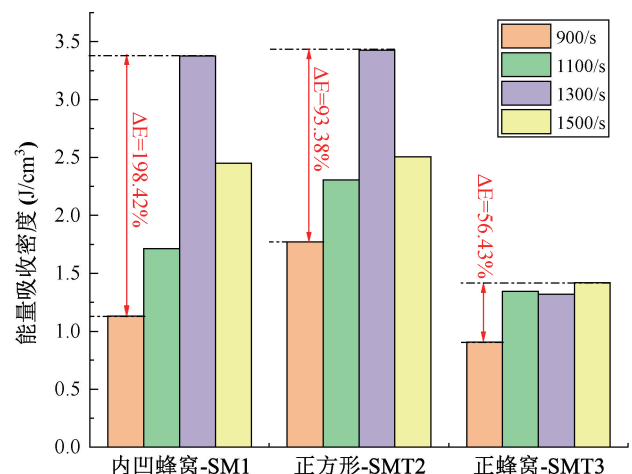


图5 动态冲击下不同拓扑结构的能量吸收密度

峰值应变为 7.9%。SMA2 的动态峰值应力分别为 14.3 MPa、20.02 MPa、13.41 MPa 和 18.46 MPa，SMA3 分别为 13.34 MPa、11.76 MPa、12.54 MPa 和 13.57 MPa。SMA2 和 SMA3 在应变率 1100 s^{-1} 和 1500 s^{-1} 下达到最大峰值应力，峰值应变为 5.87% 和 13.57%。分析可以发现，四种应变率环境下，随着胞元角度的增大，结构的强度逐渐减小，此现象的原因是在高速瞬时冲击时，垂直抵抗最大，结构应力集中越大，峰值应力越大。在改变胞元角度时，胞元角度增大，结构梁更加内凹，更容易在冲击时向内凹陷，垂直抵抗降低，因而峰值应力降低。

图 7 展示了 SM1、SMA2 和 SMA3 在四种应变率下的能量吸收密度。SM1、SMA2 和 SMA3 在应变速率为 1300 s^{-1} (3.3763 J/cm^3)、 1500 s^{-1} (2.074 J/cm^3) 和 1500 s^{-1} (2.253 J/cm^3) 时达到最大能量吸收密度。SM1 的能量吸收密度幅值变化范围为 $1.1314\sim 3.3763\text{ J/cm}^3$ ，差值百分比为 198.42%。SMA2 的范围在 $1.34\sim 2.074\text{ J/cm}^3$ 之间，差异值的百分比为 54.78%。SMA3 的范围在 $1.234\sim 2.253\text{ J/cm}^3$ 之间，差异值的百分比为 82.58%。分析得知在高速冲击状态下，胞元角度为 30° 的结构对应应变率的变化更敏感。胞元角度 30° 的结构表现出更为优

异的能量吸收能力。原因是冲击能量吸收效率与结构在整个冲击过程中的表现息息相关，即结构的强度与形变行程。内凹蜂窝结构的吸能主要依赖于结构的形变。内凹蜂窝结构的胞元角度过大，使得结构垂直抵抗较低，过早的产生变形，但是此时结构向内集聚，使得结构可以保持长的形变时间；胞元角度过小，结构的垂直抵抗大，不容易发生变形，但是此时结构更加趋向于正方形，容易发生断裂失效。因此内凹蜂窝结构想要保持一个大的能量吸收特性需要同时满足高强度和长行程。这就使得内凹结构存在一个理想值使得整体既可以有足够的强度同时可以有较长的形变时间。因此，内凹结构在 30° 时具有最优的吸能特性。

