

## 激光粉末床成形 316L 不锈钢多孔结构力学性能研究

刘玉德<sup>\*</sup>, 郭甲, 石文天, 韩玉凡, 周裕圣

北京工商大学人工智能学院, 北京 100048

**摘要** 以激光粉末床熔融(LPBF)技术成形的 316L 不锈钢体心立方型(BCC)多孔结构为研究对象,利用有限元分析法对不同长径比杆件的体心立方型多孔结构进行了准静态压缩过程模拟,分析了其微观力学响应和应力-应变特性。制备了体心立方型 316L 不锈钢多孔结构样件,对样件进行了准静态压缩试验,分析了具有不同几何参数的多孔结构的应力-应变特性和变形失效机制,并对比分析了仿真和力学试验的结果。研究表明:当成形样件杆件的直径从 0.4 mm 增加到 1.2 mm 时,杆件直径的相对误差从 15.00% 下降到 6.08%,直径越大,相对误差越小,等效弹性模量从 59.87 MPa 增加到 3356.21 MPa,压缩屈服强度从 1.02 MPa 增加到 33.88 MPa;有限元分析法与力学试验得到的等效弹性模量和压缩屈服强度的平均相对误差分别为 9.11% 和 7.86%。

**关键词** 激光技术;激光粉末床熔融技术;体心立方型多孔结构;有限元分析;力学性能试验

**中图分类号** TN249;TB31

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202249.0802018

## 1 引言

实现轻量化是航空航天、武器装备、交通运输等领域一直追求的目标<sup>[1]</sup>,是集设计、制造和材料等为一体的综合性应用<sup>[2]</sup>。金属多孔结构(如蜂窝结构<sup>[3-4]</sup>、仿生结构<sup>[5]</sup>、点阵结构<sup>[6]</sup>等)作为轻量化结构的一种,具有相对密度小、比强度高、吸能特性好等优势,被广泛应用于高科技领域和普通工业领域<sup>[7]</sup>。激光粉末床熔融技术又被称为选区激光熔化(SLM)技术<sup>[8]</sup>,是以高能激光为热源、金属粉末为原材料的一种逐点逐层精密成形复杂构件的 3D 打印技术<sup>[9]</sup>,该技术成形精度高,对特殊复杂结构(如悬垂结构、薄壁结构、复杂曲面、空间点阵等)制造的适用程度高<sup>[10]</sup>。韦雄棉等<sup>[11]</sup>制备了基于 SLM 技术的体心立方、Z 方向增强体心立方和蜂窝多孔结构,发现随着孔隙率的提高,三种结构的拉伸性能下降,相比之下蜂窝多孔结构的拉伸性能较好。曾寿金等<sup>[12]</sup>利用 SLM 技术制备了 316L 不锈钢体心立方结构和正十二面体结构,发现正十二面体多孔结构的力学性能更加优越,但正十二面体单元存在着大量的悬垂结构,成形质量相对较差,仿真预测误差

较大。Tancogne-Dejean 等<sup>[13-14]</sup>制备了基于 SLM 技术的八隅体桁架点阵结构,在  $10^3 \text{ s}^{-1}$  应变速率下仍具备良好的吸能特性。Panesar 等<sup>[15]</sup>研究了拓扑优化技术在设计点阵结构中的应用,发现拓扑优化后结构的比刚度较传统规则点阵结构更好。

本文以 316L 不锈钢多孔结构为研究对象,以激光粉末床熔融(LPBF)技术为基础,结合有限元分析和力学试验研究等方法,系统研究了金属多孔结构在单向准静态压缩载荷下的力学行为,研究结果为机械设备的轻量化设计提供了参考。

## 2 有限元分析

### 2.1 模型设计

在不设计支撑结构的前提下,LPBF 技术所成形的 316L 悬垂结构与水平面的夹角必须保持在  $30^\circ$  以上<sup>[16-18]</sup>。因此 LPBF 技术可成形的金属多孔结构的胞元类型主要有体心立方(BCC)胞元、Z 方向增强体心立方(BCCZ)、面心立方(FCC)胞元以及 Z 方向增强面心立方(FCCZ)等,如图 1 所示。BCC 胞元由正方体体对角线构成,杆件倾角约为  $37^\circ$ ,可防止杆件翘曲变形,结构为正交同性结构,在单向载

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-10-11; 录用日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(51975006)

通信作者: \*liu\_yude@163.com

荷下,方便分析其变形和失效机制。因此本文选用 BCC 胞元为研究对象,设计其胞元大小为  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ ,杆件直径( $d$ )分别取 0.4,0.6,0.8,

1.0,1.2 mm,对应杆件命名为 BCC 0.4,BCC 0.6,BCC 0.8,BCC 1.0,BCC 1.2。得到杆件长度与直径比值不同的多孔结构,其模型如图 2 所示。

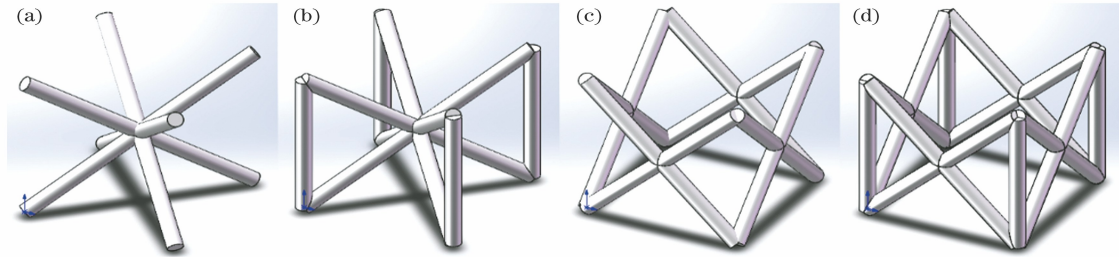


图 1 胞元类型。(a)BCC; (b)BCCZ; (c)FCC; (d)FCCZ

Fig. 1 Cell element types. (a) BCC; (b) BCCZ; (c) FCC; (d) FCCZ

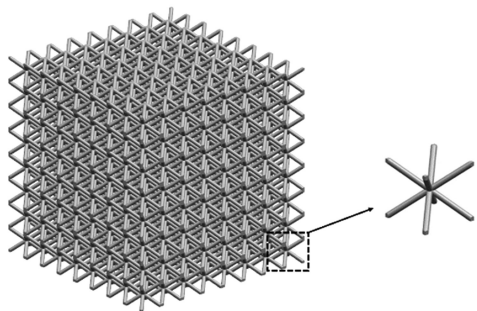


图 2 体心立方型多孔结构样件的模型

Fig. 2 Model of body-centered cubic porous structure

## 2.2 网格划分、边界条件和载荷

采用仿真软件 ABAQUS/Explicit 建立多孔结构的准静态分析模型。图 3(a)所示为多孔结构模型(Wire),指定截面的模型如图 3(b)所示。在划分网格时,多孔结构的单元类型选择一次完全积分梁单元(B31),单元大小为 0.35;采用壳单元(Shell)进行建模,单元类型为离散刚体(Discrete rigid),上下两个刚性面都要设置参考点(RP),用来设置边界条件和施加载荷,装配好的有限元分析模型如图 4 示。

