文章编号：1008-1542（2026）00-0000-00

负泊松比超材料结构设计及力学性能研究综述

侯博星，金国杰，杨立宁，杨 光

（河北科技大学机械工程学院，河北石家庄 050018）

摘要：超材料通过人工结构设计可突破传统材料的性能边界，在抗冲击、吸能及轻量化领域展现出独特优势。首先，介绍了超材料的定义及其分类；其次，结合非梯度和梯度 2 个设计理念，分别对二维和三维负泊松比结构及其力学性能进行了系统梳理，重点介绍了传统内凹六边形蜂窝结构所存在的缺陷及其优化设计方法、三维非梯度负泊松比结构的发展与力学性能、梯度负泊松比结构设计理念及其优异力学性能等；再次，对负泊松比超材料的研究现状进行了总结；最后，对该材料未来可能的研究方向进行了分析和展望：1）开展多物理场耦合条件下的负泊松比结构力学特性研究；2）探索多工况下三维负泊松比结构的抗冲击机理；3）开展三维负泊松比结构梯度优化设计；4）结合先进制造技术实现从结构到功能一体化设计制造。

关键词：结构设计；超材料；负泊松比；梯度优化；结构设计；力学性能

中图分类号：TH164 文献标识码：A

Review of the structural design and mechanical properties of metamaterials with negative Poisson's ratio

HOU Boxing，JIN Guojie，YANG Lining，YANG Guang

（School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018）

Abstract： Metamaterials can break through the performance boundaries of traditional materials through artificial structure design, and show unique advantages in the fields of impact resistance, energy absorption and lightweight. Firstly, the definition of metamaterials and their classification were introduced. Secondly, by integrating both non-gradient and gradient design concepts, the two-dimensional and three-dimensional negative Poisson's ratio structures along with their mechanical properties were systematically sorted out. The study specifically highlighted the defects and optimization design methods of the traditional concave hexagonal honeycomb structures, the development and mechanical properties of the three-dimensional non-gradient negative Poisson's ratio structures, as well as the design concept and superior mechanical properties of gradient negative Poisson's ratio structures, etc. Finally, the research status of negative Poisson's ratio metamaterials was summarized, and the possible future research directions of this material were analyzed and prospected: 1) Conduct research on the mechanical properties of negative Poisson's ratio structures under multi-physical field coupling conditions; 2) Explore the anti-impact mechanism of three-dimensional negative Poisson's ratio structures under multiple working conditions; 3) Carry out gradient optimization design of three-dimensional negative Poisson's ratio structures; 4) Combine with advanced manufacturing technologies to realize the integrated design and manufacturing from structure to function.

Keywords： structural design; metamaterials; negative Poisson's ratio; gradient optimization; structural design; mechanical properties

收稿日期：2025-04-10；修回日期：2025-09-12；责任编辑：冯民
基金项目：河北省军民融合科技创新项目（SJMYF202402）
第一作者简介：侯博星（2002—），男，河北邢台人，硕士研究生，主要从事负泊松比超材料方面的研究。
通信作者：杨立宁，副教授。E-mail：yang_li_ning@126.com

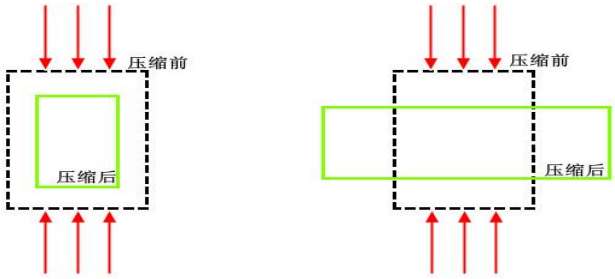
材料是人类文明进步的基石，从石器时代到硅基时代，每一次技术革命都伴随着材料的突破性发展。传统材料的性能受限于自然规律，其物理特性往往存在固有边界。例如，金属材料的高强度常伴随低韧性，陶瓷材料虽耐高温但却易脆断，这些矛盾特性制约了极端环境下的材料应用。而负泊松比超材料的“结构决定功能”范式对材料科学的颠覆性影响，通过结构创新赋予材料超越自然规律的新特性，使其具备负压缩、高吸能等优异力学性能。

超材料按照物理响应特性可以分为电磁超材料、光学超材料、声学超材料、热学超材料、力学超材料等多种类型。本文主要介绍力学超材料中按力学特性分类的负泊松比超材料，不仅首次整合了二维及三维负泊松比结构的研究现状，还结合非梯度、梯度 2 个设计理念分别对不同结构及其力学性能进行了系统性分析。最后对负泊松比超材料的研究现状进行了总结，并分析展望了该材料未来的研究方向。

1　负泊松比超材料概述

超材料（Metamaterial）是一类通过人工结构设计实现特殊物理性能的新型材料，其特性主要取决于精密的微观或介观结构而非化学成分。自 21 世纪初被提出以来，超材料因其突破自然材料极限的能力（如负折射率、负热膨胀系数、声波/电磁波调控等）引发了材料科学与工程领域的革命性发展[1-5]。超材料按物理响应类型可以分为电磁超材料、光学超材料、声学超材料、热学超材料、力学超材料等。其中力学超材料，也称机械超材料[6-9]，广义上指一类可人工操纵材料外观和力学特性的材料，能够实现轻质高强度、可调刚度、负压缩性、超流体、负泊松比等特性。

