https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20250336

激光选区熔化成形蜂窝嵌套晶格结构的压缩变形性能及微观组织研究

刘 征[1]，查正书[1]，彭 聪[1]，张文玮[2]，陈 孟[2]，罗 乐[2]，张 琦[2]
（1. 南昌航空大学 材料科学与工程学院，江西 南昌 330063）
（2. 中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司，贵州 贵阳 550000）

摘 要：将3种桁架杆单元晶格结构嵌套在蜂窝空腔内，从而得到新的蜂窝嵌套晶格结构。以AlSi10Mg粉末为材料，采用激光选区熔化成形（SLM）技术制备蜂窝嵌套新型bcc晶格结构（HC-N-bcc）、蜂窝嵌套对称杆晶格结构（HC-SP）、蜂窝嵌套新型萤石晶格结构（HC-N-F）和空蜂窝结构（HC-E）不同相对密度的试样，并对其进行侧面压缩力学性能测试、宏微观变形机制和能量吸收分析。结果表明：蜂窝嵌套晶格结构侧面压缩性能大幅优于空蜂窝结构，在46%相对密度下，HC-SP结构的压缩模量和峰值应力比HC-E高43%和44.7%，在应变50%下，其能量吸收值（E_A）和破碎力效率（CFE）分别是HC-E的7.7倍和5.3倍。当桁架杆单元晶格嵌入蜂窝空腔后，使得蜂窝外壳从瞬间破碎变形变成缓慢均匀变形，这极大改善了蜂窝结构的压缩稳定性。同时，桁架体积占整体结构的占比越大，蜂窝嵌套晶格结构的性能提升效果越好。

关键词：激光选区熔化成形；蜂窝嵌套晶格结构；微观组织；力学性能；变形机制
中图法分类号：TB383；TG665 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2026)11-2802-10

1 引 言

多孔晶格结构[1]具有轻质、缓震、吸能等特性[2–4]，故其在航空航天、生物医药、桥梁建筑等领域[5–7]被广泛应用，但受限于古代制造工艺和制造水平，人类最初对晶格结构的认识主要停留在简单的几何结构以及自然界的拓扑晶格结构[8]，例如最常见的蜂窝结构。

传统制造晶格结构的方法有熔模铸造[9]、丝织法[10]、发泡法[11]、粉末冶金法[12]等，然而传统方法在制造多孔晶格方面具有复杂的生产流程，极大限制了晶格结构的发展和应用。激光选区熔化成形[13]（selective laser melting，SLM）是一种通过高能激光束按照三维数字模型逐层选择性熔化金属粉末，最终成形高精度、高致密度金属零件的加工方法，SLM在生产复杂几何结构时具有高的灵活性，能够达到近净成形[14]，摆脱了结构设计的束缚，为高质量的晶格结构提供了精确的制造模式。

自然界的部分生物材料结构[15–17]在经过长时间的迭代升级后具有独特的力学和机械性能，对于研究者有着意想不到的研究价值，微孔结构已成功应用于各种薄壁结构的开发[18–21]。Hu等[22]设计了新型仿生蜂窝管状嵌套结构（BHTNS），其侧面破碎作用下BHTNS的能量吸收性能要远优于普通蜂窝结构。Nian等[23]设计了一种新型仿生蜂窝圆管结构（BGHCT），其侧面吸能效果特性相较于传统蜂窝结构提高了89.7%。

不同类型的晶格结构有着不同的机械性能，通过将不同晶格结构进行混合嵌套设计[24]能够融合单一结构各自的优点。Bhat等[25]设计了一种由板状晶格和杆状晶格共同组成的“嵌套晶格结构（NLS）”，该结构结合了2种不同类型晶格的优点，提高了结构的稳定性和压缩性能。Yin等[26]设计了一种新型混合层叠晶格结构（octet嵌套TPMS结构），该结构比octet结构和TPMS结构具有更好的能量吸收性能和耐撞性。

蜂窝结构因其优异的机械性能和轻质特性而被广泛使用，它的六边形晶胞通过有效地分配蜂窝框架的应力，使其在正面方向上提供出色的比刚度和比强度[27]。近年来，人们通过修改蜂窝晶胞的传统六边形几何形状来提高整体机械性能，例如凹入式蜂窝结构[28]、负泊松比蜂窝结构[29]、星形蜂窝结构[30]等，虽然这些新型蜂窝结构相对于传统六边形蜂窝结构都不同程度提高了各项力学和能量吸收性能。但是，类蜂窝结构的各向异性导致其在侧面上的压缩特性较差，这种特性很难通过单纯的结构优化来大幅度改善，这主要是由于结构内部存在固有的大空隙，而这破坏了自然界中“封闭填料”的设计原则。自然界的“封闭填料”设计是指具有内在几何稳定性的结构

收稿日期：2025-11-19
基金项目：江西省重点研发计划（20252BCE310037）
作者简介：刘 征，男，1989年生，博士，副教授，南昌航空大学材料科学与工程学院，江西 南昌 330063，E-mail：70950@nchu.edu.cn

配置，其通过减少空隙来优化结构完整性，这种方法用于开发具有混合拓扑性质的晶格结构，突出了母体结构的优势[31]。

几何配置的组合产生了协同机械行为，使其可以通过更均匀地分配应力和增强整体刚度来改变常见的失效模式，这使得混合嵌套晶格结构的变形响应更加一致，结构刚度得到改善。三周期极小曲面结构[32]（TPMS）是加固传统拓扑结构的优秀候选项，因为其光滑的表面大大减少了应力集中区域，从而提供了均匀的应力分布。Rajasingh 等[33]使用 TPMS 结构填充六边形蜂窝构建了蜂窝嵌套晶格结构（HGLS），研究表明，HGLS 结构的变形模式与蜂窝母体结构有显著差异，由于蜂窝内腔复杂的 TPMS 结构使得应力分布得到改善，令 HGLS 结构在正面和侧面压缩中都表现出更好的结构完整性，因此即使在较高的压缩应变速率下也能保持稳定性。

六边形蜂窝结构侧面的力学性能相较于正面差很多，在蜂窝结构的一些特殊应用场景中，侧面极低的抗压强度往往会导致结构的整体失效，应用在飞机机翼和机身蒙皮上的蜂窝结构[34]在飞机行驶过程中会同时受到正面和侧面载荷，而侧面剪切力是导致蜂窝结构发生剪切变形的主要原因[35]，故本次研究旨在寻求对蜂窝结构侧面承载能力进行提高的新方法。相较于 Rajasingh 等[33]在蜂窝内腔嵌套 TPMS 结构，在本研究中，设计了具有内部桁架杆和基于蜂窝外壳的混合晶格结构，称为“蜂窝嵌套晶格结构”。该结构设计更加简单、后续制造更加容易、便于后续喷砂等后处理工艺的进行。

