

FCC桁架式多孔结构的力学性能研究

周翔宇^{1,2} 徐竹田^{1,2} 彭林法^{1,2}

(1. 上海交通大学 上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室, 上海 200240)

(2. 上海交通大学 机械系统与振动全国重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为了探究结构参数关键因素对多孔结构屈服强度和屈服行为的影响,制备了面心立方(Face Center Cubic, FCC)多孔结构,研究了桁架式多孔结构材料的力学强度与变形失效。构建了有限元仿真模型,分析了不同尺寸参数结构的屈服强度与失效形式,揭示了不同加载方向下单元杆件尺寸对FCC多孔材料逐层塌陷失效与整体屈服失效的转变关系。研究表明,细长比小的结构表现出整体屈服模式,反之表现为逐层压缩的屈服模式;此外,沿面对角线承载的材料能够获得更加均匀的整体变形模式,沿体对角线承载的材料局部变形更为明显。

关键词: 有限元分析; 多孔结构; Gibson-Ashby模型; 逐层塌陷; 失效形式

中图分类号: TB31 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.09.006

0 引言

多孔结构材料是一类内部含有孔隙网络的轻质结构材料,因其独特的微观几何设计与结构特性,近年来受到了工程和学术界的广泛关注^[1-4]。桁架式多孔结构作为多孔结构中的一种典型代表,其单元由规则排布的细长杆件构成空间网络结构,这种结构能够有效优化载荷在材料内部的传递路径,大幅提升材料的结构效率和整体性能。桁架式多孔结构表现出一系列独特的功能特性,包括优异的能量吸收能力^[5]^[106101]^[6]、高效的热学性能^[7-8]以及良好的减振和降噪效果^[9]等,使其广泛应用于航空航天^[10-12]、能源工程^[13-14]、生物医疗^[15]^[16]^[109595]等领域。

多孔结构在实际应用中,压缩性能尤为关键,压缩性能的优化不仅直接关系到材料的极限承载能力和结构整体的稳定性,还对材料在实际服役环境中的表现有显著影响。良好的压缩性能增强材料的抗冲击能力和能量吸收能力,在新能源车辆碰撞保护^[17-18]以及航空航天结构抗冲击^[19]^[119230]设计中起着不可或缺的作用。桁架式多孔材料的压缩性能主要受到结构中杆件的变形模式影响,不同的变形机制决定了结构的整体屈服行为与能量耗散能力。此外,晶格单元的尺寸、杆件的细长比、节点连接方式及整体排布方式

等也会显著影响其压缩响应特征。合理设计桁架式多孔结构的几何参数,调控其变形主导机制,是提升其压缩性能的关键路径。DONG^[20]通过组装焊接方法制备了华伦桁架结构和八面体桁架结构并研究了其压缩力学行为,结果表明,桁架失效模式的临界细长比不同导致2种结构出现了不同的坍塌模式。WANG等^[21]在研究中发现调整桁架结构的基本厚度尺寸,可以有效控制材料的压缩弹性性能和初始变形模式。SUN等^[5]^[106101]基于准静态压缩试验和有限元仿真分析了杆件轴向、弯曲混合变形模式对材料刚度和强度的影响,发现适当调整杆件变形方式可以使材料表现出更均匀和稳定的变形模式,改善材料屈服后的应力波动现象。SONG等^[19]^[119230]分析了简单立方和体心立方等结构中关键尺寸参数对压缩力学性能的影响,发现增加边长可提高等效弹性模量,比能量吸收呈峰谷模式,并伴随早期失效的趋势。相反,增大梁直径可以提高弹性模量和比能量吸收,尽管应力-应变响应中的波动会增大。然而,关于桁架式多孔结构的讨论主要集中在材料的弹性模量与能量吸收方面,结构参数等关键因素对屈服强度和屈服行为的影响仍需进一步明确。

迄今为止,在桁架式多孔材料的研究中,多数学者使用基于激光的增材制造(Laser-Based Addi-

收稿日期: 2025-06-09 修回日期: 2025-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52225504, 52422509)

作者简介: 周翔宇,男,1999年生,河南信阳人,在读博士研究生; 主要研究方向为金属多孔结构材料弹塑性力学行为; E-mail: sjtuzhouxy@sjtu.edu.cn。

彭林法(通信作者),男,1977年生,江苏常州人,博士,教授,博士研究生导师; 主要研究方向为微细成形与新能源装备制造; E-mail: penglinfa@sjtu.edu.cn。

引用格式: 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.

tive Manufacturing, LBAM)方法制备具有复杂结构的多孔材料,包括面心立方(Face Center Cubic, FCC)^{[22][104425][23]4599-4613[24]}、体心立方(Body Center Cubic, BCC)^{[22][104425][23]4599-4613[25][26]108076[27]}、钻石结构(Diamond)^[28]、八面体结构(Octahedron, OCT)、十四面体结构^{[26]108076}等多种拓扑结构。然而,由于激光的高功率与反射特性,适用的金属材料相对较少且材料内部存在显著的热应力。与 LBAM 相比,金属粉末黏结-烧结方法具有更高效、成本低与使用材料广泛等优势^[29-30]。为了扩展粉末黏结-烧结技术的应用,有必要进一步探索基于该方法制备的桁架多孔结构材料。

