引用格式：万潇彬，张建军，周政，等.Fe离子辐照激光增材制造316L不锈钢的显微组织和硬化特征[J].材料工程，2026，54(8)：350-358.
WAN Xiaobin，ZHANG Jianjun，ZHOU Zheng，et al.Microstructure and hardening characteristics of Fe ion irradiated laser additive manufacturing of 316L stainless steel[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：350-358.

Fe离子辐照激光增材制造316L不锈钢的显微组织和硬化特征

万潇彬[1]，张建军[1]，周 政[1]，王建峰[2*]，刘 战[2]
（1 中核武汉核电运行技术股份有限公司，武汉 430223；
2 南京航空航天大学 材料科学与技术学院，南京 211106）

摘要：面向核电领域关键结构材料的辐照服役需求，研究激光增材制造316L不锈钢在3.5 MeV铁离子辐照环境下的力学性能演化行为，分别采用选区激光熔化（selective laser melting，SLM）与定向能量沉积（directed energy deposition，DED）工艺制备样品，开展辐照前组织结构分析及不同铁离子辐照剂量下的X射线衍射与纳米压痕测试。组织观察显示，SLM样品呈细小胞状奥氏体结构，DED样品则为粗大柱状晶粒，伴有部分铁素体析出。XRD分析表明，两类样品在辐照前后主相均为奥氏体，辐照后未观察到相变行为，表现出良好的物相稳定性。纳米压痕测试结果显示，SLM样品硬度在辐照后由2.81 GPa升高至4.33 GPa，DED样品由2.70 GPa升高至4.10 GPa，分别提升约54%和52%。其中DED样品在1～10 dpa之间硬度提升有限，仅约7.6%，展现出更早的硬化饱和趋势。结合应变梯度塑性模型分析，揭示了不同辐照剂量下的辐照硬化差异。

关键词：增材制造；316L不锈钢；离子辐照；辐照硬化
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000278 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000278
中图分类号：TG456.7；TH142.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2026)08-0350-09

Microstructure and hardening characteristics of Fe ion irradiated laser additive manufacturing of 316L stainless steel

WAN Xiaobin[1]，ZHANG Jianjun[1]，ZHOU Zheng[1]，WANG Jianfeng[2*]，LIU Zhan[2]
（1 China Nuclear Power Operation Technology Corporation，Wuhan 430223，China；
2 College of Material Science and Technology，Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing 211106，China）

Abstract：Focusing on the irradiation service demands of key structural materials in the nuclear power sector，this research delves into the evolution of mechanical properties in 316L stainless steel produced via laser additive manufacturing when subjected to 3.5 MeV iron ion irradiation. The samples are fabricated using two distinct laser additive manufacturing processes：selective laser melting（SLM）and directed energy deposition（DED）. Subsequently，a comprehensive pre-irradiation analysis is conducted，encompassing microstructural examination，X-ray diffraction（XRD），and nanoindentation tests under varying doses of iron ion irradiation. Microstructural observations revealed that the SLM samples exhibit fine cellular austenite structures，whereas the DED samples display coarse columnar grains with some ferrite precipitation. XRD analysis demonstrate that both sample types retain austenite as the predominant phase before and after irradiation，with no phase transformation detected，thus indicating their excellent phase stability. The nanoindentation results show that the hardness of the SLM samples increases from 2.81 GPa to 4.33 GPa，representing an approximate 54% rise. In contrast，the hardness of the DED samples rises from 2.70 GPa to 4.10 GPa，equating to an approximate 52% increase. Notably，the DED samples exhibit only a limited hardness improvement（approximately 7.6%）within the dose range of 1-10 dpa，

suggesting an earlier onset of hardening saturation. By integrating the analysis with the strain gradient plasticity model, the differences in irradiation hardening under varying doses are clarified.

Key words: additive manufacturing; 316L stainless steel; ion irradiation; irradiation hardening

金属增材制造(additive manufacturing, AM)技术作为先进制造领域的重要分支,近年来得到了广泛关注。相较于传统减材制造工艺,金属增材制造能够通过逐层堆积材料,实现复杂结构的高效制造,具有材料利用率高、设计自由度大以及制造周期短等优势[1-4]。目前,金属增材制造主要包括选区激光熔化(selective laser melting, SLM)和定向能量沉积(directed energy deposition, DED)等工艺,广泛应用于航空航天、核能等领域[5-7]。其中,SLM技术以其高精度和高致密度的特点适用于制造精细复杂结构,而DED技术因其高沉积速率和适应性强的特性,在零部件增材修复与再制造方面展现出巨大的应用潜力。随着工艺优化、材料开发以及后处理技术的不断进步,金属增材制造技术正朝着高性能、高可靠性和大规模工业应用方向发展,为现代制造业带来深远影响。

近年来,先进核能材料与装备的制造与研发面临诸多挑战。核电装备结构复杂、精度要求高,其传统成形加工依赖于冶炼、铸锻造等工艺,不仅需要大规模耗材和重型装备,且制造工艺复杂、周期长、一次合格率低。此外,核反应堆环境极端苛刻,材料长期处于中子高辐射作用下,易产生缺陷和杂质聚集,导致脆化和肿胀等失效问题[8-10]。因此,如何突破复杂精密核电装备的制造难题,并提升材料的抗辐照性能,已成为先进核能材料领域的重要研究方向。316L不锈钢因其优异的力学性能、耐腐蚀性及抗辐照性能,被广泛应用于二代核反应堆的燃料组件及管道结构,并因其良好的经济性成为三代及四代反应堆的重要候选材料。近年来,增材制造技术在316L不锈钢的制备与应用方面发展迅速,为核能领域复杂结构部件的高效制造提供了新的技术路径。目前,针对核电用增材制造316L不锈钢主要集中在微观结构、力学性能以及耐腐蚀性方面[11-13],对抗辐照效应的研究较少。由于中子辐照实验具有放射性,实验时间长,而离子辐照与中子辐照导致材料损伤具有一定相似性,所以采用高能离子束来研究材料辐照损伤以及辐照效应的方法已被广泛实验,主要包括氦离子和重离子[14-16]。

