

# 选区激光熔化316L不锈钢bcc点阵结构的支柱尺寸差异对其抗压缩性能的影响

王建东<sup>1</sup>, 管瑶<sup>1</sup>, 杨金水<sup>2</sup>, 王大鹏<sup>1</sup>, 窦文浩<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 哈尔滨工程大学 青岛创新发展基地, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 为研究支柱尺寸差异对bcc点阵结构抗压缩性能的影响, 在相同密度下, 设计了5种不同支柱尺寸的bcc-x点阵结构。采用选区激光熔化技术制备了316L不锈钢bcc-x点阵结构, 使用材料塑性本构建立点阵结构准静态压缩的有限元分析模型。实验和模拟的结果表明: 随着支柱比例因子 $x$ 的增加, bcc点阵的抗压缩性能体现出先升后降的趋势, 且 $x$ 大于1后, 抗压性能对 $x$ 更敏感。 $x$ 为1时可获得最优的抗压性能, bcc-1的比刚度、比强度和比能量吸收分别为 $986.794 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $25.084 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $11.731 \text{ J/g}$ 。与bcc-1相比,  $x$ 的降低和增加都会破坏单元的对称性, 且 $x$ 越偏离1时, 层间高应力区分布越不规则, 结构的变形越易失稳。其中bcc-1.5的抗压性能最差, 比刚度、比强度和比能量吸收相对于bcc-1分别降低了20.765%和12.265%和12.309%。

**关键词:** 选区激光熔化; bcc点阵结构; 支柱比例因子; 抗压缩性能; 有限元模拟

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)01-0126-08

设备轻量化主要通过使用轻量化的材料和轻量化的结构设计来实现, 点阵结构作为最常见的轻量化结构, 具有比强度高、比刚度、吸能、减振、隔声和隔热的特点, 被广泛应用于航空航天<sup>[1-2]</sup>、军事装备<sup>[3]</sup>、生物医学<sup>[4]</sup>和汽车船舶<sup>[5-6]</sup>等领域。但由于其结构复杂, 传统制造方法难以有效成型。增材制造技术的发展使复杂零件的制造成为可能, 其中基于铺粉工艺的选区激光熔化(SLM)技术可以成型复杂结构<sup>[7]</sup>, 且能保证较高的精度和表面质量, 在金属点阵结构的制造中被普遍使用。

点阵结构由代表性单元在空间中周期性重复排列而成, 可通过设计单元结构和密度分布来获得所需要的力学性能, 具有极大的可调控性。根据拓扑结构的不同, 可以将点阵结构分为3类: 基于支柱的点阵结构、三周期极小曲面和网壳结构<sup>[8]</sup>。bcc是一种常见的基于支柱的点阵结构, 由于结构简单、设计灵活、力学性能优异, 在工程中得到了广泛的应用。但是bcc结构的节点处会出现应力集中, 容易导致裂纹萌生和结构失效。近年来, 国内外学者对bcc结构的设计和力学性能进行了研究。Guo等人<sup>[9]</sup>探究了单元尺寸大小和支柱直径对bcc结构相对密度的影响, 发现单元尺寸的减小或支柱直径的增加都会导致点阵相对密度的增加。Liu等人<sup>[10]</sup>通过力学压缩实

验和有限元分析, 发现等强度体心立方(ES-bcc)结构的破坏位置由节点向支杆中心转变。相同密度下, ES-bcc结构的吸能、弹性模量和屈服强度分别比bcc结构提高了11.89%、61.80%和53.72%。Nie等人<sup>[11]</sup>基于bcc单元, 设计了3种构型的Ti6Al4V多层点阵结构(MHLSs), MHLSs的支柱呈现脆性-塑性混合断裂模式, 节点呈现塑性断裂模式, 表现出优异的力学性能。Guo等人<sup>[12]</sup>提出一种具有凝固节点和支柱中间为胶囊状空腔的空心点阵结构, 与bcc结构相比, 在比刚度、比强度和比能量吸收方面分别提高了92%、51.9%和22.8%。Yang等人<sup>[13]</sup>基于正弦曲线对bcc进行优化设计, 正弦点阵结构刚度提高了8.2%, 压缩载荷下的应力分布得到改善。An等人<sup>[14]</sup>在bcc单元中添加了垂直和水平支撑, 变形过程从弯曲主导模式转变为拉伸主导模式, 显著提高了晶格结构的抗压强度和能量吸收。Zhu等人<sup>[15]</sup>将bcc的连接部位设计成圆角结构, 结合有限元分析, 发现圆角特征有利于减少应力集中, 提高了屈服强度。总的来说, 目前对bcc结构的性能研究主要分为2大类, 一类是通过密度和单元尺寸变化造成的梯度效应, 来调控结构响应, 另一类是在结构中加入支撑或对倾斜支柱进行形状拓扑来减缓应力集中的现象。但极少有研究关注bcc结构本身支柱直径

收稿日期: 2024-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(12172098); 中央高校基本科研业务费专项资金(3072024JJ1004)

作者简介: 王建东, 男, 1987年生, 博士, 副教授, 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001, E-mail: wangjiandong@hrbeu.edu.cn

变化时,支柱间尺寸差异对应力分布的影响。

本工作通过改变支柱的直径比值,设计了5种不同支柱比例因子 $x$ 的bcc单元,采用SLM技术制备了316L不锈钢bcc- $x$ 点阵结构。基于bcc- $x$ 点阵结构的成形质量,修正理论结构模型以用于准静态压缩的有限元模拟(FEM)。通过准静态单轴压缩实验,对比并分析支柱比例因子对点阵结构压缩性能的影响规律。结合有限元模拟分析不同支柱比例因子的bcc点阵结构受压缩载荷过程中的应力分布和变形机制。

