

引用格式:孙驰,汪健,贺贺,等. 选区激光熔化成形 FeCrNi 中熵合金点阵结构及其力学性能[J]. 材料工程, 2024, 52(1): 211-219.
SUN Chi, WANG Jian, HE He, et al. Lattice structures and mechanical properties of FeCrNi medium-entropy alloy prepared by selective laser melting[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(1): 211-219.

选区激光熔化成形 FeCrNi 中熵合金点阵结构及其力学性能

Lattice structures and mechanical properties of FeCrNi medium-entropy alloy prepared by selective laser melting

孙 驰¹,汪 健¹,贺 贺²,秦冬阳^{2*},
曹远奎¹,付 遨¹,刘 彬^{1*}

(1 中南大学 粉末冶金研究院,长沙 410083;

2 西北工业大学 航空学院,西安 710072)

SUN Chi¹,WANG Jian¹,HE He²,QIN Dongyang^{2*},

CAO Yuankui¹,FU Ao¹,LIU Bin^{1*}

(1 Powder Metallurgy Research Institute of Central South

University, Changsha 410083, China; 2 School of

Aeronautics, Northwestern Polytechnical

University, Xi'an 710072, China)

摘要:金属点阵结构材料由于其轻量化、高比强度、能量吸收和多孔性等优势,广泛应用于航空航天、汽车工业等领域。以高强韧 FeCrNi 中熵合金 (medium entropy alloy, MEA) 为研究对象,采用选区激光熔化 (selective laser melting, SLM) 技术制备了具有 BCC, BCCZ, FCC, FCCZ 四种仿晶格结构的 FeCrNi 中熵合金点阵结构材料,对其显微组织、力学性能及变形行为进行了系统研究。结果表明,采用 SLM 技术制备的 FeCrNi 中熵合金点阵结构节点搭接质量高,熔池交错堆叠致密,晶粒均匀细小。在相对密度相近时, BCC, FCC, BCCZ, FCCZ 点阵结构的比强度和比能量吸收值依次升高。具有 FCCZ 点阵结构的 FeCrNi 中熵合金材料的比能量吸收值达到 $49.8 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于 Ti6Al4V 及 316L 不锈钢点阵材料。有限元模拟分析表明, Z 型支柱的存在增加了点阵材料的表观强度和刚度,并导致变形行为由结点弯曲主导向拉轴向压缩主导转变,是 FCCZ 点阵结构强度提升的主要原因。

关键词:选区激光熔化;中熵合金;点阵结构;力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000508

中图分类号: TG141 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2024)01-0211-09

Abstract: Metal lattice structural materials are widely used in aerospace, automotive industry, and other fields due to their advantages of lightweight, high specific strength, energy absorption, and porosity. High strength and toughness FeCrNi medium entropy alloy (MEA) was taken as the research object, and selective laser melting (SLM) was used to prepare FeCrNi medium entropy alloy lattice structure materials with four simulated lattice structures: BCC, BCCZ, FCC and FCC. The microstructure, mechanical properties, and deformation behavior of these materials were systematically studied. The results indicate that the FeCrNi medium entropy alloy lattice structure prepared by the skip scanning strategy has high node overlap quality, dense interlaced stacking of molten pools, and uniform and fine grains. When the relative density is similar, the specific strength and specific energy absorption values of BCC, FCC, BCCZ, and FCCZ lattice structures increase sequentially. The specific energy absorption of FeCrNi medium entropy alloy material with FCCZ lattice structure reaches $49.8 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, significantly higher than that of Ti6Al4V and 316L stainless steel lattice materials. The finite element simulation analysis shows that the presence of Z-

shaped pillars increases the apparent strength and stiffness of the lattice material, and leads to a transition in deformation behavior from bending dominated to tensile dominated, which is the main reason for the strength improvement of the FCCZ lattice structure.

Key words: selective laser melting; medium entropy alloy; lattice structure; mechanical property

航空航天及轨道交通等领域的快速发展对结构材料的静态承载性能和吸能性能提出了更高要求。具备高比强度、比能量吸收值的新型轻量化结构材料,无论是在登陆器的缓冲支架,还是汽车的支撑吸能结构等关键部件的制造中,都有着越来越广泛的应用场景^[1-4]。金属点阵材料是由单元格在空间规则重复排列得到一种多孔轻质材料,具有良好的比强度、比刚度等特性,在航空航天、生物医药、汽车工业等领域的应用日益广泛^[5-9]。目前用于制备金属点阵结构的材料主要有 Ti6Al4V、AlMgSi、316L 不锈钢和 CuCrZr 等合金。Ti6Al4V 和 AlMgSi 制备的点阵结构强度高且密度小,但塑性较差,在较小变形量下即发生断裂或破碎,缓冲吸能阶段过短^[10-11]。316L 不锈钢和 CuCrZr 制备的点阵结构具有较好的变形协调能力和较长的缓冲吸能阶段,但强度较低,比吸收能量值也较小^[12-13]。因此,同时提升点阵结构的强度和塑性是提升其冲击吸能性能的关键。

中熵合金因其优异的综合力学性能为新型高性能点阵结构材料的开发提供了新方向^[14-16]。中熵合金具有强烈晶格畸变、多元固溶结构和变形诱导孪生(TWIP)等特性而兼具高强度和高塑性。例如,CoCrNi 中熵合金有较低的层错能、低的孪晶发动临界应力以及显著的 TWIP 效应,使其具有优异的室/低温拉伸性能和抗冲击性能^[17]。本团队采用 SLM 技术制备了 FeCrNi 中熵合金,其拉伸强度超过 1000 MPa,伸长率高于 30%,具有优异的强度与塑性组合。同时,由于过饱和固溶的高铬含量,FeCrNi 中熵合金具有极好的耐腐蚀性(腐蚀电流密度 $i_{\text{corr}}=0.06 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$,仅