施建辉等[17]研究表明SLM制备的316不锈钢具有柱状晶结构和高密度胞壁状亚晶,且在3.5 MeV Fe离子辐照后发生辐照硬化,但硬化率低于传统制造316不锈钢,并呈现一定的各向异性。Sun等[18]研究发现SLM制备的316L不锈钢在450 ℃下经He离子辐照后仍保持其蜂窝状亚晶和纳米氧化物夹杂物结构,且相比传统不锈钢,气泡密度、膨胀率和硬度变化均降低,表明亚晶界和纳米氧化物界面可作为氦气泡的有效陷阱,从而提高材料的耐氦性能。邹阳等[19]研究表明AISI 304L奥氏体不锈钢在120 keV氩离子室温辐照后产生辐照空洞、位错、黑斑、堆垛层错四面体(SFT)及位错环等缺陷,且随辐照剂量增加,位错环和孔洞尺寸增长,同时退火残留孪晶作为缺陷陷阱促进孪晶界处缺陷团簇的密集析出。

为深入研究离子辐照对增材制造316L不锈钢辐照损伤行为的影响,本工作分别采用SLM和DED两种典型增材制造工艺制备316L不锈钢样品,并系统分析其辐照前的微观组织特征,开展3.5 MeV铁离子辐照实验,设置多个剂量水平。通过纳米压痕测试与X射线衍射(XRD)分析,评估样品的辐照硬化行为与物相稳定性。其研究结果将为增材制造316L不锈钢在核能等辐照服役环境中的性能变化与工艺优化提供重要的实验依据与理论支撑。

1　实验材料与方法

采用SLM和DED两种增材制造工艺制备316L不锈钢样品。SLM工艺所使用的316L不锈钢金属粉末通过气雾法制备,粉末呈球形,球形度为0.855,粒径分布在15~53 μm之间,中值粒径为25.3 μm,化学成分如表1所示。增材过程中采用交叉扫描(cross hatching)策略,为降低相邻层激光矢量重合概率,设置了较长的激光矢量。主要工艺参数包括激光功率为260 W、扫描速度为1200 mm/s、填充间距为0.12 mm。增材完成后,样品在随平台自然冷却,并通过线切割方式获取试样。最终获得的SLM增材件尺寸为

表1　316L不锈钢粉末元素成分(质量分数/%)

Table 1　Chemical composition of 316L stainless steel powder (mass fraction/%)

C	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	O	N	Si	Fe
≤0.03	≤2.0	16.0-18.0	10.0-14.0	2-3	≤0.02	≤0.02	≤0.08	≤0.1	≤1.0	Bal.

80 mm ×30 mm ×30 mm。DED 工艺所用金属粉末亦为气雾化制备的 316L 不锈钢，粉末特性与 SLM 工艺所用粉末相同，即球形度为 0.855，粒径范围 15～53 μm，中值粒径为 25.3 μm。采用尺寸为 150 mm×150 mm×30 mm 的 316L 不锈钢块作为基材，扫描策略同样采用交叉扫描方式。主要工艺参数包括激光功率为 2000 W、送粉速率为 1 r/min、扫描速度为 1100 mm/min，所制备的 DED 样品尺寸为 65 mm × 30 mm ×30 mm。

金相分析与辐照性能测试所用试样均沿垂直于打印方向（即沉积方向）进行切割。切割后的试样经 400#～3000#砂纸逐级打磨，并使用 3.5 μm 金刚石悬浮液进行机械抛光，以获得镜面质量的抛光表面。对于金相观察，试样抛光后采用王水（$HCl:HNO_3$=3∶1，体积比）进行化学腐蚀，以显现显微组织特征。金相组织通过光学显微镜（OM）和扫描电子显微镜（SEM）进行观察分析；样品的相结构则采用 X 射线衍射仪（XRD）进行表征，扫描范围设定为 30°～90°。

离子辐照实验在中国科学院近代物理研究所的 320 kV 高电荷态离子综合研究平台上完成。为实现高效的位移损伤效果，选用能量为 3.5 MeV 的 11 价铁（Fe）离子作为辐照粒子。在实验过程中，样品在室温条件下接受辐照处理，注量分别设定为 0.94×10^{15}、9.4×10^{15} ion·cm^{-2}。辐照损伤的数值模拟采用 SRIM-2013 软件进行，如图 1 所示，并以原子位移次数（displacements per atom，dpa）作为衡量辐照损伤程度的指标。dpa 表示材料中每个原子平均被打出其晶格位置的次数。模拟结果显示，3.5 MeV 铁离子的损伤峰位于样品表面以下约 860 μm 处，最大入射深度可达 1300 μm。对应于上述两种注量条件，模拟计算得到的最大离位损伤分别为 1 dpa 和 10 dpa。

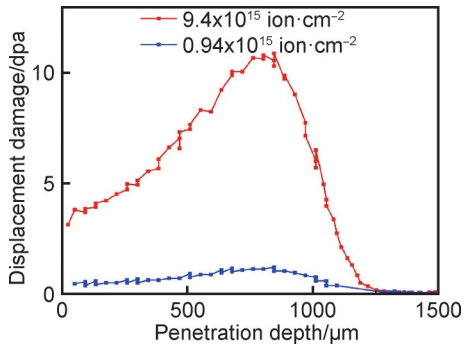


图 1 模拟 3.5 MeV Fe 离子辐照损伤分布

Fig.1 Distribution of damage from 3.5 MeV Fe ion irradiation simulation

为评估铁离子辐照对增材制造 316L 不锈钢样品力学性能的影响，采用纳米压痕技术对辐照前后样品进行表征与分析。为确保测试结果的代表性与准确性，每个样品选取 5 个不同位置进行测试，且相邻两个压痕点之间的间距不小于 30 μm（约为压入深度的 20 倍以上），以避免压痕间相互干扰。测试过程中压入深度统一设定为 1.5 μm。每个位置均进行 5 次独立压痕测试，最终取其平均值以降低偶然误差，提高数据可靠性。所得实验数据基于 Nix-Gao 应变梯度塑性理论模型进行分析，得到纳米压痕硬度随压入深度变化的关系曲线。此外，为研究辐照对样品相结构的影响，采用 X 射线衍射仪（XRD）对辐照后样品进行相分析，扫描角度范围设定为 30°～90°。该方法可用于判断辐照是否引发相变，并进一步分析不同相组分的演化规律，从而揭示辐照对材料微观结构的作用机制。