### 1 实验

本实验以316L不锈钢粉末作为选区激光熔化成形点阵结构的原始材料,粉末的扫描电子显微镜(SEM)形貌如图1所示,基本呈现为球形,少数为长条形,部分粉末表面较为粗糙且粘附卫星粉。粉末粒径分布在15~53  $\mu\text{m}$ ,中值粒径为32  $\mu\text{m}$ ,材料的化学成分见表1。

bcc点阵单元的框架为立方体的4条体对角线,以体

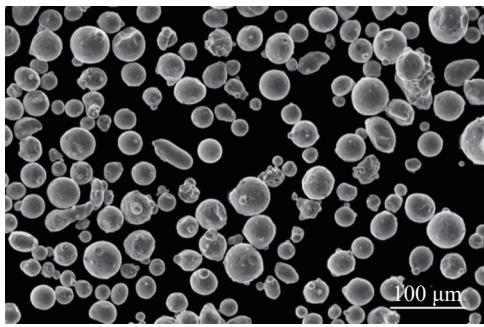


图1 316L不锈钢粉末的形貌

Fig.1 Morphology of 316L stainless steel powder

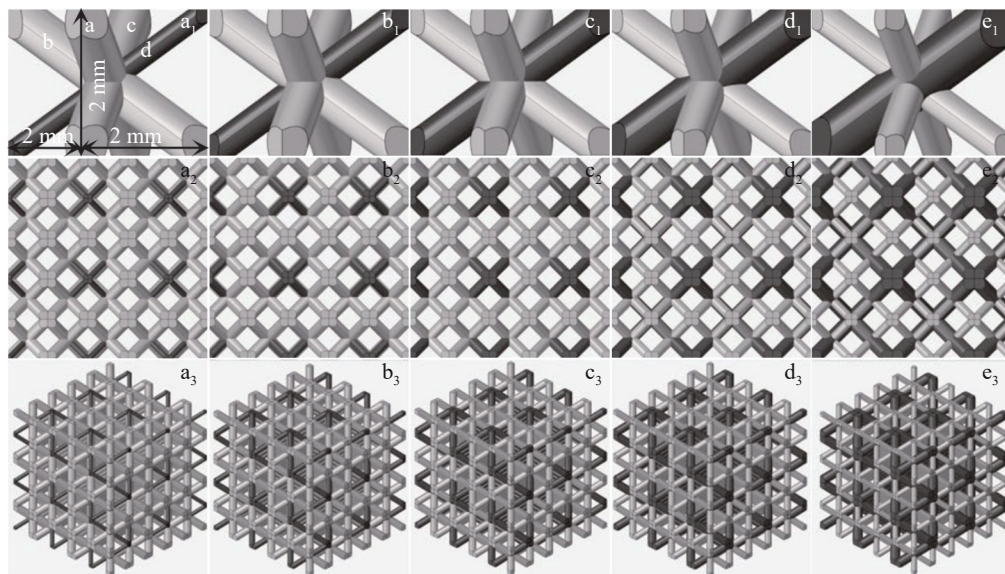


图2 bcc- $x$ 点阵结构模型

Fig.2 Models of bcc- $x$  lattice structures with  $x=0.5$  ( $a_1$ - $a_3$ ),  $x=0.75$  ( $b_1$ - $b_3$ ),  $x=1$  ( $c_1$ - $c_3$ ),  $x=1.25$  ( $d_1$ - $d_3$ ), and  $x=1.5$  ( $e_1$ - $e_3$ ): ( $a_1$ - $e_1$ ) single cell structures; ( $a_2$ - $e_2$ ) two-dimensional structures; ( $a_3$ - $e_3$ ) three-dimensional structures

表1 316L不锈钢粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel powder ( $\omega/\%$ )

Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	S	P	Fe
17.04	10.57	2.44	0.80	0.30	0.016	0.003	0.02	Bal.

对角线为中心生成的斜杆圆柱即为bcc的支柱。当圆柱直径一致时,4根支柱在空间位置上具有中心对称和轴对称性,此时向点阵单元施加压缩载荷,各支柱将承受相同的力和变形。本工作中将4根支柱任意标记为a、b、c和d,其中a、b、c支柱的直径相等记为 $D_1$ ,d支柱直径记为 $D_2$ 。为了研究a、b、c三者与d的支柱尺寸差异对点阵受力情况的影响,对单元尺寸2 mm×2 mm×2 mm、密度30%的bcc单元进行支柱调整,如图2所示。调整单元中1根支柱与其他3根支柱的直径比值(支柱比例因子 $x=D_2/D_1$ ;  $D_1=0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5$ , 分别标记为bcc-0.5, bcc-0.75, bcc-1, bcc-1.25和bcc-1.5),获得支柱调整后的点阵单元见图2 $a_1$ ~ $e_1$ ,表2列出了具体支柱尺寸。将不同支柱比例因子的bcc单元在X、Y、Z 3个方向进行5×5的镜像对列,形成10 mm×10 mm×10 mm的点阵结构,标记为bcc- $x$ 。

使用型号为AFS-M260的SLM设备成形点阵结构,工艺参数设置为:激光功率190 W、扫描速度1000 mm/s、铺粉厚度30  $\mu\text{m}$ 和扫描间距60  $\mu\text{m}$ 。成形过程中,成形舱内冲入氩气作为保护气体,在不锈钢基板上成形试样。加工完成后待成形舱冷却到室温,取出带有试样的基板,并使用电火花线切割机将试样从基板上切下,随后使用超声波清洗机去除点阵结构试样孔隙内部附着的不锈钢粉末。

表2 设计和实际bcc-x点阵结构的支柱直径和相对密度

Table 2 Strut diameters and relative densities of designed and actual bcc-x lattice structures