根据实际工况,对多孔结构模型最下层节点进行六自由度约束,上刚性面模拟压头,约束除 Z 轴

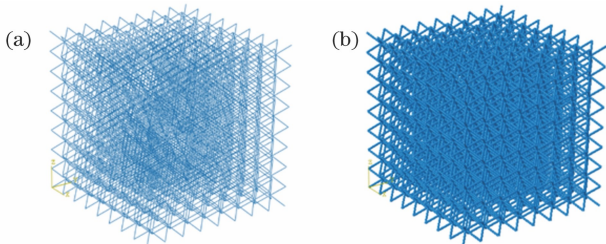


图 3 多孔结构的有限元模型。(a)多孔结构的 Wire 模型;(b)指定截面的模型

Fig. 3 Finite element models of porous structure. (a) Wire model of porous structure; (b) model with specified section

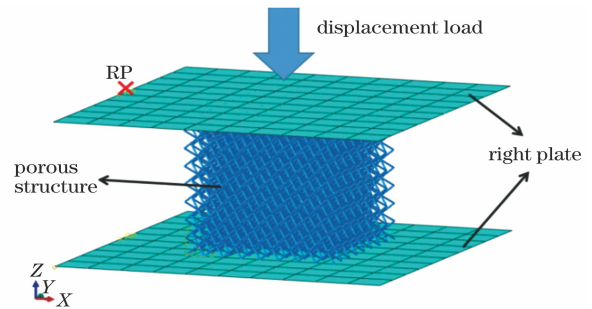


图 4 装配后的有限元模型

Fig. 4 Finite element model after assembly

方向移动以外的所有自由度,沿 Z 轴负向平移 3.2 mm(即模型高度)。

为了保证加载过程不对模型产生明显冲击,位移加载模式选用光滑加载(Smooth step)<sup>[19]</sup>,加载曲线如图 5 所示,其中 S 和 t 分别表示加载位移和分析时间。

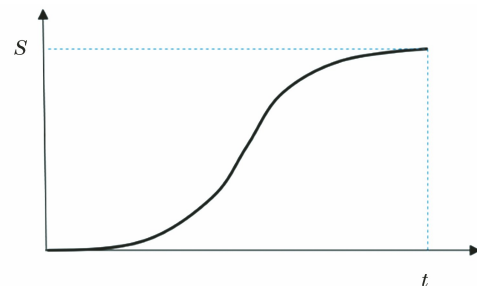


图 5 Smooth step 曲线

Fig. 5 Smooth step curve

## 2.3 结果与分析

### 2.3.1 能量分析

本文采用有限元模型中的能量关系评估分析结果是否为正确的准静态响应,要求在主要成形过程中变形材料的动能不能超过内能的 5%~10%。经有限元分析计算后,动能和内能如图 6 所示,五种尺寸多孔结构的动能( $E_{KE}$ )都在内能( $E_I$ )的 5% 以下,因此可以确定为正确的准静态响应。

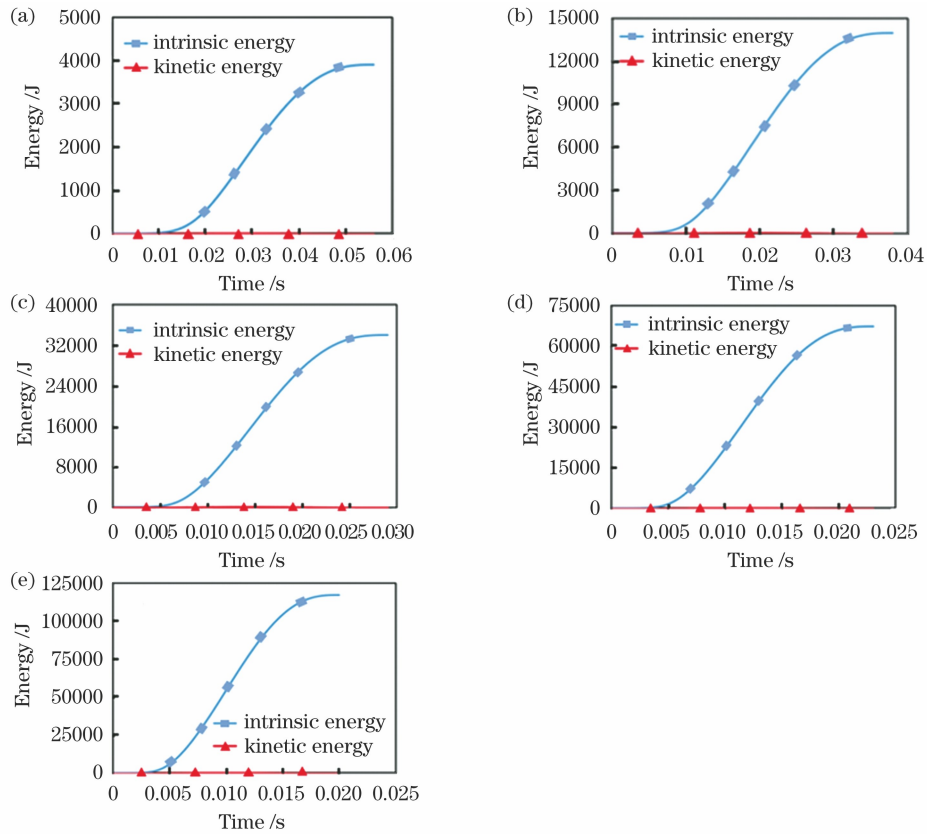


图 6 体心立方型多孔结构的能量曲线图。(a)BCC 0.4;(b)BCC 0.6;(c)BCC 0.8;(d)BCC 1.0;(e)BCC 1.2

Fig. 6 Energy curves of body-centered cubic porous structure. (a) BCC 0.4; (b) BCC 0.6; (c) BCC 0.8; (d) BCC 1.0; (e) BCC 1.2

