

单元晶胞尺寸对晶格结构力学性能的影响

黄西娜¹, 翟月雯²

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 100083, 北京;

2. 北京机电研究所有限公司, 100083, 北京)

摘要: 为了解具有晶格结构的先进轻质多功能材料的力学性能,以激光选区熔化制备的体心立方单元晶胞晶格结构为例,揭示了单元晶胞尺寸对晶格结构力学性能的影响规律。采用干重法测量晶格结构的质量,通过计算孔隙率确定了单元晶胞尺寸对孔隙率的影响规律;通过压缩实验、压-压疲劳实验及扫描电镜断口形貌图,分析了晶格结构力学性能的演化规律。实验结果表明:所有样品的实际孔隙率均低于设计值,当单元晶胞尺寸为 2.5 mm 时,孔隙率的设计值与实际值偏差最大,为 8.2%;当单元晶胞尺寸为 7.5 mm 时,孔隙率的设计值与实际值偏差最小,为 1.6%;当单元晶胞尺寸从 2.5 mm 增加到 7.5 mm,晶格结构的压缩强度降低了 41.96%,说明单元晶胞尺寸增加会导致晶格结构抵抗压缩变形的能力变小即塑性变差,断裂模式从塑性断裂向脆性断裂转变且疲劳循环次数减小。此外,单元晶胞尺寸较小时瞬断区断口主要由韧窝组成,而单元晶胞尺寸较大时,瞬断区表现为光滑的平面和少量的韧窝,说明晶格结构更脆。该研究结果可为晶格结构单元晶胞尺寸的设计和选择提供参考。

关键词: 激光选区熔化;晶格结构;单元晶胞;压缩实验;压-压疲劳实验

中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202306013 **文章编号:** 0253-987X(2023)06-0115-08

Influence of Unit Cell Size on Mechanical Properties of Lattice Structure

HUANG Xina¹, ZHAI Yuewen²

(1. School of Mechanical of Electronic & Information Engineering, China University of Mining and

Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Research Institute of Mechanical & Electronic

Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: To understand the mechanical properties of advanced lightweight multifunctional materials with a lattice structure, the body-centered cubic unit cell lattice structure prepared by selective laser melting was taken as an example to reveal the influence of the unit cell size on the mechanical properties of the lattice structure. Firstly, the mass of the lattice structure was measured by the dry weight method, the porosity was calculated, and the influence law of unit cell size on porosity was studied. Then, the evolution law of mechanical properties of lattice structure was studied through compression testing, compression-compression fatigue testing and scanning electron microscope fracture topography. The results showed that the actual porosity of all samples

收稿日期: 2022-09-19。 作者简介: 黄西娜(1987—),女,博士,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(42102345);中央高校基本科研业务费资助(2022XJJD01)。

网络出版时间: 2023-02-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230227.1707.006.html>

was lower than the design value. When the unit cell size was 2.5 mm, the actual porosity showed a maximum deviation of 8.2% from the design value. However, when the unit cell size was 7.5 mm, the deviation was the smallest (1.6%). As the unit cell size increased from 2.5 mm to 7.5 mm, the compressive strength of the lattice structure decreased by 41.96%, indicating that the ability of the lattice structure to resist compression deformation became smaller, and the plasticity became worse. In addition, the fracture mechanism changed from plastic fracture to brittle fracture, and the number of fatigue cycles decreased. The transient zone was mainly composed of dimples when the unit cell size was small while it displayed a smooth plane and a small amount of dimples when the unit cell size was large, indicating that the lattice structure was more brittle. The research results can provide a reference for the design and selection of the unit cell size of the lattice structure.

Keywords: selective laser melting; lattice structure; unit cell; compression testing;compression-compression fatigue testing

晶格结构作为一种极具潜力的先进轻质高强多功能材料结构,具有高比强度和比刚度^[1-2]、高散热和隔热性^[3-4]、吸声性能^[5-6]以及多功能可设计性^[7]等特征,是满足轻量化、高性能设计需求的新型材料结构,在先进飞机、汽车、发动机结构减重、冷却、空心内部增强以及避免应力屏蔽等方面具有独特优势,因此被广泛应用于航空航天工业^[8]、汽车工程^[9]以及生物医疗^[10]等领域。目前,晶格结构的制备方法主要包括:气相沉积法^[11]、粉末冶金法^[12]、发泡法^[13]等,但这些方法制备的晶格结构都存在一定的局限性,即晶格结构的单元晶胞拓扑、支柱尺寸以及单元晶胞尺寸很难控制,而这些参数对晶格结构的力学性能具有至关重要的作用。增材制造技术的出现使晶格结构的可设计性成为可能,激光选区熔化(selective laser melting, SLM)成形工艺作为目前应用最广泛的增材制造技术之一^[14],具有可成形材料广泛、微观组织细小、成形精度高、力学性能好等优点^[15-17]。因此,本文选取 SLM 成形工艺实现晶格结构的制备。

