材料、结构及工艺

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260130001

液体辅助飞秒激光加工织构质量试验研究

严博平，肖　强*

（西安工业大学 机电工程学院，西安 710021）

摘　要： 钛合金因摩擦系数大、耐磨性差而限制其在航空航天领域的应用，表面加工微织构可有效改善其摩擦学性能。为提高微织构的加工质量，采用液体辅助飞秒激光加工方法，通过改变激光功率、扫描速度和扫描次数，研究织构尺寸与形貌的变化规律。结果表明：随着激光功率增加，织构的深度和宽度显著增大；随着扫描速度提高，织构的深度和宽度减小；随着扫描次数增加，织构深度增大，但扫描次数超过2次后宽度保持不变。当激光功率为2 W、扫描速度为5 mm/s、扫描次数为1时，可获得最佳的表面微织构形貌。

关键词： 钛合金；液体辅助；飞秒激光；表面微织构；加工质量

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0490－06

Experimental Study on the Quality of Micro-Textures Fabricated by a Liquid-Assisted Femtosecond Laser

YAN Boping, XIAO Qiang

(**School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, CHN**)

Abstract: The large friction coefficient and poor wear resistance of titanium alloys limit their application in the aerospace field. Surface micro-textures processed on titanium alloys can improve their tribological properties. To enhance the machining quality of surface micro-textures, this study investigated the quality of micro-textures fabricated using liquid-assisted femtosecond laser processing. Variations in the dimensions and morphology of the textures were studied by adjusting the laser power, scanning speed, and number of scans. The results indicated that the depth and width of the textures significantly increased as the laser power increased, and decreased as the scanning speed increased. However, the depth of the textures increased with the number of scans, while the width remained unchanged when the number of scans exceeded two. The optimal surface micro-texture morphology was achieved at a laser power of 2 W, a scanning speed of 5 mm/s, and a single scan.

Key words: titanium alloy; liquid-assisted; femtosecond laser; machining quality

0　引言

钛合金因其高比强度、低密度、耐高温，以及优异的机械性能和良好的生物相容性[1-4]，在航空航天和医疗等领域得到广泛应用。在航空航天领域，钛合金常用于制造涡轮叶片和机匣等零部件，但其较高的摩擦系数与较差的耐磨性限制了其可靠性和使用寿命。因此，提高钛合金的摩擦学性能以解决摩擦系数大和易磨损问题具有重要意义。表面微织构是一种有效的表面改性方法，能够显著改善钛合金的摩擦学性能。其减摩机制因条件不同而有所差异：在干摩擦条件下[5]，通过减小摩擦副间的接

收稿日期：2026－01－30.

基金项目：大学生创新训练计划项目(S202510702136).

* **通信作者：**肖　强

触区域和收集磨损颗粒以减小摩擦系数；在边界和混合润滑下[6]，通过存储润滑油并将其释放到摩擦副表面以实现二次润滑来减小摩擦系数；在流体润滑条件下[7]，表面微织构形成的流体动压力可提高油膜压力以减小摩擦系数。

表面微织构加工常用微铣削[8]、电火花加工[9]、电解加工[10]和激光加工等。其中，微铣削技术易使加工区域产生应力集中，且最小加工尺寸受限于刀具尺寸；电火花加工存在电极消耗快、效率低等不足；电解加工则要求工件材料具备导电性能，需要设计专用阴极装置，同时其酸性电解液会造成环境污染。而飞秒激光加工不同于传统的机械加工技术，其实现了非接触式加工，不存在刀具磨损导致的加工精度降低且工件加工区域不存在应力集中现象。目前，飞秒激光作为激光加工中最具前景的技术，其具有超短的脉冲宽度，可获得超高的瞬时功率；烧蚀材料时产生的热影响区小、重铸层少，能够实现超精密加工；对于材料适用性强，适用于加工非金属和金属材料；能够实现微细加工，激光焦点能够聚焦至微米级别，适用于加工微纳尺度的织构结构。

