

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5147

热处理对激光增材制造非等原子 FeNiCoAlTaB 高熵合金组织性能影响

孙沁瑶^{1,2}, 杜大帆^{1,2}, 彭望君^{1,2}, 何林^{1,2}, 董安平^{1,2}, 赵凯³

(1. 上海交通大学 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240 2. 上海交通大学 金属基复合材料全国重点实验室, 上海 200240 3. 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

摘要:非等原子比 FeNiCoAlTaB 高熵合金(NCATB)因其独特的元素组成展现出良好的工程应用潜力,然而传统加工工艺产生的元素偏析和晶界 NiAl 相会损害其强度性能。因此,采用激光粉末床熔融(laser powder bed fusion, LPBF)技术结合低温时效处理,制备兼具强度和塑性的 NCATB 高熵合金,并系统研究了工艺参数对合金致密度、微观组织、应力状态及力学性能的影响规律。结果表明,适当的激光功率与扫描速度组合可有效减少成形缺陷并提高致密度;快速凝固引入大量位错结构,形成明显的织构与细化组织。通过热处理可促进 γ' 与 B2 析出相的形成,协同晶界演化,有效提升材料强度。研究表明,增材制造结合热处理工艺可实现 NCATB 合金的强塑协同调控,展现出优异的综合力学性能与良好的工程应用潜力。

关键词:高熵合金;激光粉末床熔融;低温时效;微观组织演化;力学性能

中图分类号: TG139

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)08-0765-09

Heat Treatment Effects on Microstructure and Mechanical Properties of Non-equiatomic FeNiCoAlTaB High Entropy Alloy Fabricated by Additive Manufacturing

SUN Qinyao^{1,2}, DU Dafan^{1,2}, PENG Wangjun^{1,2}, HE Lin^{1,2}, DONG Anping^{1,2}, ZHAO Kai³

(1. Shanghai Key Lab of Advanced High-temperature Materials, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Precision Forming and State Key Lab of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing General Factory Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: Non-equiatomic FeNiCoAlTaB high-entropy alloys (NCATBs) exhibit promising engineering application potential due to their unique elemental composition. However, the element segregation and NiAl phase alone at the grain boundary generated by traditional processing techniques can compromise the strength properties of the material. On this basis, a non-equiatomic FeNiCoAlTaB high-entropy alloy (NCATB-HEA) with a balance of strength and ductility was fabricated via laser powder bed fusion (LPBF), followed by a 600 °C low-temperature aging treatment. The effects of processing parameters on the densification, microstructure, residual stress, and mechanical properties of the alloy were systematically investigated. The results show that a proper combination of laser power and scan speed significantly reduces the number of defects and improves the density. Rapid solidification introduces a high density of dislocations and refines the grain structure with an evident texture. Heat treatment promotes the formation of γ' and B2 precipitates, which synergistically evolve with grain boundaries to increase the alloy strength. This work demonstrates that the integration of additive manufacturing and heat treatment enables the coordinated strengthening and toughening of NCATB alloys, offering promising mechanical performance and engineering potential.

Key words: high-entropy alloy; laser powder bed fusion; low-temperature aging; microstructural evolution; mechanical properties

收稿日期: 2025-07-10

基金项目: 上海市自然科学基金面上项目(23ZR148800); 国家自然科学基金(52474416); 航天八院-上海交大联合基金(USCAST2022-25)

作者简介: 孙沁瑶, 1998 年生, 博士生. 研究方向为金属增材制造精密成型. Email: MSEQYSun@sjtu.edu.cn

通信作者: 杜大帆, 1987 年生, 副教授, 博导. 研究方向为高温合金精密成型. Email: dafand@sjtu.edu.cn

董安平, 1977 年生, 研究员, 博导. 研究方向为高温合金精密成型. Email: apdong@sjtu.edu.cn

引用格式: 孙沁瑶, 杜大帆, 彭望君, 何林, 董安平, 赵凯. 热处理对激光增材制造非等原子 FeNiCoAlTaB 高熵合金组织性能影响[J]. 铸造技术, 2025, 46(8): 765-773.

SUN Q Y, DU D F, PENG W J, HE L, DONG A P, ZHAO K. Heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of Non-equiatomic FeNiCoAlTaB high entropy alloy fabricated by additive manufacturing[J]. Foundry Technology, 2025, 46(8): 765-773.

工业生产需求推动新材料研究的发展,而新兴工艺又进一步促进新材料展现出不同的组织性能。相较于以单一元素或化合物为基础的传统合金,高熵合金由于独特的原子构成更容易形成简单晶体结构,可以有效避免脆性金属间化合物的形成,并且在成分设计上更加灵活^[1-2]。其中 FeCoNi 基高熵合金通常以 Fe、Co、Ni、Al 等为主要元素,基于高熵效应和晶格畸变效应,理论上可以实现保持高强度的同时兼具良好的韧性,因此作为一种有望突破传统高温合金性能的新型合金体系引发广泛关注^[3-4]。Fe-Ni-Co-Al-Ta-B 体系高熵合金(NCATB)是由 Tanaka 等^[5]于 2010 年设计的非等原子高熵合金,表现出极大的超弹性变形量和阻尼效应。后续研究通过组织和析出相调控进一步实现了该合金高强度与高塑性的协同提升^[6-7]。Fu 等^[7]通过定向凝固技术控制晶粒取向,并通过固溶时效处理改变析出物的形貌和分布。随后,Zhang 等^[8]首次在 NCATB 合金中引入了异质结构,以增强应变硬化能力,克服强塑性矛盾关系。然而,定向凝固^[5]和轧制再结晶^[9]会产生难以消除的钽偏析,还会沿晶界形成粗大的 β -NiAl (B2)相,脆性相的存在限制了合金的工业化应用^[10]。因此,如何制备可控显微结构和力学性能的 NCATB 高熵合金仍是一个值得探讨的课题。

近年来,增材制造技术的发展为高熵合金零件的制备提供了全新思路,激光/电子束作用引起的快速凝固有助于元素扩散,防止金属间化合物的形成,因此有利于组织细化和元素的均匀分布^[11-14]。已有研究表明,增材制造技术已广泛应用于 FeCoNi 基高熵合金^[15-16],其所形成的独特微观组织被证实有助于提升合金的力学性能,这不仅得益于快速凝固引入的细小晶粒,还包括熔池热循环约束引入的热变形在打印样品中产生的大量位错^[17]。但能否通过增材制造技术克服 NCATB 高熵合金传统制造工艺中的不利因素尚待研究。

