

激光与光电子学进展

选区激光熔化制备 316L 不锈钢点阵结构的力学性能研究

都书, 阿依古丽·喀斯木, 张宇涛, 乌日开西·艾依提*

新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017

摘要 利用选区激光熔化技术制备了 3 种类型的 316L 不锈钢点阵结构试样。进行了准静态单轴压缩试验, 结果显示, 与实体金属结构相比, 点阵结构的弹性模量从 180 GPa 降低至 2 GPa 以下。进一步地研究发现, 孔隙率是影响点阵结构刚度的主要因素之一, 并得到了相应的数值关系。在保证整体尺寸和孔隙率不变的情况下, 点阵的大小和数量的改变对点阵结构刚度和屈服强度的影响较小。然后建立了有限元模型分析全尺寸点阵结构的宏观变形和应力分布以及单点阵的微观应力、应变的变化规律。利用超景深显微系统检测了试样的打印精度, 发现在垂直于打印方向上测量的杆径值均大于平行于打印方向上测量的杆径值。最后根据工业用计算机断层成像系统检测结果, 得到了点阵结构的变形机制。

关键词 激光技术; 选区激光熔化; 点阵结构; 力学性能; 变形机制

中图分类号 TG665; TG142.71

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1914005

Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Lattice Structure Prepared by Selective Laser Melting

Du Shu, Ayiguli·Kasimu, Zhang Yutao, Wurikaixi·Aiyiti*

School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China

Abstract Laser selective melting technology was used to prepare three types of 316L stainless steel lattice structure samples with different porosities and pore sizes. The samples were subjected to quasistatic uniaxial compression tests. The test results showed that, compared with the solid metal structure, the elastic modulus of the lattice structure decreased from 180 GPa to 2 GPa. Furthermore, porosity was found to be the main factor affecting the lattice structure stiffness, and the corresponding numerical relationship was obtained. Under the condition of keeping the overall size and porosity unchanged, the change of lattice size and number was observed to have little effect on the stiffness and yield strength of lattice structure. The finite element model was applied to analyze the macroscopic deformation and stress distribution of the full-size lattice structure and the variation of the micro stress and strain of the single lattice. The printing accuracy of the sample was tested using an industrial CT system. The test show that the diameter of the rod measured perpendicular to the printing direction is greater than that measured parallel to the printing direction. According to the test results of the industrial CT system, the deformation mechanism of lattice structure is obtained.

Key words laser technique; selective laser melting; selective laser melting; mechanical property; deformation mechanism

1 引言

金属点阵结构由规则排列的晶胞组成, 其力学性能可以灵活设计, 具有超轻量、比强度高、比刚度高、能量吸收率高等优异性质^[1]。通过改变晶胞的设计参数, 可以显著改变点阵结构的物理响应, 并表现出其母材料无法实现的功能特性, 在生物医疗、航空航天、汽

车等领域具有巨大的应用潜力^[2]。在过去, 人们只能用气相沉积、熔模铸造、自蔓延高温合成等传统方法制造形状简单、尺寸较大、精度较差的点阵结构, 很难制造出形状复杂、精密的点阵结构, 极大限制了点阵结构在工业中的应用^[3]。如今, 快速发展的三维(3D)打印技术为金属点阵结构制造提供了新的途径。其中, 选区激光熔化(SLM)技术是金属 3D 打印中重要的一

收稿日期: 2021-09-09; 修回日期: 2021-10-09; 录用日期: 2021-10-19

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划重点项目(XJEDU2021I008)

通信作者: *wurikaixi@sina.com

类。与其他金属 3D 打印技术相比,其成型件具有较高的致密度和较少的缺陷,以及更好的力学性能^[4]。该技术使材料-结构-性能的一体化制造成为可能^[5]。

张博等^[6]研究了激光能量密度和微杆直径对体心立方点阵结构的成形方向和非成形方向力学性能的影响,发现 SLM 打印的点阵结构力学性能存在各向异性特征。Xiao 等^[7]设计了一种梯度点阵结构并研究了其力学性能,发现该梯度点阵结构具有优异的能量吸收力。Harris 等^[8]将点阵结构与蜂窝结构相结合设计了混合型点阵结构,并进行动态和静态的力学实验,研究表明混合型点阵结构的能量吸收率较原点阵结构有明显提升。

目前,国内外对点阵结构的研究集中在打印工艺、晶胞结构、孔隙率等因素对点阵结构物理性能的影响上^[9-10]。而孔径对点阵结构力学性能的影响和受压后点阵结构内部的变形机制的研究较少,但它们在骨植入物应用领域中却是影响使用性能的关键因素^[11],因此有必要对此做进一步研究。

本文利用 SLM 制备了 3 类点阵结构,采用实验与数值模拟相结合的方法研究了不同类型点阵结构在力

学性能上的差异,重点研究了孔隙率和孔径对点阵结构的力学性能影响,总结出 3 类点阵结构的力学性能规律及其受压变形机制。

2 材料和方法

2.1 点阵结构设计

设计了 A、B、C 不同类型点阵结构,如图 1 所示,设计时引入单元尺寸、孔隙率、杆径、孔径等参数。其中:单元尺寸为包络单点阵的六面体尺寸,本文所设计的点阵尺寸在 X、Y、Z 三个平面上长度均相等;孔隙率为一个单元中非实体体积占整个单元体积的百分比;杆径为组成点阵结构的杆直径;孔径为点阵阵列后形成的球形孔隙直径,如图 1 球形位置所示。在许多研究中,孔径有着独特的应用,例如在医疗领域,点阵结构的孔径在 400~900 μm 之间有利于细胞的粘附和生长^[12],鉴于孔隙对于点阵结构的重要性,本文将其作为变量之一,设计了 0.6 mm 和 0.9 mm 两种孔径。在这两种特定的孔径下,本文研究了点阵结构的机械性能。点阵结构试样的设计参数如表 1 所示。