本研究首先阐述了蜂窝嵌套晶格结构的设计流程、增材制造制备工艺，然后在相对密度 46% 的条件下对所有结构试样进行侧面压缩性能、变形机制以及断口微观组织分析，接着分析了相对密度的变化对所有结构性能的影响以及从能量吸收角度阐述了蜂窝嵌套晶格的优势。

2　实 验

2.1　蜂窝晶格结构设计

图 1 为桁架不连贯的蜂窝嵌套晶格。由图 1 可以看出，蜂窝嵌套晶格结构由一个正六边形蜂窝外壳和其内部嵌套的桁架晶格组成。从图 1e 可以看出，如果直接将原始 bcc 晶格嵌套在蜂窝内部会产生内部 bcc 桁架不连贯现象（如图 1e 黄色线框所示），原始萤石晶格亦会出现此类状况。因此，对原始 bcc 晶格和原始萤石晶格进行了改良以确保蜂窝嵌套晶格内部桁架正确连接，如图 2 所示。

本次试样结构类型共 4 种，分别为蜂窝嵌套新型 bcc 晶格结构（HC-N-bcc）、蜂窝嵌套对称杆晶格结构（HC-SP）、蜂窝嵌套新型萤石晶格结构（HC-N-F）和无内部嵌套的

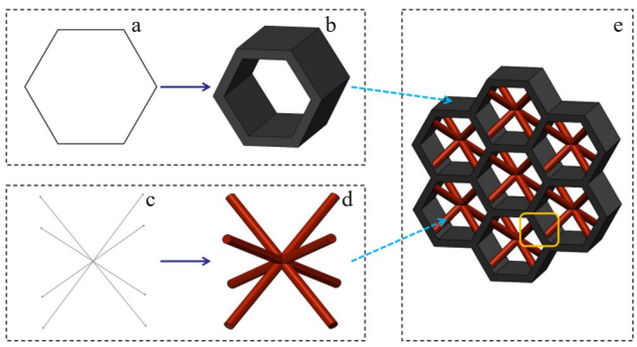


图 1　桁架不连贯的蜂窝嵌套晶格

Fig.1　Incoherent honeycomb-nested lattice of trusses: (a) honeycomb frame; (b) honeycomb structure; (c) bcc line frame; (d) bcc lattice truss; (e) honeycomb-nested primitive bcc lattice structure with insufficient truss connectivity

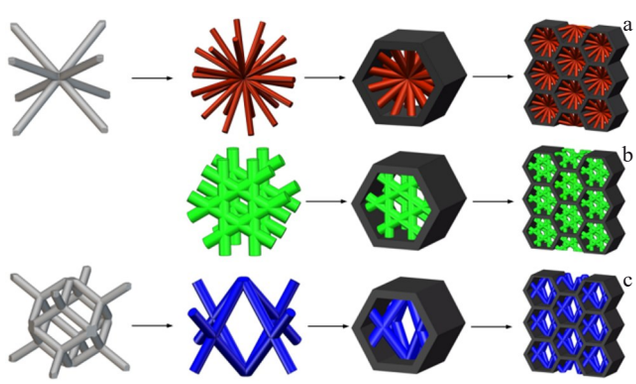


图 2　桁架改良后的蜂窝嵌套晶格结构

Fig.2　Honeycomb-nested lattice structures after the truss amelioration: (a) honeycomb-nested new bcc lattice structure; (b) honeycomb-nested symmetrical rod lattice structure; (c) honeycomb-nested new fluorite lattice structure

空蜂窝结构（HC-E），每一类试样都设置 3 种不同的相对密度，每一种相对密度都设置 3 组平行试样，考虑到 SLM 成形精度及后续结构空腔排粉问题，综合考虑之下实体试样结构的相对密度分别设置为 28%、37% 和 46%。3 种蜂窝嵌套晶格结构通过更改桁架杆径（r）大小来改变试样的整体相对密度，无内部嵌套的空蜂窝结构通过向内改变蜂窝壁厚（t）大小来更改试样的整体相对密度，其他尺寸参数均为固定值，具体如图 3 所示，4 类结构详细的设计参数和尺寸如表 1 所示。

晶格结构相对密度的计算如公式（1）所示：

$$\rho = \frac{V_{\mathrm{E}} + V_{\mathrm{I}}}{V_{\mathrm{S}}} \times 100\% \tag{1}$$

式中，ρ 为相对密度，V_{E} 为蜂窝外壳体积，V_{I} 为桁架体积，V_{S} 为相同维度的实体体积。

2.2　增材制造工艺参数

本研究选取铂力特公司使用电极感应熔炼气雾化技术自产的铝合金粉末 AlSi10Mg 为原材料，粉末的粒径范

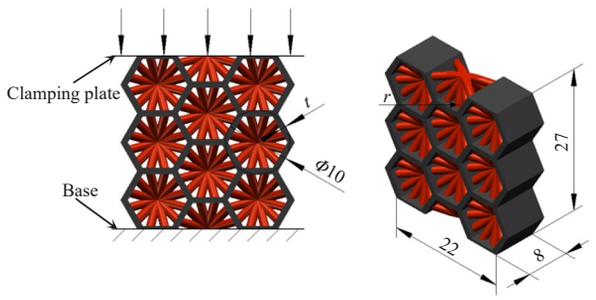


图3 压缩试样尺寸图

Fig.3 Dimensions of the compressed sample

围为18~63 μm，平均粒径大小约为40 μm。选用的加工方式为激光选区熔化成形，使用的设备为铂力特S450激光增材制造生产机，其SLM打印主要参数如表2所示，剩余参数可根据厂家推荐数值自行设定，最终成形的压缩试样如图4所示。

2.3 压缩实验测试方案

压缩实验采用万用拉伸/压缩试验机对实验试样进行侧面准静态压缩测试，试验机基座和压板材质为实体合金结构钢，最大压力为100 kN。本次试验位移加载速度为2 mm/min，通过压缩实验可以得到不同结构样品的应力-应变数据，然后由公式(2)计算得到晶格结构的近似压缩模量(E)。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2}$$

由公式(3)计算得到每个晶格结构的能量吸收值(E_A)。

$$E_A = \int_0^{\varepsilon} \sigma \mathrm{d}\varepsilon \tag{3}$$

由平均应力与峰值应力的比值得到不同结构的破碎力效率(CFE)，如公式(4)所示：

$$\mathrm{CFE} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{max}} \times 100\% \tag{4}$$