体心立方单元晶胞拓扑是最常见的单元晶胞之一,已经从理论、实验和数值模拟等方面开展了大量研究。Labeas 等^[18]研究了体心立方单元晶胞晶格结构的力学性能,获得了弹塑性变形区间内晶格结构的应力-应变关系。王健^[19]利用有限元方法分析了体心立方单元晶胞晶格结构,结果表明 3D 单元法可以详细分析点阵单元的全部受力特性。Huang 等^[20]分析了具有不同支柱尺寸的晶格结构,结果表明压缩应力随着支柱尺寸的增加而单调增加。

上述研究主要集中于单元晶胞拓扑结构,对单

元晶胞尺寸等影响晶格结构力学性能参数的系统性研究还很少,导致人们针对不同的应用领域选取晶格结构的参数时,仍需进行大量实验不断尝试才能最终确定,极大地浪费了时间和金钱。因此,本文重点研究了单元晶胞尺寸对 SLM 制备的 Ti6Al4V 体心立方晶胞结构的孔隙率和力学性能的影响。

1 实验方法及研究方案

1.1 晶格结构设计

晶格结构是由一个个具有相同结构的单元晶胞堆叠而成,其设计是建立在单元晶胞基础上的^[21]。本文设计的晶格结构选用体心立方单元晶胞,边长为 a ,孔隙率为 57%,支柱的截面是正方形,具体尺寸参数如表 1 所示。

表 1 不同单元晶胞尺寸参数
Table 1 Schemes of the optical experiments

组号	晶胞长度 a/mm	支柱边 长/ mm	实体部分 体积/ mm^3	晶胞体积 / mm^3	孔隙率 /%
1	2.5	0.75	6.72	15.625	57
2	4.0	1.20	27.52	64.000	57
3	5.0	1.50	53.75	125.000	57
4	6.0	1.80	92.88	216.000	57
5	7.5	2.25	181.41	421.875	57

基于上述 5 组不同的单元晶胞尺寸,设计外轮廓尺寸为 20 mm×20 mm×40 mm 的晶格结构用于几何表征和静态力学测试,晶格结构的模型如图 1 所示。

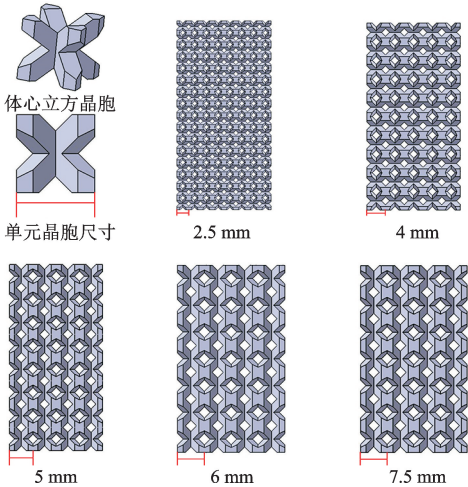


图 1 不同单元晶胞尺寸晶格结构的模型
Fig. 1 The models of lattice structures with different unit cell size

1.2 材料和制备

实验所用材料为气体雾化法制备的商用预合金 Ti6Al4V 粉末(德国 EOS 公司生产)。图 2(a)给出了采用扫描电镜获得的原始粉末形貌,从图中可以看出 Ti6Al4V 粉末是近似球形的,只有少部分粉末呈现不规则形状。原始粉末的粒径分布如图 2(b)所示,粉末颗粒的大小在 12~118 μm 之间,平均粉末颗粒尺寸为 39.55 μm,粉末的粒径呈现正态分布趋势。原始 Ti6Al4V 粉末的化学成分列于表 2。

