

选区激光熔化成形不同偏移率拱形点阵结构力学性能

杨林沂, 许明三, 叶建华, 韦铁平

(福建理工大学, 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福州, 350118)

摘要: 为研究不同偏移率对力学性能的影响, 利用选区激光熔化技术成形 12 个不同偏移率的 AlSi10Mg 拱形点阵试样, 通过准静态压缩试验分析偏移率对点阵抗压强度、弹性模量的影响, 结合有限元仿真和压缩试验, 分析不同偏移率拱形点阵应力集中的变化对点阵失效形式的影响。结果表明, 拱形点阵的偏移率在 20% 时抗压强度和弹性模量达到最大值, 相对未偏移点阵的抗压强度和弹性模量分别提升了 49% 和 28%。随着偏移率的增加点阵的应力集中先由结点向结点两端杆件转移, 点阵的失效形式由逐层坍塌变为剪切断裂, 此时偏移率的增加对点阵的结点有强化作用, 后又出现向结点处集中的趋势, 并且结点中心应力逐渐下降, 点阵的失效形式由剪切断裂变为剪切断裂伴随结点崩碎, 此时偏移率的增加削弱了点阵的结点强度。

创新点: (1) 设计出不同偏移率的 FCC 拱形点阵结构。

(2) 提出了偏移率的概念, 研究了偏移率对点阵力学性能的影响。

(3) 结合有限元分析与压缩试验, 研究了不同偏移率点阵应力集中的变化对失效形式的影响。

关键词: 选区激光熔化; 拱形点阵; 压缩; 偏移率; 失效形式

中图分类号: TG 495; TF 124

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20230816001

Mechanical properties of arch lattice structures with different offset ratios by selective laser melting

YANG Linyi, XU Mingsan, YE Jianhua, WEI Tieping

(Fujian Provincial Key Laboratory of Intelligent Processing Technology and Equipment, Fujian University of Technology,
Fuzhou, 350118, China)

Abstract: In order to study the effects of different offset ratios on the mechanical properties of the arch lattice, 12 AlSi10Mg arch lattice samples with different offset ratios were formed by selective laser melting technology. Quasi-static compression tests were conducted to analyze the effects of offset ratios on the compressive strength and elastic modulus of the lattice. Combined with finite element simulation and compression test, the influence of the change of stress concentration on the failure mode of arch lattice with different offset ratios was analyzed. The results show that the compressive strength and elastic modulus of the arch lattice reach the maximum value when the offset ratio is 20%, and the compressive strength and elastic modulus of the arch lattice are increased by 49% and 28%, respectively. With the increase of the offset ratios, the stress concentration of the lattice first diffuses from the node to the member at both ends of the node, and the failure form of the lattice changes from layer by layer collapse to shear fracture. At this time, the increase of the offset ratios has a strengthening effect on the node of the lattice, and then there is a trend of concentration to the node, and the central stress of the node gradually decreases, and the failure form of the lattice changes from shear fracture to shear fracture with the collapse of the node. At this time, the increase of the offset ratios weakens the node strength of the lattice.

Highlights: (1) FCC arch lattice structures with different offset ratios are designed.

(2) The concept of offset ratio is proposed and the effect of offset ratio on the mechanical properties of lattice is studied.

(3) Combined with finite element analysis and compression test, the influence of the change of stress concentration on the failure mode of the lattice with different offset ratios is studied.

Key words: selective laser melting; arch lattice; compression; offset ratio; failure type

0 序言

金属点阵结构由规则排列的单胞组成,其力学性能可以灵活设计,具有轻量化、比强度高、比刚度高等优异性质^[1-5]。在过去,人们只能用气相沉积、熔模铸造、粉末冶金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^[6-8]。3D 打印技术中选区激光熔化(selective laser melting, SLM)的出现为点阵成形提供了一个新的途径^[9]。SLM 技术可以直接成形结构复杂、高尺寸精度、高表面光洁度的点阵结构^[10-11]。

国内外很多学者都开始利用 SLM 成形复杂点阵结构并对样品的力学性能进行测试研究^[12-14]。Li 等人^[15]研究了 SLM 成形 Ti6Al4V 面心立方垂直支柱点阵(FCCZ)和体心立方垂直支柱点阵(BCCZ)在压缩试验下的力学性能,发现 FCCZ 点阵的抗压强度比 BCCZ 点阵高约 30%;Yang 等人^[16]设计出具有负泊松比特性的 3D 内凹式点阵结构,研究指出,减小内凹支柱的角度或者增加垂直支柱与内凹支柱长度,3D 内凹式点阵结构的负泊松比均减小,强度和弹性模量变大;Xu 等人^[17]采用拓扑优化的方法设计出一种 TOP 点阵结构,研究表明当孔隙率在 40%~80% 时, TOP 点阵结构

的抗压强度和弹性模量均随着孔隙率和单元格尺寸的增加而逐渐减小;Cao 等人^[18]设计出一种将形状参数引入到原结构杆截面中的改进型 RD 点阵结构,结果表明,改进型 RD 点阵结构试样的弹性模量和屈服强度分别提高了 79% 和 55%;丁若晨^[19]在 BCC 点阵基础上设计出拱形点阵,利用 SLM 成形了不同高跨比的拱形点阵,研究了不同高跨比拱形点阵的力学性能,结果表明,当高跨比为 0.6 时拱形点阵的力学性能最好。国内外学者设计出大量不同的点阵结构,并对其力学性能进行了研究,但是点阵阵列参数对力学性能的影响还需要进一步的研究。