对于面心立方结构(face-centered cubic, FCC)的 FeCoNi 系高熵合金,增材制造虽可引入晶界与位错强化,但其强度仍难以满足高性能应用需求。近年来,研究者多采用低温时效热处理以析出 L_{12} 和 L_{21} 有序相,进一步提升材料的力学性能,这在 $Al_3CoCrFeNi$ ^[18]和 $(FeCoNi)_{86}Al_7Ti_7$ ^[19]高熵合金中都有应用。与两种合金类似,NCATB 合金元素组成中的 Al、Ta 元素偏向于形成 $\gamma'-(Ni, Fe, Co)_3(Al, Ta)$ 析出相,有望提高合金强度。本文采用激光粉末熔融技术(laser powder bed fusion, LPBF)制备 NCATB 高熵合金,并研究其缺陷产生的原因,引入一种低温时效

后热处理的方法促进析出相的形成,进一步提高合金强度。分析微观组织与力学性能的相关性,为该类专业高熵合金在工程结构应用中提供有效的制备路径和理论支撑。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料制备

以 Fe(纯度 99.9%)、Co(纯度 99.9%)、Ni(纯度 99.9%)、Al(纯度 99.7%)、Ta(纯度 99.9%) 和 FeB (20%B,质量分数)为原料在氩气气氛下电弧熔炼合金锭,利用等离子体旋转电极法(plasma rotating electrode process, PREP)制备 NCATB 高熵合金预合金粉末(图 1b)。各元素质量分数分别为 16.75%Co、28.37%Ni、4.08%Al、4.02%Ta 和 0.006 2%B,余量为 Fe;控制球形粉末直径在 53~100 μm ,整体形貌及球形度分布统计如图 1b 和 c 所示。采用 TRUMPF TruPrint 1000 型激光粉末床熔合 3D 打印机(图 1a)构建尺寸为 6 mm×6 mm×10 mm 的长方体 NCATB 试样块,激光直径 30 μm 。样品的制备在保证其他条件不变的情况下只改变激光功率和扫描速度,制备样品所用参数见表 1。利用下式计算体积能量密度(volumetric energy density, VED)(J/mm³):

$$VED = P / vht \quad (1)$$

式中, P 为激光功率; v 为扫描速度; h 为舱口间距; t 为层厚。为了保持粉末的可用性,在打印实验前将粉末置于 200 $^{\circ}C$ 的干燥箱中干燥 8 h。利用差示扫描量热仪(differential scanning calorimetry, DSC)测试,发现打印态样品在升温过程中约 458.6 $^{\circ}C$ 处出现吸热峰(图 2),表明该温度对应析出相的形成起始温度,因此本研究在 458.6~785.4 $^{\circ}C$ 温度区间内选取 600 $^{\circ}C$ 作为时效温度,以有效促进析出反应并提升合金力学性能。打印态样品分别在 600 $^{\circ}C$ 下低温时效 0、5、

表 1 LPBF 制备 NCATB 高熵合金参数
Tab.1 The parameters of NCATB HEA fabrication via LPBF

Layer thickness / μm	Hatch space / μm	Layer rotation / $(^{\circ})$	Laser power /W	Scan speed / $(mm \cdot s^{-1})$	VED / $(J \cdot mm^{-3})$
20	90	90	100	600	92.59
				700	111.11
				800	138.89
				600	79.37
			120	700	95.24
				800	119.05
				600	69.44
				700	83.33
				800	104.17

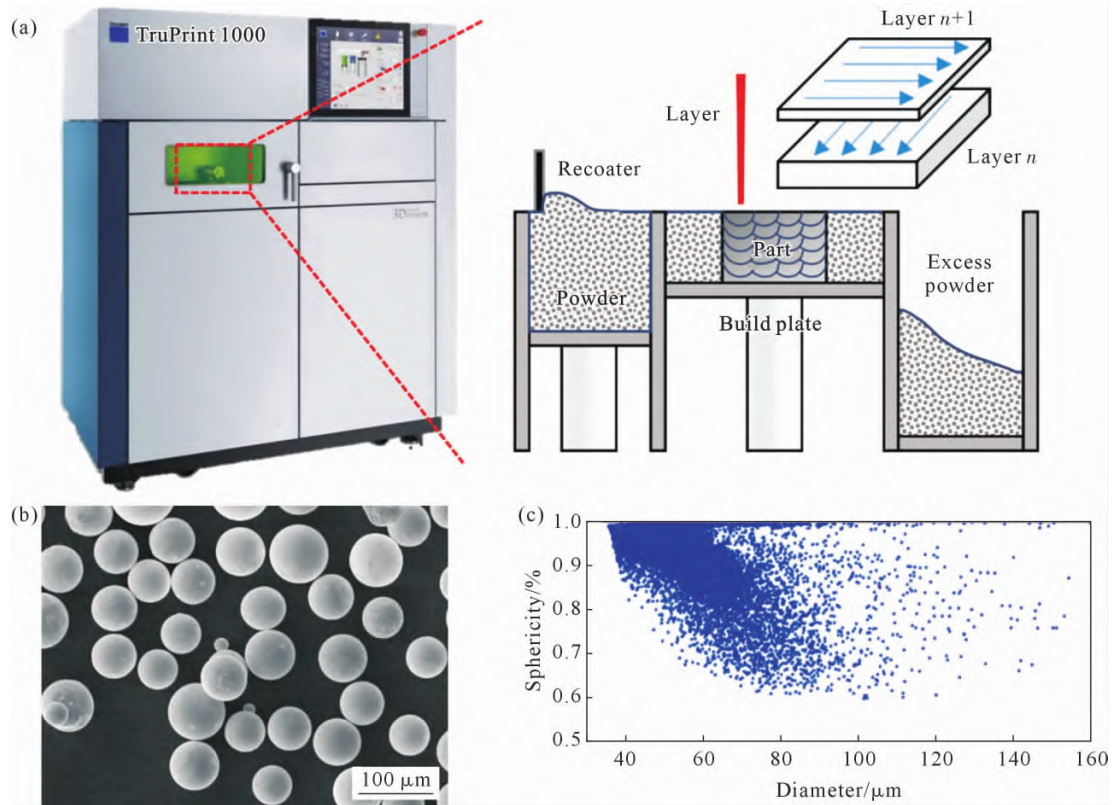


图1 激光增材制造设备及粉末表征:(a) 激光粉末床熔融 3D 打印设备及示意图;(b, c) NCATB 高熵合金粉末整体形貌及球形度分布

Fig.1 Equipment for LPBF and powder characterization: (a) LPBF 3D printing equipment and its schematic illustration; (b, c) SEM image and sphericity distribution of NCATB high-entropy alloy powders

