

手性力学超材料的非周期性设计与耐撞性研究*

徐蔚云^{1,2} 张涵寓^{1,2} 刘钊^{1,2} 朱平^{1,2}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院智能汽车研究所 上海 200240;

2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

摘要：手性力学超材料在结构上具有非对称的手性几何特征，在力学响应上展现出受压（或受拉）扭转的旋转自由度，在材料表征上不再满足传统的柯西弹性体，且其在缓冲吸能方面展露出的轻质、高比吸能的潜力，因此受到超材料领域学者的广泛关注。然而，一般的采用先设计单胞再进行周期性排布的方法以及增材制造工艺对结构形状的限制，在一定程度上阻碍了手性力学超材料的进一步发展与应用。同时，力学超材料的手性性质与其动态抗冲击性能的关联缺乏更系统与深入的研究。基于螺旋理论的手性排布规则分析了手性力学超材料的扭转机理，并提出了一种非周期性且关节增强的手性力学超材料设计方法，有效且高效地实现了多种构型的手性力学超材料的几何生成与有限元建模。在此设计框架下进一步提出了一系列评价指标表征了所设计超材料构型的整体手性、层间偏离性以及层间一致性等手性几何特性。用激光选区熔融（SLM）技术制造了以 316L 不锈钢作为基体的手性力学超材料，通过中应变率冲击工况下手性力学超材料耐撞性的仿真分析与试验验证，研究了手性力学超材料在冲击下的变形模式与失效机理，从材料比吸能、峰值力、溃缩量等吸能指标的分析中研究了超材料结构-性能关系及设计对其吸能性能的影响。

关键词：手性力学超材料；增材制造；中应变率冲击；耐撞性；非周期性设计

中图分类号：O342

Aperiodic Design Framework of Chiral Mechanical Metamaterials Considering Crashworthiness

XU Weiyun^{1,2} ZHANG Hanyu^{1,2} LIU Zhao^{1,2} ZHU Ping^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Automotive Power and Intelligent Control, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Chiral mechanical metamaterials with asymmetric chiral geometry can exhibit rotational degrees of freedom under compression (or tension), which has attracted the attention in the field of metamaterial for their lightweight and high specific energy absorption. However, the traditional periodic method and the limitation of additive manufacturing process have blocked the further development and application of chiral mechanical metamaterial, and the correlation between the chiral structures and the dynamic impact resistance properties lacks more systematic and in-depth research. In this paper, the compression-to-twist mechanism underlying chiral mechanical metamaterial is analyzed utilizing a general assembly rule based on screw theory, and an aperiodic design framework with joint enhanced method is proposed, which effectively and efficiently realizes the geometric modeling and finite element modeling of various chiral configurations. Furthermore, evaluative indexes are proposed to characterize the overall chirality, interlayer deviation and interlayer consistency of the designed metamaterial configurations. Considering the constraints of additive manufacturing, chiral mechanical metamaterial samples using 316L stainless steel are manufactured by laser selective melting (SLM) technology. Through simulation and experimental verification of impact behavior under medium strain rate, the deformation mode, specific energy absorption, and the first peak force of the chiral mechanical metamaterial are comprehensively analyzed. The relationship between the chiral indexes and the impact performance is explored, and the influence of geometric parameters on the energy absorption performance elucidates an effective property control method.

Key words: Chiral mechanical metamaterial; Additive manufacturing; Energy absorption; Crashworthiness; Aperiodic design

0 前言

扭曲与旋转是自然界中构成结构形态或响应外界激励的一种基本形式，例如丝瓜卷须的左旋与右旋^[1]、DNA 双螺旋结构中的扭曲-拉伸耦合^[2]、组成甲虫鞘翅和螃蟹外壳的螺旋多层结构^[3]，这为新材料与新结构的设计提供启发。与此同时，在通过人为设计微结构以实现超凡力学性能的力学超材料^[4]领域中也出现了一类具有受压/拉扭转特殊响应的超材料——手性力学超材料（chiral mechanical metamaterial, CMM），这种自然性和特殊性引起了学者广泛的关注和研究^[5-7]。因不再满足传统柯西弹性体假设，手性力学超材料的力学行为进而需要使用更广义的连续统理论如微极理论^[8-9]进行描述。手性力学超材料在振动传递^[10]、柔顺结构^[11]中具有较好的应用潜力，近年来在缓冲吸能方面也展现出了轻质、高比吸能的优越性能^[12]。然而，对手性力学超材料的吸能性能与耐撞性能的进一步研究仍面临着结构设计、性能分析、制造工艺等方面的挑战。

首先，手性力学超材料以周期性、启发式的人为设计为主，缺乏更为通用的设计框架。手性超材料的常用设计方法是先设计超材料单胞的微结构再对其进行周期性排列以组成宏观结构^[13]。手性超材料单胞又可以按所设计图形的特点分为三维图形单胞^[14]和二维图形单胞^[15]，或按所设计微结构的几何特征分为杆结构单胞^[16]、曲面结构单胞^[17]和实体结构单胞^[18]。有学者通过微极理论计算材料的等效弹性常数，建立所设计手性单胞几何参数与超材料力学性质之间的关联，如 DUAN S 等^[19]、XU W 等^[20]，但所建立的本构模型皆只针对各自手性单胞的结构形式，缺乏对其他设计的指导意义。同时，周期性设计是导致手性力学超材料扭转效应随单胞数量增加而陡降的根源^[21]，这可能限制手性力学超材料的进一步工程应用。有学者^[22]通过使用细杆连接相邻的单胞以弱化这种影响，使材料在单位应变下的旋转角随单胞数增加而变大，但因为依然没有打破周期性，旋转角在单胞的尺度因子 $N = 10$ 左右时开始衰减。另一方面，在其他类别的力学超材料中，非周期性设计通过模仿金属晶粒的分布^[23]或自然界中的仿生微观结构，实现了更好的耐损伤性能。因此，更泛化的手性力学超材料设计方法与其背后的原理值得探索，非周期性的手性力学超材料结构（如

无序的、梯度的）有待进一步研究。

其次，手性力学超材料在动态冲击下的非线性力学行为需要更深入的研究。根据麦克斯韦法则^[24]，手性力学超材料是一类弯曲主导变形的多孔/晶格结构，刚度相对较低，更适合用作吸能材料。现有研究中，手性力学超材料的压缩-扭转耦合变形行为多在准静态下进行仿真和试验验证。例如，LIPTON J I 等人^[25]研究了刚柔耦合的手性力学超材料管结构的高度非线性行为，JENETT B 等人^[26]提出了一种利用手性力学超材料的离散结构装配系统，GOSWAMI D 等人^[27]基于压缩试验得出了具有大旋转-压缩耦合变形的手性结构设计，本团队亦通过提出基于手性力学超材料的夹芯结构验证了其轻质、高比吸能的压缩性能^[12]。然而面对汽车碰撞分析等结构动力学领域极为关注的中等应变率冲击问题，手性力学超材料的变形机理与失效模式更加复杂，相应的基体材料需考虑应变率效应带来的影响，对实验设备和实验测量的要求更加严苛^[28]，考虑手性力学超材料耐撞性的有限元分析与试验方法需要进一步研究，其几何参数与能量吸收之间的结构-性能关系需要更系统的揭示。

最后，增材制造工艺也约束着超材料的设计方法。虽然增材制造使得力学超材料的制造与应用成为可能，但是制造缺陷较多、支撑结构难去除、后处理工艺复杂等问题使超材料的设计和性能预测变得困难。现有成熟工艺中，激光选择性烧结(SLS)的非金属基力学超材料可以实现无支撑制造，如 MENG L 等学者^[29]用尼龙 3D 打印了双曲面手性力学超材料并对其压缩性能进行了落锤试验验证，但其工程应用会因非金属较低的吸能总量而受到限制。而用于制造金属基材料的激光选择性熔融工艺（SLM）对自支撑结构的倾角以及最小几何特征的尺寸有要求。为了保证所设计结构的可制造性和制造质量，需要将考虑增材制造的设计方法（DfAM）引入手性力学超材料的设计之中。

鉴于上述研究的不足和挑战，本文旨在进一步探索手性力学超材料的设计、复杂的变形吸能机理及其性能调控方法。为此，本文提出了一种非周期性的手性力学超材料设计框架，具有广阔的参数化设计空间，同时引入了关节增强的几何形貌以提高超材料的耐撞性表现；提出了相应的高效有限元建模方法，实现动态工况下考虑率相关的手性力学超材料压缩行为力学仿真；提出评估超材料手性程度

* 上海市自然科学基金项目（23ZR1431600）与（21ZR1431500）资助。
2023xxxx 收到初稿，2023xxxx 收到修改稿

的因子,探索几何参数与变形机理、吸能性能的联系;最后通过高速试验机与高速摄像机进行试验验证,论证所提方法与数值分析的正确性和有效性。本文工作提供了一种新的力学超材料设计思路,对考虑耐撞性的手性力学超材料设计具有参考价值。