2.3.2 应力-应变响应分析

图 7(a)~(e)为五种尺寸多孔结构在应变约为

10%时的 Mises 应力云图,每一组左侧为多孔结构全视图,右侧为剖视图。其应力分布情况较一致,从

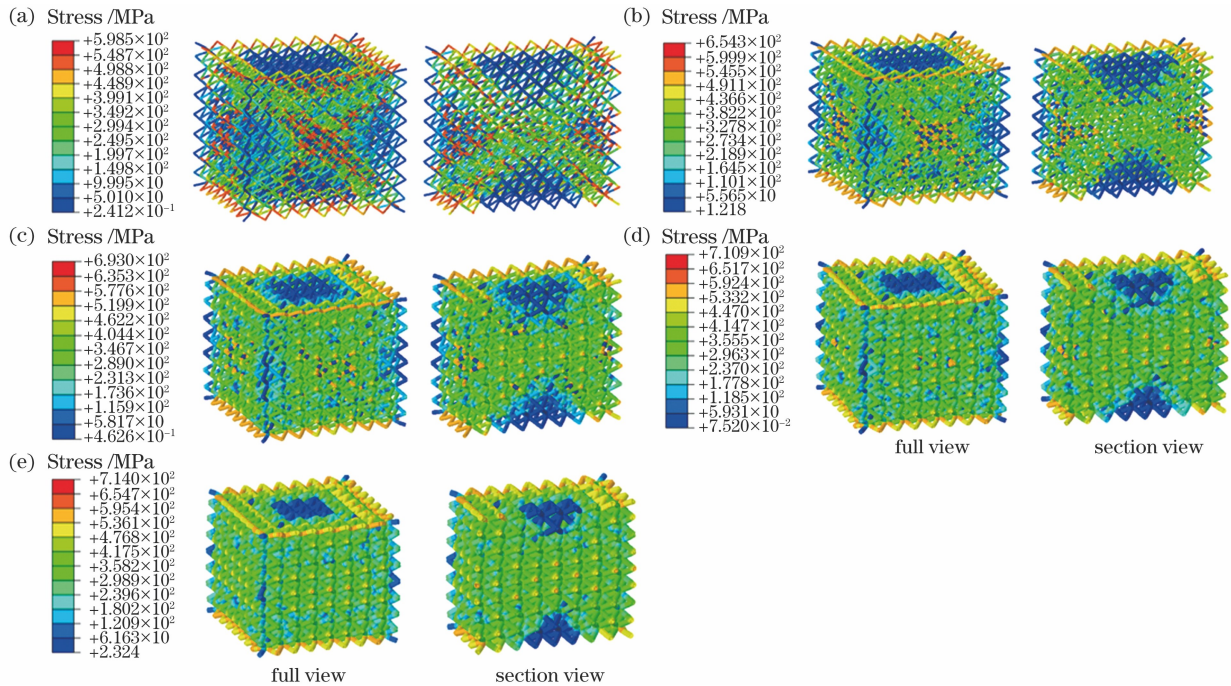


图 7 体心立方型多孔结构的应力云图。(a)BCC 0.4;(b)BCC 0.6;(c)BCC 0.8;(d)BCC 1.0;(e)BCC 1.2

Fig. 7 Stress nephograms of body-centered cubic porous structure. (a) BCC 0.4; (b) BCC 0.6; (c) BCC 0.8; (d) BCC 1.0; (e) BCC 1.2

顶面看,应力分布情况是中心区域应力水平低,周围区域高,这是由于刚性板对多孔结构最上层和最下层胞元起到约束的作用,越靠近周围的胞元,所受约束越小,越易变形,应力水平越高,越靠近中部的胞元,所受约束越强,越不易变形,应力水平越低。由于对角线方向(约 45°)的剪切应力最大,因此从截面上可以看到呈“X”状分布的高应力区,对角线与刚性板封闭区域形成“锥”状低应力区。随着杆件

直径的增大,高应力区域逐渐均匀化,但“锥”状低应力区依然明显可见。图 8 所示为位移云图,可以看出五组尺寸多孔结构的位移分布较为一致,加载过程中 Z 方向的位移沿 Z 轴负方向递减,但对于同一水平面的胞元,靠近对角线区域的位移差较大,说明对角线区域的胞元更易变形。就单个胞元而言,节点处的应力水平较高,杆件中间部分较低,即塑性屈服首先发生在节点处,屈服方式为两端弯曲。