本研究采用黏结剂喷射增材制造(Binder Jet Additive Manufacturing, BJAM)技术制备 FCC 型桁架多孔结构材料,探讨其在单轴压缩载荷作用下的力学特性,通过试验测试与数值模拟相结合,研究不同结构参数的 FCC 桁架多孔结构材料的变形行为与失效机制,以揭示材料压缩性能提升的内在机制,为多孔结构的设计与优化提供理论依据和技术指导,进一步推动此类材料在高性能轻质结构领域的广泛应用。

1 材料与方法

1.1 材料与制备方法

本文使用 316L 不锈钢粉末制备多孔结构材料,成分参数如表 1 所示。多孔结构晶格单元边长为 2 mm×2 mm×2 mm,分别制备了杆件直径为 300 μm 和 500 μm 的压缩试样,记为 C300 和 C500。其中试样整体尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm。采用 ExOne 公司 Innovent+ 金属黏结剂喷射 3D 打印机制备多孔结构材料。打印后的试样在 180 °C 环境中保温 360 min 直至黏结剂完全固化,并清除试样中多余粉末。固化后试样经高温烧结后即可获得多孔结构材料,烧结曲线如图 1 所示。

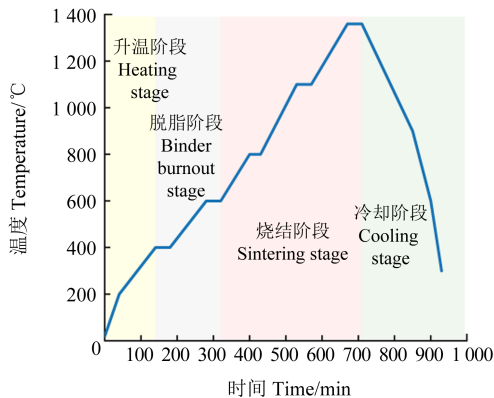


图 1 多孔结构材料高温烧结曲线

Fig. 1 High-temperature sintering curve of FCC porous structural materials

表 1 316L 不锈钢粉末主要化学成分

Tab. 1 Main chemical composition of 316L stainless steel powder %

| C | Si | Mn | Ni | Cr | Mo | O | Fe |
|-------|------|------|-----------|-----------|----------|-------|---------|
| ≤0.03 | ≤1.0 | ≤0.2 | 12.0~16.0 | 16.0~18.0 | ≤2.0~3.0 | ≤0.15 | 余量 Bal. |

BJAM 成型的基体 316L 不锈钢具有良好的质量。获取基体材料截面并通过 Matlab 软件计算空隙区域所占像素百分比。结果表明,基体材料相对密度达到了 98.5%±0.6%。通过单轴拉伸获得烧结后基体材料的工程应力-应变曲线,将其作为材料的弹塑性参数输入到有限元模型中。316L 基体材料与应力-应变曲线如图 2 所示。

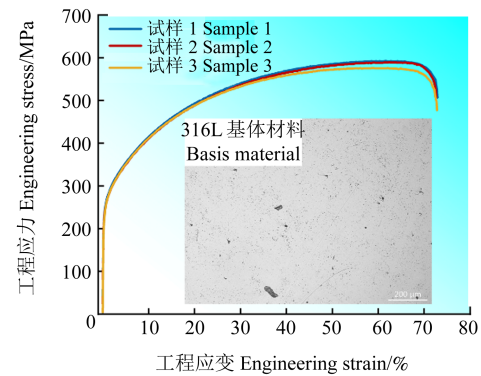


图 2 316L 基体材料与拉伸试样工程应力-应变曲线

Fig. 2 Engineering stress-strain curve of 316L matrix material and tensile specimens

烧结后试样结构如图 3 所示,试样保持 FCC 结构形式。由于烧结过程中不锈钢粉体间隙被填充,宏观表现为试样结构收缩。测量收缩后试样的质量与尺寸,计算相同体积下实体材料质量(材料相对密度为 98.5%)并得到试样结构相对密度,尺寸与结构相对密度如表 2 所示,并以烧结收缩后的有效尺寸作为构建有限元模型输入的结构参数。

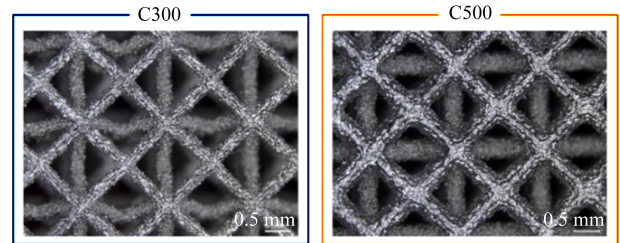


图 3 C300 与 C500 试样烧结后结构

Fig. 3 Structures of sintered C300 and C500 specimens

表 2 烧结后试样结构尺寸与相对密度

Tab. 2 Structural dimensions and relative densities of sintered specimens

| | 杆件直径 Strut diameter/μm | 单元边长 Cell size/mm | 相对密度 Relative density/% |
|------|---------------------------|----------------------|----------------------------|
| C300 | 257 | 8.93 | 9.4 |
| C500 | 441 | 9.00 | 27.8 |

本研究进行了准静态单轴压缩试验与数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)应变测试,获得多孔结构压缩力学性能与应变分布。准静态压缩试验加载速率为0.1 mm/s。

1.2 仿真建模与力学性能评价方法

采用Abaqus软件建立不同单元边长与杆件直径的多孔结构仿真模型,使用Johnson-Cook(J-C)本构模型进行有限元仿真,其中弹性模量 E 、J-C本构模型参数 A 、 B 、 n 根据图1材料实际拉伸曲线拟合得到。由于模型仅用于室温条件下的压缩,不考虑温度影响,参数 m 取值可参考其他学者的工作^[31]。材料参数如表3所示。为节约计算成本,提高计算效率,单轴压缩模型采用1/4对称模型进行计算。

