

多种超材料结构的缓冲吸能特性研究分析

刘永文^{1,2}, 邵伟平^{1,2}, 郝永平^{1,2*}

¹沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

²辽宁省先进制造技术装备重点实验室, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年11月15日; 录用日期: 2025年12月8日; 发布日期: 2025年12月15日

摘要

针对炮射无人机在发射过程中会经历极高的加速度和冲击力, 其机械内部电子元器件在高过载下可能会损坏, 需有效提升电子器件的可靠性, 缓冲结构、材料的设计至关重要。本文提出了一种新型的缓冲结构, 采用多级吸能机制, 有效降低发射过程中的冲击载荷。本文研究了几种超材料结构, 分析了内凹蜂窝结构使用不同材料的抗过载性能, 以及使用相同材料的三种不同结构的抗过载性能。通过改变胞壁的壁厚、列数对超材料进行了结构优化设计, 并对优化后的超材料进行抗过载性能研究和综合分析。研究结果表明, 通过增加列数和壁厚, 可以提高吸能性; 蜂窝折纸结构相对于内凹蜂窝结构和折纸蜂窝结构吸能缓冲尤为突出, 吸能效果增加了43%左右。6061-T6铝合金材料相对于Q235材料吸能峰值更低, 但比吸能提高约115%, 6061-T6铝合金材料更适用于轻量化。

关键词

超材料, 蜂窝结构, 吸能机理, 抗过载

Study on Energy Absorption Characteristics of Various Metamaterial Buffer Structures

Yongwen Liu^{1,2}, Weiping Shao^{1,2}, Yongping Hao^{1,2*}

¹School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

²Liaoning Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology and Equipment, Shenyang Liaoning

Received: November 15, 2025; accepted: December 8, 2025; published: December 15, 2025

Abstract

During the launch process of artillery-launched drones, they are subjected to extremely high

*通讯作者。

文章引用: 刘永文, 邵伟平, 郝永平. 多种超材料结构的缓冲吸能特性研究分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(12): 86-94.

DOI: 10.12677/mos.2025.1412661

acceleration and impact forces, which may damage the internal electronic components under high overload conditions. Effectively improving the reliability of electronic devices is crucial, and the design of buffer structures and materials plays a vital role. This paper proposes a novel buffer structure that adopts a multi-stage energy absorption mechanism to effectively reduce the impact load during launch. Several metamaterial structures are studied, analyzing the anti-overload performance of concave honeycomb structures made of different materials, as well as the anti-overload performance of three different structures made of the same material. Structural optimization of the metamaterials is carried out by varying the wall thickness and number of cell layers, followed by an investigation of the anti-overload performance and comprehensive analysis of the optimized metamaterials. The research results indicate that increasing the number of layers and wall thickness can enhance energy absorption. The honeycomb origami structure, in particular, demonstrates outstanding energy absorption and buffering performance compared to the concave honeycomb and folded honeycomb structures, with an approximately 43% improvement in energy absorption. Although the 6061-T6 aluminum alloy material exhibits a lower peak energy absorption compared to Q235 material, its specific energy absorption increases by about 115%, making it more suitable for lightweight applications.

Keywords

Metamaterial, Honeycomb Structure, Energy Absorption Mechanism, Anti-Overload

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

在用火炮发射无人机时, 无人机及其内部精密电子元器件很容易受到高过载载荷的冲击, 从而导致损坏或失灵。为了解决这一问题, 通常采用增加弹簧或橡胶垫圈等方法来缓解冲击。然而, 橡胶垫圈容易老化, 难以长期维持其弹性性能; 同时, 对于一些体积较小的精密电子元器件, 弹簧往往无法满足其缓冲需求[1][2]。随着 3D 打印技术的快速发展, 精密复杂结构的加工逐渐变得可行, 这为超材料缓冲结构的研发提供了新的可能性。超材料不仅能够通过其材料特性实现缓冲功能, 还可以通过调整其内部结构来进一步优化缓冲效果。这种结构设计不仅提升了缓冲性能, 还为精密器件的保护提供了更为灵活和高效的解决方案。

