DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4217

激光增材制造316L及IN718的原位合金化及其微观组织与力学性能研究

张再云[1],刘印刚[1,2],李淼泉[3]

(1. 西北工业大学 航空学院,陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学 飞行器基础布局全国重点实验室,陕西 西安 710072; 3. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072)

摘　要:随着增材制造技术的不断发展,该技术逐渐成为推动制造业革新的核心动力。当前,增材制造常用的金属材料主要包括不锈钢、镍基高温合金、铝合金、钛合金等商业合金,但这些材料尚不能完全满足复杂多变的应用需求。因此,开发适用于增材制造的新合金材料显得尤为重要。基于此,研究了基于316L不锈钢和IN718镍基高温合金粉末,通过激光粉末床熔融,制造了一种新型的Fe-Cr-Ni合金材料。结果表明,激光粉末床熔融实现了良好的原位合金化,合金具有出色的打印性能。同时,该合金展现出良好的室温拉伸性能,抗拉强度和屈服强度分别为(875±14) MPa和(675±14) MPa,并保有22.9%±3.8%的断后伸长率。

关键词:激光粉末床熔融;Fe-Cr-Ni合金;微观组织;力学性能

中图分类号:TG141　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)02-0160-07

Research on In-situ Alloying of 316L and IN718 via Laser Additive Manufacturing and Its Microstructure and Mechanical Properties

ZHANG Zaiyun[1], LIU Yingang[1,2], LI Miaoquan[3]

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. National Key Laboratory of Aircraft Configuration Design, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. State Key Laboratory of Solidification Process, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: With the continuous development of additive manufacturing technology, it has emerged as the core driving force for innovation in the manufacturing sector. Currently, the commonly employed metallic materials for additive manufacturing include stainless steels, nickel-based superalloys, aluminium alloys, and titanium alloys. However, these materials do not fully satisfy the complex and variable application requirements. Hence, the development of new alloys suitable for additive manufacturing is particularly important. This study focuses on the development of a new Fe-Cr-Ni alloy via laser powder bed fusion based on 316L stainless steel and IN718 nickel-based superalloy powders. The results indicate that through laser powder bed fusion, good in situ alloying is achieved, and the alloy exhibits excellent printability. Additionally, this alloy demonstrates good room-temperature tensile properties, with a tensile strength and yield strength of (875±14) MPa and (675±14) MPa, respectively, maintaining an elongation to fracture of 22.9%±3.8%.

Key words: laser powder bed fusion; Fe-Cr-Ni alloy; microstructure; mechanical properties

自21世纪以来,我国在航空、航天及汽车等关键领域取得了飞速发展。随着关键技术的不断突破,设计与制造水平也达到了新的高度,同时也对构件的制造水平提出了更高的要求。传统加工技术,如机加工、铸造、锻造和焊接等,已难以满足形状复杂、功能多样的复杂结构件制造需求。增材制造(additive manufacturing, AM)技术,即“3D打印”技术,通过逐层累积的方式构建出所需的几何结构,不仅能够制造出传统工艺难以实现的复杂形状,还具备研发周期短、快速成型等特点,成为推动制造业革

收稿日期:2024-11-20

基金项目:陕西省自然科学研究计划(2024JC-ZDXM-33);凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLSP202205)

作者简介:张再云,1999年生,博士生.研究方向为金属增材制造技术.Email: zaiyunzhang@mail.nwpu.edu.cn

通信作者:刘印刚,1986年生,博士,教授.研究方向为金属增材制造、抗疲劳设计、承载-功能一体化设计.Email: yingangliu@nwpu.edu.cn

引用格式:张再云,刘印刚,李淼泉.激光增材制造316L及IN718的原位合金化及其微观组织与力学性能研究[J].铸造技术,2025,46(2): 160-166.

ZHANG Z Y, LIU Y G, LI M Q. Research on in-situ alloying of 316L and IN718 via laser additive manufacturing and its microstructure and mechanical properties[J]. Foundry Technology, 2025, 46(2): 160-166.

中国知网 https://www.cnki.net

新的重要力量[1-2]。根据采用的热源类型，目前主流的金属增材制造技术可以分为：激光增材制造(laser additive manufacturing, LAM)、电子束增材制造(electron beam additive manufacturing, EBAM)、电弧增材制造(wire and arc additive manufacturing, WAAM)[3]。其中，激光增材制造技术因其成本较低、适应范围广，在工业领域得到广泛应用[4]。