表3 316L不锈钢J-C本构模型参数

Tab. 3 Parameters of the J-C constitutive model of 316L stainless steel

| 参数Parameters | 值Value |
|-------------------------------------|---------|
| 弹性模量 Modulus of elasticity E /GPa | 106.3 |
| 泊松比 Poisson ratio ν | 0.3 |
| A /MPa | 205.6 |
| B /MPa | 1 103.9 |
| n | 0.669 |
| m | 0.71 |

引入屈服时的压缩载荷 F_y 和有效细长比 λ_{eff} 作为定量分析结构压缩性能的评价指标。 F_y 为试样在发生首次屈服时承受的压缩载荷,反映了试样的压缩强度。在保持晶格单元大小一致的情况下, F_y 可近似根据Gibson-Ashby理论^[32]计算,为

$$F_y = Cr^\alpha \quad (1)$$

式中, α 为幂指数,根据杆件变形模式不同而变化; C 为结构系数; r 为杆件截面回转半径。

使用临界屈服/屈曲应力评价桁架结构中杆件的变形方式,桁架结构中杆件的等效细长比定义^[33]为

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{KL_{\text{eff}}}{r} \quad (2)$$

式中, L_{eff} 为杆件的有效长度; K 为根据桁架杆件约束方式确定的系数,对于两端固定杆件, $K = 0.5$;回转半径 r 为

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3)$$

式中, I 为截面惯性矩; A 为截面积。

当 $10 < \lambda_{\text{eff}} < 100$ 时,桁架结构中杆件屈曲临界应力使用Johnson-Parabola模型^[34]计算,为

$$\sigma_c = \sigma \left(1 - \frac{\sigma}{4\pi^2 E} \lambda_{\text{eff}}^2 \right) \quad (4)$$

式中, σ 为基体材料的屈服强度; E 为基体材料的弹性模量。

2 结果与讨论

2.1 力学性能与失效规律

根据建立的有限元仿真模型,模拟C300与C500在单轴压缩下的力学性能。图4为在单轴压缩下FCC多孔结构试验与仿真的位移-载荷曲线对比。结果表明,不同杆件直径造成了明显的力学性能差异,C300压缩屈服载荷为308.4 N,而C500压缩屈服载荷为1 347 N,构建的有限元仿真模型能够表现出曲线上的差异,并捕捉到C300结构中的压缩载荷波动现象。C500结构压缩性能接近传统致密材料的压缩行为,表现出整体屈服模式。试验中结构的不均匀缺陷分布导致试验曲线略低于仿真曲线。C300结构的力学响应曲线无明显弹性阶段,压缩载荷水平较低,呈现波动缓慢上升的趋势,表现出局部压缩-屈服-塌陷的逐层塌陷模式。当压缩位移达到5 mm左右时,材料结构内的孔洞被逐渐排出,结构呈致密化,载荷迅速上升,仿真曲线复现了试验曲线中这一特征。

图5和图6分别为2种试样在压缩变形行为、失效形式以及有限元仿真的Mises应力分布,发现2种结构的变形模式与试验观测一致。C300的变形模式为局部屈服的逐层塌陷模式,压缩初期应变集中于顶层桁架结构中,并先行发生屈服进入塑性变形阶段。弹性区的单元仍保持完整的FCC结构,而屈服区的晶格杆件发生了大幅度屈曲变形,靠近节点处出现明显应力集中,裂纹在此萌生并贯穿杆件,最终导致杆件断裂。杆件的大幅度屈曲、断裂使其无法承载、传递压缩载荷,直至顶层桁架全部屈服并逐渐塌陷致密化,后续压缩阶段重复逐层塌陷变形模式。当完全塌陷排出孔隙后,结构发生致密化行为,压缩载荷迅速上升。这种屈服模式导致材料无明显的弹性变形阶段,逐层的压缩-屈服-塌陷过程表现为宏观压缩曲线中的应力波动呈上升趋势。根据仿真结果推测,材料与压头之间的摩擦限制了顶层与底层横向杆件的变形,而中间层横向杆件限制了结构的屈曲,迫使上、下两侧杆件先行出现向外的屈曲,最终导致了这种屈服模式。

C500表现出整体塑性屈服的变形模式,不同层的桁架杆件发生均匀的弹性变形,之后结构整体发生塑性屈服,如图6所示。在变形过程中,单元仍能保持完整FCC结构,且杆件并未产生裂纹。由于C500的结构相对密度更大,致密化阶段相较于C300显著提前。C500结构中的杆件会出现轻微屈曲,但由于结构完整且杆件抗屈曲能力强,结构仍能够通过杆件的压缩、剪切变形与屈曲将压缩载荷由上下两侧向中间层充分传递,应力分布更为均匀。