力学超材料按结构类型不同可分为晶格结构超材料、多孔/泡沫结构超材料、折纸/剪纸结构超材料等。按力学特性不同可为负泊松比超材料（拉涨材料）、负刚度超材料、超弹性/高韧性超材料、负压缩性超材料等。其中，负泊松比超材料具有压胀特性，即当结构受到压缩载荷时，在垂直力方向将产生膨胀变形，如图 1 所示。这一反常形变特性使得负泊松比超材料结构（如内凹六边形蜂窝）的力学性能远高于常见的正泊松比材料结构（如传统六边形蜂窝），在吸能特性、抗压痕能力、剪切/弯曲模量、抗冲击性能等方面同样具有明显优势[10]。同时，该结构材料还兼具传统材料所不具备的极强设计性和轻量化，因此可广泛应用于航空航天、汽车工业、船舶、国防等领域中抗冲击、减振、吸能零部件的结构设计[11-13]，如汽车保险杠中的吸能盒、飞机的着落架等。



a）负泊松比结构　　b）正泊松比结构

图 1　泊松比结构受载变形图（箭头指示载荷方向）

Fig.1　Load deformation diagram of Poisson's ratio structure（The arrows indicate the direction of the load）

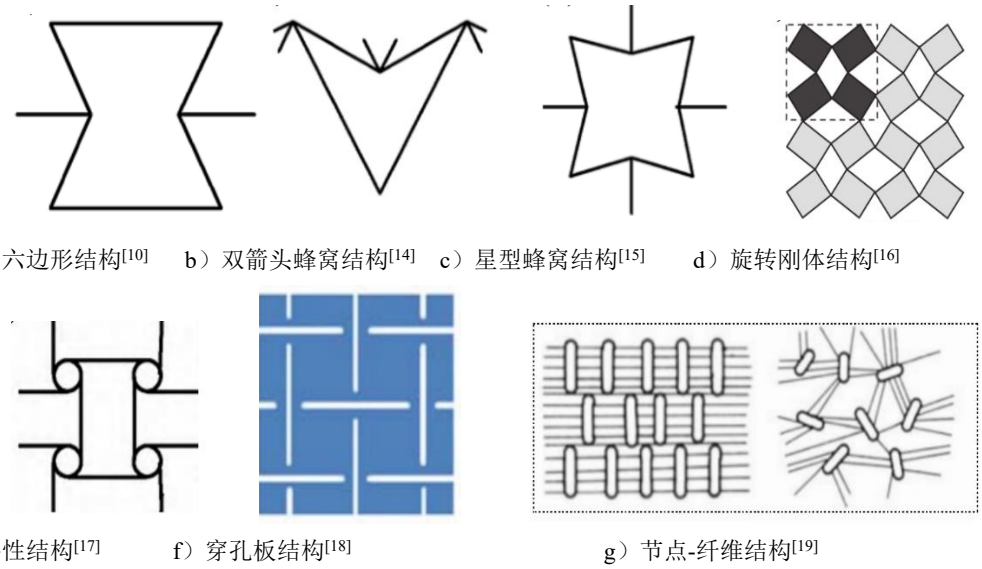
2　非梯度负泊松比结构及力学性能研究现状

近年来，由于负泊松比超材料结构的超常物理特性及其巨大应用潜力，成为了国内外学者们的研究热点。本文首先从二维和三维 2 个结构角度，对传统非梯度负泊松比结构及其力学性能的国内外研究情况进行了介绍。

2.1 二维非梯度负泊松比结构及力学性能研究

大量学者为了更好阐述负泊松比超材料结构的变形机理，在不同角度提出了一系列二维负泊松比结构模型，根据变形机理的不同可以分为：内凹多边形结构[10,14-15]、旋转刚体结构[16]、手性结构[17]、穿孔板结构[18]、节点-纤维结构[19]以及其他结构[20-22]等，如图 2 所示。其中内凹六边形蜂窝是目前研究最为广泛的一种

负泊松比结构。同时，如何进一步提高该结构的抗冲击、减振、吸能性能，也成为负泊松比结构工程化应用的关键因素之一，并成为国内外学者的研究热点。经研究发现，负泊松比蜂窝的几何构型会直接影响到整体的静/动力学性能[23-29]。由于传统内凹六边形蜂窝结构自身存在较多尖锐部位，因此在承受外力作用时容易在这些部位形成应力集中，进而导致其强度下降，抗疲劳、抗冲击及吸能性能降低。针对这一问题，国内外学者在实现内凹六边形蜂窝结构优化设计方面开展了较多创新性探索。



a）内凹六边形结构[10]　b）双箭头蜂窝结构[14]　c）星型蜂窝结构[15]　d）旋转刚体结构[16]

e）手性结构[17]　f）穿孔板结构[18]　g）节点-纤维结构[19]