1 手性力学超材料非周期性设计方法

为方便阐明设计方法及试验样件的可制造性,本研究选择使用典型的“Z”形单胞来构造手性力学超材料。“Z”形手性单胞是一种基础的基于杆结构的三维图形单胞,结构简单、特点鲜明,并且其单一方向的拉伸/压缩-扭转耦合的扭转效应明显^[30-31]。同时,FRENZEL T指出周期性的“Z”形手性力学超材料的扭转随着单胞数量增加而衰减的现象比其他形状的单胞更明显^[7],因此适合用于论证非周期

性方法的优越性。考虑到冲击力学试验的特点,本文定义冲击方向为z轴负方向,将单胞排布成具有单轴力学响应的超材料结构。如图1所示,六面体单胞的尺寸定义为 $a_x \times a_y \times a_z$,沿x,y,z轴排布的单胞数量为 $N_x \times N_y \times N_z$,即沿冲击方向可以分为独立的 N_z 层。

1.1 基于螺旋理论的手性分析

螺旋理论是机构学的基础理论,物理意义明确、表达形式简单、数学运算方便,常用作空间机构的分析^[32]。螺旋亦称旋量,可以表示空间的一组对偶矢量,从而可以描述动力学上的力和力矩。受此启发,作者通过研究将手性力学超材料的拉伸/压缩-扭转耦合表达为螺旋副,基于螺旋理论的机构学分析揭示了手性超材料扭转效应的机理,同时提出了实现无衰减的扭转效应的手性力学超材料单胞设计与排布方法^[13],如图1所示。

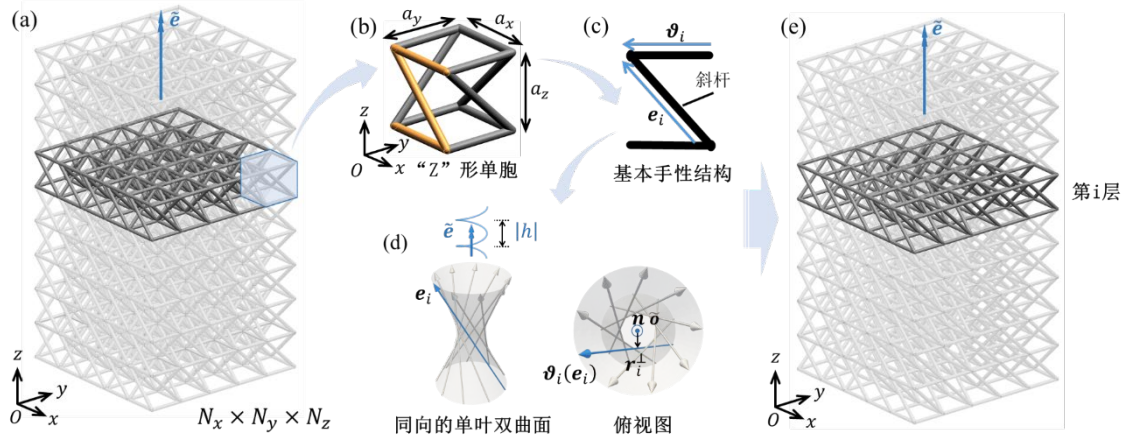


图1 基于螺旋理论分析的手性力学超材料设计。(a) 原始“Z”形手性力学超材料; (b) “Z”形手性单胞; (c) 基本手性结构螺旋约束分析; (d) 旋向为左旋的螺旋与其约束螺旋; (e) 非周期左旋手性力学超材料结构。

首先,一个手性力学超材料单胞可以表达为一个运动螺旋:

$$\xi = \omega[\tilde{e}, h\tilde{e}]^T \quad (1)$$

式中, ω 是角速度, h 是螺旋的导程, \tilde{e} 是单胞旋转方向的中心线,作为此螺旋的瞬时螺旋轴(ISA)。接着,对单胞进行瞬时伪刚体模型(PRBM)^[26]的分析,将对单胞的旋转变形趋势有贡献的斜杆表达为一系列螺旋约束 $\{\zeta_i\}$:

$$\zeta_i = [e_i, r_i \times e_i]^T \quad (2)$$

式中, e_i 是约束螺旋的瞬时螺旋轴, r_i 是从 \tilde{e} 连接到 e_i 的矢量。为了使单胞的微旋转累积成为宏观结构的旋转,所有手性单胞的螺旋约束 $\{\zeta_i\}$ 瞬时螺旋轴的方向应属于围绕 \tilde{e} 的单页双曲面的同一分支。通过规定 $\tilde{e} \cdot e_i > 0$,则 $\tilde{e} \cdot r_i \times e_i$ 的正负可以区分螺旋约束在单叶双曲面上所属分支。然而对于周期性排列单胞的手性力学超材料,这一条件无法满足,使

得材料内部相邻单胞之间的微旋转相互抵消进而削弱材料的宏观扭转,且随单胞数量的增加而加剧。

基于上述分析,本文提出单胞的排布方法为:

$$A(r_i, e_i) = \text{sgn}(\tilde{e} \cdot r_i \times e_i) = \begin{cases} +1, \text{右旋} \\ 0, \text{无旋} \\ -1, \text{左旋} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3),只要使所有单胞满足统一的旋向(右旋或左旋),则可以实现无衰减扭转效应的手性力学超材料设计。例如,在尺度因子 $N=20$ 时,原始的“Z”形超材料结构的旋转角已几乎为零,而此方法可以保持超过 $5^\circ/\%$ 的单位应变扭转角^[13]。这打破了单胞排布的周期性。不仅如此,每个单胞的每个基本手性结构(如“Z”形单胞的斜杆)都可以独立设计,进而调控力学超材料手性特征的有序程度,实现较高的设计自由度。

1.2 非周期手性力学超材料的设计框架

金属的直接 3D 打印技术中, SLM 增材制造是使用最广泛和最成熟的工艺之一。然而, 并非任何满足打印精度的复杂结构都有可能被制造出来, 还需要考虑支撑结构的可去除性。对手性力学超材料

来说, 打印支撑结构并逐一去除是不现实的, 因此有必要开展考虑增材制造工艺限制的超材料设计。如图 2 所示, 本文通过单胞中斜杆结构的预制造和检测确定了具备可制造性的杆结构设计域, 建立了自支撑打印的手性力学超材料设计框架。

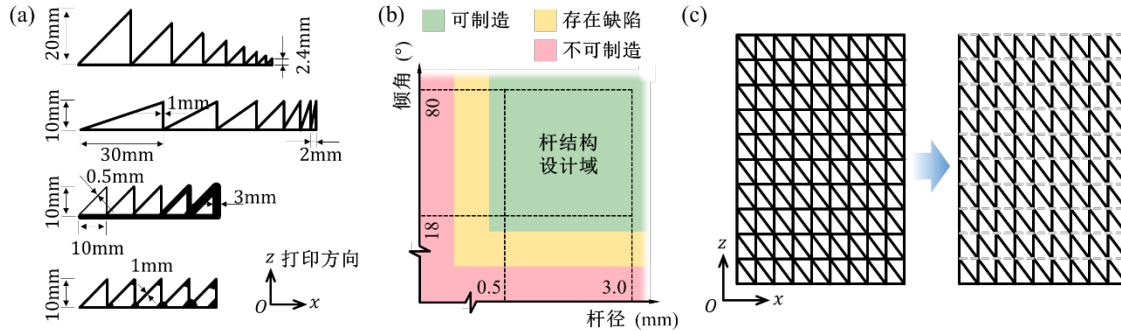


图2 考虑增材制造的超材料设计。(a) 杆结构预制造与测试; (b) 斜杆结构设计域; (c) 手性力学超材料结构优化。

本文采用圆形截面的杆结构来说明此设计框架。要实现杆结构的自支撑打印, 一方面不能有过小的直径尺寸, 另一方面不能有过小的倾角(杆轴向与水平面的夹角)。具体地, 按图 2(a)所示通过 SLM 制造商推荐的工艺参数打印出具有不同夹角、不同高度、不同杆径的一系列杆结构, 所选用的基材为 316L 不锈钢。进行形貌观测与成形质量检测后, 将斜杆的杆径和倾角构建了如图 2(b)所示的可制造的设计域。不仅如此, 也打印了用不同程度的几何加强的杆结构连接处即关节的杆结构, 为后续关节增强的设计打下基础。根据这一设计域, 本文对原始的“Z”形手性力学超材料结构进行改进, 通过取消所有的横杆结构, 保留所有的竖杆结构, 以实现其自支撑的制造, 如图 2(c)所示。后续的设计方法将在这一设计框架下进行。值得一提的是, 这样确定的几何参数范围并非严格的可制造与不可制造的界限, 但却可以提供可靠的成形质量, 也能作为约束为未来在此框架下的结构性能优化工作提供帮助。