为 316 不锈钢的五分之一)^[18],在海洋和化工等领域作为结构材料有重要应用前景。将点阵结构与高强韧中熵合金相结合,有望制备出比强度与比能量吸收性能更加优异的超材料,但是该方面的研究目前还十分缺乏。

本研究选用 FeCrNi 中熵合金作为基体,采用选区激光熔化方法制备具有 BCC, BCCZ, FCC, FCCZ 四种仿晶格结构的金属点阵结构材料,结合实验表征与有限元模拟方法对其显微组织、力学性能及变形行为进行了系统研究。旨在开发兼具高比强度和高比能量吸收值的中熵合金点阵材料,为承载-吸能一体化结构设计与材料制备提供理论参考。

1 实验材料与方法

1.1 点阵结构的制备

本研究选取了 BCC, FCC 系晶格点阵结构作为研究对象,此类结构具有制备方便、可靠性高、机械效率优越等优点,并已显示出优异的承载和吸能性能^[19-21]。基于先前报道的 SLM 点阵结构力学性能数据以及可制造性要求,最终确定点阵结构的晶格支柱直径为 0.3 mm,单胞边长 2 mm。使用三维建模软件 3D Metaworks 构建了四种不同点阵结构的模型,如图 1 所示。图 1(a)为体心立方结构(BCC);图 1(b)为体心立方 Z 轴加强结构(BCCZ);图 1(c)为面心立方结构(FCC);图 1(d)为面心立方 Z 轴加强结构(FCCZ)。在 ABAQUS 有限元仿真平台上对 FeCrNi 中熵合金点阵结构进行准静态压缩过程模拟分析。使用建模软件 Spaceclaim 构建仿真模型,生成 STP 格式文件并

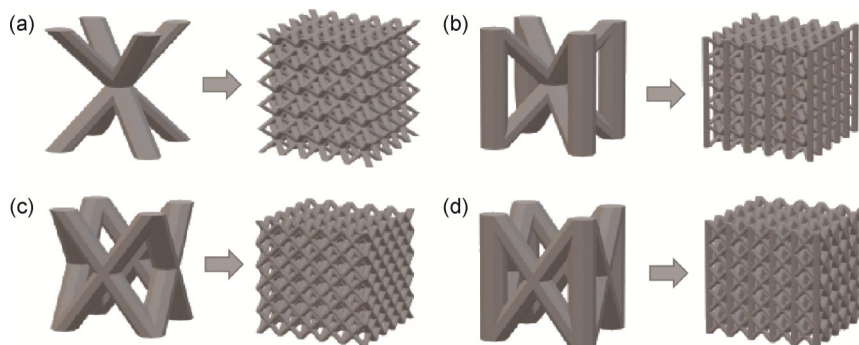


图 1 四种点阵结构模型及其单胞示意图 (a)BCC;(b)BCCZ;(c)FCC;(d)FCCZ

Fig. 1 Four lattice structure models and their units (a)BCC;(b)BCCZ;(c)FCC;(d)FCCZ

导入 ABAQUS 中。上下压头设置为刚体,压头与点阵结构间的摩擦因数设为 0.14,每个模型网格划分单元数均大于 30 万。

选用雾化法制备的 FeCrNi 中熵合金粉末为实验原料,其物性如图 2 所示。图 2(a)为 FeCrNi 中熵合金粉末的 SEM 图,粉末呈现球形或近球形,存在少量卫星粉。图 2(b)为粉末粒径分布曲线,粉末粒径分布集中,中位径(D_{50})为 60.3 μm 。图 2(c)中的粉末 XRD 图谱显示 FeCrNi 预合金粉末为单相的面心立方结构,五个衍射峰分别对应面心立方结构的 (111), (200), (220), (311) 和 (222) 晶面。分别

采用电感耦合等离子体质谱技术和仪器气体分析技术对粉末中的金属元素和非金属轻元素进行测量。FeCrNi 预合金粉末实际化学组成为 $\text{Fe}_{32.39}\text{Cr}_{35.12}\text{Ni}_{31.58}$ (体积分数/%),间隙氧和碳含量分别为 490×10^{-6} 和 720×10^{-6} 。在华曙高科的 FS121M 金属成形系统上进行样品制备。SLM 工艺参数为:激光光斑直径为 60 μm ,激光功率为 350 W,扫描速度为 700 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$,扫描间距为 110 μm ,层厚为 60 μm ,层间旋转 67°。成形过程通入氩气,氧含量降至 0.12% (体积分数)以下。样品在 400 $^{\circ}\text{C}$ 下去应力退火 3 h,随炉冷却。