2 结果与分析

2.1 激光增材制造 316L 不锈钢微观组织

图 2 为 SLM 316L 不锈钢在不同放大倍率下的典型金相组织，图中清晰地呈现出增材制造金属特有的层带状结构。该层带结构的形成与激光光束的高斯能量分布密切相关：激光光斑中心的能量密度较高，两侧则相对较低，导致中心区域熔深较大、边缘区域熔深较浅，从而在成形过程中形成弧形的熔合线。此外，相邻熔池之间存在明显的重熔区域。在每个熔池内部，可观察到细密交错的柱状晶粒，这些晶粒自熔池边界沿着最大温度梯度方向发生外延生长，并穿越熔合线延续生长。在晶粒生长过程中，部分晶粒因具备有利的晶体取向或处于更优的局部热力学条件下，其生长速度更快、晶粒尺寸更大，形成所谓的“优势晶粒”。这些优势晶粒在持续生长的过程中会对周围晶粒产生阻碍效应，限制其扩展，最终形成具有明显择优取向的柱状晶组织。SLM 成形的 316L 不锈钢金相组织呈现为单一奥氏体相。这主要归因于 SLM 过程中极高的冷却速率，有效抑制了奥氏体向其他相的转变。同时，由于激光加热速率极快，形成的奥氏体相具有较高的过热度，使其实际形核温度升高，从而进一步稳定奥氏体的存在，显著降低了其他相的生成可能性。

图 3 为选区激光熔化制备 316L 不锈钢亚结构，从图中可见，除了通过晶粒的外延生长形成柱状晶外，SLM 制备的 316L 不锈钢内部还形成了尺寸约为 1 μm 的细小亚结构。在这些 SLM 成形样品中，可观察到多种形貌各异的亚结构，主要包括均匀分布的蜂窝状、柱状以及伸长四边形等形态特征。这类亚结构的形成主要归因于激光选区熔化过程中极高的冷却速率，