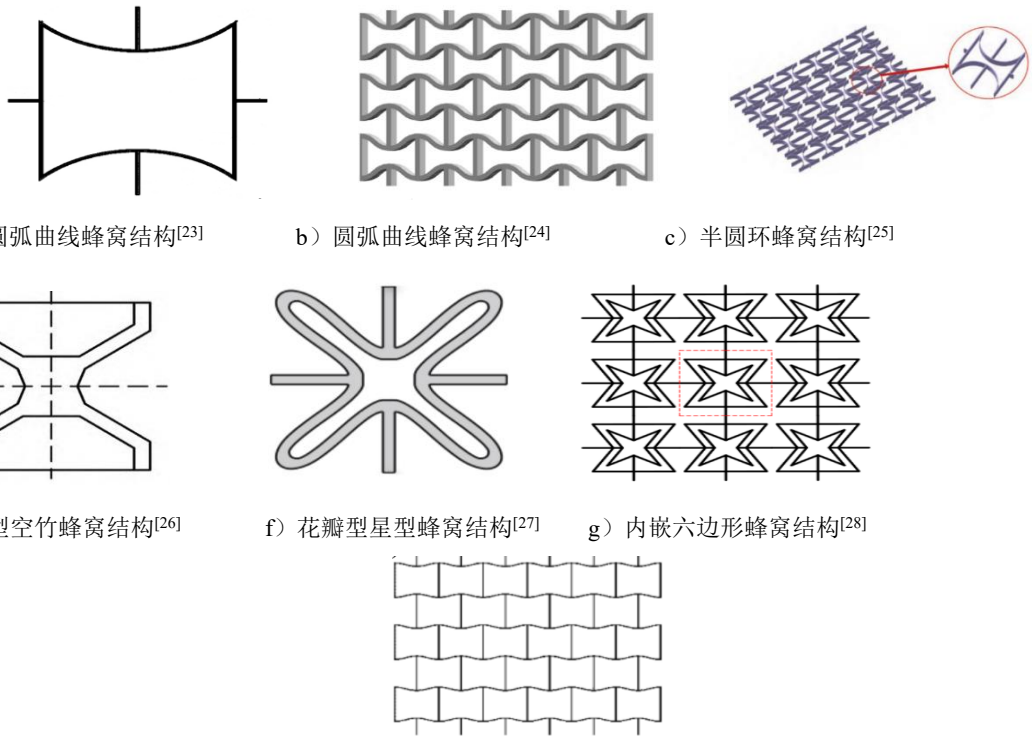
图 2　不同变形机理的负泊松比结构

Fig.2　Negative Poisson's ratio structure with different deformation mechanisms

沈建邦等[23]基于内凹六边形蜂窝结构，设计了可变弧角曲边内凹蜂窝结构，并研究了不同冲击速度下，弧角参数对结构变形模式和吸能量的影响规律，研究发现冲击速度越高时，弧角越大，结构的吸能量越大。王彦斌等[24]提出一种弧角可变的双圆弧曲线蜂窝结构，采用圆弧曲线杆作为产生负泊松比效应的核心杆，相较于传统内凹六边形结构，具有更大的变形弹性阶段且很好地消除了应力集中现象。同时系统研究了弧角、杆厚、长宽比等结构参数对于整体模型弹性模量和泊松比的影响规律，研究发现在模型 y 方向上，随着弧角的增大，弹性模量和负泊松比效应均下降，杆厚的增加会降低整体的负泊松比效应，改变各尺寸参数可明显调控结构的力学特性。蒋伟等[25]在内凹六边形蜂窝结构中引入半圆环来实现负泊松比效应，相较于传统内凹六边形蜂窝结构，该结构更为简单且力学性能更加稳定。以上研究表明：通过对传统内凹六边形蜂窝结构进行优化设计，可以有效解决应力集中问题，进而提高结构的吸能性能。

负泊松比超材料可以通过人工设计，来实现其特殊的结构物理特性。基于仿生学设计思想，刘海涛**错误! 未找到引用源.**等将空竹形体结构应用于内凹六边形蜂窝结构设计中，并对其进行面内冲击响应特性分析，研究发现空竹型蜂窝结构在不同冲击速度下均具备更高的平台应力和比吸能量，且空竹结构的引入进一步提高了原有结构的耐撞性和能量吸收能力。WANG 等[27]为了克服星型蜂窝结构顶点与胞壁由于铰链连接造成制造困难以及应力集中的问题，使用花瓣型辅助结构代替铰链连接，在保证负泊松比效应的前提下，缓解了应力集中。JIN 等[28]通过将星型蜂窝结构内嵌入内凹六边形蜂窝，克服了负泊松比特性依赖胞元夹角的缺陷，使得模型 x 方向的承载能力更强。在符合负泊松比效应的前提下，人工自主设计的负泊松比结构也具有较好的吸能特性与承载能力。图 3 为上述文献结构示意图。

同时，在结构优化设计方面，也存在学科的交叉应用，如虞科炯等[29]研究了一种基于正弦函数的曲线蜂窝结构，并构建其参数化模型，研究了不同振幅下结构的动力学响应，研究发现在中低速冲击下，振幅越大、胞壁越厚，结构的面内变形就越均匀，但总体能量吸收能力下降。



a）双圆弧曲线蜂窝结构[23]　b）圆弧曲线蜂窝结构[24]　c）半圆环蜂窝结构[25]

d）新型空竹蜂窝结构[26]　f）花瓣型星型蜂窝结构[27]　g）内嵌六边形蜂窝结构[28]

e）正弦曲线蜂窝结构[29]

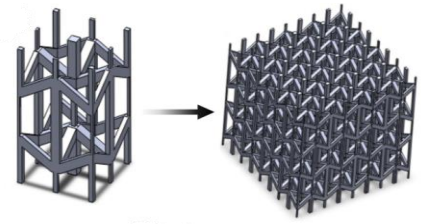
图 3　优化后的多边形内凹蜂窝结构

Fig.3 Optimized polygonal concave honeycomb structure

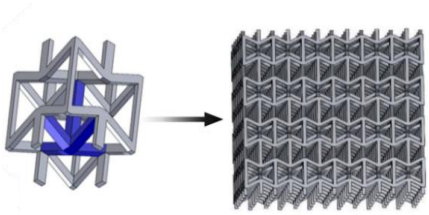
2.2 三维非梯度负泊松比结构及力学性能研究

三维结构的设计理念源于二维结构的空间扩展，但其力学响应因多自由度变形而更为复杂。根据在三维空间的排布方式，负泊松比结构主要可划分为二维结构和三维点阵结构。通过将二维单胞结构在三维空间进行旋转、阵列，即可生成三维负泊松比点阵结构。同时三维负泊松比点阵结构相较于二维结构具有更高的孔隙率，因此在轻量化结构设计领域具有更广泛的应用前景。近年来，增材制造技术的快速发展，尤其是选区激光熔化、立体光固化技术等技术的高成型效率和高成型精度，以及可以实现复杂结构零部件一体化成型[30-32]，为复杂负泊松比结构的设计及制造提供了可能。