在激光增材制造金属材料领域，当前的研究集中在不锈钢、镍基高温合金、钛合金和铝合金等商用合金[5]。尽管这些材料在许多应用中表现出色，但难以满足日益复杂多变的实际应用需求。此外，这些材料并非专为增材制造而设计，在工艺适应性方面存在挑战[6-7]。因此，开发适用于增材制造的新型合金显得尤为重要。这些新合金不仅要具备优异的服役性能，以满足高要求的应用场景，还应具备良好的可焊性和加工性能，以适应增材制造的技术特点。目前，金属增材制造在合金粉末设计领域的研究正在不断深化，特别是在微合金化、成分优化设计及预合金粉末混合等方面取得了进展[8-9]，不仅推动了新材料的开发，也为传统材料的性能提升提供了新途径。采用预合金粉末混合方法，并结合原位合金化手段来制备新型材料，在降低研发成本和时间方面具有很高的灵活性与广阔的发展前景[10-12]。Zhang 等[13]通过激光原位合金化的方法将少量 316L 不锈钢与 Ti64 合金进行混合，结果表明 316L 不锈钢中的 Fe、Cr、Ni、Mo 等元素完全溶解在 Ti64 合金基体中，并使得 Ti64 合金基体中形成了微米级成分梯度与组织梯度，有效地提升了材料的力学性能。Zhang 等[14]采用激光原位合金化方法向 Ti-5553 合金中添加 Mo 纳米颗粒，实现了凝固过程中的晶粒细化，并抑制了热循环过程中相异质性的形成，使得合金具有高度均匀的力学性能，同时也提高了合金的强度和塑性。

316L 不锈钢因其卓越的耐腐蚀性、抗氧化性和在极端环境下的出色表现，目前被广泛应用于航空、航天、海洋工程及核电等领域[15-16]。此外，316L 不锈钢优异的加工和焊接性能使其成为增材制造中最为常用的金属材料之一。Inconel 718 合金(IN718 合金)，作为一种高性能的镍基高温合金，具有卓越的高温强度和抗蠕变性能，尤其在 650 ℃以下的温度区间内表现尤为显著。这种合金在航空航天、石油开采及化工设备等领域的应用非常广泛[17-18]，特别是在制造航空发动机涡轮叶片、涡轮盘、燃烧室等高温构件方面。316L 不锈钢与 IN718 合金含有相同的主要构成元素(Fe、Cr、Ni)，这为原位合成合金提供了基础。通过调整各自的添加比例可以有效调整合金的性能。本研究采用激光粉末床熔融技术制备了一种新型 Fe-Cr-Ni 合金，并对试样的微观组织和力学性能进行了分析，为增材制造 Fe-Cr-Ni 合金的设计与开发提供参考。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

研究采用的原材料为通过气雾化方式制备的 316L 不锈钢与 IN718 镍基高温合金粉末，2 种粉末的粒径分布范围均为 15~53 μm，化学成分如表 1 所示。采用 SC-1100HF 型全自动粉末混合机将 2 种粉末混合均匀，本文仅采用 50% 316L+ 50% IN718(质量分数)粉末来验证原位合金的可行性。图 1 为 2 种合金粉末混合后的 SEM 和 EDS 面扫描照片，其中富 Fe 颗粒为 316L 不锈钢颗粒，富 Ni 颗粒为 IN718 合金颗粒，可以观察到 2 种粉末混合较为均匀且仍保持着较好的球形度，这在打印过程中有利于保持粉末的流动性。利用 BLT-310 激光粉末床熔融设备作为打印成型设备，优化后的工艺参数为：激光功率 200 W，激光扫描速度 800 mm/s，扫描间距 120 μm，层厚 30 μm。采用 Meander 型扫描路径，层间旋转 67°。选用 316L 不锈钢板作为基板，并制备尺寸为 50 mm×7 mm×50 mm 的块体试样。为防止初始冷却速度过大导致的较大应力，打印前需将基板预热至 200 ℃，打印过程中全程通入氩气作为保护气体，避免发生氧化。新合金成分（质量分数）主要包括 40.51%Fe、33.97%Ni、18.25%Cr 等，本文以 Fe-Cr-Ni 命名新合金，如无特别说明，合金均指代 Fe-Cr-Ni 合金。

表 1 316L 不锈钢与 IN718 合金粉末化学成分
Tab.1 Chemical compositions of the 316L stainless steel and IN718 alloy powders

(mass fraction/%)

Alloy	C	Mo	P	Cr	Si	Ni	Fe
316L	0.01	2.60	-	16.70	0.70	12.40	Bal.
IN718	0.035	3.04	0.012	19.79	0.062	55.54	Bal.

Alloy	Mn	O	Nb	Al	Ti	Co	Cu
316L	1.50	0.07	-	-	-	-	-
IN718	-	-	5.09	0.30	0.93	0.15	0.059

1.2　室温力学性能测试及微观组织观察

采用 Instron 5967 电子万能试验机对打印成型 Fe-Cr-Ni 合金试样进行室温拉伸力学性能测试，并采用非接触式视频引伸计进行实时应变监测，试样尺寸及取样方式如图 2 所示。拉伸试验开始前采用 SiC 水砂纸将试样表面打磨至 2000 #，以消除线切

