

引文格式:宋宗贤,郭宏业,王鹏,等.激光增材镍基高温合金轻质多孔结构设计及力学性能研究[J].航空制造技术,2026,69(17):25020408.

SONG Zongxian, GUO Hongye, WANG Peng, et al. Optimization design and mechanical properties study of lightweight porous structures fabricated by additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(17): 25020408.

激光增材镍基高温合金轻质多孔结构设计及力学性能研究

宋宗贤¹,郭宏业²,王 鹏³,刘 永⁴,金 豪¹,耿文豪¹

(1. 天津中德应用技术大学航空航天学院,天津 300350;

2. 天津中德应用技术大学机械工程学院,天津 300350;

3. 成立航空股份有限公司,天津 300000;

4. 天津大学材料科学与工程学院,天津 300350)

[摘要] 基于原始六边形蜂窝(HH)结构开发了4种增强型结构。通过控制等质量条件,使用激光选区熔化技术(Selective laser melting, SLM)制备GH4169蜂窝试样,对比不同结构的变形模式与能量吸收特性。研究发现,体心增强蜂窝(BCCH)在 X_1 、 X_2 方向表现出优异的力学性能,其单位体积屈服强度和最大力值达原始HH结构的2倍, X_1 方向弹性模量较HH提升33%,抗压强度提高约200%。在能量吸收方面,各结构 X_2 方向吸能效率普遍高于 X_1 方向,其中“H”形对称排列的平面增强蜂窝(BPEH)表现出更均匀的应力传递优势。无支撑的面心增强蜂窝(FCCH)虽强度较低,但峰值吸能效率最高达81.60%,其吸能效率较HH结构提升25%。本研究通过融合形状、拓扑与点阵的协同设计策略,并在等质量条件下系统评估了结构的多向力学与吸能行为,为航空航天领域性能可调控的轻质多孔结构提供了一种创新的设计范式与试验依据。

关键词:蜂窝结构优化;拓扑优化;点阵结构;激光选区熔化技术;吸能效率

中图分类号:V24;TP311

文献标志码:A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020408

Optimization Design and Mechanical Properties Study of Lightweight Porous Structures Fabricated by Additive Manufacturing

SONG Zongxian¹, GUO Hongye², WANG Peng³, LIU Yong⁴, JIN Hao¹, GENG Wenhao¹

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China;

2. School of Mechanical Engineering, Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China;

3. Chenglix Aviation Co., Ltd., Tianjin 300000, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

[ABSTRACT] Based on the primitive hexagonal honeycomb (HH) structure, four enhanced configurations were designed. Under a condition of equal mass, GH4169 honeycomb specimens were fabricated using Selective Laser Melting (SLM). Their deformation modes and energy absorption characteristics were compared. The results show that the Body-Centered Cubic reinforced Honeycomb (BCCH) exhibits superior mechanical performance in both the X_1 and X_2 directions. Its yield strength and maximum force per unit volume reach twice those of the primitive HH. The elastic modulus in the X_1 direction increases by 33%, and the compressive strength improves by approximately 200%. Regarding

收稿日期:2025-12-17;退修日期:2026-04-06;录用日期:2026-06-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52375372);天津市自然科学基金(23JCZDJC00680)

通信作者:宋宗贤,博士,主要从事金属增材及焊接技术研究。

energy absorption, efficiency in the X_2 direction is generally higher than in the X_1 direction. The BPEH structure with an “H-shaped” symmetric arrangement demonstrates more uniform stress transmission. Although the Face-Centered Cubic reinforced Honeycomb (FCCH) has lower strength, its peak energy absorption efficiency is up to 81.60%, and its energy absorption efficiency is 25% higher than that of the HH structure. This study systematically evaluated the multidirectional mechanical and energy-absorbing behaviors of the structure under the condition of equal mass by the synergistic design strategy of shape, topology and lattice, which provides an innovative design paradigm and experimental basis for the performance controllable lightweight porous structure in the field of aerospace.

Keywords: Optimization of honeycomb structures; Topology optimization; Lattice structures; Selective laser melting; Energy absorption efficiency

六边形蜂窝结构可以在保证较大强度和刚度的前提下最大限度地减少用材,达到轻量化的目的。六边形的蜂窝巢室间连续形成稳定的结构框架,可达到航空发动机减重、增强、防喘、防振、隔声、密闭、冷却及隐身效果^[1-3]。拓扑优化技术可在限定材料用量的前提下,去除对承载贡献较低的材料,从而在保证性能的同时实现轻量化^[4-7]。激光选区熔化技术为复杂结构件的快速制造提供了有效手段,可显著缩短工艺流程,提高材料利用率^[8-10]。点阵结构通过对微小单元的形状、尺寸及排列方式等合理设计,在降低结构自重的同时,保证了较高的结构性能和强度^[11-14]。美国国家航空航天局于20世纪70~80年代针对压气机抗喘振技术开展了大量的研究,并侧重于对机匣结构的改进,结果显示,若使用多孔的蜂巢结构替代原有的实心式外环,可以大幅度地将喘振裕度提高12%左右,并且在喘振边界附近,压气机仍有较高效率^[15]。

增材制造技术为蜂窝与多孔结构的定制化设计提供了前所未有的自由度,使其在实现轻量化、高比强度及多功能一体化方面展现出巨大潜力^[16-18]。该领域的研究涵盖了从宏观力学性能、微观失效机理到工艺优化与创新设计的多个层面。在创新结构设计方面, Yang等^[19]通过研究负泊松比蜂窝结构的弯曲性能,揭示了其在特定方向上可实现大变形且具有更高单位质量承载效率的优势。在此基础上,唐映林等^[20]通过融合不同点阵单元所设计的316L不锈钢混合结构,进一步将比吸能提升了22.25%~42.66%,并显著降低了结构的各向异性。然而,新颖设计的实现高度依赖于制造的精确性, Wang等^[21]的研究中系统指出了制造缺陷对力学性能的显著削弱作用,强调了工艺一致性的重要性。这一观点在特定材料体系的成形中得到呼应, Wang等^[22]针对Mg-5Zn Gyroid结构骨支架的研究发现,该结构优异的降解均匀性、强度等性能紧密依赖于SLM成形质量。除宏观性能外,对微观失效机理的深入理解同样至关重

要,周翔宇等^[23]对FCC桁架结构的分析表明,杆件细长比是控制其结构发生逐层塌陷还是整体屈服的关键参数; 门玉涛等^[24]基于Voronoi原理构建的梯度多孔结构仿真结果表明,梯度增大能非线性地提升结构的扭转刚度与疲劳寿命。在面向应用的性能优化上,研究则呈现出多尺度特征, Zhang等^[25]通过在节点处进行加厚优化,成功将蜂窝结构的等效弹性模量提升了38%; 而李宗书等^[26]则从材料本身出发,量化了CM247LC高温合金多孔结构从高致密(98%)到高孔隙(60%)时屈服强度的衰减规律,研究结果符合经典的Gibson-Ashby模型。最后,对于高温环境下的应用,李聪等^[27]的综述阐明了孔隙特征对多孔金属抗蠕变性能的主导机制; 马进宣^[28]则从蜂窝结构连接工艺角度,为蜂窝结构的镍基高温合金真空钎焊提供了优化参数,有效抑制了溶蚀并提高了蜂窝焊接接头强度。以上研究从设计、制造、机理到应用,为增材制造蜂窝与多孔结构的性能可控性奠定了坚实的基础。

本研究创新性地整合了形状优化、拓扑优化与点阵优化3种手段,并在等质量条件下对结构的多向力学性能与吸能行为展开系统评估。以原始蜂窝结构为基础,衍生出边缘增强型蜂窝结构、平面增强型蜂窝结构、体心增强型蜂窝结构以及面心增强型蜂窝结构。运用激光选区熔化技术制备GH4169镍基合金六方蜂窝结构,并对其表面进行形貌表征分析与金相显微观察。针对5种蜂窝结构分别开展 X_1 、 X_2 、 X_3 方向的压缩试验,旨在系统比较不同优化策略对结构多向压缩性能与能量吸收特性的综合作用,揭示“设计-性能”之间的关联机制。区别于已有主要集中于单一优化手段的研究,以及常在不同质量条件下对比性能的工作,本文的独特性在于以下3个方面,(1)协同融合。将形状优化、拓扑优化与点阵结构3种增强策略同时应用于同一基础蜂窝结构,并直接对比其效果;(2)等质量约束。所有结构严格控制在80%孔隙率下进行比较,排除质量差异对