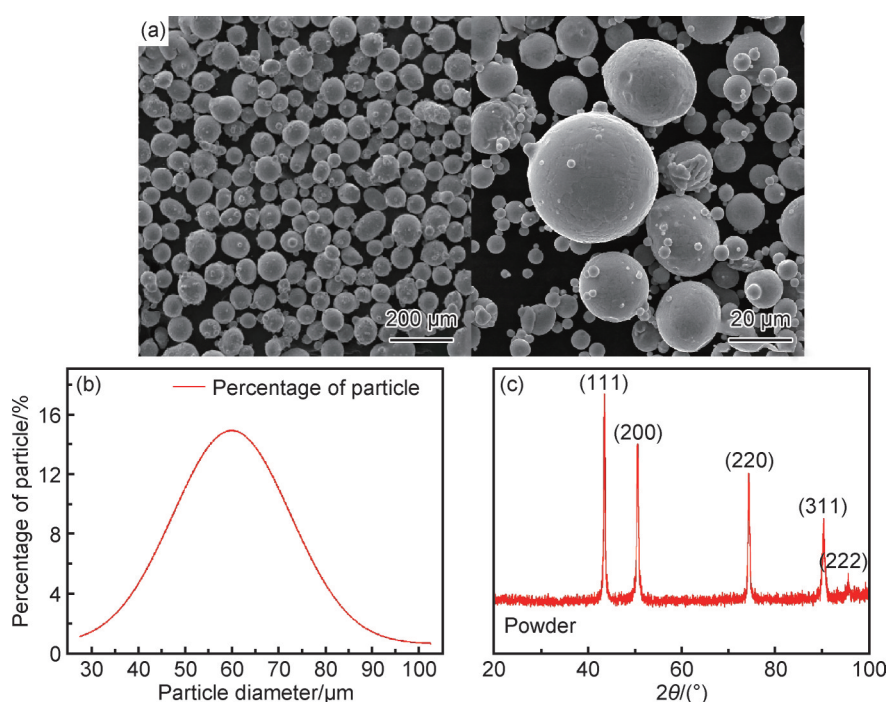


图 2 FeCrNi 中熵合金粉末物性

(a)预合金粉末 SEM 形貌图;(b)粉末粒径分布曲线;(c)粉末 XRD 图谱

Fig. 2 Physical properties of FeCrNi medium entropy alloy powder

(a)SEM morphology of pre alloy powder;(b)particle size distribution curve;(c)XRD pattern

1.2 实验方法

使用 TESCAN Mira 4 型扫描电子显微镜对不同试样压缩前后的表面状态以及微观组织进行观察。使用 INSTRON 8801 液压伺服试验机对不同结构的样品沿构建方向进行单轴压缩实验。实验温度为室温,压缩应变速率为 0.001 s^{-1} ,压缩量为 70%。

测定相对密度 ρ_{rel} 选用直接称重法,其计算公式如式(1)所示:

$$\rho_{\text{rel}} = m / (V \cdot \rho) \quad (1)$$

式中: V 为点阵结构外轮廓体积; m 为试样质量; ρ 为合金的密度,取为 $7.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

2 结果与分析

2.1 FeCrNi 点阵材料微观组织

图 3 所示为 SLM 成形四种点阵结构压缩前后的实物对照图,从左向右依次对应 BCC, BCCZ, FCC, FCCZ 点阵结构,各点阵结构均压缩到致密化阶段。图 4 为 BCC, BCCZ, FCC, FCCZ 样品压缩测试前后的表面 SEM 形貌图。从压缩前的表面 SEM 形貌图可以看出,样品的结构完整,节点之间良好搭接,成形质量较高;但结构轮廓的粗糙度较高,主要原因是一些局部熔化以及少量未熔化的粉末颗粒附着在支柱表面。从压缩测试后的表面 SEM 形貌图可以看出,在压缩实

验过程中,各个结构的样品均没有由于压力过大而导致开裂,变形较为均匀,没有出现明显的局部效应和支柱断裂痕迹,样品的结构基本保持完整。表明样品压缩协调变形能力优异,在较大应变量下仍能维持结构不发生严重的损坏。

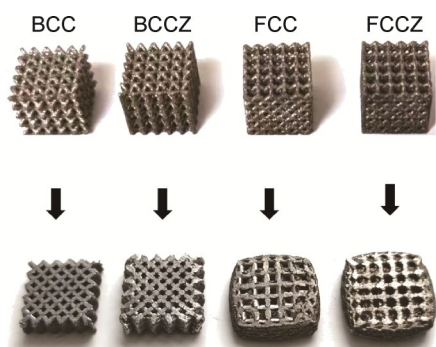


图3 四种点阵结构压缩前后的实物图

Fig. 3 Physical images of four lattice structures before and after compression

图5为FeCrNi中熵合金点阵结构的微观组织。图5(a-1)~(c-1)为在构建方向($X-Z$ 平面)的微观组织(白色虚线表示熔池边界),熔池呈现鱼鳞状交错堆叠,互相连接,重叠率高,宽度在 $100\ \mu\text{m}$ 左右。在激光烧结的过程中,金属粉末被熔化成半弧形熔池,且熔

融金属具有较好的流动性,保证了熔道间良好的搭接效果并促进熔池内部的温度和成分均匀分布,提高了熔池的稳定性和重叠率。熔池中心及顶部出现一定数量的等轴晶粒,在熔池边界存在沿温度梯度生长的柱状晶。由组织分析可知,相较于实心块体结构,虽然点阵结构试样的熔池边界沿最大温度梯度方向上仍然存在柱状晶的生长,但熔池中心部位的等轴晶明显增多。相较于柱状晶,等轴晶的各向力学性能相近,且更为细小,可以带来更高的强度和塑性。由凝固理论可知,晶粒形态由 G/R 决定,即温度梯度(G)除以凝固前沿的凝固速度(R)。当 G/R 较大时,倾向于生成柱状晶粒;当 G/R 较小时,倾向于生成等轴晶粒。点阵结构的切片面是非连续的,扫描时激光运动轨迹是非连续的,周围未加热的金属粉末会使凝固前沿的凝固速度显著提高,使 G/R 减小,有利于等轴晶粒的产生。同时,由于激光在点阵结构中扫描路径的不连续性,凝固前沿的凝固速率增大,有利于形成细小晶粒,产生细晶强化,进一步提高材料的强度和塑性。图5(a-2)~(c-2)为在垂直构建方向的微观组织,连续的激光熔化轨道对应于SLM工艺中的熔池。相邻列之间的角度与激光扫描的路径有关,激光扫描每层旋转 67° 。熔道边界的微观组织以胞状晶为主。