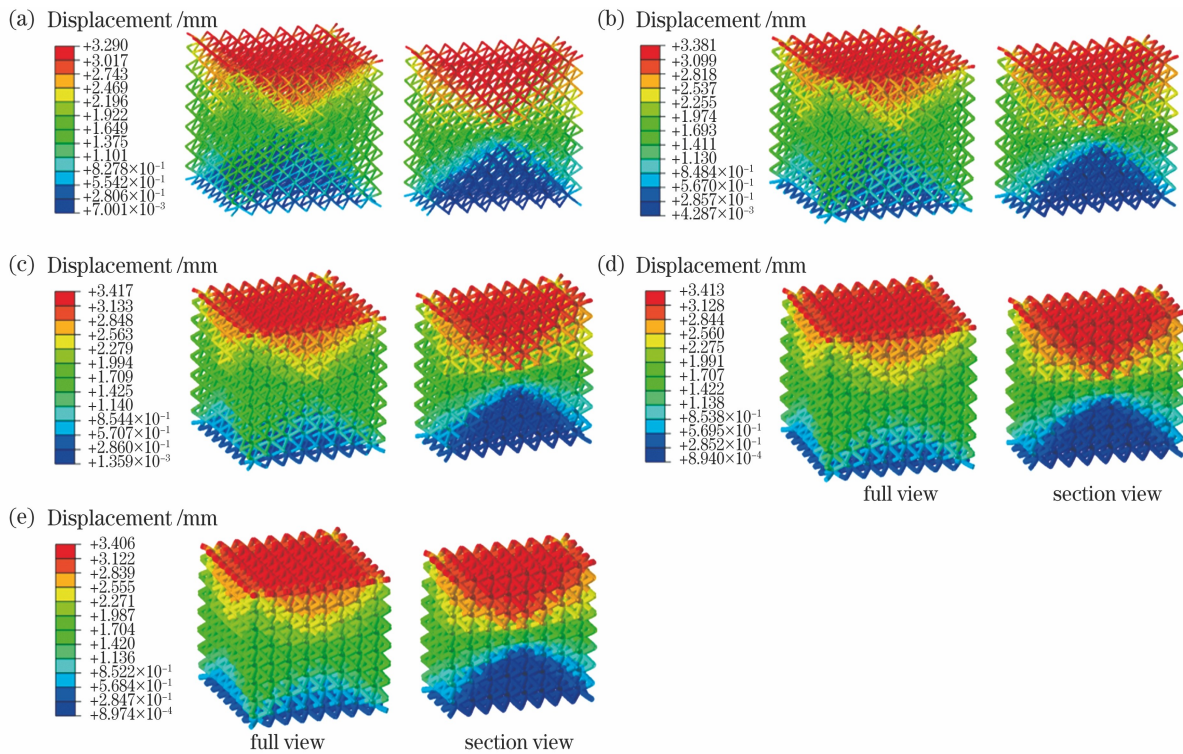


图 8 体心立方型多孔结构的位移云图。(a)BCC 0.4;(b)BCC 0.6;(c)BCC 0.8;(d)BCC 1.0;(e)BCC 1.2

Fig. 8 Displacement nephograms of body-centered cubic porous structure. (a) BCC 0.4; (b) BCC 0.6; (c) BCC 0.8; (d) BCC 1.0; (e) BCC 1.2

由于有限元软件不能直接提供应力-应变的变化规律,需先提取出图 9 所示的载荷-位移曲线。

然后将载荷-位移曲线转化为应力-应变曲线。

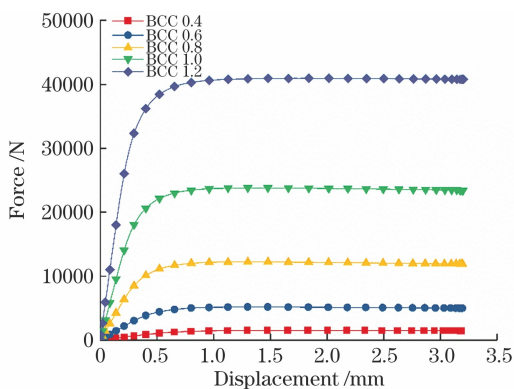


图 9 载荷-位移曲线

Fig. 9 Force-displacement curves

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h}, \quad (2)$$

式中: $\sigma$  为应力; $F$  为多孔结构的压缩载荷; $S$  为多孔结构模型的横截面积; $\epsilon$  为应变; $\Delta h$  为压缩量; $h$  为多孔结构模型的初始高度。

应力-应变曲线如图 10 所示,I 阶段为弹性变形,主要存在于 2% 的应变范围内,当应力增加到一定程度时,进入到 II 阶段,应力与应变不再呈线性关系,多孔结构开始屈服,屈服平台阶段占据了压缩行程的绝大部分,一直持续到压缩终止。为了避免变形过大影响分析结果的精确性,本次仿真只压缩了模型高度的 10%。

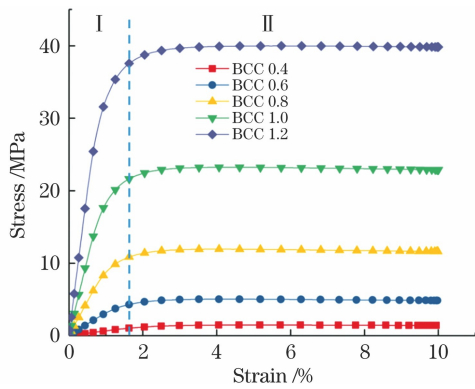


图 10 应力-应变仿真曲线  
Fig. 10 Stress-strain curves

### 3 力学试验

#### 3.1 设备与材料

采用选区激光熔化设备 Renishaw AM400 制

表 1 316L 粉末的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of 316L powder (mass fraction, %)

Element	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Content	Bal.	≤0.030	≤1.000	≤2.000	≤0.035	≤0.030	12.000–15.000	16.000–18.000	1.800–2.500

表 2 工艺参数

Table 2 Process parameters

Parameter	Dot distance / $\mu\text{m}$	Time of exposure / $\mu\text{s}$	Laser power /W	Line distance / $\mu\text{m}$
Value	50	80	200	100

成形后的样件如图 12 所示。

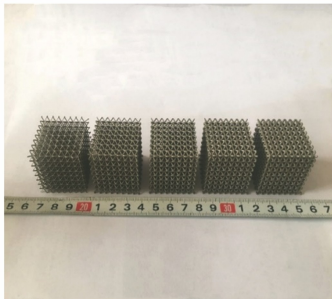


图 12 LPBF 成形的体心立方型多孔结构样件  
Fig. 12 Sample of body-centered cubic porous structure formed by LPBF

备样件,选用雾化 316L 粉末作为试验材料,其形貌如图 11 所示,化学成分如表 1 所示。

通过正交试验,选择点距、曝光时间、激光功率、扫描间距作为正交试验因素,获得了该设备成形 316L 不锈钢的最优工艺参数,具体工艺参数如表 2 所示。

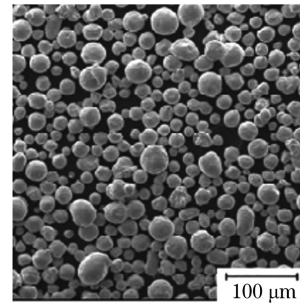


图 11 316L 粉末形貌  
Fig. 11 Morphology of 316L powder

#### 3.2 试验方法

采用 UTM5305 电子万能试验机在常温下对试样进行单轴压缩试验(试验装置如图 13 所示),上压头以 0.05 mm/s 的应变率向下移动,压缩至样品高度的 70%时停止,输出载荷-位移曲线,压缩过程中使用摄像机记录变形过程。将位移除以样品高度 32 mm 得到应变值  $\epsilon$ ,载荷除以样品横截面积得到应力值  $\sigma$ ,使用绘图软件 Origin 绘制应力-应变曲线,利用计算软件 Matlab 对线性阶段的数据进行拟合,拟合直线的斜率即为多孔结构的等效弹性模量,以第一峰值或屈服强度( $\sigma_{0.2}$ )作为压缩屈服强度。

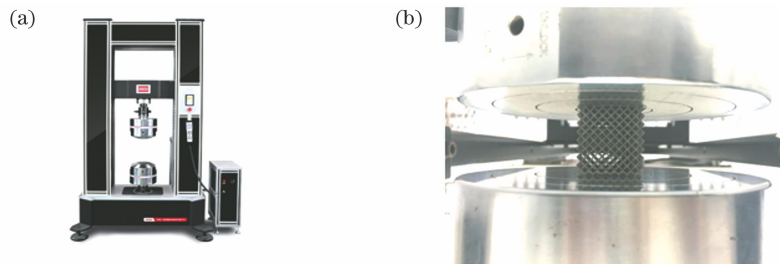


图 13 压缩试验装置。(a)设备整机;(b)局部放大图  
Fig. 13 Compression test device. (a) Whole machine equipment; (b) partially enlarged drawing