力学评价的干扰;(3)多向系统评估。首次在同一蜂窝体系中同时对 X_1 、 X_2 、 X_3 3 个正交方向开展压缩与吸能测试,揭示了不同优化策略引起的各向异性规律。以上区别使本研究能够更清晰地判别不同优化机制对性能的独立贡献与耦合效应。

1 试验及方法

1.1 结构设计

本研究采用的模型以正六边形蜂窝(HH)结构为基础,首先采用中望 3D 建模软件,根据该结构在二维平面内的几何特性开展三维数字建模,构建出 HH 单元体。随后,对该单元体实施阵列操作,生成密排型 HH 多孔结构。为便于后续参数优化分析,将 HH 单元体的边长尺寸设定为 L ,壁厚设定为 t_0 ,并截取 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的立方体区域用于计算孔隙率 Φ ,具体建模流程如图 1 所示。

通过中望 3D 与 Altair Inspire 软件进行优化。

(1)形状优化。在机械结构工程实践中,通常采用增加筋的方法来增强产品的强度和刚性,减少不均匀变形和失效现象的发生。因此,本文借鉴机械制造技术中的加强筋理念,并将其应用于结构机械工程领域,对 HH 结构型式进行优化,从而提升其承载能力。具体而言,通过引入等边三角形支撑杆,开发出边缘增强蜂窝(BEEH)结构。此外,引入厚度为 $t_0/2$ 的新型辅助杆件,该杆件从中心顺时针旋转 60° ,与 HH 蜂窝构造的棱边在 6 个指定节点处相交,进而形成具备边缘防护特性的

增强蜂窝(BEEH)结构,如图 2 所示。

(2)拓扑优化。拓扑优化的核心思想是寻找材料在特定载荷作用下最具效能的布局,通过输入特定的目标函数和约束条件,以实施拓扑优化。本文基于变密度法(Solid isotropic material with penalization, SIMP),进行优化由于 HH 结构在受载时会造成胞元壁之间的相互挤压作用,因而定义其载荷施加条件为:固定蜂窝结构的外围轮廓,在结构上下表面施加 1 kN 压力。通过设置目标函数为刚度为最大刚度,质量为 30% 约束,进行拓补优化。基于优化后的辅助支撑结构布局,借助中望 3D 软件对拓扑优化完成的蜂窝结构施加尺寸约束,将蜂窝内部尺寸与壁厚关联映射,构建以 HH 结构为基础的拓扑优化物理模型,即平面增强蜂窝结构(BPEH),其中构造方案如图 3 所示。

(3)点阵结合设计。点阵结构可通过合理设计微小单元的形貌、尺寸及排列方式,在降低结构质量的同时,保持较高的强度和刚度。这使得在宏观尺度较大的结构中,蜂窝结构的局部区域(例如蜂窝结构小室内部或壁面)可运用点阵结构实施放大处理。

融合体心立方(BCC)和面心立方(FCC)点阵,构建 BCCH 与 FCCH 结构,通过对蜂窝结构进行拓扑优化处理,得到壁厚 t_0 等于支撑结构直径 d ,将处理后的支撑结构与 BCCH 结构结合,具体结构设计流程如图 4 所示。

