机械工程 (3)2023,5
ISSN: 2661-3530(Print); 2661-3549(Online)

关于蜂窝结构力学性能的研究

谢鸿涛 [1,2] 潘志宇 [2] 魏厚先 [2]
1. 三峡大学湖北省石墨增材制造技术与装备工程研究中心
2. 三峡大学机械与动力工程学院 湖北宜昌 443002

摘　要：蜂窝状结构具有轻质、多功能、用途广泛、应用前景广阔的特点。手性蜂窝结构是近年来发展起来的一种新型蜂窝状结构，它的机械性能优良，能够在平面上完成表面的变形和表面的载荷，可以用于各种智能结构和变型飞机，在航天领域有着很大的发展空间。传统的蜂巢结构通常具有正泊松比，然而，当今技术的发展已经远远超出了这种结构的能力。研究人员正将重点放在多种用途的蜂窝材料上。手性蜂窝结构具有负泊松比，并且可以通过调整泊松比率来改变其特性。通过使用最优的工艺参数，我们可以实现具有可变形、轻量化、高比刚度和负泊松比等性能。这篇文章概述了蜂窝结构的历史演变，探讨了它在研究领域中的应用情况。
关键词：蜂窝结构概述；现状分析；结构特征；抗冲击性能；发展趋势

Study on Advanced Mechanical Properties of Honeycomb Structures

Hongtao Xie[1,2], Zhiyu Pan[2] and Houxian Wei[2]
[1]Hubei Engineering Research Center for Graphite Additive Manufacturing Technology and Equipment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China
[2]College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract. Honeycomb structure has the characteristics of light weight, multi-function, wide use and wide application prospect. Chiral honeycomb structure is a new honeycomb structure developed in recent years, its excellent mechanical properties, can complete the surface deformation and surface load on the plane, can be used in a variety of intelligent structure and deformation aircraft, has a great space for development in the field of aerospace. The traditional honeycomb structure usually has a positive Poisson's ratio, but this structure can no longer meet the requirements of today's technology. For now, researchers are focusing on honeycomb materials for multiple uses. Chiral honeycomb structures have negative Poisson's ratio and can be changed by adjusting the Poisson's ratio. By using optimal process parameters, we can achieve deformability, lightweight, high specific stiffness and negative Poisson's ratio. This article gives an overview of the historical evolution of honeycomb structure and discusses its application in the research field.
Keywords. Overview of honeycomb structure; Analysis of current situation; Structural characteristics; Impact resistance; Development trend

前言：蜂窝结构和泡沫结构都属于多孔结构，它们广泛存在于自然。通常，泡沫组织内孔的形式和大小都毫无规则可循，但蜂窝组织的内孔形式和大小却是比较规范的，它是以连续固定的多边形二维排列，内部孔隙也相应地以柱状分隔而产生，因此其在构造上的规律性也引起了许多专家的重视。余同希教授指出蜂窝结构是典型的多胞结构，它是孔隙率大于 0.7 或相对密度小于 0.3 的多孔固体材料，可以单独用于能量吸收，也可以用作夹层板的芯材蜂窝结构的胞元截面以六边形居多，也可能是三角形、正方形、圆形等其他形状，随着技术的发展，金属蜂窝结构也逐渐应用在交通运输、冲击防护、建筑、包装等工程领域。蜂窝结构特有的孔洞结构使其具备了一些优良的特性。

一、研究背景及意义

夹层结构是一种特殊的叠层复合结构，它充分发挥了各种成分的特性，实现了整体体系的整体组合，在航空、航天等方面得到了广泛的应用。该复合材料在飞机某些结构的主、次承力结构件中也得到了广泛的应用，例如机翼、机身、机尾、雷达罩等。与其他常规材料比较，夹层这种结构的特点是它的重量很小，但它的强度很高，刚度也很大，剪切模量也很大，能够抵抗冲击，隔热，并且易于设计。夹层结构通常由上面板、上面板和夹芯粘合层、夹芯、下面板、下面板和夹芯粘合层五个部件组成。夹芯层通常由轻质且具有较低内部强度的结构组