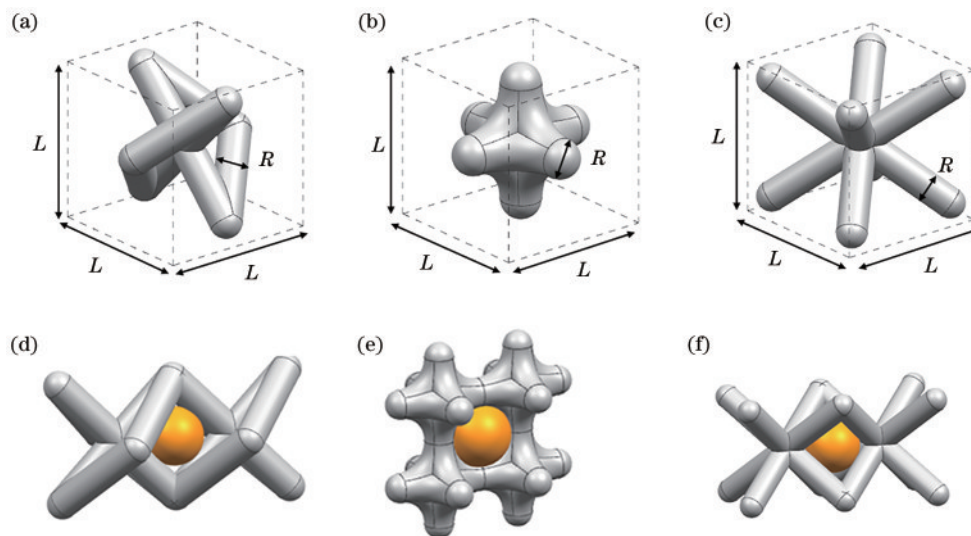


图 1 点阵结构示意图。(a)(d)点阵类型 A;(b)(e)点阵类型 B;(c)(f)点阵类型 C

Fig. 1 Lattice structure diagrams. (a) (d) Lattice type A; (b) (e) lattice type B; (c) (f) lattice type C

表 1 点阵结构的设计参数

Table 1 Design parameters of lattice structure

No.	Sample	Porosity / %	Cell size / (mm × mm × mm)	Stem diameter / mm	Aperture / mm
1	A-50%-0.6	50	1.75 × 1.75 × 1.75	0.65	0.6
2	A-60%-0.6	60	1.5 × 1.5 × 1.5	0.49	0.6
3	A-70%-0.6	70	1.4 × 1.4 × 1.4	0.40	0.6
4	A-80%-0.6	80	1.3 × 1.3 × 1.3	0.31	0.6
5	B-50%-0.6	50	1.2 × 1.2 × 1.2	0.58	0.6
6	B-60%-0.6	60	1.1 × 1.1 × 1.1	0.48	0.6
7	B-70%-0.6	70	1.0 × 1.0 × 1.0	0.35	0.6
8	B-80%-0.6	80	0.8 × 0.8 × 0.8	0.20	0.6
9	C-50%-0.6	50	1.7 × 1.7 × 1.7	0.60	0.6

续表

No.	Sample	Porosity /%	Cell size / (mm×mm×mm)	Stem diameter /mm	Aperture /mm
10	C-60%-0.6	60	1.5×1.5×1.5	0.48	0.6
11	C-70%-0.6	70	1.3×1.3×1.3	0.35	0.6
12	C-80%-0.6	80	1.2×1.2×1.2	0.26	0.6
13	A-50%-0.9	50	2.8×2.8×2.8	1.10	0.9
14	A-60%-0.9	60	2.5×2.5×2.5	0.85	0.9
15	A-70%-0.9	70	2.1×2.1×2.1	0.58	0.9
16	A-80%-0.9	80	2.0×2.0×2.0	0.47	0.9
17	B-50%-0.9	50	1.9×1.9×1.9	1.00	0.9
18	B-60%-0.9	60	1.6×1.6×1.6	0.65	0.9
19	B-70%-0.9	70	1.4×1.4×1.4	0.50	0.9
20	B-80%-0.9	80	1.2×1.2×1.2	0.33	0.9
21	C-50%-0.9	50	2.5×2.5×2.5	0.90	0.9
22	C-60%-0.9	60	2.2×2.2×2.2	0.68	0.9
23	C-70%-0.9	70	2.0×2.0×2.0	0.55	0.9
24	C-80%-0.9	80	1.8×1.8×1.8	0.40	0.9

参考 GB/T 31930—2015 多孔状和蜂窝状金属压缩试验方法,将点阵结构设计成标准压缩式样,即直径为 10 mm、高为 10mm 的圆柱形压缩试样。

2.2 试样加工和检测

材料为 316L 不锈钢粉末,利用 SLM 打印机

(BLT-S210)进行打印,打印功率为 215 W,扫描速度为 1250 mm/s,层厚为 30 μm 。图 2 为加工后的试样,在孔隙率达到 80%、杆径小于 300 μm 时,点阵容易发生断裂从而产生缺陷,如图 2 中 B 类型 80% 孔隙率试样和 C 类型 80% 孔隙率试样所示。