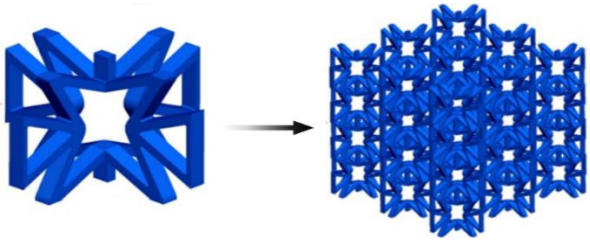
1994 年，EVANS 等[33]首次提出了三维负泊松比开孔泡沫的有限元模型，这标志着三维负泊松比结构走上了历史的舞台。在设计二维负泊松比结构中可以通过缺失肋结构的改变来得到新的结构，三维的研究思路与二维结构基本一致。CHEN 等[34]将窄肋添加到三维内凹六边形蜂窝结构单胞单元中，研究表明新的结构仍具备负泊松比特性，同时其杨氏模量得到显著提高，嵌入肋的加入使得结构的主要变形模式由弯曲转变为拉伸，提高了结构的刚度。混合设计的方式也可以应用于三维负泊松比结构中，并且混合方法还可以保持三维结构的负泊松比性能，并提高结构的稳定性和刚度。HU 等[35]则是利用晶格的排布方式，在三维单胞结构构型中嵌入同胞壁厚度的二维单胞构型，使用立体光固化技术成功制备了 3D 混合拉涨蜂窝晶格结构，研究发现该类型结构在拉伸和压缩下的力学行为存在显著差异，拉伸载荷下最小能量吸收值高于压缩载荷最大能量吸收值的 86%，因此嵌入蜂窝单元可显著提高三维蜂窝结构的刚度和能量吸收特性。WEI 等[36]设计了三维星型蜂窝结构，并优化改进了横向三维单胞连接方式，研究发现三维负泊松比结构表现出更优异的变形模式和能量吸收特性，其吸能量高于同尺寸参数二维结构的 25.45%，图 4 为上述文献的结构示意图。由此可见：通过二维负泊松比结构在空间进行扩展，所得到的三维负泊松比结构将展现出更加优异的力学特性。



a）伸长肋三维蜂窝点阵结构[34]



b）仿晶格嵌入式三维蜂窝点阵结构[35]



c）优化横向连接方式的三维星型蜂窝点阵结构[36]

图 4　三维负泊松结构

Fig.4　Three-dimensional negative Poisson structure

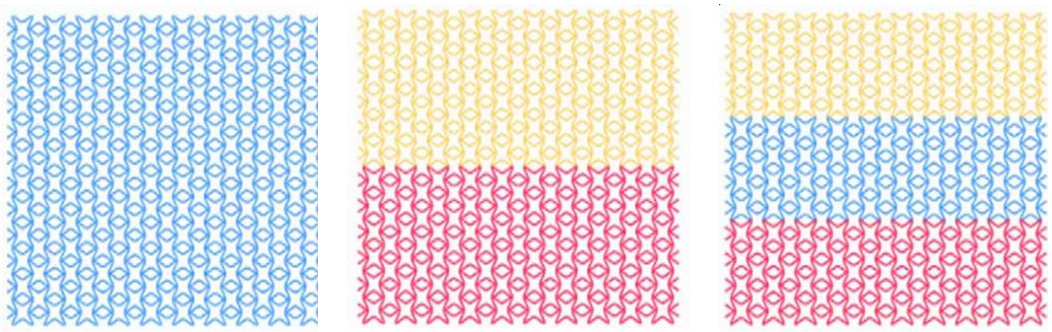
3　梯度负泊松比结构及力学性能研究现状

梯度设计是通过空间分布参数连续变化来实现结构性能调控的一种设计方法。基于这一设计思想，通过合理规划材料的空间分布形式，可以调控整体结构的目标变形模式，进而有效提升结构的吸能性能。虽然负泊松比结构因其独特的拉涨效应，具备优异的抗冲击性能，但整体结构在受载初期，存在初始峰值力远大于平均应力水平的现象，在实际工程应用中易对结构造成瞬间破坏。目前，针对负泊松比超材料结构的梯度化设计研究，主要集中于依据仿生原型进行模型的梯度化设计，以及依据单胞结构参数进行梯度化设计。

3.1 二维梯度负泊松比结构及力学性能研究

采用仿生结构梯度的方法进行梯度优化设计。朱冬梅等[37]结合甲虫鞘翅微观结构和内凹六边形结构，提出一种新型负泊松比结构，以角度参数变化为梯度，设计了正/负、对称分层递变梯度排列结构，研究结果发现梯度设计可明显提高结构的抗冲击性能，正梯度结构吸能性能表现最优。吴小莉等[38]结合悠悠球模型设计一种内凹蜂窝变体结构，通过改变胞元结构胞壁倾角、宽度比、纵横比，设计了 8 种不同阵列的梯度结构，研究发现胞壁倾角增大能够带来结构的吸能量、吸能量效率和平台应力的提升。上述两个研究均是基于仿生设计思想，对二维负泊松比结构进行了相应的梯度设计，通过优化参数空间分布来提升结构学特性。