文中在 FCC 点阵的基础上设计出 FCC 拱形点阵,研究拱形点阵的偏移率对力学性能的影响规律,通过 SLM 成形 12 组不同偏移率的点阵试样,并进行准静态压缩试验与有限元仿真分析,探究了偏移率对抗压强度和弹性模量的影响,分析了应力集中的变化与失效形式变化的关系,为研究点阵阵列问题提供了一种思路。

1 试验方法

1.1 试验材料及设备

试验采用的材料为 AlSi10Mg 球形粉末,其化学成分见表 1。

表 1 AlSi10Mg 化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of AlSi10Mg

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	其他	Al
9.0~11.0	0.4~0.6	≤2.0	≤0.6	≤0.35	≤0.25	余量

图 1 为 AlSi10Mg 粉末的扫描电子显微镜(SEM)的形貌,可以看出大部分的为球形,少量为椭圆形,部分粉末附着细小的颗粒形成卫星球,粉末粒径在 15~50 μm,平均粒径在 30 μm,该粉符合一般增材制造的要求。

试验使用的成形设备为德国 SLM 公司进口的 SLM-125HL 打印机,配备单激光 IPG 光纤激光器,额定功率为 400 W。准静态压缩试验所使用的仪器

为 DNS300 电子万能试验机,该设备可以进行样品的拉伸与压缩试验。

1.2 单元几何模型

试验所使用的单胞是基于 FCC 点阵的拱形点阵,在拱形点阵中高跨比(R_{HL})是一个重要的结构参数,即点阵单杆高度 H 与跨度 L 的比值^[18]为

$$R_{HL} = \frac{H}{L} \quad (1)$$

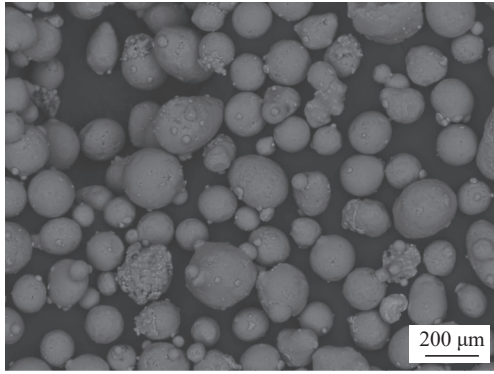


图 1 AlSi10Mg 粉末显微形貌

Fig. 1 Micromorphology of AlSi10Mg powder

采用的拱形点阵高跨比为 0.6, 其中点阵的跨度 $L = 5$ mm, 高度 $H = 3$ mm, 杆径 $d = 1$ mm, 结构尺寸为 6 mm $\times$ 5 mm $\times$ 5 mm, 如图 2 所示。

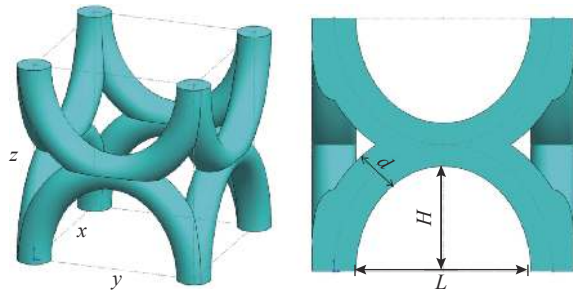


图 2 拱形点阵单胞模型

Fig. 2 Arch lattice cell model

1.3 点阵结构设计

文中引入一个偏移率的概念, 在拱形点阵单杆的阵列中, 每 4 个单杆会共用 1 个结点, 如图 3 所示, 当偏移率为 0 时, 每 4 个单杆共用 1 个结点圆 (图 3 中间点线组成的圆), 以此圆为标准, 当每个单杆都向外移动一段相同距离后再阵列成点阵时, 杆径圆心到标准圆圆心的距离 S 与标准圆直径 D 的比值定为偏移率 P , 即

$$P = \frac{S}{D} \times 100\% \quad (2)$$

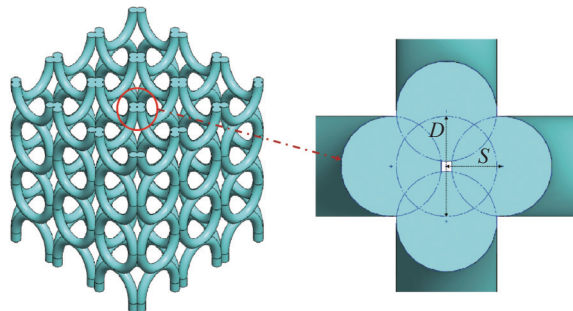


图 3 点阵阵列模型及偏移率

Fig. 3 Lattice array model and offset ratio

试验在高跨比为 0.6 的拱形点阵基础上, 设计

了 12 种不同偏移率的 $3 \times 3 \times 3$ 单元体叠加拱形点阵, 点阵各参数见表 2。

表 2 点阵结构参数

Table 2 Lattice structure parameters

样本	偏移率 $P(\%)$	点阵尺寸 (mm $\times$ mm $\times$ mm)
1	0	$16.0 \times 16.0 \times 18.0$
2	10	$16.6 \times 16.6 \times 18.0$
3	15	$16.9 \times 16.9 \times 18.0$
4	20	$17.2 \times 17.2 \times 18.0$
5	25	$17.5 \times 17.5 \times 18.0$
6	30	$17.8 \times 17.8 \times 18.0$
7	35	$18.1 \times 18.1 \times 18.0$
8	40	$18.4 \times 18.4 \times 18.0$
9	45	$18.7 \times 18.7 \times 18.0$
10	50	$19.0 \times 19.0 \times 18.0$
11	55	$19.3 \times 19.3 \times 18.0$
12	60	$19.6 \times 19.6 \times 18.0$