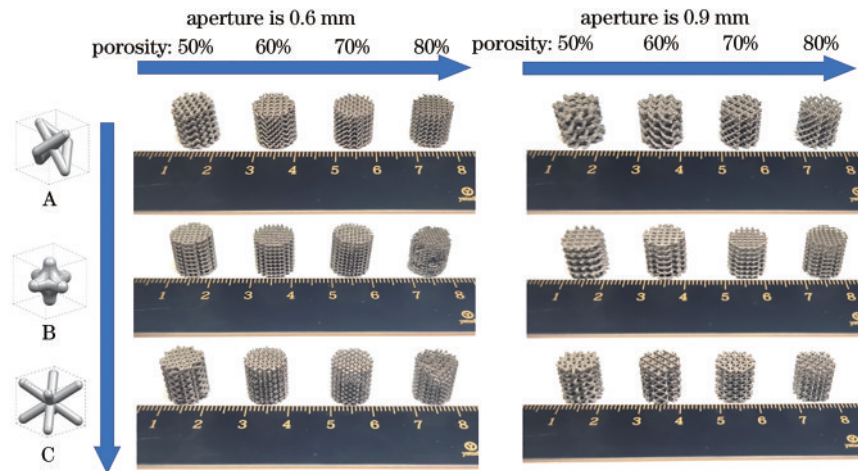


图 2 SLM 制备的点阵结构压缩试样

Fig. 2 Lattice structure samples printed by SLM

使用超景深显微镜(Keyence VHX-6000)测量试样的杆径和孔径,对每个试样不同位置的杆径和孔径进行 5 次测量,取其平均值。为检测点阵结构压缩后内部的变形模式和失效特征,采用工业微纳米计算机断层成像(CT)系统(Phoenix V|tome|x M)对试样进行检测,系统设置的参数如下:X 射线源电压为 300 kV,功率为 500 W,最小细节检测能力 $\leq 5 \mu\text{m}$ 。

2.3 压缩试验

使用万能力学试验机(瑞格尔 3005T)进行压缩试验,将试样上下表面用砂纸磨平,放置在压盘中心位置,压头加载速度为 1 mm/min,采用高速摄像机对压

缩过程进行拍摄,记录试样在压缩时的变形演化过程。试验机记录了各时刻压头位移和压力情况,根据压头位移计算出试样的应变。在计算应力数据时,将点阵结构视为“固体均质”材料。

2.4 有限元分析模型建立

使用 ABAQUS 进行压缩过程的模拟,如图 3 所示,顶部和底部设置为刚体。在顶部刚体设置位移边界条件,底部刚体设置为完全固定。为防止压缩模拟过程中试样发生移位或偏转而影响模拟结果,将接触面设置为有摩擦,摩擦系数为 0.2,接触类型为“硬接触”。为试样赋予 316L 不锈钢的材料属性,具体数值

参考文献[13]获得。将其弹性模量设为 180 GPa,屈服强度为 496 MPa,抗压强度为 717 MPa,破坏应变为 0.3,泊松比为 0.27,密度为 7.98 g/cm,使用四面体单元对模型进行网格划分。

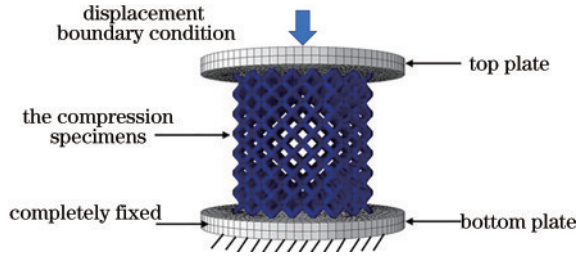


图3 有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model

为准确模拟金属材料的变形和破坏形式,模拟时使用 Johnson-Cook(J-C)本构模型,该模型能够较为准确地描述延性金属的变形行为^[14],具体形式为

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\epsilon})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为等效塑性应力(单位为 MPa); $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性

应变; $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为等效塑性应变率(单位为 s^{-1}); $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 为参考等效塑性应变率(单位为 s^{-1}); T_m 为材料的熔点(单位为 $^{\circ}C$); T_r 为参考温度(单位为 $^{\circ}C$); T 为当前温度(单位为 $^{\circ}C$); A 表示在参考等效塑性应变率和参考温度下的强度(单位为 MPa); B 、 n 为应变强化系数; C 为应变率敏感系数。本文采用的参考等效塑性应变率 $\dot{\bar{\epsilon}}_0=0.001$;参考温度 $T_r=20^{\circ}C$;熔点 $T_m=1530^{\circ}C$;当前温度为室温 $20^{\circ}C$ 。引用文献[15]中所确定的系数: $A=310.8$, $B=881.38$, $C=0.19$, $N=0.178$, $m=1.25$ 。将这些系数设置在 ABAQUS 材料属性中。

3 结果与分析

3.1 压缩试验结果分析

试样的应力-应变曲线如图 4 所示。类型 A、类型 C 点阵试样的应力-应变曲线表现出相似的趋势,它们的应力-应变曲线光滑,表明这两种点阵结构均未发生断裂损坏,其压缩过程可分为三个阶段:1) 应力随应变线性增加的弹性变形阶段;2) 连杆发生大变形的平台阶段;3) 连杆逐渐被压实的致密化阶段。由于 316L 不锈钢具有较好的延展性,因此压缩过程中没有发生断裂现象。

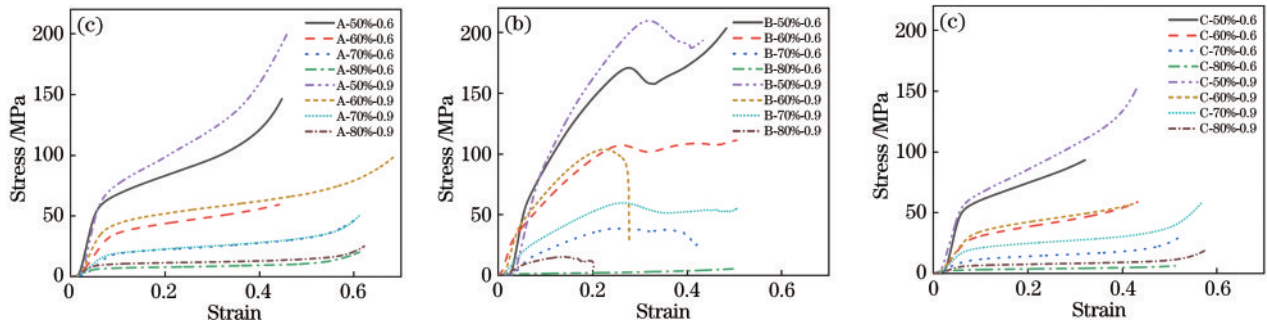


图4 三种类型点阵结构应力-应变曲线。(a)点阵类型 A;(b)点阵类型 B;(c)点阵类型 C

Fig. 4 Three types of lattice structure stress-strain curves. (a) Lattice type A; (b) lattice type B; (c) lattice type C