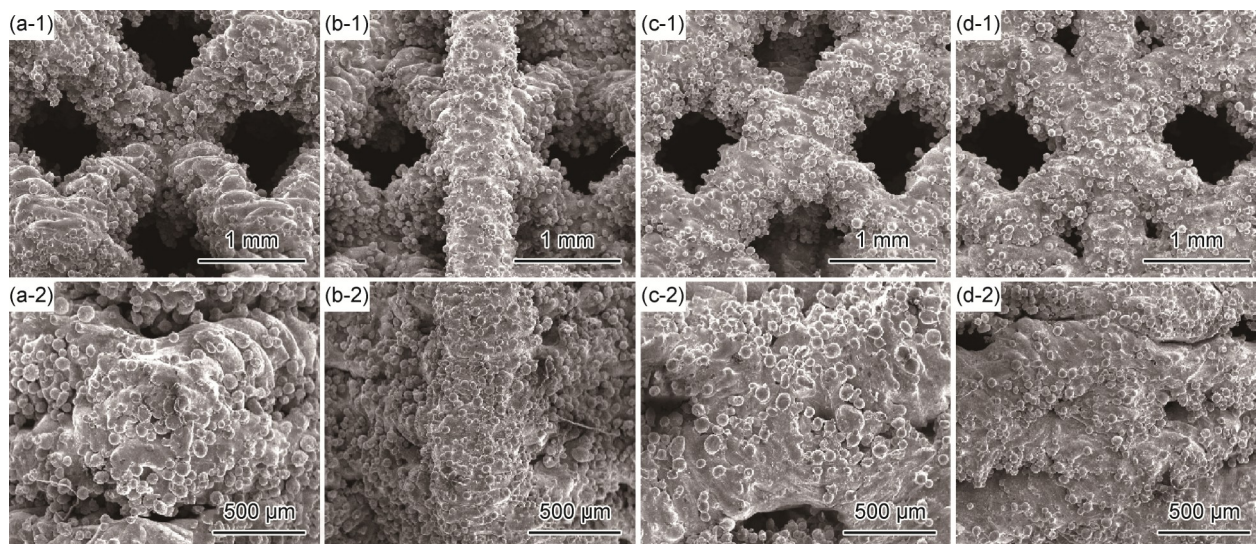


图4 压缩测试前(1)后(2)的点阵结构表面SEM形貌图

(a)BCC;(b)BCCZ;(c)FCC;(d)FCCZ

Fig. 4 SEM morphology of lattice structure surfaces before (1) and after (2) compression testing