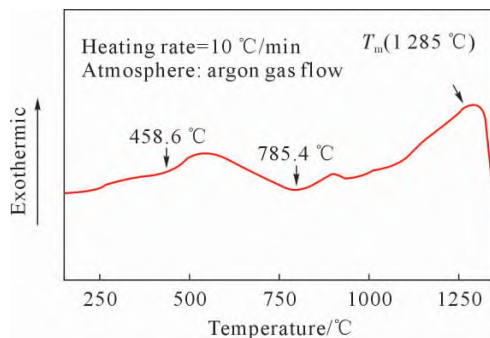


图2 打印态样品 DSC 测试升温曲线

Fig.2 DSC heating curve of the as-printed sample

10、24 h 后观察组织并测试力学性能, 热处理过程保持氩气气氛保护。

1.2 组织分析与性能测试

将 LPBF 制备的合金试样切割后机械磨抛至 2 400 目, 用 0.05 μm SiO_2 抛光液抛光表面后用于后续的组织分析。采用 D8 DaVinci 型 X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD) 对打印后试样进行物相分析, 对于 5% 硝酸溶液 (体积分数) 腐蚀后的样品截面, 利用 TESCAN MIRA3 型扫描电镜的二次电子成像 (secondary electron, SE) 模式观察显微组织, 以其搭配的背散射电子衍射 (electron backscatter diffraction, EBSD) 探头分析晶体信息。为进一步确定热处理工艺, 利用 DSC 对切割成 $\phi 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$

圆柱体试样进行热分析。室温拉伸试验在 Instron 5565 型电子万能试验机上进行, 选择垂直于打印方向平面的打印样, 应变率为 1 mm/min, 对每种试样重复进行 3 次拉伸试验, 并通过扫描电镜观察拉伸断口的显微组织。

2 实验结果及讨论

2.1 增材制造 NCATB 合金工艺参数筛选

图 3 展示了不同打印工艺下样品内部缺陷随激光能量密度输入的变化。在激光功率恒定条件下, 随着扫描速度增加, 样品的相对致密度显著提升, 当功率为 120 W 时可获得最高致密度, 显示出激光功率与扫描速度之间的协同作用, 有助于改善合金致密化程度。而当能量密度过低或过高时, 样品中仍会出现不同类型和数量的缺陷。缺陷的类型包括由 Keyhole 效应引起的孔洞, 以及由熔池边界处挥发性元素蒸发引起的气孔和未熔合缺陷。低功率时, 由于能量不足, 熔池无法完全熔化粉末层, 导致熔化轨迹不均, 形成不规则孔洞; 而高功率时可能因飞溅效应导致致密度下降。随着扫描速度升高, 由低熔点元素气化和飞溅引起的孔隙逐渐减少, 而 Keyhole 引起的孔洞趋于球形化和尺寸减小, 与已有研究结果一致^[20]。因此, 合理优化激光功率与扫描速度等关键

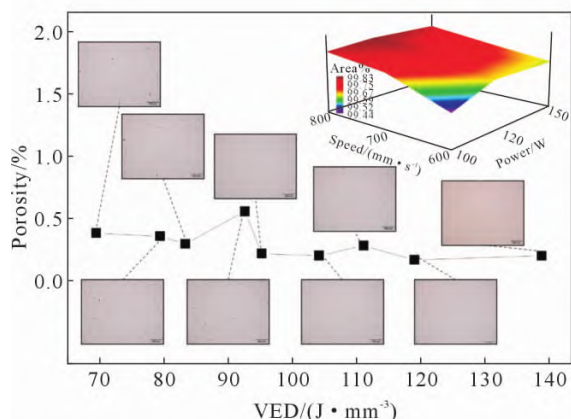


图3 不同打印工艺下样品内部缺陷随激光能量密度输入的变化

Fig.3 Variation in the number of internal defects with increasing laser energy density under different printing parameters

工艺参数是获得高致密、高质量打印件的关键。

利用 EBSD 系统分析不同打印参数对合金微

观组织演化的影响规律。研究表明,打印过程中激光功率与扫描速度等工艺参数对组织形貌、晶粒尺寸及分布均具有显著调控作用,如图4所示。缺陷会在晶粒生长过程中形成界面,改变晶粒取向。而对于高致密度的样品,在较低的能量输入密度下,由于形核点的增多和晶粒的竞争生长,晶粒形状变得不规则,织构强度降低。在 LPBF 过程中,工艺参数对熔池的形貌演变与凝固行为起到关键调控作用,从而影响最终晶体结构的形成。根据不同加工参数下的反极图(inverse pole figure, IPF)结果显示,晶粒形貌随工艺变化而改变,当激光功率降低或扫描速度提高时,晶粒形状趋于不规则,织构强度也随之减弱,该现象与 Gokcekaya 等^[21]的研究结果一致。进一步研究表明,提高激光功率或降低扫描速度有利于形成尺寸较大的柱状晶粒,并增强材料的织构特征,该趋势在不锈钢的 LPBF 成形中亦有体现^[22]。相反,当能量