1.4 样件制备及测试

根据设计出的点阵参数对 12 种偏移率的拱形点阵进行建模。如图 4 所示, 从点阵的模型俯视图可以看出不同偏移率的点阵主要变化是在结点处, 随着偏移率的增加结点截面面积逐渐变大。

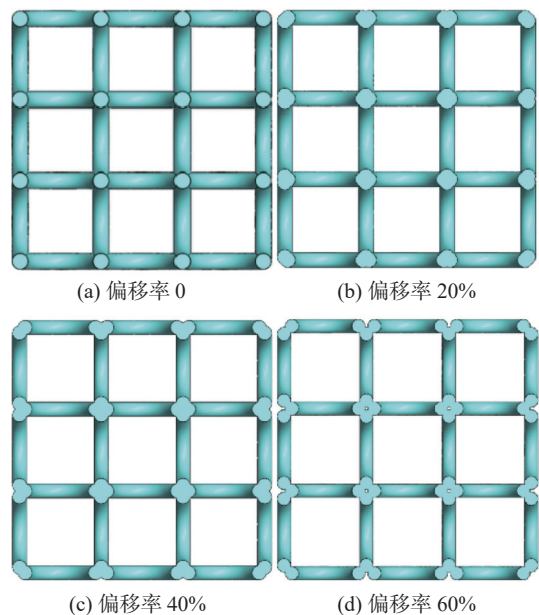


图 4 不同偏移率点阵模型俯视图

Fig. 4 Top view of lattice models with different offset ratios. (a) 0; (b) 20%; (c) 40%; (d) 60%

利用 SLM 设备成形点阵, 成形工艺参数为^[20] 激光功率 260 W, 扫描速度 1 000 mm/s, 扫描间距 0.08 mm, 铺粉层厚 30 μm , 打印完成后通过电火花切割将成形试样从基板上切除。

图 5 为 SLM 加工成形的样件, 由侧视图可知点阵表面无明显缺陷, 支杆部分有少量粉末未黏附, 悬垂部分有轻微的烧结残渣, 可以看出点阵的成形效果较好。

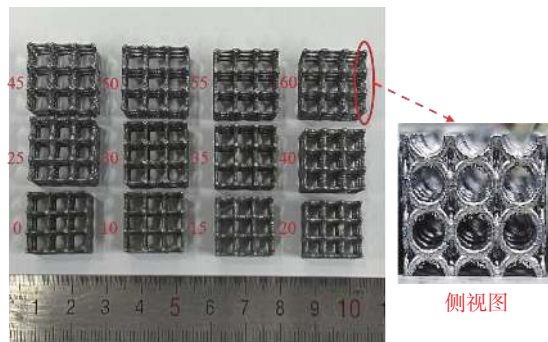


图 5 拱形点阵成形样件
Fig. 5 Arch lattice forming sample

使用 DNS300 电子万能试验机对试样进行准静态压缩试验, 在试件纵向施加载荷, 压缩位移速度为 3 mm/min, 采样频率为 20 Hz, 压缩结束后得到位移-载荷数据文件。通过处理位移-载荷数据得出点阵在压缩过程中的应力、应变。由于铝合金成形的拱形点阵在准静态压缩下主要失效形式为断裂, 所以以初始峰值应力作为压缩屈服强度。应力 σ 、应变 ε 的计算方法分别为^[21]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{G} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{F}{J} = \frac{F}{w_1 w_2} \quad (4)$$

式中: ΔL 为压缩方向的位移量; G 为试件压缩方向的高度; F 为压缩位移为 ΔL 时的反力; J 为压缩方向上试件的底面积; w_1 和 w_2 为压缩底面的边长。

1.5 有限元分析

利用 ANSYS 对压缩试验进行有限元仿真分析, 分析模型为建立的 12 个不同偏移率的拱形点阵模型。将点阵的材料设置为 AlSi10Mg, 网格划分将单元尺寸设置为 0.2 mm, 点阵的底部边界条件设置为完全固定, 在点阵的顶部施加位移载荷, 施加的位移量为点阵压缩方向高度的 5%。有限元仿真模型如图 6 所示。

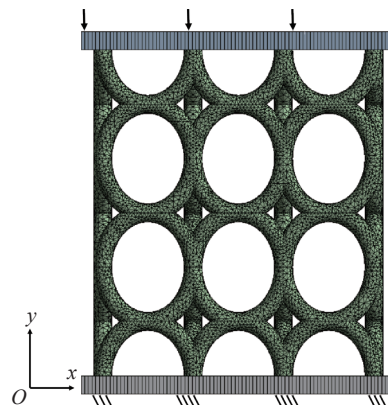
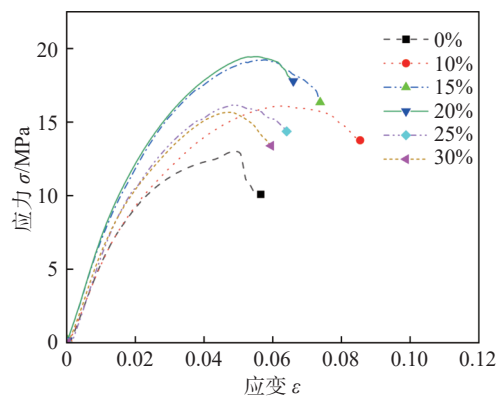