其次，梯度设计方向也可以依据单胞结构参数进行梯度划分，国内外学者也通过对截面变化率、正负混合梯度和单胞结构层数进行梯度优化设计。张晓楠等[39]设计了变截面内凹蜂窝结构，基于截面变化率设计了双向正梯度与双向负梯度，研究结果表明梯度方向并不影响结构进入密实化的应变大小，其中双向负梯度结构能量吸收效果较优。SHAO 等[40]研究了正、负梯度内凹六边形的力学性能，并基于变形过程系统探索了两种梯度形式下的负泊松比效应和平台应力，研究结果表明负梯度结构具备独特的内聚机制，在中/高速时结构的吸能量为正梯度的 12.1/7.41 倍。安明冉等[41]通过设计双向内凹单胞结构不同层数的梯度变化，发现在相同速度下，平台应力随层数的增加而增大，峰值应力随层数的增加而不断减小。这是因为各层的相对密度存在梯度，导致在变形过程中总是梯度较小的层先密实，然后下一层才会变形，所以在两层交界处应力出现波动并且应力也会随着层数的增加而增大。研究所采用的双向内凹不同层数梯度结构，如图 5 所示。



a）1 层梯度结构　　b）2 层梯度结构　　c）3 层梯度结构

图 5　双向内凹不同层数梯度结构[41]

Fig.5　Bidirectional concave gradient structure with different layers[41]

3.2 三维梯度负泊松比结构及力学性能研究

近年来，梯度结构设计在三维负泊松比结构设计领域也展现出显著优势。学者们采用改变胞元截面长度、功能与遗传算法、材料分布等进行三维结构的梯度优化设计，多项研究结果表明通过合理的梯度调控可有效提升负泊松比结构的吸能及耐撞特性。王强等[42]采用改变胞元截面长度的方法将内凹蜂窝点阵结构进行多种梯度设计，发现横向负梯度纵向正梯度的排布方式在比吸能上具有明显的优势，如图 6 所示。ZHOU 等[43]，设计了基于功能梯度的三维双箭头负泊松比吸能盒，并基于遗传算法进行优化，相较于常规吸能盒具有更好的耐撞性和抗振性。QIN 等[44]对三维负泊松比圆管结构进行了厚壁上由内到外的三层材料分布梯度，即通过改变管壁上不同位置处的材料比例来探究对力学性能的影响。上述研究结果表明：三维梯度负泊松比结构相较于常规结构来说，其具备更好的吸能特性与轻量化设计优势，也更能满足复杂冲击工况下的力学性能要求。

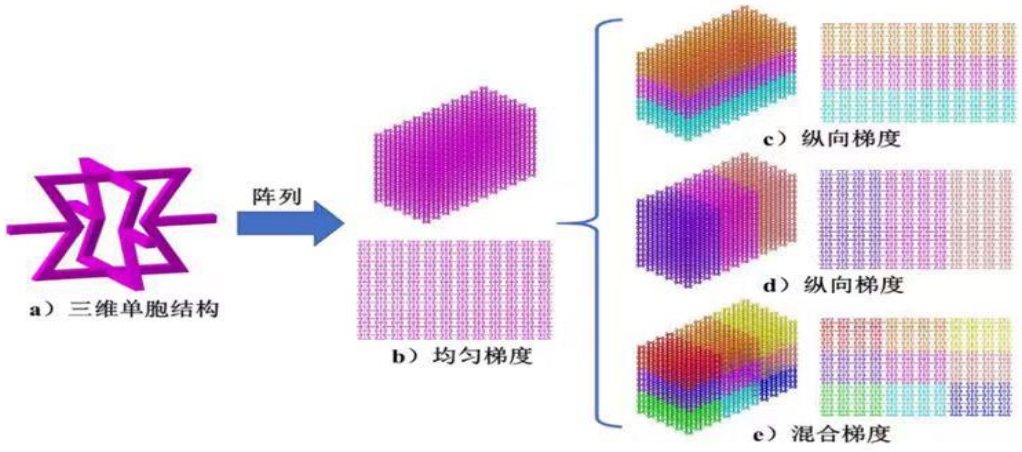


图 6　三维梯度内凹蜂窝点阵结构示意图[42]

Fig.6　Schematic diagram of a three-dimensional gradient concave honeycomb lattice structure[42]

本文结合以上国内外在负泊松比超材料结构设计及力学性能研究方面的成果综述及分析，对现有典型内凹负泊松比结构的吸能特性及局限性进行了对比分析，如表 1 所示。

表 1　典型内凹负泊松比结构吸能特性及局限性分析表

Tab. 1　Analysis of energy absorption characteristics and limitations of typical concave negative Poisson's ratio structures

结构类型	吸能特性	局限性
传统二维内凹结构	具有良好吸能特性	尖锐部位容易造成应力集中
二维弧角内凹结构	弧角结构有效解决了应力集中问题，吸能特性得到提高	不具备结构变形模式的可调控性

二维梯度内凹结构	通过二维结构参数的合理优化，可调控其变形模式，吸能特性得到进一步提高	不适用于多维度复杂冲击工况使用要求
三维梯度内凹结构	通过三维结构参数的合理优化，能够有效响应多维度的冲击载荷	结构设计复杂，成型难度大