类型 B 点阵试样的应力-应变曲线无明显平台阶段,达到最大应力后曲线骤然下降,该现象表明压缩过程中点阵的某一层会突然发生压溃,产生较大程度变形,而类型 A、C 两种点阵结构没有发现同类现象。

试样的弹性模量为图 4 中应力应变曲线的弹性阶段斜率。按照孔径的不同将所有试样分为两组。首先分析 0.6 mm 孔径的点阵结构的弹性模量随孔隙率的变化情况,如图 5(a)所示。观察到 A、B、C 三类点阵结构均表现出随着孔隙率的增大弹性模量随之减小的趋势,这种变化趋势并非呈线性关系,孔隙率从 50% 增加至 60% 时,A、C 两种点阵结构的弹性模量从约 1500 MPa 骤减至约 500 MPa,而孔隙率从 60% 增加至 80% 时,这两种点阵结构的弹性模量下降趋于平缓。另外,A、C 两种点阵结构具有相近的弹性模量,B 类型点阵结构弹性模量要高于 A、C 两种类型,这是由于 B 类型点阵具有平行于受力方向的支柱,而 A、C 两种类

型点阵则没有。图 5(b)为 0.9 mm 孔径点阵结构的弹性模量随孔隙率变化情况,其变化趋势与 0.6 mm 孔径组的变化情况基本一致,在孔隙率一致的前提下,孔径从 0.6 mm 增加至 0.9 mm,三种点阵结构的弹性模量整体上略有改变,但没有展现出明显的变化规律。对比可见,孔隙率是影响点阵结构弹性模量的主要因素。

屈服强度也是一个重要的力学指标,图 6 展示了 0.6 mm 孔径和 0.9 mm 孔径点阵结构的屈服强度与孔隙率之间的关系,结果表明,随着孔隙率的增加,点阵结构的屈服强度逐渐减小,具体来看,C 类型点阵结构屈服强度小于其他两种类型点阵,这是由于 C 类型点阵杆的结点处易产生应力集中而引发塑性变形,图 8 有限元分析也证实了这一点。如图 6 所示,随着孔径从 0.6 mm 增加至 0.9 mm,A、B、C 三种类型点阵的屈服强度均有所提高,这说明在孔隙率不变的前提下,孔径的增大(即晶胞尺寸的增大)会提高点阵结构的屈

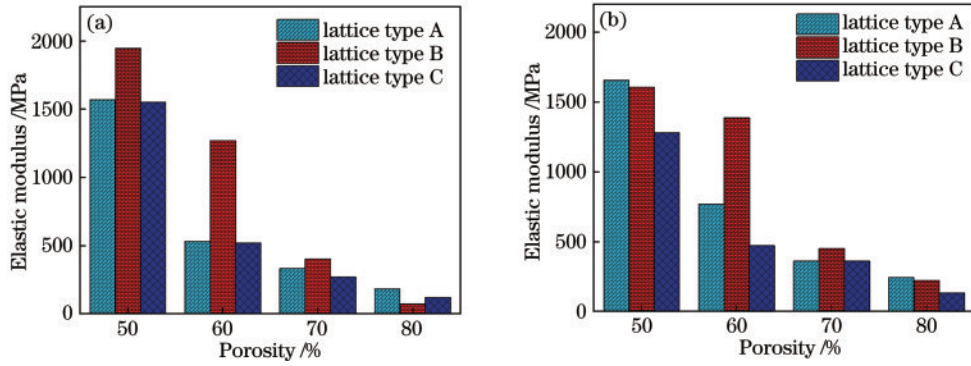


图 5 点阵结构试样的弹性模量随孔隙率变化情况。(a)0.6 mm 孔径;(b)0.9 mm 孔径

Fig. 5 Change of elastic modulus of lattice structure samples with porosity. (a) Aperture is 0.6 mm; (b) aperture is 0.9 mm

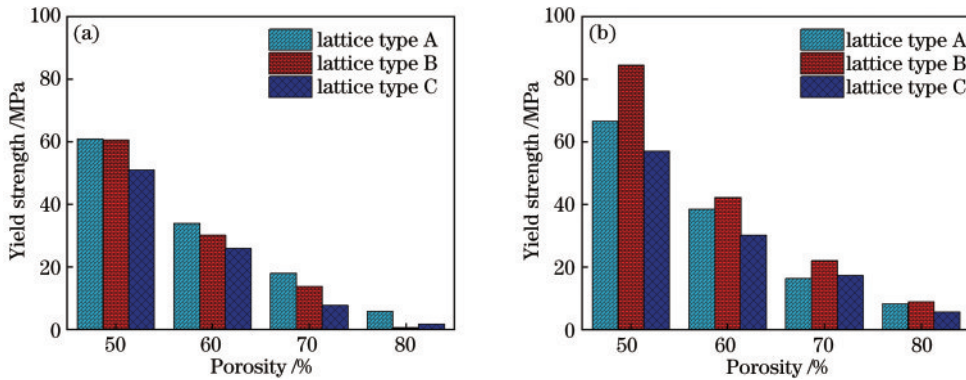


图 6 点阵结构试样的屈服强度随孔隙率变化情况。(a) 0.6 mm 孔径;(b) 0.9 mm 孔径

Fig. 6 Change of yield strength of lattice structure samples with porosity. (a) Aperture is 0.6 mm; (b) aperture is 0.9 mm