(a)BCC;(b)BCCZ;(c)FCC;(d)FCCZ

2.2 不同点阵结构对压缩真应力-应变曲线的影响

SLM技术制备的四种不同点阵结构的FeCrNi中熵合金点阵结构材料的压缩真应力-真应变曲线如图

6所示。BCC,BCCZ,FCC,FCCZ点阵结构的压缩真应力-真应变曲线整体较为平滑且呈上升趋势。压缩过程大致可分为弹性变形、塑性变形和致密化三个阶段

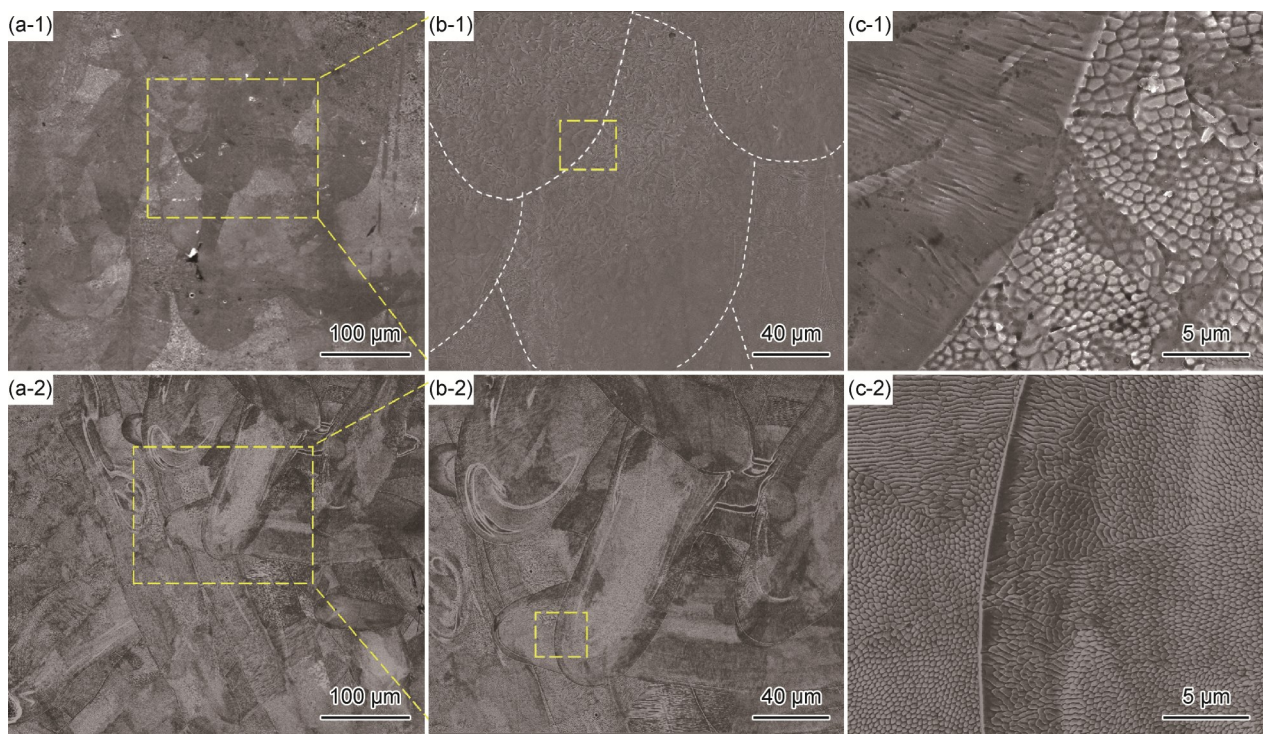


图 5 SLM 成形 FeCrNi 中熵合金点阵结构的微观组织
(a)熔池的显微照片;(b)熔道的放大图;(c)胞状晶 SEM 图;(1)在构建方向上;(2)在垂直构建方向上
Fig. 5 Microstructure of entropy alloy lattice structure in FeCrNi MEA formed by SLM
(a)micrograph of molten pool;(b)enlarged view of molten pool;(c)SEM image of cellular crystal;
(1)in direction of construction;(2)in direction of vertical construction

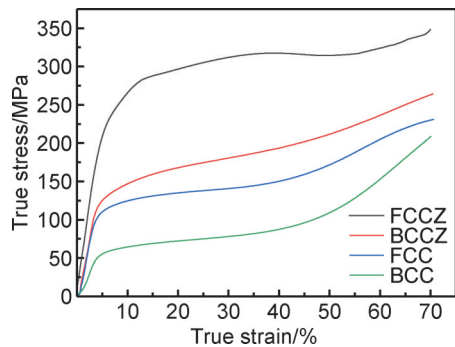


图 6 SLM 成形四种 FeCrNi 中熵合金点阵结构的
压缩真应力-真应变曲线
Fig. 6 Compression true stress-strain curves of four FeCrNi
medium-entropy alloy lattice structures formed by SLM

段。应变较小时(4%以内),压缩过程可以视为线弹性变形,应变随应力增加而线性增加,其斜率为点阵结构的弹性模量;随着应变增大(4%~55%),进入塑性变形阶段,应力缓慢上升呈平台状,此阶段的平均应力为点阵结构的平台应力,平台应力与其密度之比为比强度;当应变超过一定值后(大于55%),进入致密化阶段,此后类似于实体件的压缩,应力明显上升^[22]。四种点阵结构的准静态压缩性能如表 1 所示。BCC 和 FCC 点阵结构的相对密度大小接近(约为

表 1 四种点阵结构样品的准静态压缩性能				
Table 1 Quasi static compression properties of four lattice structure samples				
Type	Relative density/%	Elastic modulus/GPa	Plateau stress/MPa	Specific strength/(kN·m·kg ⁻¹)
BCC	35.0	1.7	80.7	29.3
BCCZ	40.7	3.5	143.3	44.9
FCC	35.9	3.2	184.6	65.5
FCCZ	39.5	3.9	302.1	97.4

35%),FCC 点阵结构的弹性模量和平台应力(3.2 GPa 和 184.6 MPa)显著高于 BCC 结构的屈服强度和模量(1.7 GPa 和 80.7 MPa)。FCC 结构的支柱长度长于 BCC 结构支柱长度且 FCC 结构支柱的倾斜角度大于 BCC 结构支柱的倾斜角度,致使 FCC 结构的支柱可以更大限度地提供支撑力。与没有 Z 轴支柱的相应点阵结构相比,添加 Z 轴支柱的 BCCZ 和 FCCZ 结构的相对密度增量较小,但强度和压缩模量显著提高。FCCZ 结构的相对密度仅为 FCC 结构相对密度的 1.14 倍,但 FCCZ 结构的平台应力(302.1 MPa)是 FCC 结构的平台应力的 1.65 倍。这是因为 BCC 和 FCC 结构通常表现出结点弯曲主导的力学响应,而含

有 Z 轴支柱的 BCCZ 和 FCCZ 结构则转变为轴向压缩主导结构的力学响应。

图 7 为四种点阵结构压缩应变与比能量吸收值曲线图。随着压缩应变量的增加,比能量吸收值总体呈单调递增趋势,根据能量吸收值增速的快慢分为 3 个阶段:(1)能量吸收值较小的初始阶段。此阶段能量吸收值增速缓慢,与真应力-真应变曲线的线弹性阶段相对应,因为此阶段的应力相对较低,且应变较小,所以构成的积分曲线面积较小,导致此阶段的能量吸收值较小;(2)能量吸收值均匀增加阶段。此阶段处于屈服平台时期,应力变化较小,所以比能量吸收值增速接近定值;(3)能量吸收值快速增加阶段。此阶段点阵结构开始致密化,应力随应变快速增大,此时积分曲线的面积增加变得较快。点阵结构在压缩过程中单位体积所吸收的能量等于压缩应力-应变曲线所包围的面积,其与密度的比为比能量吸收值,将达到 55% 的应变量作为塑性变形阶段结束的标志以计算样品的能量吸收值。各点阵结构单位体积吸收能量和比能量吸收值如表 2 所示。FeCrNi 中熵合金点阵结构显示出更好的延展性,允许其在达到致密化前充分有效地吸收能量。由于高弹性模量和平台应力,FCCZ 结构的单位体积能量吸收和比能量吸收值最高,分别为 $151.0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $49.8 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其次是

