

激光创成微结构几何精度与润湿性能的关联机制

倪敬¹ 卢蝶¹ 蒙臻^{1*} 林少荣¹ 王阳¹ 傅云²

1.杭州电子科技大学机械工程学院,杭州,310018

2.浙江西子航空制造有限公司,杭州,311222

摘要:通过对比分析不同激光脉宽制备的微结构几何精度与润湿性能,获取了微结构几何精度与润湿性能的关联规律。研究发现,减小激光脉宽有助于提高微结构的几何精度,增强表面疏水性能;皮秒激光加工在微结构底部形成了规则的乳突阵列结构,使其具有最优的疏水性能。

关键词:微结构;关联机制;加工精度;疏水性;激光创成

中图分类号:TG665;TH161

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Correlation Mechanism between Geometric Accuracy and Wettability Performance of Laser-induced Micro-structures

NI Jing¹ LU Die¹ MENG Zhen^{1*} LIN Shaorong¹ WANG Yang¹ FU Yun²

1.School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, 310018

2.Zhejiang Xizi Aviation Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou, 311222

Abstract: By comparing and analyzing the geometric accuracy and wettability of microstructures prepared with different laser pulse widths, the relationship between geometric accuracy and hydrophobicity was established. The results demonstrate that reducing the laser pulse width improves the geometric accuracy of microstructures and enhances their surface hydrophobicity. The picosecond-laser-fabricated microstructures with regular papillae arrays at the bottom region exhibit the optimal water-repellent properties.

Key words: microstructure; correlation mechanism; machining accuracy; hydrophobicity; laser induced

0 引言

疏水表面因具有自清洁、减阻、抗腐蚀和减摩等性能而成为航空航天、海洋船舶、生物医疗等领域研究热点^[1]。材料的疏水性能受表面化学组成和粗糙度影响^[2],涉及流体力学、材料学、表面科学等学科,作用机制复杂。在材料表面制备微结构是改变表面疏水性能的重要途径之一^[3-4]。激光加工因其效率高、可控性好、精度高等优点而广泛用于材料表面微结构的加工^[5]。微结构的几何特征与激光加工参数对表面疏水性能有显著影响,因此众多学者研究激光技术与材料表面润湿性能的关系^[6-7]。

早期研究通过对比不同类型的微结构润湿性能来揭示形貌特征对疏水性能的支配作用。陶海岩^[8]发现微沟槽(亲水)与微柱状结构(超疏水)的润湿性差异源于固-液接触模式的变化。基于这一发现,SONG等^[9]通过调控纳秒激光参数实现

了Wenzel向Cassie-Baxter的表面润湿状态转变。随着仿生设计的引入,DONG等^[10]对比了凹槽状微结构与仿生微结构在润湿性的差异,发现纹理图案的润湿性展现出从超亲水性到超疏水性的变化。CUI等^[11]开发的蜂窝-荷花双仿生结构在超疏水性能中融合抗破坏功能,标志着微结构设计从单一功能向复合性能的突破。

对于相同类型微结构,其尺寸对润湿性能也具有显著影响。李田^[12]发现皮秒激光的扫描间距从4 μm递增到10 μm时,铝合金表面呈现超疏水-高黏附疏水-各向异性疏水的阶梯式演变,证实了临界尺度效应的存在。WANG等^[13]发现增大圆形凹坑直径、减小微沟槽宽度均可显著提高液滴接触角,但凹坑直径对接触角的影响占主导地位,这为几何参数的量化调控提供了关键依据。

由于激光-材料的紧密关联,工艺参数优化成为调控加工效率与性能稳定性的关键。占彦龙等^[14]通过激光功率与扫描间距的多目标优化,实现了聚四氟乙烯(PTFE)表面疏水性的连续可控。孙集一^[15]针对纳秒激光系统,量化了功率密

