

引文格式: 韩昌骏, 王再驰, 黄俊斐, 等. 激光选区熔化增材制造三维双V蜂窝机械超材料及其压缩力学响应[J]. 航空制造技术, 2022, 65(23/24): 63-71.

HAN Changjun, WANG Zaichi, HUANG Junfei, et al. Selective laser melting of 3D honeycomb mechanical metamaterials with "double V" configurations and compressive responses[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(23/24): 63-71.

# 激光选区熔化增材制造三维双 V 蜂窝机械超材料及其压缩力学响应\*

韩昌骏, 王再驰, 黄俊斐, 宋长辉, 王 迪, 杨永强

(华南理工大学, 广州 510641)

[摘要] 机械超材料(Mechanical metamaterials, MMMs)具有轻量化、高强度、高能量吸收等特点,已经成为航空航天、能源汽车、制造业、军事等领域的研究热点。激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)增材制造技术可以成形复杂的微观结构,具有较高的精度和分辨率,适用于复杂金属机械超材料成形。提出了一种基于双V单元拓扑的3D机械超材料设计方案,采用SLM技术成形了不同构型的三维双V蜂窝机械超材料,通过理论计算、仿真模拟和试验结合探究了各项结构参数对三维双V蜂窝机械超材料压缩力学响应的影响,实现了可调节的负泊松比机械特性。

关键词: 机械超材料(MMMs); 负泊松比; 蜂窝; 激光选区熔化(SLM); 有限元分析

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.23/24.063



韩昌骏

副教授,长期从事金属3D打印材料与结构方面的基础研究工作。

超材料具有天然材料中无法找到的独特物理性能<sup>[1]</sup>,包括电磁/热隐身<sup>[2]</sup>、能量吸收<sup>[3]</sup>、零/负泊松比<sup>[4]</sup>、

超轻、超高强度等,对航空器及航天器适应复杂高空及太空环境具有极高的应用价值。相较于传统的均质材料,超材料通过微小尺度的结构设计获得宏观的所需性能,其几何结构通常由设计过的拓扑单元按照一定规律空间排列形成。增材制造(Additive manufacturing, AM)技术基于逐层堆积的制造原理,极大提高了超材料设计的灵活性与成形能力。其中,激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)具有较高的成形精度,是高精度金属零件的重要增材制造技术之一<sup>[5]</sup>,已应用于多种三维金属超材料成形<sup>[6-9]</sup>。

机械超材料(Mechanical metamaterials, MMMs)通常具有轻量化、高强度、高能量吸收等优势,且通过结构设计可以实现零或负泊松比、零剪切模量、负刚度等反直觉的

机械性能。机械超材料按结构区分主要有以下5类:(1)模仿自然晶体结构(体心立方、面心立方等)而诞生的桁架结构(也称晶格结构);(2)以仿生和拓扑优化为主要设计途径的多孔结构(仿生对象包括蜂巢、海星、昆虫甲壳、木本植物等);(3)受折纸艺术和剪纸艺术启发的Origami<sup>[10]</sup>和Kirigami<sup>[11]</sup>结构;(4)从双曲几何中求得的周期极小曲面结构,尤其是三周期极小曲面结构(Trpily periodic minimal surface, TPMS);(5)五模超材料<sup>[12]</sup>(Pentamode metamaterial)等。机械超材料在能量吸收、传感器、航空航天、生物医学等多个领域拥有广泛的应用前景。重庆大学的Bai等<sup>[13]</sup>利用弯曲晶格支撑代替体心立方、面心立方等4种传统晶格结构中的直线型桁架,改善了Ti6Al4V激光粉末床熔合晶格结构的力学性能和能量

\* 基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2022A1515010304, 2021A1515110527); 广州市科技计划(202201010362)。

吸收。华中科技大学 Han 等<sup>[14]</sup>基于 Schwartz 金刚石单胞结构,采用 SLM 制备了连续功能梯度的多孔支架 (FGPs),并系统研究了 SLM 加工 FGPs 的微观拓扑结构、支撑尺寸表征以及梯度体积分数对其力学性能的影响。华中科技大学 Zhang 等<sup>[15]</sup>受到竹子高比强度的启发,设计了轻质、高强度、各向同性的面心立方晶格超材料,并与诸多现有超材料进行性能比较。

负泊松比机械超材料是一种受到拉伸或挤压时,垂直方向产生膨胀或收缩效果的结构,其抗冲击性能与吸能能力高于常见的正泊松比材料,且具有节约空间、多稳态切换等特点。常见的负泊松比结构包括凹六边形蜂窝结构<sup>[16]</sup>、双 V 蜂窝结构<sup>[17]</sup>、手性负泊松比结构等。南洋理工大学 Zeng 等<sup>[18]</sup>通过模拟和试验研究了波浪形六边形手性负泊松比超材料的韧带与中心环厚度比对拉伸和压缩载荷下其结构各向同性变形特性的影响。南京理工大学 Zhang 等<sup>[19]</sup>提出了一种将手性负泊松比结构连接处用圆形框架进行优化,并通过双材料复合制造的方法,提高了其刚度和稳定性。然而,对于负泊松比机械超材料的研究大多停留在 2D 维度,向 3D 拓展的方法仍是该类结构设计的研究热点。河北工业大学和天津大学的学者提出了通过增加重入角取代尖角将 2D 星形蜂窝拓展至 3D 结构的方法,并比较了各项系数、各类结构对最终力学性能的影响,发现弧角的设计能提高相同应变下的抗压强度,且结构的厚度与强度关联最密切<sup>[20]</sup>。英国坎特伯雷基督教会大学 Hassanin 等<sup>[21]</sup>采用镍钛合金通过 SLM 制造了 3D 凹角六边形负泊松比超材料,泊松比最高达到了-2.089。

本研究受蜂窝仿生结构启发,提出了一种基于双 V 单元拓扑的三维机械超材料设计策略,为航空零部

件的大范围变形可调控需求提出潜在应对方案。与二维蜂窝超材料相比,三维双 V 超材料具有大变形、高能量吸收和更好的结构稳定性<sup>[22]</sup>,可以在多方向表现出负泊松比特性。本研究对三维双 V 超材料进行设计与建模,通过 SLM 制造了疏松型、致密型两类三维双 V 超材料;通过解析法、有限元分析以及试验研究了该三维超材料各项结构参数对其变形过程和负泊松比特性的影响,实现了大范围可调控的负泊松比,并研究了其应力分布及压缩力学响应。