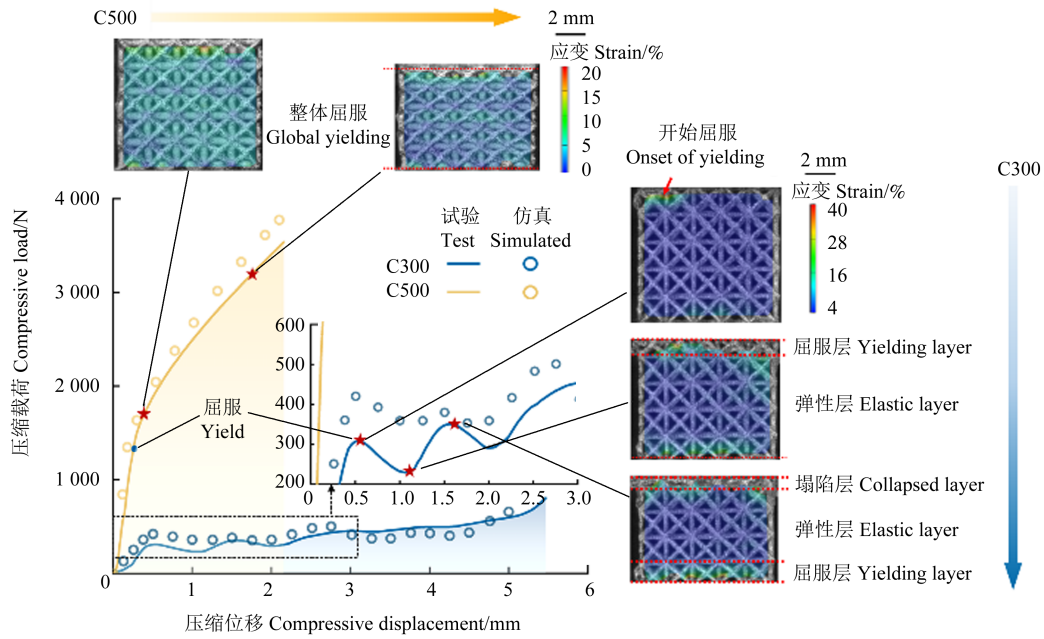


图 4 压缩载荷-位移曲线试验-仿真对比与试验应变分布

Fig. 4 Test and simulation comparison of compression load-displacement curves and test strain distribution

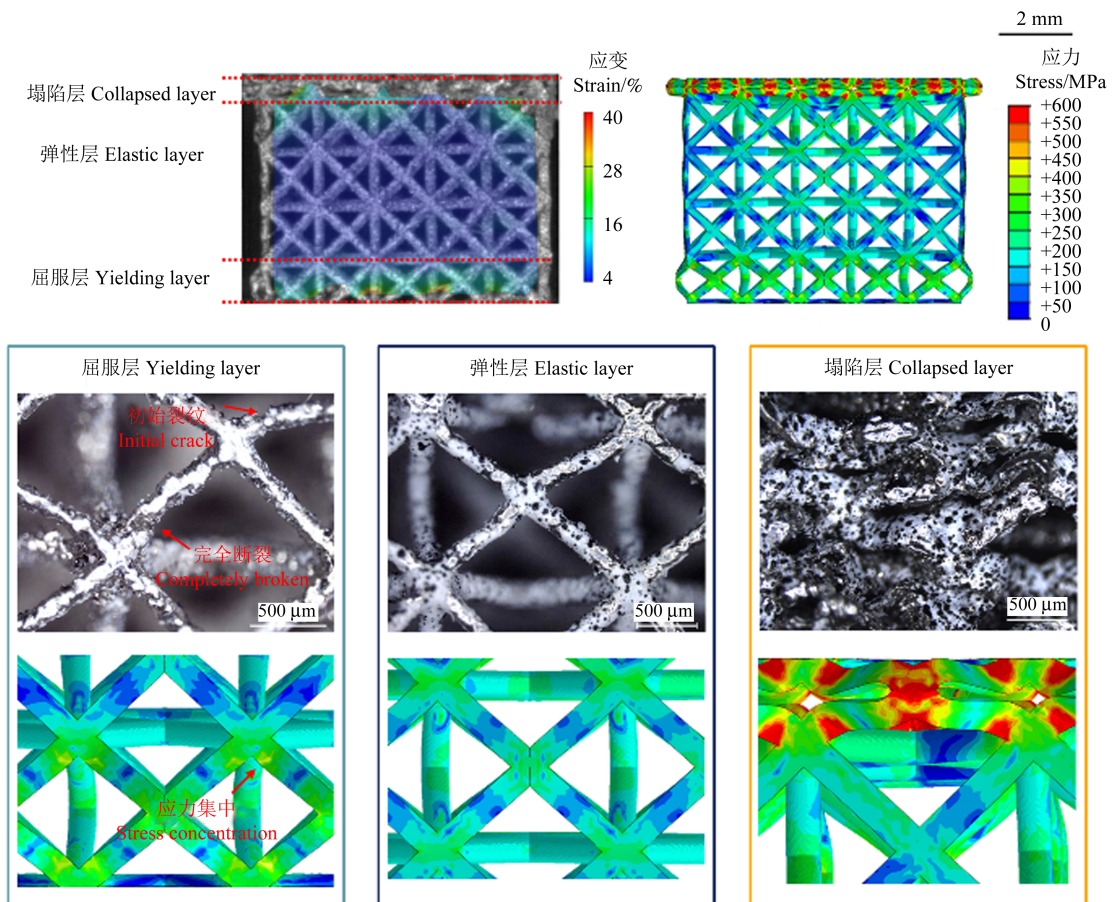


图 5 C300 试样压缩变形行为与不同层结构杆件形态的试验与仿真对比

Fig. 5 Test and simulation comparison of the compression deformation behavior of C300 and the morphology of members with different layer structures

2.2 不同结构参数对失效的影响规律

图 7 为由 Gibson-Ashby 理论与有限元模型计算出的结构屈服压缩载荷与杆件直径的关系,以及通过质

量归一化计算的屈服载荷。根据 Gibson-Ashby 模型屈服压缩载荷与结构杆件直径呈幂指数关系,代入 C300 与 C500 的杆件直径与屈服压缩载荷,得出模型