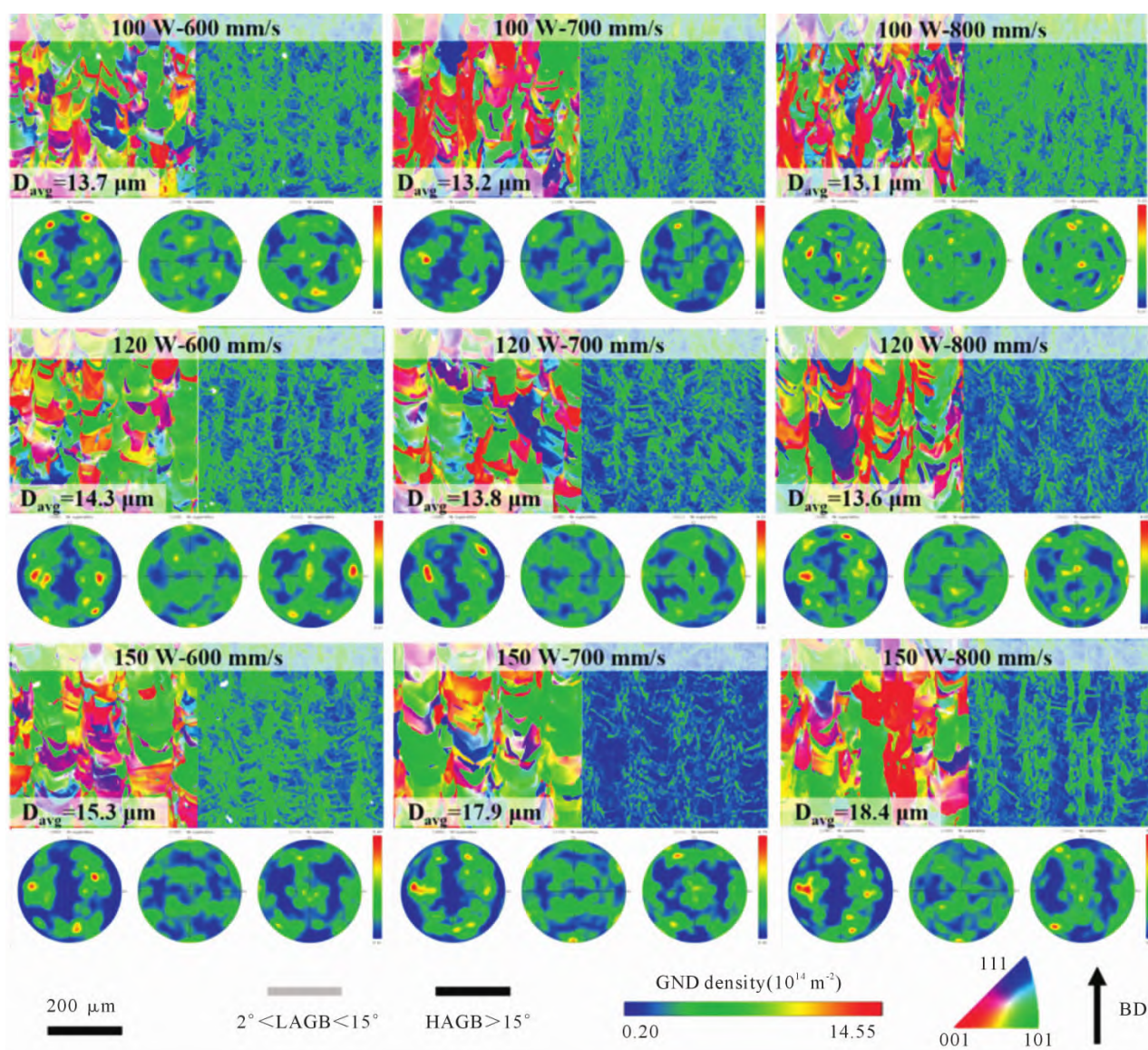


图4 EBSD 分析不同打印参数对合金微观组织演化的影响

Fig.4 EBSD characterization of microstructural evolution in the alloy under different scan parameters

密度降低(即激光功率降低或扫描速度升高)时,容易形成弱织构结构,主要源于形核位点的增多和晶粒之间的竞争生长^[23]。

受快速凝固和热循环的影响,LPBF 材料内部会积累较大的热应力,易导致裂纹的形成。几何必需位错密度(geometrically necessary dislocation density, GND) 可作为残余位错密度的定性评估指标, GND 值较高区域通常代表较强的应变集中和高缺陷密度^[24]。在周期性热循环过程中,由热膨胀与收缩引发的大量位错会缠结形成位错胞,并逐步演变为亚晶界,最终转化为高角度晶界。结果表明,低角度晶界比例越高或缺陷越集中, GND 值越大,局部应力越容易集中并诱发微裂纹萌生。较高的激光能量输入通常对应更快的冷却速率,从而导致更高的位错密度,进一步提高应力集中趋势。尽管位错胞在一定程度上具有强化效应,但从成分分析角度来看, NCATB 合金本身属于易裂纹材料,高位错密度将加剧裂纹形成的风险,成为负载状态下的裂纹源。因此针对 NCATB 高熵合金最适工艺参数为功率 120 W、扫描速度 800 mm/s。

2.2 时效处理对增材制造 NCATB 合金组织的影响

为探究不同时长的高温时效热处理对 NCATB 合金微观组织的影响,采用 XRD 对热处理后的相组成进行分析。已有研究表明,在 600 °C 时效处理后, FCC 基体中会析出 γ' 相及有序 B2 相 NiAl(β)^[25]。从 XRD 衍射图谱(图 5)中可观察到 FCC 与体心立方结构(body-centered cubic, BCC)相对应的衍射峰,分别对应 γ/γ' 相和 NiAl(β)相^[26]。其中 γ' 相因与基体晶格一致,仅可通过透射电镜(transmission electron microscopy, TEM)区分。 γ' 与 β 相的尺寸及体积分数随时效时间增长而变化,在 40°~47°的衍射角区间内可观察到 β 相的衍射峰强度明显增强。

进一步借助 TEM 和电子通道衍射(transmission kikuchi diffraction, TKD) 技术分析打印态样品和时效 24 h 后样品内的相组成,结果如图 6 所示。衍射斑点结果表明, γ' 相主要在时效后弥散分布在晶粒内部,是高 Ni/Al 比例 FCC 高熵合金中的典型析出相^[27]。同时在时效过程中,快速凝固引入的位错在热激活下逐渐发生位错滑移、交互,降低晶体内的应变能,导致位错密度降低,即发生位错回复现象。TKD 分析进一步表明,纳米级 B2 相于高角度晶界(high-angle grain boundaries, HAGBs)处析出。同时,晶粒在热力学驱动力的作用下发生晶粒并吞和晶界迁移来降低系统总能,表现为晶粒尺寸的增加。大角度晶界由于晶格取向突变、原子堆积错配严

