

引用格式: 张新彬, 潘鑫磊, 周留成, 等. 飞秒激光诱导周期性表面结构的特征与调控[J]. 航空材料学报, 2026, 46(10): 84-95.
ZHANG Xinbin, PAN Xinlei, ZHOU Liucheng, et al. Characteristics and control of femtosecond laser-induced periodic surface structures[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(10): 84-95.

飞秒激光诱导周期性表面结构的特征与调控

张新彬^{1,2}, 潘鑫磊¹, 周留成^{1,2}, 尹贻祯², 崔路卿², 魏小龙¹,
蔡 宇¹, 梁晓晴¹, 何卫锋^{1,2*}

(1. 空军工程大学 航空动力系统与等离子体技术全国重点实验室, 西安 710051; 2. 西安交通大学 机械工程学院 航空发动机研究所, 西安 710049)

摘要: 飞秒激光诱导周期性表面结构(laser-induced periodic surface structures, LIPSS)能够显著提升金属材料的耐磨性、润湿性及自清洁性能, 为表面功能化改性提供新途径。以 1Cr18Ni10Ti 不锈钢为对象, 系统探究激光能量密度、光斑搭接率及扫描次数对 LIPSS 形貌特征的影响规律。结果表明, 在多脉冲条件下, 增大激光能量密度可提高低空间频率(low-spatial frequency LIPSS, LSFL) LIPSS 的尺寸与周期, 但能量密度过高会导致高空间频率(high-spatial frequency LIPSS, HSFL) LIPSS 均匀性下降甚至结构破坏; 光斑搭接率增加促使 LIPSS 形貌从条纹状 HSFL 逐步过渡为 HSFL/LSFL 复合结构, 最终形成包状 LSFL, 其尺寸随搭接率提升而显著扩大; 扫描次数增加虽类似能量密度增大的效果, 但可进一步提升 HSFL 的分布均匀性, 且避免对其结构的破坏。单脉冲实验中, LIPSS 的空间周期由光斑中心向外逐渐降低, 且中心区域周期随能量密度增加而增大, 揭示了表面结构化与熔融效应耦合作用的机理。研究结果为飞秒激光诱导 LIPSS 的形貌调控优化提供关键理论支撑, 可推动该技术在航空材料领域的应用。

关键词: 飞秒激光; 激光诱导表面周期性结构; 形貌特征; 调控机制

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000031

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000031

中图分类号: V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)10-0084-12

Characteristics and control of femtosecond laser-induced periodic surface structures

ZHANG Xinbin^{1,2}, PAN Xinlei¹, ZHOU Liucheng^{1,2}, YIN Yizhen², CUI Luqing², WEI Xiaolong¹,
CAI Yu¹, LIANG Xiaoqing¹, HE Weifeng^{1,2*}

(1. National Key Laboratory of Aerospace Power System and Plasma Technology, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Institute of Aeronautics Engine, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Femtosecond laser-induced periodic surface structures (LIPSS) can significantly enhance the wear resistance, wettability, and self-cleaning capabilities of metallic materials, providing a novel approach for functional surface modification. This study systematically investigates the effects of laser fluence, spot overlap rate, and scanning passes on the morphological characteristics of LIPSS on 1Cr18Ni10Ti stainless steel. Experimental results indicate that under multi-pulse conditions, increasing the laser fluence enlarges the dimensions and periodicity of low-spatial frequency (LSFL) LIPSS, but excessively high fluence degrades the uniformity or even damages high-spatial frequency (HSFL) LIPSS. Increasing the spot overlap rate induces a morphological transition of LIPSS from stripe-like HSFL to a composite structure of HSFL/LSFL, ultimately forming aggregated LSFL clusters with expanded dimensions. Additional scanning passes mimic the effect of higher fluence while improving HSFL distribution uniformity without structural damage. In single-pulse experiments, the spatial period of LIPSS decreases radially from the spot

center, and the central period increases with higher fluence, revealing the coupling mechanism of surface structuring and melting effects. These findings provide critical theoretical support for the morphological control of LIPSS, advancing the application of femtosecond laser technology in aerospace materials.

Key words: femtosecond laser; laser-induced periodic surface structure; morphological feature; control mechanism

近年来,飞秒激光(脉宽 10^{-15} s)表面加工技术凭借其超高精度、超高空间分辨率和超高广泛性等优势得到迅速发展^[1]。利用飞秒激光诱导 LIPSS 可实现功能化表面制备,例如减反、耐磨、疏水、防除冰等^[2-8],是飞秒激光表面改性技术发展的重要方向之一。实现表面功能化的微观基础在于表面周期性结构,其形貌特征直接决定了材料表面的宏观性能。目前,LIPSS 取向、空间周期和尺寸特征的控制主要通过调控光源特性、加工工艺和外加激励辅助等方式实现。

在光源特性调控方面,Skoulas 等^[9]以镍薄膜为靶材,研究了不同飞秒激光偏振方向如线性(linear)、径向(radial)偏振和角向(azimuthal)偏振对 LIPSS 形貌特征的影响规律。结果显示与线性偏振激光诱导的简单条纹状 LIPSS 不同,径向和角向偏振激光作用下制备的 LIPSS 形状更为复杂,呈现沿径向和角向取向的菱形结构。Tsibidis 等^[10]进一步研究了三种偏振激光作用下激光脉冲数和能量密度对 LIPSS 空间周期的影响规律,发现激光脉冲数在 5~600 之间时,随脉冲数的提高,LIPSS 的空间频率逐渐上升,并在高脉冲数下达到饱和。与之相反的是,LIPSS 的空间周期对激光能量密度的依赖性较弱。通过综合分析三种偏振激光诱导的 LIPSS 特征,揭示了 LIPSS 的空间周期与光源空间分布和极化特性无关。

在工艺调控方面,Romano 等^[11]研究了圆偏振(circular polarisation)飞秒激光在 X6Cr17 奥氏体不锈钢上诱导 LIPSS 形貌特征,确定了不同类型 LIPSS 出现的窗口条件。该研究采用单位面积有效累积能量建立 LIPSS 形貌与工艺参数之间的关系,在低累积能量密度下,LIPSS 主要呈现周期性条纹状;随着累积能量密度的提高,逐渐演变为三角形(triangular-like);继续提高能量,则转变为波纹状与三角形混合;当超过一定阈值时,LIPSS 被破坏,表面被剧烈烧蚀。Fraggelakis 等^[12]以线性交叉双脉冲线偏振(double linearly crossed polarized pulses, XP)和逆向旋转双脉冲圆偏振激光(double counter-rotating circularly polarized pulses, CP)为光源,分别研究了时域整形(间隔时间为 0、 ± 1 、 ± 5 、 ± 10 ps)对不锈钢表面 LIPSS 形貌的影响规律。对

于 XP 光源,在脉冲间隔为 ± 1 ps 时,LIPSS 为均匀的三角形结构;随着脉冲间隔时间的延长,该结构逐渐消失。对于 CP 光源,在 $\pm 1 \sim \pm 5$ ps 时间范围内,三角形 LIPSS 均匀分布在材料表面;当间隔时间增加至 ± 10 ps,其均匀性逐渐降低。

在外加激励辅助方面,通过在飞秒激光加工过程中施加不同的氛围可以进一步提高 LIPSS 的空间周期性分布频率。Albu 等^[13]对比了空气、水、三氯甲烷和乙醇环境下飞秒激光烧蚀金属铬和钛表面诱导的 LIPSS 形貌演化规律。定量分析表明,在液体环境下,LIPSS 的空间周期(80~200 nm)相较于空气环境(460~550 nm)会降低 3~5 倍,在水环境下的间隔最小(80~120 nm),同时,液体环境下 LIPSS 的深度更大。Wang 等^[14]在金属铜和钛中也发现同样的现象,并且该研究结果表明,水环境下 LIPSS 产生的激光能量阈值相比于空气环境下降低了 30%。综合来看,飞秒激光加工过程中,施加液体环境可以提高 LIPSS 的空间分布频率,同时可以降低对激光能量的要求。