现如今, 超材料结构多种多样, 类似于内凹折纸结构, 不再局限于“纸张”, 它广义上指通过折叠技术将二维平面材料转化为三维形状的结构[3]。Liu 等[4]设计了一种新型空竹型负泊松比结构, 其抗冲击性能比内凹六边形显著提高; Lu 等[5]通过优化设计, 提出了一种星型-圆形复合结构, 该结构在负泊松比特性的基础上进行了创新改进。研究表明, 这种新型结构不仅显著提升了能量吸收效率, 还有效克服了传统负泊松比结构刚度较低的局限性, 为工程应用提供了更优的解决方案。更有许多的国内学者也对超材料结构进行了研究, 郭亚鑫等学者[6]通过准静态加载实验和激波管冲击实验相结合的方法, 对蜂窝结构进行了系统性优化设计; 与此同时, 杨小桐等研究者[7]则聚焦于不同基体材料对蜂窝结构性能的影响, 开展了深入的对比分析。其次研究人员发现铝合金材料具有优异的吸能性能和轻量化效果, 被广泛地应用在缓冲结构中[8][9]。由于缓冲结构质量较轻、吸能效率高、缓冲效果好, 也被广泛地应用于船舶、航空航天等领域[10]-[12]。

以上研究都是对结构及其使用材料进行的改变设计以求达到所需要的目的, 本文将利用 LS-DYNA

软件对比分析相同材料的三种不同结构并进行模拟对比。通过对超材料[13] [14]结构末端施加定量的过载，观察这几种超材料结构的吸能曲线、缓冲曲线，进行抗过载的性能评估。对超材料进行结构优化，通过理论研究发现影响超材料的吸能因素。

2. 负泊松比蜂窝结构参数

在超材料的研究体系中，评价指标的确立紧密围绕其核心物理机理与目标功能。对于以奇异波动调控为目标的电磁超材料，其评价体系侧重于等效介电常数、磁导率等本构参数；而对于本文所研究的力学超材料——负泊松比类蜂窝结构，其核心功能在于冲击载荷下的能量管理与力学性能优化。因此，需要建立一套与之匹配的、以宏观力学响应为核心的评价指标体系，以定量表征其缓冲吸能效率与变形稳定性。该体系主要包含以下几个关键指标：

1) 负泊松比蜂窝材料的相对密度可通过以下公式表达：

$$\bar{\rho} = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i d}{ab} \quad (1)$$

其中： ρ^* (g/cm³)为负泊松比；蜂窝的密度 ρ_s (g/cm³)为基体材料的密度； d (mm)为胞壁厚度； L_i (mm)为第 i 个胞壁的周长； a 、 b (mm)分别为蜂窝试件的宽度和高度。

2) 能量吸收[EA (J)]表示压缩下吸收的能量，由碰撞力-压溃位移积分得到，其表示为：

$$EA = \int_0^s F(x) dx \quad (2)$$

其中： $F(x)$ (N)为瞬时碰撞力； x (mm)为位移； s (mm)为压溃总位移。

3) 比吸收能[SEA (J/g)]是单位质量所吸收能量[8]，计算如下：

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

其中： M (g)为结构质量。

4) 抗压力效率(CFE)表示载荷的均匀性， CFE 值越大，结构承载稳定性越高，其表示为：

$$CFE = \frac{MCF}{PCE} \times 100\% \quad (4)$$

其中： PCE (N)为压缩载荷作用下的峰值抗压力； MCF (N)为平均抗压力。

5) MCF 可表示为：

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

3. 有限元模型设计

3.1. 超材料结构的几何模型

本文研究的几种超材料结构为内凹蜂窝结构(如图 1(a)所示，结构的局部放大图如图 1(b)所示)、折纸蜂窝结构(如图 2 所示)、蜂窝折纸结构(如图 3 所示)。选用材料均为 6061-T6 铝合金。保持这三个试件的长、宽、高大概一致为 29 mm、30 mm、18 mm，并且在长度和宽度上都有 5 层胞元，胞壁厚度为 0.3 mm。内凹蜂窝结构的胞元内角为 60°，选用 6061-T6 铝合金材料时重量为 14.22 g，选用 Q-235 材料时重量为 41.3 g；折纸蜂窝结构的胞元内角为 53°，选用铝合金材料时重量为 16.84 g。蜂窝折纸结构的胞元内角同样也为 53°，选用铝合金材料时重量为 19.7 g。