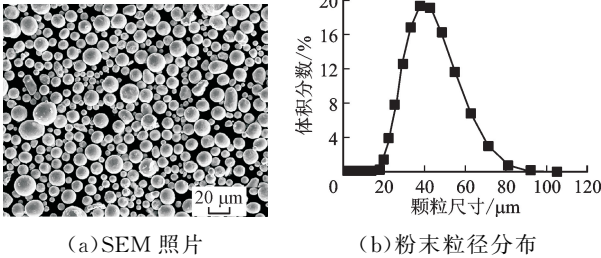


图 2 Ti6Al4V 粉末的微观结构和粒径分布情况
Fig. 2 Microstructure and particle size distribution of Ti6Al4V powder

表 2 Ti6Al4V 粉末化学成分的质量分数
Table 2 The chemical composition of Ti6Al4V powder (mass fraction)

w/ %					
Al	V	Fe	C	N	H
5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015

实验所用设备是 EOS GmbH 公司开发的 EOS

M280 金属粉末 SLM 设备。根据前人研究结果^[20-22],选取工艺参数为:激光功率 280 W,扫描速度 1 200 mm · s⁻¹,扫描间距 140 μm,铺粉厚度 30 μm。图 3 为 SLM 制备的具有不同单元晶胞尺寸的晶格结构实物图。制备过程中,在晶格结构的底部留有 1 mm 的加工余量,制备完成后利用线切割将所有试样从基板上分离。最后,用丙酮和酒精对试样进行超声波清洗,去除支柱上残留的粉末和油污。

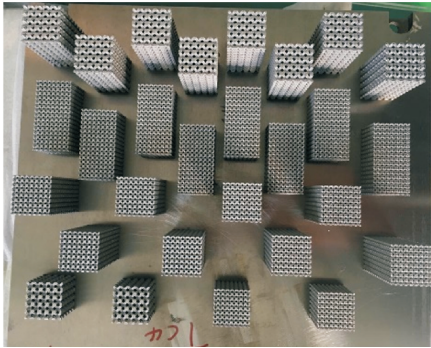


图 3 不同单元晶胞尺寸晶格结构实物图
Fig. 3 The actual specimens of lattice structures with different unit cell size

1.3 表征与性能测试

1.3.1 孔隙率测试

采用干重法测量晶格结构的实际孔隙率。首先将 SLM 制备的长方体晶格结构在空气中称重,所用设备为 XS 分析天平,灵敏度为 0.1 mg。用测得的质量除以试样尺寸,得到晶格结构的密度 ρ_a。假定钛合金的实体密度 ρ_s=4.51 g · cm⁻³,制备得到的晶格结构孔隙率可表示为

$$\varphi = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \times 100\% \tag{1}$$

1.3.2 力学性能测试

SLM 制备的晶格结构被直接用于力学性能测试。晶格结构压缩性能测试在 INSTRON 5982 电子万能材料试验机上进行,根据 GB/T 7314—2017《金属材料室温压缩试验方法》,实验过程中设置最大载荷为 100 kN,每组试样分别测试 3 个样品,实验恒定加载速度为 1.5 mm/min,直至试样被压到失效或达到 99 kN 的极限,实验停止。通过实验可以得到应力-应变曲线,然后根据应力-应变曲线得到压缩和屈服强度。

晶格结构疲劳性能测试在 MTS 370-25 液压伺服试验机上进行,根据 GB/T 3075—2021《金属材料疲劳试验轴向力方法》,设置恒定应力比为 R=0.1 (R=σ_{min}/σ_{max},其中 σ_{min} 和 σ_{max} 分别为施加在样品上

的最小应力和最大应力), 频率为 15 Hz, 每组试样分别测试 3 个样品, 直到试样全部断裂或者达到 10^6 个循环时, 测试结束。疲劳实验中, 施加在样品上的最大应力用测得的压缩破坏应力的 30% 来确定。根据实验结果, 可以获得所有样品的疲劳循环次数。

2 结果与讨论

2.1 单元晶胞尺寸对晶格结构孔隙率的影响

采用干重法检测具有不同单元晶胞尺寸的晶格结构的孔隙率并与设计值对比后发现, 所有 SLM 制备的晶格结构的孔隙率均小于设计值, 这是因为制备过程中激光热量被不同程度地传递给周边粉末, 粉末受热吸附在支柱上, 使得实际加工的支柱尺寸比设计尺寸大(如图 4 所示), 导致最终晶格结构的孔隙率比设计孔隙率小。此结果与文献[23]和[24]的研究结果相一致。