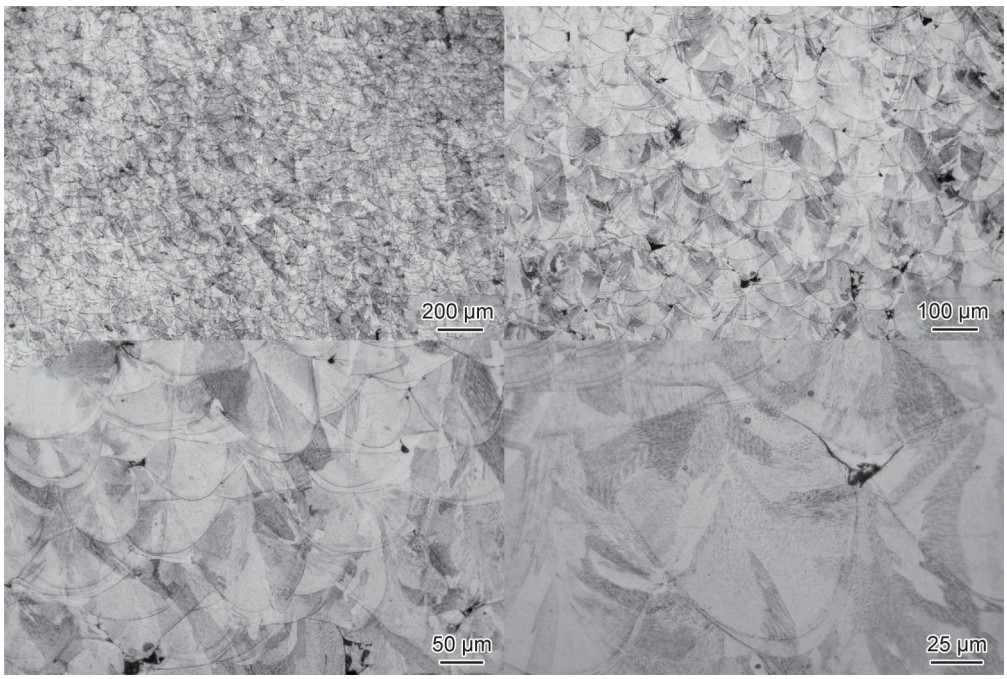


图2　选区激光熔化制备316L不锈钢金相组织

Fig.2　Microstructure of 316L stainless steel prepared by SLM

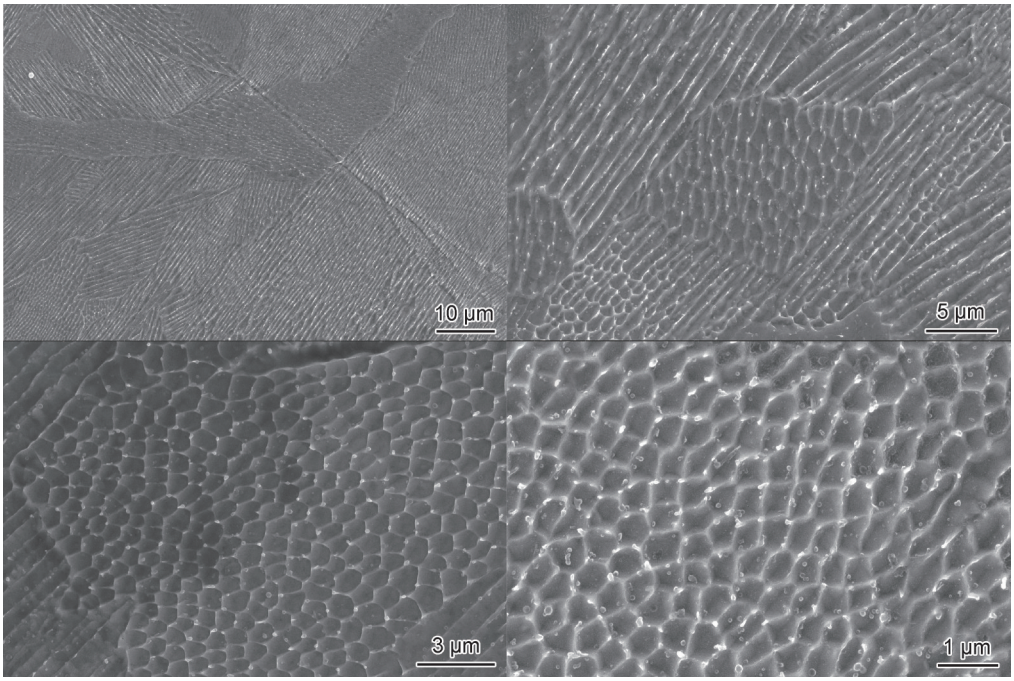


图3　选区激光熔化制备316L不锈钢亚结构

Fig.3　Substructure of 316L stainless steel prepared by SLM

导致Mo、Cr、Ni等合金元素在局部区域发生偏析，特别是在晶界或胞状晶粒边界附近形成元素富集区，从而构建出明显的“壁状”界面结构。根据凝固理论分析，熔池底部靠近基板，散热路径短、散热效率高，因此具有较大的温度梯度与凝固速度，有利于形成细密的蜂窝状亚结构。而熔池顶部接近自由表面，主要通过与空气之间的对流换热进行散热，冷却速率相对较低，温度梯度与凝固速度较低，因而更易形成柱状或伸长四边形等较粗大的亚结构。由此可见，不同部位由于热传导条件的差异，显著影响了亚结构的形貌演化过程，是导致组织非均匀性的关键因素之一。

图4为DED工艺制备的316L不锈钢的微观组织特征，从图中可见，灰白色的铁素体分布于奥氏体基体之上。铁素体主要呈板条状、针状以及少量骨架状

形态。该组织形貌表明材料经历了AF型凝固路径，即在凝固过程中首先形成奥氏体，随后在冷却阶段局部区域发生奥氏体向铁素体的固态转变。DED工艺制备的316L不锈钢的Cr、Ni和Mo含量使其Cr_{eq}/Ni_{eq}当量比处于具备铁素体形成倾向的范围，同时DED过程热输入高、冷却速率相对较低，为固态相变提供了有利条件。所形成的板条状与针状铁素体多见于A→F相变过程，而非初生铁素体常见的连续骨架状形貌，印证了材料主要经历了AF型凝固模式。在图中可以观察到，沉积层底部以针状铁素体为主；而中部和顶部则主要由板条状铁素体组成，部分区域还呈现出典型的纤维化结构。该组织演化特征与熔池的散热模式密切相关。由于热量主要通过熔池底部传导至基体，导致凝固过程自底部向顶部逐渐推进。在熔池底部，由于液态金属的过冷度较小，易于形成无枝晶的针状铁素体。随着固-液界面的上移，熔池中部区域的冷却速率逐渐降低，二次枝晶得以发育，形成组织过渡带，进而演化为板条状铁素体。在熔池顶部，由于散热速度进一步减缓，部分先生成的铁素体可能重新转变为奥氏体，从而形成不连续的骨架状结构。不同的激光增材制造工艺对最终微观组织的形成具有显著影响。SLM工艺由于热输入较低且冷却速率极高，使得组织中奥氏体含量较高，铁素体含量一般不超过3%。同时，较大的温度梯度促使晶粒趋于等轴化，形成典型的胞状晶结构。而DED工艺热输入较大、冷却速率相对较低，致使铁素体含量明显上升，可达30%～50%。在较低温度梯度条件下，铁素体得以充分生长，部分区域呈现枝晶状特征。

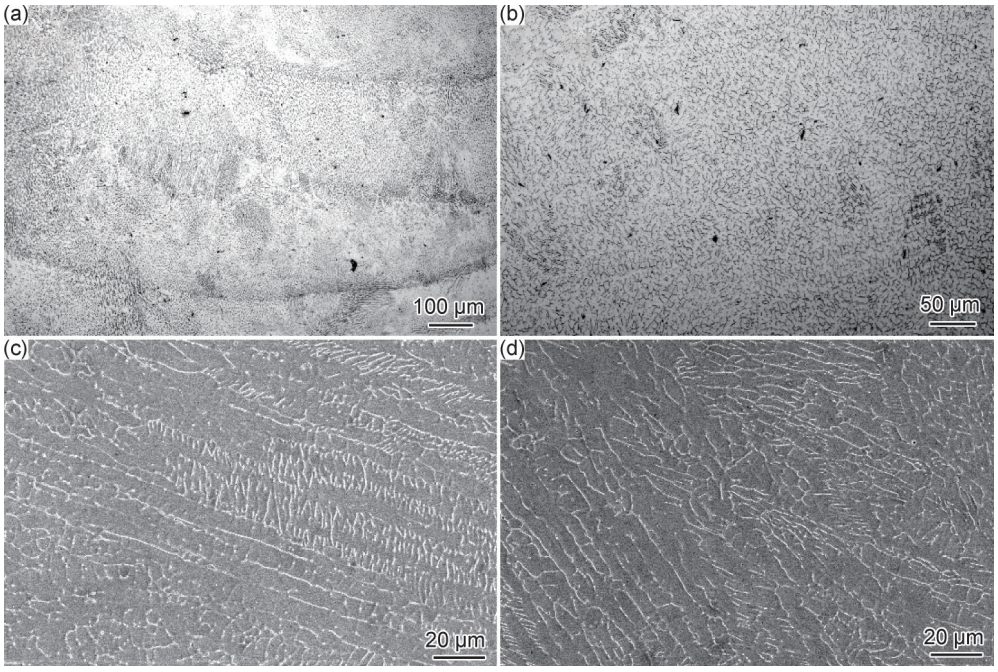


图4 激光定向能量沉积316L不锈钢微观组织

(a)，(b)金相组织；(c)，(d)铁素体形态

Fig.4 Microstructure of 316L stainless steel prepared by laser directed energy deposition