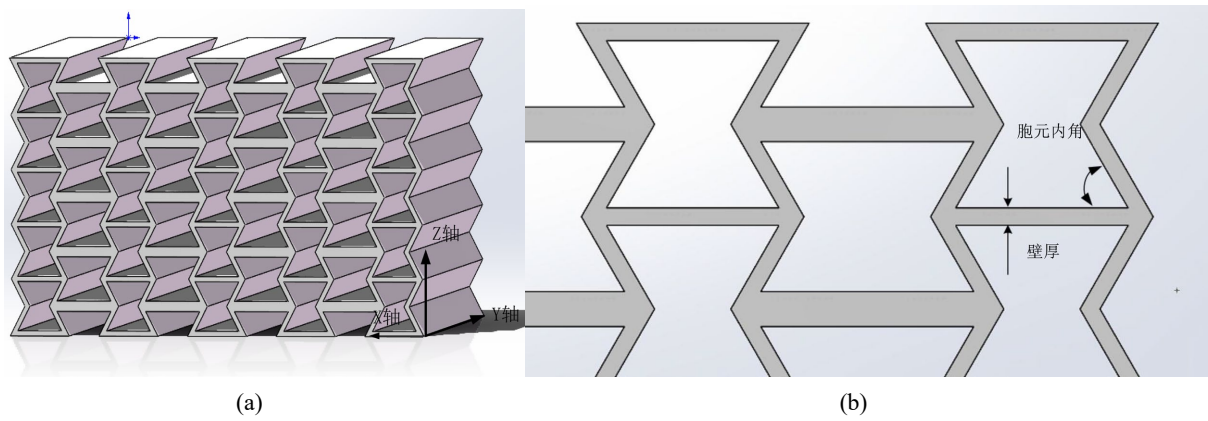


Figure 1. Re-entrant honeycomb structure: (a) 3D model of re-entrant honeycomb structure; (b) Cell size
图 1. 内凹蜂窝结构: (a) 内凹蜂窝三维模型; (b) 胞元尺寸