1Cr18Ni10Ti 奥氏体不锈钢,具有良好的韧性和耐蚀性,抗晶间腐蚀,具有良好的抗氧化性和持久强度,在航空上主要应用于液压导管材料,主要承担飞机和航空发动机上液压油的输送功能。航空液压导管一般由管体、外套螺母、平管嘴和扩口组成。在服役过程中,导管受到液压油压力脉动、飞机或发动机等结构振动作用而发生受迫振动,在平管嘴和导管的配合面形成相对位移而发生表面微动磨损损伤,同时在周期性振动应力的长期作用下产生疲劳裂纹并不断扩展,最终引发漏油,甚至疲劳断裂等严重事故,是典型的磨损损伤问题。据统计,在我国飞机及航空发动机故障中,液压导管故障占比超过一半,因此迫切需要进行强化处理。

研究表明,通过调控光源特性、加工工艺和外加激励辅助等方式可以实现 LIPSS 形貌结构的精确调控。但是,对于飞秒激光表面加工技术而言,调整激光能量、光斑搭接率和扫描次数是常规的工艺参数调控方法,工艺简单,操作性强。目前 LIPSS 结构的飞秒激光工艺参数影响规律和抗磨损机理尚不明确。本工作创新性开展能量密度、光斑搭接率、扫描次数等多参数协同调控 LIPSS 结构

研究,以 1Cr18Ni10Ti 不锈钢为研究对象,表征不同工艺参数下 LIPSS 结构形貌特征,获得激光能量、光斑搭接率、扫描次数等工艺参数对 LIPSS 形貌影响规律,采用时间分辨泵浦探测成像系统拍摄表面烧蚀形貌演化,为 LIPSS 制备提供理论和数据支撑。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为 1Cr18Ni10Ti 奥氏体不锈钢,具有良好的韧性和耐蚀性,其化学成分见表 1,力学性能见表 2。冶炼工艺为真空感应加电渣重熔,固溶处理工艺为 1000~1100 ℃ 温度下保温 5~30 min 后水冷。

1.2 实验方法

飞秒激光加工系统组成如图 1 所示,主要包括飞秒激光光源系统、光路传输组件、飞秒激光加工头、五轴运动机床、保护气氛施加系统和其他辅助部件等。飞秒激光光源采用 PH2-15 工业级固态飞秒激光器(Light conversion, 立陶宛),最大平均功率 15 W,可产生波长为(1030±10) nm 的高斯激光束,脉宽为 290 fs,最大重频 1 MHz,最大单脉冲能量 200 μJ,光束偏振态为线偏振,光斑直径为

表 2 1Cr18Ni10Ti 不锈钢基本力学性能

Table 2 Basic mechanical properties of 1Cr18Ni10Ti stainless steel

Tensile strength, σ_b /MPa	Elastic modulus, E /MPa	Elongation, δ_s /%	Sectional shrinkage, ψ /%
657	194	37	48

30 μm。五轴运动机床 X、Y、Z 轴定位精度≤5 μm, A 轴和 C 轴定位精度 10”。

在图 1 中采用超短脉冲的飞秒激光,通过非线性吸收实现材料的“冷加工”,显著减少热影响区(heat affected zone, HAZ),避免传统激光加工的热损伤问题,尤其适用于高精度微纳结构加工及热敏感材料处理。采用高速扫描振镜与 F-Theta 透镜的优化组合,实现大范围高速扫描,同时保持微米级聚焦精度。通过扩束器实时调节光斑尺寸,结合高斯光束的强度分布特性,实现能量密度的梯度控制。集成空气喷嘴与激光加工同步工作,利用定向高压气流实时清除加工碎屑,减少材料再沉积污染,同时辅助抑制加工区域的微量热积累,提升加工洁净度与工艺一致性。通过上述元件组成的飞秒激光加工系统解决了传统激光加工中热损伤、效率低、精度不足等问题,在微纳制造、生物医疗器件加工等领域具有显著创新性与应用潜力。

采用反射式泵浦探测系统对不锈钢飞秒激光辐照诱导的表面烧蚀特征进行表征,实现飞秒-纳秒时间范围内飞秒激光辐照烧蚀形貌和冲击波演化过程的连续成像,如图 2 所示。该系统主要基于反射成像原理搭建,泵浦光与垂直入射的探测光以一定的角度聚焦于金属材料表面,通过分析反射探

表 1 1Cr18Ni10Ti 不锈钢化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of 1Cr18Ni10Ti stainless steel (mass fraction/%)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Ti	Fe
0.12	2.00	0.015	0.01	0.80	9.00	18.00	0.70	Bal.

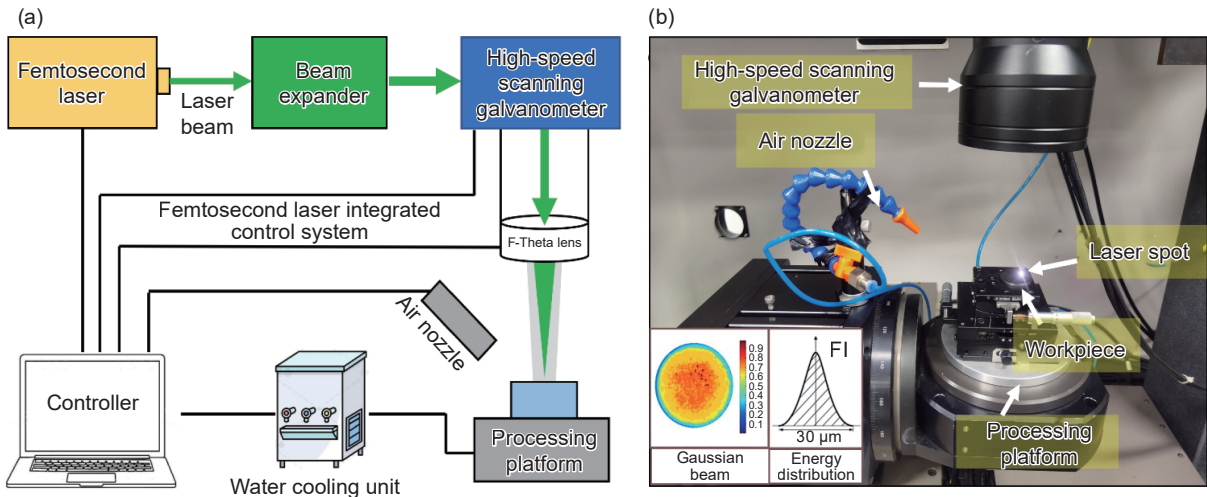


图 1 飞秒激光加工平台 (a)系统原理图; (b)加工台实物图

Fig. 1 Femtosecond laser processing platform (a) system principle diagram; (b) processing table physical drawing

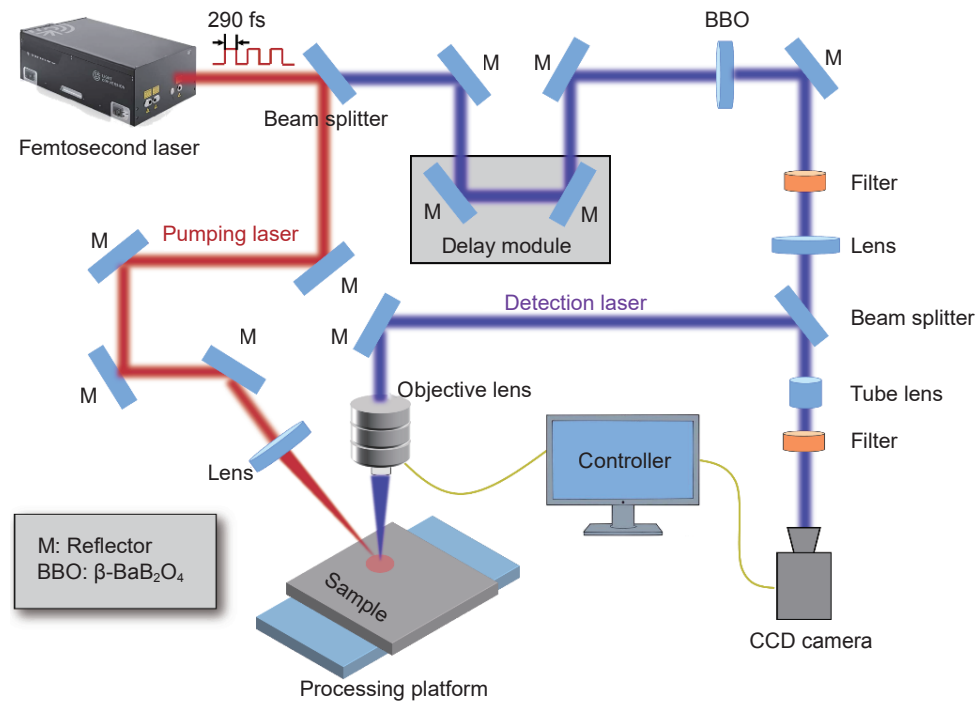


图 2 时间分辨反射式泵浦探测成像系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the time-resolved reflection-mode pump-probe imaging system