中幂指数 α 可取值 2.66。将 C300 曲线第 1 个波峰压缩力视为屈服压缩载荷,结合 C500 屈服压缩载荷,得出 FCC 结构在屈服时压缩载荷与杆件直径的函数关系,有限元仿真模型结果较好地复现了这一幂指数规律。质量归一化的屈服载荷与杆件直径呈线性规律,归一化屈服载荷随着杆件直径的增加而增大,这表明杆件直径的增大对材料力学性能的影响不仅使相对密度增加,还有其他方面的影响。例如,杆件直径的增加会使杆件的有效细长比显著减小,提高结构局部抗屈曲的能力,同时杆件交叉节点体积增大,使此处的应力集中显著减小。计算得出 C300 试样中杆件等效细长比 λ_{eff} 为 11.97,使用 Johnson-Parabola 模型计算 C300 结构中杆件临界屈曲应力远小于屈服应力。C500 结构中的杆件等效细长比为 6.58,属于短粗杆件,屈服/屈曲模式受短柱压屈模型控制,屈曲临界应力远大于屈服应力。

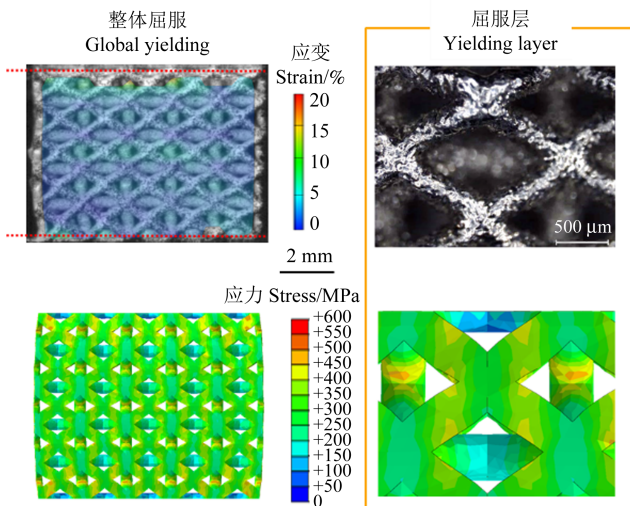


图6 C500试样压缩变形行为与结构杆件形态的试验与仿真对比

Fig. 6 Test and simulation comparison of the compression deformation behavior of C500 and the morphology of members

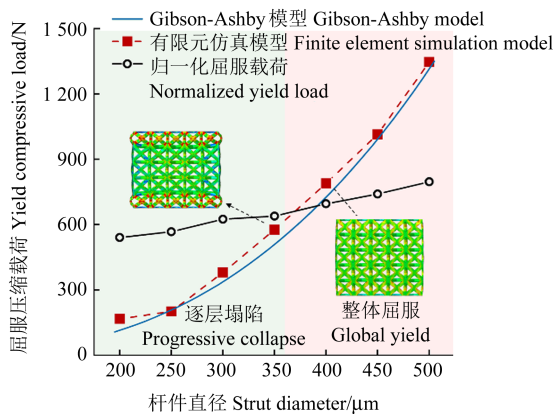


图7 有限元仿真模型与理论模型模拟的具有不同直径杆件的结构压缩屈服载荷

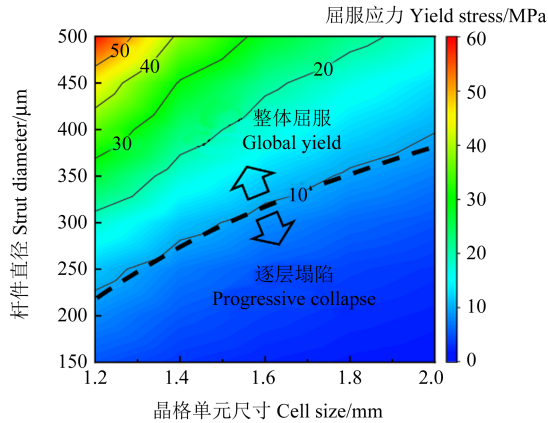
Fig. 7 Compressive yield loads with members of different diameters simulated by the finite element simulation model and the theoretical model

根据杆件局部屈曲失效模型计算,在晶格单元边长为 2 mm 的 FCC 结构中,当杆件直径小于 312 μm 时,结构临界屈曲应力小于屈服应力,表现为逐层塌陷的屈服形式;当杆件直径超过 312 μm 时,FCC 多孔结构发生由逐层塌陷模式向整体屈服模式的转变。而有限元模型中结构杆件直径为 350 μm 时,仍会发生逐层塌陷。出现这种差异的原因在于杆件屈曲模型的计算中前置了杆件的变形假设,难以完全解耦杆件的混合变形模式以及很大程度上忽略了节点的影响。因此,推测逐层塌陷模式向整体屈服模式的实际转变尺寸在 350~400 μm 。