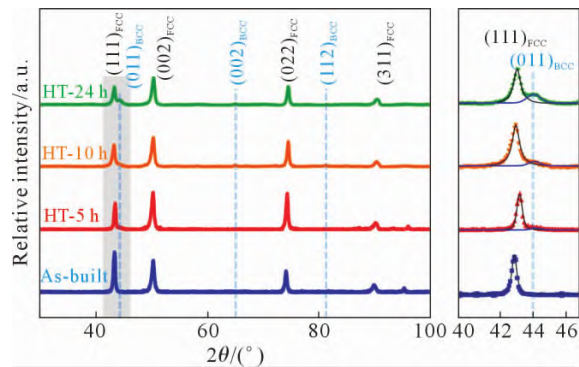


图 5 打印态 NCATB 高熵合金不同时效时间后的 XRD 谱
Fig.5 XRD patterns of the as-printed NCATB high-entropy alloy after different aging durations

重,具有较高的界面能与扩散速率,这为第二相(如 β 相)的形核提供了优先位置和较低的能垒,成为析出相的有利形核位点。因此低温时效热处理的引入使小角度晶界演变为大角度晶界的比例增加^[10],体系中高能界面数量上升,从而为析出相提供了更多的形核平台,导致析出相数量进一步增加。此外,析出相的形成反过来可能抑制某些晶界迁移行为^[28],有助于稳定部分大角度晶界的结构形态,表现为微观组织的共同演化。因此,大角度晶界比例的提升与析出相数量的增加在热处理过程中呈现协同演化关系。

2.3 时效处理对增材制造 NCATB 合金力学性能影响

分别对铸态、打印态、热处理态合金进行室温拉伸试验,结果如图 7a 所示。相较于铸态样品,增材制造有效提高了 NCATB 高熵合金的强度与塑性,而后续在 600 °C 条件下的时效热处理会牺牲一部分塑性但强度得到进一步提高。与同样条件下时效后粗晶合金 Fe-28.5Ni-17.5Co-11.5Al-2.5Ta-0.05B(原子分数,%)相比^[10],尽管 NCATB 合金中 Ta 含量仅为其 1/2,但仍表现出更高的强度和良好的延展性。随着时效时间的增加,合金强度不断增强,在 10 h 时效时有明显上升,而进一步延长保温时间会导致塑性迅速下降,并且对强度提升有限。图 7b 统计了已有报道中 LPBF 成型 FeCoNi 基高熵合金的力学性能,结果显示 LPBF 制备的 NCATB 高熵合金表现出相对优异的综合性能。

结合前期对热处理前后微观组织的分析,相比于铸态样品,LPBF 制备的 NCATB 高熵合金屈服强度和延展性的提升,应归因于快速凝固所引发的晶粒细化、细胞状组织的形成及高密度位错结构的引入,从而显著增强了晶界强化与位错强化效应。而 600 °C 下进行时效处理,可在保持单一 FCC 基体的前提下析出 $L1_2$ 型 γ' 相与 B2 型 NiAl 相,实现沉淀强

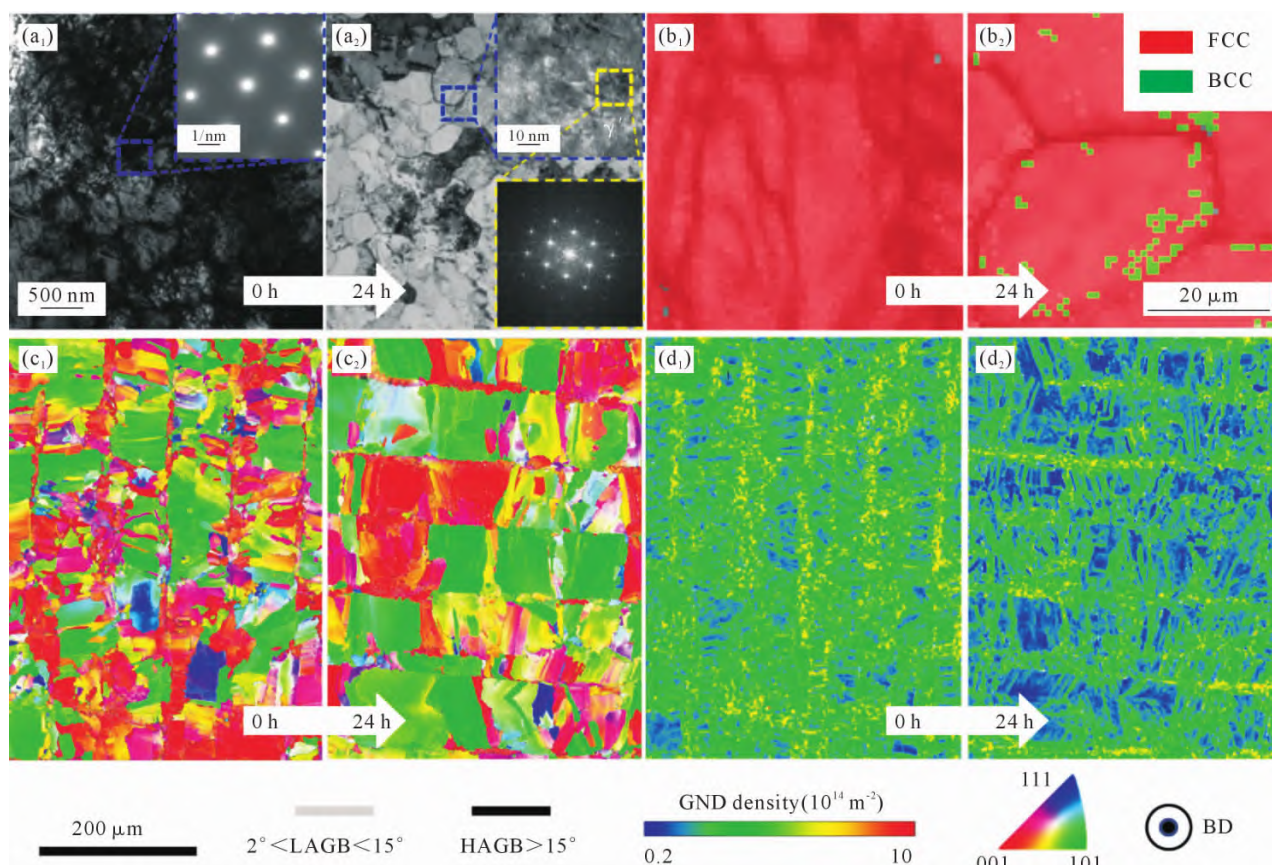


图6 利用TEM和TKD分析时效后相组成及微观组织变化:(a₁, a₂) TEM明场像及衍射花样;(b₁, b₂)相分布;(c₁, c₂) IPF图及晶界分布;(d₁, d₂) GND分布