## 1 试验及方法

### 1.1 三维双 V 蜂窝机械超材料设计

蜂窝结构超材料是经典的多孔超材料之一,其设计核心是基于平面内图形的二维单元密排,如正六边形、三角形、正方形及圆形与星形的复合图形等<sup>[23]</sup>,以实现几乎只与图形本身相关的各类变形特性。二维蜂窝平面拓展为三维蜂窝结构的一种策略是通过设计平面之间的结合方式,从而设计新型的三维蜂窝单元体及对应的排列、堆叠方式。规定纵向为 Y 方向,横向为 X 方向和 Z 方向,双 V 单元左右对称,双 V 蜂窝机械超材料可用如下参数描述:第 1 个 V 形的纵向长度  $y_1$ 、夹角  $\theta_1$ ;第 2 个 V 形的纵向长度  $y_2$ 、夹角  $\theta_2$ ;两个 V 形共用的横向宽度  $x$ ;两个 V 形共同构成的叠层高度  $h$ ,如图 1 (a) 所示。双 V 单元在二维平面内的两向线性密集排列(以 XY 平面为例),在密排平面中存在两类结合点,即层结合点与列结合点,如图 1 (b) 所示。为了使结合点更加牢固,增强结构性能,设计了矩形平台(图 1 (c)),半宽为  $d_1$ ,桁架宽度为  $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 。考虑 SLM 工艺的精度与分辨率,以及本研究中双 V 蜂窝超材料的可打印性、经济性,设计  $d_1=d_2=d_3=d_4=0.1\text{ mm}$ 。

三维双 V 蜂窝结构由二维双 V

蜂窝正交形成,正交方式共有两种,即仅在单元体的层结合点(或列结合点)进行正交构建的疏松型三维双 V 超材料,以及在层结合点与列结合点均进行正交构建的致密型三维双 V 超材料。使用 SolidWorks 软件建模流程,如图 1 (d) 所示。设计三维双 V 单元沿 3 方向的重复数为:横向列数  $M_1=M_2=5$ ,纵向层数  $N=8$ 。本研究以  $x=1.2\text{ mm}$ 、 $y_1=0.4\text{ mm}$ 、 $y_2=1.6\text{ mm}$  为基本型进行设计,每次均改变其中一项参数并建立疏松型和致密型两类超材料模型,共建立 8 种超材料实体模型进行打印、有限元模拟及单轴压缩试验。

8 种实体模型的结构参数如表 1 所示,其中,疏松型模型编号为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ ,致密型模型编号为  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ 。

### 1.2 压缩力学有限元仿真

本研究使用 COMSOL Multiphysics 5.6 进行压缩力学有限元仿真。由于 SLM 成形的零件与设计 CAD 模型之间通常存在尺寸偏差,因此使用有限元方法模拟时进行了假设,以简化模型。假设 SLM 成形的零件与设计模型一致;假设成形的 NiTi 合金在任何位置各向同性。通过标准拉伸试验获得此 NiTi 合金的应力-应变曲线,并用于有限元仿真。为充分模拟零件在压缩试验机上的受力场景,在结构上下两侧分别装配一块  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  的板,并视为刚性域。使用静力学稳态模块,压缩时上下板与中间结构设置为联合体,下板固定,上板为主动运动端,压缩量均为中间结构 25% 应变对应的具体值,并在研究设置中通过辅助扫描功能以 2.5% 应变为间隔获取压缩过程中的各项数据。通过物理场控制网格,构建了符合结构与边界条件的疏密有致的三角形网格超过 124000 个,密集处网格尺寸均小于  $0.3\text{ mm}$ ,足以将误差降低至可接受的水平。边界条件及有限元网格划分

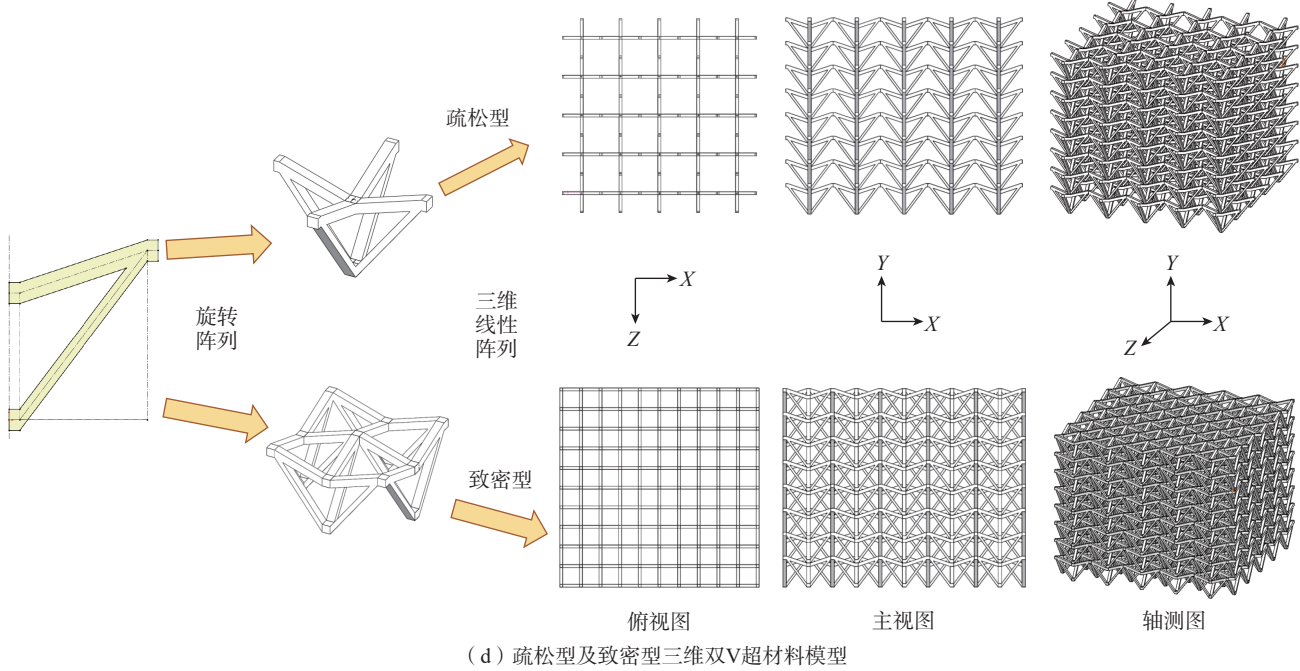
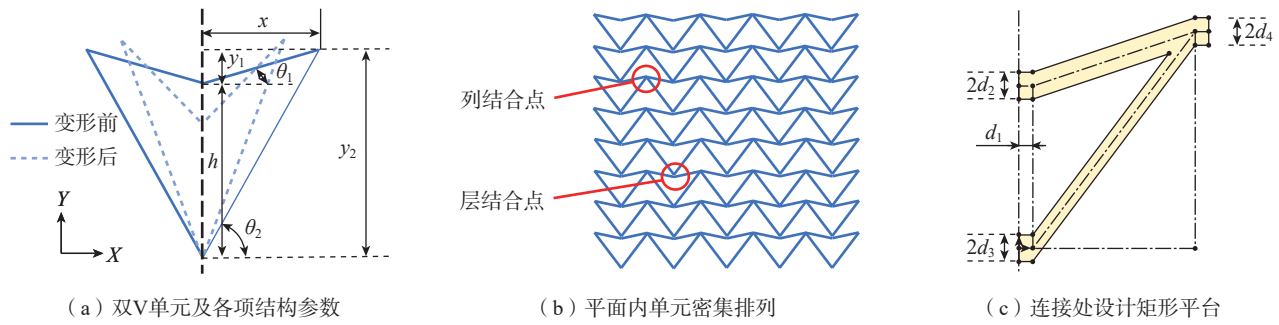