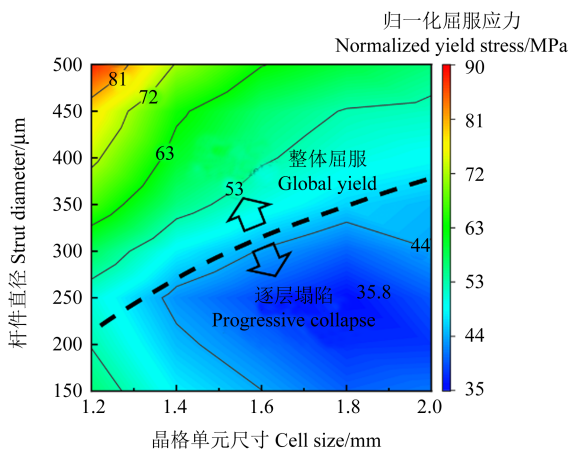
为了更加深入探究结构尺寸参数对材料压缩性能的影响,对比了不同晶格单元边长与杆件直径对结构压缩性能的影响。由于不同模型中结构尺寸与压缩位移存在差异,采用应力-应变曲线代替位移-载荷曲线。图 8 为 FCC 晶格结构在不同几何参数组合下的压缩屈服应力响应面图。由图 8(a)可知,在选取的参数范围内存在逐层塌陷与整体屈服模式的转变,且逐层塌陷结构的屈服应力显著小于整体屈服结构,这是逐层塌陷结构中有效承载的杆件较少导致。增大杆件直径或减小晶格单元尺寸有助于提升结构的屈服压缩应力,且通过调控几何参数可实现不同失效模式之间的可控转变,随着晶格单元尺寸由 1.2 mm 增大到 2 mm,杆件临界尺寸由 210 μm 左右增大到 360 μm 左右。无论单元尺寸大小,当杆件直径小于 210 μm 时,结构仅存在逐层塌陷的屈服模式;当杆件直径大于 360 μm 时,结构均为整体屈服模式。为了消除结构参数造成的相对密度差异,将屈服应力通过相对密度归一化处理,如图 8(b)所示。由图 8(b)可知,逐层塌陷结构由于屈服时材料的承载利用率低,仍表现出较低的归一化屈服应力。晶格尺寸为 1.8 mm 且杆件直径为 250 μm 的结构表现出最小的归一化屈服应力,为 35.8 MPa,表明结构在这一几何参数下的利用率最低。

此外,考虑 FCC 结构在斜向加载下的压缩性能,以研究斜向承载能力。选择晶格单元边长为 2 mm,杆件直径为 350 μm 晶格结构作为研究对象,因为这一参数组合接近转变临界尺寸。原结构压缩方向为晶格单元边方向([1,0,0]),补充沿其面对角线方向([1,1,0])和体对角线方向([1,1,1])的压缩模型,其他数值设置与上述相同。图 9 为 3 个加载方向的弹性模量与应变为 0.2 时的变形行为。在 3 个方向中,结构在 [1,0,0] 方向具有最高的弹性模量,其次为 [1,1,0] 方向,[1,1,1] 方向弹性模量最低,这与文献 [16]¹⁰⁹⁵⁹⁵ 中报道的结果一致。然而,结构在 [1,0,0,] 和 [1,1,1]

方向出现了逐层塌陷的特性,导致结构的屈服应力水平较低。虽然 $[1, 1, 0]$ 方向的结构中出现了杆件的局部屈曲行为,但结构的屈服形式仍表现为整体屈服。出现这种差异的原因是结构中杆件的压缩承载方向与加载方向不一致,导致 $[1, 0, 0]$ 与 $[1, 1, 1]$ 方向的结构无法有效传递层与层之间的压缩载荷。3个方向的压缩变形行为表明,相同结构通过调整压缩的方向可以获得不同的屈服模式。



(a) 屈服应力
(a) Yield stress



(b) 相对密度归一化屈服应力

(b) Normalized yield stress of relative density

图 8 不同几何参数下结构屈服应力与相对密度归一化屈服应力等值线图

Fig. 8 Contour plot of yield stress and normalized yield stress of relative density under different geometric parameters

2.3 多孔材料力学性能评估

如图 10 所示,本研究中采用 316L 不锈钢通过 BJAM 工艺制备的多孔结构材料,将其压缩屈服强度与文献中使用的选择性激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 和激光粉末床熔融 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 这类 LBAM 制备的具有类似晶胞结构的材料进行了对比分析。由图 10 可知,在相对密度小于 10% 的区间内, BJAM 工艺制备的 FCC 结构多孔材

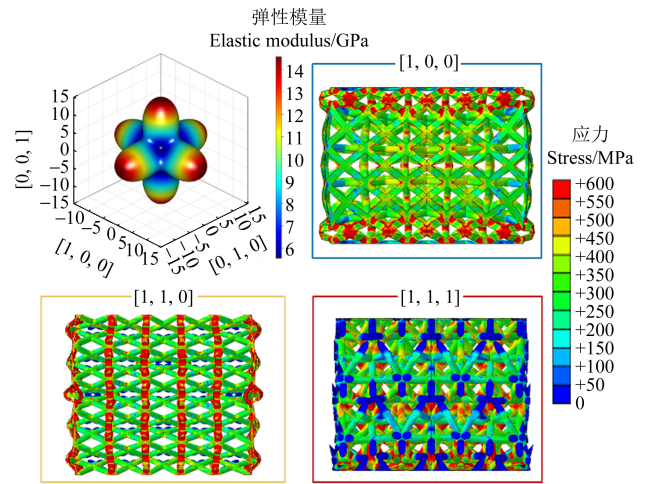


图 9 不同加载方向下结构弹性模量与变形行为

Fig. 9 Elastic modulus and deformation behavior of the structure under different loading directions