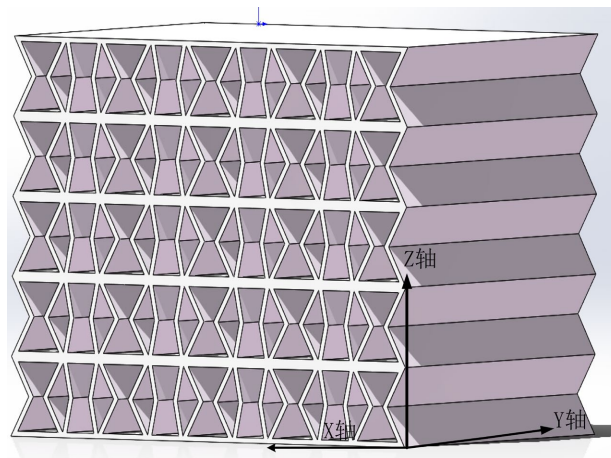


Figure 2. Origami honeycomb structure
图 2. 折纸蜂窝结构

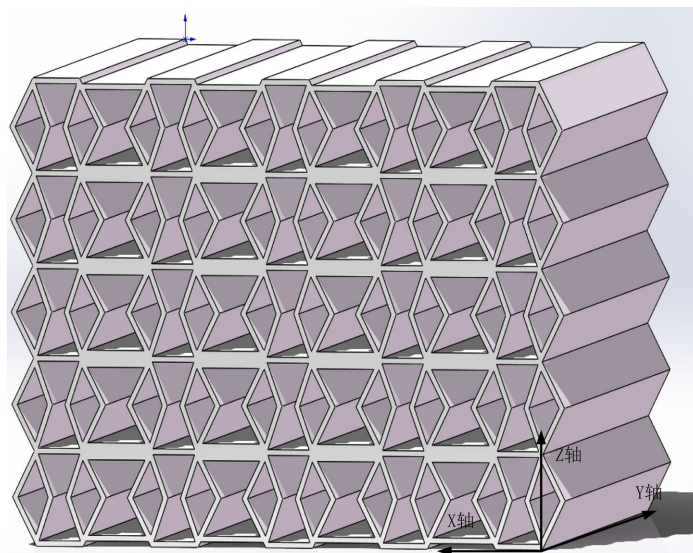


Figure 3. Honeycomb origami structure
图 3. 蜂窝折纸结构

3.2. 模拟仿真分析模型

图 4 展示了内凹蜂窝超材料结构在吸能特性方面的模拟仿真分析模型。在该模型中，零件 1 和零件 3 采用 Q-235 钢材，其密度为 7850 kg/m^3 ，弹性模量达到 203 GPa ，泊松比为 0.33 。而缓冲零件 2 则分别选用了 Q-235 钢材和 6061-T6 铝合金材料，其中铝合金的密度为 2700 kg/m^3 ，弹性模量为 69 GPa ，泊松比同样为 0.33 。

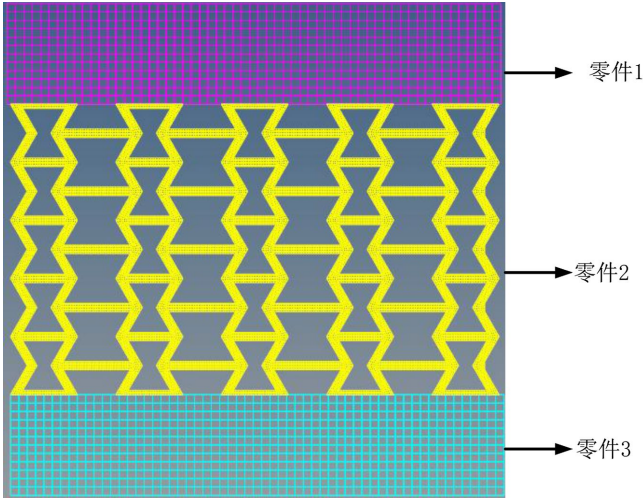


Figure 4. Simulation and analysis model for energy absorption characteristics of re-entrant honeycomb metamaterial structures
图 4. 内凹蜂窝超材料结构吸能特性模拟仿真分析模型

内凹蜂窝模型的网格划分主要以四边形网格为主，取缓冲零件 2 的单元尺寸为 0.08 mm ，为保证数值的准确性和计算结果的收敛性，蜂窝结构沿单元厚度取 5 个积分点。零件 1 和零件 3 网格单元尺寸均为 0.5 mm 。

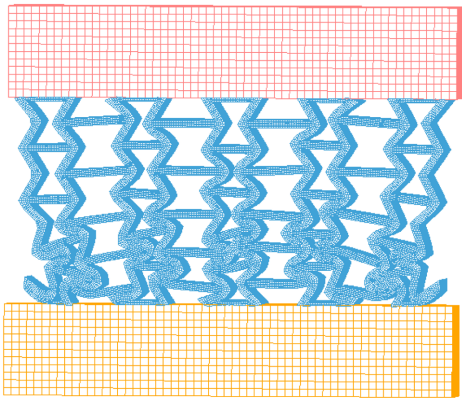


Figure 5. Simulation results
图 5. 模拟仿真效果

本研究模拟了极端条件下的过载情形，其中零件 1 代表脆弱的高精度元件，而零件 3 则被设定为冲击体，并对其施加了一个向上的加速度冲击，数值高达 $20,000\text{ 米每秒平方}$ 。在此仿真过程中，刚性板与蜂窝结构的外表面均假定为无摩擦的光滑面，两者间的相互作用通过侵蚀接触模型来描述；至于蜂窝结构内部的接触，则运用了自动面面接触算法进行处理。