所有模型均控制孔隙率为 80%,通过 Origin 软件拟合壁厚与孔隙率关系,确保建模精度(偏差 $<0.5\%$)。

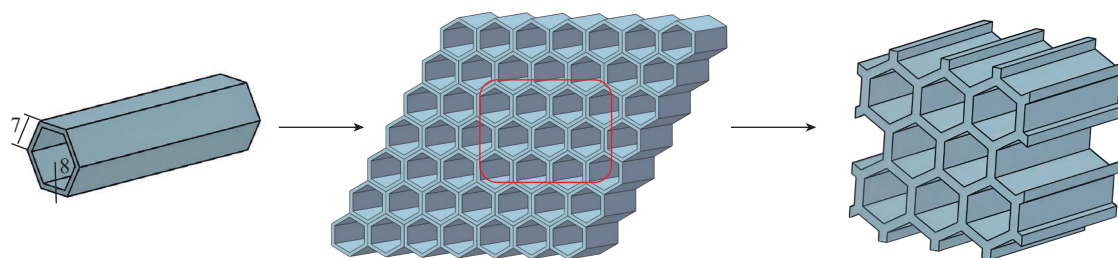


图 1 HH 结构的建模

Fig.1 Modeling of HH structure

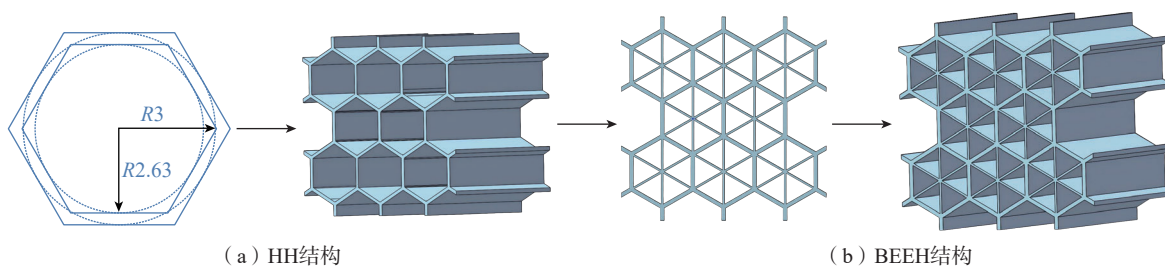


图 2 BEEH 结构设计流程

Fig.2 BEEH structural design process

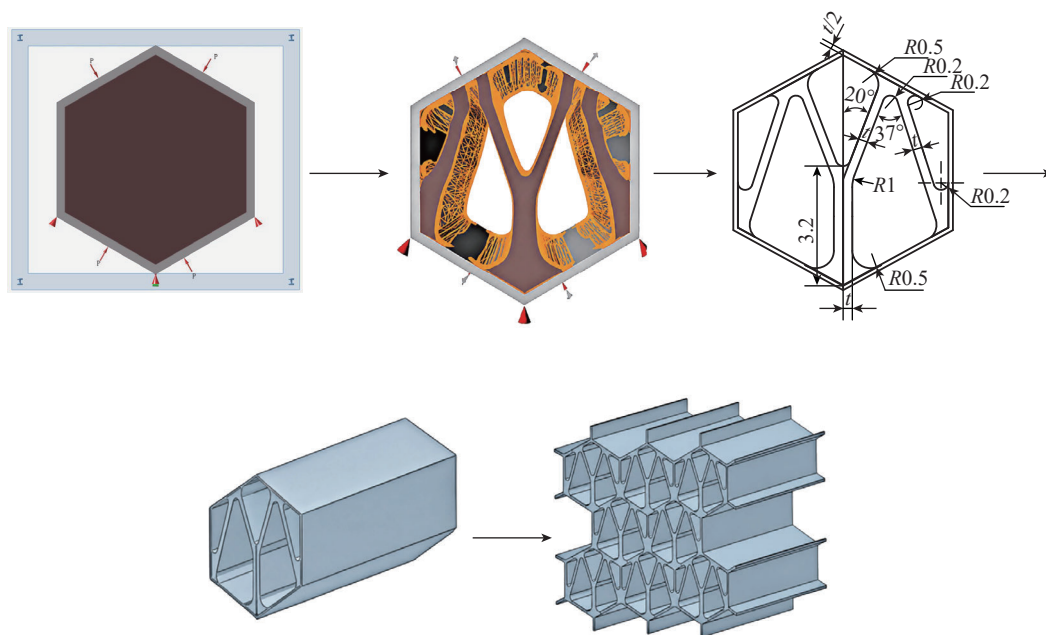


图3 BPEH 蜂窝结构拓扑优化流程
Fig.3 BPEH honeycomb structure topology optimization process

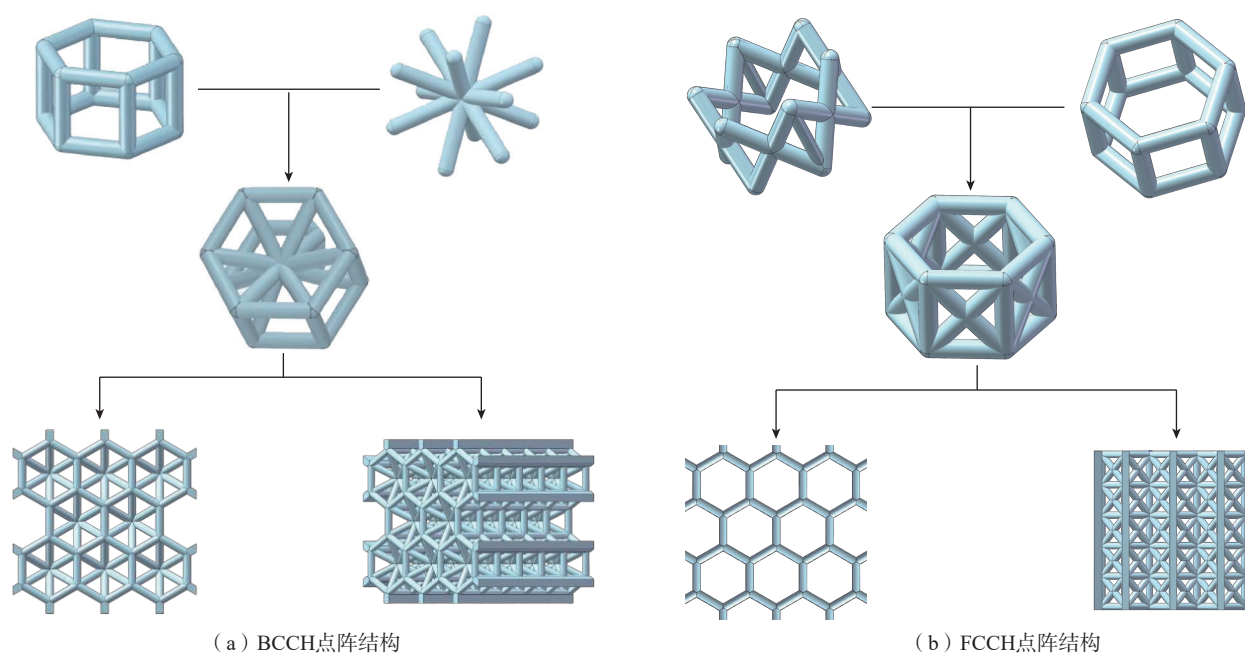


图4 BCCH 和 FCCH 点阵结构蜂窝设计流程图
Fig.4 BCCH and FCCH lattice structure honeycombs design flowchart

图5(a)展示了HH结构控制孔隙率为80%的流程设定。HH结构的壁厚 t_0 范围设定为0.5~1.5 mm。使用中望3D软件对每个壁厚值分别建立20 mm × 20 mm × 20 mm的HH蜂窝立方体模型,并通过软件内置的体积计算功能获取模型的实体体积 V_0 ,进而通过体积 V 与 V_0 的比值计算得出相应的孔隙率,具体计算参数如表1所示。

随后利用Origin软件对HH结构壁厚 t_0 与孔隙率的关联性进行曲线拟合,探究模型孔隙率与壁厚之间的关联性。拟合曲线见式(1),得到高相关系数 $R^2 > 0.99$ 。

$$Y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (1)$$

然后使用Origin软件内置的Level Crossing插件,精准确定图像中80%孔隙率所对应的坐标点,如图5(b)所示。在获取相关坐标点的 X 、 Y 后,导出数据,得出

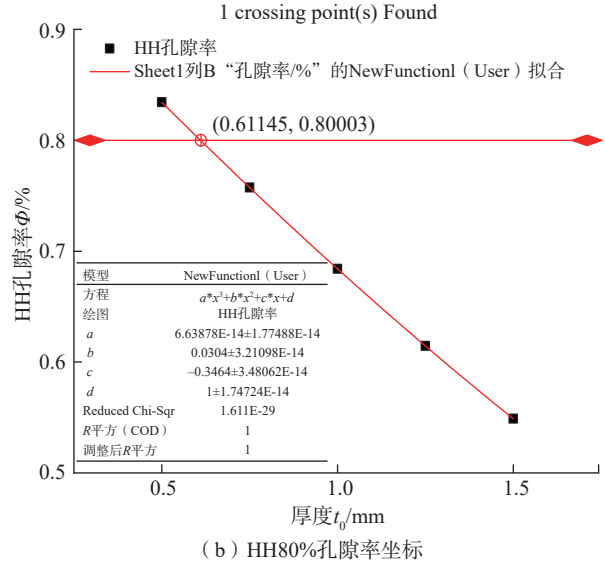
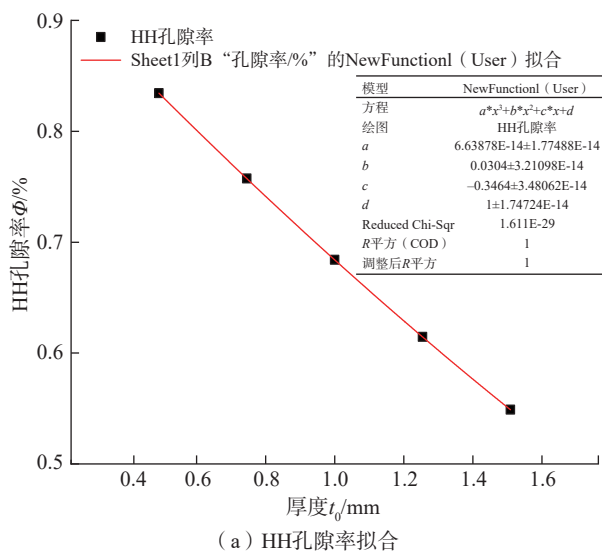


图5 HH 孔隙率拟合曲线及 80% 孔隙率坐标图
Fig.5 HH porosity fitting curve and 80% porosity coordinate chart

表1 不同壁厚 HH 结构的体积及孔隙率
Table 1 Volume and porosity of HH structures with different wall thicknesses

蜂窝类型	壁厚 t_0/mm	体积 V/mm^3	实体体积 V_0/mm^3	孔隙率 $\phi/\%$
HH	0.5	1324.57	8000	0.83442875
	0.75	1941.4		0.7573250
	1	2527.91		0.68401125
	1.25	3084.1		0.61448750
	1.5	3609.99		0.54875125

HH 模型在孔隙率为 80% 时的壁厚值为 t_1 , 以便进行后续的详细分析。

为清晰展示本文研究的 5 种蜂窝结构的编号、名称与设计特征, 将相关参数汇总如表 2 所示。

1.2 增材制造

本文采用江苏威拉里新材料科技有限公司的 GH4169 镍基合金粉末作为研究材料, 粉末粒度范围为 15~53 μm , 化学成分如表 3 所示。

采用易博 IGAM-1 型激光选区熔化设备制备试样, 该设备配备 500 W 光纤激光器, 激光最大扫描速度为 7 m/s, 采用一体式光路系统, 可有效防止移机或振动, 打印件尺寸精度为 $100\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$, 表面粗糙度 R_a 6.3~12.5 μm 之间。试验的成形工艺参数为激光功率 275 W、扫描速度 800 mm/s、扫描间距 0.08 mm, 扫描策略为层间旋转角 90°。增材制造过程如图 6 所示, 在打印之前须对基板进行逐层精细打磨, 确保其表面精度以满足打

表2 试验用 5 种蜂窝结构的编号与设计特征
Table 2 Numbering and design characteristics of five honeycomb structures used in the experiment