屈服强度。这是由于孔径增大,晶胞尺寸也会增加,为了保证孔隙率不变,点阵结构的杆径也会增大,杆径的增大会引起屈服强度的提高。

对多孔结构的研究中,Gibson 和 Ashby 发现了多孔结构的弹性模量与孔隙率之间呈幂函数关系,即

$$\frac{E^*}{E_s} = C \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^m, \quad (2)$$

式中: E^* 为多孔结构的弹性模量; E_s 为材料的弹性模量; ρ^* 为多孔结构的表观密度; ρ_s 为材料的密度; C 和 m 为常数。

由于点阵结构和多孔结构具有相似的结构特征,所以本文采用 Gibson-Ashby 模型对点阵结构弹性模

量和孔隙率的关系进行表征。将点阵结构的弹性模量和孔隙率实测值代入到式(2)中,在 Origin 中利用非线性曲线拟合出 3 种点阵类型的 Gibson-Ashby 曲线,如图 7 所示。A、B、C 类型点阵具体函数关系分别为

$$\frac{E^*}{E_s} = 3.23 \times 10^{-4} \times \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{-7.7}, \quad (3)$$

$$\frac{E^*}{E_s} = 9.9 \times 10^{-4} \times \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{-5.4}, \quad (4)$$

$$\frac{E^*}{E_s} = 1.87 \times 10^{-4} \times \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{-9.1}. \quad (5)$$

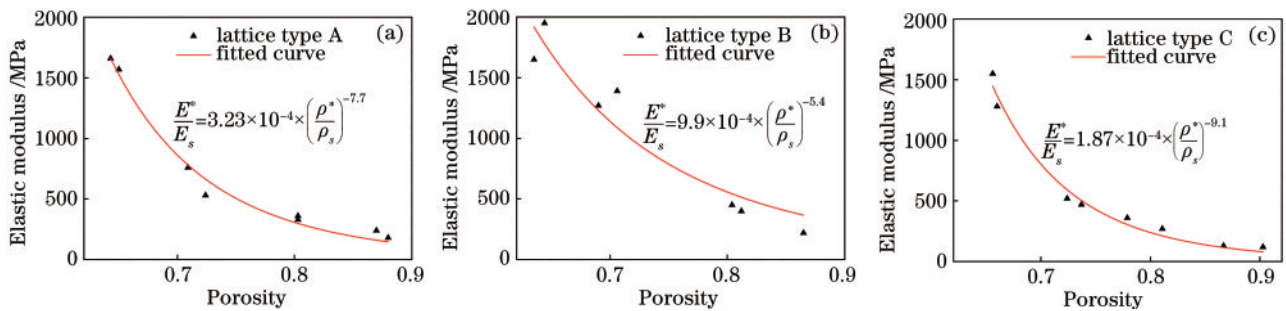


图 7 点阵结构孔隙率与弹性模量的数值关系。(a)点阵类型 A;(b)点阵类型 B;(c)点阵类型 C

Fig. 7 Numerical relationship between porosity and elastic modulus of lattice structure. (a) Lattice type A; (b) lattice type B; (c) lattice type C

3.2 点阵结构有限元分析

单晶胞的应力分布如图 8 所示。对每个晶胞设计相同晶胞尺寸、相同孔隙率,以及施加相同的载荷。模拟发现 A 类型点阵的应力集中在杆的交界处,最大 von-Mises 应力为 145.4 MPa。B 类型点阵的应力主

要分布在点阵的垂直杆上,并非杆的结点处,其最大 von-Mises 应力为 11.25 MPa。C 类型点阵应力均匀分布在结点附近,所有杆均起到支撑作用,最大 von-Mises 应力为 169.7 MPa。A 类型和 C 类型点阵均存在应力集中现象。

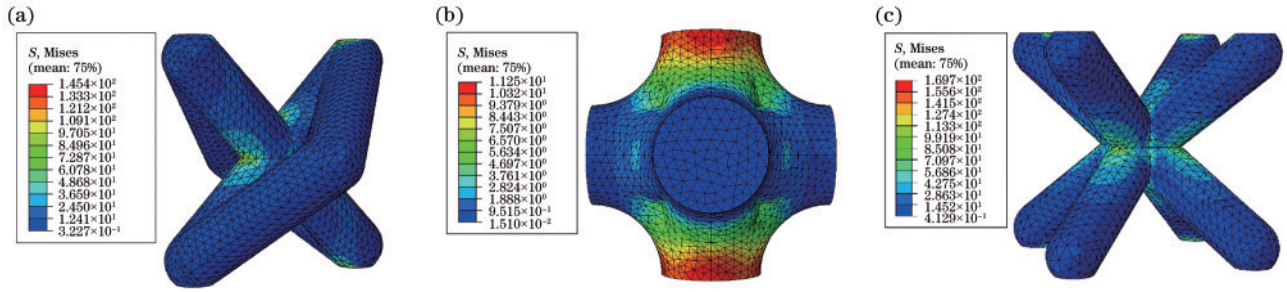


图 8 点阵结构应力分布。(a)点阵类型 A;(b)点阵类型 B;(c)点阵类型 C

Fig. 8 Lattice structure stress distributions. (a) Lattice type A; (b) lattice type B; (c) lattice type C