成，常见的形式包括蜂窝状和泡沫状多孔材料，其中蜂窝状夹心结构是目前应用最为普遍的类型。蜂窝夹层具有许多优秀的机械性能，如低密度、高比强度和比刚度，这使得它们能够降低应力集中。此外，由于它们的密度较低，单位体积损失系数也很小，因此它们在电磁波方面表现出色，可以用来制作天线罩和雷达罩，提高建筑物的吸收或透波性能。蜂窝夹层结构是一种常见的飞机隐身技术，它能够在航空、航天等领域发挥出良好的隐形性能和承载能力。使用蜂窝结构的机翼蒙皮不仅能够提高飞行器的重量，增强其承载能力，同时还具有隐身效果。此外，将一些天线安装在蜂窝内部，有助于提升整体性能。现在，世界上最先进的战机、客机、军舰上，都出现了这种夹层结构。

2. 蜂窝结构概述

2.1 结构概述

蜂窝网络是在二维平面的最佳拓扑网络。蜂窝结构是一种复杂的蜂窝形状，由一系列正六角形单房组成，每个单房的入口或出口都朝向一个方向，形成蜂窝状结构以背靠背的形式所组合而成的一种结构。在日常生活中，亦指像蜂窝似的以多孔形状，在煤、水泥等结构表面的现象。

2.2 蜂窝夹层结构

该结构的核心部分包含了许多六个六边形、四角形和其它形状的孔洞，它们由多种金属、木材、玻璃纤维和其它复合材料制成。并通过在夹芯层的上下二端之间再胶接（或钎焊）而形成了较薄的表板。由于早期使用的轻质巴萨木层的嵌入体不耐潮，抗腐性也很弱，而且无法防潮，于是随着时间的推移，人们开始注意到金属蜂窝的交错排列。在一九四五年试制成了第一批的金属蜂窝互层嵌入体系。金属蜂窝体系比其他互层嵌入体系具有更好的抗拉强度和刚性，同铆合体系相比，结构质量可提高百分之十五～百分之三十。而互层嵌入的金属蜂窝孔格宽度、由于深浅不一的金属薄片和其形状的复杂性，它们对表面的弯曲、孔洞和护墙板套扣的临界应力产生重要影响。以及金属互层嵌入体系的防水功能。这种形式的设计考虑，是为了在保证它能承受必要的屈曲载荷的情况前途下，获得了必要的保温功能。而这种蜂窝设计的受力分析就如一般夹层结构那样重要。在宇航生产中，蜂窝设计也经常被用于生产各种防护墙面，如翼面、舱面、舱盖、底板、发动机保护罩、气尾喷管、消音片、隔热片、卫星星体外壳、热刚性的太阳能电池组片翼、抛物面多进多出的通信系统、火箭推进剂贮箱箱底等。

三、蜂窝结构力学超材料的结构特征和类型

蜂窝结构力学超材料的基础材料包括各种不同类型的材料，如高分子材料、金属和合金。它们通常由节点环和弹性韧带构成，这些韧带会与节点环相互连接，使得它们能够呈现出蜂窝状的结构。手性蜂窝结构的力学特性受到节点环的旋转、韧带的弯曲变形以及其大小、排列方式等多种因素的共同作用，这些都会对其弹性性能和冲击性能产生重要的影响。。常用的韧带种类，主要有三韧带、四韧带和六韧带等。若由韧带的双端组成的环状结构，被称为具有前向手性的结构，它们在韧带的双侧相互联系；若近年来，随着对手性蜂窝结构力学超材料的深入研究和实践应用，一种全新的手性蜂窝架构结构应运而生，它的两端连接的环位于韧带的同一边，形成了一种向后手翻的超结构，具有良好的力学特性和耐久性，可以满足多种应用需求。若将内凹六边形与手性蜂巢框架组合，就能使之满足为与毛细血管壁内膜的变形功能相匹配的微血管支架结构，其外形大小也可做到微米以上。此外，目前还有三 D 形态的手性蜂巢结构力学超材料问世。