中国知网　https://www.cnki.net

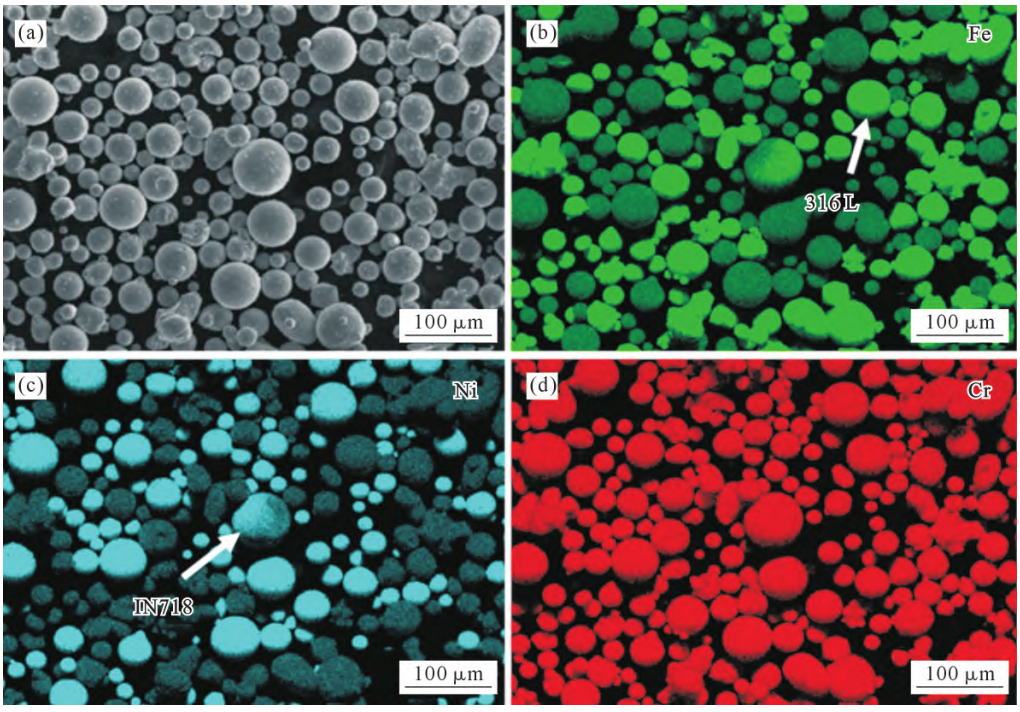

图 1 混合粉末 SEM 和 EDS 照片:(a) SEM 照片;(b~d) EDS 元素面扫描照片
Fig.1 SEM and EDS images of the powder mixture: (a) SEM image; (b~d) EDS elemental mapping images

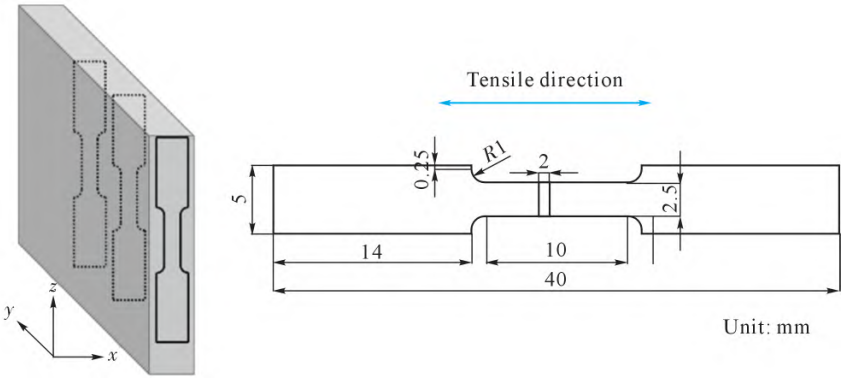

图 2 拉伸试样尺寸及取样方式示意图
Fig.2 Schematic diagram of the tensile specimen size and sampling method

割痕迹对测试结果的影响。室温拉伸试验所采用的拉伸应变速率为 0.001 s^{-1}，共进行 3 次测试以确保试验可重复性。

微观组织观察试样取自图 2 所示拉伸试样夹持段位置。采用 G3 UC 型聚焦离子/双束系统扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)进行微观组织观察和电子背散射衍射(electron back scatter diffraction, EBSD)测试,设备工作电压 20 kV。微观组织观察前，采用 SiC 水砂纸将试样打磨至5000#后采用 SiO_2 悬浮抛光液进行机械抛光处理，使用 H_2O_2:HCl=1:3 的混合试剂腐蚀 5 s,清洗后吹干备用。

采用 X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD) 进行衍射分析，试验用靶材为旋转 Cu 靶,管压为 40 kV,管流为 20 mA,扫描范围为 20°~90°,扫描速度 3 (°)/min,扫描步长 0.02°。