虽然飞秒激光有显著优势，但在实际加工中仍易出现热影响区和重铸层堆积等问题。针对这些缺陷，研究人员采用液体辅助飞秒激光加工方式，被加工材料置于辅助溶液中，液体的冷却性和流动性能够进一步减小热影响区和重铸层堆积，液体隔绝空气能够降低激光加工过程中烧蚀区域的氧化现象。激光加工过程生成的等离子体会反射和吸收激光脉冲，在液体中等离子体膨胀受到限制且寿命变短，等离子体的屏蔽效应被削弱。Wu 等[11]探究在三种不同介质中飞秒激光加工对于 SiC 微孔质量的改变，结果发现，空气介质中烧蚀 SiC 的能量最大，水中次之，HF 中所需要的能量最小。这是由于当液体辅助激光加工时，液体的冲刷作用使得加工产物迅速远离加工区域，等离子体屏蔽效应削弱。因此，相比于空气中熔融物沉积在加工区域，液体中烧蚀材料的表面更加光滑，产生熔融物沉积最少。Saraeva 等[12]利用 1 030 nm 飞秒激光研究了在空气和液体（去离子水、异丙醇）介质中硅片的烧蚀机理，结果表明液体中材料的烧蚀氧化层低于空气介质。时间分辨光谱监测结果显示，纳米颗粒形成的等离子羽流并非是烧蚀产物，且液体中等离子体羽流的寿命比空气中更短，这可能是由于致密的液体层约束了其存留空间。Zhang 等[13]为解决飞秒激光加工 β-Ga_2O_3 表面上的盲孔中孔内重铸层的堆积问题，提出水辅助飞秒激光加工。通过控制变量法探究了激光重复频率和液面高度对盲孔表面形貌的作用，结果表明水辅助激光加工出了高质量的盲孔，盲孔中无重铸层。

目前大多数液体辅助加工研究主要集中在提高微孔质量研究上，对于表面微织构的研究较少，且辅助液体多局限于水和酸性溶液等。本文以中性盐溶液为辅助液体，通过改变激光功率、扫描速度及扫描次数研究对微织构几何尺寸与形貌特征的影响规律，探究飞秒激光加工表面微织构质量。

1　试样制备与试验方法

试验材料选择宝钛集团生产的 Ti-6Al-4V（TC4）材料，TC4 是以钛为主要成分，并含有铁、钒、锰和铝等元素。采用激光切割将 TC4 切割成直径为 30 mm、厚度为 3 mm 的试样。分别用 400～2 000 目砂纸对试样进行打磨处理。实验开始前，将试样放在超声清洗机中并使用乙醇清洗 10 min 以去除试样表面的杂质，再放入烘干机烘干备用。加工结束后，同样清洗 10 min 以去除加工区域烧蚀产物。利用液体辅助飞秒激光在 TC4 上加工表面微织构，辅助液体选择中性的 0.9% NaCl 溶液，液面距离材料上表面的距离设置为 1 mm。如图 1 所示，激光加工设备选择立陶宛生产的四轴联动飞秒激光加工设备，采用美国生产的白光干涉仪表征表面微织构三维轮廓。表 1 为试验使用的飞秒激光器的参数指标。

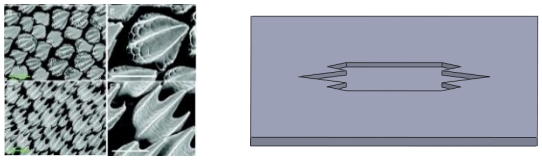


图 1　飞秒激光器和白光干涉仪

表 1　飞秒激光器参数

参数	技术指标
波长/nm	1 030
脉冲宽度/fs	223
激光功率/W	0～5
激光频率/kHz	60，196.9，1 008.6
扫描速度/(mm/s)	0～300
运动精度/μm	0.1