选择 6061-T6 铝合金材料内凹蜂窝结构进行模型验证, 通过准静态压缩实验发现内凹蜂窝结构在对角线上发生变形, 如图 5 所示, 符合负泊松比内凹蜂窝结构压溃形状[9]。

4. 仿真分析

4.1. 相同结构不同材料对比试验

本文使用 LS-DYNA 软件, 在设置 6061-T6 铝合金材料时使用 MAT24 弹塑性材料模型应用比较多的应变率相关模型——Cowper-Symonds 模型[15][16]。设置 Q-235 不锈钢材料时使用 MAT15Johnson_Cook 模型[7]。Johnson_Cook 本构模型作为一种经验型的粘塑性本构关系, 在工程计算与数值模拟领域具有广泛的应用。该模型能够有效描述材料在高应变率载荷(如冲击工况)下同时发生的弹性与塑性变形行为。其建模思路综合考虑了应变硬化、应变率强化效应以及热软化行为, 并通过显式函数形式将三者耦合, 具有表达式简洁、参数易于标定等特点。Johnson_Cook 模型将流动应力表示为应变、应变率与温度的函数关系:

$$\sigma_y = \left(A + B \varepsilon^p \right) \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^* \right) \left(1 - T^{*m} \right)$$

式中: σ_y (Pa)为应力; ε^p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ 为 $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0$ 时的无量纲塑性应变率;

$T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ 为无量纲温度; T (K)为当前绝对温度; T_{melt} (K)为材料熔点, T_{room} (K)为室温; A (Pa)为屈服应力; m 为热软化指数; B (Pa)为应变硬化系数; n 为应变硬化指数; C 为应变率敏感系数。

采用五层五列凹蜂窝结构对 Q-235 和 6061-T6 铝合金材料的吸能特性进行分析, 仿真得到的吸能曲线如图 6 所示。

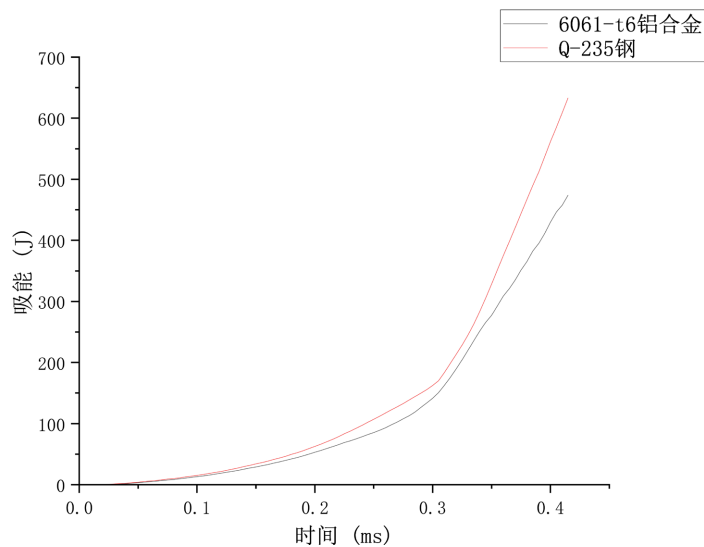


Figure 6. Energy absorption curves of re-entrant honeycomb structures made of two materials

图 6. 两种材料内凹蜂窝结构的吸能曲线

由图 6 可知: 6061-T6 铝合金材料的内凹蜂窝结构最大吸能值为 470 J, 其比吸能为 33.4 J/g; Q-235 材料的内凹蜂窝结构最大吸能值为 640 J, 其比吸能为 15.5 J/g。Q-235 材料由于屈服强度和抗拉强度更高, 因此其内凹蜂窝结构的吸能性和缓冲效果相比于使用 6061-T6 铝合金材料内凹蜂窝结构都有显著的提升, 但是 6061-T6 铝合金的比吸能相对于 Q-235 材料提升了 53%, 因此在考虑轻量化和场景应用的条