对比三种点阵的受压位移模拟,如图 9 所示。在同样的载荷下,B 类型单点阵发生的应变最小,最

易发生塑性变形,C 类型单点阵的应变最大,最易发生塑性变形。

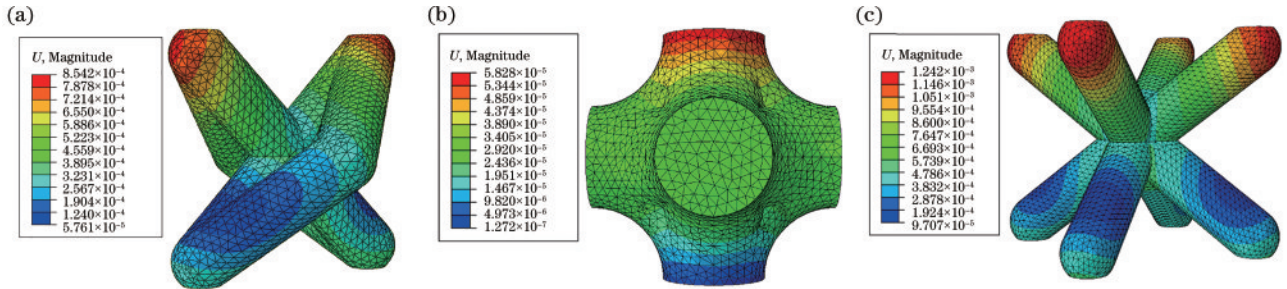


图 9 点阵结构位移分布。(a)点阵类型 A;(b)点阵类型 B;(c)点阵类型 C

Fig. 9 Lattice structure displacement distributions. (a) Lattice type A; (b) lattice type B; (c) lattice type C

3.3 点阵结构的变形模式和失效形式

三种点阵结构展现出不同的变形模式和失效形式,图 10 展现了在 70% 孔隙率下三类点阵结构的压缩变形过程和工业 CT 检测的内部变形情况。图 11 为这

三类点阵结构的压缩过程有限元分析。

对于弯曲变形为主的结构[图 10(b)],应力在达到峰值时立即下降,在应力下降之前没有明显的塑性硬化现象,在达到应力峰值之后随即发生振荡,之后应

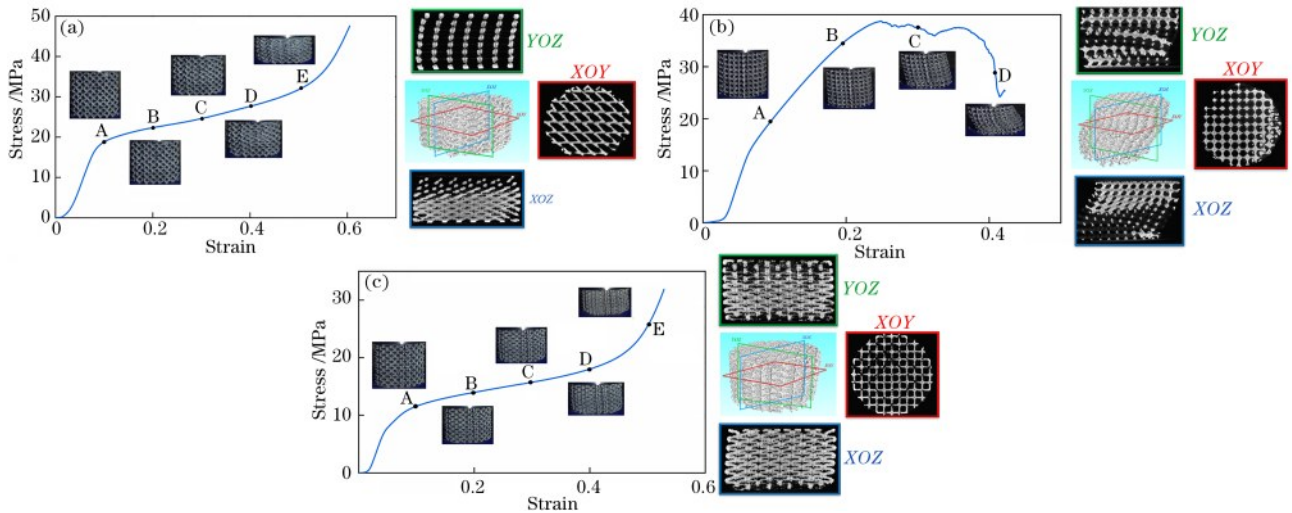


图 10 点阵结构的变形机制。(a)点阵类型 A;(b)点阵类型 B;(c)点阵类型 C

Fig. 10 Deformation mechanism of lattice structure. (a) Lattice type A; (b) lattice type B; (c) lattice type C