2 实验结果及讨论

2.1 微观组织

图 3 为激光粉末床熔融增材制造 Fe-Cr-Ni 合金的 XRD 图谱。分析发现,打印态 Fe-Cr-Ni 合金在衍射图谱中仅呈现出奥氏体(γ 相)的特征峰,表明该合金在打印态下主要由奥氏体相构成。这种单一相态的检测结果，归因于打印过程中的快速凝固与冷却过程,极大抑制了 δ、γ″和 γ′强化相的析出。同时，316L 不锈钢的加入，使得强化相形成元素被稀释，因此 XRD 图谱并未检测到 δ、γ″和 γ′强化相对应的衍射峰。

图 4 为激光粉末床熔融增材制造 Fe-Cr-Ni 合金的 EBSD 反极图,平行于打印方向(building direction, BD)。从图中可以明显观察到,打印态 Fe-Cr-Ni 合金的晶粒以柱状晶为主，并呈现出跨越多个熔合

中国知网 https://www.cnki.net

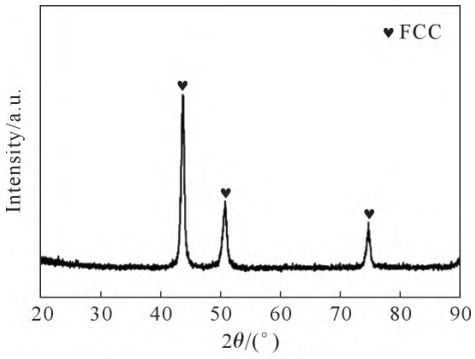

图 3 Fe-Cr-Ni 合金 XRD 图谱
Fig.3 XRD pattern of the Fe-Cr-Ni alloy

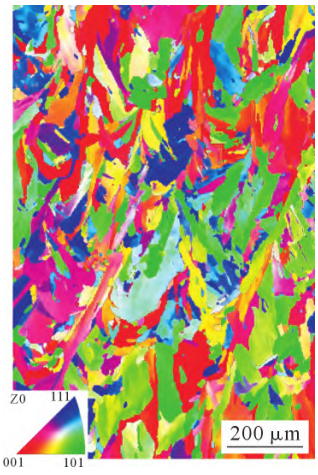

图 4 Fe-Cr-Ni 合金的 EBSD 反极图
Fig.4 EBSD inverse pole figure map of the Fe-Cr-Ni alloy

层外延生长特征。柱状晶长约 200~500 μm，宽度约为 20~50 μm。在激光粉末床熔融增材制造过程中，已凝固的金属层在新的激光扫描轨迹下会经历局部重熔现象，这一过程提供了形成新晶粒的晶核。同时，由于激光扫描作用下熔池内部形成了显著的温度梯度，晶粒沿着温度梯度方向快速生长，而其他生长方向则受到抑制，从而促进了晶粒的外延生长形成柱状晶，并贯穿多个融合层。

图 5 为激光粉末床熔融增材制造 Fe-Cr-Ni 合金平行于打印方向的微观组织 SEM 照片。从图 5a可以看出，打印态 Fe-Cr-Ni 合金层间结合紧密，基体中无明显的孔洞、未熔合、裂纹等缺陷，表明该合金具有良好的打印性能，这对于制造高质量、高性能的零件至关重要，因为这些缺陷往往是导致零件性能下降的关键因素[19]。图 5b 与 c 为图 5a 中不同区域的放大照片，可以看出基体中呈现胞状生长特征，表明 Fe-Cr-Ni 合金与激光增材制造 316L 不锈钢[20-21]、IN718 镍基高温合金[22]相同，均为胞状生长方式。目前胞状生长特征已在激光增材制造的铝基、铁基、钴基等合金材料中被广泛发现[23]。图 5d 为图 5c 中白框区域放大图，可以看到大量细小 Laves 相在枝晶间区域形成，Laves 相的形成与元素 Nb、Mo 在枝晶间区域的富集有关(下文进行阐述)[22, 24]。Laves 相通常具有优异的高温性能和良好的机械稳定性，有助于提高合金的高温强度和抗蠕变性能[25]。然而，Laves 相的过量形成可能导致材料的塑性降低，因此控制其形成和分布是优化合金性能的关键。此外，从图 5d 还可以看出，胞状亚结构内部存在大量均匀分布