3.4 胞元高度的影响

图 8 显示了样本 SMH2、SMH3 和 SMH4 的动态冲击的应力-应变曲线。在应变率为 900 s^{-1} 、 1100 s^{-1} 、 1300 s^{-1} 和 1500 s^{-1} 下，SMH2 的峰值应力分别为 22.83 MPa、34.35 MPa、25.53 MPa 和 25.44 MPa。SMH2 的峰值应力分别为 SM1 的 2.15 倍、2.29 倍、1.21 倍、1.68 倍和 SMH3 的 2.16 倍、4.25 倍、2.59 倍、3.42 倍和 SMH4 的 3.7 倍、4.64 倍、4.54 倍、5.17 倍。SMH2 和 SMH4 在应变率为 1100 s^{-1} 时达到最大峰值应力，峰值应变为 4.55% 和 8.3%。SM1 在应变率为 1300 s^{-1} 达到峰值应力，对应的峰值应变为 7.9%。SMH3 的应变率为 900 s^{-1} ，峰值应变为 5.58%。实验发现，无论应变率如何变化，SMH2 的峰值应力都高于 SM1、SMH3 和 SMH4 的屈服强度。原因是结构的胞元高度越小，整体结构的相对密度越大，使得结构强度越高。

图 9 显示在 900 s^{-1} 、 1100 s^{-1} 、 1300 s^{-1} 和

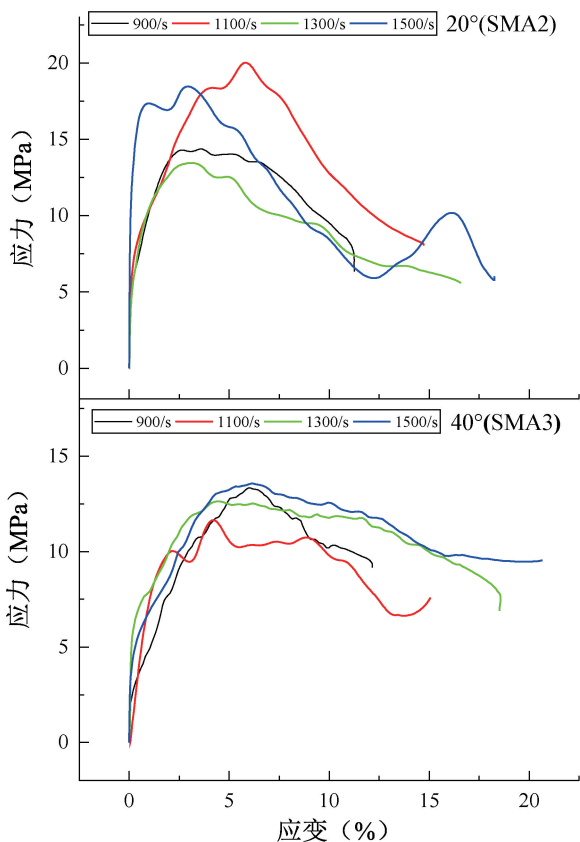


图 6 动态冲击下不同胞元角度结构应力-应变曲线

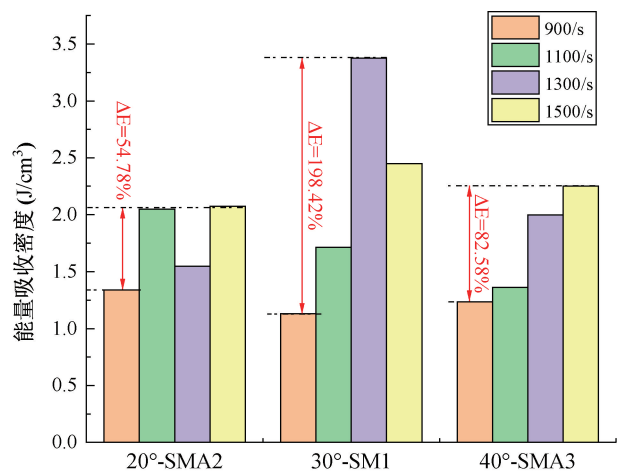


图 7 动态冲击下不同胞元角度结构能量吸收密度

1500 s⁻¹ 时, SM1、SMH2、SMH3 和 SMH4 的能量吸收密度。在应变率为 1100 s⁻¹ 时, SMH2 达到最大能量吸收密度 (3.038 J/cm³), 振幅幅度范围为 1.816~3.038 J/cm³, 差值百分比为 67.3%。SM1、SMH3 和 SMH4 范围为 1.1314~3.3763 J/cm³, 0.977~1.439 J/cm³, 0.721~0.886 J/cm³, 差值百分比为 198.42%、47.3% 和 22.88%。在四种应变率内, SMH2 比 SM1、SMH3 和 SMH4 具有更高的