收稿日期:2024-11-28

基金项目:国家自然科学基金(U21A20134);浙江省“尖兵”“领雁”科技计划(2022C01134);第二十七届中国科协年会学术论文

表 1 激光的加工参数

Tab.1 Processing parameters of laser

序号	激光类型	能量密度/ μJ	扫描速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	脉冲频率/ kHz	加工次数
1	纳秒	83.3	400	120	55
2		83.3	600	120	69
3		108.3	500	120	47
4		111.1	500	90	60
5		55.6	500	180	56
6	皮秒	5.5	400	100	91
7		5.5	200	100	45
8		6.2	400	200	75
9		8.6	400	100	70
10	飞秒	6.2	300	200	55
11		4.8	400	200	125
12		4.8	200	200	62
13		5.3	400	200	100
14		4.8	400	100	245
15	4.8	300	150	208	

度、扫描速度、脉冲频率对微结构尺寸和形貌特征的耦合作用规律,揭示了参数匹配误差对表面均匀性的显著影响。脉冲频率与扫描速度的微小变化会通过热累积效应显著改变微结构形貌^[16-17],这解释了早期研究中表面性能的波动。

此外,在激光加工环境中引入辅助介质为润湿性能原位修饰提供了新方法。翟帅杰^[18]通过实验发现不同液相辅助的微结构表面疏水性能具有显著差异。POU 等^[19]证明气体氛围的切换($\text{O}_2 \rightarrow \text{Ar}$)可诱导表面氧化层厚度与化学成分变化,使接触角从 31° 变为 125° 。

虽然已有研究取得了显著进展,但成果多聚焦于单一变量对疏水性能的影响^[20-22],激光创成微结构的几何精度与润湿性能的多尺度耦合作用机制仍缺乏系统研究。为实现高疏水性微结构表面的激光制备,有必要开展激光加工微结构几何精度与疏水性能关联机制的研究。本文采用激光在 M42 高速钢表面制备出相同几何参数的沟槽阵列,分析不同制备工艺下的微结构尺寸精度与表面疏水性,探究制备工艺对表面疏水性能的影响机制。考虑粗糙表面接触角模型,研究沟槽阵列底部粗糙度特征与疏水性的内在关联,最终确定材料疏水表面设计依据。

1 实验设计与方法

1.1 微结构制备

1.1.1 样品预处理

研究所用试样材料为 M42 高速钢,具体尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。制样时,先打磨抛光试样表面,再通过无水乙醇超声清洗去除试样表面的氧化层和杂质。清洗后的样件使用无尘洁净布擦拭,再加热至 50°C 并保温 5 min。

1.1.2 表面微结构制备与后处理

为对比激光类型对制备精度的影响,采用 3 种脉宽(纳秒、皮秒、飞秒)的激光在试样表面制备间距 $100 \mu\text{m}$ 的微沟槽(尺寸为 $8 \text{ mm} \times 100 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$)结构阵列。多轮工艺实验优化确定的激光加工关键参数组合如表 1 所示。为避免激光加工过程中表面的熔融物和杂质对微结构几何精度的负面影响,在激光加工后利用无水乙醇超声清洗试样 15 min。超声清洗后,迅速用无尘洁净布擦拭,并在 50°C 保温 5 min。

1.2 表面形貌测量与表征

为精确表征制备精度,采用白光干涉仪测量制备微沟槽阵列的三维形貌,并提取沟槽宽度 W 、沟槽间距 L 、侧壁倾角 θ 等微沟槽剖面参数,

选用差异较大的微沟槽底面算术平均粗糙度 S_a 表征微结构制备精度。为减少测量误差,每个试样在相同条件下测量 3 次,取测量均值作为最终结果。

1.3 润湿性能测试与表征

为表征制备微结构的润湿性能,通过悬滴法测量各试样的固液接触角。基于标准测试流程,采用接触角测量仪获取各试样表面水的接触角。为确保实验环境的一致性,每个试样在相同时间段内测量 3 次,将测量均值作为最终结果。

2 实验结果与分析

2.1 微结构几何精度

2.1.1 激光加工工艺对微结构尺寸精度的影响

如图 1 所示,3 种激光制备的微结构皆呈现 V 形的原因是激光能量的高斯分布与激光的离焦效应。加工过程中,激光焦点中心的能量密度高,焦点两侧的能量密度低,这导致激光焦点中心的材料去除量大、两侧的材料去除量小,在材料表面形成 V 形结构^[23]。随着加工深度的增加,激光焦点逐渐偏离最初的加工表面。激光的能量密度随离焦量的增加而逐渐减小,对微结构底部材料的去除效果减弱,进一步强化 V 形结构的形成^[24]。