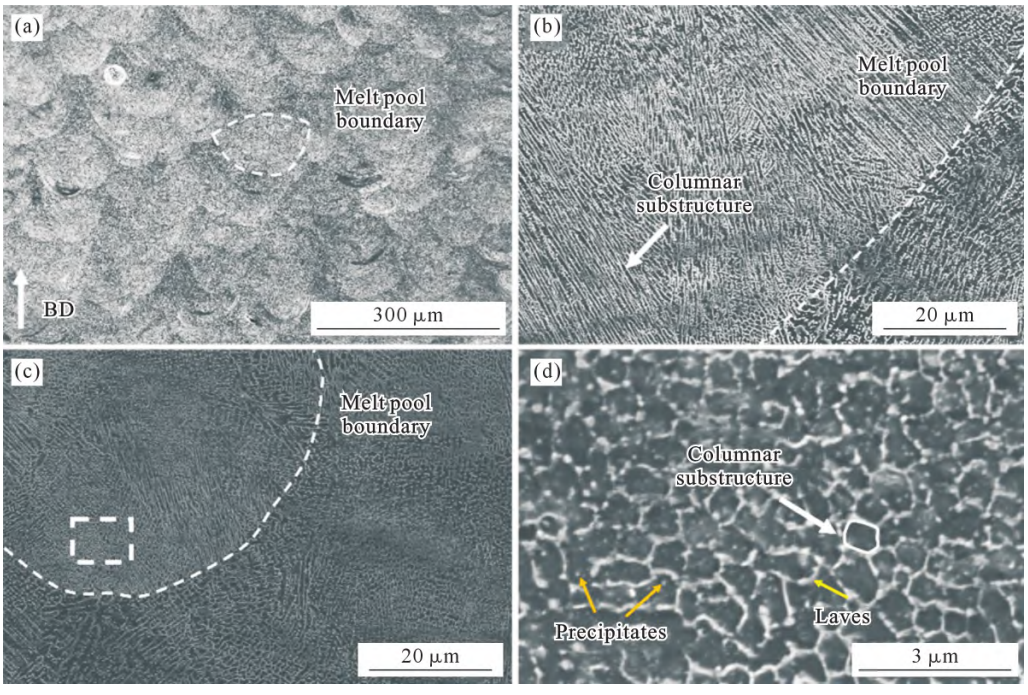

图 5 Fe-Cr-Ni 合金微观组织 SEM 照片：(a) 低倍 SEM 照片；(b, c) 图(a)中不同区域高倍 SEM 照片；(d) 图(c)中白框区域放大照片
Fig.5 SEM images of the Fe-Cr-Ni alloy: (a) low-magnification SEM image; (b, c) high-magnification images of distinct regions within (a); (d) enlarged view of the white-framed area in (c)

中国知网 https://www.cnki.net

的细小沉淀相颗粒，其可能为 MC 碳化物或氧化物颗粒[26-27]。在合金加载过程中，这些沉淀相颗粒可以充当位错移动的屏障，从而有效提升材料的强度。

采用 Image J Pro 软件对胞状亚结构尺寸进行统计，数量超过 500 个，统计结果如图 6 所示。结果表明胞状亚结构尺寸分布符合高斯分布特征，其平均直径为 0.681 μm，可近似反应一次枝晶间距。已有的研究表明，一次枝晶间距与温度梯度(G)、生长速率(V)等条件有关[22]。

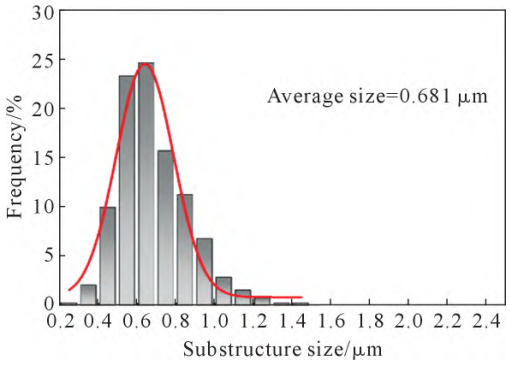

图 6 Fe-Cr-Ni 合金胞状亚结构尺寸统计
Fig.6 Statistical results of the cellular substructure size of the Fe-Cr-Ni alloy

图 7 为激光粉末床熔融增材制造 Fe-Cr-Ni 合金的 EDS 元素面扫描照片。可以看出，Ni、Cr、Mn 3 种元素在基体中分布均匀，未观察到明显的宏观偏析现象，这表明 316L 不锈钢与 IN718 合金在激光粉末床熔融增材制造过程中实现了充分的元素混合，从而证实了良好的原位合金化效果。然而，对于 Nb 和 Mo 元素，EDS 面扫描揭示了它们存在偏析现象，主要在胞状亚结构胞壁处富集。这种偏析行为与 Nb 和 Mo 在熔池中溶解度、扩散速率及分配系数(液态中溶解度与固态中溶解度之比)有关[28-29]。在凝固过程中，由于 Nb 和 Mo 的分配系数小于 1，这意味着它们在固态中的溶解度低于液态，导致这些元素倾向于在凝固前沿的液体中富集[24]；此外，激光增材制造所具有的高冷速特征(冷却速率可达 10^6~10^7 K/s)[30]，限制了元素的充分扩散，使得 Nb 和 Mo 等元素在快速冷却过程中难以分布均匀，从而导致偏析现象的出现。这种偏析现象为枝晶间的 Laves 相形成提供了条件，促进了 Laves 相在枝晶间区域的形核和生长。