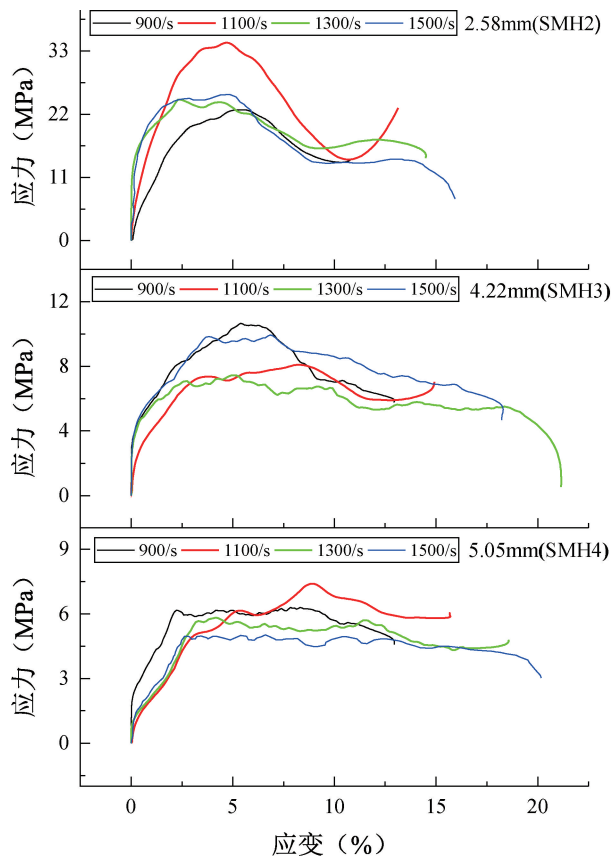


图8 动态冲击下不同胞元高度结构应力-应变曲线

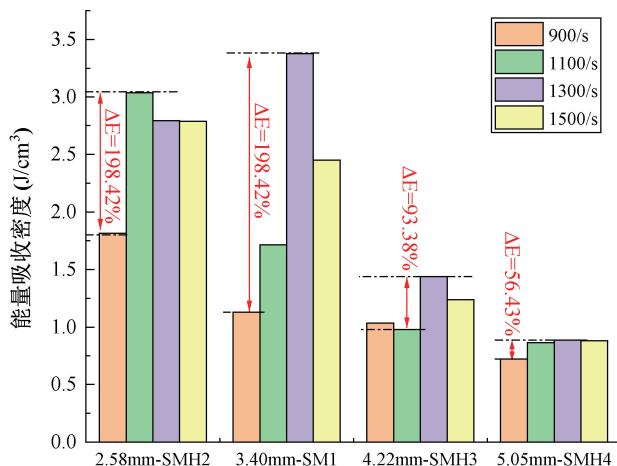


图9 动态冲击下不同胞元高度结构能量吸收密度

能量吸收密度, 且 SMH3 和 SMH4 的能量吸收密度小于 SM1。SM1、SMH3 和 SMH4 的能量吸收密度在 1300 s⁻¹ 的应变率下达到最大的能量吸收效率, 即 3.3763 J/cm³、1.439 J/cm³ 和 0.886 J/cm³。分析得出胞元高度越小, 结构具有更大的强度和更高的能量吸收密度。原因是随着胞元高度减小, 结构内部将形成更多的支撑梁, 从而导致在冲击过程中结构具有更强抵御形变能力, 导致了更大的峰值应力。其次, 细胞高度越小, 结构收到冲击后塑性变形发生得越快, 结构更早进入能量吸收状态, 从而造成了更大的能量吸收效率。

4 结 语

本研究对不同蜂窝结构的强度和能量吸收密度进行了实验研究。对比分析了蜂窝结构的拓扑形状、胞元角度、胞元高度对力学特性的影响, 得出以下结论:

(1) 内凹蜂窝结构可有效地提高了能量吸收密度和抗冲击性。独特的负泊松比效应使得结构在冲击载荷下垂直压缩和水平内缩, 并增加等效密度, 这种变形机制增强了蜂窝结构面内抗冲击性。