在上述考虑增材制造的设计框架下, 手性力学超材料由斜杆和竖杆构成, 其中倾斜的杆结构起到定义该处结构手性的作用, 竖直的杆结构垂直于打印平台, 用于形成整体框架。基于此, 本文提出了一种可以生成变截面且关节增强的杆结构, 进而实现手性力学超材料的非周期性设计的设计与建模流程, 如图 3 所示。该流程基于 MATLAB 连接 Unigraphics NX 与 ABAQUS, 可以高效地完成超材料设计, 并生成相应的几何模型与有限元模型。具体地, 此非周期性设计方法分为布种、连接、增强三个步骤定义手性力学超材料的几何信息, 随后在

生成 CAD 模型中实现杆结构的变截面和关节的增强, 而与之对应的用于有限元分析的模型在几何信息的基础上再经历离散化过程完成网格的划分, 最后赋予材料属性、边界条件等生成 FEA 模型。

其中, 布种步骤用于定义关节的几何信息。在由单胞数量和单胞尺寸定义的设计空间内, 以球体对关节建模, 则可以用直径与球中心点所在坐标完整描述。各关节的空间位置可以自由定义, 只需满足各层间关节互相对应即可; 各个关节的直径可以独立赋值, 在生成 CAD 模型步骤中杆结构的几何形状即由各杆结构两端的关节大小决定。具体定义为: 两端关节直径相同, 则在关节间生成底面直径为关节直径、高为两关节间欧式距离的圆柱体; 两端关节直径不同, 则在关节间生成上下底面直径分别为两关节直径、高为两关节间欧式距离的圆台。因此, 不均匀的关节分布与大小定义了手性力学超材料的一种非周期性。本工作所提出的手性力学超材料的另一种非周期性来自于关节的连接方法。在连接步骤中, 根据式(3)提出的单胞排布方法, 对每一处杆结构的轴线方向进行手性的判断与选择。由于本文中手性的定义是沿着冲击方向即 z 方向进行的, 所以沿 z 方向的各层之间的手性定义互不影响。如果有一层所有斜杆皆按右旋(左旋)规则进行排布, 则该层整体表现出右旋(左旋); 如果在此基础上该层有一部分斜杆按左旋(右旋)排布, 则该层整体依然为右旋(左旋), 只是这种倾向性发生减弱; 若该层斜杆的手性排布是随机的, 则可以得出该层手性接近于零。值得指出在这一过程中, 手性力学超材料从微极本构变为了传统的柯西本构, 即与传统晶格点阵结构无异。每一层的手性的定义是独立

的,斜杆的方向排布则贡献于这一定义,通过确定每一斜杆方向,进而确定该斜杆两端的关节,完成

关节的连接,实现杆结构的有序(右旋或左旋)或无序(无旋)排布,但这些排布都是非周期性的。

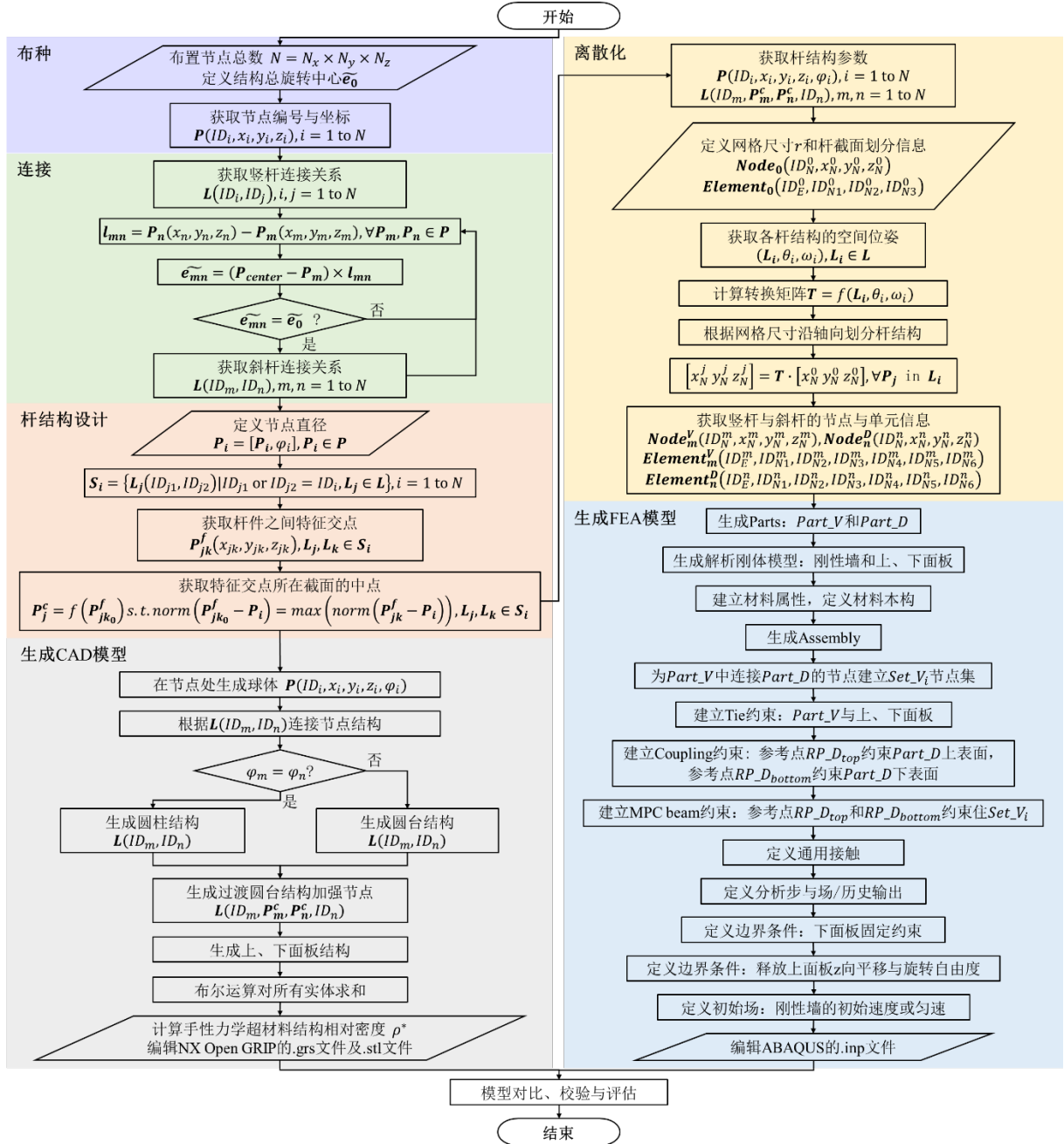


图3 手性力学超材料的非周期性设计与建模方法流程示意图

对于点阵晶格结构来说,在变形过程中总是在关节附近出现应力集中现象,这是截面尺寸的突变或形貌的不连续性带来的固有结构特性。有研究已经证实对关节做几何形貌的过渡或增强处理如倒角可以有效地改善这一现象,提高结构强度,并避免结构过早在关节处破坏失效^[33]。因此,为了提高手性力学超材料的耐撞性,本方法也将关节增强的设计引入进来,对每一处竖杆与斜杆的两端进行关节的改进。与周期性超材料不同,本设计的难点在于非周期性带来的多种可能的关节形貌,即不同关节

连接的杆结构的数量、直径与形状都可能不同。为此,本文采用的关节增强设计方法是定义放大系数 f 来放大关节的直径,即 $\varphi = f\varphi_0$,然后在关节与杆结构之间形成基于关节直径和杆结构直径的圆台过渡。对于过渡圆台的高度,采用的定义为:

$$h = \mu f l_0 \quad (4)$$

式中, μ 是经验系数, l_0 是超材料杆结构的最小长度。本研究中,经验系数固定为 0.125,放大系数固定为 2。

1.3 手性力学超材料的几何特征表征

手性描述的是一种几何特征，由本文所提出的非周期性设计框架，可以实现各种手性程度和几何尺寸的力学超材料设计与建模。由于此设计框架的随机性和多样性，需要通过建立合适的数学表达来定义与评价生成构型的手性结构特征，对手性力学超材料进行相应的表征。为此，本文首先提出了排布矩阵 $\mathbf{C}_z = [c_{k,z}]_{1 \times N_z}$ ，其中每一个分量表示独立设计的 z 向第 k 层的总旋向，即：

$$c_{k,z} = \frac{1}{B_{k,z}} \sum A(\mathbf{r}_i' \cdot \mathbf{e}_i), \quad (5)$$