编号	结构名称	设计策略	核心特征
T1	原始六边形蜂窝 (HH)	基准结构	正六边形密排, 壁厚控制孔隙率 80%
T2	边缘增强蜂窝 (BEEH)	形状优化	引入等边三角形支撑杆, 加强筋理念
T3	平面增强蜂窝 (BPEH)	拓扑优化	基于 SIMP 变密度法, 生成 H 形对称排列
T4	体心立方点阵增强蜂窝 (BCCH)	点阵结合 (BCC)	融合体心立方点阵, 内部三维传力网络
T5	面心立方点阵增强蜂窝 (FCCH)	点阵结合 (FCC)	融合面心立方点阵, 对称无额外支撑

表3 GH4169 粉末的化学成分(质量分数)
Table 3 Chemical composition of GH4169 powder(mass fraction) %

元素	实测值	元素	实测值
Ni	54.0	Si	0.031
Nb	5.29	Mn	<0.005
Mo	3.11	Cu	0.016
Cr	19.72	Mg	<0.005
Al	0.38	P	0.0094
Ti	1.01	Fe	Bal.
Co	0.16	B	<0.005
C	0.031	S	<0.003

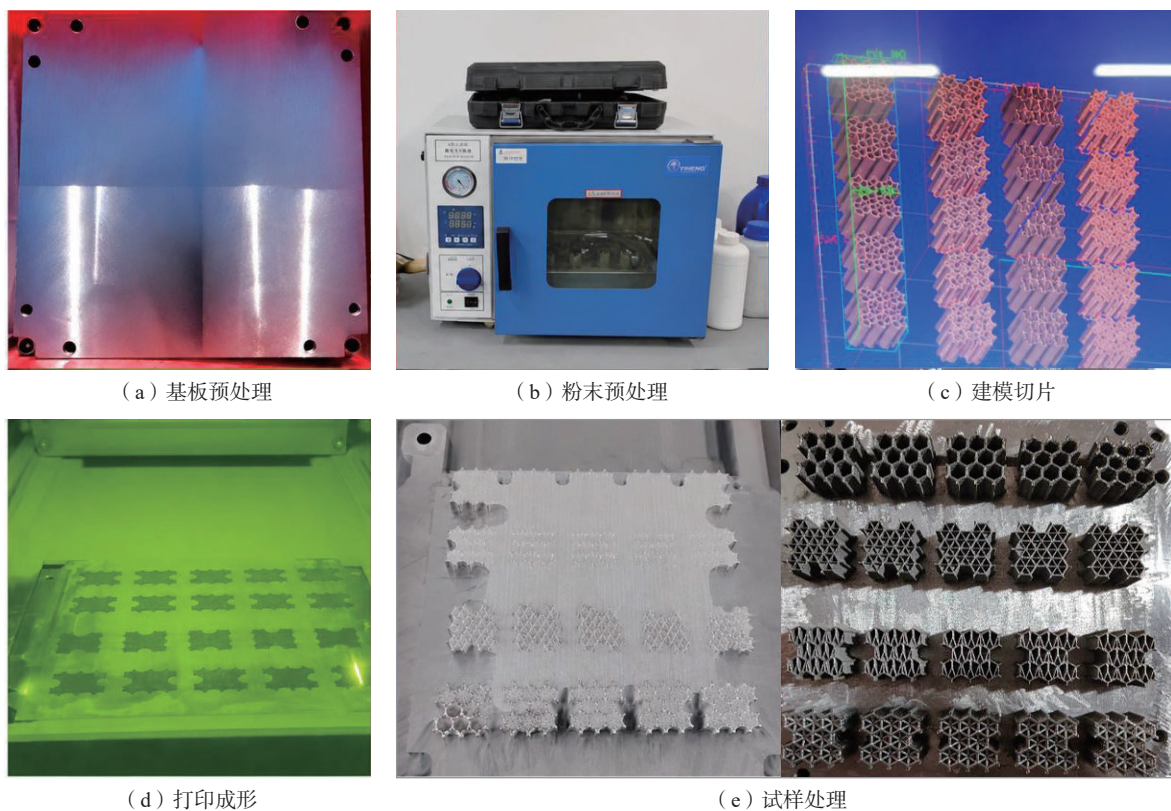


图6 SLM过程

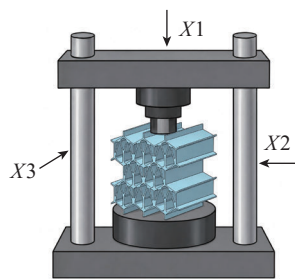
Fig.6 SLM process

印要求;接着将金属粉末放入真空干燥箱中烘干以去除水分,防止打印过程中出现成型质量问题;然后利用三维建模软件构建模型,经切片处理后导入成形设备;打印时须在氩气保护下进行,并实时观察成形状况,防止试样变形;打印完成后,回收并筛分剩余粉末以供再利用,试样经线切割从基板取下后,使用超声波清洗去除表面残留污渍与粉末。

采用图7(a)所示的DDL100电子万能试验机对制备好的试件进行室温三向压缩试验,压缩方向如图7(b)所示,每种结构共制备3个样件,分别用于 X_1 、 X_2 、 X_3 3个方向各1个样件的单次压缩试验,为尽可能保证数据可靠性,在测试前对所有样件进行了严格的外观与尺寸筛选,确保同组结构的一致性。试验在位移控制模式下进行,加载速率设定为2 mm/min,以确保准静态条件。试样安装于试验机两刚性压盘之间,安装时通过调节以确保受压面平行并对中,随后在试样与压盘初始接触点(预载荷约为0.1N)对力与位移传感器进行清零。压缩过程持续至载荷进入急剧上升的致密化阶段为止。试验过程中,设备同步采集载荷-位移数据,并通过计算工程应力与工程应变获得材料的压缩应力-应变曲线。采用图8所示的DSX510显微镜分析微观组织与变形模式。



(a) DDL100电子万能试验机



(b) 压缩方向示意图

图7 压缩试验示意图

Fig.7 Schematic diagram of the compression test

2 结果与讨论

2.1 形貌分析

DSX510显微镜下的平面结构形貌图如图9(a)所示。片状多孔结构在较大倾角位置,由于散热条件差和热积累效应,容易导致熔池温度升高、液相流动性增强,从而使熔池实际宽度大于激光光斑直径。针对多孔试件,通过对实际测量的壁厚与理想状态下的壁厚进行计算可知,实测壁厚均大于理论壁厚。其物理机制在于SLM过程中,激光束扫描时若出现粉末局部熔化,意味

着局部区域吸收了过多能量,导致熔池温度升高、流动性增强。此时,熔融金属的表面张力梯度会引发马兰戈尼对流,促使熔池向外扩展。同时,局部熔化会使周围未熔粉末被卷入熔池,增加了熔池的实际体积,从而在凝固后形成更宽的熔道。因此,局部熔化并非直接“展宽”,而是通过热效应与流体动力学机制间接导致熔池尺寸扩大。

如图9(b)和(c)所示,在垂直于增材方向上,边缘附着的粉尘相较于平行打印方向的附着物更少。这与增材方向及熔池冷却时的热传导机制有关,在SLM过程中,靠近基板的已成形区域散热条件优于上方空

气,热量主要沿Z轴负方向向下传导,导致垂直方向的温度梯度大于水平方向。同时,重力作用使熔池内的液态金属有向下流动的趋势,部分未熔化的粉末颗粒更容易粘附在垂直表面的熔池边缘。两方面共同作用导致平行于增材方向的粉末附着物更多,平行增材方向的尺寸偏差大于垂直方向。