测光性质获得泵浦光辐照金属材料表面引起的瞬态光学性质和材料相变等超快动力学信息。

在飞秒激光加工前,通过机械研磨和抛光的方法将靶材表面粗糙度降低至 0.2 μm。基于飞秒激光加工平台性能指标和靶材特性(不锈钢的飞秒激光烧蚀能量密度阈值一般在 0.09~0.21 J/cm² [15-18]),设计不同能量密度单脉冲飞秒激光辐照不锈钢实验,如表 3 所示。在飞秒激光单脉冲研究基础上,开展多脉冲条件下不同能量密度、光斑搭接率、扫描次数等参数对 LIPSS 结构形貌影响规律研究,工艺参数如表 4 所示。采用 SEM(ZEISS evo10)、AFM (Bruker dimension fastscan)技术表征不同工艺参数下 LIPSS 结构形貌特征,获得工艺参数对 LIPSS 形貌影响规律。同时利用反射式泵浦探测系统对单个飞秒激光脉冲辐照不锈钢表面烧蚀形貌演化过程进行表征,成像时刻分别设置为 500 fs、1 ps、

表 3 飞秒激光单脉冲辐照不锈钢的实验参数
Table 3 Experimental parameters of femtosecond laser single-pulse irradiation on stainless steel

No.	Laser energy/μJ	Laser fluence/(J·cm ⁻²)
1	50	7.1
2	100	14.2
3	150	21.2
4	200	28.3

表 4 多脉冲条件下飞秒激光辐照不锈钢的实验参数
Table 4 Experimental parameters of femtosecond laser irradiation on stainless steel under multi-pulse conditions

No.	Laser energy/μJ	Laser fluence/(J·cm ⁻²)	Spot overlap rate/%	Scanning pass
1	50	7.1	67(10 μm)	1
2	100	14.2		
3	150	21.2		
4	200	28.3		
5	100	14.2	83(5 μm)	
6			50(15 μm)	
7			33(20 μm)	
8			67(10 μm)	2
9				3

3 ps、5 ps、7 ps、10 ps、30 ps、50 ps、70 ps、100 ps、300 ps、500 ps、700 ps、1 ns、1.3 ns 和 1.6 ns, 泵浦激光能量密度设置为 14.2 J/cm²。

2 结果与分析

2.1 单脉冲飞秒激光诱导 LIPSS 结构形貌特征

图 3 为不同能量密度单脉冲飞秒激光诱导的 LIPSS 结构 SEM 图,从图中可以看到,在低能量密

度激光作用下 (7.1 J/cm^2), 激光光斑中心区域的 LIPSS 主要呈现低频条纹状 (low-spatial frequency ripple, LF-ripple), 周期 Λ 为 $1 \mu\text{m}$ 左右, 具有明显的取向一致性, 分布相对均匀。

由光斑中心向外, LIPSS 空间分布频率逐渐上升, 发展成为高频条纹结构 (high-spatial frequency ripple, HF-ripple), 周期 Λ 降低至 $0.5 \mu\text{m}$ 以下, 均匀性提升, 烧蚀迹象减弱。在激光光斑边缘处位置, LIPSS 结构主要以液滴状重熔体形式存在; 在中等能量密度激光 (14.2 、 21.2 J/cm^2) 作用下, 不同于低能量密度激光, 光斑中心区域 LIPSS 结构转变为条带状, 部分区域存在明显烧蚀现象, 在烧蚀区域内的 LIPSS 结构的周期性特征不明显, 随着距离的增加, LIPSS 结构恢复为原有的条纹状; 在高能量密度激光作用下 (28.3 J/cm^2), 中心区域原有的条带状 LIPSS 沿长度方向被分割, 呈现出无规则的球状凸起结构, 原有的取向一致性减弱, 周期性特征减弱, 随着距离的增加, LIPSS 逐渐转变为原有的高频条纹状形貌, 但受高能激光的作用, 在相互平行的条纹状之间还存在一些液滴状凸起, 整体呈现网状形貌。

图 4 为时间分辨反射式泵浦探测成像系统观测的烧蚀形貌演化过程示意图, 在 $3 \sim 300 \text{ ps}$ 时间范围内 (冲击波形成之前), 观察到辐照区反射率水平明显降低, 影响区面积逐渐扩大, 在 3 ps 时刻, 观察到材料熔化, 并且随着时间的推移出现沿不同方向的熔融体流动现象, 主要以明亮相间的圆环或条纹结构形式存在。熔融体形成后, 在剧烈的温度梯度、激发的表面稀疏波等不稳定性因素作用下产生局部流动, 改变表面形貌, 并驱动熔融体向外扩展, 辐照区面积逐渐增大。

在 300 ps 时刻之后, 根据图 4 冲击波成像表征结果, 在该时刻冲击波开始形成, 并不断向外扩展。在冲击波形成的初始阶段, 冲击波产生的反冲压力同样会对熔融层施加不稳定性干扰作用, 因此在 300 ps 时刻也观察到熔融体的局部流动现象。另外, 在 700 ps 时刻, 观察到高频波纹状 LIPSS 结构, 认为在该时间段熔融体开始固化, 表面形貌趋于稳定, LIPSS 结构开始形成, 在纳秒时间范围内, 夹带着碎屑的冲击波向外扩展, 导致中心区域对探测光的吸收能力增强, 因此辐照区内中心位置展现出更低的反射率。