式中， $B_{k,z}$ 为该层基本手性结构（斜杆）的数量， $i = 1, 2, \dots, B_{k,z}$ 。显然， $c_{k,z} \in [-1, +1]$ 。定义排布矩阵 \mathbf{C}_z ，则可以定义超材料的手性特征，且手性力学超材料的总旋向可以表示为 $\frac{1}{N_z} \sum c_{k,z}$ 。但是，除了 $c_{k,z} = \pm 1$ ，在 $c_{k,z} \in (-1, +1)$ 时每层的结构形式并非唯一，且这些分量的排列顺序会影响超材料的具体结构分布。进一步地，提出衡量结构手性偏离程度和层间手性一致性的指标，为：

$$\beta_z = \frac{1}{N_z} \sum (c_{k,z} - c)^2, \quad (6)$$

$$c = \frac{1}{N_z} \sum c_{k,z}, \quad (7)$$

$$\gamma_z = \prod e^{-\frac{|c_{k,z} - c_{k+1,z}|}{N_z}}, \quad (8)$$

其中， $\beta_z \in [0, +1]$ 称为手性偏离度（Deviation chirality, DC）， $\gamma_z \in [0, +1]$ 称为手性一致性（Consistency chirality, CC）。从式(6)和式(8)可以看出， β_z 表示各层手性结构总旋向与整体结构总旋向的偏离的平均， β_z 越大则偏离程度越大；而 γ_z 表示相邻层的总旋向之间的偏差的累积， γ_z 越小则结构手性的一致性越高。然而，由于式(3)的排布规则对结构的手性只取约束螺旋的符号进行判断，能够定性评价手性却不能表示由几何参数（如单胞的长宽高）决定的手性大小。为此，本文受复合材料取向张量的启发，提出用斜杆的手性方向定义的方向场的加权平均值来表示结构的整体手性（Overall chirality, OC）：

$$\alpha_z \equiv \langle \mathbf{p}_i \otimes \mathbf{p}_i \rangle_\Psi = \oint (\mathbf{p}_i \otimes \mathbf{p}_i) \Psi(\mathbf{p}_i) d\mathbf{p}_i, \quad (9)$$

式中， $\mathbf{p}_i = \hat{\mathbf{r}}_i \times \mathbf{e}_i$ 为各斜杆的手性矢量， $\Psi(\mathbf{p}_i)$ 为该矢量的方向分布函数。 α_z 为一对称二阶张量，随手性排布的变化而变化，同时其三个特征值由几何参数决定。

通过手性几何特征的参数化，本文使用排布矩阵 \mathbf{C}_z 对手性力学超材料的手性取向进行定义，用整体手性 α_z 、手性偏离度 β_z 和手性一致性 γ_z 对其进行手性表征。这些指标的角标“ z ”表示对 z 向手性的表征，对于能在三个主方向表现出手性的超材料单胞及结构来说，相应的指标可以为三个。基于此，

本文通过生成不同手性特征的超材料构型，阐明所提出设计方法及评价指标的有效性。结合考虑增材制造的杆结构设计域，定义统一的单胞尺寸、排布层数、杆结构直径的几何参数为：

$$\begin{aligned} a_x \times a_y \times a_z &= 6\text{mm} \times 6\text{mm} \times 10\text{mm} \\ N_x \times N_y \times N_z &= 9 \times 9 \times 10, \quad (10) \\ d &= 1\text{mm} \end{aligned}$$

考虑冲击试验的边界条件，在超材料 z 向的上下端面建立 $70\text{mm} \times 70\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的上下面板，并规定 $\frac{1}{N_z} \sum c_{k,z} = 0$ 使得其在变形前后不发生旋转。这样，定义 $\mathbf{C}_z = [+1, +1, +1, +1, +1, -1, -1, -1, -1, -1]$ ，即可得到上下旋向相反的对称手性构型；定义 $\mathbf{C}_z = [+1, +1, +1, -1, -1, -1, +1, -1, -1, +1]$ ，则得到层间旋向混合的一种混合手性构型；作为对照，通过随即定义各处斜杆的方向，使整体旋向为 0 ，则能得到随机无旋构型，由此生成的三种代表性手性力学超材料如图4所示。

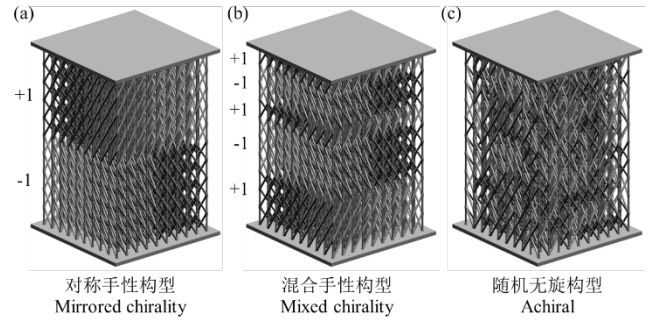


图4 设计框架下不同手性力学超材料构型

三种构型采用的关节增强参数即放大系数和经验系数皆为 $f = 2.0, \mu = 0.125$ 。经过计算，可以得出三种构型的手性表征指数如表1所示。

表1 不同手性力学超材料构型的手性表征

构型	OC, α_z	DC, β_z	CC, γ_z	RD, ρ^*/ρ_s
对称	$\begin{bmatrix} 0.4105 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.4105 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1789 \end{bmatrix}$	1.0000	0.8187	8.89%
混合	$\begin{bmatrix} 0.4105 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.4105 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1789 \end{bmatrix}$	1.0000	0.4493	8.89%
无旋	$\begin{bmatrix} 0.4127 & 0.0028 & 0.0065 \\ 0.0028 & 0.4096 & 0.0035 \\ 0.0065 & 0.0035 & 0.1777 \end{bmatrix}$	0.0091	0.9089	8.71%

从表1可以得出，三种构型有近似相同的整体手性OC，即在单胞尺寸与排布数量相同的情况下，斜杆各个方向分布的平均是一致的。然而因为对称手性和混合手性构型的离散度DC很高，在 $\sum c_{k,z}$ 统一为零的条件下反映了其杆结构是有序的、有旋的，

反之随机无旋构型的手性离散度则趋于零。另一方面, 由于对称构型的右旋层集中在超材料结构的上半部分, 左旋层在下半部分, 所以具有较好的层间一致性, 比混合手性构型的 γ_Z 高, 而随机无旋构型由于各层都接近无旋因而有三者中最好的层间一致性。通过对 OC, DC, CC 三个手性指标的分析, 可以对所设计手性力学超材料的结构特征进行统计学表达, 对其有更充分的认识。手性结构与力学性能的关系将在结果与讨论部分进一步展示。同时, 表 1 也列出了三种构型各自的相对密度。在当前几何参数的设置下, 所提出手性力学超材料的相对密度约为 9%, 该参数将用于后续材料比吸能的计算。

2 冲击有限元分析与试验方法

2.1 有限元分析方法

本文提出的方法包括手性力学超材料几何结构的生成以及对有限元模型的建立。在第 1 节所述“布种-连接-增强-生成 CAD 模型”的设计框架下, 本节将继续介绍如图 3 所示的“离散化-生成 FEA 模型”过程。对于规模较大的杆结构超材料有限元模型——如本文中三种构型分别含有 1000 根竖杆与 1800 根斜杆, 传统的用四面体实体网格对模型进行有限元划分的方法将产生上千万单元, 这在计算机算力和效率上是不可行或不可接受的, 而采用梁结构单元划分的方法不能很好地模拟材料和结构中高度的非线性过程, 且不能考虑复杂的接触模式。与周期性结构不同的是, 非周期性结构在各处的关节连接形式各异, 不能直接预定义网格形式。为此, 本文采用的对几何模型进行离散化的方法是先对每一根杆结构进行网格划分, 再通过约束方式进行装配。

如图 5 所示, 先将手性力学超材料中包括关节增强形貌在内的变截面杆结构在关节处进行拆分, 各自沿着轴向进行离散化, 再将圆形截面划分成楔形单元。在 ABAQUS 中, 使用的是线性缩减单元 C3D6。经过收敛性分析, 采用的平均单元尺寸是 0.5mm。由于要对网格划分过程进行参数化建模, 需要将在局部坐标系下定义的截面网格转换至全局坐标系下各个方向的杆结构上, 所使用的变换关系为:

$$[x' \ y' \ z' \ 1]^T = \mathbf{T} \cdot [x \ y \ z \ 1]^T \quad (11)$$

其中, (x, y, z) 和 (x', y', z') 分别为节点的局部坐标和全局坐标。转换矩阵为:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_r(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{R}_z(-\omega) \cdot \mathbf{R}_x(-\theta) \quad (12)$$

$$\mathbf{T}_r(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_z(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由此生成的模型含有 400 万至 500 万个单元。接着, 将杆结构两端面的节点通过参考点约束, 再由多点约束 MPC 将同一关节处的各杆结构的参考点约束在一起。最后还需将竖杆结构的最上端面和最下端面耦合约束至作为解析刚体建模的上下面板, 完成手性力学超材料结构的有限元模型建立。