四、蜂窝结构力学超材料抗冲击性能的研究现状

4.1 蜂窝结构力学超材料抗冲击性能的理论分析

现代材料工程行业尤其是在航空航天行业中，对轻量化、隔振、耐冲击等的防护材料需求也日益提高。当随着手性蜂窝结构力学超材料的不断发展，它们已经成为替代传统保护复合材料、能够吸收或填充复合材料及其工程结构的有效选择，因此，对它们的冲击变形功能、动态冲击强化和动态特性的研究显得尤为重要。然而，从力学的视角来看，这是一个重要的发现。对耐研究的焦点依旧集中于探索外力对韧带、节点以及它们之间的相互影响，以及如何更好地理解它们之间的关系，以便更好地应对复杂的环境条件尤其针对于一般的蜂窝和泡沫结构有着许多重要的观察结果。

牛斌等人提出的一种新的算法，基于微极连续体等效分析理论，能够有效地计算微单胞构件中的应力分布，这一技术比传统的体积平均均匀化方法更加精确，可以更好地反映出原结构的微观层次应力和应变，从而更好地探索局部微观结构的裂纹开裂、构件失稳等破坏行为，并且能够更好地分析外载与内部受力之间的关系。尽管细观力学方法的计算复杂度较高，而且内部微结构尺寸参数的影响也难以直观地反映出来。张大军等人考察了邻接洞室的约束效应，并给出了较理想的非等壁厚蜂窝护壁板的侧边约束，进而形成了可以求解在一个任意体积比的蜂窝材料表面外承压后的初始弹性不稳定状态负荷问题的热力学模型，从而解决了不稳定状态负荷实验方法求解精度的缺陷，但是该方法仅适合于计算弹性套扣临界应力值，因此对于整体复合材料的耐冲击承压的特性还没有明确的结论。刘强等人基于目前最常用的二维蜂窝体系中的代表性单元，建立了关于金属蜂窝复合材料弹塑性屈曲的热力学分析模型，并由此推论出了金属六边形蜂窝复合材料在面外压强存在下的弹塑性临界应力。

4.2 力学超材料在实际结构中的抗冲击性能研究

蜂窝结构力学超复合材料拥有“拉胀”复合材料所

没有的优势：(1) 杨氏模量和剪切模量均达到最大值，但由于它们的结构稳定，因此在弯曲过程中几乎不可能出现马鞍状的变形 ;(2) 它们的整体变形行为也十分稳定，因此可以满足多种应用场景的要求。所以，许许多研究人员正在尝试将手性蜂窝结构的材料应用于更复杂的工程系统，以提高其强度和稳定性，并改善其功能和安全性并由此来探讨其总体的耐冲击与抗弯曲性能。章振华等人就提出了圆洞结构、手型结构和在反蜂窝结构中三种覆盖面的“抗冲瓦”模式，从耐冲击型瓦的相对密度、棱面直径、不同拓扑形式和微观构造系数等的方面，对其层间的瓦形式进行了优化，同时也给出了一种全新的双层耐冲击型瓦：圆洞结构与在手性蜂窝超结构的结合体。实验结果显示，将手性蜂窝结构复合材料用作抗冲击性瓦的镂空充填结构，能够显著改善抗冲击性瓦块的耐冲击特性，虽然这是实验表面上的主要研究成果，然而，这种结合力的超材料化可以显著提高复合结构的稳定性，并且这种结合力对层状土体结构的热力学稳定性具有重要的影响。而江坤等人通过采用六韧带手性蜂窝结构复合材料作为基础，在舰船表面形成一个具有良好吸能效果的保护层，以提升其功能性能观察到其主体结构材料在动态载荷下的压缩情况。实验结论也证实了，基于高强度复合材料的六韧带手性蜂窝结构覆盖层，具有出色的耐久性和耐磨性拥有较高的能量吸收能力和可靠性。