(a)，(b)metallographic structure；(c)，(d)ferrite morphology

2.2 铁离子辐照后物相变化

图5(a)为SLM制备316L不锈钢的XRD图谱。XRD分析结果表明，辐照前的316L不锈钢主要由奥氏体相组成，具有典型的面心立方(FCC)晶体结构。图谱中清晰可见(111)、(200)和(220)晶面的衍射峰，其中(111)与(200)晶面表现出较强的择优取向，说明SLM过程中高过冷度与定向凝固机制共同促进了晶粒在这些晶面方向上的择优生长。辐照后样品的主要相仍为奥氏体，未检测到任何第二相的生成，表明铁离子辐照并未诱发新的相变，材料的物相组成保持稳定。进一步观察显示，尽管晶面取向在辐照前后基本保持一致，但衍射峰强度略有下降。在辐照过程中，材料内部会引入大量晶体缺陷，包括点缺陷(如空位和间隙原子)、位错环以及错配界面等，显著提高了缺陷密度。这些缺陷破坏了晶体原有的周期性排列，使得X射线布拉格衍射条件不再理想，导致衍射峰强度降低，峰形变宽。此外，辐照诱导的缺陷在局部区域形成应力场，引起晶格常数微小变化，从而造成晶格畸变，进一步扰乱了相干衍射过程。与此同时，原子长程有序度也因辐照而下降，晶体结构逐步向无序

态演化，特别是在晶界及亚晶界区域更加显著，从而导致衍射信号进一步减弱。由于缺陷密度升高，X射线在样品中发生非弹性散射的概率也随之增加，导致部分X射线未能满足布拉格条件参与衍射，最终引起XRD图谱中衍射峰强度的下降。然而，需要指出的是，尽管衍射强度略有降低，样品的物相组成未发生变化，晶面取向仍保持稳定，说明材料的晶体结构在辐照后仍具有良好的整体稳定性。

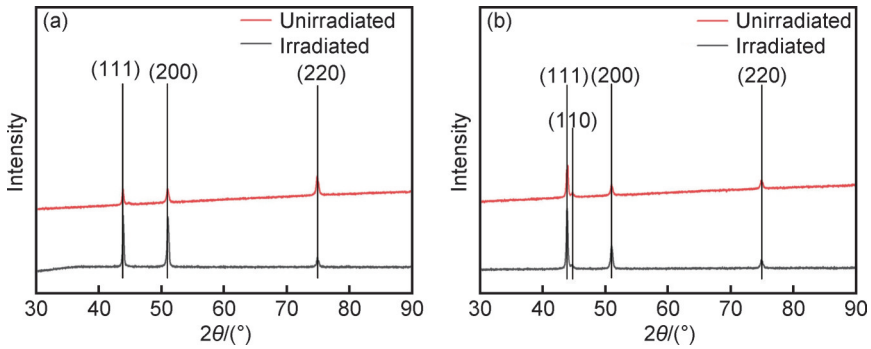


图5　铁离子辐照前后316L不锈钢XRD图谱

(a)选区激光熔化；(b)定向能量沉积

Fig.5　XRD patterns of 316L stainless steel before and after Fe ion irradiation

(a)SLM；(b)DED

图5(b)为DED工艺制备的316L不锈钢的XRD图谱。辐照前，样品主要由奥氏体相组成，同时可见少量铁素体相。图谱中出现了4个主要的衍射峰，分别对应于(111)、(110)、(200)和(220)晶面，其中(111)晶面的衍射强度最高，表明材料在该方向上具有显著的择优取向。该特征与DED过程中较高的过冷度及定向凝固条件密切相关，促进了晶粒沿特定晶面方向尤其是(111)的优先生长。尽管奥氏体为主导相，图谱中仍可观察到少量铁素体相的存在。这主要归因于DED过程中的高温熔池环境以及元素在固液界面处的扩散行为，使得在局部区域形成了铁素体第二相。辐照后，DED样品的XRD图谱中未出现任何新增衍射峰，说明辐照过程中未诱发新相生成，原有的奥氏体与铁素体相组成基本保持不变。因此，DED制备的316L不锈钢在铁离子辐照条件下表现出良好的相稳定性，未发生明显的相变行为，显示出一定的抗辐照能力。

2.3　增材制造316L不锈钢铁离子辐照硬化

图6(a)为SLM工艺制备的316L奥氏体不锈钢在铁离子辐照前后，纳米压痕硬度(H)随压入深度(D)变化的关系曲线。从图中可见，所有样品的压痕硬度均随压入深度的增加而降低，呈现出典型的“尺寸效应”特征(indentation size effect，ISE)。该现象主要归因于压入初期载荷作用下，位错源密度较低、几何限制显著，导致单位体积内的位错活动更为困难，从而表现出更高的硬度；而随着压入深度加大，位错源逐渐被激活与扩展，塑性变形更易发生，硬度随之下降[20-21]。为提高数据的代表性与分析准确性，图中已剔除压入深度小于100 nm的测试数据，以避免表面粗糙度与初始接触不稳定性造成的误差影响。对比分

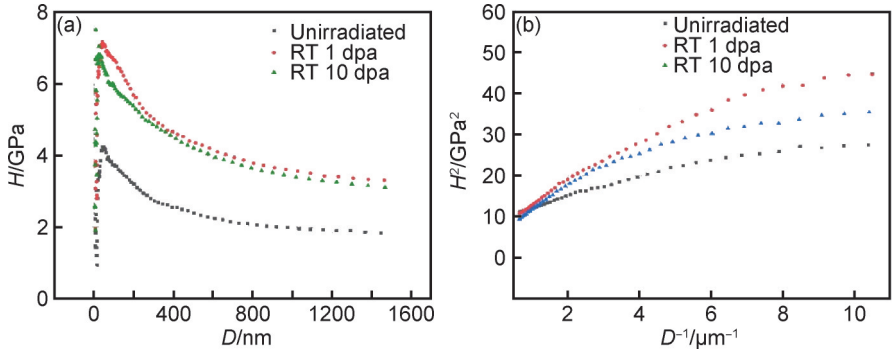


图6　选区激光熔化316L不锈钢纳米压痕硬度

(a)纳米压痕硬度随压入深度变化；(b)H^2与D^{-1}的关系

Fig.6　Nanoindentation hardness of SLM 316L stainless steel

(a)variation of nanoindentation hardness with indentation depth；(b)relationship between H^2 and D^{-1}