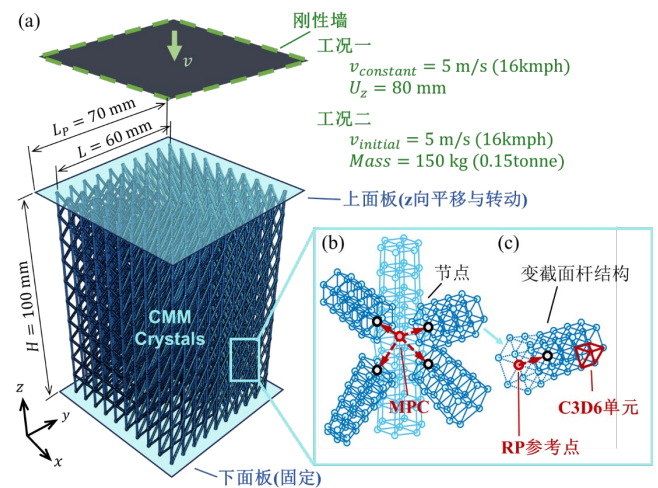


图 5 冲击有限元建模与分析

在建立的有限元模型基础上, 本小节将介绍有限元分析的参数设置。材料参数方面, 本文的有限元分析与增材制造所用材料一致, 为 316L 不锈钢。316L 的新国标牌号为 022Cr17Ni12Mo2, 具有较好的延展性和韧性, 是适合本超材料耐撞性研究的 3D 打印材料。根据 SLM 制造商的数据, 所使用的 SLM 增材制造 316L 不锈钢的化学组分和物性参数分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 SLM 增材制造 316L 不锈钢化学组分表(wt. %)

Material	%C	%Si	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%P	%S
316L SS	0-0.03	0-1.0	0-2.0	10.0-13.0	16.5-18.5	2.0-2.5	0.0045	0.030

表3 316L 不锈钢的物性参数

参数	值
屈服应力	470 MPa
拉伸强度	570 MPa
断裂延伸率	> 15%
杨氏模量	约 200 GPa
热导率	约 15 kW/K
密度	7.98 g/cm ³
硬度	20 HRC

为了考虑冲击载荷的中等应变率效应下材料的力学响应, 本文采用 316L 不锈钢的 Johnson-Cook (J-C) 塑性本构模型与损伤模型进行有限元分析。由于不考虑温度效应, 相应的表达式为:

$$\sigma = [A + B(\bar{\varepsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right], \quad (13)$$

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (14)$$

式中, A , B , C 和 n 为 J-C 模型参数, 和 D_1 , D_2 , D_3 和 D_4 为失效参数, η 为应力三轴度, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。在本文模型使用的参数设置如表 4 所示^[34-35]:

表4 316L J-C 塑性与损伤模型参数 ($\dot{\varepsilon}_0 = 0.001 \text{ s}^{-1}$)

$A(\text{MPa})$	$B(\text{MPa})$	n	C	D_1	D_2	D_3	D_4
554.05	3919.72	1.17	0.0118	0.4	120	-15	-0.025

边界条件方面, 如图 5(a)所示, 将超材料结构的下面板固定约束, 释放上面板沿 z 向的平移与旋转自由度, 其他边界为自由边界, 同时建立刚性墙赋予整个模型的冲击外载。本研究共设立两种工况, 工况一赋予刚性墙恒定的 z 负方向速度 $v_c = 5 \text{ m/s}$ 在接触上面板后位移 80mm, 即应变率为 50 s^{-1} , 轴向应变为 80%; 工况二则赋予刚性墙初速 $v_0 = 5 \text{ m/s}$, 刚体质量为 150kg。全场的接触设置为法向的硬接触与切向的系数为 0.5 的摩擦接触。本文使用 Explicit 求解器进行计算, 设置的目标时间增量为 1×10^{-6} 。后处理方面, 除了全场的应力和位移数

据, 还通过提取上面板的位移和下面板的约束反力获取手性力学超材料的力-位移 ($F-s$) 曲线。同时在工况二下, 还提取了力-时间 ($F-t$) 曲线。

2.2 试验方法

本研究采用激光选择性熔融 (SLM) 制造工艺打印金属 316L 不锈钢为基材的手性力学超材料试验样件。对提出的三种手性构型, 分别制备了 2 件用以冲击试验验证。使用的设备型号为 3DS ProX DMP 320, 在设备商推荐的激光功率、扫描速度、炉温等工艺参数下进行 3D 打印。为保证打印质量, 制备好的样件用渗透剂来检验其致密度, 用游标卡尺测量其成形尺寸。如图 6 所示, 通过多处多次测量, 上下面板厚度 t 、杆结构直径 d 和超材料 z 向结构高度 H 的测点分布绘制成了归一化的箱型图。结果表明 3D 打印的成形尺寸普遍比公称尺寸大, 其中关键的杆径和高度参数的成形误差控制在 5% 以内, 满足制造要求。

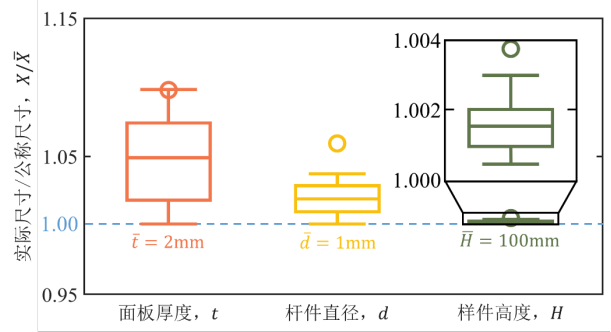


图6 增材制造手性力学超材料样件的尺寸分析

本研究通过中应变率冲击试验验证所提出手性力学超材料的耐撞性, 所使用的设备型号为 Instron VHS 160/100-20, 如图 7 所示。试验工况与有限元分析设置的工况一一致, 即使冲头以匀速 5 m/s 压缩试样 80mm。对三种构型的两个样件分别记录试验力-位移曲线, 并对记录数据进行滤波处理。

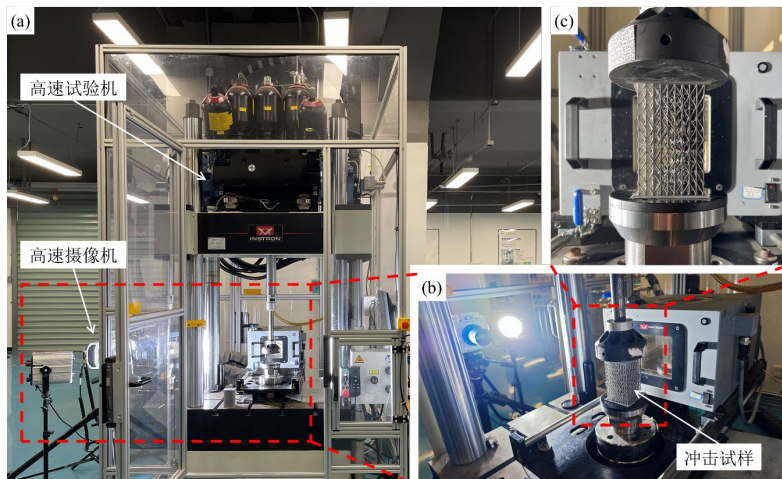


图7 高速拉伸试验装置

3 结果与讨论

3.1 手性力学超材料的动态力学性能

根据对所设计手性力学超材料的单轴冲击载荷试验以及对应的有限元模拟结果, 本文通过变形机理与失效模式的研究和提取的峰值力、屈服平台、吸能量等一系列吸能指标, 进行动态力学性能的综合

分析, 探究了手性对其耐撞性能的影响。如图 8、图 9、图 10 所示, 分别为对称手性构型、混合手性构型、随机无旋构型三种超材料手性构型的动态冲击结果。从提取的力-位移曲线可以得出, 仿真解在工况一下获得了与试验结果一致的预测。三种构型的超材料的压缩过程都经过了较高的第一峰值力、长且均匀的屈服平台段以及压缩应变 ε_{zz} 大于75%之后才出现的致密化阶段。

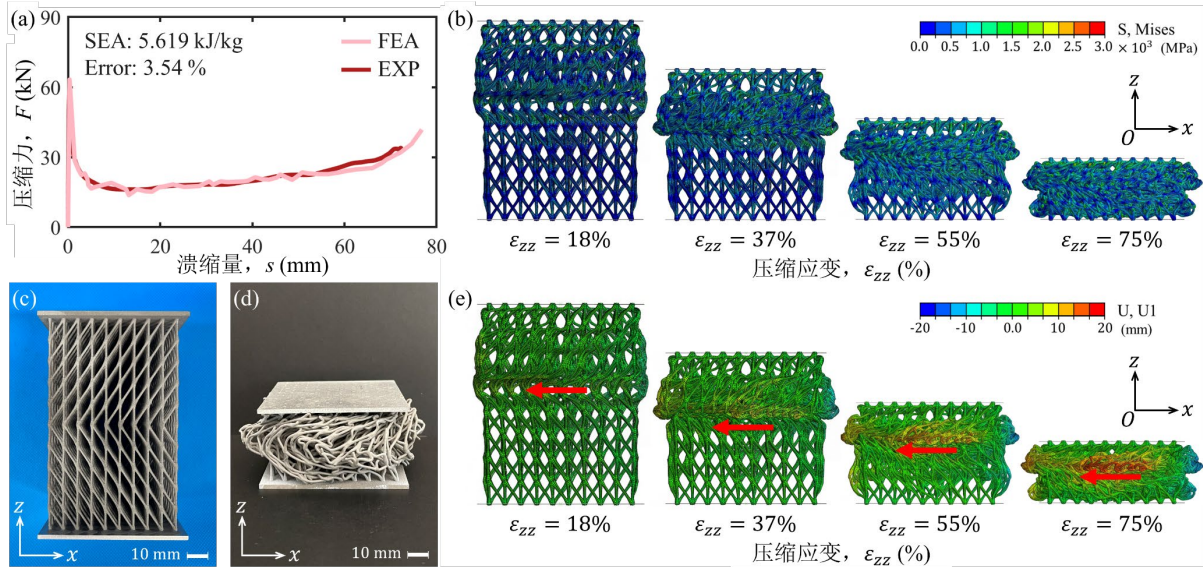


图 8 对称手性构型的手性力学超材料动态冲击响应结果。(a) 力-位移曲线与比吸能; (b) 有限元分析 Mises 应力场结果; (c) 试验前与 (d) 试验后的超材料样件; (e) 有限元分析 x 分量位移场结果。