仿鲨鱼结构的表面微织构已经被证实能够改善摩擦副表面的摩擦学性能，本试验以图2(a)中鲨鱼皮齿为参照，设计如图2(b)的双向齿状表面微织构，以该双向齿状微织构为加工对象，织构的长、宽、深分别为200，70，5 μm。对于改善摩擦系数的表面微织构而言，织构深度的影响最大，其次为织构的表面形貌，最后是织构宽度的影响。采用单因素试验探究激光功率、扫描速度以及次数对织构加工质量的影响，在试验过程中，激光重复频率恒为60 kHz，扫描间距恒为5 μm，共设置10组实验。具体试验参数如表2所示。



(a) 鲨鱼皮SEM图[14] (b) 双向齿状表面微织构三维模型

图2 鲨鱼皮齿图

表2 激光加工表面微织构试验参数

编号	功率/W	扫描速度/(mm/s)	扫描次数
1	1.5	5	1
2	2	5	1
3	2.5	5	1
4	3	5	1
5	3.5	5	1
6	2	10	1
7	2	15	1
8	2	20	1
9	2	5	2
10	2	5	3

2 结果与讨论

2.1 激光功率对织构的影响

不同激光功率下表面微织构深度和宽度尺寸如图3所示，保持扫描速度和扫描次数分别为5 mm/s和1次。由图3可知，激光功率增高，织构深度加深，高激光功率可以提高织构深度，且激光功率的增强导致织构深度的增速变小，1.5 W激光功率下加工的织构深度为1.1 μm，3.5 W时深度为15.6 μm；表面微织构的宽度随着激光功率的增强而加宽，宽度的增速随激光功率的增强而减小，激光功率为1.5 W时织构宽度为59 μm，3.5 W时织构宽度为76.2 μm，较1.5 W时织构宽度增加了29.2%。

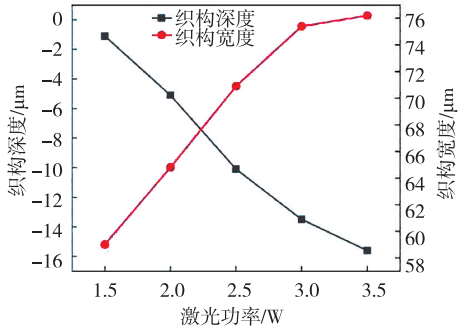


图3 不同激光功率下织构深度和宽度

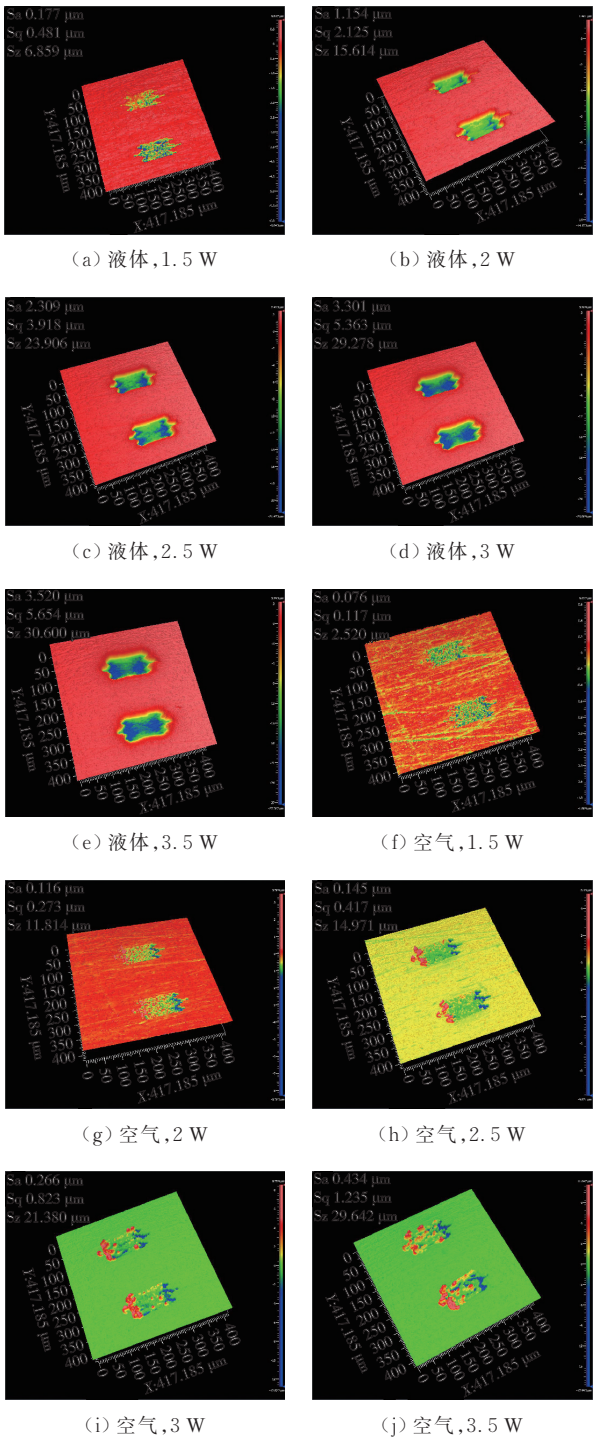
单个脉冲能量E_i与激光功率的关系如公式(1)所示，激光重复频率恒定，单脉冲能量与激光功率成正比，即：