图1 三维双V蜂窝机械超材料设计  
Fig.1 Design of 3D “double V” configuration MMMs

表1 三维双V蜂窝机械超材料结构参数  
Table 1 Structural parameters of 3D “double V” configuration MMMs

类型	编号	$x/mm$	$y_1/mm$	$y_2/mm$	$h/mm$
疏松型	A <sub>1</sub>	1.2	0.4	1.6	1.2
	A <sub>2</sub>	0.9	0.4	1.6	1.2
	A <sub>3</sub>	1.2	0.6	1.6	1.0
	A <sub>4</sub>	1.2	0.4	1.2	0.8
致密型	B <sub>1</sub>	1.2	0.4	1.6	1.2
	B <sub>2</sub>	0.9	0.4	1.6	1.2
	B <sub>3</sub>	1.2	0.6	1.6	1.0
	B <sub>4</sub>	1.2	0.4	1.2	0.8

如图2所示。

### 1.3 材料及SLM工艺

本研究选用镍钛合金球形粉

末(Ni<sub>50</sub>Ti<sub>50</sub>,原子分数),粒径范围15~53 μm,采用DiMetal-100H金属3D打印机(广州雷佳增材科技有限

公司研发)进行打印,配备的光纤激光器最大功率为200 W。通过前期工艺优化研究,选定镍钛合金粉末的打印参数为:激光功率140 W、扫描间距0.08 mm、扫描速度500 mm/s、层厚0.03 mm。扫描策略为正交层错,层与层之间旋转角度为90°。整个SLM过程在惰性气氛中进行,保护气为氩气。成形试样如图3所示。

### 1.4 单轴压缩试验

采用电子万能试验机进行单轴压缩试验,加载速率恒定为0.2 mm/min。通过传感器获取并记录其压缩响应数据,以绘制每种3D双V超材料的应力-应变曲线。使用摄像机定机

位记录其压缩变形全过程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 三维双V超材料的泊松比调控

研究三维双V蜂窝超材料的整体变形过程、调控其泊松比共分为两步进行：(1)探究双V蜂窝代表性单元体本身的变形过程及各结构参数对其的影响；(2)探究代表性单元的变形过程与结构整体变形之间的联系。

双V单元体在两水平方向均对称，且在X、Y方向上结构左右对称，故使用解析法时取其一半进行计算。代表性单元受到Y向压缩前后，X方向也产生相应位移，变形前后的各项参数如图4(a)所示。

规定Y方向的位移为 $d_y$ （负值，

负号代表压缩），压缩前的层高为 $h$ ，压缩后的层高为 $h'$ ，X方向的位移为 $d_x$ （负值，负号代表压缩），压缩前的横向宽度为 $x$ ，压缩后的横向宽度为 $x'$ 。其中 $-d_x$ 、 $-d_y$ 分别为X、Y方向位移的绝对值。将两个V形的斜杆视为刚性桁架，不考虑其弯曲和变形，可获得以下关系。

$$(x+d_x)^2 + (\sqrt{x^2+y_2^2} - (x+d_x))^2 - (y_2-y_1+d_y)^2 = x^2 + y_1^2 \quad (1)$$

式(1)仅含有 $x$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 、 $d_x$ 、 $d_y$ ，表明代表性双V单元的变形过程参数 $d_x$ 、 $d_y$ 仅与 $x$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 相关（或表示为仅与 $x$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 相关）。将其转化为形如 $d_x=f(d_y)$ 的函数表达式，可得

$$d_x = f(d_y) = \left( x^2 + \frac{y_1^2 + y_2^2}{2} - \right.$$

$$\left. \left( (y_2 - y_1 + d_y)^2 + \frac{(y_2 - y_1)^2 (y_2 + y_1)^2}{(y_2 - y_1 + d_y)^2} \right)^{\frac{1}{2}} - x \right) / 4 \quad (2)$$

用 $\varepsilon_y$ 表示压缩的纵向应变， $\varepsilon_x$ 表示产生的横向应变，则泊松比根据定义式可展开表示为

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{d_x/h}{d_y/h} \quad (3)$$

与式(2)联立可知，结构参数 $x$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 固定时，横向应变 $\varepsilon_x$ 与泊松比 $\nu$ 均是一条关于纵向应变 $\varepsilon_y$ 的曲线，如图4(b)所示（以基本型为例）。泊松比的绝对值随应变 $\varepsilon_y$ 的增加而增加。其中， $A_1$ 试样的泊松比在 $\varepsilon_y$ 趋向于0时收敛于-0.444455，且随着应变增加至1/3时，达到接近-1.5。