式中，σ为结构压应力，ε压缩应变，σ_m为平均应力，σ_{max}为峰值应力。

将试样模型转化成x_t格式并导入到ANSYS软件中进行仿真求解，将材料库中的AlSi10Mg和结构钢并分别赋予给实验体模型、基座和压板模型。根据前人研究[36]，1~0.35 mm的网格尺寸是合适的，故在划分有限元网格时，设置实验体模型的网格尺寸为0.5 mm，网格类型设置为四面体；设置上下两块压板模型的网格尺寸为1 mm，网格类型设置为六面体，固定下压板，使上压板沿Z轴的负方向以2 mm/min的速度移动，在达到50%压缩量停止压缩。

3 结果与分析

3.1 结构和性能分析

图5为相对密度46%时，空蜂窝结构和蜂窝嵌套晶格结构的压缩性能情况。如图5a所示，所有结构的应力在最开始的弹性变形阶段都随着应变的增加而增加，在结构应力达到峰值后的塑性变形阶段，HC-E应力快速归零，而3种蜂窝嵌套晶格结构的应力依然存在，造成这种差异的原因为蜂窝嵌套晶格在蜂窝外壳破碎失效后，内部桁架作为结构支撑可以继续承受压缩应力。

每种晶格结构的压缩模量如图5b所示，HC-SP在所有结构中具有最高的压缩模量，在46%的相对密度下，HC-SP的压缩模量比HC-E提高了43%，这是由于HC-SP在承受压缩载荷时力的方向与内部桁架杆方向一致，一部分原本作用在蜂窝外壳的拉应力被转化为桁架杆的压缩应力。HC-N-bcc和HC-N-F的压缩模量比HC-E分别提高了29.6%和22.8%，其可归因于bcc结构和萤石结构作为弯曲主导的晶格在嵌入到蜂窝空腔后改善了蜂窝结

表1 试样结构数据表

Table 1 Sample structure data table

Serial number	Structural type	Truss rod diameter, r/mm	Shell thickness, t/mm	Shell volume, V_E/mm^3	Truss volume, V_1/mm^3	Total volume, $V_E + V_1$/mm^3	Relative density, ρ/%
1	HC-E	-	1.14	1486	-	1486	28
2	HC-N-bcc	0.5	1	1309	182	1491	28
3	HC-SP	0.56	1	1309	184	1493	28
4	HC-N-F	0.68	1	1309	176	1485	28
5	HC-E	-	1.52	1959	-	1959	37
6	HC-N-bcc	1.00	1	1309	646	1955	37
7	HC-SP	1.15	1	1309	645	1954	37
8	HC-N-F	1.35	1	1309	636	1945	37
9	HC-E	-	1.96	2451	-	2451	46
10	HC-N-bcc	1.4	1	1309	1136	2445	46
11	HC-SP	1.64	1	1309	1135	2444	46
12	HC-N-F	1.88	1	1309	1138	2447	46

表2 SLM打印主要参数

Table 2 SLM printing parameters

Laser power/W	Scanning speed/ mm·s^{-1}	Spot diameter/ mm	Scan spacing/ mm	Powder layer height/ mm
120	1250	0.1	0.15	0.03

构抗压缩变形性能。

图5c对比了不同晶格结构的峰值应力，HC-N-bcc的峰值应力最高，为172.8 MPa，与HC-E相比，HC-N-bcc提高了52.4%的峰值应力，HC-SP和HC-N-F分别比HC-E提高了44.7%和29.8%的峰值应力，从这里可以看出桁架杆的嵌入有效地提升了结构的峰值抗压强度。

结合图5a和图6可以看出HC-N-bcc、HC-SP和HC-N-F与HC-E在塑性变形阶段的变形方式存在不同，Ashby等[37]将晶格结构的塑性变形分为渐进式平滑变形和突然性破碎变形，渐进式平滑变形主要由桁架弯曲主导，从图5a中可以看到作为弯曲主导的HC-N-bcc结构在塑性变形阶段其应力曲线波动幅度相对较小，没有出现应力值大幅度变化的现象。从图6中4种结构25%压缩变形图可以看出，HC-N-bcc的压缩变形最均匀，从结构安全设计的角度来看，渐进式平滑变形始终是晶格结构的首选；另一方面，没有内部桁架支撑的HC-E在塑性变形阶段会发生突然性的破碎变形，从图5a中HC-E曲线可以看出结构应力达到峰值后快速下降并归零，从图