4　增材制造技术在复杂三维负泊松比结构成型中的应用

增材制造（additive manufacturing，AM）俗称 3D 打印，是一种通过将离散材料进行逐层堆积来制造三维物体的先进制造技术。与传统的减材和等材加工方法不同，增材制造通过数字模型直接驱动三维物体的直接构建，具有更高的设计自由度和制造灵活性。

随着增材制造技术发展逐渐成熟，也为复杂三维负泊松比结构的直接成型提供了技术支持。WU 等[45]，通过选择性激光烧结技术逐层打印复杂负泊松比结构聚合物，与传统制造方法相比，该技术确保了结构单元的高尺寸精度和力学性能。CHEN 等[46]采用挤压式 3D 打印技术实现了折纸基封闭空心负泊松比结构的无支撑制造，解决了传统工艺中结构可控性差、支撑复杂等问题，为高性能可穿戴传感器的设计提供了新范式，如图 7 所示。SUN 等[47]设计的手性负泊松比结构具有精细的连接杆—圆环旋转薄壁单元，传统注塑或切削工艺难以实现，光固化成型技术通过逐层固化柔性树脂，精确成型复杂内凹和旋转连接结构，确保负泊松比效应的有效实现。

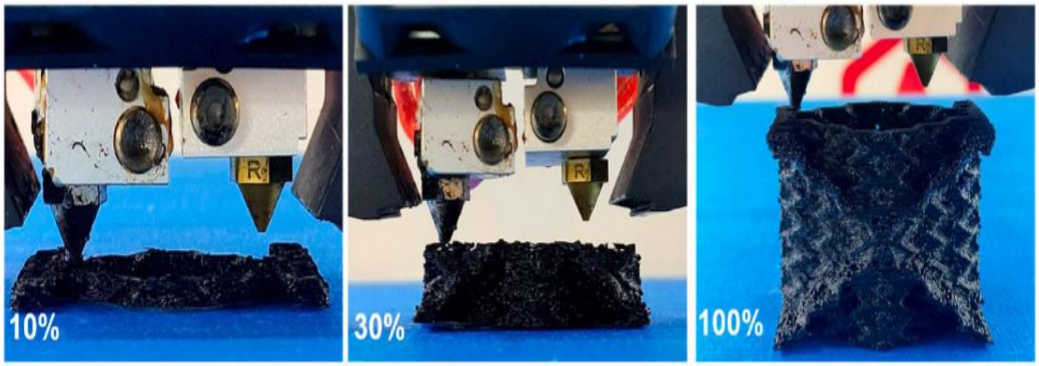


图 7　基于挤压式 3D 打印技术的无支撑打印折纸基负泊松比结构的过程[46]

Figure 7　Process of printing a foldable paper-based structure with negative Poisson's ratio using extrusion-based 3D printing technology without support[46]

5　问题与展望

负泊松比超材料通过“结构决定功能”的创新理念，打破了传统材料的性能边界，可以为航空航天、汽车工业、船舶、国防等领域中抗冲击、减振、吸能零部件的结构设计提供有效的解决方案。负泊松比结构设计从最初的二维结构到三维点阵结构，使其结构的可设计性和可扩展性更强。但其发展仍需克服理论设计、性能优化、制备工艺、成本控制和可靠性验证等一系列问题。在此，本文梳理出未来负泊松比超材料的可能研究方向。

1）开展多物理场耦合条件下的负泊松比结构力学特性研究　现有对于负泊松比超材料力学性能的研究成果，多限于单一物理场下的变形机理及吸能特性，因此需要进一步研究超材料结构在多物理场耦合条件下的力学特性，使结构设计能够满足复杂物理场下的工程化使用要求。

2）探索多工况下三维负泊松比结构的抗冲击机理　目前国内对于负泊松比超材料的研究，主要集中于单一轴向冲击工况研究，鲜有考虑多冲击速度、多冲击角度结合的复杂工况下结构的动力学性能变化规律。因此需要结合实际工况，研究多工况下的变形机理及性能特性，使得三维结构设计能够满足多速度、多角度等使用工况要求。因此研究复杂工况下三维负泊松比结构的抗冲击机理具有重要意义。

3）开展三维负泊松比结构梯度优化设计　负泊松比超材料结构的设计目标主要包括轻量化、高吸能、抗冲击等，因此该结构设计所关注的主要性能指标包括峰值碰撞力、比吸能，三维结构相较于二维结构具有更加优异的抗冲击特性，而为了进一步降低峰值碰撞力，同时提高结构的比吸能特性，需要在原有三维结构设计基础上开展梯度结构优化。

4）结合先进制造技术实现从结构到功能一体化设计制造　为了满足复杂多工况下的使用要求，同时进一步提高抗冲击性能，负泊松比超材料需要由简单的二维结构向复杂的三维梯度结构进行扩展，而复杂的结构设计对传统制造工艺提出了巨大挑战。为了促进负泊松比超材料在实际工程领域中的应用，需要将结构设计与先进的制造技术，如增材制造技术等相结合，实现负泊松比超材料从结构到功能的一体化设计与制造。

参考文献/References:

[1] CAI Wenshan,CHETTIAR U K,KILDISHEV A V,et al.Optical cloaking with metamaterials[J].Nature Photonics,2007,1(4):224-227.

[2] SCHURIG D,MOCK J J,JUSTICE B J,et al.Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J].Science,2006,314:977-980.

[3] PENDRY J B,SCHURIG D,SMITH D R.Controlling electromagnetic fields[J].Science,2006,312:1780-1782.