$$E_i=\frac{P}{f} \tag{1}$$

式中，P为平均功率，f为重复频率。

织构深度增加的主要原因是在较低能量密度下，TC4材料表面产生库伦爆炸，材料表面电子吸收光子能量后产生多光子电离，电子挣脱原子核束缚后原子形成高密度正离子聚集区。一旦产生的库伦排斥力超过原子间化学键的结合力，材料便以原子形式实现去除，因此当激光功率为1.5 W时织构深度很浅。在高能量密度下发生相爆炸，TC4表面电子吸收光子能量温度瞬时升高，电子通过电子-声子耦合作用将能量传递至晶格。当晶格处于极不稳定的状态时，会发生爆炸并随之蒸发，材料的去除率大，因此当激光功率为3.5 W时织构较深。在激光功率超过TC4的烧蚀阈值后，激光功率的增加逐渐使光强达到饱和，因此织构深度和宽度的增速随激光功率的增强而减小。

不同激光功率下织构的三维形貌如图4所示，其中，(a)～(e)，(f)～(j)分别为液体和空气介质中的形貌图。在NaCl溶液辅助飞秒激光加工中，除1.5 W外的其他激光功率下，加工的织构形状轮廓清晰且织构底部光滑；当激光功率为1.5 W时，织构烧蚀不连续，这主要源于脉冲能量不足导致材料烧蚀不完全。在空气介质中，当激光功率为1.5 W和2 W时，织构烧蚀不完全；当激光功率提升至2.5 W时，织构区域开始明显有重铸层的堆积，随着激光功率越大，重铸层堆积越严重，这主要是激光功率越大单脉冲能量越大，加工区域产生的烧蚀熔融物显著增多，产生的冲击力无法全部将熔融物排出加工区域。



（a）液体，1.5 W　（b）液体，2 W
（c）液体，2.5 W　（d）液体，3 W
（e）液体，3.5 W　（f）空气，1.5 W
（g）空气，2 W　（h）空气，2.5 W
（i）空气，3 W　（j）空气，3.5 W

图 4　两种介质中不同激光功率织构三维形貌图

由图 4 可知，液体辅助飞秒激光加工出的织构质量优于空气介质，这是因为脉冲激光的部分能量被液体吸收，吸收激光能量后的液体形成空化气泡，在空化气泡溃灭产生的冲击波使液体处于流动状态；在加工过程中液体能够及时将激光烧蚀产物带走，减少烧蚀产物在加工区域堆积形成重铸层，同时液体能够及时带走材料表面的热量，进一步降低烧蚀区域热影响区的影响。结合图 4(b)中织构底部较其他更光滑，因此激光功率为 2 W 时表面微织构的形貌质量最佳。