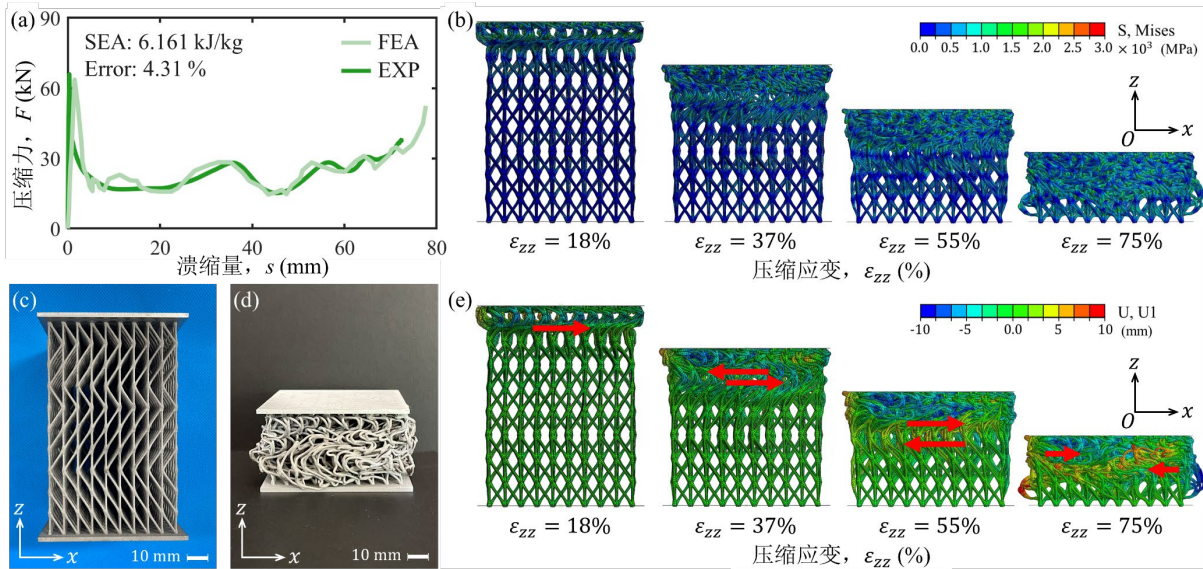


图 9 混合手性构型的手性力学超材料动态冲击响应结果。(a) 力-位移曲线与比吸能; (b) 有限元分析 Mises 应力场结果; (c) 试验前与 (d) 试验后的超材料样件; (e) 有限元分析 x 分量位移场结果。

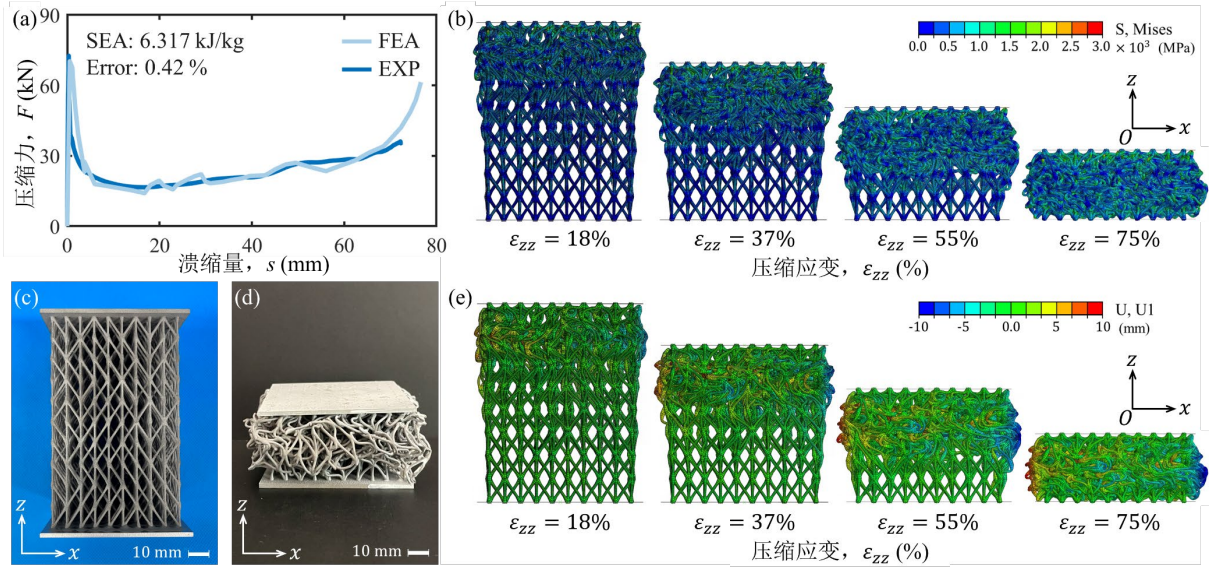


图 10 随机无旋构型的手性力学超材料动态冲击响应结果。(a) 力-位移曲线与比吸能；(b) 有限元分析 Mises 应力场结果；(c) 试验前与 (d) 试验后的超材料样件；(e) 有限元分析 x 分量位移场结果。

在给定的参数设置下，三种构型在 $\varepsilon_{zz} = 0.5\% - 1\%$ 左右达到第一峰值力，分别为 65kN、62kN、71kN。结合变形过程结果，此时主要是竖杆结构的轴向压缩变形，导致整体结构的高刚度和压缩力的陡增。事实上，过高的刚度和峰值力是不利于吸能的，这往往使得材料在进入塑性变形后的承载力相对过低从而让吸能能力变差。由于竖杆结构是考虑增材制造设计做出的改变，且在本文中的杆径与斜杆一致，因此竖杆带来的影响明显。然而，从相对一致的第一峰值力幅值和出现时的压缩应变可知，这一现象与所设计的手性特征无关，在未来研究中可以通过减小竖杆直径、优化竖杆倾角等方式降低峰值力和结构刚度。接着，伴随着竖杆的塑性屈曲和斜杆的弯曲变形，三种构型都经历了压缩力维持在 20kN - 30kN 的屈服平台阶段，但是动态冲击带来的局部变形情形并不相同。

冲击载荷下的材料变形总是优先发生在受冲击一端并逐层向下传递，这一规律从作为对照的随机无旋构型的变形过程可以看出，如图 10(b)与(e)所示。沿着 z 向，各层的杆结构逐层发生弯曲变形，材料主要通过塑性能、摩擦耗散等形式对冲击载荷的动能进行吸收。相比之下，对称手性构型的手性力学超材料的变形模式有所不同。由于上下部分分别为右旋和左旋的手性排布，结构首先在旋向相反的交界层发生屈曲与弯曲。从图 8(e)的 x 位移分量的分布形式可以看出，各个杆结构的变形方向综合作用于交界层区域使其变形模式为压缩下的旋转变形。在中等应变率下，由于杆结构塑性变形的局部化，交界层上下的变形并不均匀，靠近冲击方向的手性

层较先变形失效。对于混合手性构型，手性层间一致性更差（更小的 γ_z ），即表明各层之间有更多手性的转变，因而在多个手性发生变化的交界层都会发生弯曲屈曲进而引起旋转变形，且其先后顺序为优先在受冲击一端逐层传递。如图 9(e)所示，混合手性构型在多层都发生旋向相反的压缩下旋转变形，最后形成“旋转折叠”的变形特点。与这一变形模式对应的，是混合手性构型的力-位移曲线在屈服阶段压缩力的“波动”。当最上层的交界层发生旋转变形，杆结构逐渐弯曲失效并互相接触，由下层未发生屈曲的手性层继续承力，直至该交界层亦发生旋转导致压缩力下降，继而又由下层未屈曲结构承受压缩力。在整个冲击过程中，可以观察到尽管出现了各层的旋转变形，三种构型的上下面板都未发生相对旋转，这与所提出方法设计手性力学超材料时规定排布矩阵的 $\frac{1}{N_z} \sum c_{k,z} = 0$ 一致。