[4] SMITH D R,PENDRY J B,WILTSHIRE M C K.Metamaterials and negative refractive index[J].Science,2004,305:788-792.

[5] KSHETRIMAYUM R S.A brief intro to metamaterials[J].IEEE Potentials,2004,23(5):44-46.

[6] 宋波,张磊,王晓波,等.面向航空航天的增材制造超材料的研究现状及发展趋势[J].航空制造技术,2022,65(14):22-33.
SONG Bo,ZHANG Lei,WANG Xiaobo,et al.Research status and development trend of additive manufacturing metamaterials toward aerospace[J].Aeronautical Manufacturing Technology,2022,65(14):22-33.

[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.
ZHU Qing,ZHANG Haijun,HAN Lei,et al.Research progress of mechanical metamaterials[J].Rare Metal Materials and Engineering,2021,50(10):3786-3796.

[8] 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):656-687.
REN Xin,ZHANG Xiangyu,XIE Yimin.Research progress in auxetic materials and structures[J].Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2019,51(3):656-687.

[9] 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.
YU Jingjun,XIE Yan,PEI Xu.State-of-art of metamaterials with negative Poisson’s ratio[J].Journal of Mechanical Engineering,2018,54(13):1-14.

[10]GIBSON L J,ASHBY M F,SCHAJER G S,et al.The mechanics of two-dimensional cellular materials[J].Proceedings of the Royal Society A,1982,382:25-42.

[11]蒋欣程.双箭头蜂窝夹层式军车装甲的防弹分析与优化[D].大连:大连理工大学,2016.
JIANG Xincheng.Analysis and Optimization of the Ballistic Resistance Performanceof the Double Arrowhead Sandwich Military Vehicle Armor[D].Dalian:Dalian University of Technology,2016.

[12]WANG Chunyan,WANG Weiwei,ZHAO Wanzhong,et al.Reliability optimization of a novel negative Poisson’s ratio forepart for pedestrian protection[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,PartC:Journal of Mechanical Engineering Science,2017,232(17):2998-3012.

[13]GIBSON L J,ASHBY M F.Cellular Solids:Structure and Properties[M].Cambridge:Cambridge University Press,1997.

[14]LARSEN U D,SIGNUND O,BOUWSTA S.Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio[J].Journal of Microelectromechanical Systems,1997,6(2):99-106.

[15]GRIMA J N,GATT R,ALDERSON A,et al.On the potential of connected stars as auxetic systems[J].Molecular Simulation,2005,31(13):925-935.

[16]HU Hong,WANG Zhengyue,LIU Su.Development of auxetic fabrics using flat knitting technology[J].Textile Research Journal,2011,81(14):1493-1502.

[17]HA C S,PLESHA M E,LAKES R S.Chiral three-dimensional isotropic lattices with negative Poisson’s ratio[J].Physica Status Solidi(b),2016,253(7):1243-1251.

[18]MIZZI L,AZZOPARDI K M,ATTARD D,etal.Auxetic metamaterials exhibiting giant negative Poisson's ratios[J].Physica Status Solidi:Rapid Research Letters,2015,9(7):425-430.

[19]EVANS K E,CADDOCK B D.Microporous materials with negative Poisson’s ratios.II.Mechanisms and interpretation[J].Journal of Physics D:Applied Physics,1989,22(12):1883-1887.

[20]GRIMA J N,WINCZEWSKI S,MIZZI L,et al.Tailoring graphene to achieve negative Poisson's ratio properties[J].Advanced Materials,2015,27(8):1455-1459.

[21]BOUAZIZ O,MASSE J P,ALLAIN S,et al.Compression of crumpled aluminum thin foils and comparison with other cellular materials[J].Materials Science

and Engineering:A,2013,570:1-7.

[22]RODNEY D,GADOT B,MARTINEZ O R,et al.Reversible dilatancy in entangled single-wire materials[J].Nature Materials,2016,15(1):72-77.

[23]沈建邦,肖俊华,梁希,等.负泊松比曲边内凹蜂窝结构的面内冲击动力学数值研究[J].中国机械工程,2020,31(16):1998-2004.

SHEN Jianbang,XIAO Junhua,LIANG Xi,et al.Numerical study on in-plane impact dynamics of negative Poisson's ratio honeycomb structures with curved concave sides[J].China Mechanical Engineering,2020,31(16):1998-2004.

[24]王彦斌,刘海涛.负泊松比圆弧曲线蜂窝芯结构的力学分析[J].云南大学学报(自然科学版),2020,42(6):1159-1165.

WANG Yanbin,LIU Haitao.Mechanical analysis of the circular curve honeycomb core with negative Poisson's ratio[J].Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition),2020,42(6):1159-1165.

[25]蒋伟,马华,王军,等.基于环形蜂窝芯结构的负泊松比机械超材料[J].科学通报,2016,61(13):1421-1427.

JIANG Wei,MA Hua,WANG Jun,et al.Mechanical metamaterials with negative Poisson's ratio based on annular honeycomb core structure[J].Chinese Science Bulletin,2016,61(13):1421-1427.

[26]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.

LIU Haitao,LIU Jiayue,ZHANG Dequan.In-plane impact performance of diabolo honeycomb structure with negative Poisson's ratio[J].Journal of Vibration and Shock,2022,41(17):262-267.

[27]WANG Zhenpei,POH L H,DIRRENBERGER J,et al.Isogeometric shape optimization of smoothed petalauxetic structures via computational periodic homogenization[J].Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering,2017,323:250-271.