如表 2 所示,纳秒、皮秒、飞秒激光加工的微结构沟槽侧壁倾角依次减小,产生该现象的主要原因是激光加工的热影响与激光的离焦效应。激光加工中,脉宽越小,热影响区域越小,加工精度越高,在去除材料时能得到更均匀的结构,侧壁更接近垂直面^[25]。激光脉宽也影响激光的离焦量,随着激光脉宽的减小,离焦量也减小,材料的去除效率提高,可加工出更接近垂直的侧壁^[26]。

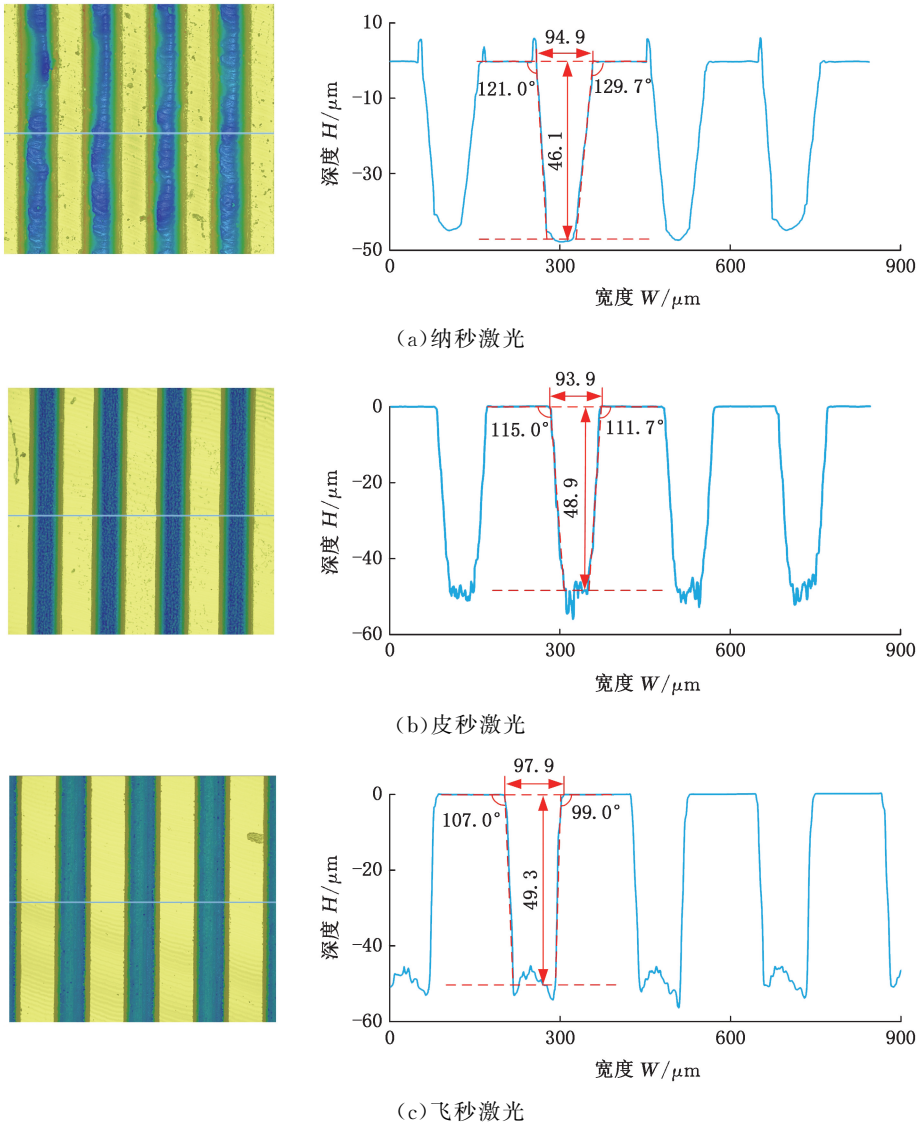


图 1 激光加工微结构形貌

Fig.1 Laser-processed microstructure morphologies

表 2 激光加工微结构侧壁倾角

Tab.2 The sidewall inclination angle of laser-processed microstructures (°)