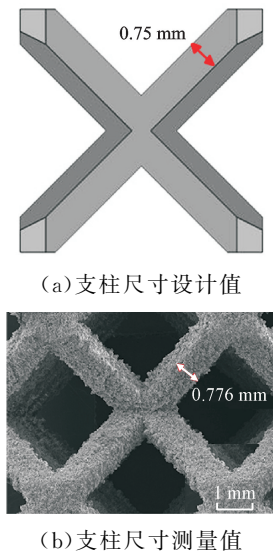


图 4 激光选区熔化制备成形后粉末的粘附

Fig. 4 The powder adhesion on specimen fabricated using selective laser melting

图 5 显示了具有不同单元晶胞尺寸的晶格结构实际与设计孔隙率对比。从图中可以看出, 单元晶胞尺寸为 2.5 mm 时, 实际孔隙率与设计值相差最大, 达到 8.2%。随着单元晶胞尺寸的增大, 实际孔隙率逐渐增加, 直到单元晶胞尺寸为 7.5 mm, 实际的孔隙率与设计值仅相差 1.6%。这是因为随着单元晶胞尺寸的增大, 支柱尺寸增加, 当支柱尺寸远大于激光光斑直径时, 激光在扫描过程中传递到周围粉末的热量减少, 熔化的多余粉末减少, 使得最终附着在支柱上的粉末减少, 实际制备的支柱尺寸与设计尺寸越接近, 实际与设计的孔隙率就越接近。

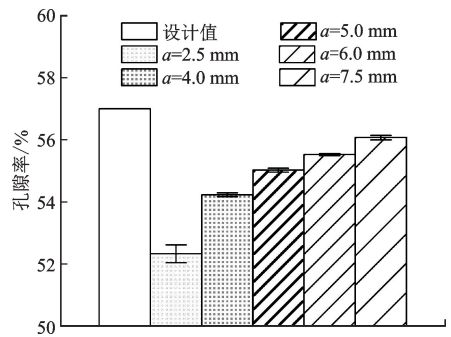


图 5 不同单元晶胞尺寸晶格结构的孔隙率对比

Fig. 5 The porosity comparison of lattice structures with different unit cell size

2.2 单元晶胞尺寸对晶格结构压缩性能的影响

为了研究单元晶胞尺寸对晶格结构力学性能的影响, 本文对具有不同单元晶胞尺寸的晶格结构进行了压缩性能分析。为了减小制造精度、加工缺陷等对晶格结构压缩性能的影响, 开展了多次实验, 最终选取 15 条应力-应变曲线, 如图 6 所示。此外, 假定每一炉加工出来的产品精度相同, 在分析过程中可忽略制造精度和加工缺陷的影响。从压缩应力-应变曲线图可以看出, 在压缩应力作用下, 所有试样都发生了断裂。曲线基本由 3 个阶段组成: 应力与应变成正比关系的线弹性阶段; 线弹性阶段结束后, 不同单元晶胞尺寸的应力-应变曲线出现长短不一的平台区间, 此区间即为塑性变形阶段, 从图中可以看出, 随着单元晶胞尺寸增加, 平台区间逐渐缩短甚至消失, 说明晶格结构的塑性逐渐变小; 试样在不断增加的压缩应力持续作用下抗压能力逐渐变小, 直到最后达到晶格结构的某薄弱区域发生断裂, 即为断裂阶段。

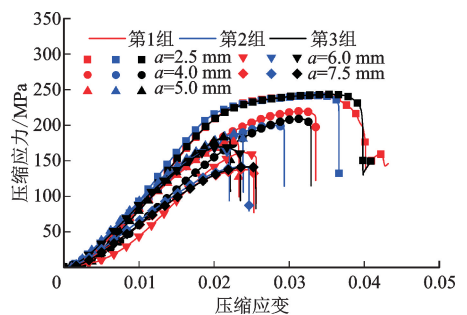


图 6 不同单元晶胞尺寸晶格结构的压缩应力-应变曲线

Fig. 6 The compressive stress-strain curves of lattice structures with different unit cell size