2.2　扫描速度对织构的影响

织构深度和宽度随激光扫描速度的变化曲线如图 5 所示，保持激光功率与扫描次数分别为 2 W 和 1 次。在提高加工效率的同时保证加工质量，因此取最小扫描速度为 5 mm/s。由图 5 可知，织构深度随扫描速度的提升呈递减趋势，且深度变浅速率随着扫描速度的加快而减小。当扫描速度为 5 mm/s 时，织构深度为 5.1 μm；扫描速度提升至 20 mm/s 时，织构深度降低至 2.4 μm，降幅达 52.9%。织构宽度同样随扫描速度提升呈递减趋势，扫描速度越高，织构横向尺寸越窄，且宽度的衰减速率随扫描速度升高逐渐加快。当扫描速度为 5 mm/s 时，织构宽度为 65.7 μm；当扫描速度提升至 20 mm/s 时，织构宽度降至 62.7 μm，降幅为 4.6%。

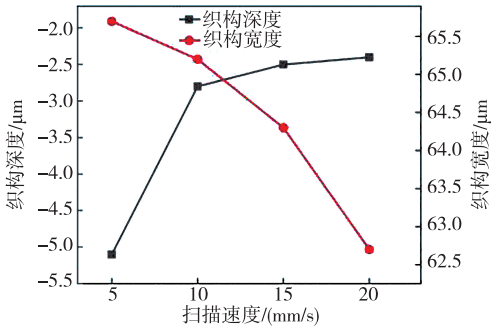


图 5　不同扫描速度下织构深度和宽度

激光焦点重叠率 S 与扫描速度 v 关系如公式(2)所示。激光焦点直径与重复频率恒定，激光焦点重叠率随扫描速度的加快而减小。

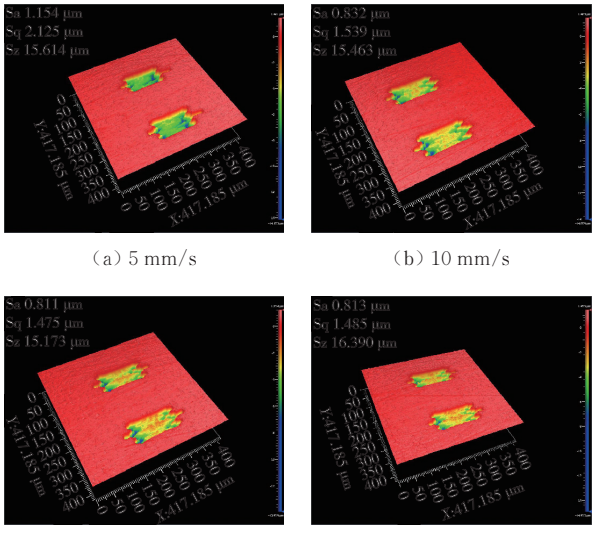
$$S=(1-\frac{v}{fd})\times 100\% \tag{2}$$

式中，v 为扫描速度，d 为焦点直径。

造成上述低扫描速度下织构深度和宽度增加的原因，一方面是沉积在 TC4 表面的能量密度增加使材料去除率增加；另一方面，单位时间内作用于液体的激光脉冲数量增加，使液体中形成更多空化气泡；空化气泡溃灭不仅能够清除织构中的熔融物，其产生的微射流还会作用于织构侧壁，从而使织构的深度和宽度比高扫描速度下更大。

不同扫描速度下织构三维形貌如图 6 所示。随

着扫描速度的提升，材料的烧蚀深度明显变浅。当扫描速度为5 mm/s时，织构底部较为光滑；当扫描速度提高至10 mm/s开始，织构底面的去除量出现不均匀现象。这一方面是因为激光扫描速度过快导致激光焦点重叠率降低，作用在同一区域的能量减少使材料去除率下降；另一方面是由于产生的空化气泡数量有限对熔融物的消除作用微弱，部分熔融物堆积在织构底部，使得织构底部区域凹凸不平，进而降低织构加工质量。综合比较可知，在5 mm/s的扫描速度下获得的表面微织构形貌最佳。