Fig.6 TEM and TKD analyses of the phase composition and microstructural evolution after aging: (a₁, a₂) bright-field TEM images and SAED patterns; (b₁, b₂) phase distribution maps; (c₁, c₂) IPF maps and grain boundary characteristics; (d₁, d₂) GND density distributions

化机制的引入,时效 10 h 时使其屈服强度由 704 MPa 提高至 1 025 MPa,同时仍保持良好的塑性(伸长率达 14.6%)。这一强化效果主要源自析出相对位错运动的钉扎作用及堆垛层错行为的诱导,有效弥补了退火过程中晶粒长大和位错密度降低所带来的强度损失。同时在晶界处分布的 β 相由于 BCC 与 FCC 界面晶格失配严重,易产生应力集中,导致塑性下降^[29]。综上,增材制造结合热处理工艺可实现高性能 NCATB 高熵合金的高效制备,具有重要的工程应用潜力。

图 7c~g 所示的断口形貌分析进一步揭示了不同加工状态下 NCATB 合金的断裂机制演化规律。铸态样品的拉伸断口整体呈现解理面主导的脆性断裂特征。相比之下,LPBF 打印态样品的断口呈现出以细小等轴韧窝为主的延性断裂形貌,局部可见准解理面与撕裂棱,表明材料在拉伸过程中具有较强的塑性变形能力。经过 600 °C 时效处理后,断口形貌呈现明显变化,随着时效时间的延长,韧窝逐渐减少,断面上出现更多解理面和河流花样,反映出断裂模式由韧性断裂逐渐向脆性断裂转变,呈现出韧脆混合断裂模式。这一演化趋势与时效过程中析出相

增多、晶界强化作用增强及塑性降低相对应,进一步说明沉淀强化虽然提高了强度,但在一定程度上牺牲了延展性。

3 结论

(1)工艺参数对致密度及微观组织影响显著。在激光功率为 120 W、扫描速度为 800 mm/s 的条件下,合金样品获得最高致密度。扫描速度的提高有助于减少气孔和球形孔洞的数量,且晶粒趋于细化、织构减弱,表现出更优异的组织均匀性。

(2)快速凝固引发复杂缺陷演化机制。LPBF 过程中快速加热冷却导致材料内部积累较高热应力,诱发位错胞形成与亚晶界演化,GND 分析显示高位错密度区域易形成于大角度晶界处,具有开裂的潜在风险。

(3)热处理促进析出相形成并协同组织演化。600 °C 低温时效可促使 γ' 与 B2 析出相在晶内及高角度晶界处形成。析出相的钉扎效应在一定程度上抑制晶界迁移,有助于稳定微观组织结构,并与大角度晶界比例协同演化。

(4)热处理强化效应显著但伴随塑性下降。时效

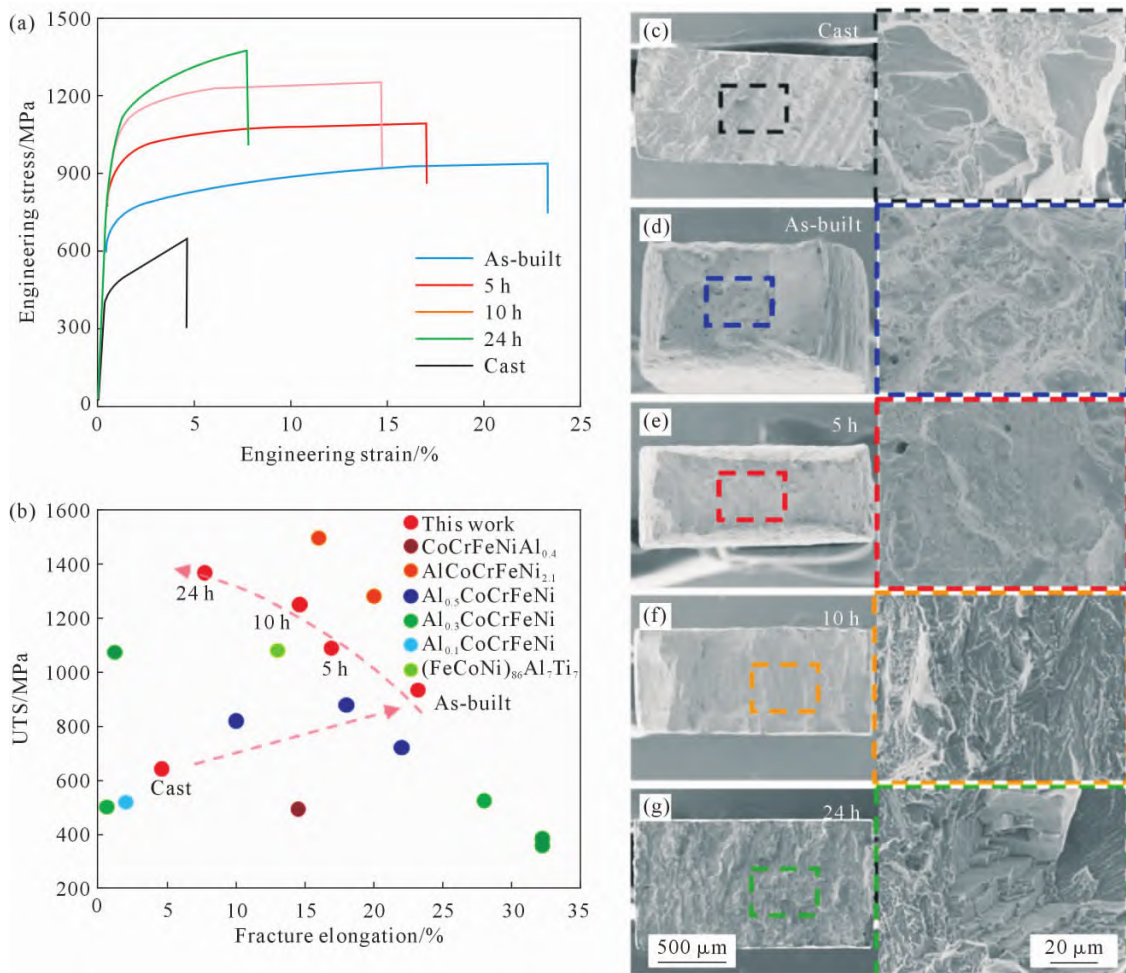


图7 时效处理对增材制造 NCATB 合金力学性能的影响:(a) 室温拉伸曲线;(b) LPBF 成型 FeCoNi 基高熵合金力学性能统计^[15,30-39];(c~g) 断口形貌分析