Sample	bcc-0.5		bcc-0.75		bcc-1		bcc-1.25		bcc-1.5	
	$D_1/mm$	$D_2/mm$	$D_1/mm$	$D_2/mm$	$D_1/mm$	$D_2/mm$	$D_1/mm$	$D_2/mm$	$D_1/mm$	$D_2/mm$
Design	0.600	0.300	0.570	0.428	0.540	0.540	0.500	0.625	0.470	0.705
Actual-parallel	0.733	0.423	0.695	0.481	0.662	0.662	0.648	0.743	0.622	0.760
Actual-vertical	0.578	0.292	0.563	0.417	0.532	0.532	0.492	0.613	0.466	0.655
Actual mass/g	2.864		2.858		2.832		2.771		2.845	
Designed relative density/%	30.261		29.880		30.017		29.502		30.141	
Actual relative density/%	36.007		35.932		35.605		34.838		35.768	

采用扫描电子显微镜(SEM, Apreo S)观察超声清洗后的bcc点阵结构的宏观形貌。对点阵试样的纵截面用砂纸打磨抛光后,放置在超景深光学金相显微镜(OM, VHX-1000)中观察孔隙分布情况。使用Image J准确测量支柱尺寸和缺陷占比。

采用电子万能材料试验机Instron 5982,在室温下对bcc点阵进行准静态单轴压缩实验。将试样沿沉积方向放置在压头中心部位,使上压板以1 mm/min的恒定速度向下移动5 mm,每组试样做3组平行压缩实验。

根据成形后bcc点阵单元的实际几何形状对设计模型进行修正,用HyperMesh 2021划分六面体网格,采用ABAQUS 2019/Explicit对bcc-x进行准静态单轴压缩有限元仿真。通过对母材的准静态拉伸实验来获取材料本构,拉伸应力-应变曲线见图3a,并选取塑性变形阶段中颈缩之前的数据构建材料的塑性本构模型。建立2块离散刚性压板,组装到点阵模型Z方向的上下两侧,模拟压缩设备中的压头,压板网格类型选用四节点刚性单元R3D4,点阵网格类型指定为缩减积分八节点六面体单元C3D8R。点阵结构与压板之间的接触类型设为自接触,其中切向接触行为的摩擦公式选择罚函数,摩擦系数设置为0.1,法向接触行为用硬接触来定义。对下刚性板施加移动和转动方向的约束,对上刚性板施加Z轴方向5 mm的位移,如图3b,U1、U2和U3分别对应X、Y和Z轴3个方向的平移自由度,UR1、UR2和UR3分别对应3个

轴的旋转自由度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 点阵结构的宏观形貌和内部缺陷

SLM成形的bcc点阵结构在平行于和垂直于构建方向的点阵单元的宏观形貌如图4所示。图4表明制备的点阵结构与设计的点阵结构几何形状存在一定的差异。首先,试样表面粗糙度较高,在支柱的下表面存在明显的粘粉情况。因为在制造过程中,支柱的上表面会与激光束直接接触,几乎所有与表面接触的粉末颗粒都会熔化。而无支撑的下表面与粉末床直接接触,当熔池凝固时,未熔化和部分熔化的粉末颗粒会粘附在表面上,导致点阵结构表面粗糙度增加。其次,支柱表面具有波纹,这是由于分层制造工艺会存在“阶梯效应”,倾斜表面被转换成层与层之间的阶梯状而得以成功制造,体现出具有层厚度大小的脊,即波纹度<sup>[16]</sup>,会降低实际和设计的几何形状之间的一致性。基于单元的宏观形貌(图4),从2个方向测量支柱的实际尺寸,表2列出了支柱尺寸的设计值与实际值。从平行于构建方向的角度测量,实际尺寸普遍大于设计尺寸,而这种尺寸差异正是归因于粘粉和波纹度导致的几何不一致性。从垂直于构建方向的角度测量,发现实际支柱尺寸会略小于设计值。由于激光束聚焦后形成的是具有一定直径的光斑,直接扫描2D切片的设计轮廓时会导致零件轮廓正偏置,使制造轮廓大于设

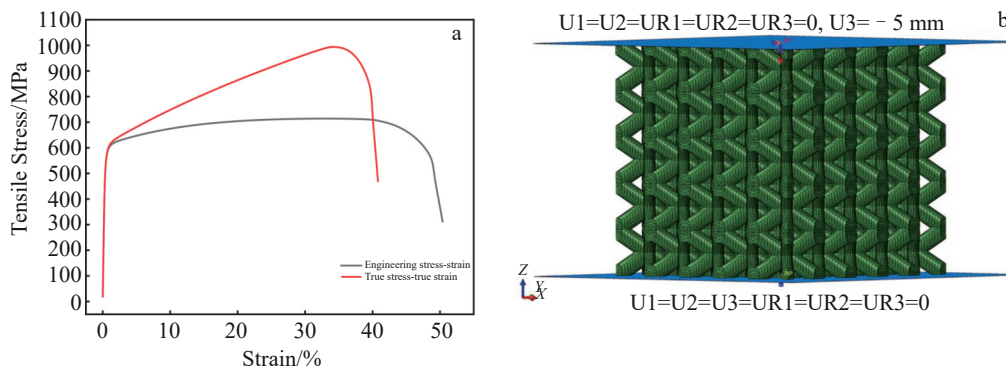


图3 母材的拉伸应力-应变曲线和准静态单轴压缩有限元分析模型

Fig.3 Tensile stress-strain curves of base material (a) and finite element analysis model of quasi-static uniaxial compression (b)