### 3.3 结果与分析

#### 3.3.1 尺寸与形态特征

图 14 所示为多孔结构在光学显微镜下的宏观形貌。可以看到,采用 LPBF 技术制备的样件杆件

无变形、开裂等宏观缺陷,孔洞无堵塞,样件几何形态与模型一致。从图 14(f)局部放大图可以看到,杆件表面较为粗糙。

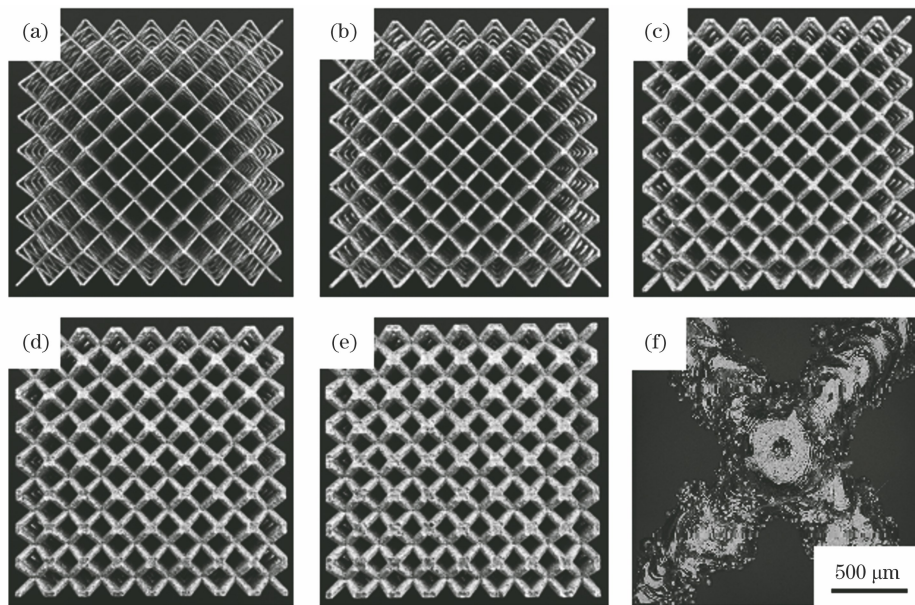


图 14 体心立方型多孔结构的宏观形貌。(a)BCC 0.4;(b)BCC 0.6;(c)BCC 0.8;(d)BCC 1.0;(e)BCC 1.2;(f)局部放大图

Fig. 14 Macroscopic profiles of body-centered cubic porous structure. (a) BCC 0.4; (b) BCC 0.6; (c) BCC 0.8; (d) BCC 1.0; (e) BCC 1.2; (f) partially enlarged drawing

利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察多孔结构的微观表面形貌,如图 15 所示。可以看到杆件表面存在未熔化的金属颗粒,原因是熔池周围的粉末熔化不充分,冷却后粘附在固化材料表面。杆件呈“鱼鳞状”形貌,这是由 LPBF 技术的工艺特点造

成的,激光光斑中心的激光能量最高,熔化较深,两侧能量较弱,熔化较浅,且熔化后液体金属受表面张力的作用,单熔道的剖面呈椭圆状,再加上层间交错的扫描策略,最终呈现出“鱼鳞状”的表面形貌。

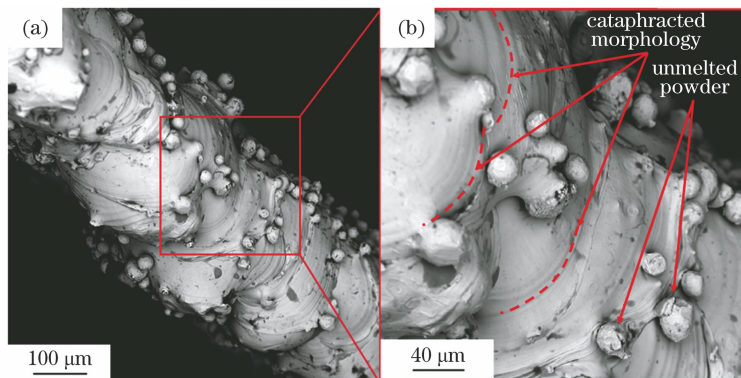


图 15 微观形貌的扫描电镜图像。(a)表面形貌;(b)局部放大图

Fig. 15 SEM images of microscopic profile. (a) Surface topography; (b) partially enlarged drawing

五种尺寸多孔结构的杆件直径实测值如表 3 所示,直径的绝对误差为 0.060~0.073 mm,绝对误差受直径大小的影响;相对误差为 6.08%~15.00%,随着杆件直径的增大,相对误差逐渐减小,即杆件的成形精度随直径的增大而增大。

体积占比(多孔结构的实际体积与其所占空间

体积之比)的实测值如表 4 所示,可以发现,杆件直径和体积占比的实测值均大于设计值。体积占比的绝对误差为 0.40%~2.16%,随体积占比的增大而逐渐增大;相对误差为 6.03%~8.20%,且随着体积占比的增大而逐渐减小,即体积占比越大,成型精度越高。

表 3 杆件直径的测量结果

Table 3 Measurement result of rod diameter

Mold	Design result /mm	Measurement result /mm	Absolute error /mm	Relative error /%
BCC 0.4	0.400	0.460	0.060	15.00
BCC 0.6	0.600	0.668	0.068	11.33
BCC 0.8	0.800	0.871	0.071	8.88
BCC 1.0	1.000	1.069	0.069	6.90
BCC 1.2	1.200	1.273	0.073	6.08

表 4 体积占比的测量结果

Table 4 Measurement result of volume fraction

Mold	Design result /%	Measurement result /%	Absolute error /%	Relative error /%
BCC 0.4	4.90	5.30	0.40	8.20
BCC 0.6	10.59	11.34	0.75	7.11
BCC 0.8	17.85	19.02	1.17	6.53
BCC 1.0	26.36	28.00	1.64	6.22
BCC 1.2	35.75	37.91	2.16	6.03

综上所述,LPBF 成形的 316L 不锈钢多孔结构虽表面粗糙,但与计算机模型高度吻合,成型误差小于 15%,LPBF 技术具备成形体心立方型 316L 不锈钢多孔结构的能力。