Fig.7 Influence of aging treatment on the mechanical performance of the additively manufactured NCATB alloy: (a) tensile curves at room temperature; (b) comparative mechanical property data of LPBF-processed FeCoNi-based HEAs from the literature^[15,30-39]; (c~g) SEM images of fracture surfaces for different aging conditions

10 h 后,合金屈服强度从 704 MPa 提升至 1 025 MPa,伸长率仍保持在 14.6%。沉淀强化是主要强化机制,但 B2 相分布于晶界处易诱导应力集中,导致塑性下降,表现为断裂模式由韧性向脆性逐步转变。

参考文献:

- [1] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, VINCENT A J B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 375-377(1): 213-218.
- [2] TASAN C C, DENG Y, PRADEEP K G, YAO M J, SPRINGER H, RAABE D. Composition dependence of phase stability, deformation mechanisms, and mechanical properties of the CoCrFeMnNi high-entropy alloy system[J]. JOM, 2014, 66(10): 1993-2001.
- [3] 李洪超,王军,赵萌萌,王毅,李金山. 非等原子比 AlCoCrFeNi 高熵合金组织及力学性能研究[J]. 铸造技术, 2022, 43(1): 1-5. LI H C, WANG J, ZHAO M M, WANG Y, LI J S. Study on microstructure and mechanical properties of non-isoatomic AlCoCrFeNi high entropy alloy[J]. Foundry Technology, 2022, 43(1): 1-5.
- [4] 郭静波,杨守华,周子翼,牟仁德,谢云,舒小勇,戴建伟,彭晓. 激光增材制造 AlCoCrFeNiSi 高熵合金的氧化行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(1): 217-223.
- [5] TANAKA Y, HIMURO Y, KAINUMA R, SUTOUY, OMORI T, ISHIDA K. Ferrous polycrystalline shape-memory alloy showing huge superelasticity[J]. Science, 2010, 327(5972): 1488-1490.
- [6] CHULIST R, PROKOPOWICZ M, MAZIARZ W, OSTACHOWSKI, SCHELL N. Effect of heat treatment on the precipitation hardening in FeNiCoAlTaB shape memory alloys[J]. International Journal of Materials Research, 2019, 110(1): 70-74.
- [7] FU H D, LI W, SONG S L, JINANG Y B, XIE J X. Effects of grain orientation and precipitates on the superelasticity in directionally solidified FeNiCoAlTaB shape memory alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 684: 556-563.
- [8] ZHANG C, ZHU C Y, HARRINGTON T, VECCHIO K. Design of non-equiatomic high entropy alloys with heterogeneous lamella structure towards strength-ductility synergy[J]. Scripta Materialia,