在每个结构的同一切片位置上,分别测量平行于增材方向和垂直于增材方向的实际壁厚,各取3个样本后取平均值,计算与理论壁厚的偏差,结果如表4所示。

2.2 力学性能对比

在力学性能方面,BCCH结构于X1方向的弹性模量

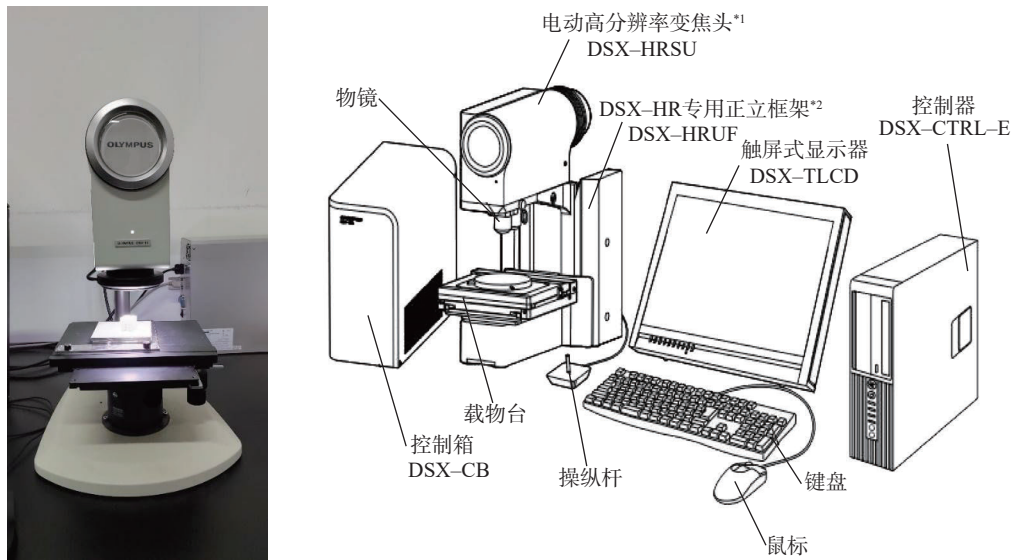


图8 DSX510 显微镜
Fig.8 DSX510 microscope

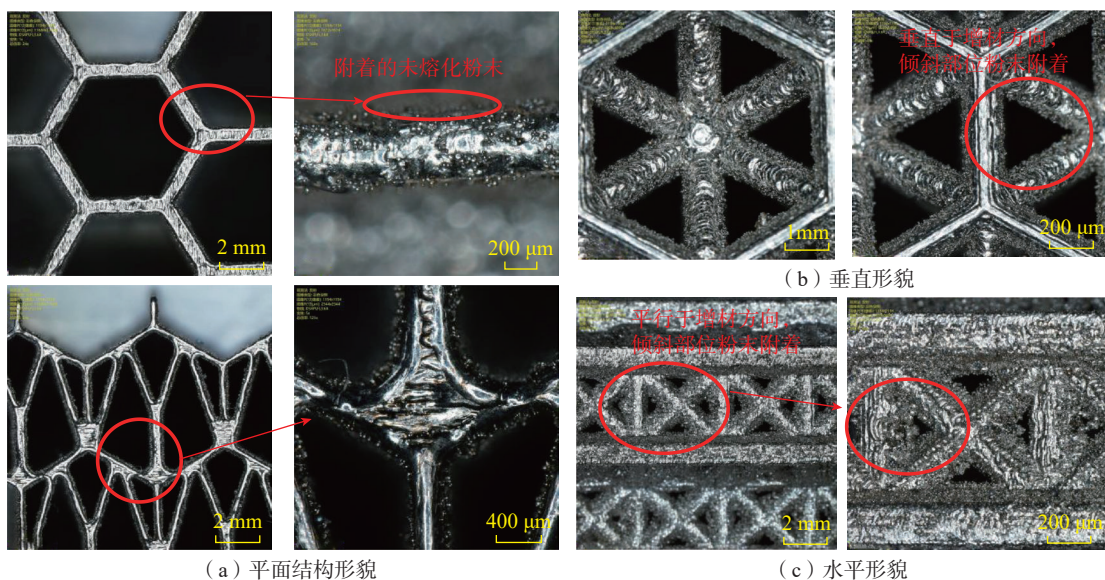


图9 DSX510 显微镜下形貌图
Fig.9 DSX510 microscope morphology image

为 1187 MPa,相较于 HH 结构提高约 33%;抗压强度达 106.293 MPa,提升约 200%。体心支撑杆构建三维网络,能够有效分散应力,延长屈服平台。如图 10 所示,在 BCCH 结构中,受益于点阵结构的 BCC 结构,在弹性变形阶段,BCCH 结构 3 个方向的弹性模量差异较小,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 方向分别为 1817 MPa、1874 MPa、1851 MPa;

表 4 不同结构两个方向上的壁厚偏差对比

Table 4 Comparison of wall thickness deviations in two directions for different structures

结构模型	理论壁厚 / mm	平行方向实测值 / mm	垂直方向实测值 / mm	偏差比 (平行/垂直)
HH	0.61	0.81	0.74	1.54
BEEH	0.39	0.56	0.47	2.13
BPEH	0.20	0.39	0.33	1.46
BCCH	0.41	0.91	0.60	2.63
FCCH	0.44	0.93	0.57	3.77

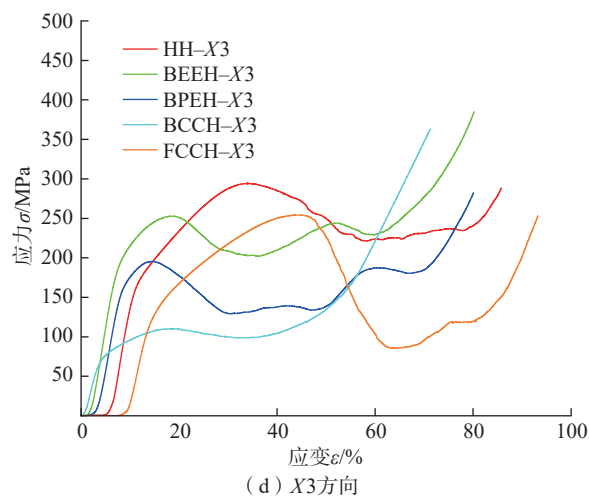
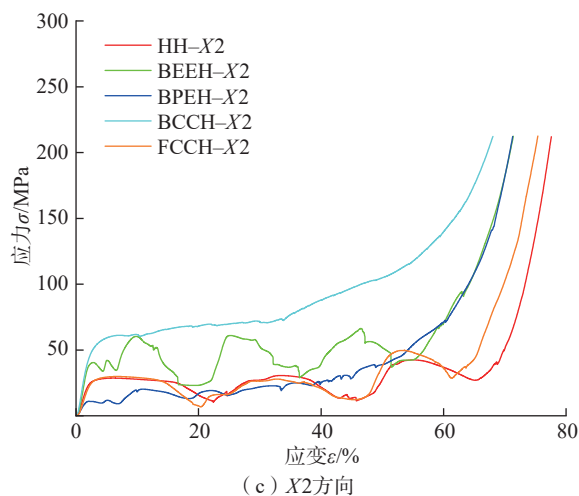
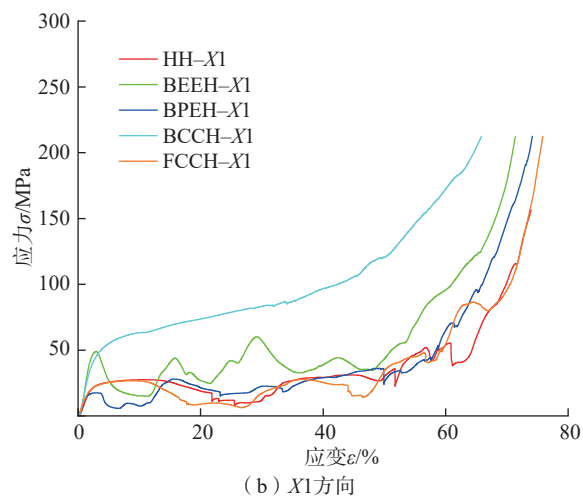
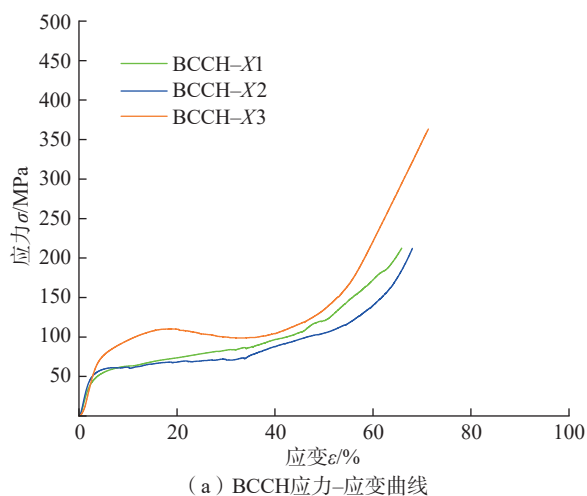