### 3.3.2 应力-应变响应分析

通过压缩试验获得了五种尺寸多孔结构在单向准静态压缩载荷下的应力-应变曲线,如图 16 所示。I 阶段为线弹性阶段,发生的是弹性变形;II 阶段为平台应力阶段,杆件达到母体材料的屈服极限,发生塑性变形,由于多孔结构的孔隙率较大,杆件发生弯曲变形但尚未接触,有较大变形空间,因此应力增加不明显,这个阶段被认为是吸收能量的主要阶段,可以有效耗散外界压缩或冲击产生的能量<sup>[20]</sup>;III 阶段为致密化阶段,胞元被压溃变形,杆件之间相互接触,结构完全压实,类似于致密金属的压缩过程。将

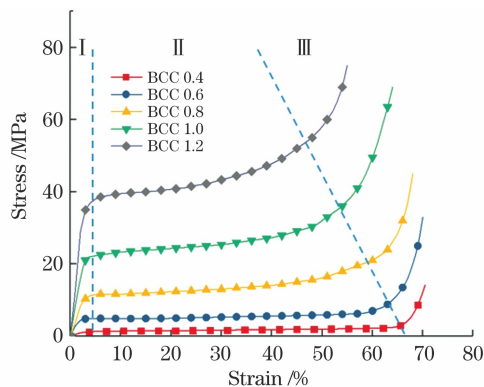


图 16 应力-应变测试曲线

Fig. 16 Stress-strain test curves

图 16 与图 10 对比可知,在 10% 应变范围内,有限元分析结果与力学试验结果吻合,曲线变化趋势一致。本文仿真只压缩了模型高度的 10%,当超过 10% 应变直到进入致密化阶段时,由于仿真模型高度理想化,而实际模型受表面粘粉、成型误差等因素的影响,两种结果会出现较大差异。

### 3.3.3 变形与失效分析

本文以 BCC 0.4 为例分析其变形与失效模式。图 17 所示为 50% 压缩应变范围内的变形过程,可以看出,多孔结构的所有胞元变形基本同步,无明显局部坍塌。在初始阶段,变形均匀,当  $\epsilon = 20\%$  时,对角线上的杆件开始出现不同步弯曲变形,如局部放大图所示。从  $\epsilon = 30\%$  开始,位于对角线上的胞元特别是对角线交点处,密积现象加剧,随着载荷加大,变形扩散至整个样件。当  $\epsilon = 50\%$  时,对角线上的胞元尤其是对角线交点处的胞元变形情况比周围明显严重。这表明在整个变形过程中,应变主要集中于对角线尤其是中心区域,但整体表现出较高的柔度。与前文的有限元分析吻合。试验结果表明:多孔结构的失效形式为塑性变形,杆件未出现断裂,表明采用 LPBF 技术制备的多孔结构质量可靠。

### 3.4 结果与分析

体心立方型 316L 不锈钢多孔结构的力学性能参数(等效弹性模量  $E_{BCC}^*$  和压缩屈服强度  $\sigma^*$ )如表 5 所示,其中包含有限元分析(FEA)和力学试验(Experiment)的研究结果。

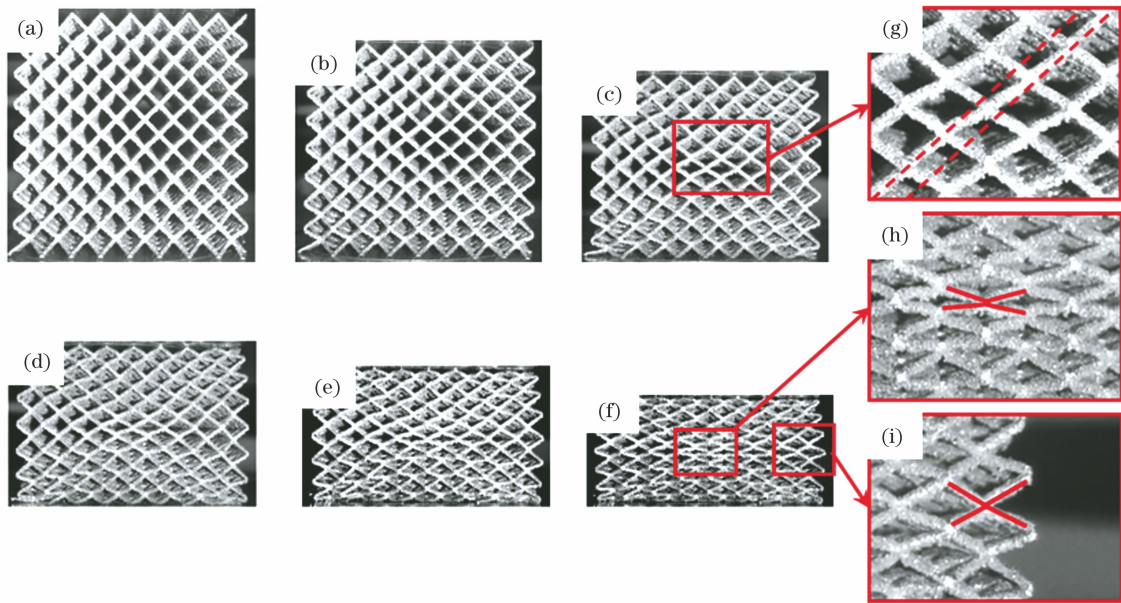


图 17 不同  $\epsilon$  下体心立方型多孔结构的变形过程。(a)  $\epsilon=0$ ; (b)  $\epsilon=10\%$ ; (c)  $\epsilon=20\%$ ; (d)  $\epsilon=30\%$ ; (e)  $\epsilon=40\%$ ; (f)  $\epsilon=50\%$ ; (g) 图 17(c) 的局部放大图; (h) (i) 图 17(f) 的区域放大图

Fig. 17 Deformation process of body-centered cubic porous structure under each  $\epsilon$ . (a)  $\epsilon=0$ ; (b)  $\epsilon=10\%$ ; (c)  $\epsilon=20\%$ ; (d)  $\epsilon=30\%$ ; (e)  $\epsilon=40\%$ ; (f)  $\epsilon=50\%$ ; (g) local enlarged view of Fig. 7 (c); (h) (i) local enlarged view of Fig. 7 (f)

表 5 体心立方型 316L 多孔结构的力学性能参数

Table 5 Mechanical performance parameters of body-centered cubic 316L porous structure