图 6 点阵有限元模型
Fig. 6 Lattice finite element model

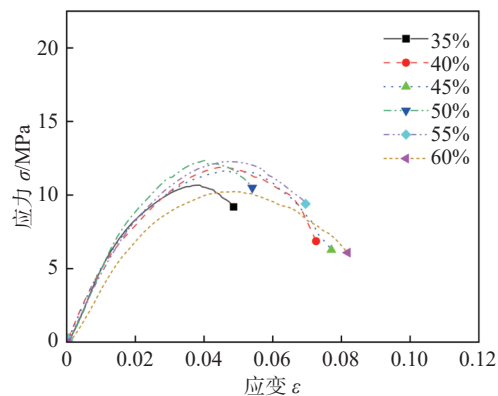
2 结果与分析

2.1 应力-应变曲线分析

处理压缩试验中的位移-载荷数据后, 得到不同偏移率拱形点阵的应力-应变, 通过 Origin 软件绘制出图 7 所示应力-应变曲线, 可以得出每个点阵的应力-应变曲线有大致相同的趋势。点阵压缩过



(a) 偏移率 0~30%



(b) 偏移率 35%~60%

图 7 不同偏移率点阵应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of different offset lattice. (a) 0~30%; (b) 35%~60%

程中,不同偏移率的拱形点阵均出现了断裂的现象,所以应力-应变曲线在达到波峰后出现了下降的趋势.在应力-应变曲线中可知偏移率为 0~30% 的点阵性能更好,整体曲线基本都在应变为 0.05 后才出现下降的趋势,偏移率大于 30% 的点阵在应变为 0.04~0.05 之间时就达到了峰值应力.

通过图 8 的应力-应变曲线可以得出,用 AlSi10Mg 成形不同偏移率拱形点阵后的压缩试验可以分为 3 个阶段.

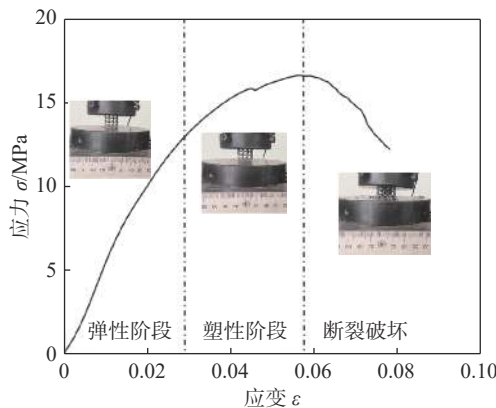


图 8 应力-应变曲线
Fig. 8 Stress-strain curve

(1) 弹性变形阶段. 在压缩试验过程中,此阶段是承受应力的主要阶段,因为承受的应力较小所以点阵内部发生的是弹性变形,应力-应变曲线呈线性关系,此阶段载荷卸载后点阵可以恢复初始状态.如图 7 所示,此阶段偏移率为 0~30% 的点阵性能更好.

(2) 塑形变形阶段. 随着载荷的逐渐增加,点阵的应力-应变曲线缓慢上升趋于平缓,此时应力-应变曲线呈非线性关系,随着应变的增加应力的变化逐渐变小,此阶段点阵变形较明显且不可逆.

(3) 断裂破坏阶段. 达到此阶段时点阵直接发生断裂,应力-应变曲线出现下降的趋势,且随着应变的增加应力逐渐下降.由试验可知该阶段不同偏移率的点阵均出现断裂,但是失效形式不同.如图 9 所示,点阵的失效形式主要是 3 种,逐层坍塌、剪切断裂和剪切断裂伴随结点的崩碎.

2.2 抗压强度和弹性模量分析

将点阵的应力-应变曲线初始峰值定为点阵的抗压强度.由表 3 和图 10 可知,在 12 组试验样品中偏移率为 60% 时抗压强度最小为 10.23 MPa,偏移率为 20% 时抗压强度最大为 19.44 MPa.由图 10(a) 可知在拱形点阵偏移率在 0~20% 之间时

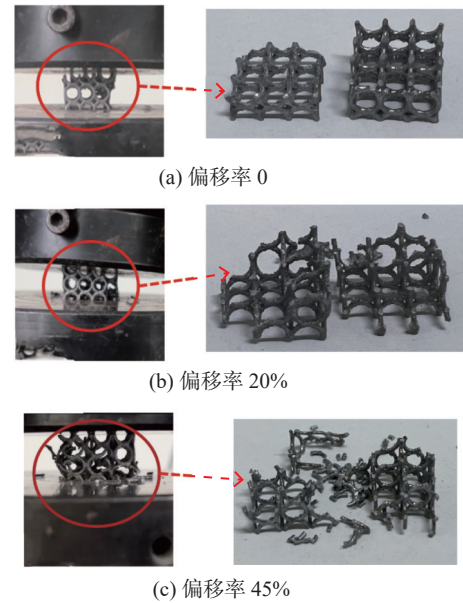


图 9 不同偏移率点阵的失效形式

Fig. 9 Failure form of different offset ratios. (a) 0; (b) 20%; (c) 45%

抗压强度-偏移率曲线呈上升的趋势,随着偏移率的增加点阵的抗压强度增强,20% 偏移率拱形点阵相对未偏移拱形点阵的抗压强度提升了约 49%;当拱形点阵偏移率在 20%~30% 之间时抗压强度-偏移率曲线呈下降趋势,随着偏移率的增加点阵的抗压强度下降,但是 30% 偏移率拱形点阵相对未偏移拱形点阵的抗压强度依旧提升了约 20%;在拱形点阵偏移率为 35%~60% 之间时,不同偏移率拱形点阵抗压强度均小于未偏移的拱形点阵,抗压强度-