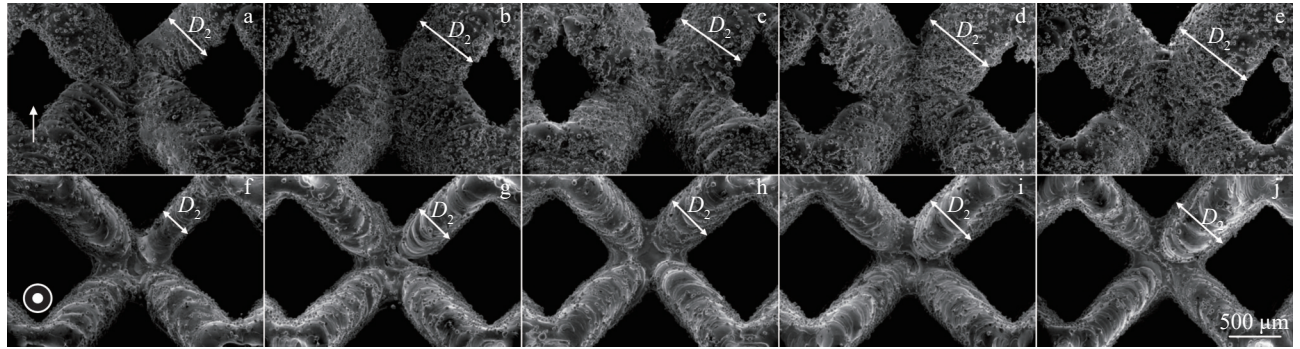


图4 bcc-x单元平行和垂直于构建方向的宏观形貌

Fig.4 Macroscopic morphologies of bcc-x cells with  $x=0.5$  (a, f),  $x=0.75$  (b, g),  $x=1$  (c, h),  $x=1.25$  (d, i), and  $x=1.5$  (e, j): (a-e) parallel to the construction direction; (f-j) vertical to the construction direction

计轮廓,而光斑补偿可通过让光斑向设计轮廓内部偏移来避免轮廓的正偏置<sup>[17]</sup>。但设计的光斑补偿值过大时,光斑向内侧偏移过多,发生负偏置,最终导致实际支柱尺寸小于设计尺寸。

SLM的固有特征会给试样内部带来制造缺陷,优化加工参数可以减少这些缺陷,但无法完全消除<sup>[18]</sup>。bcc点阵结构纵截面的缺陷分布如图5所示,可观察到大小不一的圆形气孔(蓝色箭头)、匙孔(橙色箭头)和不规则孔隙(绿色箭头)。气孔的形成归因于粉末中的气体截留,快速凝固使得形成的气泡无法逃逸到表面,被截留在材料中形成球形孔<sup>[19]</sup>。当液体金属表面发生蒸发,会形成的金属蒸汽产生反冲压力,该反冲压力会压制熔化的金属,从而形成一个充满金属蒸汽的圆锥形空腔,即匙孔<sup>[20]</sup>。不规则孔隙则是由于工艺参数没有提供足够的能量来促进熔池之间的熔化<sup>[21]</sup>,导致形成不规则缺陷。使用Image J对纵截面缺陷占比进行测量,支柱比例因子为0.5、0.75、1、1.25和1.5的缺陷占比分别为1.712%、1.772%、1.781%、1.746%和1.705%,缺陷数量非常接近,均在1.7%左右。可认为在相同的工艺条件下bcc-x具有相近的内部孔隙率。

## 2.2 支柱比例因子对抗压缩性能的影响

通过沿沉积方向加载获得bcc-x点阵的抗压缩性能,应力-应变曲线如图6所示。由于316L不锈钢的延展性

好,不同支柱比例因子的bcc点阵在准静态压缩载荷下,发生连续的塑性变形,直至结构致密化,在整个压缩过程中没有发生脆断失效,曲线平滑没有突然的应力下降和振荡。观察应力-应变曲线,塑性变形阶段应力连续增加,bcc-x点阵呈现出以拉伸主导的结构特征<sup>[22]</sup>。结合2.1节对点阵单元的宏观形貌的分析可知,由于粘粉和“阶梯效应”使得bcc点阵结构在竖直方向上具有更大的支柱直径,纵截面的形状从圆形变为椭圆形,长轴几乎平行于载荷方向,这增加了支柱的惯性矩,并使其能够抵抗由压缩引起的弯曲<sup>[23]</sup>。

表3列出了bcc-x结构的弹性模量 $E$ 、屈服强度 $\sigma_y$ 、平台应力 $\sigma_{pl}$ 和能量吸收SEA。图7a、7b对比了不同支柱比例因子的bcc点阵结构的比强度和比刚度。当 $x$ 从0.5增加到1时,bcc点阵结构的比强度和比刚度均得到提升,比刚度和比强度分别提高8.583%和9.199%。 $x$ 等于1可获得最优的力学性能,比刚度和比强度分别为 $986.794 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $25.084 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $x$ 再继续增加时,结构的比强度和比刚度对 $x$ 更为敏感,表现出明显的下降趋势; $x$ 等于1.5时,结构的力学性能最差,与 $x$ 为1相比,比刚度和比强度分别降低了20.765%和12.265%。比能量吸收SEA是表征点阵结构吸能能力的一个重要指标,可以通过应力-应变曲线弹塑性阶段的积分面积与密度之比来获取。图7c给出了bcc-x的 $\sigma_{pl}$ 和SEA,随着 $x$

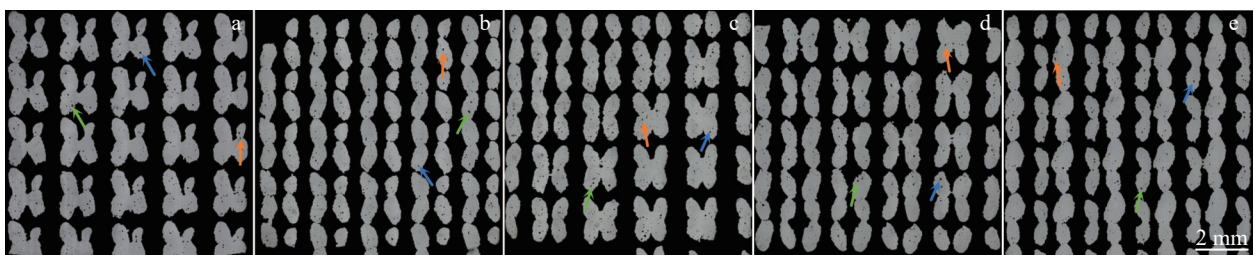


图5 bcc-x点阵结构的内部缺陷

Fig.5 Internal defects of different bcc-x lattice structures: (a) bcc-0.5; (b) bcc-0.75; (c) bcc-1; (d) bcc-1.25; (e) bcc-1.5