激光类型	侧壁倾角	
	左侧	右侧
纳秒	129.3	122.4
皮秒	114.9	112.1
飞秒	103.8	98.4

微沟槽两侧壁的倾角存在差异的原因是激光的偏振效应^[27]。激光束扫描加工微沟槽的过程中,随着加工深度的增大,激光束与侧壁间的夹角逐渐增大。根据菲涅耳定律,电场振动方向平行于入射平面,P偏振光在大入射角下具有更高的透射率和吸收率,导致能量集中作用于该侧材料,形成更陡峭的侧壁,如图 2 所示。材料表面对 S 偏振分量的反射率较大,故反射光中 S 偏振分量占主导。S 偏振分量的二次去除作用使另一侧侧壁倾角增大。因此,在 P 偏振分量和 S 偏振分量的共同

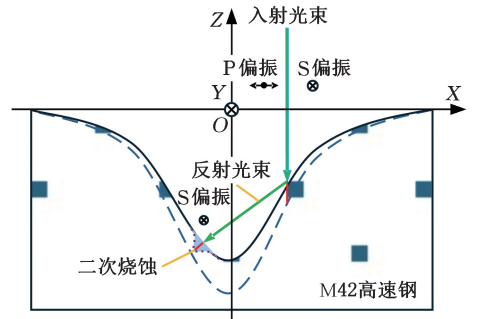


图 2 激光偏振对加工侧壁的二次烧蚀

Fig.2 Laser polarization's effect on the secondary ablation of machined sidewall

作用下,微沟槽两侧壁倾角出现规律性的差异。

2.1.2 激光加工工艺对微结构表面形貌的影响

3 种脉宽激光加工的微沟槽底部形貌存在明显差异。如图 3a 所示,纳秒激光加工属于长脉冲加工即通过材料的受热熔化或汽化去除材料,加工过程中,部分熔化的材料会重新凝固,形成重铸

层,因此微沟槽底部为不规则凹状。皮秒、飞秒激光都属于超快激光,两者制成的微沟槽底部没有出现熔融物堆叠,如图 3b、图 3c 所示。皮秒激光加工过程中几乎不存在能量的热扩散,仅有少量材料处于熔融状态,可视为以材料蒸发为主导的“固态等离子体转化”过程^[28]。飞秒激光的脉冲宽度更小,材料在极短时间内迅速熔化、气化,最终转化为等离子体,可直接视为固体-等离子体跃迁过程^[29]。

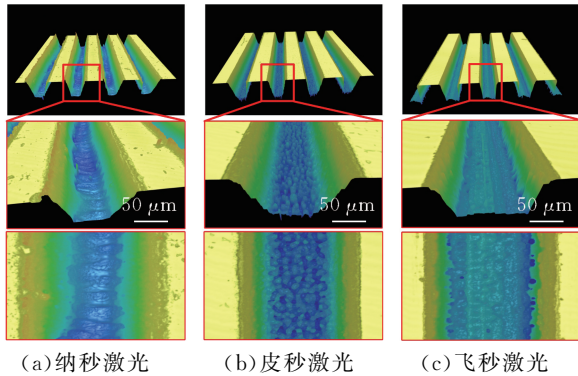


图 3 不同脉宽激光加工微结构的表面形貌观测图

Fig.3 Surface morphologies of microstructures processed by lasers with different pulse durations