2.2 力学性能

激光粉末床熔融增材制造 Fe-Cr-Ni 合金室温拉伸应力–应变曲线如图 8 所示。由于合金致密度高且主要由面心立方(FCC)相组成，因此展现出了较高的塑性，断后伸长率为 22.9%±3.8%。此外，合金中的胞状亚结构、沉淀纳米颗粒等对其强度有显著贡献。统计结果显示，Fe-Cr-Ni 合金抗拉强度为(875±14) MPa，屈服强度为(675±14) MPa，这表明 Fe-Cr-Ni 合金不仅具有优异的强度，同时展现出良好的塑性，适用于高强度、高韧性要求的应用场合。

图 9 为 Fe-Cr-Ni 合金试样室温拉伸断口形貌 SEM 照片。图 9a 为断口低倍 SEM 照片，从图中可以看出断裂面较为粗糙，且伴随明显的颈缩特征，表明试样在断裂之前发生了较为明显的塑性变形。图 9b 和 c 揭示了断裂面的微观特征，从图 9c 可以看出，断口中存在大量直径约为 500 nm 的微小韧窝，表明该 Fe-Cr-Ni 合金的断裂方式属于韧性断裂。

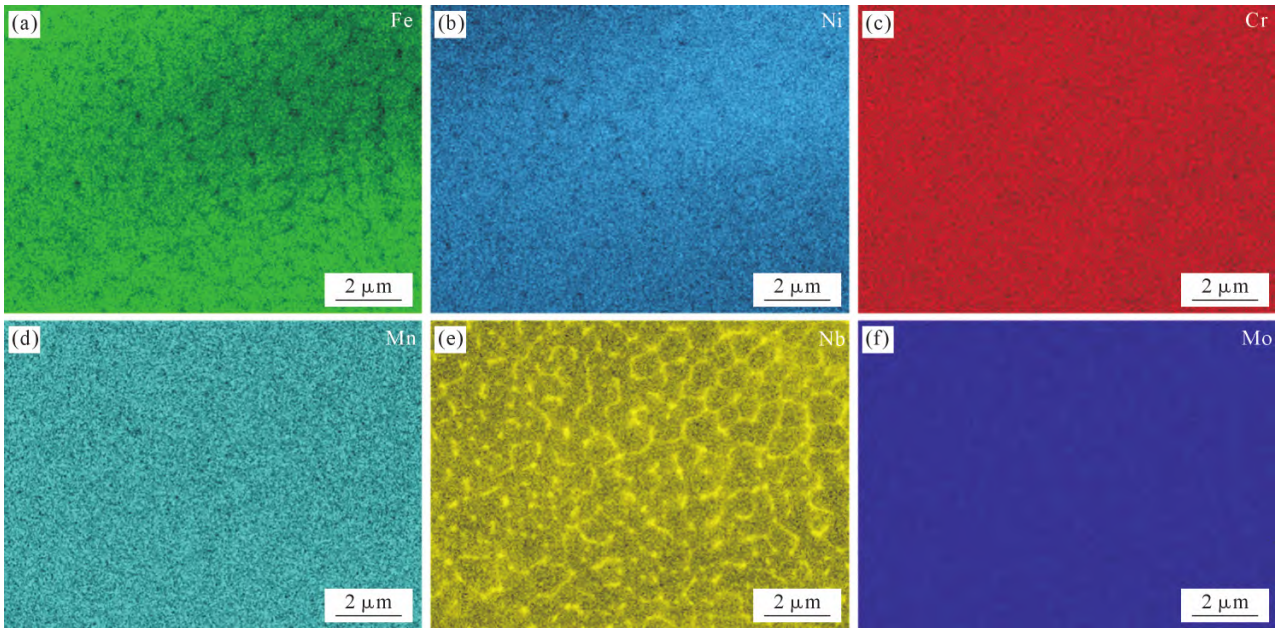

图 7 Fe-Cr-Ni 合金 EDS 面扫描照片：(a) Fe; (b) Ni; (c) Cr; (d) Mn; (e) Nb; (f) Mo
Fig.7 EDS elemental mappings of the Fe-Cr-Ni alloy：(a) Fe; (b) Ni; (c) Cr; (d) Mn; (e) Nb; (f) Mo

中国知网 https://www.cnki.net

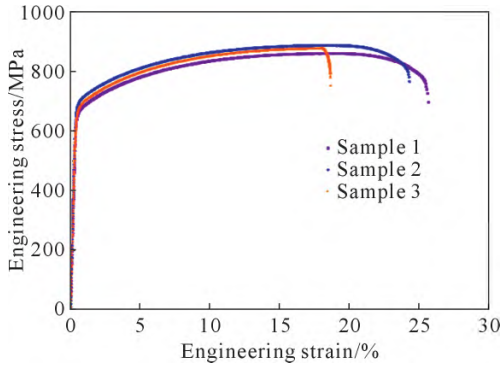

图 8 Fe-Cr-Ni 合金室温拉伸工程应力–应变曲线

Fig.8 Engineering stress-strain curves of the Fe-Cr-Ni alloy at room temperature

3 结论

(1)Fe-Cr-Ni 合金材料层间结合紧密，无明显的打印缺陷，Ni、Cr、Mn 等元素在合金基体中分布均匀，证实了激光粉末床熔融原位合金的可行性。

(2)Fe-Cr-Ni 合金基体存在大量胞状亚结构，平均尺寸为 0.681 μm，胞壁处富集 Nb、Mo 2 种元素。

(3)Fe-Cr-Ni 合金具有良好的室温拉伸性能，抗拉强度为(875±14) MPa，屈服强度为(675±14) MPa，同时保持着 22.9%±3.8 %的断后伸长率。