件下，选择 6061-T6 铝合金材料。

4.2. 相同材料不同结构对比试验

仿真得到的 6061-T6 铝合金材料三种蜂窝结构的吸能曲线如图 7 所示。

由图 7 可知：蜂窝折纸蜂窝结构的吸能效果最好为 1248 J，比吸能为 63.4 J/g。将其完全缓冲所需要的也较长，缓冲效果十分明显，所吸收的能量也是尤为突出；折纸蜂窝结构的吸能最大值为 872 J，其比吸能为 51.78 J/g；吸能效果相对于蜂窝折纸结构比较弱一些，吸能效果降低了 43%左右，但是高于内凹蜂窝结构。内凹蜂窝结构的吸能和比吸能低于其他两个结构，但是吸能所需时间较短，吸能也较为平缓。蜂窝折纸结构所吸能缓冲时间较长，吸能效果较好，结构比较稳定。

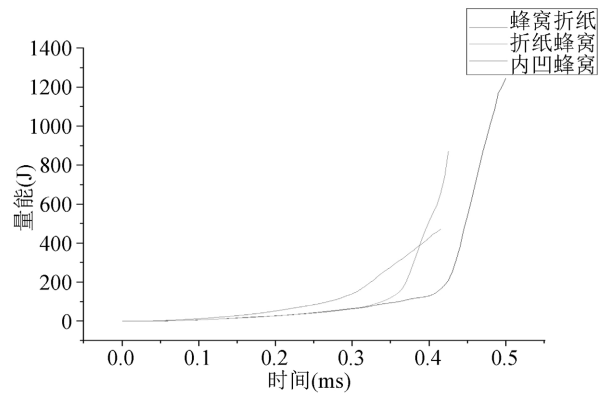


Figure 7. Energy absorption curves of three metamaterial structures made of 6061-T6 aluminum alloy
图 7. 6061-T6 铝合金材料三种超材料结构的吸能曲线

4.3. 蜂窝结构优化及对比试验

4.3.1. 增加内凹蜂窝结构胞壁厚度

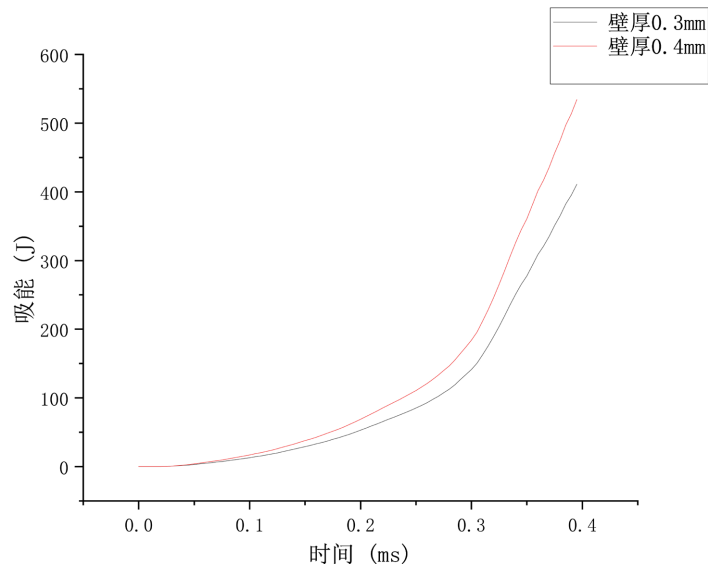


Figure 8. Energy absorption curves of re-entrant honeycomb structures made of 6061-T6 aluminum alloy with varying cell wall thicknesses
图 8. 6061-T6 铝合金不同胞壁厚度的内凹蜂窝结构吸能曲线