表 3 点阵抗压强度和弹性模量
Table 3 Compressive strength and elastic modulus of lattice

序号	偏移率P(%)	抗压强度R/MPa	弹性模量E/GPa
1	0	13.01	0.579
2	10	16.09	0.654
3	15	19.22	0.724
4	20	19.44	0.740
5	25	16.16	0.692
6	30	15.66	0.672
7	35	10.67	0.546
8	40	11.99	0.548
9	45	11.67	0.483
10	50	12.33	0.546
11	55	12.27	0.486
12	60	10.23	0.423

偏移率曲线呈现出一个上下起伏的趋势,点阵的抗压强度出现一个波动的过程,说明在此范围内偏移率对抗压强度的影响较小.成形质量的不同导致点阵的抗压强度出现了上下起伏的趋势.

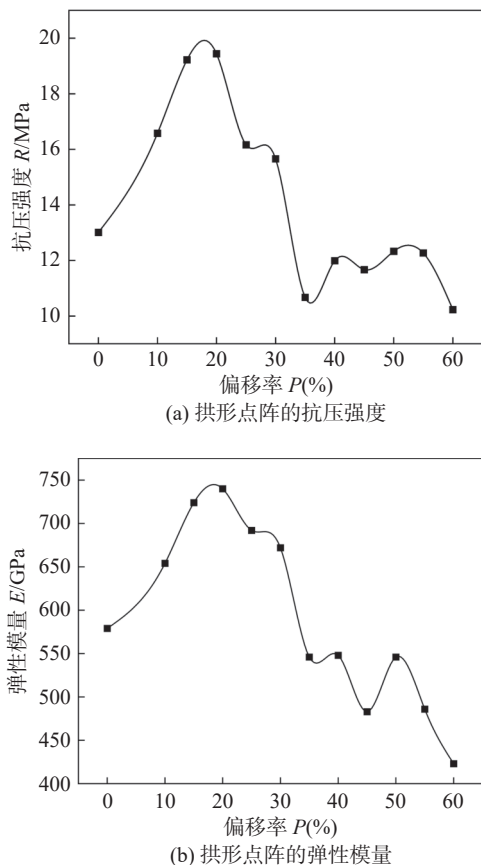


图 10 不同偏移率抗压强度和弹性模量曲线

Fig. 10 Compressive strength and elastic modulus of arch lattice with different offset ratios. (a) compressive strength of arch lattice; (b) elastic modulus of arch lattice

点阵的弹性模量为应力-应变曲线弹性阶段的斜率,通过图 10 可以看出抗压强度-偏移率曲线和弹性模量-偏移率曲线趋势大致相同.由表 3 和图 10(b)可知,在范围内不同偏移率的拱形点阵的弹性模量在 0.423 ~ 0.740 GPa 之间.由图 10(b)可知偏移率为 0 ~ 20% 时弹性模量-偏移率曲线呈上升趋势,拱形点阵的弹性模量随偏移率的增加而增加,点阵偏移率在 20% 时弹性模量达到最大值,相对未偏移拱形点阵弹性模量提升了约 28%;当拱形点阵偏移率在 20% ~ 30% 之间时弹性模量-偏移率曲线呈下降趋势,随着偏移率的增加点阵的弹性模量下降,但是 30% 偏移率拱形点阵的弹性模量相对未偏移拱形点阵依旧提升了约 10%;偏移率在 35% ~ 60% 之间时出现了一个上下起伏的过程,但是弹性模量相较抗压强度有较明显的下降趋势,此

范围内不同偏移率拱形点阵的弹性模量均小于未偏移拱形点阵,点阵偏移率在 60% 时的弹性模量达到最小值.

2.3 点阵结构有限元分析

对 12 个点阵模型进行有限元仿真分析,不同偏移率的点阵应力集中随偏移率的改变均发生了变化.如图 11 所示,在点阵斜视图中可知,当点阵未偏移时应力明显集中在点阵的结点处.当点阵偏移率为 10% 时,结点处的应力向两端发生转移,一定程度削弱了在结点处的应力集中,但是点阵的大部分应力依旧集中在结点处.如图 9(a) 所示,此范围内点阵的失效形式主要为结点处发生断裂.