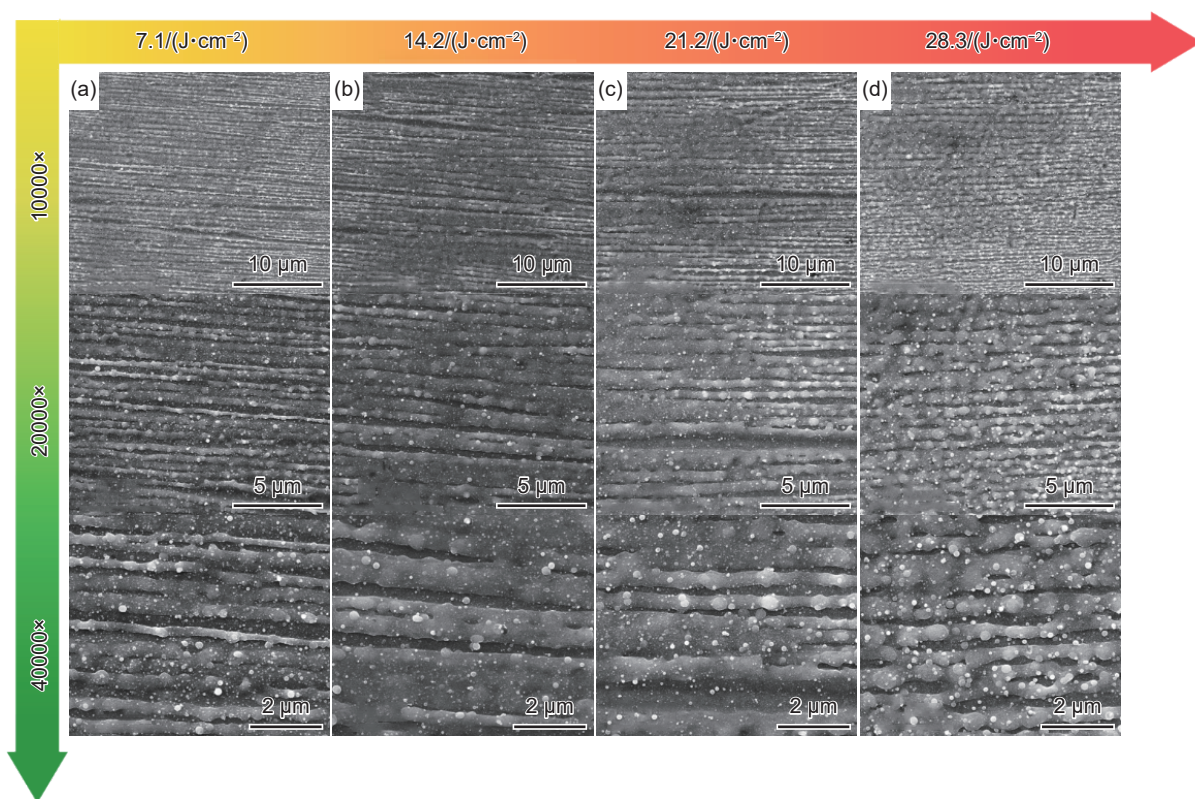


图 3 不同能量密度飞秒激光单脉冲辐照靶材表面周期性结构形貌特征 (a) $7.1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $14.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $21.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (d) $28.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$

Fig. 3 Morphological characteristics of periodic structures on the target surface induced by femtosecond laser single-pulse irradiation with different energy densities (a) $7.1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $14.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $21.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (d) $28.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$

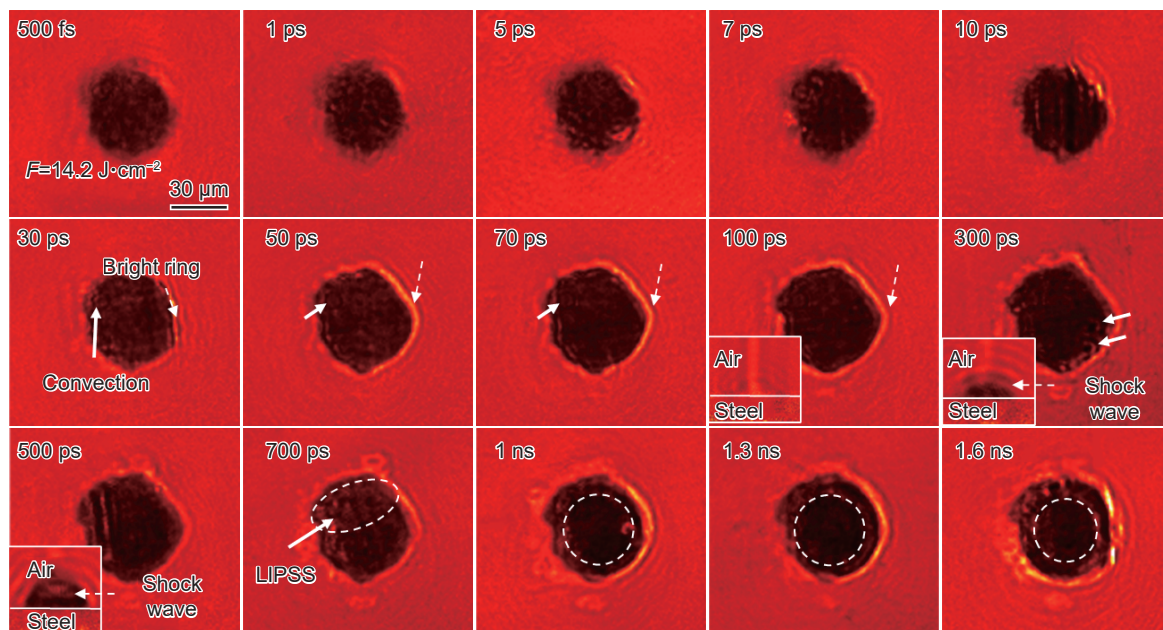


图 4 飞秒激光辐照钢材料表面烧蚀形貌演化(泵浦激光能量密度 14.2 J/cm^2)

Fig. 4 Morphological evolution of femtosecond-laser-ablated steel surface (pump fluence: 14.2 J/cm^2)

在飞秒激光辐照后的几个皮秒时间尺度,观测到材料熔化及沿不同方向熔融体流动现象,这一观测结果进一步加深了对金属材料与飞秒激光相互作用机理的理解,为飞秒激光烧蚀过程中提出的多种超快动力学理论提供了直接的实验证据。根据表面等离子激元和流体动力学理论,分析认为靶材表面 LIPSS 的形成是飞秒激光诱导的表面结构化与表面熔化效应共同作用的结果^[19-20],如图 5 所示。表面结构化效应是指飞秒激光与表面等离子激元 (surface plasmon polariton, SPP) 相互干涉形成能量密度空间周期性分布,从而产生选择性烧蚀(去除)形成最终的波纹状 LIPSS 结构;表面熔化效应是指

飞秒激光极高的能量输入会引起表层材料的熔化,诱导产生过热液相,在流体不稳定性因素影响下发生局部流动,将原有形成的狭缝擦除掉,抑制 LIPSS 结构的产生。两者相互竞争耦合,形成最终的 LIPSS 结构形貌。不同能量密度飞秒激光单脉冲作用下 LIPSS 形貌特征及形成机制,认为 LIPSS 形成是表面结构化和表面熔化效应共同作用的结果。同时,结合表征结果,为后续多脉冲作用下的 LIPSS 形貌制备工艺窗口的选择提供指导。

2.2 多脉冲飞秒激光诱导 LIPSS 结构形貌特征及调控机制

不同能量密度飞秒激光作用下 LIPSS 形貌特

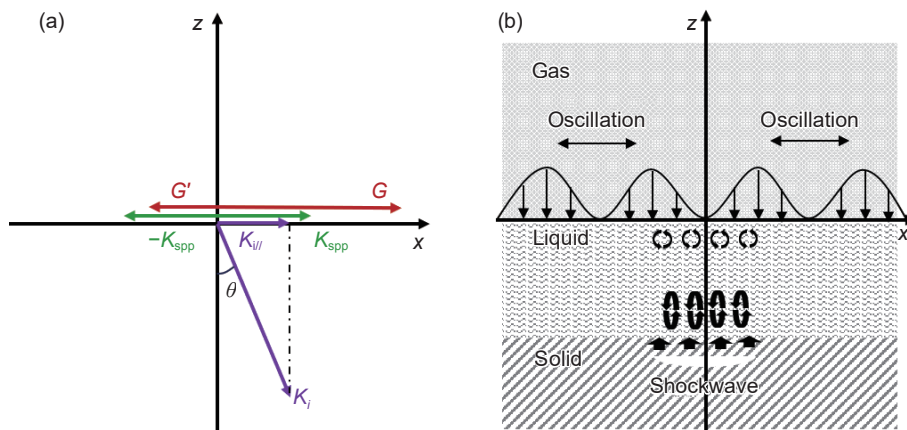


图 5 飞秒激光诱导表面结构化与表面熔化效应 (a) 表面等离子体激元-激光耦合(表面结构化); (b) 液相不稳定性流动(表面熔融)

Fig. 5 Femtosecond laser-induced surface structuring and surface melting effects (a) surface plasmon polariton-laser coupling (surface structuring); (b) liquid-phase instability flow (surface melting)