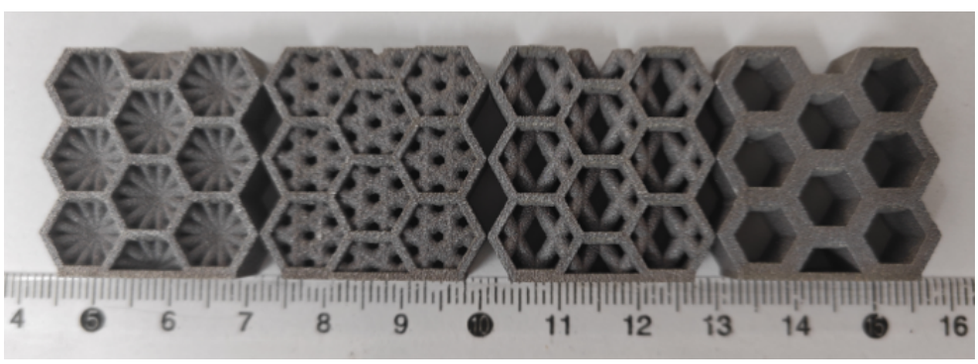


图4 压缩试样实物图

Fig.4 Physical drawing of the compressed sample

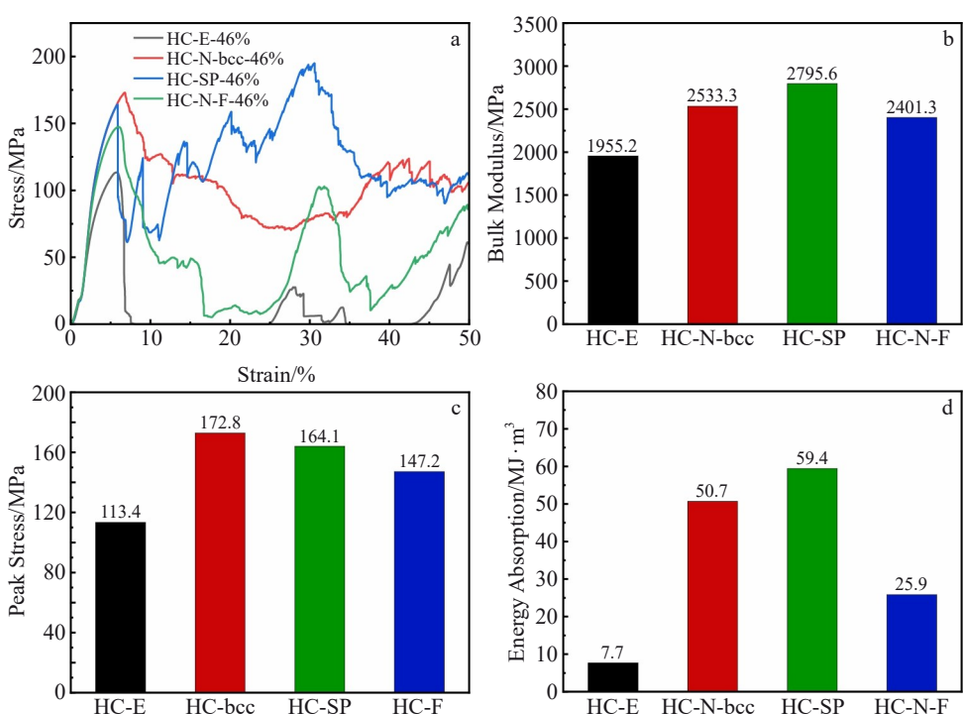


图5 46%相对密度下的空蜂窝结构和蜂窝嵌套晶格结构的功能特性

Fig.5 Functional characteristics of hollow honeycomb structures and honeycomb-nested lattice structures under the relative density of 46%: (a) stress-strain curves; (b) bulk modulus; (c) peak stress; (d) energy absorption

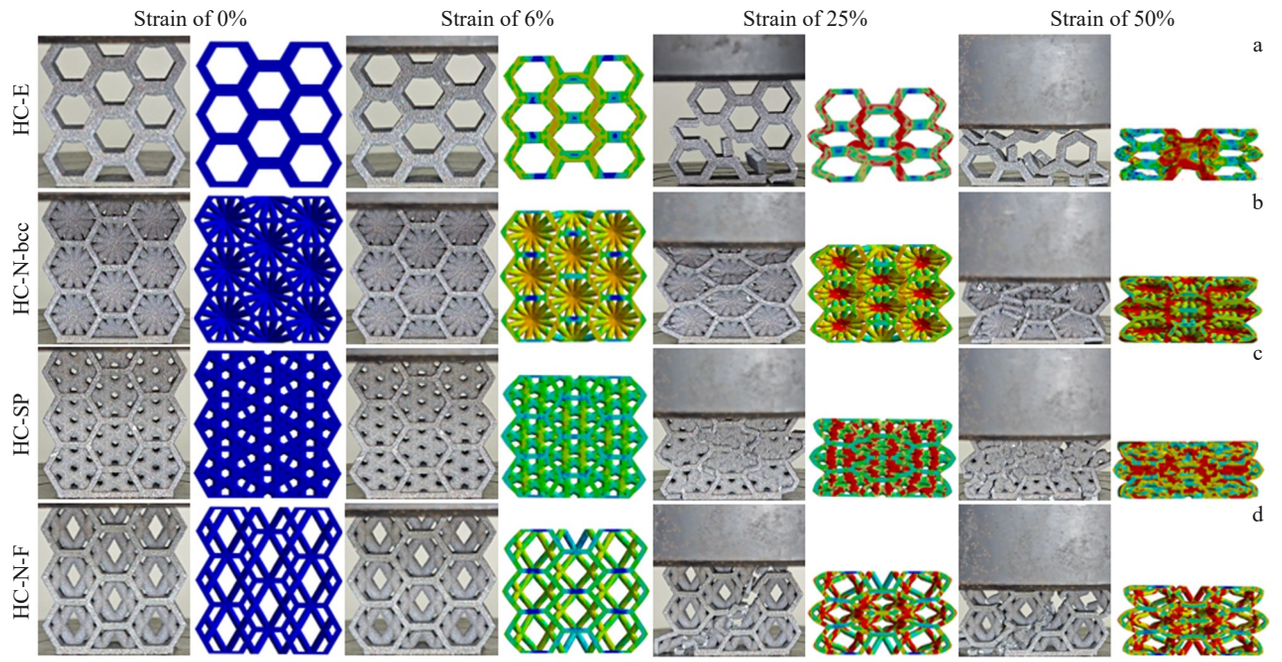


图6 4种结构实物及仿真压缩变形过程图

Fig.6 Physical drawings and simulation images of four types of structures during compression deformation

6a中也可以看出在压缩应变25%时HC-E已经完全丧失结构承载性能。

从图5d中可以看出，所有的蜂窝嵌套晶格结构的E_A都要比HC-E高，HC-N-bcc、HC-SP和HC-N-F的E_A分别是HC-E的6.6倍、7.7倍和3.4倍，这是由于蜂窝嵌套晶格结构内部桁架的存在，使得在结构发生塑性变形破坏时依然具有一定程度的抗压缩性能和能量吸收性能。相比之下Günaydin等[38]所研究的新型凹入式蜂窝结构的E_A值最多只能达到普通六边形蜂窝结构E_A值的2.0倍，而Rajasingh[33]等所研究的蜂窝嵌套TPMS晶格结构（HGLS）的E_A值也只能达到空蜂窝结构（HLS）E_A值的1.7倍。

CFE反映了结构致密化前压缩变形的平稳程度，CFE越高，变形过程越平稳。从表3中可以看出，随着桁架的嵌入，蜂窝嵌套晶格结构的CFE数值成倍增加，HC-N-bcc、HC-SP和HC-N-F的CFE数值分别是HC-E的4.3倍、5.3倍和2.6倍，这表明蜂窝嵌套晶格结构的侧面压缩稳定性要远优于空蜂窝结构。

表3 空蜂窝和蜂窝嵌套晶格结构的性能

Table 3 Properties of hollow honeycomb and honeycomb-nested lattice structures

Property	HC-E	HC-N-bcc	HC-SP	HC-N-F
Bulk modulus/MPa	1955.2	2533.3	2795.6	2401.3
Peak stress/MPa	113.4	172.8	164.4	147.2
Energy absorption/MJ·m^{-3}	7.7	50.7	59.4	25.9
Crushing efficiency/%	13.6	58.7	72.4	35.2

由图6结构应力图可知，在结构屈服点（即应变6%左右）可以观察到应力集中（黄色区域）。随着塑性变形的进行（25%应变），应力开始集中在红色区域，而实物压缩图可以看出在塑性变形阶段，结构的破坏区域同样分布在应力图的红色区域。将图6b~6d与6a相对比可以发现在25%应变的塑性变形下，桁架承担了很大一部分的应力，使得蜂窝外壳的应力值大幅下降，这种现象大大提高了蜂窝嵌套晶格结构的承压性能，同时也从应力分布的角度解释了嵌套桁架对空蜂窝结构的强化机制。