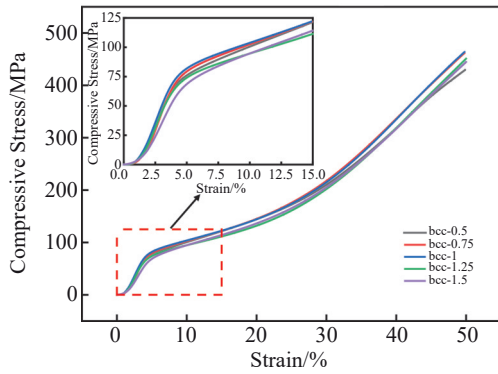


图6 bcc- $x$  点阵结构的压缩应力-应变曲线

Fig.6 Compressive stress-strain curves of bcc- $x$  lattice structures

的增大,其吸能能力与力学性能的变化趋势一致。 $x$  增加到 1 时, bcc 点阵结构获得最大的平台应力 113.431 MPa 和比能量吸收 11.731 J/g, 比能量吸收提升 7.611%; 相比于  $x$  等于 1,  $x$  增加到 1.5 时, 比能量吸收降低 12.309%。分析图 7 中比刚度、比强度和比能量吸收随支柱比例因子的变化趋势可知, 较  $x$  小于 1 时,  $x$  大于 1 的设计使得结构的性能具有更明显的降低趋势。

从具体的压缩性能参数来看, 改变支柱比例因子  $x$  会影响结构的力学性能和吸能能力。bcc 点阵的变形依赖于支柱, 因此支柱的粗细会极大地影响 bcc 结构的抗压缩性能。bcc-1 点阵单元的 4 根支柱具有相同的直径, 在结构上具有均匀性和对称性。均匀结构在准静态的外

力作用下往往具有更好的力学表现, 正如实验结果所示, 支柱比例因子  $x$  等于 1 时, bcc 点阵的力学性能最优。调整支柱比例因子  $x$  小于 1 时, 点阵单元的 1 根支柱直径减小, 其它 3 根支柱直径略微增大, 相当于在原来的均匀结构中引入了结构缺陷, 并破坏了原有的对称性, 越偏离 1 时, 结构缺陷效应和不对称性越严重。因而在抗压性能上, bcc-0.5 点阵次于 bcc-0.75, 更次于 bcc-1。支柱比例因子大于 1 时, 虽然引入了 1 根粗的支柱来抵抗外力, 但同时其它 3 个支柱的直径被消减, 若将加粗的支柱当作增强结构, 这种调整可视为降低了基体结构的密度, 越偏离 1 时, 基体结构密度越低, 越不利于整体结构的力学响应<sup>[24]</sup>。点阵结构的密度是影响其性能的关键因素, 本实验中 bcc 点阵的抗压性能对基体结构密度较结构缺陷更为敏感。通过改变支柱比例因子来调整材料分布的 bcc-1.5 点阵, 在准静态的力学条件下表现不佳, 在工程实践中需要尽量避免。

### 2.3 有限元分析

由于实际模型与理论模型存在较大的几何偏差, 根据实验获得的 bcc 单元的支柱尺寸和形状(表 2), 对原设计模型进行修正。基于修正后的 bcc- $x$  点阵模型, 进行平行于构建方向的有限元单轴准静态压缩模拟, 以分析 bcc- $x$  点阵在压缩载荷下的应力分布和变形规律。有限元模拟得到的应力-应变曲线如图 8a 所示, 支柱比例因子对结构力学性能的影响趋势与实验结果一致, 表 4 为

表 3 准静态压缩实验获得的 bcc- $x$  点阵结构的抗压性能

Table 3 Compression performance of bcc- $x$  lattice structures obtained by quasi-static compression test

Lattice structure	$E$ /MPa	$\sigma_y$ /MPa	$\sigma_p$ /MPa	SEA/ $J \cdot g^{-1}$
bcc-0.5	2602.7±55.731	65.788±0.382	108.967±1.076	10.901±0.103
bcc-0.75	2750.2±23.567	70.299±0.405	111.217±1.177	11.274±0.113
bcc-1	2794.6±47.570	71.038±0.679	113.431±0.640	11.731±0.064
bcc-1.25	2447.7±41.438	64.667±0.546	101.632±0.728	10.565±0.071
bcc-1.5	2224.5±29.769	62.611±0.400	101.503±0.657	10.287±0.068

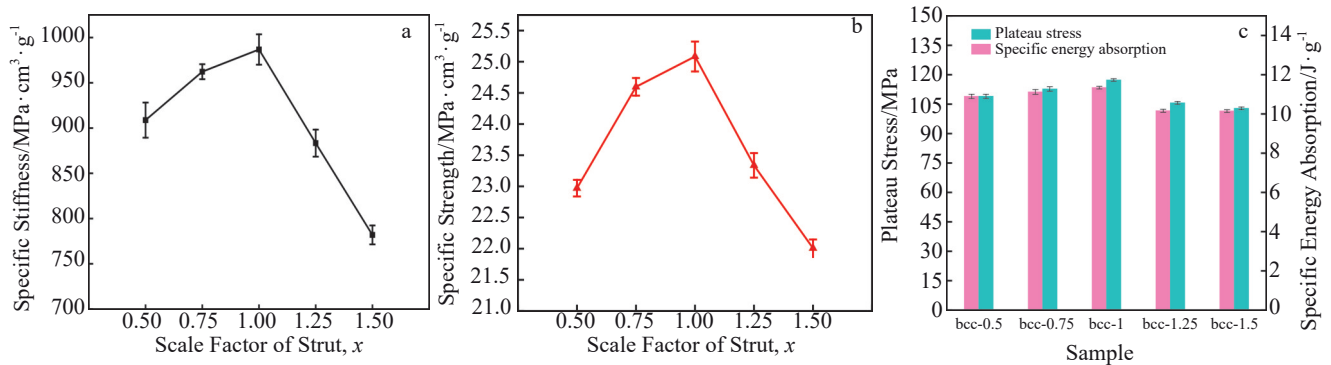


图7 支柱比例因子  $x$  对 bcc 点阵结构抗压性能的影响

Fig.7 Effects of strut scale factor  $x$  on the compression performance of bcc lattice structures: (a) specific stiffness, (b) specific strength and (c) plateau stress and specific energy absorption