本文将手性力学超材料的变形模式与手性表征指标联系起来，其中手性偏离程度 β_z 可以评估该手性结构的扭转程度，而层间手性一致性 γ_z 则可以定义旋转变形互相堆叠。值得指出的是，不同构型所表现的不同变形模式在屈服平台压缩力的大小上并没有明显区别，同时至致密化阶段时的溃缩量也是相当的，这在本质上与杆结构直径和关节的大小、以及斜杆的倾斜角度有关。其中，前者决定超材料的相对密度，后者决定斜杆弯曲变形时应力的大小。

进一步地，本文比较了三种手性构型超材料的吸能性能。材料吸能量（EA）的计算方法为：

$$EA = \int_0^{s_{ple}} F ds \quad [J], \quad (15)$$

式中 s_{ple} 为屈服平台结束点对应的位移溃缩量，在

本研究中统一设为 $s_{ple} = 75\text{mm}$ 。由此,材料比吸能(SEA)的表达式为:

$$SEA = \frac{EA}{\rho^*V} = \frac{\int_0^{s_{ple}} F ds}{\rho_s \cdot \rho^* / \rho_s \cdot V} [\text{kJ/kg}], \quad (16)$$

其中, ρ^*/ρ_s 为相对密度, $\rho_s = 7.98 \text{ g/cm}^3$, $V = L \times L \times H = 360 \text{ cm}^3$ 。

通过计算,对称手性构型、混合手性构型、随机无旋构型手性力学超材料的比吸能仿真值分别为 5.619 kJ/kg , 6.161 kJ/kg , 和 6.317 kJ/kg , 与试验值的相对误差分别为 3.54% , 4.31% , 和 0.42% 。以随机无旋构型为基准, 其与对称手性构型的比吸能相差 11% , 与混合手性构型相差 2.4% 。考虑到动态冲击问题测量结果较高的波动性和离散性, 可以认为三者的吸能量大致相当, 吸能性能较为一致。如前所述, 虽然三种构型的手性各不相同, 但斜杆的直径和倾角是一致的, 根据整体手性 α_z 的值可以得到三种超材料的平均约束螺旋的三个特征值近似相等, 从侧面表明手性几何特征对材料吸能量的贡献是相当的。也即, 在固定的几何参数下, 手性特征的调控可以改变力学超材料的变形模式, 但对材料的吸能性能没有影响。

3.2 手性力学超材料力学性能的结构影响

上述结果表明, 可以调控手性力学超材料的手性几何特征来影响其压缩变形模式。本文通过计算各个构型的泊松比进一步阐述这一影响。如图 11(a)所示, 不同手性构型在轴向冲击载荷下的横向变形量和形状有着不同。

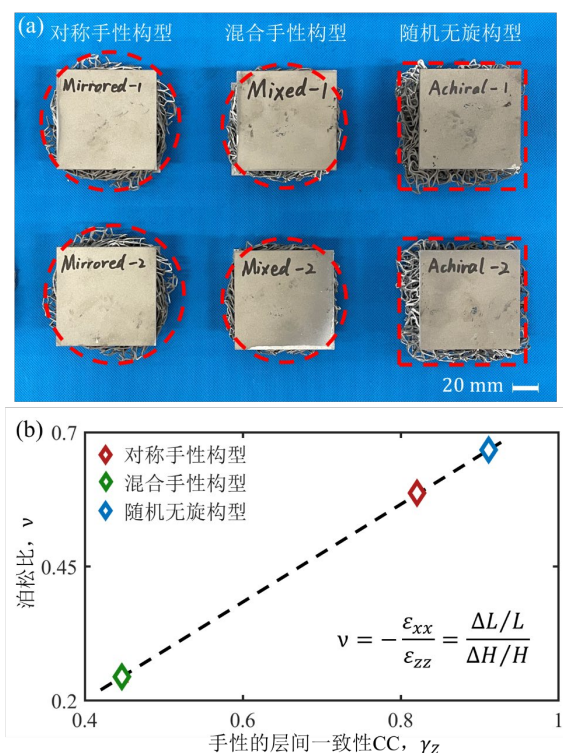


图 11 力学超材料手性对泊松比的影响

随机无旋构型由于不发生旋转变形, 杆结构自然地受到挤压而向四周扩散, 压缩后的截面形状保持方形, 与典型的各向同性材料的压缩力学行为一致; 而对称手性构型与混合手性构型在交界层发生旋转, 因而将轴向位移转变为旋转折叠, 在压缩后整体的截面形状为近圆形, 且混合手性构型因具有更多交界层的旋转折叠, 其圆形截面更小。三者的泊松比 v 混合手性构型最小、对称手性构型次之、随机无旋构型最大, 与相应的层间一致性 γ_z 的关系如图 11(b)所示, 呈现明显的线性关系, 这表明了手性力学超材料层间的手性关系对其变形模式的映射和调控。

此外, 本文还研究了超材料在杆结构不同直径下的吸能表现。如图 12 所示, 固定关节增强系数 f , 将杆径分别设置为 1.0 mm , 1.5 mm , 和 2.0 mm , 通过仿真测试了工况一条件下超材料的力学性能。显然, 杆径越大, 吸能量越大。不仅如此, 越粗的杆结构具有越不明显的第一峰值力和越大的屈服压缩力。同时, 杆径粗的手性力学超材料有更早的致密化阶段, 这与 3.1 小节中的结论一致。通过研究吸收能量与直径之间的相关性, 如图 12(b), 可以得出所提出的手性力学超材料的吸能量与杆结构直径的三次方成正比。

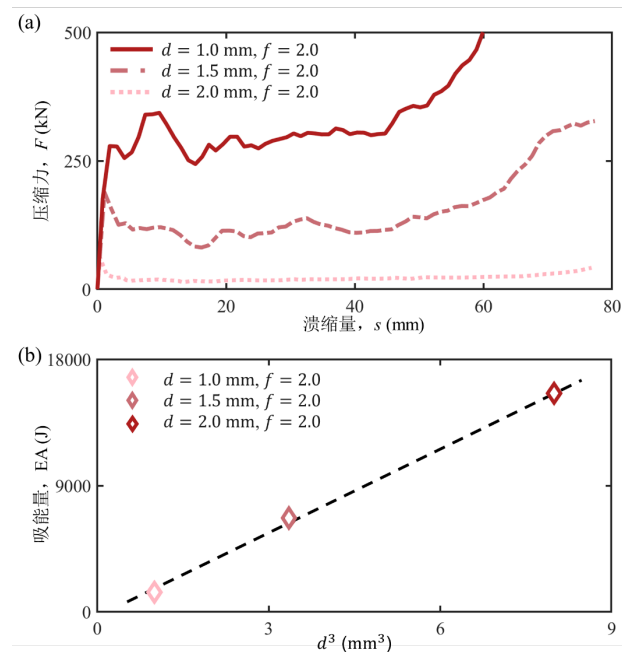


图 12 手性力学超材料杆径对耐撞性的影响

得益于增强的关节几何形状, 在图 8, 图 9 和图 10 所示的动态冲击力学行为中, 手性力学超材料的在关节处的应力集中不明显, 杆结构的失效不再集中在两端的关节部位, 因而大大提高了结构的

抗冲击韧性。本文通过对比进一步证明所提出的关节增强方法的有效性。如 1.2 小节所述，加强关节的直径定义为 $f\varphi_0$ ，因此当 $f = 1$ 时，关节会保持原始形貌。在此，通过生成具有不同放大因子的对称手性构型力学超材料—— $f = 2$ ， $f = 1.5$ ，和 $f = 1$ ，可以研究关节增强方法对超材料抗压性能的影响。

将上述三种增强程度的对称手性构型超材料在工况二下的 $F-s$ 和 $F-t$ 曲线提取出来，分别如图 13(a) 和 (b) 所示。在工况二下，刚性墙的总动能为 $Mass \cdot v_{initial}^2 / 2 = 1875 \text{ J}$ ， $f = 2$ 的超材料完全吸收其动能的溃缩量为 50mm，而其余两种超材料在 30ms 内并未完全阻止刚性墙的运动。从曲线中可以得出，关节增强愈大，屈服压缩力越大，溃缩位移和对应的响应时间越小。与没有关节增强的手性力学超材料相比，强化后的关节几何形状有助于减少接头区域周围的应力集中，从而表现出更好的冲击吸能性能。