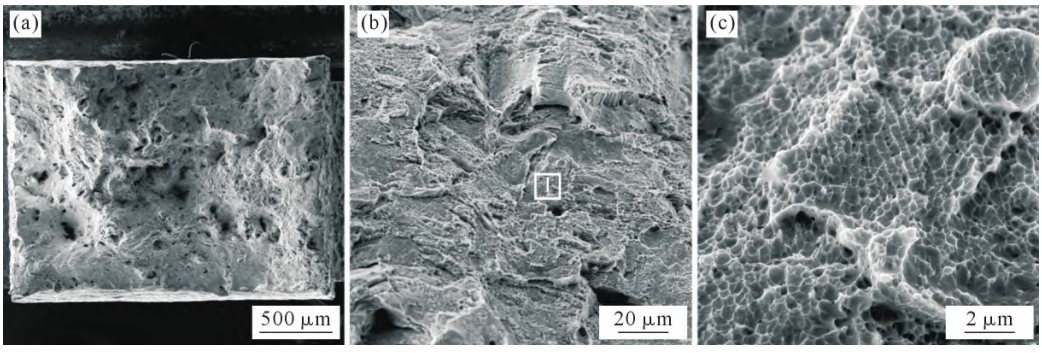

图 9 Fe-Cr-Ni 合金室温拉伸断口 SEM 照片：(a) 低倍 SEM 照片；(b) 高倍 SEM 照片；(c) 图(b)中 I 区放大图

Fig.9 SEM images of the room temperature tensile fracture surface of the Fe-Cr-Ni alloy: (a) low magnification SEM image; (b) high magnification SEM image; (c) enlarged view of region I in (b)

参考文献：

[1] GU D D, SHI X Y, POPRAWE R, BOURELL D L, SETCHI R, ZHU J H. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372: 6545.

[2] HUANG S H, LIU P, MOKASDAR A, HOU L. Additive manufacturing and its societal impact: A literature review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5-8): 1191-1203.

[3] 党晓玲，王婧. 增材制造技术国内外研究现状与展望[J]. 航空精密制造技术，2020, 56(2): 35-38.
DANG X L, WANG J. Research status and prospects of additive manufacturing technology at homeand abroad[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2020, 56(2): 35-38.

[4] 王勇，周雪峰. 激光增材制造研究前沿与发展趋势[J]. 激光技术，2021, 45(4): 475-484.
WANG Y, ZHOU X F. Research front and trend of specific laser additive manufacturing techniques[J]. Laser Technology, 2021, 45(4): 475-484.

[5] GONG G H, YE J J, CHI Y M, ZHAO Z H, WANG Z F, XIA G, DU X Y, TIAN H F, YU H J, CHEN C Z. Research status of laser additive manufacturing for metal: A review [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 855-884.

[6] DIXIT S, LIU S Y. Laser additive manufacturing of high-strength aluminum alloys: Challenges and strategies[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2022, 6(6): 156.

[7] GUO C, LI G, LI S, HU X G, LU H X, LI X G, XU Z, CHEN Y H, LI Q Q, LU J, ZHU Q. Additive manufacturing of Ni-based superalloys: Residual stress, mechanisms of crack formation and strategies for crack inhibition[J]. Nano Materials Science, 2023, 5(1): 53-77.

[8] 宋波，张金良，章媛洁，胡凯，方儒轩，姜鑫，张莘茹，吴祖胜，史玉升. 金属激光增材制造材料设计研究进展[J]. 金属学报，2023, 59(1): 1-15.
SONG B, ZHANG J L, ZHANG Y J, HU K, FANG R X, JIANG X, ZHANG X R, WU Z S, SHI Y S. Research progress of materials design for metal laser additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(1): 1-15.

[9] BANDYOPADHYAY A, TRAXEL K D, LANG M, JUHASZ M, ELIAZ N, BOSE S. Alloy design via additive manufacturing: Advantages, challenges, applications and perspectives[J]. Materials Today, 2022, 52: 207-224.

[10] 朱幼宇，任德春，雷波，姜沐池，杨兴远，刘意，蔡雨升，吉海宾，雷家峰.激光增材制造高温合金原位增强钛合金复合材料的组织与力学性能[J]. 材料工程，2024, 52(3): 33-43.
ZHU Y Y, REN D C, LEI B, JIANG M C, YANG X Y, LIU Y, CAI Y S, JI H B, LEI J F. Microstructure and mechanical properties of superalloy in-situ reinforced titanium alloy composites by laser additive manufacturing[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(3): 33-43.