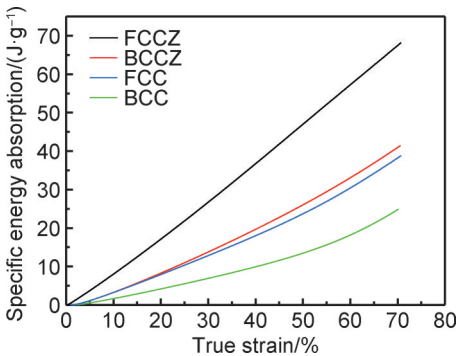


图 7 四种 FeCrNi 中熵合金点阵结构压缩比能量吸收值-真应变曲线图

Fig. 7 Specific energy absorption-true strain curves of four FeCrNi medium entropy alloy lattice structures

表 2 四种点阵结构的吸能性质

Table 2 Energy absorption properties of four lattice structures

Type	Energy absorption per unit volume/($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$)	Specific energy absorption/($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)
BCC	36.9	13.5
BCCZ	82.9	26.2
FCC	66.4	23.8
FCCZ	151.0	49.8

BCCZ 结构及 FCC 结构,BCC 结构的单位体积能量吸收和比能量吸收值最低。结果表明,Z 轴支柱的加入显著增加了点阵结构能量吸收能力,因为其可最大限度地提供支撑力且不会显著提高相对密度。FCCZ 结构优异的能量吸收性能赋予其更高的材料使用效率,适用于旨在最大化能量吸收的场景。

为降低相对密度对不同点阵结构材料的吸能性能的影响,选用比能量吸收值来比较 SLM 成形的不同 FeCrNi 中熵合金点阵结构和一些其他竞争点阵材料的吸能特性,如图 8 所示。在四种 FeCrNi 中熵合金点阵结构中,FCCZ 点阵结构的比能量吸收值最大,为 $49.8 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$,并且明显高于 Ti6Al4V 和 316L 不锈钢 FCCZ 点阵结构材料^[23-24]。因为在高速动态冲击过程中,Ti6Al4V 点阵结构材料协调变形能力差导致结构较早崩溃而停止吸能,316L 不锈钢点阵结构材料协调变形能力良好但强度较低,故两者比能量吸收值较低。

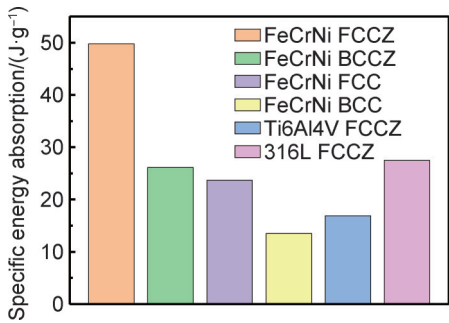


图 8 SLM 制造的不同点阵材料和一些其他竞争点阵材料的静态冲击比能量吸收值吸收

Fig. 8 Static impact specific energy absorption of four lattice materials manufactured by SLM and some other competing lattice materials

2.3 FeCrNi 点阵材料准静态压缩变形行为模拟

图 9 为 BCC,BCCZ,FCC 和 FCCZ 点阵结构在准静态压缩下,应变 ϵ 为 1%,25%,35% 和 50% 时有限元模拟应力云图。当 ϵ 为 1%,即变形刚发生时,BCC 点阵结构的应力集中发生在节点处,BCCZ 点阵结构的应力集中发生在竖直支柱以及倾斜支柱间的结点上,FCC 点阵结构的应力集中主要发生在倾斜支柱上,FCCZ 点阵结构的应力集中在竖直支柱和倾斜支柱上。当应力集中在结点上时,点阵结构的压缩过程以弯曲变形为主导;当应力集中在支柱上时,点阵结构的压缩过程以轴向压缩变形为主导。典型的结点弯曲主导的点阵结构通常表现出相对较低的强度和高度顺应性,压缩时的平台应力基本恒定。相反,典型的轴向压缩主导结构通常表现出高强度,塑性坍塌后出现循环性平台应力。但作为点阵结构基体材料

的 FeCrNi 中熵合金具有良好的塑性,致使点阵结构具有良好的协调变形能力,因此变形以轴向压缩主导的

FeCrNi 中熵合金 FCCZ 点阵结构呈现基本恒定的平台应力。

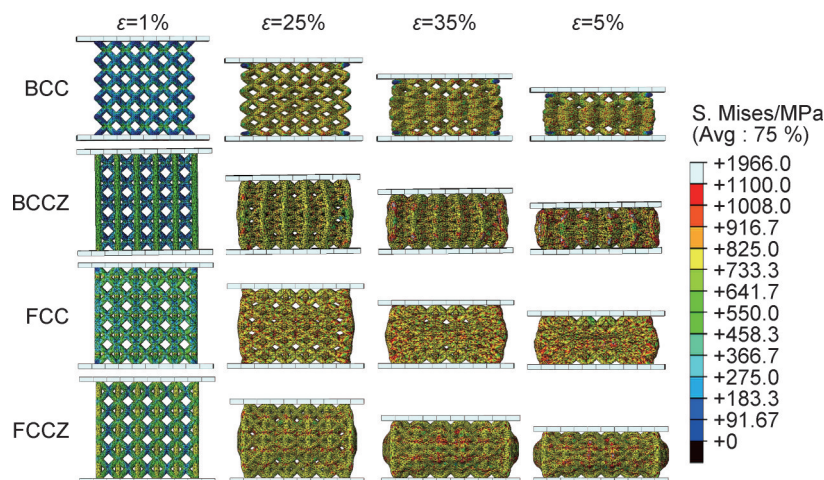


图 9 BCC,BCCZ,FCC 和 FCCZ 点阵结构准静态压缩下不同应变的有限元模拟应力云图

Fig. 9 Finite element simulation stress cloud plots of BCC,BCCZ,FCC,FCCZ lattice structures under quasi-static compression at different strains