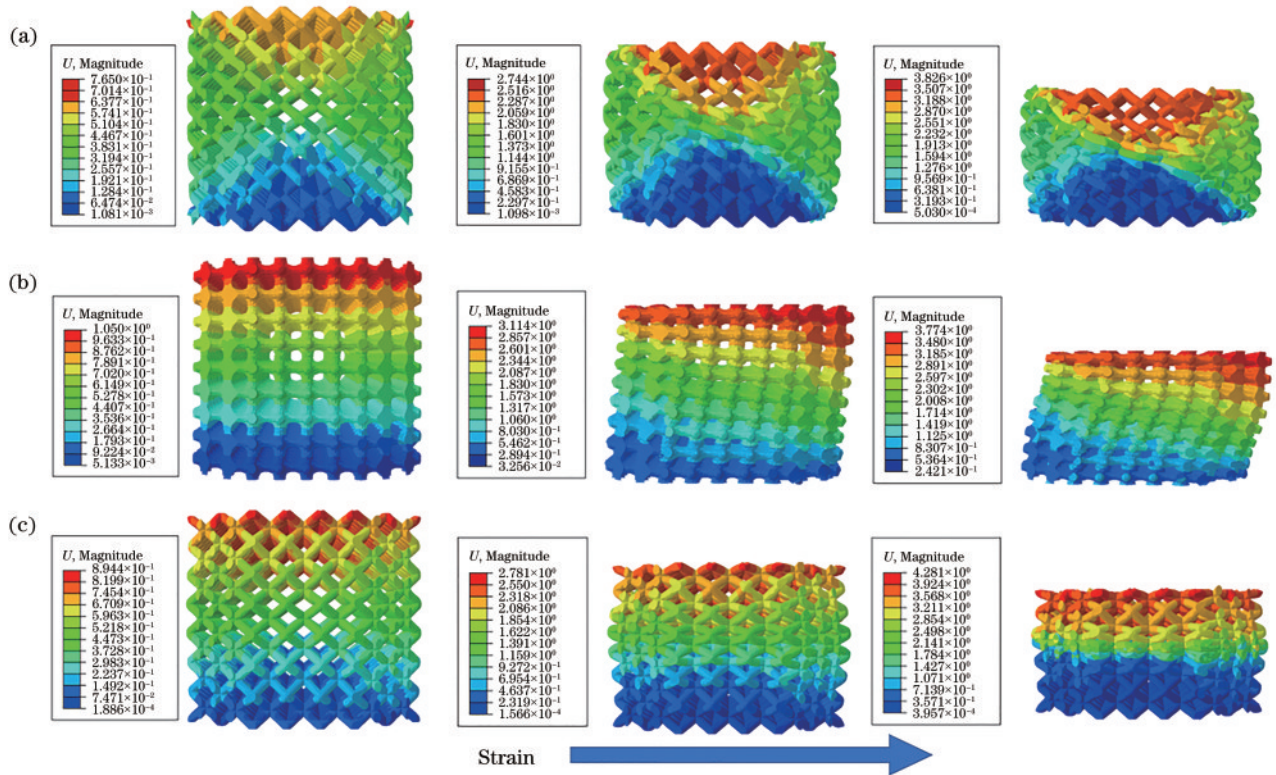


图 11 点阵结构变形机制有限元分析。(a)点阵类型 A;(b)点阵类型 B;(c)点阵类型 C

Fig. 11 Finite element analysis of deformation mechanism. (a) Lattice type A; (b) lattice type B; (c) lattice type C

力迅速下降,试样在竖直平面上可以观察到整体结构产生近 45° 屈曲。结合图 11(b)可知,B 类型点阵变形模式可总结为:1) 弹性变形阶段每一层均匀地被压缩;2) 在平台阶段垂直的支柱开始发生弯曲变形,使点阵结构变为非对称结构,产生不均匀的应力分布,逐渐形成倾斜的剪切带。

对于拉伸变形为主的结构[图 10(a)、(c)],应力达到第一个峰值之后可以明显地观察到一段平缓上升的塑性硬化阶段,平台应力较类型 B 更平滑,无振荡。结合图 11(a)、(c)可知,A 类型点阵变形模式总结为:1) 受压后点阵结构的上、下部出现三角形的剪切带,中部逐渐被挤压向两侧膨胀;2) 其横截面随着压缩的进行逐渐由圆形变为椭圆形,说明其变形程度具有各向异性特征;3) C 类型点阵变形模式较为单一,受压时每层均匀地发生变形,其任意横截面的变形程度也展现出各向同性的特点,说明该构型具有最稳定的变形模式。

3.4 点阵结构打印质量分析

超景深显微系统下观察到支柱上附着了金属颗粒,如图 12 所示。由于轮廓激光轨迹只扫描一次,边界的金属粉末未完全融化而粘附在实体上。评估打印质量的重要依据是试样杆径的偏差,对每个试样进行平行于打印方向(俯视)测量和垂直于打印方向(侧视)测量,每个方向各取 5 个测量位置,对测量数据计算平均值和标准偏差。图 13 展示了其中任意选取的 6 个试样的不同方向测量结果和设计值的对比情况,结果表明,

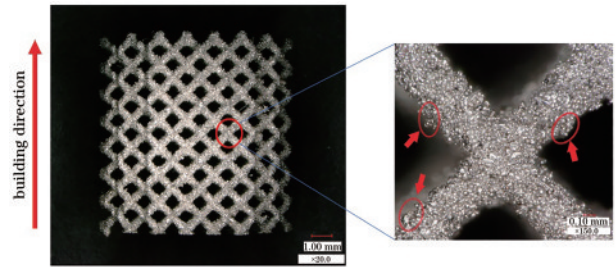


图 12 显微镜拍摄的点阵结构试样表面细节

Fig. 12 Surface details of lattice structure sample captured by the microscope

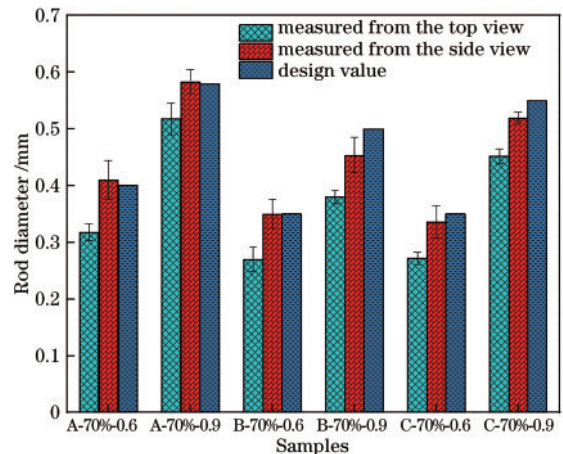


图 13 不同方向测量的杆径对比(俯视图和侧视图)

Fig. 13 Comparison of rod diameters measured in different directions (top view and side view)