（a）5 mm/s （b）10 mm/s

（c）15 mm/s （d）20 mm/s

图6 不同扫描速度下织构三维形貌图

2.3 扫描次数对织构的影响

织构深度和宽度随扫描次数的变化曲线如图7所示，其中激光功率和扫描速度分别设置为2 W和5 mm/s。织构深度随扫描次数的增多而加深，但增速逐渐降低，当扫描次数为3次时，织构深度为12.1 μm，相比于单次扫描的织构深度提升了137.3%。织构宽度随扫描次数的增多而变大，当扫描次数从1次提升至2次时，织构宽度仅拓宽1.2%，而扫描3次与2次织构具有相同宽度。由此可知，在NaCl溶液辅助飞秒激光织构加工工艺条件下，扫描次数对于增加织构宽度尺寸作用很小。

多次扫描主要是加深了织构的深度，而对宽度的影响相对有限。这是因为随着扫描次数的增加，作用在织构区域的激光脉冲数量就变多，因此织构深度随扫描次数的增多而加深。具体而言，单次扫描后加工区域已经出现了烧蚀去除，形成初始织构。由于未设置激光的进给量，当第2次扫描时，激光焦点在织构底部之上。此时为正离焦量，作用在材料表面的激光光斑面积增加导致激光功率密度减小，使得其深度增量小于第1次扫描的蚀除量。

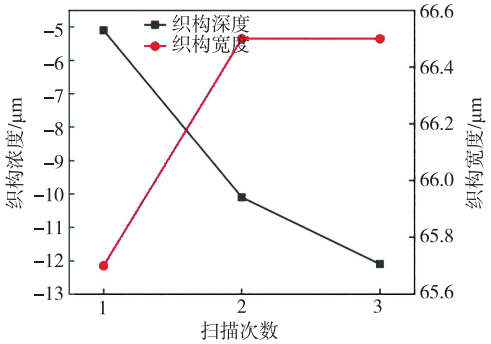
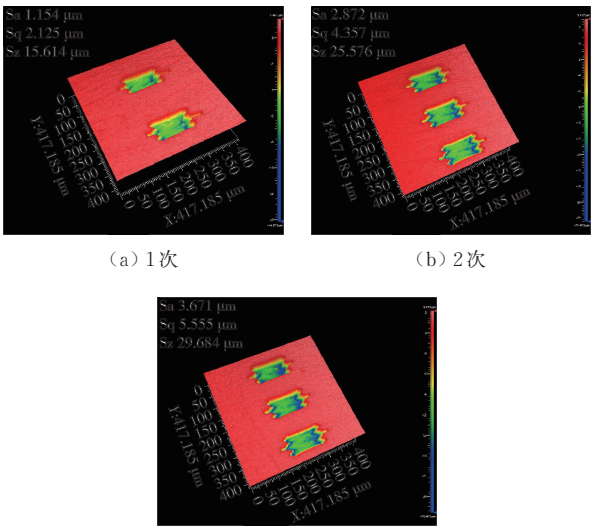


图7 不同扫描次数下织构深度和宽度尺寸

三种扫描次数下织构三维形貌如图8所示。随着扫描次数的增加，织构的轮廓保持清晰，但使得织构齿端较中间部位的深度更深，且较深部位的范围更广。该特征的形成原因主要是织构两端处于加工的起始和结束部位，此处等离子体的屏蔽效应弱，更多的激光能量可以沉积在织构两端。加工中间部位时相对两端等离子体屏蔽效应强，等离子吸收和反射激光能量导致沉积的激光能量较少。因此，扫描次数的增加通过累积增强上述空间差异。



（a）1次 （b）2次

（c）3次

图8 不同扫描次数下织构三维形貌图

3 结论

本文利用0.9%NaCl溶液辅助飞秒激光进行表面微织构的加工，通过改变激光功率、扫描速度和

扫描次数对织构尺寸和形貌进行分析，得出如下结论：

（1）激光功率增强导致单个脉冲能量变大，织构深度和宽度尺寸均呈增大趋势，且织构尺寸的增加趋于饱和。与空气介质相比，液体辅助激光加工的织构无重铸层的产生，当激光功率为2 W时织构形貌最佳。