图 10 BCCH 结构应力-应变曲线及各向结构对比

Fig.10 BCCH structure stress-strain curve and comparison with other structures

在塑性变形阶段, X_3 方向因建模需求,在结构四周设置 Z 轴加强立柱,使其受力为 110.19 MPa,高于 X_1 、 X_2 方向。在 X_1 方向上,由于蜂窝结构胞元的排列,整体结构呈“X”形状;而在 X_2 方向上,蜂窝结构上下堆叠呈“H”形状。“X”形状更有助于结构的应力传导,因此 X_1 方向的力学性能优于 X_2 方向的力学性能。其中各结构的最高弹性模量及抗压强度如表 5 所示。

2.3 变形与吸能特性

结构形式的差异会致使其承载能力有所不同,同时也会对结构的失效形式产生影响。当结构承受上表面压应力作用时,结构上表面腔内壁会对该压应力作出响应。压力波会沿着结构腔内壁传播,由于 HH 和 FCCH 结构中不存在支撑杆,这两种结构内的各个胞元所受压力不均衡,中间各胞元在 Z 向的压力值大于左右两侧,最终致使 HH 结构发生形变,呈现“X 对角线”式失效。而 BEEH、BCCH 和 BPEH 结构中存在结构支撑杆,这使得压力波的传递增强,结构内各个胞元所受压力较为

均匀,压力分布相对均衡,进而对结构失效形式产生作用,最终导致 BEEH、BCCH 和 BPEH 结构呈现“上下向中间”字型失效,如图 11 所示。

2.4 吸能效率

能量吸收效率(Energy absorption efficiency, EAE)

表 5 不同结构力学性能峰值

Table 5 Peak mechanical properties of different structures

结构模型	最高弹性模量 E/GPa	最高抗压强度 σ/MPa
HH	2.142 (X3)	294.03 (X3)
BEEH	1.942 (X2)	252.44 (X3)
BPEH	1.667 (X3)	195.09 (X3)
BCCH	1.874 (X2)	110.19 (X3)
FCCH	2.716 (X3)	253.97 (X3)

表示结构在变形过程中实际吸收的能量与理想条件下吸收的最大能量之比。EAE 值越大,表明在相应应力条件下材料的吸能状态越优。在特定变形程度下,材料可达到最佳吸能状态。压缩试验中,能量吸收效率是一项关键的性能指标,其体现了材料在变形过程中吸收能量的能力。吸收能效率(EAE)的计算方式为

$$\text{EAE} = \frac{\int_0^{\varepsilon} F(\sigma) d\varepsilon}{\sigma_{\text{peak}} \times \varepsilon} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\int_0^{\varepsilon} F(\sigma) d\varepsilon$ 为材料变形至应变 ε 时吸收的体积能量密度, J/m^3 或 MJ/m^3 ; σ_{peak} 为对应应变下的峰值应力; ε 为工程应变。EAE 值越高,表示材料的能量吸收效率越优。各结构吸能效率峰值如表 6 所示。

FCCH 借助对称设计达成全方向高效吸能,相较

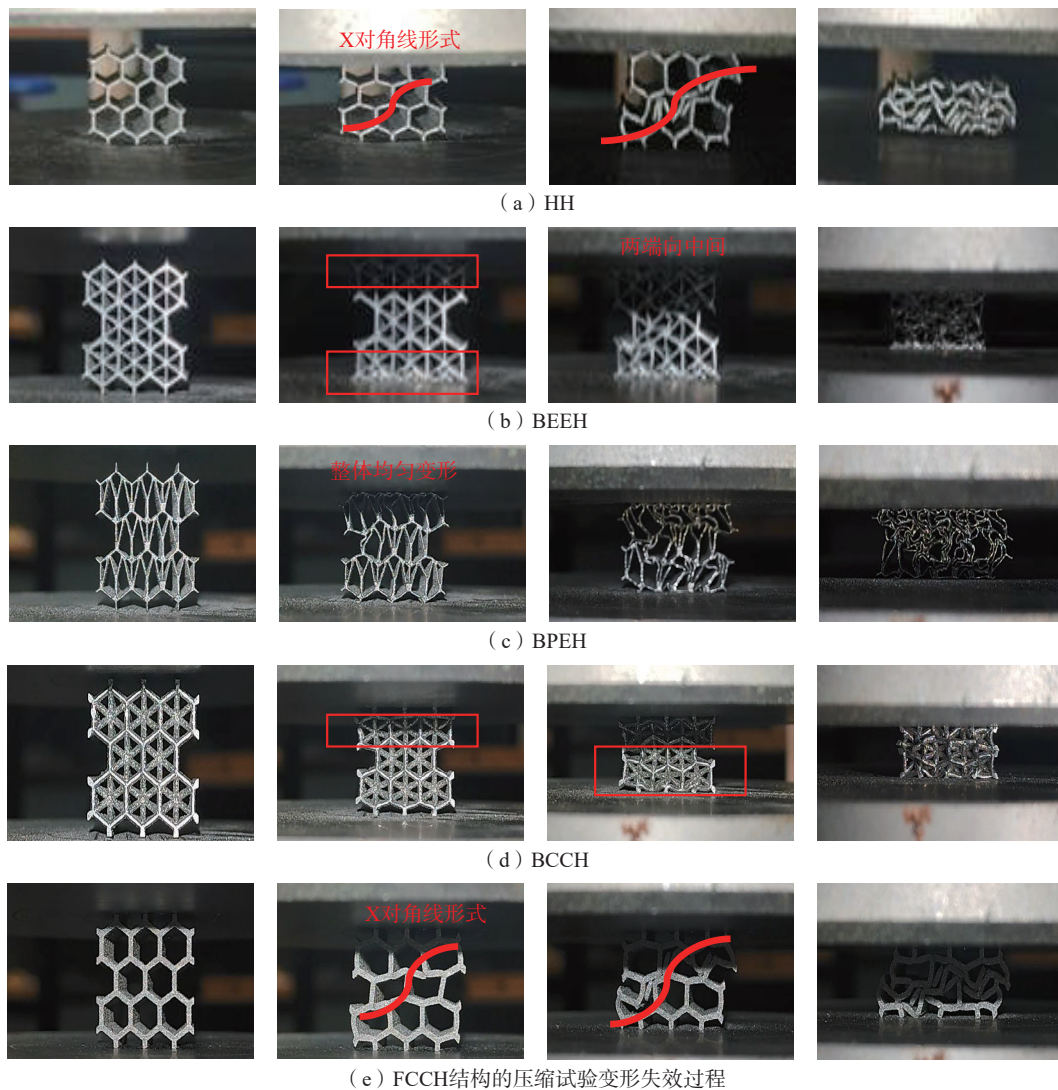


图 11 不同结构压缩试验变形失效过程

Fig.11 Deformation and failure process of compression tests with different structures

于HH结构,其吸能效率提升了25%。如图12所示,FCCH结构的吸能效率展现出全方向高效、高应变优势突出的特点。在X1、X2方向,凭借对称失效模式,在中低应变条件下实现了70%~80%的高效吸能,适用于平面内多向冲击;在X3方向,以超大变形能力在高应变区达到最优,成为轴向极端载荷下吸能的首选结构。其

表6 不同结构各方向吸能效率峰值

Table 6 Peak energy absorption efficiency in various directions for different structures %