图 7 给出了不同单元晶胞尺寸晶格结构的压缩和屈服强度。从压缩实验结果可以看出,晶格结构的单元晶胞尺寸对压缩和屈服强度有着重要影响。随着单元晶胞尺寸增加,晶格结构的压缩强度逐渐降低,单元晶胞尺寸从 2.5 mm 增加到 7.5 mm,压缩强度降低了 41.96%。这是由于随着单元晶胞尺寸增加,支柱长度增加,这样支柱在压力的作用下更容易发生弯曲变形而失稳,失稳的支柱不能够再继续承担压力,压力被分担到周边支柱上,导致周边支柱承受集中的应力,破坏速度加快,最终导致整个晶格结构发生破坏^[25-26]。随着晶格结构尺寸增加,支柱长度增加且边长增加,计算表明支柱边长的增加对于长度增加带来的失稳变形有所缓解,但并不能完全排除。从图中还可以看出,屈服强度随着单元晶胞尺寸的增加而降低,由于单元晶胞尺寸为 6 mm 和 7.5 mm 的试样在压缩过程中发生脆性断裂,因此无法检测到屈服强度,这与应力-应变曲线得到的结果相一致。屈服强度减小意味着塑性的降低,对于动态加载过程,塑性的降低对于晶格结构的疲劳寿命有不良影响,需要进一步开展疲劳实验进行验证。

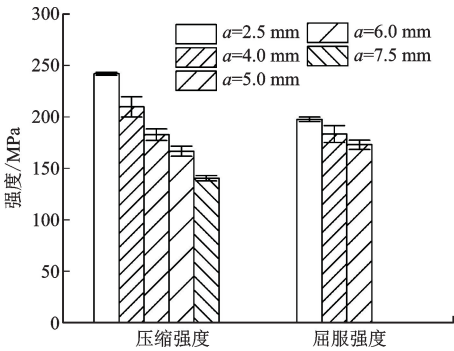
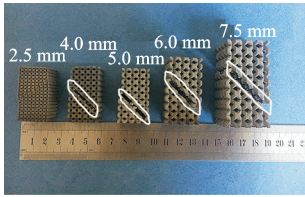


图 7 不同单元晶胞尺寸晶格结构的压缩性能

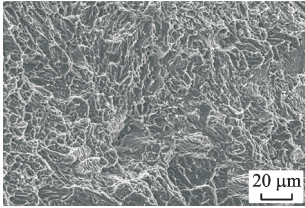
Fig. 7 The compressive property of lattice structures with different unit cell size

图 8(a)为 5 组具有不同单元晶胞尺寸晶格结构的压缩试样断裂后的宏观断口形貌。可以看出,对于单元晶胞尺寸为 2.5 mm 的晶格结构,经过压缩后试样没有发生明显的断裂,但试样沿垂直于受力方向产生了鼓肚,说明试样具有良好的塑性,这与应力-应变曲线呈现的结果一致。其余 4 个单元晶胞尺寸的晶格结构在压缩后均发生了断裂,断口与力的加载方向呈 45°。此外,压缩试样的断裂均从表面开始,可能是制备过程中粘附在支柱表面的粉末产生的缺陷所导致。随着单元晶胞尺寸增加,断

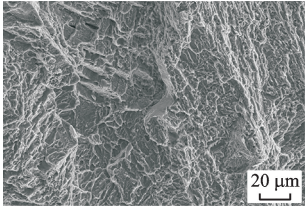
口的平整度越高,呈明显的剪切断裂,说明晶格结构的塑性逐渐降低,断裂方式更加趋于脆性断裂。从微观角度而言,在单元晶胞尺寸为 4 mm 的断口形貌中(见图 8(b))存在着大量的韧窝,单元晶胞尺寸为 5 mm 的断口形貌(见图 8(c))也是由大量韧窝组成。而在单元晶胞尺寸为 6 mm 的断口形貌中出现了微孔洞(见图 8(d)),这是因为 SLM 制备过程中,过高的冷却速率使得粉末不均匀收缩而产生的。压缩过程中,孔洞边缘容易产生应力集中,从而引起断裂。从图 8(e)所示单元晶胞尺寸为 7.5 mm 的断口形貌中可以观察到光滑平面以及微裂纹,说明该晶格结构的断裂模式是混合断裂。从 4 组不同单元晶胞尺寸的微观断口形貌可以看出,随着单元晶胞尺寸增加,微观形貌中韧窝逐渐减少,微裂纹逐渐产生,说明晶格结构抵抗变形的能力变小,塑性变差。