图 10 比较了从准静态压缩实验测试和仿真模拟中获得的 BCC,BCCZ,FCC 和 FCCZ 点阵结构的应力-应变曲线。四种点阵结构的仿真模拟刚度始终大于实验所测的刚度,且 BCC 和 FCC 点阵结构的刚度偏差小于 BCCZ 和 FCCZ 点阵结构的刚度偏差。这一发现与先前比较点阵结构模拟和实验行为的研究一致。例如,Maconachie 等^[25]的研究表明,对于响应高

度依赖于方向的点阵结构,例如当包括面向构建方向的支柱(Z轴支柱)时,模拟和实验曲线之间存在更大的误差,因为这些结构对加载方向的变化非常敏感。而四种点阵结构仿真模拟所得的平台应力和压缩实验塑性变形阶段的平台应力吻合良好,且实验时四种点阵结构进入致密化阶段均快于仿真模拟,因为实际样品会因激光精度不足、粉末粘连、未全致密等因素

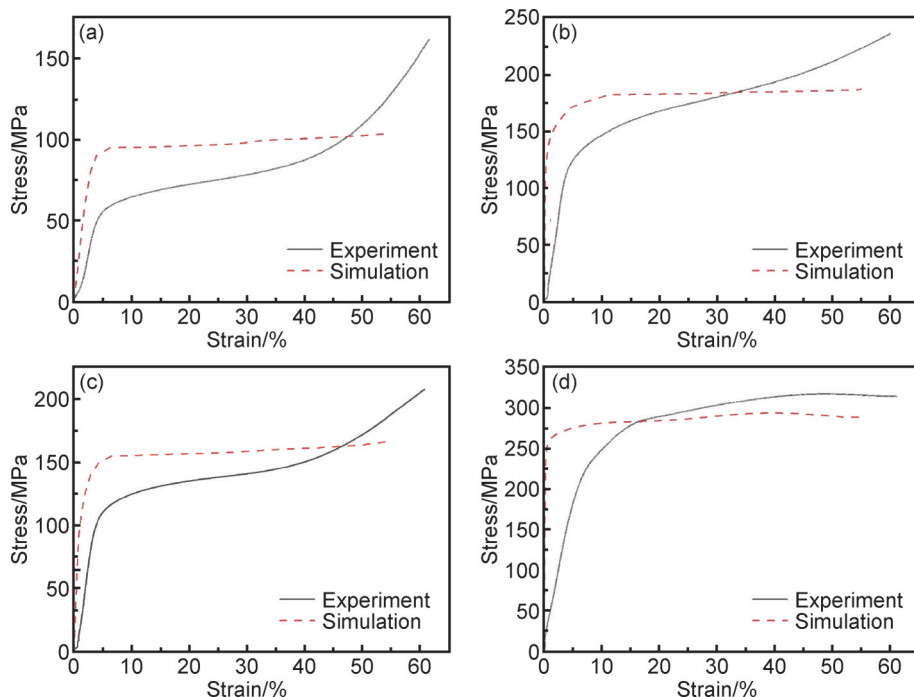


图 10 准静态压缩测试和仿真模拟的点阵结构的应力-应变曲线对比图

(a)BCC;(b)BCCZ;(c)FCC;(d)FCCZ

Fig. 10 Comparison diagram of stress-strain curve of lattice structure by quasi-static compression test and simulation

(a)BCC;(b)BCCZ;(c)FCC;(d)FCCZ

使支柱直径略大于仿真模拟结构,支柱压缩后更快接触因此应力快速提高。综上所述,采用Abaqus软件进行仿真模拟所得的应力-应变曲线虽然无法完全与实验所得的应力-应变曲线完美匹配,尤其是对刚度的预测存在较大误差,但仿真模拟所得到的不同应变下的应力云图、变形行为以及塑性变形阶段的平台应力与实验所得信息匹配良好。同时,有限元仿真模拟可作为一种有效的预测不同点阵结构变形模式以及应力大致区间的方法,用于实验前期点阵结构的设计与调控。

3 结论

(1)采用SLM方法制备的FeCrNi中熵合金点阵结构整体节点搭接良好,成形质量高,熔池交错堆叠致密。激光在点阵结构中扫描路径的不连续性使得固液界面前沿的凝固速率大,促进晶粒细化,使材料具备了更高的强度和塑性。

(2)相对密度在35%~40%范围时,BCC,BCCZ,FCC和FCCZ点阵结构的比强度和比能量吸收值依次升高。FCCZ点阵结构的FeCrNi中熵合金材料比能量吸收值达到 $49.8 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于Ti6Al4V及316L不锈钢点阵材料。

(3)FeCrNi中熵合金点阵结构材料变形过程包括弹性变形、塑性变形和致密化三个阶段。FCCZ和BCCZ结构相较于FCC,BCC结构具有更高的强度和模量,其主要原因是Z型支柱的增加导致变形行为由结点弯曲主导向轴向压缩主导转变,使点阵材料的表观强度和刚度显著提高。