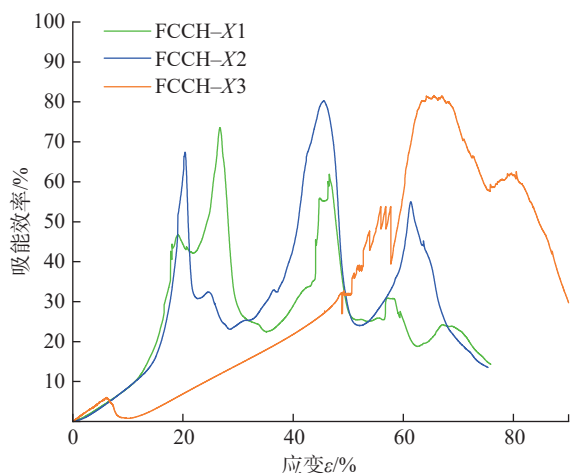
结构模型	X1方向	X2方向	X3方向
HH	70.36	92.60	72.38
BEEH	48.20	61.66	55.28
BPEH	44.21	29.85	55.83
BCCH	32.56	35.47	37.30
FCCH	73.51	80.28	81.60

核心优势体现为无支撑设计所赋予的塑性变形自由度,借助对称坍塌达成能量的均匀耗散。同时,可通过局部增强对低应变弹性性能进行优化。

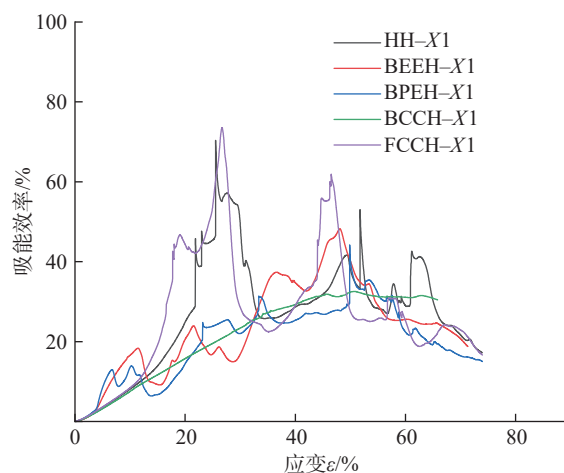
FCCH结构与HH结构在X1、X2方向吸能效率的二维投影基本相同,这是因其蜂窝内部未设置加强支撑结构。在压缩过程中,吸能效率由50%急剧提升至73.51%,此现象与“从对角线胞元逐层失效向对称扩展转变”的变形过程相对应。无辅助支撑的对称“X”形结构促使应力沿对角线实现均匀传递,在每层胞元失效时同步进行能量耗散,进而形成“三峰式”吸能特征,这种结构的吸能效率明显高于含支撑的结构。面心立方(FCC)点阵的对称布局消除了应力集中现象,X1方向的“X”形失效模式使胞元协同变形,能量吸收效率在中低应变区表现卓越。

2.5 不同结构设计对力学性能的影响机理分析

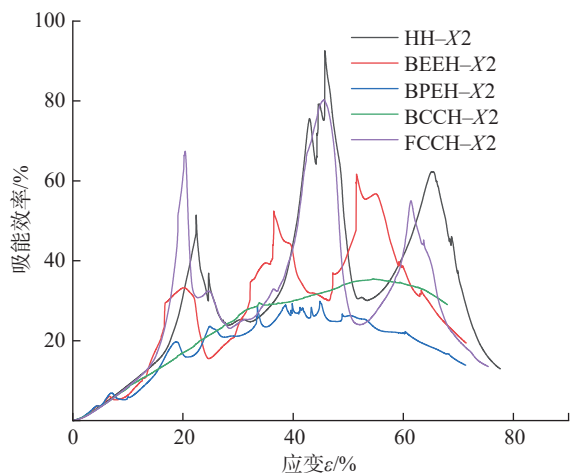
5种结构在等质量条件下的力学性能差异源于应力传递与失效模式的不同调控。无支撑结构(HH、FCCH)



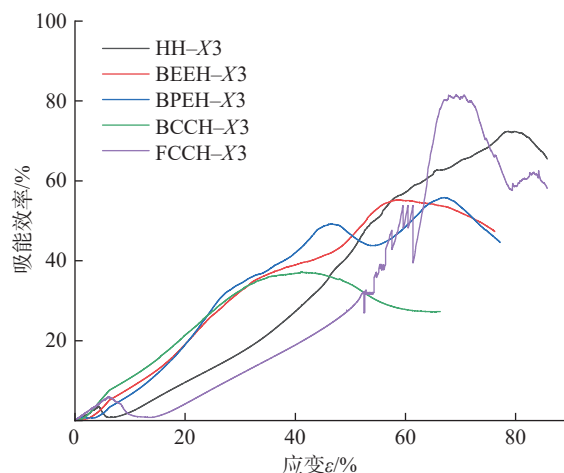
(a) FCCH能量吸收效率



(b) X1方向



(c) X2方向



(d) X3方向

图12 FCCH能量吸收效率及各方向结构能量吸收效率对比图

Fig.12 Comparison charts of energy absorption efficiency for FCCH and various structures under different loading directions

中,压应力沿胞元壁传递,中部胞元因约束较弱率先屈服,引发“X对角线”连锁坍塌,导致弹性模量与强度偏低;FCCH因FCC点阵的对称投影改善了协同变形,吸能效率较HH提升25%。形状优化(BEEH)引入三角形支撑杆,实现“由底层至中层再到顶层”的分层传力与阶梯式失效,弹性模量提升约74%;拓扑优化(BPEH)生成“H”形对称支撑网络,使应力均匀重分布,塑性变形平稳且面内各向同性。点阵结构BCCH通过BCC三维传力网络大幅提升整体刚度(弹性模量约1.85 GPa),体心节点分散应力使屈服强度达HH两倍。 X_1 方向“X”形投影应力路径短于 X_2 方向“H”形,故前者力学性能更优; X_3 方向加强立柱提升了轴向强度但高应变下易局部屈曲。上述机理揭示了设计特征与力学性能的内在关联。

3 结论

本研究通过SLM技术制备了GH4169镍基合金蜂窝多孔结构,结合形状优化、拓扑优化及点阵结构设计方法,获得了5种蜂窝结构,系统分析了其结构特征、力学性能及能量吸收特性,提出了多方法协同增强的设计策略,并揭示了BCC点阵在强度提升与FCC对称结构在吸能优化方面的机制。需要指出的是,本研究仅采用GH4169一种材料、固定工艺参数及准静态压缩工况,尚未涉及动态冲击、疲劳及高温环境。后续应拓展至更多合金体系与工艺窗口,开展多轴、动态及热-力耦合加载试验,同时引入其他点阵类型,结合原位CT与断口分析,建立基于微观失效机理的寿命预测模型,从而推动面向航空实际工况的多功能一体化结构设计。

(1)体心立方(BCC)点阵增强蜂窝(BCCH)结构在力学性能上提升显著。 X_1 方向弹性模量较原始HH结构提高33%,抗压强度提高约200%。其体心支撑杆形成三维传力网络,有效分散了应力并延长屈服平台。各向异性表现为 X_1 、 X_2 、 X_3 方向弹性模量分别为1.817、1.874、1.851 GPa;因建模需要 X_3 方向增设加强立柱,使其抗压强度(110.19 MPa)高于 X_1 、 X_2 方向。面内“X”形投影(X_1 方向)的应力传导效率优于“H”形堆叠(X_2 方向)。

(2)内部支撑设计主导了变形与失效模式。无内部支撑的HH和FCCH结构受压时胞元受力不均,呈“X对角线”式失稳坍塌;而含支撑杆的BEEH、BCCH和BPEH结构能均匀传递压应力,使胞元协同变形,呈现“上下向中间”的层叠式失效模式。

(3)面心立方(FCC)点阵增强蜂窝(FCCH)结构在能量吸收效率上优势突出,整体效率较HH结构提升25%。其无支撑的对称设计赋予充分的塑性变形自由度,

在 X_1 、 X_2 方向于中低应变区即可实现70%~80%的高效吸能;在 X_3 方向依靠大变形能力成为轴向极端载荷下的优选。吸能效率曲线呈典型“三峰”特征,峰值效率达73.51%,对应“对角线胞元逐层失效并向对称扩展”的理想耗能过程。