3.2 结构断口微观组织分析

图7为46%相对密度下HC-E蜂窝外壳压缩断口形貌。从图7a和图7b可以看出外壳的断口呈现2种不同断裂形式，上半部分断口表面粗糙呈现灰白色，能观察到韧窝和微孔的存在，下半部分断口表面光滑呈现暗黑色，能观察到河流状花纹，并且二者分界线十分的清晰，从图7c和图7d可以很直观地看出二者在微观组织上的形貌区别。查阅文献[39]后发现，图7a和图7b上半部分粗糙的断口为韧性断裂，下半部分光滑的断口为脆性断裂，整体为韧性和脆性的混合断裂模式。造成HC-E外壳同时出现韧性和脆性断裂的原因为结构在压缩过程中韧性断口处受到外部载荷作用下的拉应力分力，脆性断口受到外部载荷的压应力分力和剪切应力，外壳在变形时由于拉应力的作用而从上半部分产生微裂纹并逐渐演变成韧性断裂，下半部分在压应力和剪切应力的共同作用下应力逐渐累计并在超过剪切强度极限后发生脆性断裂。

图8为相对密度46%下空蜂窝结构和蜂窝嵌套晶

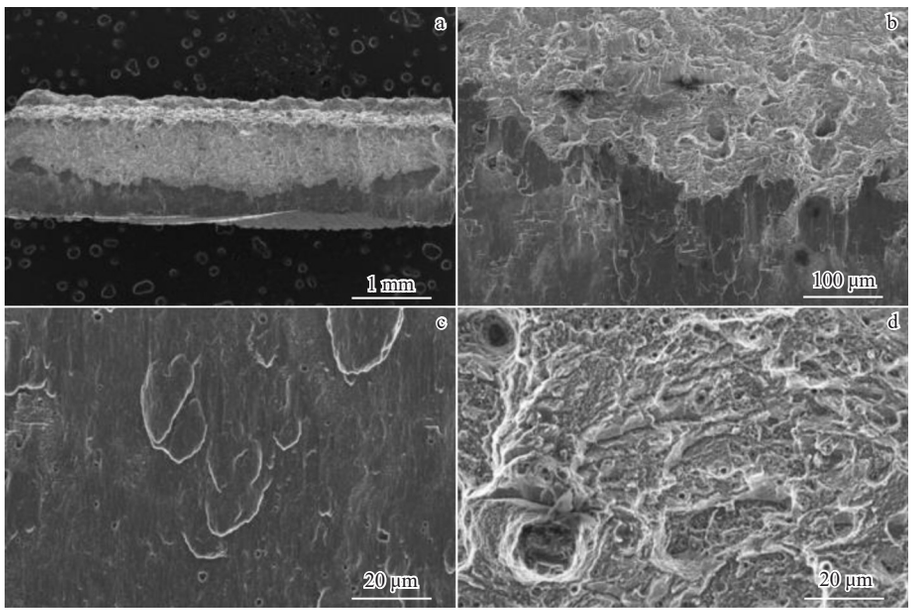


图7 46%相对密度下HC-E外壳压缩断口微观组织

Fig.7 Compression fracture morphologies of HC-E shell under the relative density of 46%: (a) overall fracture morphology; (b) junction image of ductile fracture and brittle fracture; (c) image of brittle fracture; (d) image of ductile fracture

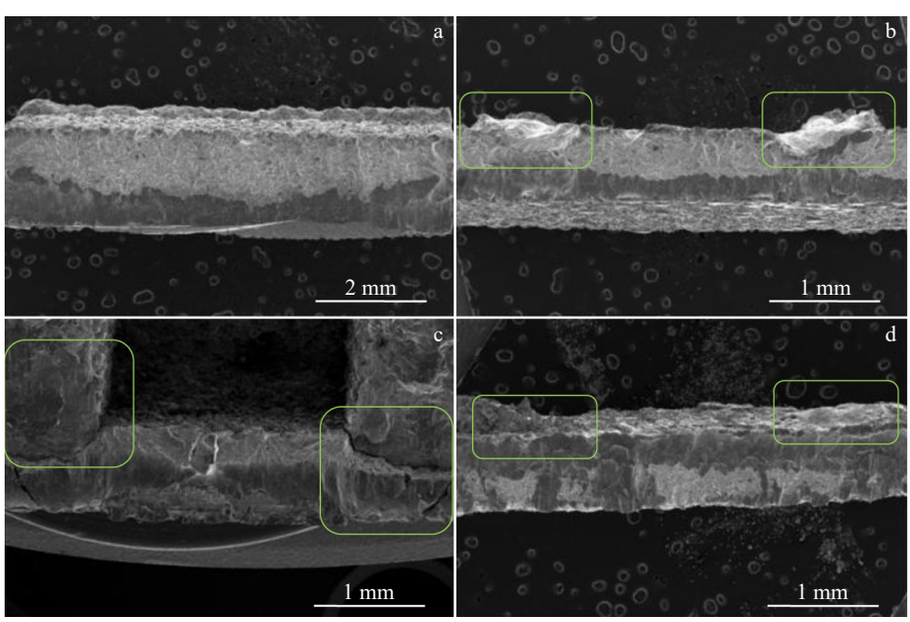


图8 46%相对密度下4种结构蜂窝外壳压缩断口形貌

Fig.8 Compression fracture morphologies of honeycomb shells with four structures under the relative density of 46%: (a) HC-E, (b) HC-N-bcc, (c) HC-SP, and (d) HC-N-F

格结构外壳压缩断口形貌，对比图8a与图8b、图8c和图8d可以看出，3种蜂窝嵌套晶格结构外壳脆性断裂的断口面积占整个外壳横截面的比值相较于空蜂窝结构的比值更大，这说明蜂窝嵌套晶格结构在内部嵌套桁架晶格之后，其外壳承受的拉应力分力变小，承受的压应力分力和剪切应力变大。图8b~8d中绿色方框内为嵌套结构与蜂窝外壳的连接部位，从图中可以看到HC-N-bcc和HC-N-F 2种结构的内部断口只发生在桁架杆上，蜂窝外壳没有出现纵向断口和裂纹，这说明在压缩过程中，这2种结构受剪切应力影响，在桁架杆与蜂窝外壳连接处产生微裂纹并随着压缩的进行而发展成断口。HC-SP结构的内部断口不仅发生在桁架杆与蜂窝外壳的连接处，而且在蜂窝外壳上还存在着纵向裂纹，这说明HC-SP结构在压缩过程中主要受压应力影响，经桁架杆传导的压应力不仅使桁架杆与蜂窝外壳连接处发生断裂，更将蜂窝外壳一并压裂，这说明HC-SP结构具有更高的结构抗压性能。