征如图6所示。由图6可知,与单脉冲激光相比,多脉冲条件下LIPSS形貌发生了明显的改变,靶材表面存在微米和纳米两种不同尺度的LIPSS结构,两者在形貌结构上均呈现条纹状,并且其空间周期性排列方向相互垂直。例如,在低能量密度激光(7.1 J/cm^2)条件下,从高分辨SEM图中可以看到,微米尺度的LIPSS结构的宽度约为 $2.0 \mu\text{m}$,空间周期也为 $2.0 \mu\text{m}$ 左右,长度在 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 范围内不等,属于低频LIPSS结构。而在该低频LIPSS结构表面均匀分布着纳米尺度的条纹状LIPSS,宽度和空间周期均在 500 nm 左右,长度与LSFL的宽度大致相同,属于高频LIPSS结构;其空间周期性排列方向沿LSFL的长度方向,即垂直于LSFL周期性方向。4种能量密度激光作用下的LIPSS形貌均呈现上述特征,所不同的是随着激光能量密度的提升,LSFL的宽度逐渐增大,即分布周期增大。此外,还可以看到在中低能量密度激光下,HSFL特征明显,但随着激光能量密度进一步提升,HSFL遭到破坏,形貌特征逐渐减弱,一致性降低。

上述LSFL和HSFL的尺寸特征表征结果如图7所示,在低能量密度激光条件下,LSFL的高度

主要分布在 $300 \sim 400 \text{ nm}$ 之间,在中等能量密度下上升至 $500 \sim 700 \text{ nm}$ 之间,而在高能量密度激光作用下,高度超过 $1 \mu\text{m}$,表面起伏的增大也带来了粗糙度的提升,激光能量密度由 7.1 J/cm^2 上升至 28.3 J/cm^2 时,表面粗糙度提升了一倍多。此外,从剖面提取的数据图中,还可以看到HSFL主要存在于中低能量密度激光作用下,特别是在中等能量密度激光下,分布均匀性更高,高度普遍在 100 nm 左右,分布在LSFL表面,但该HSFL结构在高能量密度激光条件下几乎不存在,与SEM表征结果相一致。

不同光斑搭接率下LIPSS形貌特征演化如图8所示,可以看到当光斑搭接率为33%时,靶材表面LSFL结构消失,只存在HSFL一种结构,宽度和空间周期在 500 nm 左右,均匀分布,轮廓清晰,表面较为光滑;在光斑搭接率50%情况下,LSFL结构开始出现,但不是十分明显,直到光斑搭接率提升至67%时,靶材表面表现为LSFL和HSFL复合结构,HSFL表面变粗糙,存在一些纳米颗粒附着。随着光斑搭接率的进一步提升,在83%情况下,LSFL由条纹状转变为包状形貌,周期性特征减弱,更倾向于无规则形貌,LSFL的表面HSFL特征不

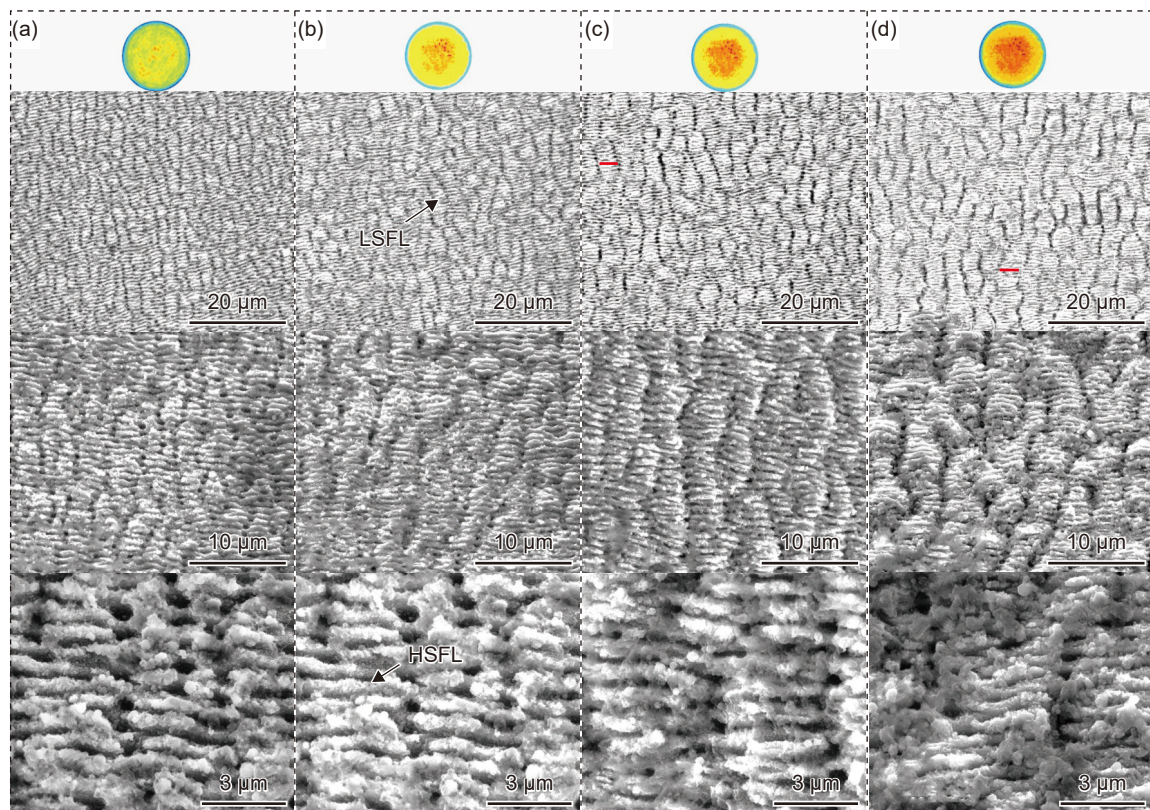


图6 多脉冲条件下不同能量密度飞秒激光诱导LIPSS形貌特征 (a) $7.1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $14.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $21.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (d) $28.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$

Fig. 6 Morphological characteristics of LIPSS induced by femtosecond laser with different energy densities under multi-pulse conditions (a) $7.1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $14.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $21.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (d) $28.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$

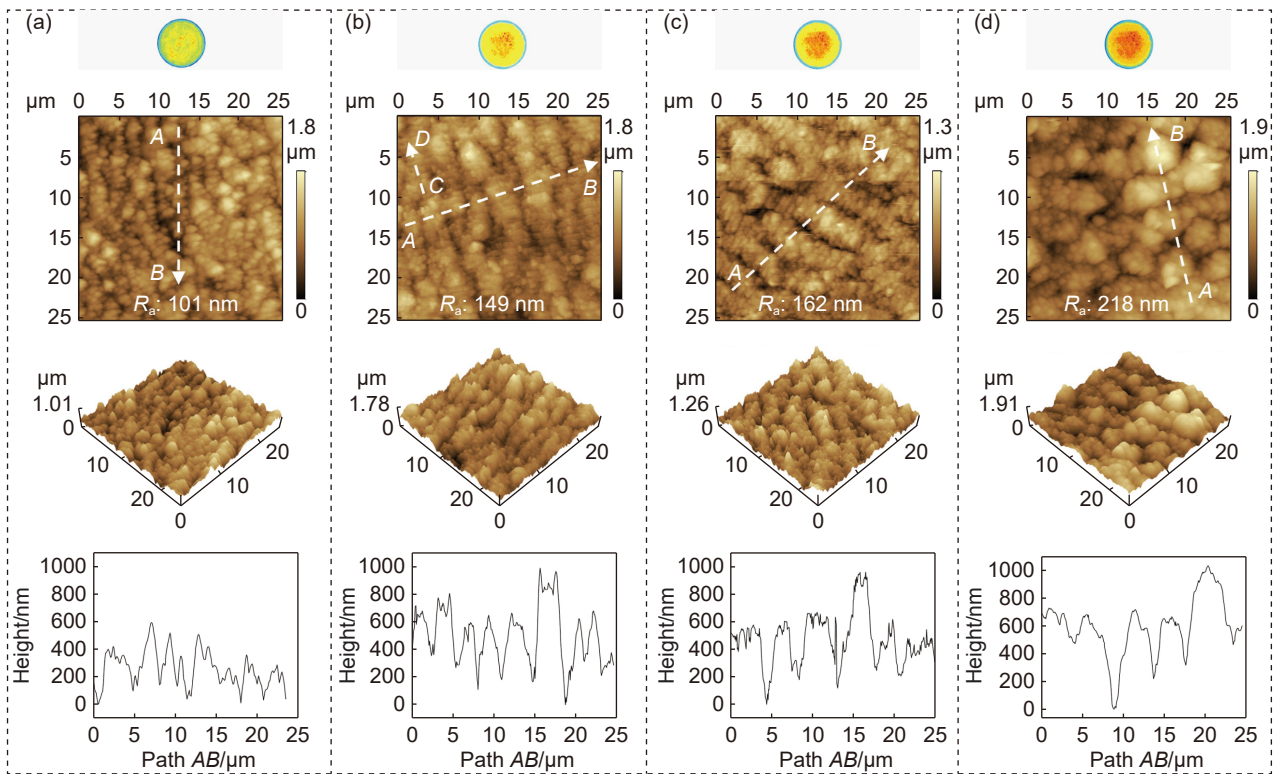


图 7 多脉冲条件下不同能量密度飞秒激光诱导 LIPSS 尺寸特征 (a) $7.1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $14.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $21.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (d) $28.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$