[11] MOSALLANEJAD M H, NIROUMAND B, AVERSA A, SABOORI A. In-situ alloying in laser-based additive manufacturing processes: A critical review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 872: 159567.

[12] 马军，贾文鹏，李烨，贾亮，金峰. 基于增材制造的原位合金化制造方法的研究进展[J]. 中国材料进展，2024, 43(2): 142-150.
MA J, JIA W P, LI Y, JIA L, JIN F. Research progress of in situ al-

中国知网 https://www.cnki.net

loying manufacturing method based on additive manufacturing[J]. Materials China, 2024, 43(2): 142-150.

[13] ZHANG T L, HUANG Z H, YANG T, KONG H J, LUAN J H, WANG A D, WANG D, KUO W, WANG Y Z, LIU C S. In situ design of advanced titanium alloy with concentration modulations by additive manufacturing[J]. Science, 2021, 374(6566): 478-482.

[14] ZHANG J Q, BERMINGHAM M J, OTTE J, LIU Y G, HOU Z Y, YANG N, YIN Y, BAYAT M, LIN W K, HUANG X X, STJOHN D H, DARGUSCH M S. Ultrauniform, strong, and ductile 3D-printed titanium alloy through bifunctional alloy design [J]. Science, 2024, 383(6683): 639-645.

[15] DEWIDAR M M, KHALIL K A, LIM J K. Processing and mechanical properties of porous 316L stainless steel for biomedical applications[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(3): 468-473.

[16] KONG D C, DONG C F, NI X Q, ZHANG L, YAO J Z, MAN C, CHENG X Q, XIAO K, LI X G. Mechanical properties and corrosion behavior of selective laser melted 316L stainless steel after different heat treatment processes[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(7): 1499-1507.

[17] HOSSEINI E, POPOVICH V A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100877.

[18] JIA Q, GU D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 585: 713-721.

[19] 姚燕生,汪俊,陈庆波,丁晨,唐建平,葛张森. 激光增材制造产品缺陷及其处理技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展,2019, 56 (10): 100004.
YAO Y S, WANG J, CHEN Q B, DING C, TANG J P, GE Z S. Research status of defects and defect treatment technology for laser additive manufactured products[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 100004.

[20] CASATI R, LEMKE J, VEDANI M. Microstructure and fracture behavior of 316L austenitic stainless steel produced by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(8): 738-744.

[21] VOISIN T, FORIEN J B, PERRON A, AUBRY S, BERTIN N, SAMANTA A, BAKER A, WANG Y M. New insights on cellular structures strengthening mechanisms and thermal stability of an austenitic stainless steel fabricated by laser powder-bed-fusion[J]. Acta Materialia, 2021, 203:116476.

[22] TAO P, LI H, HUANG B, HU Q, GONG S, XU Q. The crystal growth, intercellular spacing and microsegregation of selective laser melted Inconel 718 superalloy[J]. Vacuum, 2019, 159: 382-390.

[23] PRASHANTH K G, ECKERT J. Formation of metastable cellular microstructures in selective laser melted alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 707: 27-34.

[24] CHEN Y, LU F, ZHANG K, NIE P, ELMI HOSSEINI S R, FENG K, LI Z, CHU P K. Investigation of dendritic growth and liquation cracking in laser melting deposited Inconel 718 at different laser input angles[J]. Materials & Design, 2016, 105: 133-141.

[25] XIAO X, JIN M, QIN W, YAO J. A review of emerging trends in Laves phase research: Bibliometric analysis and visualization[J]. High Temperature Materials and Processes, 2024, 43(1): 81-185.

[26] SARGENT N, WANG Y, LI D, ZHAO Y, WANG X, XIONG W. Exploring alloy design pathway through directed energy deposition of powder mixtures: A study of stainless steel 316L and Inconel 718[J]. Additive Manufacturing Letters, 2023, 6: 100133.

[27] DENG P, KARADGE M, REBAK R B, GUPTA V K, PROROK B C, LOU X. The origin and formation of oxygen inclusions in austenitic stainless steels manufactured by laser powder bed fusion [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101334.

[28] XIAO W J, XU Y X, XIAO H, LI S M, SONG L J. Investigation of the Nb element segregation for laser additive manufacturing of nickel-based superalloys[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 180: 121800.

[29] 孙晓峰,宋巍,梁静静,李金国,周亦胄. 激光增材制造高温合金材料与工艺研究进展[J]. 金属学报,2021, 57(11): 1471-1483.
SUN X F, SONG W, LIANG J J, LI J G, ZHOU Y Z. Research and development in materials and processes of superalloy fabricated by laser additive manufacturing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(11): 1471-1483.

[30] GU D D, MEINERS W, WISSENBACH K, POPRAWE R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2012, 57(3): 133-164.

中国知网 https://www.cnki.net