(2) 内凹蜂窝结构中随着胞元角度的增大, 结构的强度降低, 峰值应变逐渐延迟。当胞元角度为 30° 时, 能量吸收密度达到最大值。随着单元高度的增加, 结构强度和能量吸收密度逐渐降低。

(3) 在不同的冲击应变率下, 结构具有不同的响应特性, 结构的细观设计参数也会影响其响应机制。与正蜂窝结构相比, 正方形蜂窝结构和内凹蜂窝结构具有更明显的应变率效应。根据内凹蜂窝结构细观设计参数的不同, 应变率效应表现不同。

在未来高速冲击下的结构设计中, 内凹负泊松比结构是一种抗冲击的有效手段。此外, 保证胞元角度为 30° 时具有优异的机械性能, 在满足轻量化的需求下应尽量减小胞元高度。

参 考 文 献

- [1] 张伟. 三维负泊松比多胞结构的轴向压缩性能研究. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [2] 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. 材料工程, 2019, 47(8): 49—58.
- [3] Evans KE, Nkansah MA, Hutchinson IJ, et al. Molecular network design. Nature, 1991, 353 (6340): 124—124.
- [4] 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. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 5—10.

- [5] Lakes R. Foam structures with a negative poisson's ratio. *Science*, 1987, 235(4792): 1038—1040.
- [6] Liu WY, Wang NL, Luo T, et al. In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure. *Mater Design*, 2016, 100: 84—91.
- [7] 韩会龙, 张新春, 王鹏. 负泊松比蜂窝材料的动力学响应及能量吸收特性. *爆炸与冲击*, 2019, 39(1): 44—54.
- [8] Donoghue JP, Alderson KL, Evans KE. The fracture toughness of composite laminates with a negative Poisson's ratio. *Physica Status Solidi*, 2010, 246(9): 2011—2017.
- [9] Wan H, Ohtaki H, Kotosaka S, et al. A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2004, 23: 95—106.
- [10] Zhang J, Zhu X, Yang X, et al. Transient nonlinear responses of an auxetic honeycomb sandwich plate under impact loads. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 134: 103383.
- [11] 邢昊, 敬石开, 张贺, 等. 拓扑优化密度映射的非均匀蜂窝结构设计方法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2017, 29(4): 734—741.
- [12] Zhang XC, An LQ, Ding HM, et al. The influence of cell micro-structure on the in-plane dynamic crushing of honeycombs with negative Poisson's ratio. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2014, 17: 26—55.
- [13] Evans AG, Hutchinson JW, Ashby MF. Multifunctionality of cellular metal systems. *Progress in Materials Science*, 1998, 43 (3): 171—221.

Research on Mechanical Properties and Parameter Optimization of Three Typical Honeycomb Structures under High Strain Rates

Wei Yuchen¹ Huang Chunyang^{1, 2} Yuan Mengqi^{1*}

1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*

2. *Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 400044*

Abstract This paper studies the energy absorption efficiency and mechanical properties of honeycomb structures with different design characteristics under dynamic impact. The influence of topological shape, cell angle and cell height on the structure's behavior is discussed. Studies have determined that under high-speed impact conditions, the square structure and the concave honeycomb structure have obvious strain rate effects, while the positive honeycomb structure does not show obvious strain rate effects. Due to the unique negative Poisson's ratio effect, the energy absorption density of the concave honeycomb structure is significantly greater than that of the positive honeycomb structure and the square honeycomb structure. The meso-parameter design is carried out for the concave honeycomb structure. When the cell angle is 30°, it has a greater energy absorption density than other cell angles. When the cell height increases from 2.58 mm to 5.05 mm, the peak stress of the structure gradually decreases to more than 50%, and the energy absorption density gradually decreases to more than 60.3%. In the future high-strain impact environment, the concave honeycomb structure is given priority, and the smallest cell size that meets the premise of lightweight is selected, and the best cell angle is 30°. The research results will provide reference for the design and selection of seismic structures under high-strain shock environments.

Keywords dynamic shock; concave honeycomb; topological shape; parameter optimization; energy absorption density

(责任编辑 吴征天)

* Corresponding Author, Email: myuan@bit.edu.cn