图 9 为相对密度 46% 下 3 种蜂窝嵌套晶格结构桁架杆的压缩断口形貌，结合图 $9a_1$、图 $9b_1$ 和图 $9c_1$ 可以很清晰地看出所有蜂窝嵌套晶格结构桁架杆的断口为脆性断裂混合着少部分的韧性断裂，对比图 $9a_1$、图 $9b_1$ 和图 $9c_1$ 可以发现 HC-SP 在 20 μm 下的断口面十分光滑，其断裂模式几乎只有脆性断裂，这说明桁架杆在整体结构压缩变形过程中分担承受了很大一部分压缩载荷，而且由于桁架杆与载荷力的方向一致性大于蜂窝外壳，尤其是 HC-SP 有一部分桁架杆更是与载荷力的方向完全一致，这导致该部分桁架杆不受拉应力而只受压应力和剪切应力，使得 HC-SP 桁架杆呈现几乎完全的脆性断裂模式，而这也是 HC-SP 综合抗压缩性能比 HC-N-bcc 和 HC-N-F 更好的主要原因。

3.3　相对密度对蜂窝嵌套晶格结构性能的影响

在 28%、37% 和 46% 的相对密度下，本文研究了相对密度对晶格结构性能的影响，图 10 为不同晶格结构中各项性能随相对密度增加的变化情况。在 28% 的相对密度下，空蜂窝和蜂窝嵌套晶格结构的压缩模量基本相同，约为 1000 MPa，如图 10a 所示。随着结构相对密度的增大，桁架取代蜂窝外壳成为整体结构承压的主导角色，使得晶格结构的抗压能力大幅提高。当相对密度上升到 46% 时，3 种蜂窝嵌套晶格结构的压缩模量比空蜂窝结构的压缩模量高 22.8%~43%。3 种相对密度下通过对 4 种结构的压缩模量进行对比可以清晰地看出相同体积增加的情况下，增大桁架杆直径带来的压缩模量的提升大于蜂窝外壳厚度的增加。

图 10b 为不同相对密度下所有晶格结构的峰值应力。在 28% 相对密度下，空蜂窝与 3 种嵌套晶格结构的峰值应力数值十分接近，这意味着此时的蜂窝嵌套晶格结构内部桁架在抵抗弹性压缩变形时的作用很小，但随着相对密度的上升，桁架对整体结构在抵抗弹性压缩变形时的作用开始显现。当相对密度上升到 46% 时，HC-N-bcc 的峰值应力最大，为 172.8 MPa，相较于 HC-E 提升了 52.4%。由图 10b 表明随着桁架体积在整体结构中占比的增大，蜂窝嵌套晶格结构相较于空蜂窝结构在峰值抗压强度的提升效果会增大。

图 10c 为不同相对密度下晶格结构的 E_A 值。从图 10c 可以看出，在相对密度为 28% 时，3 种蜂窝嵌套晶格结构的 E_A 差异并不大，约为 5 MJ/m^3，桁架对蜂窝结构吸能强化效果也不够明显。但随着相对密度的上升，蜂窝嵌套晶格结构的吸能效果急剧提升，从这里可以直观地看出桁架对于结构吸能性能的提升是巨大的，其极大程度地提升了空蜂窝结构的能量吸收性能。

图 10d 为不同相对密度下所有设计的晶格结构的 CFE。从图 10d 可以看出，在相对密度为 28% 时，空蜂窝和 3 种蜂窝嵌套晶格结构的 CFE 差异并不大，约为 25%。但随着相对密度的增大，蜂窝嵌套晶格结构的 CFE 也同样增大，但空蜂窝结构的 CFE 并没有发生太大的变化。由此可知，空蜂窝结构相对密度的上升不会提高结构压缩稳定性，但增大蜂窝嵌套晶格结构内部桁架杆直径却能大幅度提高结构压缩稳定性。

3.4　桁架类型对蜂窝结构压缩能量吸收性能的影响机制

图 11 为不同相对密度下空蜂窝和蜂窝嵌套晶格结

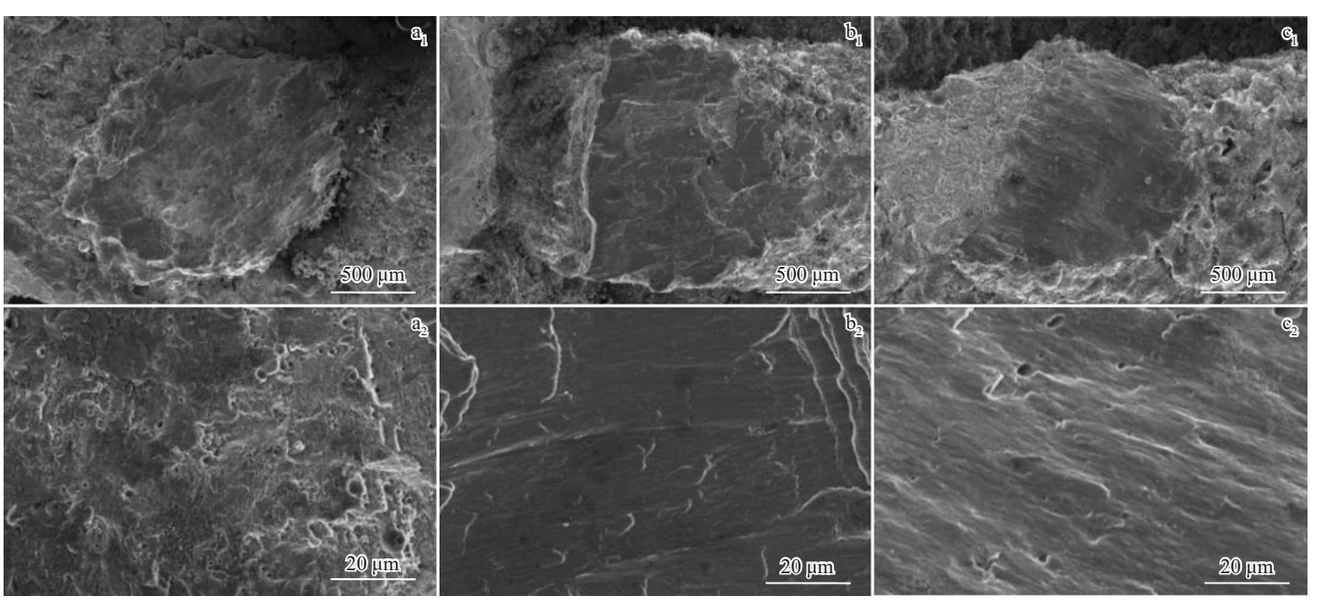


图 9　46% 相对密度下 3 种蜂窝嵌套晶格结构桁架杆压缩断口形貌

Fig.9　Compression fracture morphologies of truss rod with three honeycomb-nested lattice structures under the relative density of 46%: (a_1, a_2) HC-N-bcc; (b_1, b_2) HC-SP; (c_1, c_2) HC-N-F