Mold	$d / \text{mm}$	$E_{\text{BBC}}^* / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$		$\sigma^* / \text{MPa}$	
		FEA	Experiment	FEA	Experiment
BCC 0.4	0.4	65.76	59.87	1.10	1.02
BCC 0.6	0.6	281.57	260.38	4.15	3.88
BCC 0.8	0.8	845.34	778.14	10.11	9.44
BCC 1.0	1.0	1957.21	1792.25	20.38	18.81
BCC 1.2	1.2	3683.28	3356.21	36.95	

有限元分析和准静态力学试验得到的结果的对比如图 18 所示。可以看出,当长径比取固定值时,两种方法得到的力学性能参数较为接近。

有限元分析与力学试验得到的等效弹性模量的

平均相对误差为 9.11%,压缩屈服强度的平均相对误差为 7.86%,验证了有限元模型的合理性。有限元分析结果比力学试验结果好,这是由于有限元模型高度理想化,而实际样件存在诸多成形缺陷,如杆

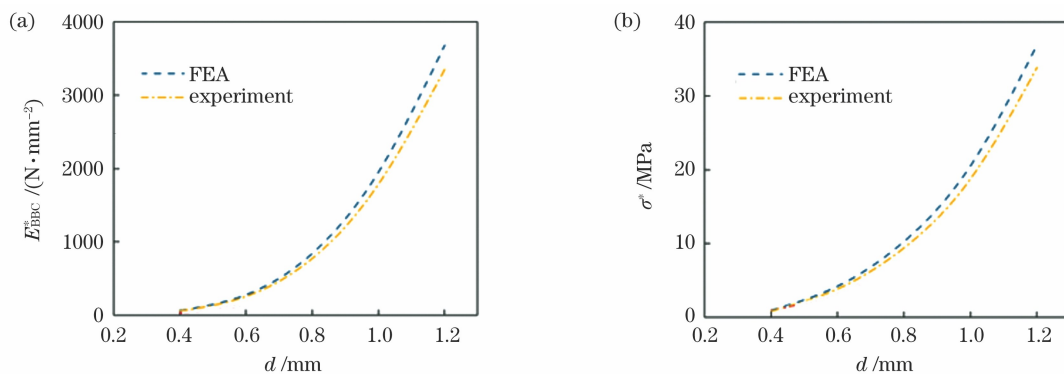


图 18 力学性能曲线。(a)  $E_{\text{BBC}}^*$ ; (b)  $\sigma^*$

Fig. 18 Mechanical property curves. (a)  $E_{\text{BBC}}^*$ ; (b)  $\sigma^*$



件表面较粗糙。实测值比设计值大,成形误差很大一部分来自表面粘粉和台阶效应;有效承力尺寸实际值比设计值小,且粗糙表面易产生应力集中,在承受载荷时不能达到理想状态。

## 4 结 论

对多孔结构进行了形貌观测和几何参数测量,当杆件的直径为 0.4~1.2 mm,多孔结构的体积占比为 4.9%~35.75%时,直径和体积占比的相对误差分别为 15.00%~6.08%和 8.20%~6.03%,即杆件的成型精度随直径的增大而增大,体积占比越大,成型精度越高。可知成形效果良好,轮廓误差和表面粘粉是导致误差的主要原因,尺寸越大,成型精度越高。

利用有限元软件建立了体心立方型多孔结构的准静态分析模型,对单向压缩试验过程进行了模拟。就单个胞元而言,节点处最先达到屈服极限,产生塑性变形;就整个多孔结构而言,存在变形的不均匀性,对角线区域尤其是中心区域最先达到屈服极限,产生塑性变形;杆件直径不同的结构,其应力分布和位移分布基本相同。

基于 LPBF 技术制备了体心立方型 316L 多孔结构样件,成形效果良好,制造误差主要归因于轮廓误差和表面粘粉。多孔结构的压缩过程主要经历弹性阶段、平台应力阶段以及致密化阶段三个阶段,失效形式为塑性变形失效。关于力学性能,当体心立方型多孔结构的杆件直径从 0.4 mm 增加至 1.2 mm 时,等效弹性模量从 59.87 MPa 增加至 3356.21 MPa,压缩屈服强度从 1.02 MPa 增加至 33.88 MPa。

对比分析了有限元分析结果和力学试验结果,有限元分析与力学试验得到的等效弹性模量的平均相对误差为 9.11%,压缩屈服强度的平均相对误差为 7.86%,均在 10%以内,因此有限元模型可以在一定误差范围内有效预测 316L 不锈钢体心立方型多孔结构的力学性能。