析发现，经过不同注量铁离子辐照处理后的样品均表现出明显的硬化趋势，尤其是在压入深度小于辐照损伤层厚度（约100～200 nm）范围内，硬度提升最为显著。这表明辐照在材料表层引入了大量缺陷结构（如位错环、空位簇、纳米空洞等），这些缺陷在后续加载过程中对位错运动产生强烈的钉扎作用，从而提高了材料的抗塑性变形能力，形成明显的辐照硬化效应[22]。当压入深度超过损伤层厚度后，压头逐渐探入未受辐照影响的基体区域，硬度值趋于回落，接近未辐照态的水平，进一步验证了辐照效应的深度依赖性。

图6（b）基于Nix-Gao应变梯度塑性理论模型对实验数据进行线性拟合（以硬度平方与1/深度为坐标），可进一步量化材料的基体硬度与硬化指数。拟合结果表明，随着辐照注量从1 dpa增加至10 dpa，样品的表面硬度持续上升，但硬度增幅逐渐减缓，呈现出典型的辐照硬化饱和行为。该现象可能与高剂量辐照下缺陷的空间饱和、缺陷间的交互作用与湮灭机制增强有关，即进一步注入的离子不再有效生成新缺陷，或生成缺陷被已有缺陷捕获和湮灭，从而使得硬化效应趋于饱和[23]。

图7为不同铁离子辐照剂量条件下，采用DED工艺制备的316L不锈钢样品，其纳米压痕硬度随压入深度的演变规律。如图7（a）所示，所有样品均表现出明显的尺寸效应特征，即硬度随着压入深度的增加逐渐降低。这种现象反映出表层区域中应变梯度对材料塑性行为的显著影响。值得注意的是，辐照后样品在浅层区域（<200 nm）硬度显著提高，表明辐照诱导的硬化效应尤为显著。该现象主要归因于高能铁离子在材料近表面引入了大量辐照缺陷，如位错环、空位簇和间隙原子团簇等，这些缺陷在微观尺度上对位错运动形成强钉扎作用，从而提升局部硬度。为进一步解析硬度演化行为的内在机制，采用Nix-Gao应变梯度塑性模型对硬度-深度关系进行了拟合分析，结果如图7（b）所示。拟合曲线显示，在压入深度超过150～200 nm后，硬度-深度曲线逐渐偏离理论线性趋势，呈现出一定的非线性特征。这种偏离可能源于较深区域内辐照缺陷诱发的局部应力场变化及位错交互作用增强，从而使材料的变形响应更加复杂。此外，相较于SLM样品，DED样品在不同辐照剂量下的硬度变化幅度整体较小，且硬化趋势在较低剂量阶段即趋于饱和。图8（a）中给出了不同辐照剂量下SLM样品的平均压痕硬度值：未辐照样品为2.81 GPa，辐照至1 dpa和10 dpa后分别升高至3.91 GPa和4.33 GPa。其中，1 dpa处理相较于未辐照状态提升了约39%，而10 dpa样品则提高约54%；相比之下，1～10 dpa之间仅增长约7.8%，进一步印证了高剂量下辐照硬化的饱和趋势。图8（b）进一步量化了不同辐照剂量下样品的平均纳米压痕硬度。未辐照DED样品的平均硬度为2.70 GPa，在1 dpa和10 dpa辐照后分别上升至3.81 GPa和4.10 GPa，分别提升约41%和52%。然而，1～10 dpa之间的硬度增幅仅为约7.6%，显示出在较高剂量辐照条件下，DED样品的硬化效应逐渐趋于饱和。对比SLM与DED工艺下样品的辐照硬化行为，可以看出两者虽均表现出显著的辐照硬化效应，但在硬化幅度和机理响应方面存在明显差异。SLM样品具有更高的初始硬度和更明显的尺寸效应，其辐照后硬化幅度亦略高于DED样品。这主要归因于SLM工艺形成的细小等轴晶组织、高位错密度和致密成形结构，有利于增强辐照缺陷的钉扎作用并叠加其硬化效果。相比之下，DED样品则呈现出粗大柱状晶粒、明显的冶金缺陷以及整体组织均匀性较差等特点，这些因素使其基体硬度偏低，且对辐照缺陷的响应相对迟缓，导致硬化幅度有限，硬化趋势更早进入饱和阶段。

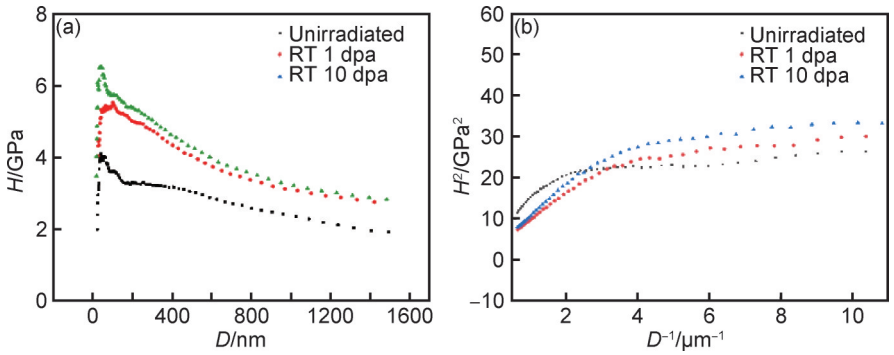


图7 定向能量沉积316L不锈钢纳米压痕硬度

（a）纳米压痕硬度随压入深度变化；（b）H^2与D^{-1}的关系

Fig.7 Nanoindentation hardness of DED 316L stainless steel by laser directed energy deposition

(a)variation of nanoindentation hardness with indentation depth; (b) relationship between H^2 and D^{-1}