Fig. 7 Dimensional characteristics of LIPSS induced by femtosecond laser with different energy densities under multi-pulse conditions (a) $7.1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) $14.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (c) $21.2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$; (d) $28.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$

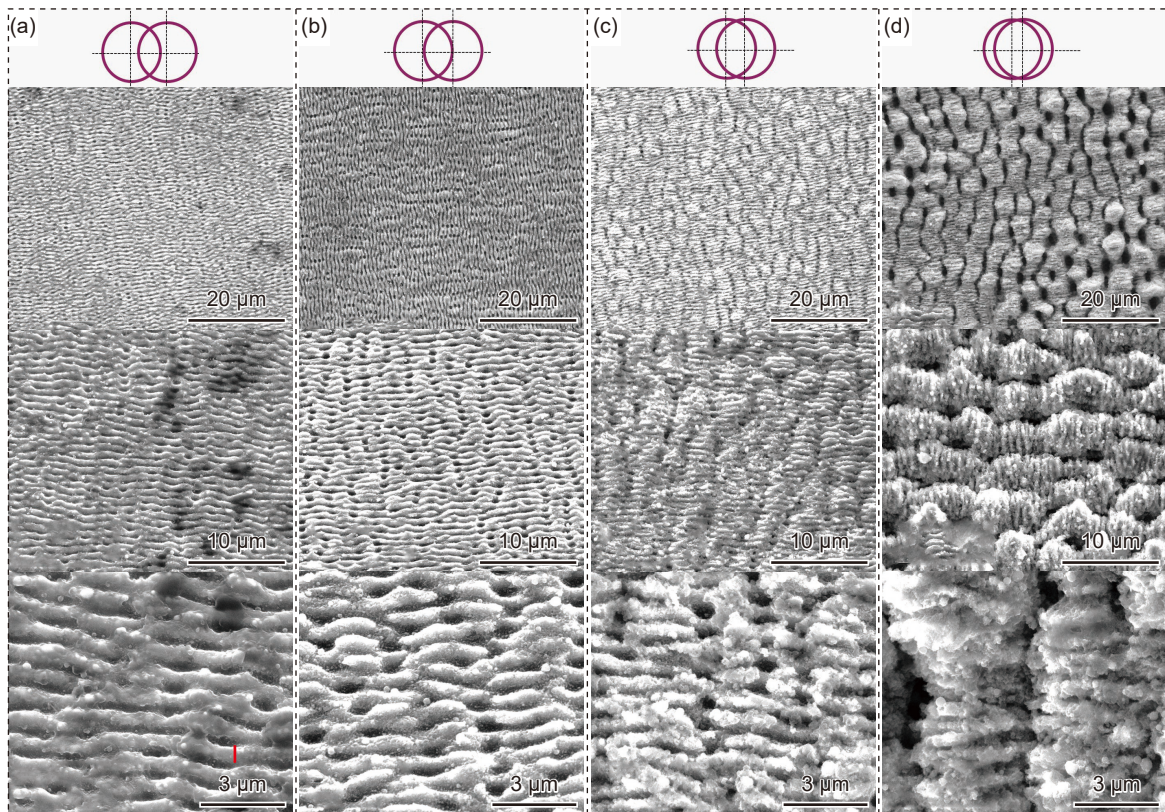


图 8 多脉冲条件下不同光斑搭接率飞秒激光诱导 LIPSS 形貌特征 (a) 33%; (b) 50%; (c) 67%; (d) 83%

Fig. 8 Morphological characteristics of LIPSS induced by femtosecond laser with different spot overlap rates under multi-pulse conditions (a) 33%; (b) 50%; (c) 67%; (d) 83%

明显,主要以纳米颗粒为主。

上述不同光斑搭接率下 LIPSS 的尺寸特征如图 9 所示,从相应的 3D 形貌图和剖面曲线更加直观看到,随着光斑搭接率的提升,表面 LIPSS 由 HSFL 转为 LSFL/HSFL 复合,再到包状 LSFL 的演变趋势。在低光斑搭接率(33%)情况下,表面 HSFL 的高度只有 100 nm 左右,因此整个表面的粗

糙度只有 69 nm。而在 50% 情况下,虽然 LSFL 结构开始出现,但表面粗糙度仅提高至 77 nm,但当光斑搭接率超过 50% 时,表面粗糙度迅速提升。特别是在 83% 情况下,达到了 462 nm,表面包状 LSFL 高度普遍在 1.5 μm 左右,并且从 3D 图中可以看到,由于 HSFL 结构的消失,包状 LSFL 的表面较为光滑。

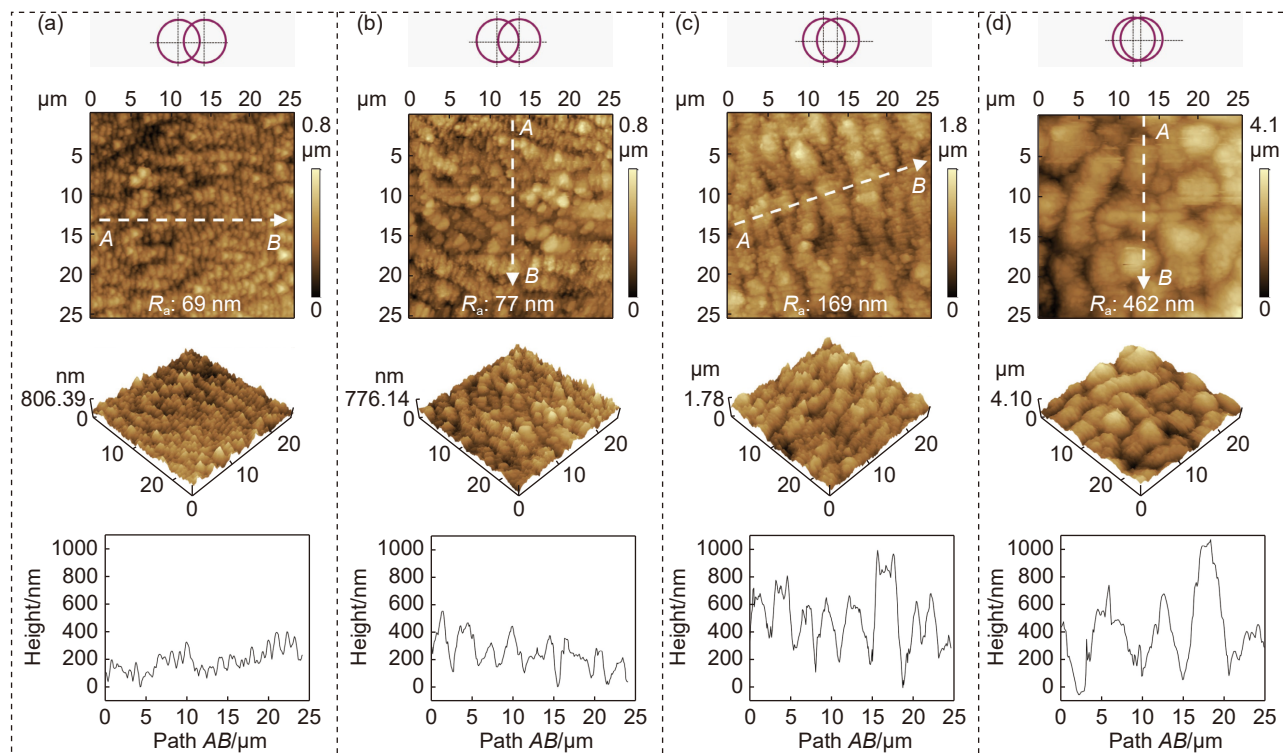


图 9 多脉冲条件下不同光斑搭接率飞秒激光诱导 LIPSS 尺寸特征 (a)33%;(b)50%;(c)67%;(d)83%

Fig. 9 Dimensional characteristics of LIPSS induced by femtosecond laser with different spot overlap rates under multi-pulse conditions (a) 33%; (b) 50%; (c) 67%; (d) 83%