FEM得到的 $\sigma_y$ 、 $\sigma_{pl}$ 和SEA,以及与实验之间的误差。图8b~8f将有限元模拟获得的工程应力-应变曲线与实验曲线进行比较,结果表明,在弹性阶段,FEM表现出更高的弹性模量,这是因为用于有限元分析的结构模型是不含缺陷的理想模型,而实际制造过程中会不可避免地引入气孔、匙孔和未熔合缺陷,正如2.1节所讨论的,这些缺陷会造成结构软化,体现出更低的弹性模量<sup>[25]</sup>。在塑性阶段,用于FEM的模型支杆是均匀的,压缩曲线具有理想的平台区,但实验制备的点阵试样在支杆不同部位存在不同程度的粘粉,使得结构提前进入致密化阶段,平台区应力呈现明显的上升趋势。但从 $\sigma_y$ 、 $\sigma_{pl}$ 和SEA来看,模拟与实验具有较好的一致性,这说明所建立的有限元模型是合理的,可以进一步用于bcc-x塑性阶段的变形分析。

通过有限元模拟得到5种不同支柱比例因子的bcc点阵结构在准静态压缩条件下,工程应变为10%、20%、30%、40%和50%时的应力分布和变形轮廓如图9所示,当工程应变达到50%时,bcc-x完全被压实。在压缩过程

中,bcc-x表现出相似的变形模式,整个结构同步变形,且都出现了剪切带(红色虚线)。具体来说,bcc-1的变形模式最为规则,呈现出对称的“X”形状剪切带;相比之下,bcc-0.5和bcc-0.75结构,由于支柱比例因子减小,给整体结构中引入了小尺寸支柱,在载荷作用下,细杆支柱更容易失稳,导致整体结构的剪切带朝右上角偏移;而bcc-1.25和bcc-1.5结构中具有大尺寸支柱,受压缩载荷时,较粗的支柱可以更大程度地抵抗变形,但由于力的传递,与之相邻的单元发生了明显的变形,剪切带朝右下角发生偏移。“X”形剪切带出现在点阵结构的整个塑性区间,剪切带的偏移会使结构变形更易失稳,对力学性能产生不利影响。

bcc点阵结构受压缩载荷时,变形主要通过节点周围倾斜支柱的压缩和旋转进行,应力集中在支柱交叉的节点位置<sup>[26]</sup>,而从应力云图来看,由于实际制造形成的支柱为椭圆柱,bcc-x应力集中的部位由节点处转移到支柱处。bcc-1的高应力区集中分布在支杆的中心部位,随着

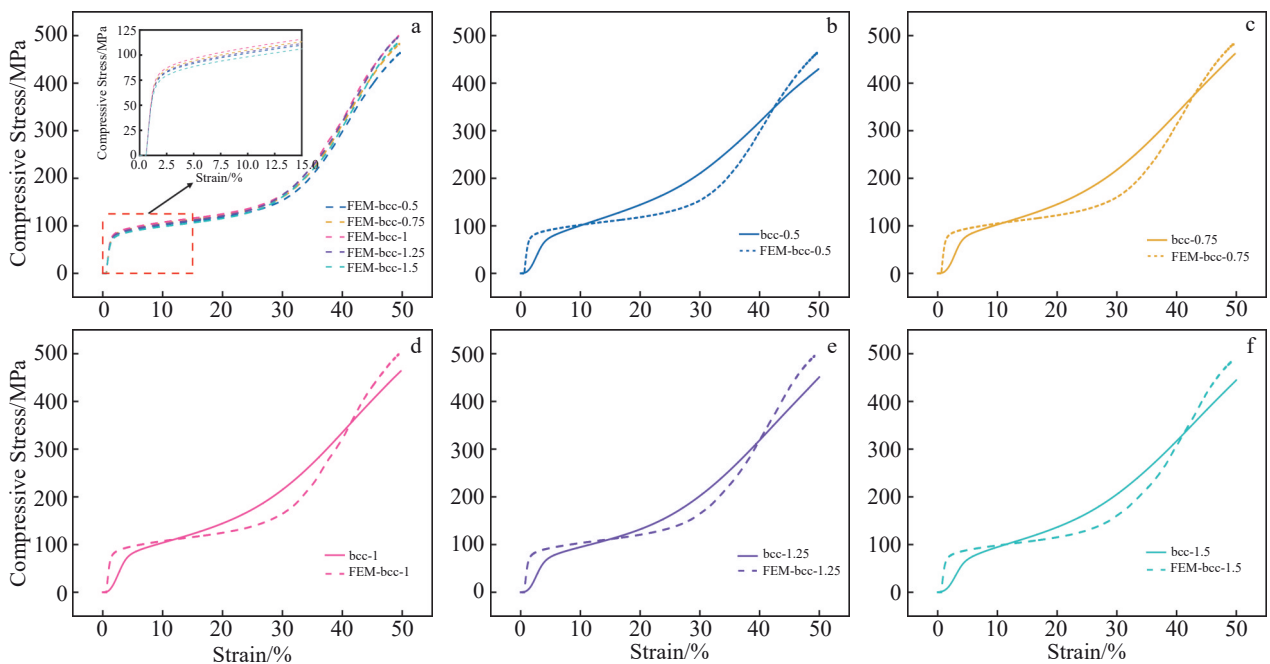


图8 FEM得到的bcc-x点阵结构的压缩应力-应变曲线及其与实验压缩应力-应变曲线的对比

Fig.8 Compressive stress-strain curves of bcc-x lattice structures obtained by FEM (a); comparison of compressive stress-strain curves between FEM and experiment results (b-f): (b) bcc-0.5, (c) bcc-0.75, (d) bcc-1, (e) bcc-1.25, and (f) bcc-1.5