在研究结构参数对双V蜂窝结构泊松比的影响时，首先确定一个相同的应变值以构成可比较性。因此，引入等效泊松比用以表征纵向压缩应变为25%时的泊松比，即 $\nu_{25}$ 。图4(c)和(d)显示了单独改变基本型的一项结构参数时，各结构参数对代表性单元等效泊松比的影响趋势。等效泊松比的绝对值与 $x$ 负相关，与 $y_1$ 、 $y_2$ 正相关，且对宽度 $x$ 的改变最敏感。由于 $x$ 是两个V形结构共用的参数，改变 $x$ 可以看作同时改变了 $y_1$ 和 $y_2$ ，（或改变了 $\tan\theta_1$ 和 $\tan\theta_2$ ），即改变了两个V形的角度。

代表性单元体的阵列层数及列数是其泊松比与整体结构泊松比相联系的关键。本研究用于建立模型的三维双V蜂窝超材料中，3方向的阵列数量均较为有限（ $N=8$ ， $M_1=M_2=5$ ）。其应用于实际的情况下，代表性双V单元体在X、Y、Z3方向的阵列数量应当是一个较大的值，且具体数值根据实际情况与环境决定。易知

$$D_x = 2M \times d_x \quad (4)$$

$$D_x = 2M \times x \quad (5)$$

$$D_y = N \times d_y \quad (6)$$

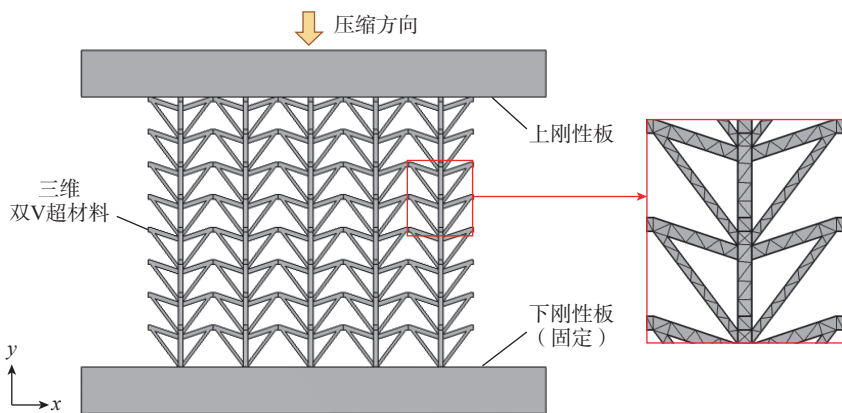


图2 有限元压缩仿真边界条件及网格划分

Fig.2 Boundary conditions and meshing of finite element simulation for compression

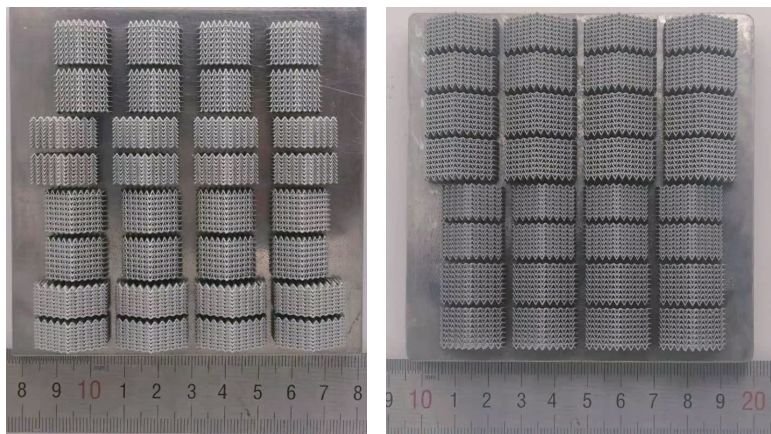


图3 SLM成形三维双V蜂窝超材料试样

Fig.3 3D "double V" configuration MMMs samples fabricated by SLM

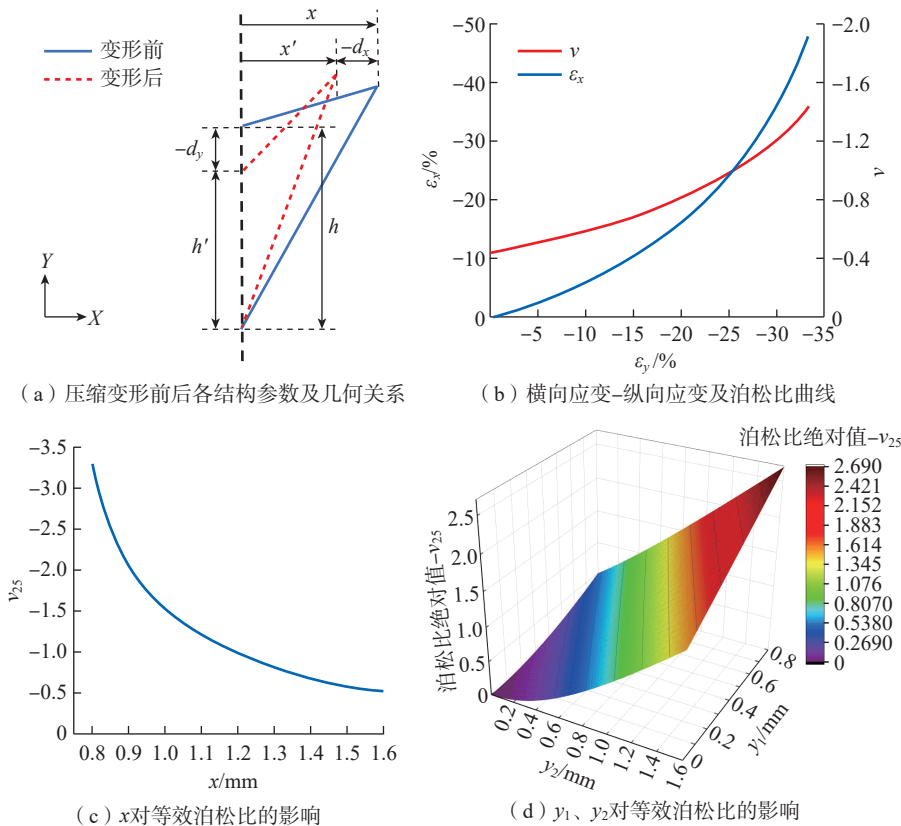


图4 通过结构参数调控泊松比

Fig.4 Control Poisson's ratio through structural parameters

$$D_y = N \times h + y_1 \quad (7)$$

式中,  $D_x$  为整体结构在  $X$  方向的压缩量;  $D_x$  为整体结构在  $X$  方向的原长度;  $D_y$  为整体结构在  $Y$  方向的压缩量;  $D_y$  为整体结构在  $Y$  方向的原长度;  $\nu_{xy}$  表示泊松比, 则