图 10 显示了不同飞秒激光扫描次数下靶材表面 LIPSS 形貌特征图,可以看到扫描次数对 LIPSS 结构的影响趋势类似于变激光能量密度。在不同扫描次数下,靶材表面 LIPSS 均呈现出 HSFL 和 LSFL 复合形貌,并且随着扫描次数的增加,LSFL 的宽度逐渐增大,即空间周期性分布频率降低。但与提高激光能量密度导致 HSFL 被破坏的情况不同,在变扫描次数的条件下,从图中可以看到随着扫描次数的增加,HSFL 并没有被破坏,反而轮廓更加清晰,表面的纳米颗粒也逐渐减少,HSFL 分布更加均匀。

从相应的 3D 形貌图(图 11)中也可以看到,随着扫描次数的增加,LSFL 的起伏变得更加剧烈。在 3 次扫描情况下,部分区域已经超过了原子力显微镜的量程,达到了 1~2 μm 范围,导致靶材表面

形貌难以表征,表面粗糙度值也从 1 次扫描情况下的 169 nm 上升至 411 nm。并且在 3 次扫描情况下,LSFL 的宽度和空间周期新增大至 5 μm 左右,大于前文提到的高能量密度下(28.3 J/cm²)的 LSFL 的宽度和空间周期(4 μm)。因此,在 LIPSS 空间周期调控上,改变扫描次数是其中的有效手段之一。

综上,如图 12 所示,对于激光能量密度而言,增大激光能量密度可以提高 LSFL 的尺寸,同时提高空间分布周期,但在过高的能量密度激光作用下,HSFL 可能会被破坏,导致其均匀性和一致性下降。关于变光斑搭接率工艺,该工艺会引起 LIPSS 形貌特征发生改变,当光斑搭接率由低到高时,表面 LIPSS 形貌依次为条纹状 HSFL→条纹状 HSFL/条带状 LSFL 复合→包状 LSFL,并且其尺寸也逐

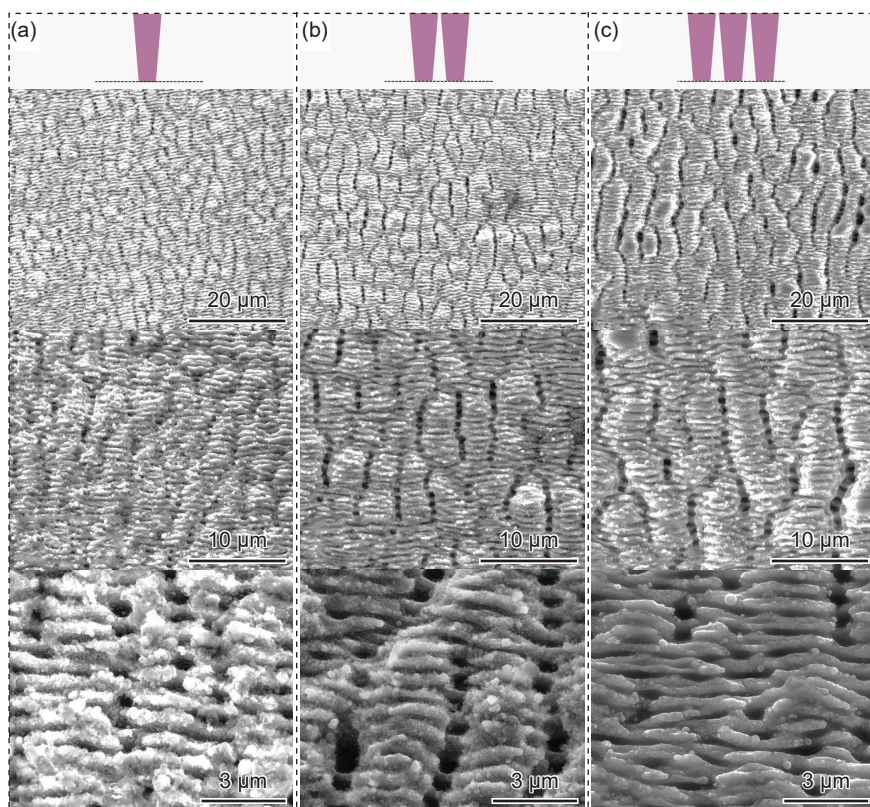


图 10 多脉冲条件下飞秒激光不同扫描次数诱导 LIPSS 形貌特征 (a)1 次; (b)2 次; (c)3 次

Fig. 10 Morphological characteristics of LIPSS induced by femtosecond laser with multiple pulses at different scanning passes (a) once; (b) twice; (c) three times

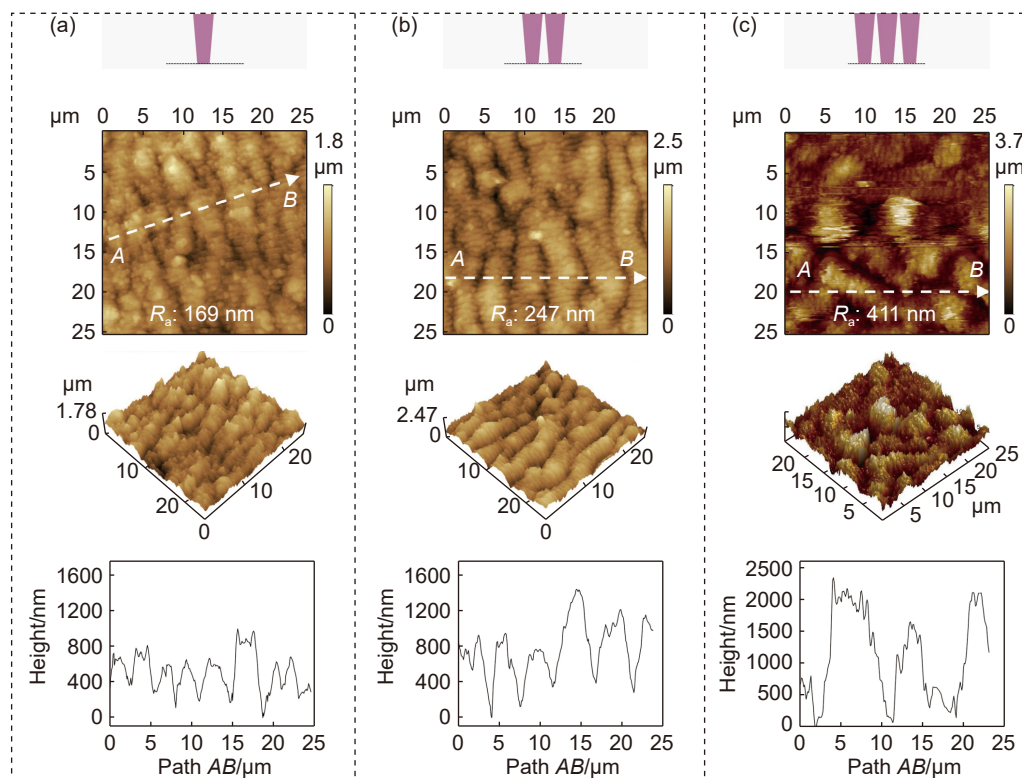


图 11 多脉冲条件下飞秒激光不同扫描次数诱导 LIPSS 尺寸特征 (a)1 次; (b)2 次; (c)3 次

Fig. 11 Dimensional characteristics of LIPSS induced by femtosecond laser with multiple pulses at different scanning passes (a) once; (b) twice; (c) three times