3 种激光加工的微沟槽底部的面粗糙度 S_a 也有显著区别,如表 3 所示。飞秒激光加工中,微沟槽底部的 S_a 达到极低的水平($0.10 \sim 0.13 \mu\text{m}$),皮秒激光加工的 S_a ($0.25 \sim 0.35 \mu\text{m}$) 意外地略高于纳秒激光加工($0.20 \sim 0.30 \mu\text{m}$)。与纳秒激光加工相比,皮秒激光加工形成的微沟槽底部虽在宏观上更为规则和平整,但存在细微的乳突状结构。这些乳突状结构是皮秒激光加工粗糙度较大的关键原因。皮秒激光加工中,激光诱导的等离子体冲击波作用在材料汽化的蒸汽上,产生极高瞬时压力,导致熔融材料发生爆炸性喷溅,促使熔体在凝固过程中形成乳突状微结构^[30]。此外,皮秒激光作用于材料表面时产生强烈的马兰戈尼对流效应^[31]。等离子体冲击波引发的熔体爆炸性喷溅与马兰戈尼对流效应共同作用,促使大量的熔体通过堆叠形成乳突状结构。飞秒激光加工微沟槽底部的两侧深度较大、中部略微隆起。这是由于扫描较快时,同一区域接收到的激光脉冲较少,材料表面热效应不显著,表面汽化和蒸发较少,激光与振镜的不同步导致沟槽两侧的刻蚀深度显著大于中部^[32]。激光脉宽越小,获取的微结构越平整,但小脉宽激光却会因其特殊的作用机理而在微结构表面形成更细微的粗糙结构,导致微结构底部的粗糙度有一定程度的增大。

表 3 不同激光工艺及参数制备微结构沟槽底部的粗糙度

Tab.3 Bottom roughness of microstructure grooves made by different laser pulse widths and parameters μm

激光类型	序号	底部粗糙度 S_a
纳秒	1	0.292
	2	0.288
	3	0.209
	4	0.307
	5	0.247
皮秒	6	0.298
	7	0.336
	8	0.382
	9	0.257
	10	0.319
飞秒	11	0.127
	12	0.100
	13	0.117
	14	0.115
	15	0.102

2.2 微结构的润湿性能

液滴体积小于 $10 \mu\text{L}$ 时,重力对液滴运动的影响可忽略不计^[33],因此研究统一采用 $5 \mu\text{L}$ 液滴测量试样表面的静态接触角。如图 4 所示,无微沟槽试样表面呈现轻微的亲水性,静态接触角为 $87^\circ \pm 1^\circ$;有微沟槽的试样表面均表现出疏水性,纳秒、皮秒和飞秒激光制备试样表面的静态接触角分别为 $110^\circ \pm 8^\circ$ 、 $130^\circ \pm 2^\circ$ 和 $124^\circ \pm 1^\circ$ 。皮秒和飞秒激光制备微沟槽表面的液滴接近球体,反映出微沟槽表面优异的疏水性。

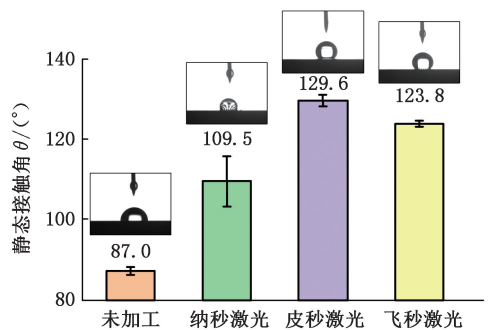


图 4 不同激光工艺制备微结构的试样表面静态接触角

Fig.4 Static contact angle of sample surfaces for microstructure made by different laser processing

不同激光工艺制备的微结构润湿性出现显著差异的原因是,微沟槽内部形成的稳定空气垫减小了固液界面直接接触的面积,提高了疏水性能。进一步分析发现,微沟槽的底部形貌对疏水性也起重要作用。皮秒激光加工在沟槽底部形成的乳突结构与微沟槽共同形成一种新的跨尺度微纳结构,增大了沟槽内截留的空气量,阻止液体向沟槽内部的扩散,显著提高试样表面的疏水性^[34]。如图 4 所示,在皮秒和飞秒加工的微结构表面上,液

滴呈现明显的白色反射光,这表明微结构内部包裹了大量的空气,使空气和液滴的界面产生复杂的光线折射和反射^[30],再次验证了皮秒与飞秒加工形成的微纳结构对空气的截留作用。

2.3 微结构几何精度与润湿性能的关联机制

为进一步揭示微沟槽底部形貌与润湿性能的关联机制,采用显微相机俯拍液滴与试样表面。如图 5a 所示,无微沟槽的试样表面是完全润湿状态,表现出一定的亲水性,该现象满足 Wenzel 理论模型^[35]。