## 参 考 文 献

- [1] Kleiner M, Geiger M, Klaus A. Manufacturing of lightweight components by metal forming[J]. CIRP Annals, 2003, 52(2): 521-542.
- [2] Gao S D. Application of lightweight in construction machinery design [J]. Construction Machinery Technology & Management, 2010, 23(10): 66. 高顺德. 轻量化技术在工程机械设计中的应用[J]. 建设机械技术与管理, 2010, 23(10): 66.
- [3] Zhang D H. Mechanical behavior of honeycombs and sandwich panels under impact loading[D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 17-33. 张大海. 冲击载荷下蜂窝及其夹芯结构力学行为研究[D]. 南京: 东南大学, 2018: 17-33.
- [4] Zhang Q C, Yang X H, Li P, et al. Bioinspired engineering of honeycomb structure-using nature to inspire human innovation[J]. Progress in Materials Science, 2015, 74: 332-400.
- [5] Cheng W L, Yuan C, Qiu Q Y, et al. Honeycomb sandwich structure and manufacturing process in aviation industry [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(7): 94-98. 程文礼, 袁超, 邱启艳, 等. 航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J]. 航空制造技术, 2015, 58(7): 94-98.
- [6] Dong P, Chen J L. Current status of selective laser melting for aerospace applications abroad [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014 (1): 1-5. 董鹏, 陈济轮. 国外选区激光熔化成形技术在航空航天领域应用现状[J]. 航天制造技术, 2014(1): 1-5.
- [7] Al-Ketan O, Rowshan R, Abu Al-Rub R K. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials [J]. Additive Manufacturing, 2018, 19: 167-183.
- [8] Olakanmi E O, Cochrane R F, Dalgarno K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: processing, microstructure, and properties [J]. Progress in Materials Science, 2015, 74: 401-477.
- [9] Min S L, Hou J, Zhang K, et al. Laser powder bed fusion of GH3536 alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1700008. 闵师领, 侯娟, 张恺, 等. 激光粉末床技术制造 GH3536 合金研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700008.
- [10] Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002. 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
- [11] Wei X M, Wang D, Yang Y Q, et al. Study on tensile properties of titanium alloy porous structure using selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802016. 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.
- [12] Zeng S J, Wu Q R, Ye J H. Mechanical properties of 316L stainless steel porous structure formed by selective laser melting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 67-75.  
曾寿金, 吴启锐, 叶建华. 选区激光熔化成型 316L 不锈钢多孔结构的力学性能 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(8): 67-75.
- [13] Tancogne-Dejean T, Spierings A B, Mohr D. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading [J]. *Acta Materialia*, 2016, 116: 14-28.
- [14] Latture R M, Rodriguez R X, Holmes L R, Jr, et al. Effects of nodal fillets and external boundaries on compressive response of an octet truss [J]. *Acta Materialia*, 2018, 149: 78-87.
- [15] Panesar A, Abdi M, Hickman D, et al. Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for additive manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 81-94.
- [16] Wu G L, Liu T T, Zhang C D, et al. Research on forming quality of overhanging structure by selective laser melting [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(13): 1810-1815.  
吴根丽, 刘婷婷, 张长东, 等.  $Ti_6Al_4V$  激光选区熔化成形悬垂结构的质量研究 [J]. *中国机械工程*, 2016, 27(13): 1810-1815.
- [17] Qi B, Liu Y D, Shi W T, et al. Study on overlap ratio of pulse laser selective melting forming [J]. *Laser Technology*, 2018, 235(3): 27-33.  
祁斌, 刘玉德, 石文天, 等. 脉冲式激光选区熔化成形搭接率的研究 [J]. *激光技术*, 2018, 235(3): 27-33.
- [18] Shi W T, Wang P, Liu Y D, et al. Process strategy of selected laser melting forming non-horizontal suspension structure experiment of nichrome steel [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2019, 43(5): 486-493.  
石文天, 王朋, 刘玉德, 等. 镍铬合金选区激光熔化成形非水平悬垂结构的工艺策略试验研究 [J]. *稀有金属*, 2019, 43(5): 486-493.
- [19] Feng Q X. A study on the mechanical properties of metallic porous structures fabricated using selective laser melting and its variable-density design method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.  
冯琪翔. 基于选择性激光熔化的金属多孔结构力学特性及其变密度设计方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [20] Leary M, Mazur M, Williams H, et al. Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): mechanical properties, deformation and failure modes [J]. *Materials & Design*, 2018, 157: 179-199.

## Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Porous Structure Formed by Laser Powder Bed Fusion

Liu Yude<sup>\*</sup>, Guo Jia, Shi Wentian, Han Yufan, Zhou Yusheng

*School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China*

### Abstract

**Objective** The metallic porous structure has great application prospects in lightweight. Aiming at the demand of further improving the lightweight level in aerospace, automobile, mechanical equipment and other fields, this paper uses the theories and methods of finite element analysis combined with the microscopic inspection analysis and the mechanical test research. The mechanical properties of porous structures under quasi-static uniaxial compression are systematically studied based on the laser powder bed fusion (LPBF) technology and by taking the 316L stainless steel porous structure as the research object. In this study, five kinds of body centered cubic (BCC) porous structures with different sizes are designed, and these samples are fabricated using LPBF. The compression test and the finite element analysis of porous structures are conducted. The design and manufacturing feasibility of metal 3D printing lightweight structures based on the LPBF technology is verified.

**Methods** First, the BCC porous structures with five different aspect ratios are modeled by the SolidWorks software, and subsequently the quasi-static simulation analysis is carried out by the ABAQUS software. The samples are prepared by Renishaw AM400, and the aerosolized 316L powder is selected as the test material. By selecting point distances, exposure time, laser powers, and scanning distances as the orthogonal test factors, the optimal process parameters for forming the 316L stainless steel are obtained. The macroscopic morphology of the sample is

observed by an optical microscope and the microscopic surface morphology of the sample is observed by the scanning electron microscope. Then, the sample is subjected to the uniaxial compression test at room temperature with the UTM5305 electronic universal testing machine. Finally, the mechanical properties of the 316L porous structure are analyzed according to the simulation and test results, and the reasons for the difference between the two results are compared and analyzed.

**Results and Discussions** From the simulation results, the stress distribution of the BCC porous structure in the compression process is that the stress level in the central region is low, and that in the surrounding region is high (Fig. 7). The displacement distributions of the five sizes of porous structures are consistent. The plastic yield first occurs at the node, and the yield mode is bending at both ends (Fig. 8). In the deformation process of the porous structure, elastic deformation first occurs, and then the porous structure begins to yield with the increase of strain (Fig. 9). From the test results, the microscopic surface of the sample is rough, and there are unmelted metal particles and cataphracted morphologies (Fig. 15(b)). For the porous structures with different sizes, the forming accuracy increases with the increase of rod diameter and volume fraction (Tables 3 and 4). During the whole deformation process of the compression test, the strain is mainly concentrated in the diagonal, especially in the central region, but the overall flexibility is high (Fig. 17). In the range of 10% strain, the results of finite element analysis and mechanical experiment are consistent, and the curve trend is consistent (Figs. 10 and 16). The average relative errors of the equivalent elastic modulus and compressive yield strength obtained by the finite element analysis and the mechanical test are within 10% (Table 5 and Fig. 18).

**Conclusions** The BCC 316L porous structure is prepared based on the LPBF technology. The compression process of this porous structure mainly experiences the elastic stage, platform stress stage and densification stage. By observing the morphology and measuring the geometric parameters of the porous structure, when the diameter of the rod is from 0.4 mm to 1.2 mm and the volume fraction is from 4.9% to 35.75%, the relative errors of diameter and volume fraction are from 15.00% to 6.08% and from 8.20% to 6.03%, respectively. It can be seen that the forming effect is good, and the contour error and surface sticking are the main causes of the error. The larger the size, the higher the forming accuracy. With the increase of rod diameter, the equivalent elastic modulus increases from 59.87 MPa to 3356.21 MPa, and the compressive yield strength increases from 1.02 MPa to 33.88 MPa. The research conclusions of the finite element analysis and the mechanical test are compared and analyzed. The average relative error of equivalent elastic modulus obtained by the finite element analysis and the mechanical test is 9.11%, and the average relative error of compressive yield strength is 7.86%. Both are within 10%. Therefore, the finite element model can effectively predict the mechanical properties of the 316L stainless steel body-centered cubic porous structure within a certain error range.

**Key words** laser technique; laser powder bed fusion technology; body-centered cubic porous structure; finite element analysis; mechanical property test