料的屈服强度与 LBAM 方法制备的同类多孔材料相当,二者差异较小。然而,随着相对密度的增加, BJAM 制备的多孔材料屈服强度相较于 LBAM 制备的多孔材料出现明显下降。这归因于 LBAM 制备过程中材料经历快速凝固与热循环,形成了更为细小的晶粒结构;此外, LBAM 制备的材料通常具有更低的孔隙率与更高的致密性,这也进一步增强了其力学性能^[35]。尽管如此,在相对密度为 5%~20% 时, BJAM 工艺制备的 FCC 结构多孔材料的屈服强度仍高于 LBAM 工艺制备的 BCC 结构多孔材料。这表明,即使在微观组织和致密性方面存在一定劣势,结构几何形态仍在一定程度上弥补了 BJAM 制品在材料本体性能上的不足,从而在特定结构设计下展现出优于 LBAM-BCC 结构的力学性能。尽管 BJAM 制备 316L 多孔结构材料的力学性能仍然低于 LBAM 制备的材料,但构建的多孔结构材料仍然在简单性、高效性和低成本方面具有优势。

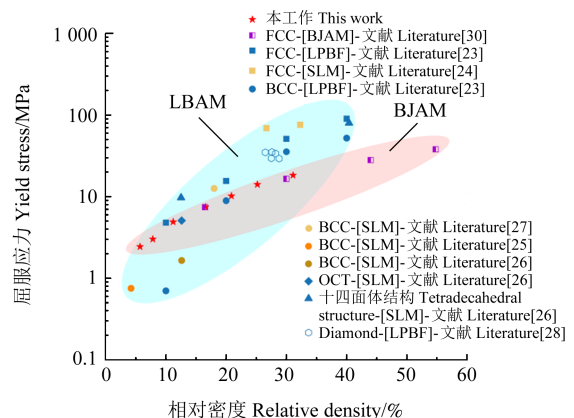


图 10 使用不同制造技术制备的 316L 多孔结构材料的压缩屈服应力对比

Fig. 10 Comparison of compressive yield stresses of 316L porous structural materials prepared by different manufacturing techniques

3 结论

制备了具有不同杆件直径的多孔晶格结构,研究了FCC桁架多孔晶格材料在准静态压缩中的力学性能与变形行为,揭示了不同尺寸参数的多孔晶格材料强度以及不同失效机制之间的转变规律。具体结论如下:

1)通过准静态压缩试验获得了C300与C500的压缩力学性能与变形特性。结果表明,杆件直径较小的结构,压缩承载能力低,压缩载荷呈波动上升趋势,压缩时呈逐层塌陷的失效模式;杆件直径较大的结构压缩时应力分布更加均匀,呈整体屈服特性,压缩性能更接近传统致密材料的压缩行为,存在弹-塑性变形阶段。

2)有限元模型能够较好地复现试验结果,计算的屈服载荷符合Gibson-Ashby理论模型预测规律。相同晶格单元尺寸下,结构的压缩屈服载荷与杆件直径呈幂指数关系,质量归一化的屈服载荷与杆件直径呈线性关系。

3)调整结构尺寸(杆件直径和晶格单元尺寸)或加载方向可以实现不同失效模式之间的转变。对于FCC晶格而言,增大杆件直径或减小晶格单元尺寸可以使结构由逐层塌陷向整体屈服转变,而沿面对角线加载的材料能够获得更加均匀的整体变形模式,沿体对角线加载的材料局部变形更为明显。

参考文献(References)

- [1] SRIVASTAVA M, RATHEE S. Additive manufacturing: recent trends, applications and future outlooks[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2022, 7(2): 261-287.
- [2] LIU Y B. Mechanical properties of a new type of plate-lattice structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 192: 106141.
- [3] KORKMAZ M E, GUPTA M K, ROBAK G, et al. Development of lattice structure with selective laser melting process: a state of the art on properties, future trends and challenges[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 81: 1040-1063.
- [4] SORO N, BRODIE E G, ABDAL-HAY A, et al. Additive manufacturing of biomimetic titanium-tantalum lattices for biomedical implant applications[J]. *Materials & Design*, 2022, 218: 110688.
- [5] SUN Z P, GUO Y B, SHIM V P W. Characterisation and modeling of additively-manufactured polymeric hybrid lattice structures for energy absorption[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 191: 106101.
- [6] ZHANG P J, YU P H, ZHANG R, et al. Grid octet truss lattice materials for energy absorption[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 259: 108616.
- [7] ZHOU Y, SHEN S P, LIU T, et al. Effective heat conduction evaluation of lattice structures from selective laser melting printing[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 218: 124790.
- [8] KEMERLI U, KAHVECI K. Conjugate forced convective heat transfer in a sandwich panel with a Kagome truss core: the effects of strut length and diameter[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 167: 114794.
- [9] GUO J J, LI Y Q, XIAO Y, et al. Multiscale modeling and design of lattice truss core sandwich metastructures for broadband low-frequency vibration reduction[J]. *Composite Structures*, 2022, 289: 115463.
- [10] KHAN N, RICCIO A. A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: current trends and future directions[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2024, 149: 101021.
- [11] FERRO C G, VARETTI S, MAGGIORE P. Experimental evaluation of mechanical compression of lattice trusses made with Ti_6Al_4V for aerospace use[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(5): 520-532.
- [12] WANG C, ZHU J H, WU M Q, et al. Multi-scale design and optimization for solid-lattice hybrid structures and their application to aerospace vehicle components[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(5): 386-398.
- [13] SAJJAD U, REHMAN T U, ALI M, et al. Manufacturing and potential applications of lattice structures in thermal systems: a comprehensive review of recent advances[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 198: 123352.
- [14] YAN H B, WU W T, ZHAO Z Y, et al. Review and comparison of turbulent convective heat transfer in state-of-the-art 3D truss periodic cellular structures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 235: 121450.
- [15] JAM A, DU PLESSIS A, LORA C, et al. Manufacturability of lattice structures fabricated by laser powder bed fusion: a novel biomedical application of the beta Ti-21S alloy[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 50: 102556.
- [16] FENG J W, LIU B, LIN Z W, et al. Isotropic octet-truss lattice structure design and anisotropy control strategies for implant application[J]. *Materials & Design*, 2021, 203: 109595.
- [17] PRATAMA L K, SANTOSA S P, DIRGANTARA T, et al. Design and numerical analysis of electric vehicle Li-ion battery protections using lattice structure undergoing ground impact[J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2022, 13(1): 10.
- [18] WU W W, XIA R, QIAN G A, et al. Mechanostructures: rational mechanical design, fabrication, performance evaluation, and industrial application of advanced structures[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 131: 101021.
- [19] SONG X H, ZENG C J, HU J Q, et al. Compressive behavior and energy absorption of novel body-centered cubic lattice metamaterials incorporating simple cubic truss units[J]. *Composite Structures*, 2025, 367: 119230.
- [20] DONG L. Mechanical responses of snap-fit Ti-6Al-4V warren-truss lattice structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 173: 105460.
- [21] WANG S H, MA Y B, DENG Z C, et al. Two elastically equivalent compound truss lattice materials with controllable anisotropic