表4 bcc-x点阵结构抗压缩性能FEM模拟值及其与实验值的误差

Table 4 Compression performance of bcc-x lattice structures obtained by FEM and its error with experimental values

Lattice structure	$\sigma_y$ /MPa	Error of $\sigma_y$ /%	$\sigma_{pl}$ /MPa	Error of $\sigma_{pl}$ /%	SEA/J·g <sup>-1</sup>	Error of SEA/%
bcc-0.5	72.155	9.678	107.010	1.796	11.518	5.660
bcc-0.75	74.474	5.939	110.566	0.585	11.873	5.313
bcc-1	76.189	7.251	113.230	0.177	12.133	3.427
bcc-1.25	72.911	12.748	107.094	5.374	10.974	3.871
bcc-1.5	69.081	10.334	102.355	0.839	10.405	1.147

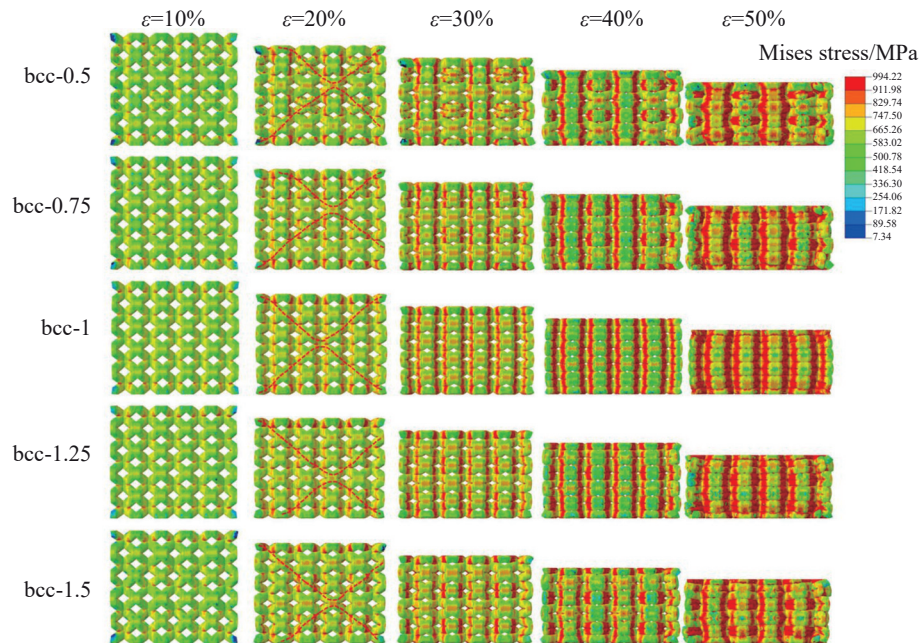


图9 有限元模拟准静态压缩bcc-x点阵结构的米塞斯应力云图

Fig.9 Mises stress clouds of quasi-static compression of bcc-x lattice structures simulated by FEM

塑性应变的增加,应力逐渐扩展到整根支柱,整个变形过程均匀且稳定。bcc-0.5和bcc-0.75受力后,单元中的细杆支柱最先发生塑性变形,在加载方向上,与细杆相连的粗杆受力均匀,直到细杆部分开始致密化后,在支柱中心部位开始出现应力集中的现象。bcc-1.25和bcc-1.5中,粗杆区域拥有更多的材料分配,抵抗变形的能力强,上下两侧的细杆承受了更多的变形,而左右两侧支柱上应力集中现象得以缓解。总的来说,bcc-1高应力区在层与层之间分布较为规律,与bcc-1相比,支柱比例因子的降低和增加都会破坏结构点阵单元的对称性,层间应力呈现明显的间隔式分布。当比例因子越偏离1时,局部致密化现象越为明显,相邻单元应力分布情况的差异越大,这降低了结构的承载能力,体现出更低的比能量吸收。

由于316L材料具有较高的塑韧性,准静态的加载条件下,5种支柱比例因子下bcc的支柱均未发生断裂,而是发生了压缩致密化行为。在本研究中,改变支柱比例因子能通过改变应力分布来影响致密化的过程。支柱比例因子 $x$ 为1的bcc结构,点阵单元的支柱尺寸一致且具有对称性,因此bcc-1的致密化进程均匀且稳定; $x$ 小于1时,bcc- $x$ 的小支柱部位容易提前变形, $x$ 大于1时,大支柱处上下两侧的单元应力更集中,这些部位会提前进入致密化阶段并最终产生更大的变形。因而 $x$ 偏离1时,点阵结构各区域不会同步进入到致密化阶段,提前发生变形的区域会提前失效。

### 3 结论

1)本实验中SLM制备的316L bcc- $x$ 点阵,由于粘粉

和“阶梯效应”,支柱尺寸在平行于构建方向上均大于设计值,而内部孔隙率在1.7%左右。

2)随支柱比例因子 $x$ 的增加,bcc结构的抗压缩性能先提升后降低,当 $x$ 等于1时,可获得最优的力学性能和吸能能力,比刚度、比强度和比能量吸收分别为 $986.794 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $25.084 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $11.371 \text{ J/g}$ 。相较于 $x$ 小于1, $x$ 大于1的设计更不利于结构的抗压缩性能。 $x$ 从0.5增加到1,比刚度、比强度和比吸能分别提升了8.583%、9.199%和7.611%; $x$ 从1增加到1.5,比刚度、比强度和比能量吸收分别降低了20.765%、12.265%和12.309%。