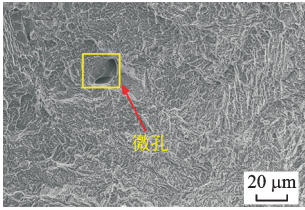
(a) 宏观压缩断口



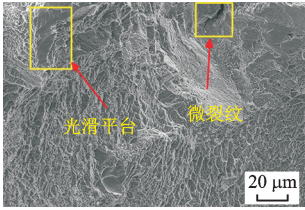
(b) a=4 mm



(c) a=5 mm



(d) a=6 mm



(e) a=7.5 mm

图 8 不同单元晶胞尺寸晶格结构的宏观微压缩断口形貌
Fig. 8 The macro and micro compressive fracture morphology of lattice structures with different unit cell size

2.3 单元晶胞尺寸对晶格结构压-压疲劳性能的影响

为了研究单元晶胞尺寸对晶格结构疲劳性能的影响,对具有不同单元晶胞尺寸的晶格结构开展了压-压疲劳实验,得到的疲劳循环次数如图 9 所示。由图可知,随着单元晶胞尺寸增加,疲劳循环次数明显减少。单元晶胞尺寸为 2.5 mm 的晶格结构在循

环载荷作用下经历的循环次数最多,是单元晶胞尺寸为 5 mm、6 mm 和 7.5 mm 时的 3 倍左右,这是因为单元晶胞尺寸为 2.5 mm 的晶格结构具有最大的塑性。综合单元晶胞尺寸对晶格结构的力学性能影响分析可知,针对不同的应用领域应选择合适的晶胞尺寸,较小的单元晶胞尺寸适合应用于承受较高的循环载荷,但是对于尺寸精度要求较高而抗压强度和疲劳寿命要求不高的地方,可以选择较大的单元晶胞尺寸。

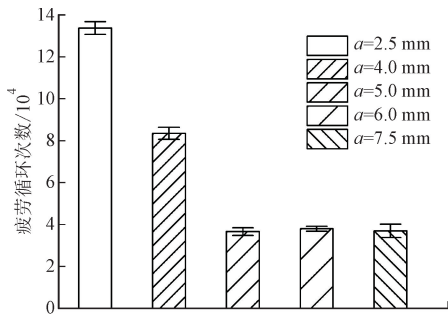
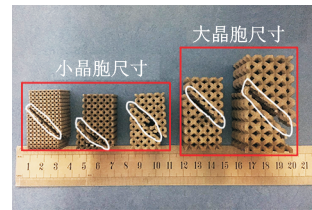


图 9 不同单元晶胞尺寸晶格结构的疲劳循环次数

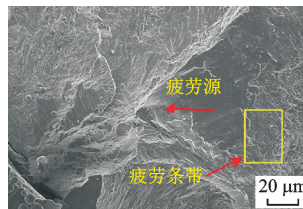
Fig. 9 The number of fatigue cycles for lattice structures with different unit cell size

疲劳断裂是材料内部薄弱区组织在循环压缩应力作用下,微裂纹形成并逐渐积累的过程,当裂纹扩展到一定程度后发生断裂,最终导致整个试样断裂。从具有不同单元晶胞尺寸的晶格结构疲劳断裂的宏观照片可以看出,所有试样的疲劳断裂都与力的加载方向呈 45° ,如图 10(a)所示。单元晶胞为 2.5 mm、4 mm 和 5 mm 的疲劳断裂特征相似,选 1 组典型的疲劳断口作为小晶胞尺寸进行分析。单元晶胞尺寸为 6 mm 和 7.5 mm 的晶格结构的瞬断区,相较于前面 3 组单元晶胞尺寸试样存在一定的差异,则也选取 1 个典型断口作为大晶胞尺寸进行分析。本文的压-压疲劳实验是在低应力水平进行的,疲劳裂纹稳态扩展,因此疲劳断口的微观形貌由 3 个典型区域组成,包括疲劳源区、疲劳裂纹扩展区和疲劳断裂区。图 10(b)所示为疲劳裂纹源区,疲劳裂纹起源于支柱交叉处表面,疲劳源区呈现光亮的平面特征,表现为扇形。在 SLM 成形过程中, Ti6Al4V 粉末收缩引起周围的应力集中,从而在该区域生成微孔,是疲劳裂纹在此处萌生的主要原因。除了疲劳裂纹萌生区之外,还可以观察到疲劳裂纹扩展区。从疲劳裂纹扩展区的放大图中(见 10(c))可以发现大量的疲劳条带,这是疲劳裂纹扩展的重要特征^[28],疲劳条带垂直于裂纹的扩展方向,同时还存在裂纹扩