参考文献

- [1] PARK S J, LEE J H, YANG J, et al. Lightweight injection mold using additively manufactured Ti-6Al-4V lattice structures [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 759-766.
- [2] ZINKLE S J, GHONIEM N M. Prospects for accelerated development of high performance structural materials [J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 417(1/3): 2-8.
- [3] LI H, LIU R, WANG H, et al. Ant-inspired bionic design method for the support structure of the fengyun-3 satellite payload infilled with lattice structure [J]. Materials, 2023, 16(2): 736.
- [4] SONG S, WU G, ZHANG W. Lightweight of UAV based on the lattice structure characterized by additive manufacturing [J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(6): 25-29.
- [5] MORA S, PUGNO N M, MISSERONI D. 3D printed architected lattice structures by material jetting [J]. Materials Today, 2022, 59: 107-132.
- [6] YAN C, HAO L, HUSSEIN A, et al. Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated *via* direct metal laser sintering [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(4): 856-864.
- [7] DANTAS A C S, SCALABRIN D H, De FARIAS R, et al. Design of highly porous hydroxyapatite scaffolds by conversion of 3D printed gypsum structures-a comparison study [J]. Procedia CIRP, 2016, 49: 55-60.
- [8] TYAGI S A. Additive manufacturing of titanium-based lattice structures for medical applications-a review [J]. Bioprinting, 2023, 30: e00267.
- [9] OZDEMIR Z, HERNANDEZ-NAVA E, TYAS A, et al. Energy absorption in lattice structures in dynamics: experiments [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 89: 49-61.
- [10] YANG X, MA W J, GU W P, et al. Multi-scale microstructure high-strength titanium alloy lattice structure manufactured *via* selective laser melting [J]. RSC Advances, 2021, 11(37): 22734-22743.
- [11] LI Z H, NIE Y F, LIU B, et al. Mechanical properties of AlSi10Mg lattice structures fabricated by selective laser melting [J]. Materials & Design, 2020, 192: 108709.
- [12] LEE J M, LEE J E, KIM J H, et al. Compressive behavior of 316L stainless steel lattice structures fabricated by selective laser melting [J]. Korean Journal of Metals and Materials, 2020, 58(4): 227-233.
- [13] MA Z, ZHANG D Z, LIU F, et al. Lattice structures of Cu-Cr-Zr copper alloy by selective laser melting: microstructures, mechanical properties and energy absorption [J]. Materials & Design, 2020, 187: 108406.
- [14] BAE J W, KIM H S. Towards ferrous medium-entropy alloys with low-cost and high-performance [J]. Scripta Materialia, 2020, 186: 169-173.
- [15] GALI A, GEORGE E P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys [J]. Intermetallics, 2013, 39: 74-78.
- [16] 胡朝辉, 姜照坤, 王鑫, 等. Fe₄₀Cr₂₅Ni₂₅Al₅Ti₅中熵合金的微观组织和力学性能 [J]. 材料工程, 2023, 51(6): 93-100.
- [17] HU Z H, LOU Z K, WANG X, et al. Microstructure and mechanical properties of Fe₄₀Cr₂₅Ni₂₅Al₅Ti₅ medium entropy alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(6): 93-100.
- [18] LAPLANCHE G, KOSTKA A, REINHART C, et al. Reasons for the superior mechanical properties of medium-entropy Cr-CoNi compared to high-entropy CrMnFeCoNi [J]. Acta Materialia, 2017, 128: 292-303.
- [19] DUAN H, LIU B, FU A, et al. Segregation enabled outstanding combination of mechanical and corrosion properties in a Fe-CrNi medium entropy alloy manufactured by selective laser melting [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 99: 207-214.
- [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.
- [21] AN Q, DONG F, LUO T, et al. Influence of bracing on the mechanical properties of Ti6Al4V lattice structures [J]. Journal of

- Alloys and Compounds, 2023, 937: 168354.
- [21] 吴伟, 张辉, 曹美文, 等. 仿生 BCC 结构的准静态压缩数值模拟及吸能性[J]. 高压物理学报, 2020, 34(6): 28-35.
WU W, ZHANG H, CAO M W, et al. Numerical simulation of quasi-static compression and energy absorption of bionic BCC structure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(6): 28-35.
- [22] WANG Z, ZHAO Z, LIU B, et al. Compression properties of porous Inconel 718 alloy formed by selective laser melting [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2021, 4(4): 1309-1321.
- [23] CHANG C, WU W, ZHANG H, et al. Mechanical characteristics of superimposed 316L lattice structures under static and dynamic loading [J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(7): 2001536.
- [24] MERKT S, HINKE C, BUELTMANN J, et al. Mechanical response of TiAl6V4 lattice structures manufactured by selective laser melting in quasistatic and dynamic compression tests [J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27: S17006.
- [25] MACONACHIE T, LEARY M, TRAN P, et al. The effect of topology on the quasi-static and dynamic behaviour of SLM AlSi10Mg lattice structures [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(11/12): 4085-4104.
-
- 基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52020105013);湖北省自然科学基金资助项目(2022CFB894)
- 收稿日期:**2023-08-03;**修订日期:**2023-09-20
- 通讯作者:**刘彬(1980—),男,教授,博士,研究方向为高熵合金,联系地址:湖南长沙中南大学主校区粉末冶金研究院(410083),E-mail: binliu@csu.edu.cn;秦冬阳(1983—),男,副研究员,博士,研究方向为冲击载荷下钛合金的力学行为,联系地址:陕西西安西北工业大学航空学院(710072),E-mail: qindongyang19831205@nwpu.edu.cn
- (本文责编:解 宏)