3)有限元分析结果表明bcc-1具有“X”剪切带,且高应力区在层与层之间分布较为规律,与bcc-1相比,支柱比例因子 $x$ 的降低和增加都会破坏结构单元的轴对称性,导致剪切带偏移,层间高应力区呈现明显的间隔式分布,变形更易失稳,对结构的力学性能造成影响。且 $x$ 越偏离1时,相邻单元应力分布情况的差异越大,结构的承载能力越差,体现出更低的比能量吸收。

### 参考文献 References

- [1] Zhao Anan(赵安安). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2018, 61(11): 68
- [2] Li Jialin(李佳霖), Zhao Jian(赵剑), Sun Zhi(孙直) *et al. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*(力学学报)[J], 2022, 54(1): 244
- [3] Lim Dahyun Daniel, Park Jinwoo, Lee Jaemin *et al. Additive Manufacturing*[J], 2022, 55: 102856

- [4] Sheng Su(盛 苏), Chen Hanxiao(陈含笑). *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*(机械科学与技术)[J], 2022, 41(5): 764
- [5] Liang Hongyu(梁鸿宇), Liu Baichuan(刘百川), Ma Fangwu(马芳武) et al. *Automotive Engineering*(汽车工程)[J], 2023, 45(2): 293
- [6] Armanfar A, Tasmektepligil A A, Kilic R T et al. *Ocean Engineering*[J], 2024, 301: 117601
- [7] Wu Hongfei(吴鸿飞), Wang Weirong(王维荣), Wang Guowei(王国伟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(4): 1397
- [8] Zhang X Z, Leary M, Tang H P et al. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*[J], 2018, 22(3): 75
- [9] Guo Meng, Yang Yule, Yang Chao et al. *Journal of Laser Applications*[J], 2024, 36(1): 012033
- [10] Liu Zeliang, Zhao Rui, Tao Chenglin et al. *Aerospace*[J], 2024, 11(1): 4
- [11] Nie Yu, Ren Yi, Gao Haoze et al. *Advanced Engineering Materials*[J], 2024, 26(11): 2400330
- [12] Guo Zhengmiao, Yang Fan, Li Puhao et al. *Engineering Structures*[J], 2024, 305: 117777
- [13] Yang Sanqiang, Zhang Jie, Peng Chengkuan et al. *Advanced Engineering Materials*[J], 2024, 26(10): 2400177
- [14] An Qi, Dong Fangdong, Luo Tianzhi et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2023, 937: 168354
- [15] Zhu Lei, Wang Xiaoyang, Sun Liao et al. *Materials*[J], 2022, 15(24): 9072
- [16] Lv Haiqing(吕海卿), Li Mingchuan(李明川), Ma Rui(马 瑞) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2024, 45(6): 20
- [17] Moesen Maarten, Craeghs Tom, Kruth Jean-Pierre et al. *Computer-Aided Design*[J], 2011, 43(8): 876
- [18] Salem H, Carter L N, Attallah M M et al. *Materials Science Engineering A*[J], 2019, 767: 138387
- [19] Kasperovich Galina, Haubrich Jan, Gussone Joachim et al. *Materials and Design*[J], 2016, 105: 160
- [20] Fabbro Rémy, Dal Morgan, Peyre Patrice et al. *Journal of Laser Applications*[J], 2018, 30(3): 032410
- [21] Antony K, Arivazhagan N. *Journal of Engineering Science and Technology*[J], 2015, 10(4): 509
- [22] Köhnen Patrick, Haase Christian, Bültmann Jan et al. *Materials & Design*[J], 2018, 145: 205
- [23] Yao Dingye, Zhou Weixing, Ma Yuli et al. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2023, 32(7): 2963
- [24] Zhou Han, Zhu Jihong, Wang Chuang et al. *Structural and Multidisciplinary Optimization*[J], 2022, 65(1): 39
- [25] Arabnejad S, Johnston R B, Pura J A et al. *Acta Biomaterialia*[J], 2016, 30: 345
- [26] Ye Jiajian, Sun Zhengping, Ding Yuanyuan et al. *Thin-Walled Structures*[J], 2023, 190: 110988

## Effect of Strut Diameter Difference of bcc Lattice Structure of 316L Stainless Steel Prepared by Selective Laser Melting on Compression Performance

Wang Jiandong<sup>1</sup>, Guan Yao<sup>1</sup>, Yang Jinshui<sup>2</sup>, Wang Dapeng<sup>1</sup>, Dou Wenhao<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(2. Qingdao Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** In order to study the effect of strut diameter difference on the compression performance of body-centered cubic (bcc) lattice structure, five bcc- $x$  lattice structures with different strut diameters were designed under the same density. 316L stainless steel with bcc- $x$  lattice structures were fabricated by selective laser melting technique. A finite element analysis model of quasi-static compression of the lattice structure was established using the plastic constitutive model of the material. The experimental and finite element simulation results show that with the increase in strut scale factor  $x$ , the compressive performance of bcc lattice shows a trend of first increasing and then decreasing, and when  $x$  is greater than 1, the compressive performance is more sensitive to  $x$ . When  $x$  is equal to 1, the optimal compressive properties can be obtained. The specific stiffness, specific strength and specific energy absorption of bcc-1 are 986.794 MPa·cm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>, 25.084 MPa·cm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup> and 11.731 J/g, respectively. Compared with bcc-1, both the decrease and increase of  $x$  will destroy the axial symmetry of the cell, and the larger the  $x$  deviating from 1, the more irregular the distribution of high stress regions between layers, and the more unstable the deformation of the structure. The compressive performance of bcc-1.5 is the worst, and the specific stiffness, specific strength and specific energy absorption are reduced by 20.765%, 12.265% and 12.309%, respectively, compared with those of bcc-1.

**Key words:** selective laser melting; bcc lattice structure; strut scale factor; compression performance; finite element simulation

Corresponding author: Yang Jinshui, Ph. D., Professor, Qingdao Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, P. R. China, E-mail: yangjinshui@hrbeu.edu.cn