- mechanical properties [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 213: 106879.
- [22] LEE G, JEONG S G, KWON J, et al. Shear deformation behavior of additively manufactured 316L stainless steel lattice structures [J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 93: 104425.
- [23] MANDAL A, LI F, JIA X, et al. Compressive deformation behavior of functionally graded lattice structures of stainless steel 316L [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 35: 4599-4613.
- [24] CHANG C, WU W, ZHANG H, et al. Mechanical characteristics of superimposed 316L lattice structures under static and dynamic loading [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23 (7) : 2001536.
- [25] WANG Z G, ZHOU Y, WANG X X, et al. Compression behavior of strut-reinforced hierarchical lattice: experiment and simulation [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 210: 106749.
- [26] ZHONG T L, HE K T, LI H X, et al. Mechanical properties of lightweight 316L stainless steel lattice structures fabricated by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2019, 181: 108076.
- [27] ARAGHI M, ROKHGIREH H, NAYEBI A. Experimental and FEM investigation of BCC lattice structure under compression test by using continuum damage mechanics with micro-defect closure effect [J]. *Materials & Design*, 2023, 232: 112125.
- [28] LIANG Z L, CHEN X L, SUN Z G, et al. A study on the compressive mechanical properties of 316L diamond lattice structures manufactured by laser powder bed fusion based on actual relative density [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 84: 414-423.
- [29] MORA S, PUGNO N M, MISSERONI D. 3D printed architected lattice structures by material jetting [J]. *Materials Today*, 2022, 59: 107-132.
- [30] PARSOMPECH N, SUWANPREECHA C, NORAPHAIPHAKSA N, et al. Supportless lattice structure of 316L stainless steel fabricated by material extrusion additive manufacturing: effect of relative density on physical, microstructural and mechanical behaviour [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 915: 147270.
- [31] ZHAO Y H, SUN J, LI J F, et al. A comparative study on Johnson-Cook and modified Johnson-Cook constitutive material model to predict the dynamic behavior laser additive manufacturing FeCr alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 723: 179-187.
- [32] ZHONG H Z, SONG T T, LI C W, et al. The Gibson-Ashby model for additively manufactured metal lattice materials: its theoretical basis, limitations and new insights from remedies [J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2023, 27(3): 101081.
- [33] MEZA L R, PHLIPOT G P, PORTELA C M, et al. Reexamining the mechanical property space of three-dimensional lattice architectures [J]. *Acta Materialia*, 2017, 140: 424-432.
- [34] BHOI R M, KALURKAR P L G. Study of buckling behavior of beam and column [J]. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2014, 11(4): 36-40.
- [35] GONG H J, SNELLING D, KARDEL K, et al. Comparison of stainless steel 316L parts made by FDM and SLM-based additive manufacturing processes [J]. *JOM*, 2019, 71(3): 880-885.

Research on the mechanical properties of FCC truss lattice structures

ZHOU Xiangyu^{1,2} XU Zhutian^{1,2} PENG Linfa^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory for Digital Manufacturing of Thin-Walled Structures, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

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

Abstract: To investigate the influence of structural parameters on the yield strength and deformation behavior of truss lattice structures, face-centered cubic (FCC) porous lattices were fabricated and the mechanical responses were systematically studied. A finite element model was developed to evaluate the yield strength and failure modes of structures with varying geometric parameters. The analysis revealed a correlation between the member slenderness ratio and the transition from progressive collapse to global yielding under different loading orientations. Structures with lower slenderness ratios tend to exhibit global yielding, while those with higher slenderness ratios are prone to layer-by-layer compression failure. Furthermore, lattices supported along the face diagonals demonstrate more uniform global deformation, whereas those supported along the body diagonals are characterized by localized deformation.

Key words: Finite element analysis; Porous lattice structure; Gibson-Ashby model; Progressive collapse; Failure mode

Corresponding author: PENG Linfa, E-mail: penglinfa@sjtu.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (52225504, 52422509)

Received: 2025-06-09 Revised: 2025-07-21