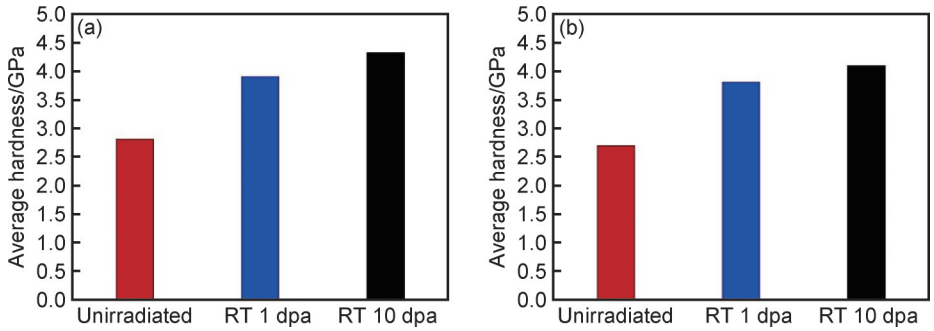


图8　辐照前后增材制造316L不锈钢纳米压痕平均硬度

(a)选区激光熔化;(b)定向能量沉积

Fig.8　Average nanoindentation hardness of additively manufactured 316L stainless steel before and after irradiation

(a)SLM;(b)DED

为深入揭示不同辐照剂量下材料硬化程度的差异机理,本研究引入经典的 Orowan 第二相强化理论对辐照硬化行为进行定量分析[24-25]。根据该理论,辐照诱导缺陷在材料中充当第二相粒子的作用,可有效阻碍位错运动,从而引起屈服强度的提升。其数学表达式如下所示:

$$\Delta\sigma_{\mathrm{V}} = \alpha M \mu \boldsymbol{b} \sqrt{Nd} \tag{1}$$

式中:$\Delta\sigma_{\mathrm{V}}$ 为辐照引起的屈服强度增量;α 为阻碍强度因子;M 为泰勒因子;μ 为剪切模量;$\boldsymbol{b}$ 为 Burgers 矢量;N 为辐照缺陷的体积密度(单位体积内缺陷数量);d 为缺陷的平均尺寸。式(1)表明,材料的屈服强度提升与缺陷体积分布密度和尺寸的平方根成正比,在其他材料常数不变的情况下,辐照诱导缺陷数量越多、尺寸越大,对位错运动的阻碍越强,进而导致更显著的力学性能提升。Orowan 模型强调的是缺陷对位错的“绕过机制”强化效应,即位错在运动过程中难以剪切这些缺陷,只能通过弯曲或缠绕方式通过,从而消耗更多能量。由于纳米压痕硬度与屈服强度之间通常存在良好的线性关系,因此该模型同样适用于解释辐照硬化引起的硬度增加趋势。在本工作中,采用激光增材制造(SLM 和 DED)制备的 316L 不锈钢样品在接受不同剂量的铁离子辐照后,表现出明显的硬度升高趋势。结合前述硬度-深度曲线和平均硬度变化规律可知,随着辐照剂量从 0 增加至 10 dpa,材料中形成大量位错环、空位簇等稳定缺陷。这些辐照产物在数量和尺寸上均随剂量增加而显著增长,从而提高了材料对位错运动的阻碍能力,导致宏观硬度的持续上升。

然而,在高剂量阶段,硬度的增长幅度趋于缓和,这与缺陷演化过程中的“饱和行为”密切相关。当材料中有效障碍源达到一定饱和程度后,新增辐照缺陷对硬化贡献逐渐减弱,导致硬度提升减缓。

3　结论

(1)SLM 与 DED 工艺制备的 316L 不锈钢样品在辐照前均呈现奥氏体为主的稳定相结构。SLM 样品组织致密、晶粒细小,DED 样品晶粒粗大,含有明显铁素体析出。

(2)经 3.5 MeV 铁离子辐照后,两类样品均表现出明显的辐照硬化效应。SLM 样品硬度由 2.81 GPa 升高至 4.33 GPa,提升约 54%;DED 样品硬度由 2.70 GPa 升高至 4.10 GPa,提升约 52%。

(3)在 1～10 dpa 范围内,DED 样品硬度提升约 7.6%,早于 SLM 样品出现硬化饱和。Nix-Gao 模型拟合表明,SLM 样品具备更高的基体硬度和硬化指数,展现出更优的抗辐照硬化能力。

参考文献

[1] Das T, Mukherjee M, Chatterjee D, et al. A comparative evaluation of the microstructural characteristics of L-DED and W-DED processed 316L stainless steel[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2023, 40: 114-128.

[2] Xu X N, Kumar P, Cao R Q, et al. Exceptional cryogenic-to-ambient impact toughness of a low carbon micro-alloyed steel with a multi-heterogeneous structure[J]. Acta Materialia, 2024, 274: 120019.

[3] SaGong M J, Kim R E, Lee J A, et al. Enhanced strength-ductility synergy in stainless steel 316L through hierarchically tailored microstructure via laser-based repair deposition[J]. Materials Research Letters, 2024, 12(10): 709-718.

[4] 曹浩. 316L 不锈钢激光同轴熔丝成形工艺与组织性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2023.
Cao H. Study on forming process and microstructure properties of laser coaxial wire deposition with 316L stainless steel[D]. Suzhou: Soochow University, 2023.

[5] 姚俊卿, 刘鑫旺, 刘洁, 等. 钛合金激光送丝沉积增材制造技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(9): 19-30.

Yao J Q, Liu X W, Liu J, et al. Research progress of wire-feeding laser metal deposition additive manufacturing technology for titanium alloys[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(9): 19-30.

[6] 蒋华臻,彭爽,胡琦芸,等.激光熔化沉积制备316L不锈钢的电化学腐蚀及空化腐蚀性能[J].金属学报,2024,60(11):1402804.
Jiang H Z, Peng S, Hu Q Y, et al. Corrosion and cavitation erosion resistance of 316L stainless steels produced by laser metal deposition[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2024, 60(11): 1402804.

[7] Revilla R I, Van Calster M, Raes M, et al. Microstructure and corrosion behavior of 316L stainless steel prepared using different additive manufacturing methods: a comparative study bringing insights into the impact of microstructure on their passivity[J]. Corrosion Science, 2020, 176: 108914.