参考文献

- [1] 吕东, 徐宁宁, 刘会平, 等. 类蜂巢结构在航空发动机中的应用[J]. 航空动力, 2024(2): 45-48.
- LÜ Dong, XU Ningning, LIU Huiping, et al. Application of honeycomb-like structure in aero engine[J]. Aerospace Power, 2024(2): 45-48.
- [2] MANSOUR M T, TSONGAS K, TZETZIS D, et al. The in-plane compression performance of hierarchical honeycomb additive manufactured structures[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 564(1): 012015.
- [3] DU PLESSIS A, RAZAVI S, BENEDETTI M, et al. Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review[J]. Progress in Materials Science, 2022, 125: 100918.
- [4] 刘同明. 考虑热效应的增材制造零件拓扑优化设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- LIU Tongming. Topology optimization design for additive manufacturing parts considering thermal effect [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [5] 蒋国璋, 刘朴湧, 张严, 等. 面向增材制造的新型蜂窝夹芯结构拓扑优化设计[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(4): 134-140.
- JIANG Guozhang, LIU Puyong, ZHANG Yan, et al. Topology optimization design of new honeycomb sandwich structures for additive manufacturing[J]. Powder Metallurgy Industry, 2024, 34(4): 134-140.
- [6] 李佚非, 卢耀辉, 宋承裕, 等. 多层级拓扑策略下车体模态及轻量化优化设计[J]. 机械科学与技术, 2026, 45(2): 308-315.
- LI Yifei, LU Yaohui, SONG Chengyu, et al. Modal and lightweight optimization of railway passenger carbody under multi-level topology strategy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2026, 45(2): 308-315.
- [7] 坎标. 桁架式四旋翼无人机异形机架优化设计[J]. 机械设计与制造, 2024(11): 281-284.
- KAN Biao. Optimal design of novel-shaped frame of truss quadrotor UAV[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(11): 281-284.
- [8] 符成学, 雷小伟, 贾晓飞, 等. 钛合金激光增材制造技术研究与应用进展[J]. 焊管, 2023, 46(8): 11-18, 24.
- FU Chengxue, LEI Xiaowei, JIA Xiaofei, et al. Research and application progress of titanium alloy laser additive manufacturing technology[J]. Welded Pipe and Tube, 2023, 46(8): 11-18, 24.
- [9] JEONG J U, LEE K K, AHN D G, et al. Study of surface roughness change of AlSi10Mg based on selective laser melting (SLM) using electro-polishing technique[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(9): 4579-4585.
- [10] AFKHAMI S, AMRAEI M, UNT A, et al. Metal additive manufacturing for industrial applications[R]. ResearchGate Publication,

2021.

[11] BASKARAN J, MUTHUKANNAN D, SHUKLA R, et al. Manufacturability and deformation studies on a novel metallic lattice structure fabricated by Selective Laser Melting[J]. Vacuum, 2024, 222: 113065.

[12] 梁宽, 刘岩, 赵定国, 等. 激光选区熔化点阵结构 316L 不锈钢性能[J]. 钢铁, 2024, 59(8): 158–168.

LIANG Kuan, LIU Yan, ZHAO Dingguo, et al. Properties of 316L stainless steel lattice structures prepared by selective laser melting[J]. Iron and Steel, 2024, 59(8): 158–168.

[13] 韦雄棉, 王迪, 杨永强, 等. 激光选区熔化钛合金多孔结构拉伸性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802016.

WEI Xiongmin, WANG Di, YANG Yongqiang, et al. Study on tensile properties of titanium alloy porous structure using selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802016.

[14] LESCHOK M, CHEIBAS I, PICCIONI V, et al. 3D printing facades: Design, fabrication, and assessment methods[J]. Automation in Construction, 2023, 152: 104918.

[15] 韦云峰. 激光增材制造金属梯度蜂窝结构的制备及力学性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.

WEI Yunfeng. Preparation and mechanical properties of metal gradient honeycomb structure made by laser additive[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.

[16] 程春龙, 周高林, 渠博, 等. 多孔镁合金制备技术研究进展与展望[J]. 铸造技术, 2025, 46(7): 615–625.

CHENG Chunlong, ZHOU Gaolin, QU Bo, et al. Research progress and prospects of porous magnesium alloy preparation technology[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 615–625.

[17] 齐晓红, 梁晓康, 肖铮, 等. 激光增材制造 Inconel718 骨架增强多孔结构的力学行为[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(11): 31–42.

QI Xiaohong, LIANG Xiaokang, XIAO Zheng, et al. Mechanical behavior of lattice-reinforced porous structures of Inconel718 fabricated by laser additive manufacturing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(11): 31–42.

[18] 甘艺良, 伊明扬, 叶焰杰, 等. 基于选区激光熔化的多孔结构工艺性能研究[J]. 应用激光, 2024, 44(9): 10–18.

GAN Yiliang, YI Mingyang, YE Yanjie, et al. Research on process performance of porous structure based on selective laser melting[J]. Applied Laser, 2024, 44(9): 10–18.

[19] YANG Y, WANG F, LIU J S. Application of honeycomb structures in key components of space deployable structures[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022: 4756272.

[20] 唐映林, 许明三, 韦铁平, 等. 选区激光熔化 316L 不锈钢混合点阵结构压缩性能和各向异性研究[J]. 精密成形工程, 2025, 17(4): 203–216.

TANG Yinglin, XU Mingsan, WEI Tieping, et al. Compressive

performance and anisotropy of hybrid lattice structures of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(4): 203–216.

[21] WANG Z G, LI Z D, ZHOU W, et al. On the influence of structural defects for honeycomb structure[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142: 183–192.

[22] WANG C, TANG S, SUN Z C, et al. Effect of Cu content on microstructure and properties of biodegradable porous Mg-5Zn alloy scaffolds fabricated by SLM[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1049: 185275.

[23] 周翔宇, 徐竹田, 彭林法. FCC 桁架式多孔结构的力学性能研究[J]. 机械强度, 2025, 47(9): 72–79.

ZHOU Xiangyu, XU Zhutian, PENG Linfa. Research on the mechanical properties of FCC truss lattice structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(9): 72–79.

[24] 门玉涛, 刘鹏, 胡白冰, 等. 基于 Voronoi 原理的梯度多孔结构扭转与压缩疲劳性能仿真研究[J/OL]. 天津理工大学学报, 1–9. https://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=7203086239&from=Qikan_Search_Index.

MEN Yutao, LIU Peng, HU Baibing, et al. Simulation study on torsional and compressive fatigue properties of gradient porous structures based on Voronoi principle[J/OL]. Journal of Tianjin University of Technology, 1–9. https://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=7203086239&from=Qikan_Search_Index.

[25] ZHANG L, LIU B, GU Y, et al. Modelling and characterization of mechanical properties of optimized honeycomb structure[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2020, 16(1): 155–166.

[26] 李宗书, 刘文涛, 潘勤羲, 等. 激光粉末床熔融多孔 CM247LC 镍基高温合金的组织及力学性能[J]. 粉末冶金工业, 2025, 35(4): 92–100.

LI Zongshu, LIU Wentao, PAN Qinxi, et al. Microstructure and mechanical properties of laser powder bed fused porous CM247LC nickel-based superalloy[J]. Powder Metallurgy Industry, 2025, 35(4): 92–100.

[27] 李聪, 肖欣悦, 陈荐. 多孔金属材料的抗蠕变性能研究进展[J]. 机械强度, 2025, 47(7): 1–13.

LI Cong, XIAO Xinyue, CHEN Jian. Research progress in the creep resistance of porous metal materials[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(7): 1–13.

[28] 马进宣. 航空用镍基高温合金钎焊连接工艺优化研究[J]. 焊接技术, 2025, 54(11): 58–61.

MA Jinxuan. Research on the optimization of brazing connection process of nickel-based superalloy for aviation[J]. Welding Technology, 2025, 54(11): 58–61.

(责编 晓月)