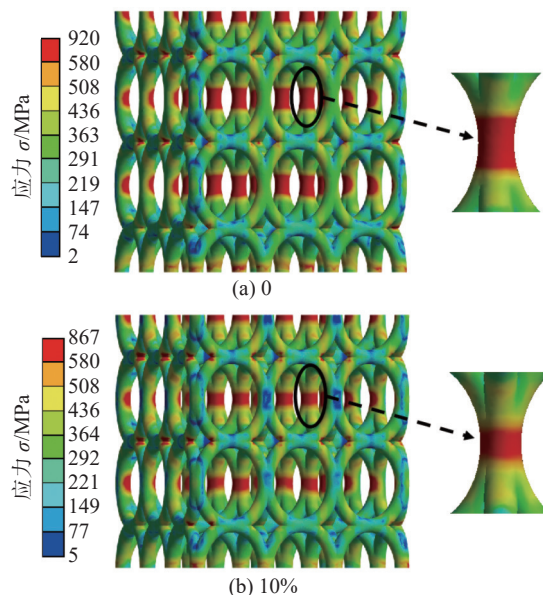


图 11 偏移率 0 和 10% 点阵应力云图

Fig. 11 Stress cloud map of 0 and 10% offset ratio. (a) 0; (b) 10%

如图 12 所示,在点阵斜视图中可知,点阵偏移率从 15% 增加到 35% 过程中,应力集中逐渐从结点处转移到了结点两边的杆上,其中点阵偏移率为 15% ~ 25% 时应力在结点及结点两端杆上分布最为均匀,偏移率在 30% ~ 35% 时应力大部分集中于结点两端的杆上.如图 9(b) 所示,此范围内点阵的失效主要为结点两端的杆件断裂.

如图 13 所示,当点阵偏移率在 40% ~ 60% 时,在斜视图中点阵的应力集中有从结点两端的杆上向结点处集中的趋势,结点截面图可知点阵结点中心应力逐渐降低,在偏移率为 55% 过后结点中心出现了孔洞,结点内外产生了较大的应力差.如图 9(c) 所示,此范围内点阵的主要失效形式为杆的断裂并伴随结点的崩碎,产生结点崩碎是因为结点处的结

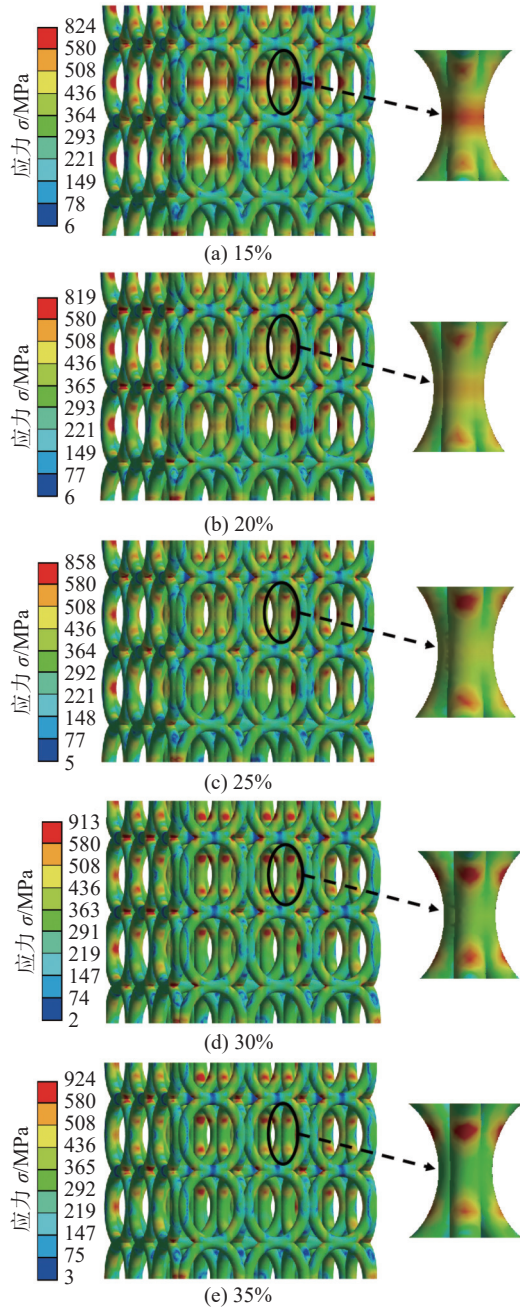


图 12 偏移率 15% ~ 35% 点阵应力云图

Fig. 12 Stress cloud map of 15% ~ 35% offset ratios.
(a) 15%; (b) 20%; (c) 25%; (d) 30%; (e) 35%

合区域减少, 降低了结点的结合强度。

结合有限元对抗压强度-偏移率曲线和弹性模量-偏移率曲线的变化进行分析。当拱形点阵偏移率在 0 ~ 30% 之间时, 偏移率的产生对点阵的抗压强度和弹性模量有增强的作用, 在 20% 偏移率时抗压强度和弹性模量达到最大值, 这是因为拱形点阵的应力集中于结点处, 产生偏移时结点处的杆径会增加, 此时应力集中会向结点两端转移, 点阵偏移率在 15% ~ 20% 时结点处及结点两端的应力分布最均匀, 所以此范围的点阵力学性能最好; 当拱形