不同脉宽激光加工后的微沟槽底部表面形貌与疏水性能存在明显差异。如图 5b 所示,纳秒激光加工后的微沟槽底部为不规则凹状结构,几乎不存在气泡,这表明该结构不能有效存储空气。依据 Young 润湿性平衡理论^[35],物体的表面能显著影响接触表面的润湿性能。固体的表面能越高,液滴越容易铺展,亲水性越强,接触角越小。纳秒加工的熔融沉积导致表面能分布不均,增大了工件局部的表面能。因此,虽然微沟槽结构增大了试样表面粗糙度和液滴接触角,但凹状底部

形貌和局部高表面能使得接触角仅为 110° 。

如图 5c 所示,皮秒激光加工后的微沟槽底部形貌呈现出明显的乳突状结构,存在较多的气泡,表明该结构能有效捕获更多的空气,液滴被截留的空气层有效托起,使液体与固体之间的有效接触面积减小。依据 Cassie-Baxter 模型^[35],乳突状结构减小液体与固体之间的有效接触面,增大液体与气体之间的有效接触面,液滴在加工后的微沟槽底部表面上形成的气-固-液三相接触状态,使液滴表现出更强的疏水性,接触角可保持在 130° 。

如图 5d 所示,飞秒激光加工形成的微沟槽底部粗糙度最小,但呈现凸状结构,虽存在一定的气泡,但明显少于皮秒制备的微沟槽。这表明凸状结构捕获空气的能力弱于皮秒激光加工后的乳突状结构,仅能在沟槽底部两侧较深的区域捕获少量空气。凸状结构使液体与固体的有效接触面减小,增大了接触角,使整体的气体-固体接触面积比例较小,接触角略小于皮秒激光加工表面,维持在 124° 。

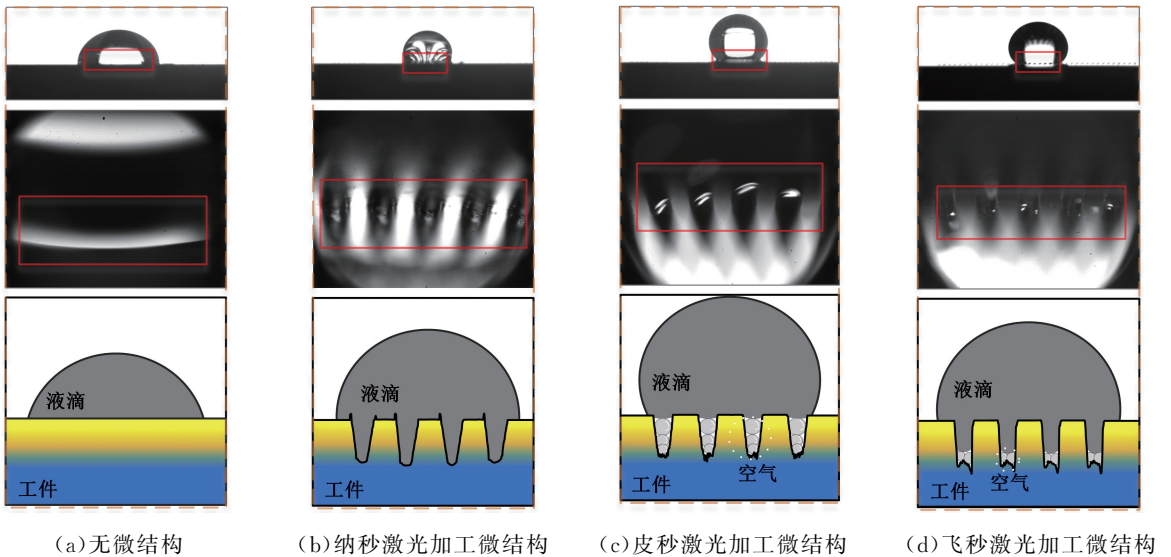


图 5 液滴与工件表面的接触方式

Fig.5 The contact mode between droplets and workpiece surfaces and its schematic diagram