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{D_x/D_x}{D_y/D_y} = -\frac{(2M \times d_x)/(2M \times x)}{(N \times d_y)/(N \times h + y_1)} = -\frac{d_x/x}{(N \times d_y)/(N \times h + y_1)} \quad (8)$$

这说明整体结构泊松比与列数  $M$  无关, 仅与层数  $N$  相关。考虑实际应用中层数  $N$  极大, 则有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N \times d_y}{N \times h + y_1} = \frac{N \times d_y}{N \times h} = d_y/h \quad (9)$$

因此

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \nu_{xy} = -\frac{d_x/x}{d_y/y} = \nu \quad (10)$$

这表示三维双 V 蜂窝超材料的

泊松比与其代表性单元是相等的, 各项结构参数对代表性双 V 单元变形过程的影响和关联性可以直接适用于对 3D 双 V 蜂窝超材料整体, 以实现超材料等效泊松比数值的调控。

## 2.2 三维双 V 超材料应力分布

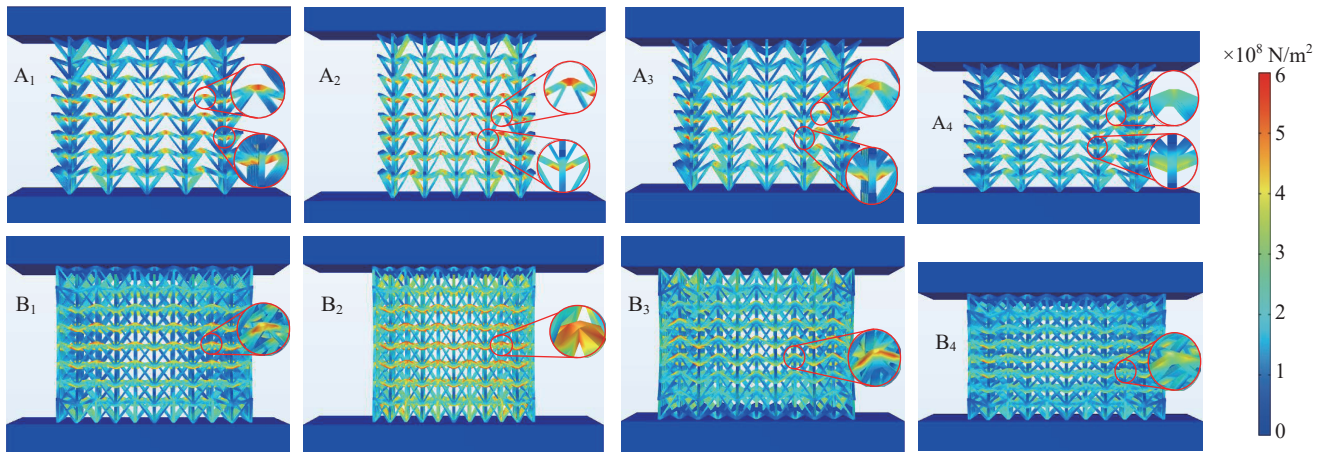
压缩应变为 25% 时, 不同构型的三维双 V 蜂窝机械超材料的应力分布及最大 von Mises 应力如图 5 (a) 所示。结果表明, 不同类型、不同结构参数的三维双 V 超材料的应力分布类似。对于每个三维双 V 超材料, 较大的应力集中在层与层、列与列的连接节点附近, 这是由于力的传递在连接处交汇, 结构在连接处采用了非连续性的过渡。图 5 (b) 进一步显示了在压缩变形过程中, 三维双 V 超材料的应力分布没有显著变化。

## 2.3 三维双 V 超材料的压缩响应

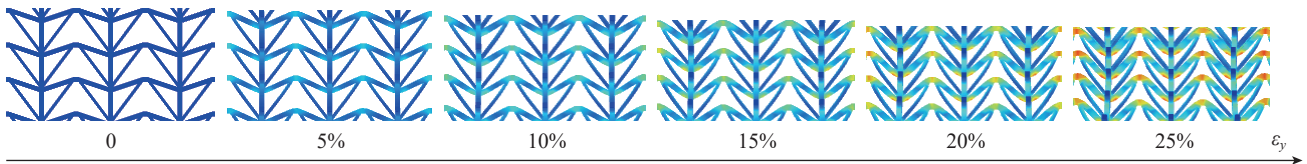
图 6 (a) 显示了 8 种三维双 V

超材料在单轴压缩应变 25% 情况下的横向变形分布。可以观察到, 该结构受到纵向压缩时, 横向呈现出收缩效果, 表现出负泊松比性能。由于上下基板与中间结构存在摩擦力, 靠近上下两侧的双 V 单元受到基板约束, 不易发生横向变形。本研究中, 模型列数为 5, 位于对称中轴的单元可视作不受摩擦力干扰; 层数为 8, 自下而上第 3~6 层的结构受两侧基板影响小, 可近似视为自由变形部分。因此, 通过考察自由变形区中第 5 层且位于对称中轴的双 V 单元右上侧一边界点的横向及纵向位移, 进而求出其泊松比曲线及等效泊松比  $\nu_{25}$ 。