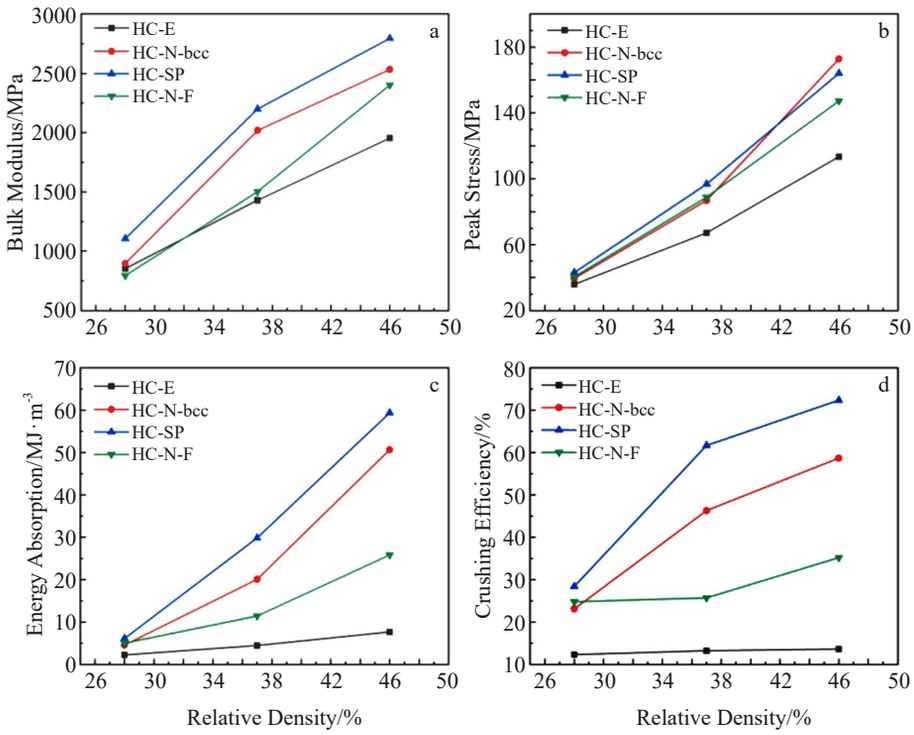


图 10　空蜂窝和蜂窝嵌套晶格结构的力学性能随相对密度的变化

Fig.10 Variations of mechanical properties of hollow honeycomb and honeycomb-nested lattice structures with relative density: (a) bulk modulus; (b) peak stress; (c) energy absorption; (d) crushing efficiency

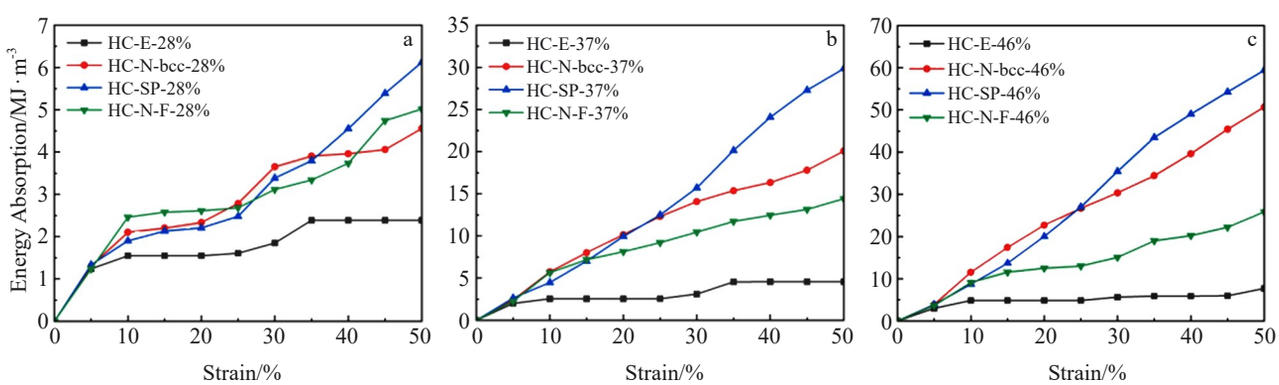


图 11　不同相对密度下空蜂窝和蜂窝嵌套晶格结构的能量吸收随应变的变化关系

Fig.11 Energy absorption of hollow honeycomb and honeycomb-nested lattice structures with strain under different relative densities: (a) 28%, (b) 37%, and (c) 46%

构的能量吸收随应变的变化关系。由图 11 可知，3 种相对密度下 HC-E 的能量吸收数值在 10% 压缩应变之后几乎停止，这说明在 HC-E 在塑性变形破坏的应变点（6%）之后就已经失去了能量吸收能力。同时，在 3 种不同的相对密度下，HC-SP 的能量吸收值都最大。

图 11 中 3 种相对密度下的 HC-N-bcc、HC-SP 和 HC-N-F 的能量吸收数值都随着压缩应变的增加而增加，并且随着结构相对密度的增加能量吸收曲线变得越发平滑。对比图 11a~11c 可以看出，当相对密度为 28% 时，HC-N-bcc、HC-SP 和 HC-N-F 能量吸收曲线波动起伏大，当相对密度增大到 46% 时，3 种结构的能量吸收曲线已经很接近于斜直线。这表明在 46% 相对密度下，蜂窝嵌套晶格结构在塑性变形阶段的能量吸收性能很稳定，在部分蜂窝外壳和部分内部桁架发生断裂破坏后，整体结构大体依旧完整没有完全失效，其依然有着良好的能量吸收能力。

4　结 论

1）嵌套桁架能大幅增强蜂窝结构的侧面压缩性能。在所有相对密度为 46% 的晶格结构中，HC-SP 具有最高的压缩模量，比 HC-E 高 43%，同时 HC-SP 具有最高的 E_A 和 CFE，其数值分别是 HC-E 的 7.7 倍和 5.3 倍；HC-N-bcc

具有最高的峰值抗压强度，其比HC-E高52.4%。

2）嵌套桁架能改变蜂窝结构的压缩变形机制。蜂窝结构内部嵌套的桁架晶格在整体结构压缩过程中承担了很大一部分的压缩载荷，令部分结构的断裂模式由韧性断裂转化成脆性断裂，使得蜂窝嵌套晶格结构在塑性变形阶段呈现均匀且缓慢的变形，没有出现像空蜂窝结构那样瞬间结构完全破碎而丧失承载性能的情况，极大的改善了蜂窝结构压缩变形的稳定性和压缩承载能力。

3）相对密度越大，蜂窝嵌套晶格结构相较于空蜂窝结构的性能提升越大。在相对密度一致的情况下，桁架体积占整体结构的占比越大，蜂窝嵌套晶格结构的性能提升效果越好。

4）不同类型的桁架晶格会影响蜂窝嵌套晶格结构的能量吸收性能。HC-SP是所有蜂窝嵌套晶格结构中能量吸收性能最好的结构，并且随着相对密度的增大，HC-SP相较于HC-E的能量吸收性能提升的幅度也越大。