（2）扫描速度提升导致激光焦点重叠率变低，织构深度和宽度尺寸减小，且织构宽度受扫描速度的影响大于深度。在保证加工效率的前提下，当扫描速度为5 mm/s时织构加工质量最佳。

（3）随着扫描次数的增多，作用于材料的能量越多，织构深度加深。织构宽度在扫描次数达到2次后即趋于稳定，继续增加扫描次数对其不再产生明显影响。

（4）激光功率、扫描次数和扫描速度对织构深度的影响依次减小；激光功率、扫描速度、扫描次数对织构宽度的影响依次减小。激光参数对织构的形貌影响与织构深度的影响规律基本一致。

参考文献：

[1] Nguyen H D, Pramanik A, Basak A K, et al. A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 4641-4661.

[2] Wang W, Guo Q, Yuan W, et al. Synergistically enhanced tribological properties and corrosion resistance of Ti_6Al_4V *via* laser-induced convex textures[J]. Tribology International, 2026, 214: 111171.

[3] Jin L L, Huang T, Wang Z Y, et al. High-temperature protection of a basalt flake reinforced borosilicate-silicone hybrid coating for titanium alloys[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2026, 729: 138868.

[4] Thakur A, Kumar A, Kaya S, et al. Recent advancements in surface modification, characterization and functionalization for enhancing the biocompatibility and corrosion resistance of biomedical implants[J]. Coatings, 2022, 12(10): 1459.

[5] Anand P, Biswas J, Singh S S, et al. Femto-second laser ablated surface-textures in AISI 440C martensitic stainless steel for precision bearings: hardness, residual stress, lubricant wettability, friction and wear assessment[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 183: 112359.

[6] Lu P, Wood R J K, Gee M G, et al. The use of anisotropic texturing for control of directional friction[J]. Tribology International, 2017, 113: 169-181.

[7] Liu W, Ni H, Chen H, et al. Numerical simulation and experimental investigation on tribological performance of micro-dimples textured surface under hydrodynamic lubrication[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 163: 105095.

[8] Chen L, Liu Z, Shen Q. Enhancing tribological performance by anodizing micro-textured surfaces with nano-MoS_2 coatings prepared on aluminum-silicon alloys[J]. Tribology International, 2018, 122: 84-95.

[9] 申继文，明平美，薛宝龙，等. 旋带掩模电解织构化圆柱表面及其润湿性分析[J]. 中国表面工程，2023，36(3)：101-112.
Shen Jiwen, Ming Pingmei, Xue Baolong, et al. Fabrication and wetting analysis of weaving cylindrical surface by rotating through-mask electrochemical texturing[J]. China Surface Engineering, 2023, 36(3): 101-112.

[10] Jiang P, Mitchell-Smith J, Walker J C. Tribological performance of electrochemically textured EN-GJS 400-15 spheroidal cast iron[J]. Lubricants, 2025, 13(5): 203.

[11] Wu C, Fang X, Kang Q, et al. Crystal cleavage, periodic nanostructure and surface modification of SiC ablated by femtosecond laser in different media[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 424: 127652.

[12] Saraeva I N, Kudryashov S I, Lednev V N, et al. Single- and multishot femtosecond laser ablation of silicon and silver in air and liquid environments: plume dynamics and surface modification[J]. Applied Surface Science, 2019, 476: 576-586.

[13] Zhang K, Xu Z, Dong B, et al. Process exploration of β-Ga_2O_3 blind hole processing by water-assisted femtosecond laser technology[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 939: 168769.

[14] Wen L, Weaver J C, Lauder G V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function[J]. Journal of Experimental Biology, 2014, 217(10): 1656-1666.

作者简介：

严博平（2000—），男，硕士研究生，研究方向为飞秒激光加工表面微织构技术；

肖　强（1976—），男，博士，教授，研究方向为先进制造技术。