图 6 (b) 和 (c) 为有限元模拟疏松型及致密型三维双 V 超材料 0~25% 压缩应变下的泊松比曲线。与解析法所得结果不同, 该曲线中泊松比不随应变的增加而递增。A<sub>1</sub> 的泊松比在 -0.401~-0.388 范围内波动, 等效泊松比为 -0.38883; A<sub>2</sub> 的泊松比在 -0.699~-0.636 范围内波动, 等效泊松比为 -0.63610; A<sub>3</sub> 的泊松比在 -0.506~-0.532 内波动, 等效泊松比为 -0.53122; A<sub>4</sub> 的泊松比在 -0.277~-0.270 内波动, 等效泊松比为 -0.27561。与基本型 A<sub>1</sub> 相比, A<sub>2</sub> 拥有更小的  $x$  参数 (0.9 mm) 及更大的等效泊松比, A<sub>3</sub> 拥有更大的  $y_1$  参数 (0.6 mm) 及更大的等效泊松比, A<sub>4</sub> 拥有更小的  $y_2$  参数 (1.2 mm) 及更小的等效泊松比, 说明等效泊松比的绝对值与  $x$  负相关, 与  $y_1$ 、 $y_2$  正相关, 这与使用解析法得出的结论是一致的。致密型三维双 V 超材料与具有相同结构参数的疏松型拥有接近的泊松比。B<sub>1</sub> 的泊松比在 -0.465~-0.446 范围内波动, 等效泊松比为 -0.44602; B<sub>2</sub> 的泊松比在 -0.684~-0.646 范围内波动, 等效泊松比为 -0.64676; B<sub>3</sub> 的泊松比在 -0.566~-0.555 范围内波动, 等效泊松比为 -0.55740; B<sub>4</sub> 的泊松比在 -0.282~-0.275 内波动, 等效泊松



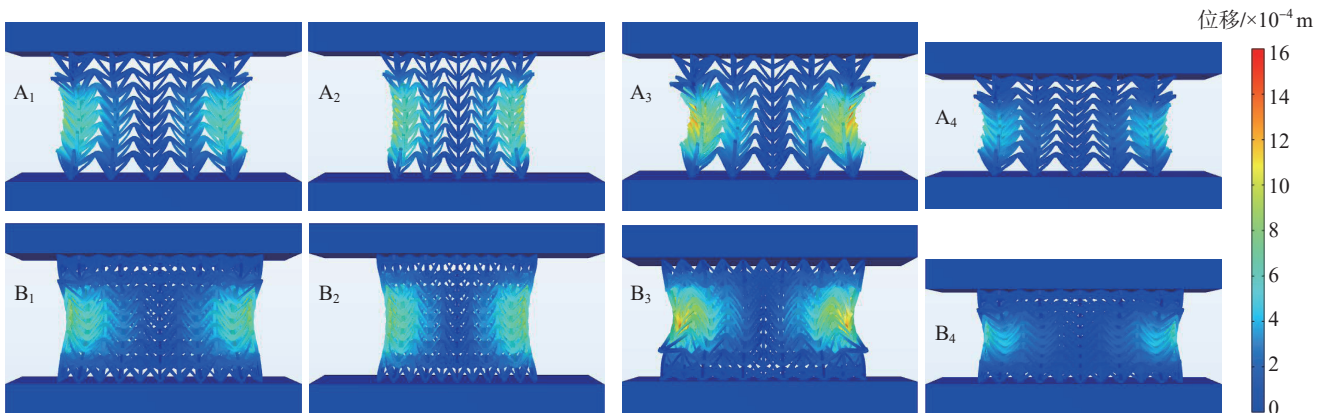
(a) 25%压缩应变时疏松型及致密型三维双V超材料的von Mises应力分布及应力集中



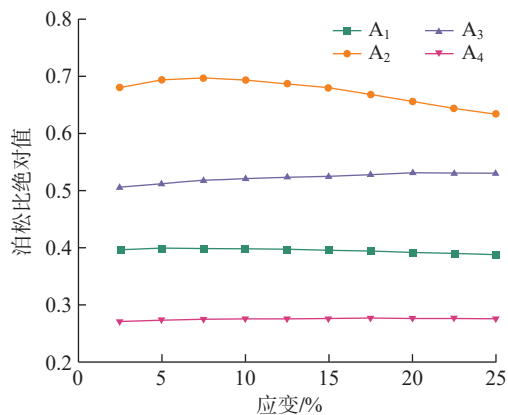
(b) 压缩过程中的von Mises应力分布 (以A<sub>1</sub>为例)

图5 压缩过程中三维双V超材料的力学性能分布

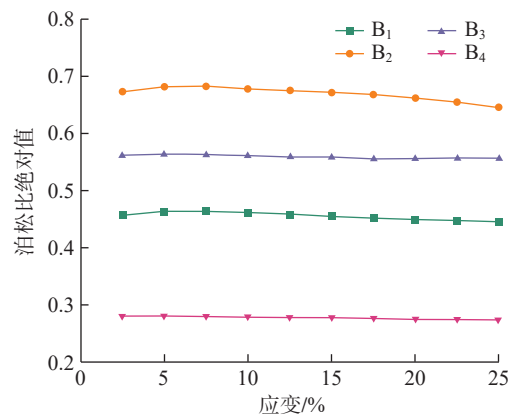
Fig.5 Distribution of mechanical properties of 3D “double V” configuration MMMs during compression



(a) 25%压缩应变时疏松型及致密型三维双V超材料的压缩变形



(b) 疏松型三维双V超材料的泊松比曲线



(c) 致密型三维双V超材料的泊松比曲线

图6 三维双V超材料的压缩响应

Fig.6 Compression response of 3D “double V” configuration MMMs

比为-0.27529。三维双V超材料的负泊松比特性使其受压缩载荷时各方向运动范围均不超过原有空间,因此可制成圆筒状等各种形状用以保护核心器件;对于空间资源十分有限的航空航天环境,其可以压缩状态携带,有效节约空间。

图7显示了单轴压缩试验中三维双V蜂窝超材料的应力-应变曲线、机械变形及破坏行为。结构首先以负泊松比方式变形,在竖直和水平方向上收缩,也就是致密化的过程;直到加载应变达到各样品的第1个应力峰值,开始出现各类破坏现象,包括从底层开始逐层破坏、45°剪切破坏和局部崩溃(用红色圈及虚线标出)。各类结构中均出现逐层破

坏现象,45°剪切破坏主要发生在A<sub>2</sub>及B<sub>2</sub>的压缩过程中,这两种结构纵向尺寸与横向尺寸的比值均大于其他结构。各类破坏机制的出现可能与以下原因有关:一是SLM增材制造成形的镍钛多孔结构有较强脆性,且可能存在其他制造缺陷;二是与结构的各项相对尺寸有关,如45°剪切破坏主要出现在纵向尺寸相对较大的A<sub>2</sub>及B<sub>2</sub>中。