五、存在问题及发展趋势

蜂窝结构力学超材材料因为其特有的高参数微结构以及优良的动态性能，而具备高度轻量化、负泊松比、高剪切模数和优异的防缺口性、耐裂纹和高回弹强度，因此引起了中国国内材料研发工作者的高度重视。因为其的拓扑结构形状能够进行毫米–厘米以上的空间扩张，所以手型蜂窝结构力学超材料不但在日常生活的医疗产品，如血管支架、瓶塞、踏垫等中有所使用，而且还在关键的产业领域中，如航空、军事、消费电子等领域中都有着重要的潜在使用价值。近年来，人类对于手式蜂窝结构力学超材的研发虽然获得了不少的进展，但主要还停留于基础试验设计和虚拟仿真研究的层面。目前，我国该行业中面临的一些情况及其发展概况如下：

(1) 人们已经建立了一个宏观的手性蜂窝结构力学超材料模型，以探究其内部微结构之间的关联性。目前，Sub–I 们正在努力构建新型的手性蜂窝结构，并对其准静态力学性能进行预测，以期望更好地满足实际应用的需求。, 以及解释负泊松比的形成机理上。然而，为了更好地研究杨氏模量、细胞内部拓扑形态、尺寸以及表面外韧带屈曲、细胞内部损伤的机理，我们必须借助于宏观、微观的力学理论来深入研究。

（2）深入探究手式蜂窝结构力学超材料抗冲击吸能特性的内细胞结构变化机理。关于该类复合材料抗冲击特性的探讨，目前主要集中于对整体表面内细胞的结构应变和吸能模式的有限元数值模拟。虽然手式蜂窝结构力学的材料在动载压力下，负泊松比的发生机制与静态时的关联性研究已被证实了，但对冲击的内部韧带的受力结构和变化与实际的外部压力变化间的定量关联研究还没有正确的结构力学模式。同时，对于关键的初始压力吸能过程的产生机制，还需科学家们做出更深刻、全面的研究。

（3）研究了对通过 3D 手性蜂窝结构力学超材料的热力学模拟，研究人员已经成功地将二维结构力学和超材料结合起来，并利用三维打印技术制造出具有精细结构（如医用血管支架）的三维手性蜂窝支架构件，从而大大提高了材料的加工效率。所以，对于从三 D 设计制造过程和使用的视角，进行对该类超材的微观设计与制备过程中的力学基础问题的探讨，有着很重大的研究价值。

六、结语

蜂窝结构力学超材料，因为其特有的高参数细胞设计和优良的动力学性能，而具有质量较低、负泊松比、高剪切模数和优异的防缺陷性、耐裂纹和高回弹的结构强度，因而引起了国外科研工作者的高度重视。也因为其的拓扑组织形状而能够进行一定量级的扩展，小到可以用于对日常生活和医疗用品中的血管框架、瓶塞、座垫等进行使用，大到可以应用于如飞机、军事、汽车灯工业等。虽然近年来，针对手型蜂窝结构力学超材料的研制已经获得了不少的进展，但仍主要停留在理论试验研究阶段和虚拟仿真分析阶段。各方面都尚存在着不少有待探讨的基础理论问题和具体应用方面。如对结构受力、吸能机制，和各种热力学超材料与其自身所固有的电、波、声等特性之间的相互作用研究、工程设计等。

参考文献：

[1] 郝巍，李勇，罗玉清 . 中、高密度 Nomex 蜂窝力学性能研究 [J]. 航空材料学报 .2002,22(2), 41–45.

[1] 郝新超，胡杰 .Nomex 蜂窝夹层结构侧向变形机理及蜂窝稳定化 [J]. 航空制造技术 .2020,63(13),69–74.

[1] 才琪 . 马克俭 . 多层大跨度空间钢网格蜂窝型空腹楼盖的研究与应用 [D]. 贵州大学，2017.