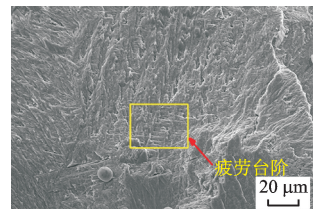
展台阶。疲劳条带是循环载荷作用下,裂纹每一次扩展留下的痕迹。它类似于以疲劳源为圆心向外扩展的平行弧线,疲劳条带的凹侧指向疲劳源,凸侧指向裂纹的扩展方向。靠近疲劳源处的条带比较密集,表明裂纹扩展较慢;随着裂纹扩展逐渐变快,疲劳条带变得稀疏、粗糙。随着单元晶胞尺寸逐渐增加,疲劳断口最主要的区别出现在瞬断区。单元晶胞尺寸比较小时(见图 10(d)),瞬断区断口主要由韧窝组成,这是试样承受较高的循环压缩应力所导致的。当单元晶胞尺寸增加到比较大时(见图 10(e)),瞬断区表现为光滑的平面和少量的韧窝,说明晶格结构更脆,这与压缩实验结果相吻合。



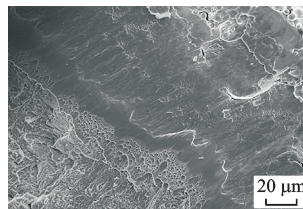
(a) 宏观疲劳断口



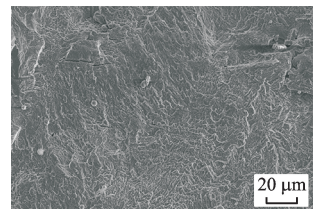
(b) 疲劳裂纹源



(c) 疲劳裂纹扩展区



(d) 小晶胞尺寸瞬断区



(e) 大晶胞尺寸瞬断区

图 10 不同单元晶胞尺寸晶格结构的宏微观疲劳断口形貌

Fig. 10 The macro and micro fatigue fracture morphology of lattice structures with different unit cell size

3 结 论

本文以体心立方单元晶胞为研究对象,在孔隙率不变的条件下,设计了 5 种不同的单元晶胞尺寸,利用 SLM 成形工艺,成功制备出所设计的具有不同单元晶胞尺寸的晶格结构,最后分析不同单元晶胞尺寸对晶格结构力学性能的影响,得到如下结论。

(1) 单元晶胞尺寸增加,晶格结构的实际孔隙率逐渐增大,更接近设计值。当单元晶胞尺寸为 7.5 mm

时,孔隙率的设计值与实际值偏差最小,为1.6%。

(2) 单元晶胞尺寸增加,晶格结构的压缩和屈服强度减小,单元晶胞尺寸从2.5 mm增加到7.5 mm,晶格结构的压缩强度降低了41.96%。晶格结构单元晶胞尺寸越小塑性越好,能够承受更高的循环载荷。

(3) 随着晶格结构单元晶胞尺寸减小,晶格结构抗疲劳性能增加。当单元晶胞尺寸较小时,瞬断区断口主要由韧窝组成,而当单元晶胞尺寸较大时,瞬断区表现为光滑的平面和少量的韧窝,表明晶格结构更脆。

参考文献:

- [1] LIU Hui, CHEN Lianxiong, JIANG Yi, et al. Multi-scale optimization of additively manufactured graded non-stochastic and stochastic lattice structures [J]. *Composite Structures*, 2023, 305: 116546.
- [2] 徐亮, 湛清云, 席雷, 等. 微类桁架点阵结构填充内冷通道的多目标优化设计 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(3): 1-11.
XU Liang, CHEN Qingyun, XI Lei, et al. Multi-objective optimization design of micro-class truss lattice structure for filling internal cooling channel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(3): 1-11.
- [3] LIANG Dong, HE Guanlin, CHEN Wei, et al. Fluid flow and heat transfer performance for micro-lattice structures fabricated by selective laser melting [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 172 (Part B): 107312.
- [4] CHEN Li, CHEN Jian, LI Wei, et al. Research on high temperature compression and creep properties of porous copper alloy [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2017, 853: 122-126.
- [5] ZHANG Lei, SONG Bo, LIU Ruijie, et al. Effects of structural parameters on the Poisson's ratio and compressive modulus of 2D pentamode structures fabricated by selective laser melting [J]. *Engineering*, 2020, 6(1): 56-67.
- [6] YU Kunhao, FANG N X, HUANG Guoliang, et al. Magnetoactive acoustic metamaterials [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(21): 1706348.
- [7] YANG Xin, GONG Yu, ZHAO Libin, et al. Compressive mechanical properties of layer hybrid lattice structures fabricated by laser powder bed fusion technique [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22: 1800-1811.
- [8] GUPTA A, TALHA M. Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2015, 79: 1-14.
- [9] YIN Sha, CHEN Haoyu, WU Yaobo, et al. Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood [J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 131-140.
- [10] YAN Xingchen, LI Qing, YIN Shuo, et al. Mechanical and in vitro study of an isotropic Ti6Al4V lattice structure fabricated using selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 782: 209-223.
- [11] WILLIAMS B E, BROCKMEYER J, TUFFIAS R H. Composite foam structures; US6929866B1 [P]. 2005-08-16.
- [12] CHEN Hongjie, WANG Chunli, ZHU Xiangdong, et al. Fabrication of porous titanium scaffolds by stack sintering of microporous titanium spheres produced with centrifugal granulation technology [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2014, 43: 182-188.
- [13] WANG Chunli, CHEN Hongjie, ZHU Xiangdong, et al. An improved polymeric sponge replication method for biomedical porous titanium scaffolds [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 70(Part 2): 1192-1199.
- [14] 宋剑锋, 宋有年, 王文武, 等. 金属粉末选区激光熔化成形表面粗糙度预测及控制方法研究 [J]. *中国激光*, 2022, 49(2): 75-88.
SONG Jianfeng, SONG Younian, WANG Wenwu, et al. Prediction and control on the surface roughness of metal powder using selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(2): 75-88.
- [15] YUAN Zijun, CHEN Xiangdong. Novel approach for fabricating horizontal overhanging structures in selective laser melting [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85: 793-801.
- [16] 杨益, 党明珠, 李伟, 等. 激光选区熔化钛铝合金裂纹形成机理及抑制研究 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(3): 181-188.
YANG Yi, DANG Mingzhu, LI Wei, et al. Study on cracking mechanism and inhibiting process of TiAl alloys fabricated by selective laser melting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(3): 181-188.
- [17] 刘林青, 宋长辉, 杨永强, 等. 异种材料激光选区熔化界面结构强化机理研究 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56(3): 189-196.
LIU Linqing, SONG Changhui, YANG Yongqiang, et al. Study on mechanism of strengthening interface structure of dissimilar materials by selective laser melting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(3): 189-196.
- [18] LABEAS G N, SUNARIC M M. Investigation on the

- static response and failure process of metallic open lattice cellular structures [J]. *Strain*, 2010, 46(2): 195-204.
- [19] 王健. 激光增材制造点阵结构力学性能研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [20] HUANG Xina, DING Shoubin, LANG Lihui, et al. Compressive response of selective laser-melted lattice structures with different strut sizes based on theoretical, numerical and experimental approaches [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2023, 29(2): 209-217.
- [21] 纪小刚, 张建安, 栾宇豪, 等. 仿皮肤三维多孔点阵结构压缩吸能性能研究 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(15): 222-230.
- JI Xiaogang, ZHANG Jianan, LUAN Yuhao, et al. Research on compression energy absorption performance of skin-like 3D porous lattice structure [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(15): 222-230.
- [22] HUANG Xina, ZHANG Sheng, HU Quandong, et al. Coupling effect of unit cell topology and forming orientation on the Ti6Al4V porous structures fabricated using selective laser melting [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(2): 1800737.
- [23] WARNKE P H, DOUGLAS T, WOLLNY P, et al. Rapid prototyping: porous titanium alloy scaffolds produced by selective laser melting for bone tissue engineering [J]. *Tissue Engineering: Part C Methods*, 2009, 15(2): 115-124.
- [24] ZHANG Sheng, WEI Qingsong, CHENG Lingyu, et al. Effects of scan line spacing on pore characteristics and mechanical properties of porous Ti6Al4V implants fabricated by selective laser melting [J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 185-193.
- [25] BECKER W T. Mechanisms and appearances of ductile and brittle fracture in metals [M]//BECKER W T, SHIPLEY R J. *Failure Analysis and Prevention*. New York, NY, USA: ASM International, 2002: 587-626.
- [26] KERLINS V. Modes of fracture [M]//ASM Handbook Committee: *Fractography*. New York, NY, USA: ASM International, 1987: 12-71.
- [27] 张骁勇, 王荣. 材料的断裂与控制 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.

(编辑 李慧敏 刘杨)