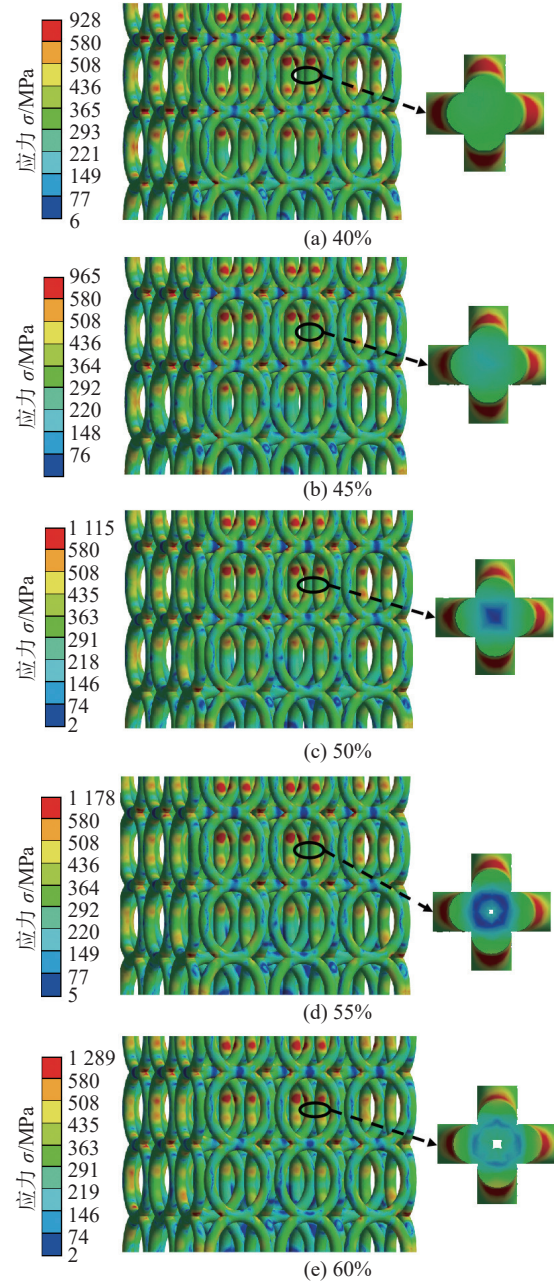


图 13 偏移率 40% ~ 60% 点阵应力云图

Fig. 13 Stress cloud map of 40% ~ 60% offset ratios.
(a) 40%; (b) 45%; (c) 50%; (d) 55%; (e) 60%

点阵偏移率在 35% ~ 60% 时, 点阵的抗压强度和弹性模量相对于未偏移点阵下降, 这是因为在偏移率达到 35% 后继续增加偏移率, 点阵的应力大部分集中于结点两端的杆上, 并且偏移率的增加使结点处的结合区域减少, 降低了结点的结合强度, 从而使点阵力学性能下降。

3 结论

(1) 偏移率在 0 ~ 30% 时, 偏移率的增加对抗压强度和弹性模量有增强的作用; 偏移率在 35% ~

60% 时, 偏移率的增加会削弱抗压强度和弹性模量。偏移率在 20% 时点阵力学性能提升最大, 抗压强度相对未偏移点阵提升了约 49%, 弹性模量相对提升了约 28%。

(2) 点阵偏移率在 0 ~ 30% 时, 对结点有强化作用; 点阵偏移率在 40% ~ 60% 时, 削弱了结点强度。

(3) 点阵偏移率在 0 ~ 10% 时, 点阵的应力主要集中在结点处, 点阵主要失效形式为逐层坍塌; 点阵偏移率在 15% ~ 35% 时, 点阵的应力集中逐渐向结点两端的杆上转移, 应力在结点及两端杆上分布较均匀, 点阵主要失效形式为剪切破坏; 点阵偏移率在 40% ~ 60% 时, 点阵的应力主要集中于结点两端的杆上, 且结点结合强度下降, 点阵主要失效形式为剪切破坏伴随结点崩碎。

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): 32 – 55.
Gu Dongdong, Zhang Hongmei, Chen Hongyu, *et al.* Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Laser, 2020, 47(5): 32 – 55.
- [2] 范华林, 杨卫. 轻质高强点阵材料及其力学性能研究进展 [J]. 力学进展, 2007(1): 99 – 112.
Fan Hualin, Yang Wei. Research progress of lightweight high-strength lattice materials and their mechanical properties[J]. Advances In Mechanics, 2007(1): 99 – 112.
- [3] 刘飞, 唐艺川, 谢海琼, 等. 选区激光熔化成型极小曲面点阵的结构和性能优化 [J]. 中国激光, 2023, 50(12): 222 – 235.
Liu Fei, Tang Yichuan, Xie Haiqiong, *et al.* Optimization of structure and performance of minimal surface lattice formed by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Laser, 2023, 50(12): 222 – 235.
- [4] 江尧峰, 许明三, 曾寿金, 等. SLM 成型 316L 体心立方点阵结构力学性能优化 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30(4): 178 – 186.
Jiang Yaofeng, Xu Mingsan, Zeng Shoujin, *et al.* Optimization of mechanical properties of 316L body centered cubic lattice structure formed by SLM[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(4): 178 – 186.
- [5] 徐裕蔚, 张振杰, 刘清原, 等. 选区激光熔化制备多孔结构的成形偏差及力学性能与压缩失效分析 [J]. 焊接学报, 2022, 43(10): 49 – 56.
Xu Rongwei, Zhang Zhenjie, Liu Qingyuan, *et al.* The forming deviation, mechanical properties and compression failure of porous structures fabricated by laser melting were analyzed[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(10): 49 – 56.
- [6] 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): 8 – 25.
Yin Bangzhao, Qin Yu, Wen Peng, *et al.* Laser powder bed fusion for fabrication of metal orthopedic implants[J]. Chinese Journal of Laser, 2020, 47(11): 8 – 25.
- [7] 都书, 阿依古丽·喀斯木, 张宇涛, 等. 选区激光熔化制备 316L 不锈钢点阵结构的力学性能研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 255 – 263.
Du Shu, Kasimu Ayiguli, Zhang Yutao, *et al.* Mechanical properties of 316L stainless steel lattice structure prepared by selective laser melting[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 255 – 263.
- [8] 聂云飞, 刘斌, 李忠华, 等. 基于选区激光熔化制备的点阵优化结构形貌和组织分析 [J]. 应用激光, 2020, 40(2): 205 – 213.
Nie Yunfei, Liu Bin, Li Zhonghua, *et al.* Morphology and organization analysis of lattice optimized structure based on selective laser melting[J]. Applied Laser, 2020, 40(2): 205 – 213.
- [9] 田杰, 黄正华, 戚文军, 等. 金属选区激光熔化的研究现状 [J]. 材料导报, 2017, 31(S1): 90 – 94.
Tian Jie, Huang Zhenghua, Qi Wenjun, *et al.* Research progress on selective laser melting of metal[J]. Materials Reports, 2017, 31(S1): 90 – 94.
- [10] 章文献. 选择性激光熔化快速成形关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
Zhang Wenxian. Research on the key technologies for selective laser melting process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008.
- [11] 曾寿金, 吴启锐, 叶建华, 等. 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.
Zeng Shoujin, Wu Qirui, Ye Jianhua, *et al.* Mechanical properties of 316L stainless steel porous structure formed by selective laser melting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(8): 67 – 75.
- [12] Han C, Li Y, Wang Q, *et al.* Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2018, 80: 119 – 127.
- [13] Zhang X Y, Fang G, Xing L L, *et al.* Effect of porosity variation strategy on the performance of functionally graded Ti-6Al-4V scaffolds for bone tissue engineering[J]. Materials & Design, 2018, 157: 523 – 538.
- [14] Yan C, Hao L, Hussein A, *et al.* Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2015(51): 61 – 73.
- [15] Li P Y, Ma Y E, Sun W B, *et al.* Fracture and failure behavior of additive manufactured Ti6Al4V lattice structures under compressive load[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 244: 107537.