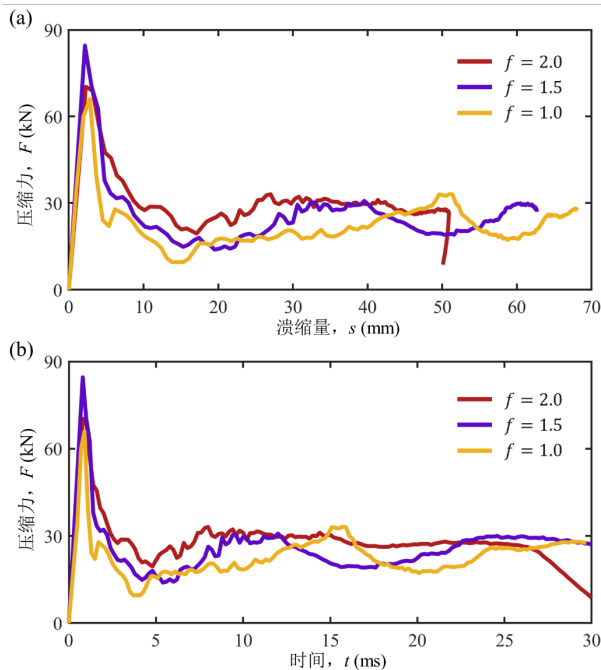


图 13 手性力学超材料增强关节对耐撞性的影响

4 结论

针对手性力学超材料周期性设计和考虑增材制造方法的局限性及其动态吸能性能研究的必要性，本文提出了一种非周期性的关节增强手性力学超材料设计与建模框架。该框架设计灵活，可以生成具有不同手性程度的有序/无序力学超材料；建模高效，提出的有限元建模方法可以平衡高保真度模拟的准确性和效率。接着，本文提出基于螺旋理论分

析的手性排布规则，并对力学超材料的手性进行了表征。通过三个指标量化手性几何特征，描述了所提出材料的整体手性、偏离程度和层间的一致性。最后，通过中应变率下的冲击试验和仿真模拟，研究了所提出手性力学超材料的耐撞性及其手性特征结构对吸能性能的影响。通过结果，可以得出以下结论：

- (1) 手性力学超材料以斜杆为基本手性结构，各处皆可独立设计，其非周期性可包括有序的左旋或右旋和无序的无旋性，一方面来自于斜杆方向的独立排布，另一方面来自于提出方法可实现的变截面杆结构形状。
- (2) 定义排布矩阵可定义单轴响应下力学超材料的手性特征。通过进一步的数学表征，不仅可以用二阶对称张量来衡量结构整体的手性程度，其特征值受杆结构几何参数影响，还能描述结构的手性与总旋向的偏离程度、以及手性几何特征在单向的连续性与变化。
- (3) 在动态冲击载荷下，手性力学超材料吸收的能量取决于杆结构的直径、整体手性和关节增强程度。相同的整体手性则表明有相同的比吸能。同时，层间一致性指标与泊松比存在线性关系，杆径和能量吸收之间存在三阶非线性关系。

本文通过结果阐明所提出的设计和建模方法为轻质材料和结构的耐撞性设计提供了一个有效的范例，有助于其在汽车、土木工程、航空航天等领域的进一步应用。下一步工作可以将此设计框架应用于更多类别的手性力学超材料，以及组成形状更复杂的宏观结构，进一步探索和拓展面向材料性能调控的通用性设计框架。

参 考 文 献

- [1] WANG J S, WANG G, FENG X Q, et al. Hierarchical chirality transfer in the growth of Towel Gourd tendrils [J]. Scientific Reports, 2013, 3(1).
- [2] GROSS P, LAURENS N, ODDERSHEDE L B, et al. Quantifying how DNA stretches, melts and changes twist under tension [J]. Nature Physics, 2011, 7(9): 731-6.
- [3] CHENG L, THOMAS A, GLANCEY J L, et al. Mechanical behavior of bio-inspired laminated composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(2): 211-20.
- [4] YU X, ZHOU J, LIANG H, et al. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review [J]. Progress in Materials Science, 2018, 94(114-73).
- [5] FERNANDEZ-CORBATON I, ROCKSTUHL C, ZIEMKE P, et al. New Twists of 3D Chiral Metamaterials [J]. Advanced Materials, 2019, 31(26): 1807742.
- [6] 朱一林, 江松辉, 于超. 增强六手臂缺失支柱手性拉胀超材料力学性能理论研究 [J]. 力学学报, 2022, 54(10): 2733-2746.

- [7] FRENZEL T, KADIC M, WEGENER M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist [J]. *Science*, 2017, 358(6366): 1072-4.
- [8] COSSERAT E, COSSERAT F. *Theorie des corps déformables* [J]. A Hermann et fils, 1909.
- [9] ERINGEN A C. *Microcontinuum field theories: I. Foundations and solids* [M]. Springer Science & Business Media, 1999.
- [10] 李卉, 魏国崇, 姚红良等. 手性超材料惯容吸振器的扭转振动抑制研究 [J/OL]. *力学学报*: 1-9 [2023-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2062.O3.20230710.1404.002.html>.
- [11] LEE H, JANG Y, CHOE J K, et al. 3D-printed programmable tensegrity for soft robotics [J]. *Science Robotics*, 2020, 5(45): eaay9024.
- [12] XU W, ZHANG L, ZHANG B, et al. Crushing behavior of contact-aided AlSi10Mg sandwich structure based on chiral mechanical metamaterials [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 260(108636).
- [13] WU W, HU W, QIAN G, et al. BERTO F. Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review [J]. *Materials & Design*, 2019, 180(
- [14] SHEIKH H M, MEIER T, BLANKENSHIP B, et al. Systematic design of Cauchy symmetric structures through Bayesian optimization [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 236(107741).
- [15] TABACU S, NEGREA R F, NEGREA D. Experimental, numerical and analytical investigation of 2D tetra-anti-chiral structure under compressive loads [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 155(
- [16] CHEN Y, FRENZEL T, ZHANG Q, et al. Cubic metamaterial crystal supporting broadband isotropic chiral phonons [J]. *Physical Review Materials*, 2021, 5(2): 025201.
- [17] GAO Z, WANG H, SUN H, et al. Additively manufactured high-energy-absorption metamaterials with artificially engineered distribution of bio-inspired hierarchical microstructures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 247(
- [18] WANG J, LUO X, WANG K, et al. On impact behaviors of 3D concave structures with negative Poisson's ratio [J]. *Composite Structures*, 2022, 298(
- [19] DUAN S, WEN W, FANG D. A predictive micropolar continuum model for a novel three-dimensional chiral lattice with size effect and tension-twist coupling behavior [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 121(23-46).
- [20] XU W, LIU Z, WANG L, et al. 3D chiral metamaterial modular design with highly-tunable tension-twisting properties [J]. *Materials Today Communications*, 2022, 30(
- [21] XU W, WANG L, LIU Z, et al. General assembly rules for metamaterials with scalable twist effects [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 259(108579).
- [22] FRENZEL T, HAHN V, ZIEMKE P, et al. Large characteristic lengths in 3D chiral elastic metamaterials [J]. *Communications Materials*, 2021, 2(1):
- [23] PHAM M S, LIU C, TODD I, et al. Damage-tolerant architected materials inspired by crystal microstructure [J]. *Nature*, 2019, 565(7739): 305-11.
- [24] ASHBY M F. The properties of foams and lattices [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2006, 364(1838): 15-30.
- [25] LIPTON J I, MACCUDY R, MANCHESTER Z, et al. Handedness in shearing auxetics creates rigid and compliant structures [J]. *Science*, 2018, 360(6389): 632-5.
- [26] JENETT B, CAMERON C, TOURLOMOUSIS F, et al. Discretely assembled mechanical metamaterials [J]. *Science Advances*, 2020, 6(47): eabc9943.
- [27] GOSWAMI D, ZHANG Y, LIU S, et al. Mechanical metamaterials with programmable compression-twist coupling [J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(1): 015005.
- [28] 应鹏飞. 基于结构激振的中高应变率材料力学试验方法与应用 [D]. 清华大学, 2021. DOI:10.27266/d.cnki.gqhau.2021.000010.
- [29] MENG L, SHI J, YANG C, et al. An emerging class of hyperbolic lattice exhibiting tunable elastic properties and impact absorption through chiral twisting [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 40(
- [30] ZIEMKE P, FRENZEL T, WEGENER M, et al. Tailoring the characteristic length scale of 3D chiral mechanical metamaterials [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2019, 32(100553).
- [31] CUI H, YAO D, HENSLEIGH R, et al. Design and printing of proprioceptive three-dimensional architected robotic metamaterials [J]. *Science*, 2022, 376(6599): 1287-93.
- [32] SUN T, YANG S, LIAN B. *Finite and Instantaneous Screw Theory in Robotic Mechanism* [M/OL]. Singapore: Springer, 2020: 25-64 [2023-07-28]. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1944-4>.
- [33] QI D, YU H, LIU M, et al. Mechanical behaviors of SLM additive manufactured octet-truss and truncated-octahedron lattice structures with uniform and taper beams [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 163(105091).
- [34] 雷经发, 葛永胜, 刘涛等. 激光选区熔化 316L 不锈钢动态力学性能研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(23): 220-229.
- [35] TAMER Y, TOROS S, OZTURK F. Numerical and Experimental Comparison of Fractural Characteristics of 316L Stainless Steel [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(3): 1103-18.

作者简介: 徐蔚云, 男, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为力学超材料的结构-性能一体化设计。

E-mail: xuweiyunmachinery@sjtu.edu.cn

朱平(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轻量化设计与制造、大数据与数字孪生、复杂产品结构 CAE 技术、数据驱动的超材料优化设计、材料-结构-工艺-性能一体化设计。

E-mail: pzhu@sjtu.edu.cn