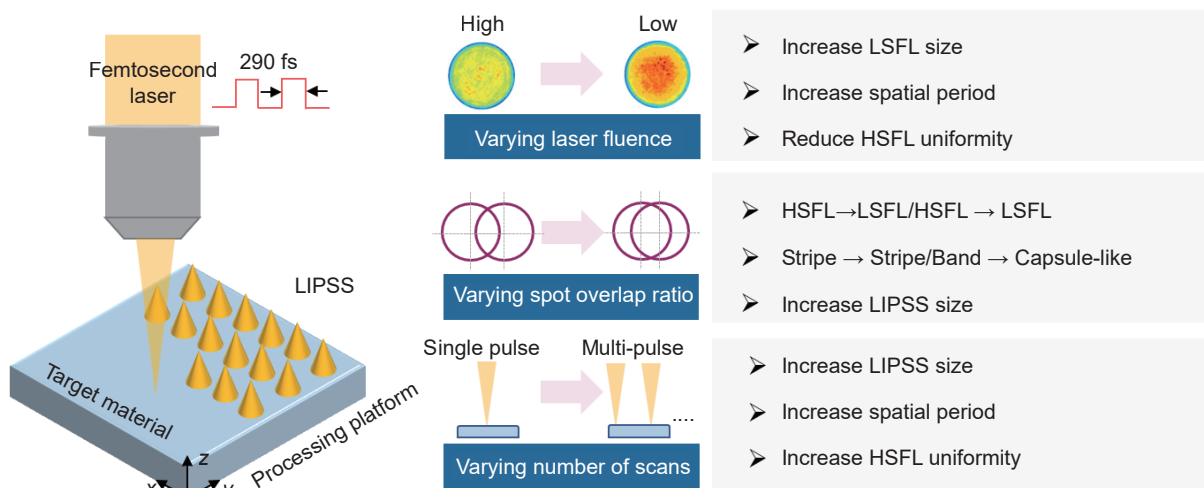


图 12 不同工艺参数对 LIPSS 结构形貌的影响规律示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the influence of different process parameters on the morphology of LIPSS structures

渐扩大。扫描次数对 LIPSS 形貌特征的影响规律与变激光能量密度的情况类似, 差异在于增加扫描次数不会导致 HSFL 的破坏, 反而会进一步提升 HSFL 的分布均匀性。

3 结论

(1) 飞秒激光单脉冲辐照区域内由中心向四周 LIPSS 结构的空間周期 λ 逐渐降低。另外, 辐照区域中心位置 LIPSS 空間周期 λ 随激光能量密度的提升逐渐提高。该现象是飞秒激光诱导的表面结构化与表面熔化效应共同作用的结果, 随着激光能量密度的提升, 表面熔化效应增强。

(2) 增大激光能量密度 ($7.1 \sim 28.3 \text{ J/cm}^2$) 可提高 LSFL 的尺寸和空間分布周期, 但过高能量密度 (28.3 J/cm^2) 可能导致 HSFL 的均匀性下降甚至被破坏。光斑搭接率的增加会使 LIPSS 形貌从条纹状 HSFL 转变为条纹状 HSFL 与条带状 LSFL 的复合结构, 最终形成包状 LSFL, 且尺寸逐渐扩大。扫描次数的增加则类似于能量密度的影响, 但不会破坏 HSFL, 反而能提升其分布均匀性。

参考文献:

- [1] Park M, Gu Y R, Mao X L, et al. Mechanisms of ultra-fast GHz burst fs laser ablation[J]. *Science Advances*, 2023, 9(12): 6397.
- [2] Wang H, Jürgensen J, Decker P, et al. Corrosion behavior of NiTi alloy subjected to femtosecond laser shock peening without protective coating in air environment[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 501: 144338.
- [3] Bai X, Yang Q, Fang Y, et al. Superhydrophobicity-memory surfaces prepared by a femtosecond laser[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 383: 123143.
- [4] Vercillo V, Tonnichia S, Romano J M, et al. Design rules for laser-treated icephobic metallic surfaces for aeronautic applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(16): 1910268.
- [5] Ageev E I, Andreeva Y M, Ionin A A, et al. Single-shot femtosecond laser processing of Al-alloy surface: an interplay between Mbar shock waves, enhanced micro-hardness, residual stresses, and chemical modification[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 126: 106131.
- [6] Kawashima T, Sano T, Hirose A, et al. Femtosecond laser peening of friction stir welded 7075-T73 aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 262: 111-122.
- [7] Lu C H, Ge L C, Zhu B, et al. Effective femtosecond laser shock peening on a Mg-3Gd alloy at low pulse energy 430 μJ of 1 kHz[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7(3): 529-535.
- [8] Arefev M I, Shugaev M V, Zhigilei L V. Kinetics of laser-induced melting of thin gold film: how slow can it get?[J]. *Science Advances*, 2022, 8(38): 2621.
- [9] Skoulas E, Manousaki A, Fotakis C, et al. Biomimetic surface structuring using cylindrical vector femtosecond laser beams[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45114.
- [10] Tsididis G D, Skoulas E, Stratakis E. Ripple formation on nickel irradiated with radially polarized femtosecond beams[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5172.
- [11] Romano J M, Garcia-Giron A, Penchev P, et al. Triangular laser-induced submicron textures for functionalising stainless steel surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 440: 162-169.

- [12] Fraggelakis F, Mincuzzi G, Lopez J, et al. Controlling 2D laser nano structuring over large area with double femtosecond pulses[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 470: 677-686.
- [13] Albu C, Dinescu A, Filipescu M, et al. Periodical structures induced by femtosecond laser on metals in air and liquid environments[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 278: 347-351.
- [14] Wang C, Huo H B, Johnson M, et al. The thresholds of surface nano-/micro-morphology modifications with femtosecond laser pulse irradiations[J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(7): 075304.
- [15] Schille J, Schneider L, Kraft S, et al. Experimental study on double-pulse laser ablation of steel upon multiple parallel-polarized ultrashort-pulse irradiations[J]. *Applied Physics A*, 122(7): 644.
- [16] Mannion P T, Magee J, Coyne E, et al. The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 233(1-4): 275-287.
- [17] Pietroy D, Di Maio Y, Moine B, et al. Femtosecond laser volume ablation rate and threshold measurements by differential weighing[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29900.
- [18] Orzi D J O, Alvira F C, Bilmes G M. Determination of femtosecond ablation thresholds by using laser ablation induced photoacoustics (LAIP) [J]. *Applied Physics A*, 2013, 110(3): 735-739.
- [19] 杨明. 飞秒激光诱导硅表面微纳结构研究[D]. 天津: 南开大学, 2014.
Yang M. Study on micro-nano structure of silicon surface induced by femtosecond laser[D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
- [20] Tsiibidis G D, Skoulas E, Papadopoulos A, et al. Convection roll-driven generation of supra-wavelength periodic surface structures on dielectrics upon irradiation with femtosecond pulsed lasers[J]. *Physical Review B*, 2016, 94(8): 081305.

收稿日期: 2025-03-03; 录用日期: 2025-04-18

基金项目: 中国航空发动机集团产学研合作项目 (HFZL2021CXY024-2); 国家自然科学基金青年基金 (52405240); 国家重点研发计划 (2024YFB4609000); 国家科技重大专项 (J2019-IV-0014-0082); 陕西省杰出青年科学基金项目 (2023-JC-JQ-37)

通讯作者: 何卫锋 (1977—), 男, 博士, 教授, 研究方向为激光制造与再制造、表面工程, 联系地址: 陕西省西安市灞桥区霸凌路一号军人服务社 (710051), E-mail: hehe_coco@163.com

(本文责编: 张 琴)