[8] 董元元,罗英,杜华,等.辐照温度对反应堆压力容器材料辐照脆化行为的影响规律研究[J].核动力工程,2024,45(增刊2):102-109.
Dong Y Y, Luo Y, Du H, et al. Study on irradiation temperature impact on irradiation embrittlement behavior of RPV material[J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(S2): 102-109.

[9] 胡爽,万明攀,朱特,等.核用钛合金辐照效应的研究现状与展望[J].稀有金属材料与工程,2025,54(1):232-242.
Hu S, Wan M P, Zhu T, et al. Research status and prospect of irradiation effects of titanium alloys for nuclear applications[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2025, 54(1): 232-242.

[10] 高俊宣,曹晗,匡文军,等.奥氏体钢辐照促进应力腐蚀开裂行为机制的研究进展[J].中国腐蚀与防护学报,2024,44(4):835-846.
Gao J X, Cao H, Kuang W J, et al. Research progress on irradiation assisted stress corrosion cracking behavior and mechanism of austenitic steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(4): 835-846.

[11] 熊操,吴智,黄上甫,等.核电用316L不锈钢中厚板焊接工艺研究[J].金属加工(热加工),2025(1):51-57.
Xiong C, Wu Z, Huang S F, et al. Research on the welding process of 316L stainless steel medium thick plate for nuclear power[J]. MW Metal Forming, 2025(1): 51-57.

[12] 高天锡,王磊,冯盛洲,等.含裂纹316L不锈钢核电管道激光增材修复工艺研究[J].苏州科技大学学报(工程技术版),2024,37(3):74-80.
Gao T X, Wang L, Feng S Z, et al. Research on laser reinforcement repair process of cracked 316L stainless steel nuclear power pipes[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology Edition), 2024, 37(3): 74-80.

[13] 杨青峰,高士鑫,陈平,等.核电用316L不锈钢粉末增材制造研究现状[J].精密成形工程,2023,15(5):209-219.
Yang Q F, Gao S X, Chen P, et al. Current research status of additive manufacturing of 316L stainless steel powder for nuclear power[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 209-219.

[14] 张向阳.氢离子辐照对钼金属表面缺陷演化行为研究[D].西安:西安建筑科技大学,2024.
Zhang X Y. Evolution behavior of molybdenum surface defects induced by hydrogen ion irradiation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2024.

[15] 安瞻,徐驰,龚翱翔,等.15-15Ti奥氏体不锈钢中D、He、Ne离子辐照损伤的TEM表征[J].材料导报,2025,39(6):173-178.
An Z, Xu C, Gong A X, et al. TEM characterization of D, He, Ne ion irradiation damage of 15-15Ti austenitic stainless steel[J]. Materials Reports, 2025, 39(6): 173-178.

[16] 郭义盼,苏洋帆,张同林,等.7075铝合金的Fe^{11+}离子辐照损伤研究[J].强激光与粒子束,2023,35(10):106-111.
Guo Y P, Su Y F, Zhang T L, et al. Study on Fe^{11+} ion irradiation damage of 7075 aluminum alloy[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(10): 106-111.

[17] 施建辉,全琪炜,刘政平,等.增材制造316不锈钢的Fe离子辐照硬化[J].粉末冶金技术,2025,43(1):116-122.
Shi J H, Quan Q W, Liu Z P, et al. Irradiation hardening of Fe ions in additive manufacturing 316 stainless steels[J]. Powder Metallurgy Technology, 2025, 43(1): 116-122.

[18] Sun X Y, Chen F D, Huang H, et al. Effects of interfaces on the helium bubble formation and radiation hardening of an austenitic stainless steel achieved by additive manufacturing[J]. Applied Surface Science, 2019, 467/468: 1134-1139.

[19] 邹阳,王晓彤,吕鹏,等.氩离子辐照304奥氏体不锈钢的微观结构状态研究[J].真空科学与技术学报,2021,41(12):1213-1217.
Zou Y, Wang X T, Lv P, et al. Study on the microstructure of 304 austenitic stainless steel under argon ion irradiation[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(12): 1213-1217.

[20] 乔永丰,雷玉成,姚奕强,等.焊接方法对316L不锈钢焊缝抗辐照损伤性能的影响[J].焊接学报,2023,44(5):77-83.
Qiao Y F, Lei Y C, Yao Y Q, et al. Effect of welding method on irradiation damage resistance of 316L stainless steel weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(5): 77-83.

[21] Li X Z, Zhang W X, Han M D, et al. Indentation size effect: an improved mechanistic model incorporating surface undulation and indenter tip irregularity[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 143-153.

[22] Fukumoto K I, Mabuchi T, Yabuuchi K, et al. Irradiation hardening of stainless steel model alloy after Fe-ion irradiation and post-irradiation annealing treatment[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 557: 153296.

[23] Lin J W, Chen F D, Tang X B, et al. Radiation-induced swelling and hardening of 316L stainless steel fabricated by selected laser melting[J]. Vacuum, 2020, 174: 109183.

[24] 侯娟,刘慧,陈亮,等.选区激光熔化成形304L不锈钢氦泡长大与辐照硬化行为[J].材料导报,2024,38(2):194-199.
Hou J, Liu H, Chen L, et al. Study of helium bubbles growth and hardening of selective laser melting 304L stainless steel under He^{+} irradiation[J]. Materials Reports, 2024, 38(2): 194-199.

[25] Edwards D J, Simonen E P, Bruemmer S M. Evolution of fine-scale defects in stainless steels neutron-irradiated at 275 ℃[J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, 317(1): 13-31.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52205380);湖北省核电运行工程技术研究中心应用基础基金项目(YYJJ-CNPO-2023-02)
收稿日期:2025-05-21;**录用日期**:2025-07-10

通讯作者:王建峰(1989—),男,副教授,博士,主要研究方向为激光焊接及再制造技术,联系地址:江苏省南京市江宁区将军大道29号南京航空航天大学将军路校区(211106),E-mail:wangjianfeng@nuaa.edu.cn

(本文责编:张宝玲)