各三维双V超材料的第一峰值应力及对应应变如表2所示。相同类型的结构中,A<sub>1</sub>及B<sub>1</sub>样品的第一峰值应力均最小,说明相同载荷下其最容易出现破坏。A<sub>2</sub>及B<sub>2</sub>样品的第一峰值应力均较大,但出现破坏时的应变均较小,仅次于A<sub>1</sub>及B<sub>1</sub>样

品。A<sub>3</sub>及B<sub>3</sub>样品出现破坏时的应变较大,但应力值较小,仅次于A<sub>1</sub>及B<sub>1</sub>样品,说明其抗压强度较差,但变形能力较强。A<sub>4</sub>及B<sub>4</sub>样品均具有较大的第一峰值应力,且出现破坏时的应变也较大,说明其拥有较高的抗压强度和变形能力。随着应变继续增大,A<sub>4</sub>及B<sub>4</sub>样品应力持续上升且远大于其他3种。这是由于其最早完成致密化且破坏时结构保持较为完好,后续近似于实体压缩。横向比较致密型与疏松型三维双V超材料,相同结构参数的致密型与疏松型在产生相等应变时,致密型有更高的应力,且出现破坏时的应变也均大于疏松型,说明致密型结构拥有更高的体积分数(更低的孔隙率)、抗压强度和

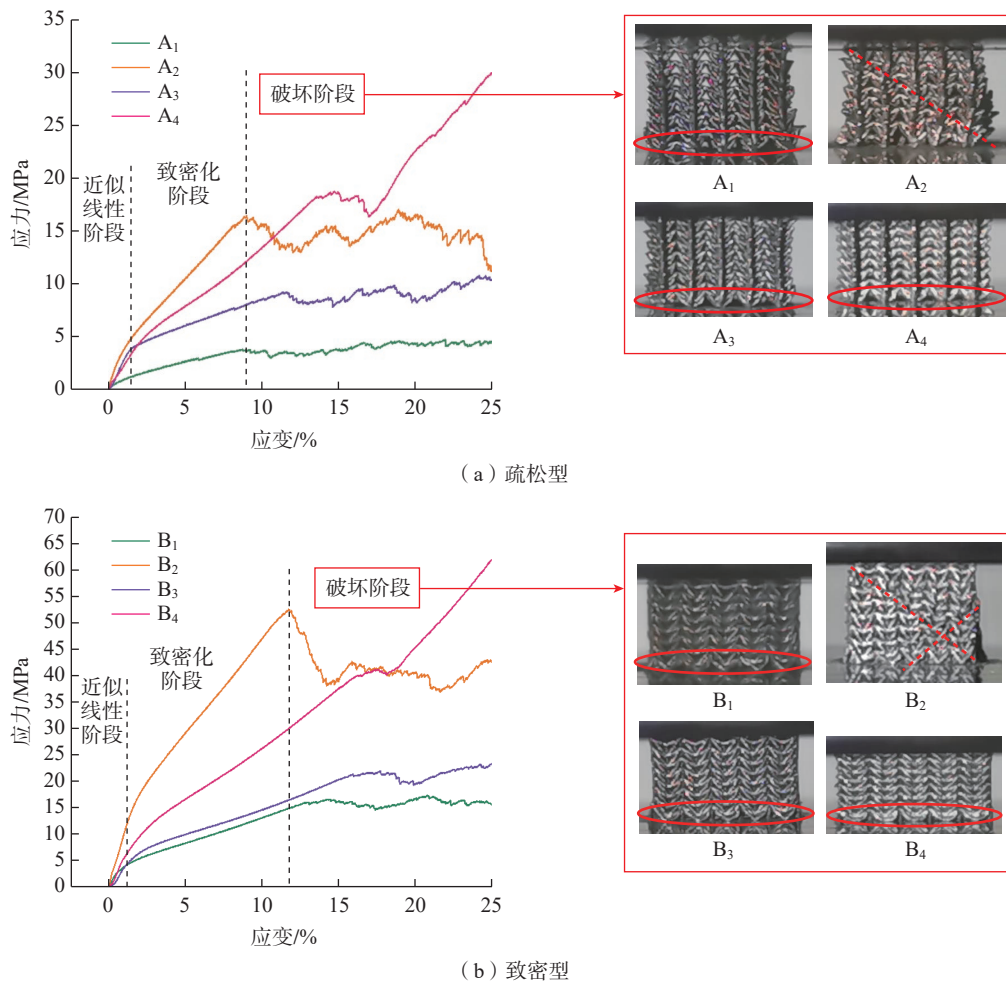


图7 三维双V超材料的应力-应变曲线及压缩变形

Fig.7 Stress-strain curve and compression deformation of 3D "double V" configuration MMMs

表 2 三维双 V 蜂窝机械超材料的第一峰值应力及应变  
Table 2 First peak stress and strain of 3D “double V” configuration MMMs

类型	编号	应变/%	应力/MPa
疏松型	A <sub>1</sub>	7.943	3.581
	A <sub>2</sub>	9.060	16.214
	A <sub>3</sub>	11.331	9.173
	A <sub>4</sub>	13.581	18.250
致密型	B <sub>1</sub>	14.245	16.343
	B <sub>2</sub>	11.676	52.300
	B <sub>3</sub>	17.723	21.855
	B <sub>4</sub>	17.567	41.026

变形能力。

### 3 结论

(1) 提出了由二维双 V 蜂窝单元在两类连接点处按一定规律正交结合成三维双 V 蜂窝超材料的设计方案,并按三维结合规律分类为疏松型与致密型。使用 SLM 工艺成形了两类共 8 种 3D 双 V 蜂窝超材料,并通过单轴压缩试验验证了两类超材料的负泊松比特性。

(2) 三维双 V 蜂窝机械超材料的等效泊松比均为负数,其绝对值与横向单元尺寸负相关,与两纵向单元尺寸正相关;在三维阵列层数、列数较大时,可视为与该两项无关,即结构整体泊松比与单元体泊松比相等。由此实现了可调的负泊松比机械特性,本研究所设计的 8 种 3D 双 V 超材料的等效泊松比范围为 -0.647~-0.275。

(3) 有限元模拟显示,两类型不同结构参数的三维双 V 蜂窝机械超材料的应力分布具有相似性,均集中在连接处。其应力-应变曲线呈现近似线性阶段、致密化阶段及阶梯应力阶段;达到第 1 次应力峰值后出现逐层破坏、45° 剪切破坏及其他不可控的局部崩坏现象。两种类型中,致密型超材料具有更高的抗压强度和变形能力。同类型中,4 号样品兼

具较强的抗压强度和变形能力。

### 参考文献

[1] FAN J X, ZHANG L, WEI S S, et al. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends[J]. *Materials Today*, 2021, 50: 303-328.