- [15] 张帅锋, 吕逸帆, 魏正英, 等. 基于 CMT 的电弧熔丝增材 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金的组织与性能 [J]. 焊接学报, 2021, 42(2): 56 – 62.
- Zhang Shuaifeng, Lü Yifan, Wei Zhengying, *et al.* Microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy fabricated by CMT-wire arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(2): 56 – 62.
- [16] Lü Y, Hu M, Wang L, *et al.* Influences of heat treatment on fatigue crack growth behavior of NiAl bronze (NAB) alloy[J]. *Journal of Materials Research*, 2015, 30(20): 3041 – 3048.
- [17] Cai X, Wang Z, Dong L, *et al.* Advanced mechanical properties of nickel - aluminum bronze/steel composite structure prepared by wire - arc additive manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2022, 221: 110969.
- [18] Dharmendra C, Gururaj K, Pradeep K G, *et al.* Characterization of κ -precipitates in wire-arc additive manufactured nickel aluminum bronze: A combined transmission Kikuchi diffraction and atom probe tomography study[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 46: 102137.
- [19] Qin Z, Xia D H, Zhang Y, *et al.* Microstructure modification and improving corrosion resistance of laser surface quenched nickel-aluminum bronze alloy[J]. *Corrosion Science*, 2020, 174: 108744.
- [20] Dharmendra C, Hadadzadeh A, Amirkhiz B S, *et al.* Microstructural evolution and mechanical behavior of nickel aluminum bronze Cu-9Al-4Fe-4Ni-1Mn fabricated through wire-arc additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 30: 100872.

第一作者: 刘缙, 硕士; 主要从事电弧增材方面研究; Email: 1134574878@qq.com.

通信作者: 彭勇, 博士, 研究员; Email: ypeng@njust.edu.cn.

(编辑: 郑红)

[上接第 102 页]

- [16] Yang L, Harrysson O, West H, *et al.* Compressive properties of Ti-6Al-4V auxetic mesh structures made by electron beam melting[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(8): 3370 – 3379.
- [17] Xu Y, Zhang D, Hu S, *et al.* Mechanical properties tailoring of topology optimized and selective laser melting fabricated Ti6Al4V lattice structure[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2019, 99(11): 225 – 239.
- [18] Cao X F, Xiao D, Li Y, *et al.* Dynamic compressive behavior of a modified additively manufactured rhombic dodecahedron 316L stainless steel lattice structure[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 148: 106586.
- [19] 丁若晨. 基于激光选区熔化的金属点阵结构力学性能研究 [D]. 广州: 中国科学院大学, 2021.
- Ding Ruochen. Study on mechanical properties of metal lattice structures based on selective laser melting[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [20] 张唯, 杨孝梅, 蹇海根, 等. 选区激光熔化铝合金缺陷影响因素及形成机制 [J]. *铸造工程*, 2021, 45(6): 20 – 27.
- Zhang Wei, Yang Xiaomei, Jian Haigen, *et al.* Influence factors and formation mechanism of selective laser melting aluminum alloy defects[J]. *Foundry Engineering*, 2021, 45(6): 20 – 27.
- [21] 吴鸿飞, 王维荣, 王国伟, 等. 选区激光熔化成形点阵结构的各向异性对力学性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(4): 1397 – 1405.
- Wu Hongfei, Wang Weirong, Wang Guowei, *et al.* The effect of anisotropy on mechanical properties of selective laser melting forming lattice structures[J]. *Rare Metal Materials And Engineering*, 2022, 51(4): 1397 – 1405.

第一作者: 杨林沂, 硕士研究生; 主要从事激光增材制造技术; Email: 345683537@qq.com.

通信作者: 许明三, 硕士, 教授; Email: xums368@163.com.

(编辑: 郑红)