将内凹蜂窝结构的胞壁厚度由 0.3 mm 增加为 0.4 mm, 其他参数不变, 选用 6061-T6 铝合金材料时蜂窝试件的重量为 22.72 g。6061-T6 铝合金材料不同胞壁厚度的内凹蜂窝结构的吸能曲线如图 8 所示。

根据图 8 可知, 6061-T6 铝合金内凹蜂窝结构的胞壁厚度达到 0.4 mm 时, 其最大吸能值为 618 J, 比吸能则达到 27.2 J/g。与胞壁厚度为 0.3 mm 的内凹蜂窝结构相比, 0.4 mm 厚度的结构在吸能峰值上表现出显著提升, 但是比吸能没有显著的提升, 因此在考虑经济和轻量化的设计上, 我们仍然可以选择 0.3 mm 的壁厚来进行设计。

4.3.2. 增加内凹蜂窝结构水平方向列数

我们选择 0.3 mm 胞壁厚度的 5 层胞元的内凹蜂窝进行加列处理, 将水平方向上的 5 列胞元分别变为 6 列胞元和 7 列胞元, 其他的参数不进行改变, 选用 6061-T6 铝合金材料, 5 层 6 列内凹蜂窝结构重量为 17.22 g; 5 层 7 列内凹蜂窝结构重量为 20.22 g。

6061-T6 铝合金材料不同胞元列数的内凹蜂窝结构吸能曲线如图 9 所示。

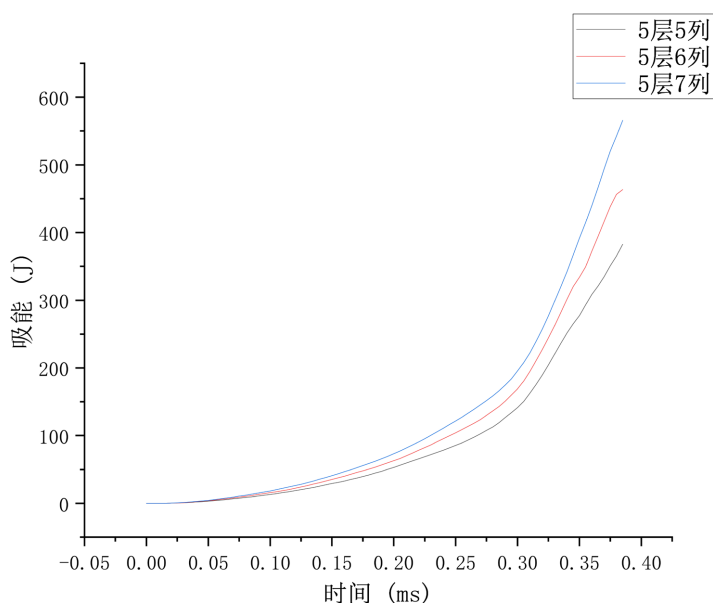


Figure 9. Energy absorption curves of re-entrant honeycomb structures made of 6061-T6 aluminum alloy with varying numbers of cell layers

图 9. 6061-T6 铝合金材料不同胞元列数的内凹蜂窝结构吸能曲线

由图 9 可知: 6061-T6 铝合金材料的 7 列胞元的内凹蜂窝结构最大吸能值为 566 J, 其比吸能为 27.99 J/g; 6 列胞元的内凹蜂窝结构最大吸能值为 463 J, 其比吸能为 26.88 J/g; 而 5 列胞元的内凹蜂窝结构最大吸能值为 382 J。由此我们可以得出结论: 在保持行数不变时, 增加胞元列数, 该结构的吸能效果增加, 但是由于重量的增加, 其比吸能不一定是增加的。

5. 结论

- 1) 超材料结构可以有效地将冲击载荷的能量吸收, 进而保护其无人机内部电子元器件的稳定运行。
- 2) 材料的改变也会影响缓冲吸能的峰值, 选用 6061-T6 铝合金材料时, 内凹蜂窝结构的吸能为 470 J, 比吸能为 33.4 J/g; 选用 Q-235 材料时的吸能为 640 J, 但是其比吸能为 15.5 J/g。6061-T6 铝合金材料密度较小, 更适合应用于轻量化, 如果使用场景无需轻量化, Q-235 材料可以当作首选。
- 3) 折纸蜂窝结构、蜂窝折纸结构、内凹蜂窝结构这三种结构的缓冲都能达到一定的需求, 但是蜂窝