[2] SCHITTNY R, KADIC M, GUENNEAU S, et al. Experiments on transformation thermodynamics: Molding the flow of heat[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(19): 195901.

[3] LI X, YU X, ZHAI W. Additively manufactured deformation-recoverable and broadband sound-absorbing microlattice inspired by the concept of traditional perforated panels[J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla)*, 2021, 33(44): e2104552.

[4] WANG H, LU Z X, YANG Z Y, et al. In-plane dynamic crushing behaviors of a novel auxetic honeycomb with two plateau stress regions[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 151: 746-759.

[5] SAEDI S, SAGHAIAN S E, JAHADAKBAR A, et al. Shape memory response of porous NiTi shape memory alloys fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2018, 29(4): 1-12.

[6] MACONACHIE T, LEARY M, LOZANOVSKI B, et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges[J]. *Materials & Design*, 2019, 183: 108137.

[7] FAN X J, TANG Q, FENG Q X, et al. Design, mechanical properties and energy absorption capability of graded-thickness triply

periodic minimal surface structures fabricated by selective laser melting[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 204: 106586.

[8] KOLKEN H M A, CALLENS S J P, LEEFLANG M A, et al. Merging strut-based and minimal surface meta-biomaterials: Decoupling surface area from mechanical properties[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 52: 102684.

[9] WEI S S, SONG B, ZHANG Y J, et al. Mechanical response of triply periodic minimal surface structures manufactured by selective laser melting with composite materials[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35(3): 397-410.

[10] ZHAI Z R, WU L L, JIANG H Q. Mechanical metamaterials based on origami and kirigami[J]. *Applied Physics Reviews*, 2021, 8(4): 041319.

[11] SUN Y, YE W J, CHEN Y, et al. Geometric design classification of kirigami-inspired metastructures and metamaterials[J]. *Structures*, 2021, 33: 3633-3643.

[12] WU S H, LUO Z, LI Z Y, et al. Topological design of pentamode metamaterials with additive manufacturing[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, 377: 113708.

[13] BAI L, XU Y, CHEN X H, et al. Improved mechanical properties and energy absorption of Ti6Al4V laser powder bed fusion lattice structures using curving lattice struts[J]. *Materials & Design*, 2021, 211: 110140.

[14] HAN C J, LI Y, WANG Q, et al. Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2018, 80: 119-127.

[15] ZHANG Z, ZHANG L, SONG B, et al. Bamboo-inspired, simulation-guided design and 3D printing of light-weight and high-strength mechanical metamaterials[J]. *Applied Materials Today*, 2022, 26: 101268.

[16] 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.

[17] LIM T C. A 3D auxetic material based on intersecting double arrowheads[J]. *Physica Status Solidi*, 2016, 253(7): 1252-1260.

- [18] ZENG Z H, HAN C J, SUN C N, et al. Tunable isotropy on the mechanical properties of wavy hexachiral metamaterials: Numerical simulation and additive manufacturing[J]. *Smart Manufacturing*, 2022, 1(1): 2250001.
- [19] ZHANG X G, REN X, JIANG W, et al. A novel auxetic chiral lattice composite: Experimental and numerical study[J]. *Composite Structures*, 2022, 282: 115043.
- [20] LIU H T, WANG L. Design 3D improved star-shaped honeycomb with different tip angles from 2D analytical star-shaped model[J]. *Composite Structures*, 2022, 283: 115154.
- [21] HASSANIN H, ABENA A, ELSAYED M A, et al. 4D printing of NiTi auxetic structure with improved ballistic performance[J]. *Micromachines (Basel)*, 2020, 11(8): E745.
- [22] YANG H, WANG B, MA L. Mechanical properties of 3D double-U auxetic structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 180–181: 13–29.
- [23] QI C, JIANG F, YANG S. Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 227: 109393.

通讯作者: 宋长辉, 副研究员, 研究方向为激光选区熔化技术及应用。

## Selective Laser Melting of 3D Honeycomb Mechanical Metamaterials With “Double V” Configurations and Compressive Responses

HAN Changjun, WANG Zaichi, HUANG Junfei, SONG Changhui, WANG Di, YANG Yongqiang  
(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**[ABSTRACT]** Mechanical metamaterials (MMMs) have become a research hotspot in the application of aerospace, energy automobile, manufacturing, and military due to their light weight, high strength, and high energy absorption. Selective laser melting (SLM) additive manufacturing can produce complex microstructure with high precision and resolution, thus being suitable to fabricate complex MMMs. In this study, a design scheme of three-dimensional (3D) MMMs models based on a “double V” configuration honeycomb topology was proposed, which were subsequently printed by SLM. Through the combination of theoretical calculation, simulation, and experiments, the influences of various structural parameters on the compression mechanical response of the “double V” configuration honeycomb MMMs were investigated. The findings provide an approach to manually tailor the negative Poisson's ratio of MMMs.

**Keywords:** Mechanical metamaterial (MMMs); Negative Poisson's ratio; Honeycomb; Selective laser melting (SLM); Finite element analysis

(责编 阳光)

(上接第 62 页)

## Research Progress of Ultrafast Laser Ceramic Polishing and Texturing Technology

LONG Yu, CHEN Xu, JIANG Jiyan, JI Changhao, FENG Shihe, WANG Chengyun  
(Institute of Laser Intelligent Manufacturing and Precision Processing, School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**[ABSTRACT]** The application of ultrafast laser in the field of ceramic surface processing has been initially confirmed. This paper introduces the mechanism of ultrafast laser ceramic surface processing, reviews the research progress of ultrafast laser in the field of ceramic surface polishing and texturing processing, and discusses the processing technology of ultrafast laser on complex freeform surfaces. Also, the development direction of laser polishing and texturing technology is foreseen, and the use of the ultrafast laser to enhance the comprehensive performance of ceramic surfaces provides a reference to further broaden the application of ultrafast laser technology in the field of surface processing.

**Keywords:** Ultrafast laser; Ceramic; Laser polishing; Laser texturing; Free-form surface processing

(责编 阳光)