打印的试样杆径与设计值存在明显差异,主要原因是打印过程中产生的阶梯效应。对比不同方向测量的杆径值可知,平行于打印方向测量的杆径均小于垂直于打印方向的测量值,且垂直于打印方向测量的杆径非常接近设计值,但平行于打印方向测量的杆径均小于

设计值。这说明打印后试样的杆的横截面由设计的圆形变为椭圆形,杆的几何形状发生了改变。

选取了 3 个试样进行工业微纳米 CT 系统内部缺陷检测,分别是 A-70%-0.6、B-70%-0.6、C-70%-0.6,检测结果如表 2 所示,打印缺陷率小于 0.1%。

表 2 工业微纳米 CT 系统检测的试样缺陷

Table 2 Printing defects detected by industrial micro-nano CT system

No.	Sample	Total volume /mm ³	Defect volume /mm ³	Defect volume ratio /%
1	A-70%-0.6	163.735	0.032	0.02
2	B-70%-0.6	150.399	0.084	0.06
3	C-70%-0.6	153.983	0.146	0.09

4 结 论

在本研究中,使用 SLM 打印技术制备了 316L 不锈钢,制造了具有不同类型、不同孔径和孔隙率的点阵结构。对这些点阵结构进行了准静态单轴压缩试验和数值模拟,得到了点阵结构的机械性能和变形机制,总结出以下结论:

1) 孔隙率是影响点阵结构力学性能的主要因素,孔隙率的改变对 316L 不锈钢点阵结构的弹性模量和屈服强度影响非常显著,而孔径的改变对点阵结构的力学性能影响较小。在所设计的三类点阵结构中,B 类型点阵结构具有较高的弹性模量,C 类型点阵结构弹性模量最小。利用有限元分析了三种晶胞的应力分布情况,与实验结果一致,证明了所设计的有限元分析模型具有很好的准确性

2) 利用 Gibson-Ashby 模型对点阵结构弹性模量和孔隙率的关系进行表征,分别得到了三类点阵结构的弹性模量和孔隙率之间的数值关系。

3) 设计的三种点阵结构具有不同的变形机制和失效模式,B 类型点阵结构以弯曲变形为主,压缩过程产生对角线剪切状压溃。A、C 两种类型点阵结构以拉伸变形为主,A 类型点阵结构的变形模式具有各向异性特征,C 类型点阵结构变形模式具有各向同性特征。

4) 通过试样打印质量的评估发现,在垂直于打印方向上测量的杆径值大于在平行于打印方向上测量的杆径值,因此打印后的杆截面并不是规则的圆形,而是椭圆形截面。工业微纳米 CT 系统检测到点阵结构的缺陷体积比小于 0.1%,通过打印工艺的改进,有望进一步减少缺陷。

参 考 文 献

[1] 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.
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.

[2] 郝云波,赵凯,黄叶玲,等. 激光熔化沉积 TC11 钛合金双重退火后的组织和力学性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202001.
Hao Y B, Zhao K, Huang Y L, et al. Microstructures and mechanical properties of doubled annealed laser melting deposited TC11 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202001.

[3] 尹滨兆,秦瑜,温鹏,等. 激光粉末床熔融制备金属骨植入物[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1100001.
Yin B Z, Qin Y, Wen P, et al. Laser Powder bed fusion for fabrication of metal orthopedic implants[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1100001.

[4] 秦艳利,孙博慧,张昊,等. 选区激光熔化铝合金及其复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402002.
Qin Y L, Sun B H, Zhang H, et al. Development of selective laser melted aluminum alloys and aluminum matrix composites in aerospace field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402002.

[5] Gu D D, Shi X Y, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing [J]. Science, 2021, 372(6545): eabg1487.

[6] 张博,曹毅,王玲,等. 选区激光熔化体心立方多孔结构的各向异性[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0802005.
Zhang B, Cao Y, Wang L, et al. Anisotropy of body-centered-cubic porous structures by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0802005.

[7] Xiao L J, Song W D. Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: experiments [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 111: 255-272.

[8] Harris J A, Winter R E, McShane G J. Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 104: 177-191.

[9] 廖中源,王英俊,王书亭. 基于拓扑优化的变密度点阵结构体优化设计方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 65-72.
Liao Z Y, Wang Y J, Wang S T. Graded-density lattice structure optimization design based on topology optimization [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 65-72.

- [10] 杨鑫, 马文君, 王岩, 等. 增材制造金属点阵多孔材料研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7114-7120.
Yang X, Ma W J, Wang Y, et al. Research progress of metal lattice porous materials for additive manufacturing [J]. Materials Reports, 2021, 35(7): 7114-7120.
- [11] Yang J Z, Jin X, Gao H R, et al. Additive manufacturing of trabecular tantalum scaffolds by laser powder bed fusion: mechanical property evaluation and porous structure characterization[J]. Materials Characterization, 2020, 170: 110694.
- [12] Chen Z Y, Yan X C, Yin S, et al. Influence of the pore size and porosity of selective laser melted Ti₆Al₄V ELI porous scaffold on cell proliferation, osteogenesis and bone ingrowth[J]. Materials Science and Engineering: C, 2020, 106: 110289.
- [13] Mower T M, Long M J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 651: 198-213.
- [14] 魏刚, 张伟, 邓云飞. 基于 J-C 模型的 45 钢本构参数识别及验证[J]. 振动与冲击, 2019, 38(5): 173-178.
Wei G, Zhang W, Deng Y F. Identification and validation of constitutive parameters of 45 steel based on J-C model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38 (5): 173-178.
- [15] Karkalos N E, Markopoulos A P. Determination of Johnson-Cook material model parameters by an optimization approach using the fireworks algorithm[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 22: 107-113.