- 2018, 154: 78-82.
- [9] EVIRGEN A, MA J, KARAMAN I, LUO Z P, CHUMLYAKOV Y I. Effect of aging on the superelastic response of a single crystalline FeNiCoAlTa shape memory alloy [J]. Scripta Materialia, 2012, 67(5): 475-478.
- [10] ZHANG C, ZHU C Y, SHIN S M, CASALENAL, VECCHIO K. Grain boundary precipitation of tantalum and NiAl in superelastic FeNiCoAlTaB alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 372-381.
- [11] MOGHADDAM A O, SHABUROVA N A, SAMODUROVA M N, ABDOLLAHZADEH A, TROFIMOV A. Additive manufacturing of high entropy alloys: A practical review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 77(18): 131-162.
- [12] 田春茂, 曹裕栋, 欧阳迪, 周文琰, 蔡超, 史玉升. 激光增材制造相变诱导型高熵合金的研究进展 [J]. 铸造技术, 2024, 45(8): 711-725.
- TIAN C M, CAO Y D, OUYANG D, ZHOU W Y, CAI C, SHI Y S. Review on laser additive manufacturing of transformatuin-induced high-entropy alloys [J]. Foundry Technology, 2024, 45(8): 711-725.
- [13] 刘泊良, 马志毅, 赵军, 史昆, 徐凯, 刘时兵, 刘田雨, 岳野, 程姣姣. 选区激光熔化制备镍基高温合金的研究进展 [J]. 铸造, 2023, 72(5): 485-495.
- LIU B L, MA Z Y, ZHAO J, SHI K, XU K, LIU S B, LIU T Y, YUE Y, CHENG J J. Research progress on selective laser melting for nickel-base superalloy [J]. Foundry, 2023, 72(5): 485-495.
- [14] 陈乔雨, 殷杰, 陈兴宇, 徐海升, 李正, 黄田野, 刘富初, 关凯, 朱安东, 尹作为, 郝亮. 激光粉末床熔融增材制造高导热银-铜异种金属界面的微观组织和显微硬度研究 [J]. 材料开发与应用, 2024, 39(1): 1-13.
- CHEN Q Y, YIN J, CHEN X Y, XU H S, LI Z, HUANG T Y, LIU F C, GUAN K, ZHU A D, YIN Z W, HAO L. Microstructure and microhardness of interfaces of high thermal conductivity Ag-Cu dissimilar metals fabricated by laser power bed fusion additive manufacturing [J]. Development and Application of Materials, 2024, 39(1): 1-13.
- [15] SUN K, PENG W X, YANG L L, FANG L. Effect of SLM processing parameters on microstructures and mechanical properties of $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloys [J]. Metals, 2020, 10(2): 292.
- [16] WANG Y, LI R D, NIU P D, ZHANG Z J, YUAN T C, YUAN J W, LIK. Microstructures and properties of equimolar AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy additively manufactured by selective laser melting [J]. Intermetallics, 2020, 120: 106746.
- [17] PEYROUZET F, HACHET D, SOULAS R, NAVONE C, GODET S, GORSSE S. Selective laser melting of $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloy: Printability, microstructure, and mechanical properties [J]. JOM, 2020, 72(10): 3705.
- [18] YANG T F, XIA S Q, LIU S, WANG C X, LIU S S, FANG Y, ZHANG Y, XUE J M, YAN S, WANG Y G. Precipitation behavior of $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloys under ion irradiation [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 32146.
- [19] LIU Z Y, ZHAO X Y, WU Y W, CHEN Q, YANG B H, WANG P, CHEN Z W, YANG C. Homogenization heat treatment for an additively manufactured precipitation-hardening high-entropy alloy [J]. Rare Metals, 2022, 41(8): 2853-2863.
- [20] WANG L, ZHANG Y M, CHIA H Y, CHIA H Y, YAN W T. Mechanism of keyhole pore formation in metal additive manufacturing [J]. npj Computation Materials, 2022, 8(1): 1-11.
- [21] GOKCEKAYA O, ISHIMOTO T, HIBINO S, YASUTOMI J, NARUSHIMA T, NAKANO T. Unique crystallographic texture formation in Inconel 718 by laser powder bed fusion and its effect on mechanical anisotropy [J]. Acta Materialia, 2021, 212: 116876.
- [22] GHAYOOR M, LEE K, HE Y J, CHANG C H, PAUL B K, PASEBANIS. Selective laser melting of 304L stainless steel: Role of volumetric energy density on the microstructure, texture and mechanical properties [J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101011.
- [23] MONTERO-SISTIAGA M L, GODINO-MARTINEZ M, BOSCHMANS K, KRUTH J P, HUMBEECKJ V, VANMEENSEL K. Microstructure evolution of 316L produced by HP-SLM (high power selective laser melting) [J]. Additive Manufacturing, 2018, 23: 402-410.
- [24] MARCHESE G, PARIZIA S, RASHIDI M, SABOORI A, MANFREDI D, UGUES D, LOMBARDI M, HRYHA E, BIAMINO S. The role of texturing and microstructure evolution on the tensile behavior of heat-treated Inconel 625 produced via laser powder bed fusion [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 769: 138500.
- [25] GENG Y H, JIN M J, REN W J, ZHANG W M, JIN X J. Effects of aging treatment on martensitic transformation of Fe-Ni-Co-Al-Ta-B alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577(Suppl 1): S631-S635.
- [26] ZHANG G N, YANG X, QI W, LI Y, WANG W, CHEN Y X, LI J T, LI L F. Effect of Co on phase stability and mechanical behavior of $\text{Co,CrFeNiMnAl}_{0.3}$ high entropy alloys with micro/nano hierarchical structure [J]. Materials & Design, 2022, 215: 110442.
- [27] LIU Z W, TAN Z, YAO H L, CHEN C, ZHOU Z, XUE Y F, SHAO W, GUO X Y, YAO H H, CHEN L J, CUI L, HE D Y. Heat treatment induced microstructural evolution and strength enhancement of Al-Cr-Fe-Ni-V high-entropy alloy fabricated by laser powder bed fusion [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 861: 144348.
- [28] TAN F S, FANG Q H, LI J, WU H. Interaction of precipitate with shear-coupled grain boundary migration [J]. Acta Mechanica, 2020, 231(1): 237-250.
- [29] FUJIEDA T, SHIRATORI H, KUWABARA K, KATO T, YAMANAKA K, KOIZUMI Y, CHIBA A. First demonstration of promising selective electron beam melting method for utilizing high-entropy alloys as engineering materials [J]. Materials Letters, 2015, 159: 12-15.
- [30] ZHOU P F, XIAO D H, WU Z, QU X Q. $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNi}$ high entropy alloy prepared by selective laser melting with gas-atomized pre-alloy powders [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 739: 86-89.
- [31] LIU L X, PAN J, ZHANG C, XU J Y, GUO R, LIU L. Achieving high strength and ductility in a 3D-printed high entropy alloy by cooperative planar slipping and stacking fault [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 843: 143106.
- [32] PENG H P, XIE S Y, NIU P D, ZHANG Z J, YUAN T C, REN Z

- Q, WANG X M, ZHAO Y, LI R D. Additive manufacturing of $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloy by powder feeding laser melting deposition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 862: 158286.
- [33] ZHANG Y P, CHEN X Z, JAYALAKSHMI S, SINGH R A, DEEV V B, PRUSOV ES. Factors determining solid solution phase formation and stability in CoCrFeNiX ($\text{X}=\text{Al}, \text{Nb}, \text{Ta}$) high entropy alloys fabricated by powder plasma arc additive manufacturing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 857: 157625.
- [34] GUO Y N, SU H J, ZHOU H T, SHEN Z L, LIU Y, ZHANG J, LIU L, FU H Z. Unique strength-ductility balance of AlCoCrFeNi_{21} eutectic high entropy alloy with ultra-fine duplex microstructure prepared by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 111(16): 298-306.
- [35] LIN W C, CHANG Y J, HSU T H, GORSSE S, SUN F, FURUHARAT, YEH A C. Microstructure and tensile property of a precipitation strengthened high entropy alloy processed by selective laser melting and post heat treatment[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101601.
- [36] JOSEPH J, STANFORD N, HODGSON P, FABIANIC D M. Tension/compression asymmetry in additive manufactured face centered cubic high entropy alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2017, 129: 30-34.
- [37] KUWABARA K, SHIRATORI H, FUJIEDA T, YAMANAKA K, KOIZUMI Y, CHIBA A. Mechanical and corrosion properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy fabricated with selective electron beam melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 264-271.
- [38] NARTU M S K K Y, ALAMD T, DASARI S, MATRI S A, GORSSE S, SILLER H, DAHOTRE N, BANERJEE R. Enhanced tensile yield strength in laser additively manufactured $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloy[J]. *Materialia*, 2020, 9: 100522.
- [39] VIKRAM R J, MURTY B S, FABIANIC D, SUWAS S. Insights into micro-mechanical response and texture of the additively manufactured eutectic high entropy alloy AlCoCrFeNi_{21} [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 827: 154034.
- (责任编辑:李亚敏)