参考文献 References

[1] Khan N, Riccio A. *Progress in Aerospace Sciences*[J], 2024, 149: 101021

[2] Hanks B, Berthel J, Frecker M *et al*. *Additive Manufacturing*[J], 2020, 35: 101301

[3] Pawlowski P, Stanczak M, Broniszewska-Wojdat P *et al*. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2025, 198: 105216

[4] Yin H F, Zhang W Z, Zhu L C *et al*. *Composite Structures*[J], 2023, 304: 116397

[5] Wang C, Zhu J H, Wu M Q *et al*. *Chinese Journal of Aeronautics*[J], 2021, 34(5): 386

[6] Zhang X Z, Leary M, Tang H P *et al*. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*[J], 2018, 22(3): 75

[7] Alqahtani S, Ali H M, Farukh F *et al*. *Applied Thermal Engineering*[J], 2023, 218: 119366

[8] Niu X Q, Xu F X, Zou Z *et al*. *Composite Structures*[J], 2022, 299: 116064

[9] Purwar U, Javed M A, Vidya S. *Materials Today: Proceedings*[J], 2021, 46: 6704

[10] Sharp K, Mungalov D, Brown J. *Procedia Materials Science*[J], 2014, 4: 15

[11] Ariff Z M, Afolabi L O, Salmazo L O *et al*. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(5): 9929

[12] Xie F X, Sun Q C, Mu Y M *et al*. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2024, 152: 106466

[13] Wang Jiandong(王建东), Guan Yao(管 瑶), Yang Jinshui(杨金水) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2025, 54(1): 126

[14] Li Kangan(李康安), Wan Jie(万 杰), Tang Bin(唐 斌) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(12): 3526

[15] Wang Y, Lu G, Ha N S *et al*. *Composite Structures*[J], 2024, 341: 118201

[16] Sun Z X, Gong Y, Bian Z *et al*. *Thin-Walled Structures*[J], 2024, 198: 111715

[17] Ufodike C O, Wang H, Ahmed M F *et al*. *Materials & Design*[J], 2021, 205: 109736

[18] Tsang H H, Raza S. *Composite Structures*[J], 2018, 195: 199

[19] Duan Y G, Zhang T, Zhou J *et al*. *Composite Structures*[J], 2021, 278: 114637

[20] Hu K M, Lin K J, Gu D D *et al*. *Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 762: 138089

[21] Qi D X, Yu H B, Liu M *et al*. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2019, 163: 105091

[22] Hu D Y, Wang Y Z, Song B *et al*. *Composites Part B: Engineering*[J], 2019, 162: 21

[23] Nian Y Z, Wan S, Li X Y *et al*. *Thin-Walled Structures*[J], 2019, 144: 10626

[24] Zhang J W, Yanagimoto J. *Composites Part B: Engineering*[J], 2021, 224: 109241

[25] Bhat C, Kumar A, Jeng J Y. *Additive Manufacturing*[J], 2021, 47: 102326

[26] Yin H F, Meng F B, Zhu L C *et al*. *Composite Structures*[J], 2023, 303: 116335

[27] Afkhami S, Amraei M, Gardner L *et al*. *Thin-Walled Structures*[J], 2022, 180: 109864

[28] Zhang Wenjuan(张文娟), Liu Yuanqiang(刘远强), Qin Zhengqi(秦政琪) *et al*. *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2026: 43(2): 1226

[29] Qiao Jisen(乔及森), Kong Haiyong(孔海勇), Miao Hongli(苗红丽). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2021: 49(3): 167

[30] Montazeri A, Ahmadian I, Bahmanpour E *et al*. *European Journal of Mechanics A/Solids*[J], 2025, 113: 105709

[31] Raj R, Jiyalal Prajapati M, Tsai J T *et al*. *Materials & Design*[J], 2024, 245: 113268

[32] Wei Qulong(魏取龙), Jiang Lihong(姜丽红), Liu Zheng(刘 征) *et al*. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2025, 46(3): 303

[33] Rajasingh C G G D, Palaniyandi K, Moganraj A. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2025, 36: 9906

[34] Tan Y N, Zhou Y D. *Thin-Walled Structures*[J], 2025, 213: 113223

[35] Li Z D, Wang Z G, Wang X X *et al*. *Thin-Walled Structures*[J], 2020, 157: 107001

[36] Chibani A, Haddad M A N, Boucetta C *et al*. *Applied Thermal Engineering*[J], 2025, 277: 126988

[37] Ashby M F. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*[J], 2006, 364: 15

[38] Günaydin K, Rea C, Kazanci Z. *Additive Manufacturing*[J], 2022, 59: 103076

[39] Martins R F, Branco R, Camacho J *et al*. *International Journal of Fatigue*[J], 2025, 197: 108942

Study on the Compressive Deformation Performance and Microstructure of Laser-Selective-Melted Honeycomb-Nested Lattice Structures

Liu Zheng[1], Zha Zhengshu[1], Peng Cong[1], Zhang Wenwei[2], Chen Meng[2], Luo Le[2], Zhang Qi[2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. AECC Guizhou Honglin Aero-engine Control Technology Co., Ltd, Guiyang 550000, China)

Abstract: Three types of truss rod unit lattice structures were nested within the honeycomb cavities to obtain a new honeycomb-nested lattice structure. Using AlSi10Mg powder as the material, samples with different relative densities of the new bcc honeycomb-nested lattice structure (HC-N-bcc), honeycomb-nested symmetric rod lattice structure (HC-SP), new fluorite-type honeycomb-nested lattice structure (HC-N-F), and hollow honeycomb structure (HC-E) were fabricated by the selective laser melting (SLM) technique. Lateral compression mechanical properties, macro-micro deformation mechanisms, and energy absorption analyses were conducted on these samples. The results show that the lateral compression performance of the honeycomb-nested lattice structures is significantly superior to that of the hollow honeycomb structure. At the relative density of 46%, the HC-SP structure exhibits a compression modulus and peak stress that are 43% and 44.7% higher than those of HC-E, respectively. Under the strain of 50%, its energy absorption (E_A) and crushing force efficiency (CFE) are 7.7 and 5.3 times higher than those of HC-E, respectively. When truss unit lattices are embedded in the honeycomb cavities, the honeycomb shell deforms gradually and uniformly instead of fracturing instantly, significantly improving the compressive stability of the honeycomb structure. Furthermore, the larger the proportion of the truss volume in the overall structure, the better the performance improvement of the honeycomb-nested lattice structure.

Key words: laser selective melting forming; honeycomb-nested lattice structure; microstructure; mechanical properties; deformation mechanism

---

Corresponding author: Peng Cong, Ph. D., School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: 70920@nchu.edu.cn