[28]JIN Yutong,QIE Yanhui,LI Ningning,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.DOI:10.1016/j.compstruct.2022.116065.

[29]虞科炯,徐峰祥,华林.正弦曲边负泊松比蜂窝结构面内冲击性能研究[J].振动与冲击,2021,40(13):51-59.

YU Kejiong,XU Fengxiang,HUA Lin.In plane impact performance of honeycomb structure with sinusoidal curved edge and negative Poisson's ratio[J].Journal of Vibration and Shock,2021,40(13):51-59.

[30]王强,梁鸿宇,蒲永锋,等.增材制造技术的发展对负泊松比材料的促进[J].汽车文摘,2020(7):41-47.

WANG Qiang,LIANG Hongyu,PU Yongfeng,et al.The development of additive manufacturing technology promotes negative Poisson's ratio materials[J].Automotive Digest,2020(7):41-47.

[31]韦超,杨潇,鲁淑芬,等.激光多材料增材制造技术研究进展和展望[J].航空制造技术,2023,66(8):26-34.

WEI Chao,YANG Xiao,LU Shufen,et al.Research progress and prospect of laser-based multi-material additive manufacturing technology[J].Aeronautical Manufacturing Technology,2023,66(8):26-34.

[32]刘倩,卢秉恒.金属增材制造质量控制及复合制造技术研究现状[J].材料导报,2024,38(9):182-189.

LIU Qian,LU Bingheng.Review on quality control and relevant hybrid technology in additive manufacturing of metallic materials[J].Materials Reports,2024,38(9):182-189.

[33]EVANS K E,NKANSAH M A,HUTCHINSON I J.Auxeticfoams:Modelling negative Poisson's ratios[J].Acta Metallurgica et Materialia,1994,42(4):1289-1294.

[34]CHEN Yu,FU Minghui.A novel three-dimensional auxetic lattice meta-material with enhanced stiffness[J].Smart Materials and Structures,2017.DOI:10.1088/1361-665X/aa819e.

[35]HU Qifang,LU Guoxing,TSE K M.Compressive and tensile behaviours of 3D hybrid auxetic-honeycomb lattice structures[J].International Journal of Mechanical Sciences,2024.DOI:10.1016/j.ijmecsci.2023.108767.

[36]WEI Lulu,XU Shiwei,ZHU Guohua,et al.In-plane compression behavior of a novel 3D auxetic honeycomb[J].Materials Today Communications, 2023. DOI:10.1016/j.mtcomm.2023.105729.

[37]朱冬梅,鲁光阳,杜瑶,等.新型负泊松比梯度结构缓冲性能[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(10):203-211.

ZHU Dongmei,LU Guangyang,DU Yao,et al.Cushioning performance of a new negative Poisson's ratio gradient structure[J].Journal of Hunan University(Natural Sciences),2023,50(10):203-211.

[38]吴小莉,李兆凯.新型负泊松比材料等效性能与吸能性能研究[J].机械强度,2023,45(4):826-837.

WU Xiaoli,LI Zhaokai.Study on the equivalent properties and energy absorption properties of a novel material with negative Poisson's ratio[J].Journal of Mechanical Strength,2023,45(4):826-837.

[39]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(3):193-198.

ZHANG Xiaonan,YAN Shilin,OU Yuanxun,et al.Gradient design and dynamic impact response of concave honeycomb structures with negative Poisson's ratio[J].Journal of Vibration and Shock,2023,42(3):193-198.

[40]SHAO Yujie,MENG Jiaxu,MA Guanghao,et al.Insight into the negative Poisson's ratio effect of the gradient auxetic reentrant honeycombs[J].Composite Structures,2021. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.114366.

[41]安明冉.新型多层梯度负泊松比结构设计及其吸能特性研究[D].天津:河北工业大学,2022.

AN Mingran.Research on Design and Energy Absorption Characteristics of New Multilayer Gradient Structure with Negative Poisson's Ratio[D].Tianjin:Hebei University of Technology,2022.

[42]王强.基于汽车吸能盒的梯度负泊松比结构多工况耐撞性研究[D].长春:吉林大学,2022.

WANG Qiang.Study on Multi-Condition Crashworthiness of Gradient Negative Poisson's Ratio Structure Based on Automotive Crash Box[D].Changchun:Jilin University,2022.

[43]ZHOU Guan,YAN Pengfei,WANG Qi,et al.Optimal design of a novel crash box with functional gradient negative Poisson's ratio structure[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,PartD:Journal of Automobile Engineering,2022,236(14):3309-3325.

[44]QIN Ruixian,LIU Xiwei,WANG Xi,et al.Mechanical behavior and energy absorption of expansion circular tube with negative Poisson's ratio[J].Alexandria Engineering Journal,2024,109:638-654.

[45]WU Jiangyu,LI Shihao,SHEN Louyan,et al.Effect of 3D-printed polymer with negative Poisson's ratio structure on the mechanical characteristics of cemented tailings backfill[J].Case Studies in Construction Materials,2025.DOI:10.1016/j.cscm.2025.e04665.

[46]CHEN Weiwei,LI Yanan,YANG Tingting,et al.Support-free printing origami-based 3D negative Poisson's ratio-structured piezoresistive sensor for motion monitoring[J].Composites Communications,2024.DOI:10.1016/j.coco.2024.102078.

[47]SUN Yue,ZHOU Qixuan,NIU Wenxin,et al.3D printed sports shoe midsoles:Enhancingcomfort and performance through finite element analysis of negative Poisson's ratio structures[J].Materials & Design,2024.DOI:10.1016/j.matdes.2024.113292.