折纸结构吸能效果最为明显, 吸能可以达到 1248 J; 比吸能达到 63.4 J/g。内凹蜂窝相比之下吸能降低约 43%左右。

4) 内凹蜂窝结构增加胞壁厚度后, 吸能效果显著提升, 由原来的 470 J 达到了 618 J。但是由于重量的增加, 其比吸能没有显著提升。增加列数后吸能缓冲的效果有显著的提升, 由 5 列的 470 J 达到了 7 列的 566 J。

5) 本文存在加载条件简化的局限性和环境适应性问题等局限性, 未来可以在进行多工况与多物理场耦合分析及探索中采用碳纤维复合材料、柔性高分子泡沫或形状记忆合金等新型功能材料, 结合超材料结构设计, 以期实现更轻量化、更高比吸能或具备自适应能力的缓冲系统。

参考文献

- [1] 金家存. 军用微电子器件耐高过载技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2008: 1-7.
- [2] 张嘉易, 安晓卫, 张海龙, 等. 高 g 值引信测试弹射切入机构研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2009, 28(3): 54-57.
- [3] 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.
- [4] Liu, J., Liu, H. and An, M. (2022) Crushing Behaviors of Novel Diabolo Shaped Honeycombs with Enhanced Energy Absorption Performance. *International Journal of Mechanical Sciences*, **229**, Article ID: 107492. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107492>
- [5] Lu, H., Wang, X. and Chen, T. (2022) Enhanced Stiffness Characteristic and Anisotropic Quasi-Static Compression Properties of a Negative Poisson's Ratio Mechanical Metamaterial. *Thin-Walled Structures*, **179**, Article ID: 109757. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109757>
- [6] 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.
- [7] 杨小桐, 周云波, 李鹏, 等. 基体材料对蜂窝结构抗爆炸冲击性能的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 16-20.
- [8] Zhang, X., Zhang, H. and Wen, Z. (2015) Axial Crushing of Tapered Circular Tubes with Graded Thickness. *International Journal of Mechanical Sciences*, **92**, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.11.022>
- [9] Hanssen, A.G., Langseth, M. and Hopperstad, O.S. (2000) Static and Dynamic Crushing of Circular Aluminium Extrusions with Aluminium Foam Filler. *International Journal of Impact Engineering*, **24**, 475-507. [https://doi.org/10.1016/s0734-743x\(99\)00170-0](https://doi.org/10.1016/s0734-743x(99)00170-0)
- [10] Abramowicz, W. (2003) Thin-Walled Structures as Impact Energy Absorbers. *Thin-Walled Structures*, **41**, 91-107. [https://doi.org/10.1016/s0263-8231\(02\)00082-4](https://doi.org/10.1016/s0263-8231(02)00082-4)
- [11] Lu, G. and Yu, T.X. (2003) Energy Absorption of Structures and Materials. Elsevier.
- [12] Sun, G., Wang, Z., Yu, H., Gong, Z. and Li, Q. (2019) Experimental and Numerical Investigation into the Crashworthiness of Metal-Foam-Composite Hybrid Structures. *Composite Structures*, **209**, 535-547. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.051>
- [13] 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.
- [14] 吴厦. 轻量化高吸能蜂窝结构优化设计和模拟仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2021: 38-40.
- [15] 崔世堂, 王波, 张科. 负泊松比蜂窝面内动态压缩行为与吸能特性研究[J]. 应用力学学报, 2017, 34(5): 919-924.
- [16] 王学双, 王保男, 庄华晔, 等. 基于 QP1180 钢板动态性能数据的 MAT24 材料卡制作[J]. 汽车工艺与材料, 2017(12): 46-50.