3 结论

1)随着激光脉宽的减小,微结构的几何精度逐渐提高。纳秒激光加工的侧壁倾角最大,皮秒激光次之,飞秒激光加工的侧壁倾角最小。此外,受激光偏振效应影响,同一微沟槽的左侧壁倾角大于右侧壁倾角。

2)纳秒激光加工的热效应强,导致沟槽底部呈凹状结构且熔融现象明显,表面粗糙度较大;皮秒激光加工后的微沟槽底部无熔融沉积,但出现的

乳突状结构使表面粗糙度最大;飞秒激光加工的表面粗糙度最小,但沟槽底部呈现凸状结构。

3)微沟槽底部形貌显著影响液滴接触角,但微沟槽表面总体上呈现疏水性。底部形貌为乳突状结构的微沟槽由于空气存储性能较强而具有最大接触角(约 130°),凸状结构次之(约 124°),凹状结构的接触角最小(约 110°)。

4)微结构底部形貌与表面润湿性能存在密切关联。乳突状形貌能有效捕获空气,从而显著提高材料表面的疏水性能;凸状形貌虽然也具有良

好的疏水性能,但空气捕获能力不及乳突状形貌;凹状形貌及熔融现象导致空气捕获能力最差,抑制了疏水性能的增强。

参考文献:

- [1] 付佳俊,刘超,宋昕蓉,等.激光仿生制备超疏水碳化硅表面及功能化特性研究[J].中国激光,2024,51(20):2002204.
FU Jiajun, LIU Chao, SONG Xinrong, et al. Laser Bionic Fabrication of Superhydrophobic Silicon Carbide Surface and Investigation of Functional Properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(20): 2002204.
- [2] TANG Mingkai, HUANG Xingjiu, YU Jingui, et al. The Effect of Textured Surfaces with Different Roughness Structures on the Tribological Properties of Al Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(10):4115-4125.
- [3] 牛赢,王壮飞,焦锋,等.表面微结构对材料性能影响的研究现状与展望[J].现代制造工程,2023(1):146-153.
NIU Ying, WANG Zhuangfei, JIAO Feng, et al. Research Status and Prospect of the Effect of Surface Microstructure on Material Properties [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(1):146-153.
- [4] 倪家伟,曹自洋,潘杰,等.镍钛合金表面微纳结构构建及其疏水性能研究[J].机床与液压,2024,52(4):44-49.
NI Jiawei, CAO Ziyang, PAN Jie, et al. Study on Construction of Micro-nano Structure and Hydrophobicity of Ni-ti Alloy Surface[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(4):44-49.
- [5] 李文轩,段海涛,李国政,等.激光表面织构技术调控材料摩擦学性能的研究进展[J].表面技术,2024,53(9):85-101.
LI Wenxuan, DUAN Haitao, LI Guozheng, et al. Research Progress in Controlling Material Tribological Properties by Laser Surface Texture Technology [J]. Surface Technology, 2024, 53(9):85-101.
- [6] 李杰,王宇科,石文天,等.激光构建超疏水表面的研究进展[J].化工进展,2025,44(3):1432-1444.
LI Jie, WANG Yuke, SHI Wentian, et al. Research Progress in Constructing Superhydrophobic Surfaces by Laser Processing[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(3):1432-1444.
- [7] 张茂,易川云,杨化雨,等.激光纹理化调控材料表面疏水性能研究进展[J].精密成形工程,2023,15(4):153-163.
ZHANG Mao, YI Chuanyun, YANG Huayu, et al. Research Progress on Hydrophobicity of Material Surfaces Regulated by Laser Texturing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 153-163.
- [8] 陶海岩.飞秒激光固体材料表面微纳结构制备及其功能特性的研究[D].长春:长春理工大学,2014.
TAO Haiyan. Fabrication and Properties Researches of Femtosecond Laser Induced Micro/Nano Structures on Solid Surface[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [9] SONG Juanjuan, WANG Deren, HU Leyong, et al. Superhydrophobic Surface Fabricated by Nanosecond Laser and Perhydropolysilazane [J]. Applied Surface Science, 2018, 455:771-779.
- [10] DONG Jialin, LIU Yang, PACELLA M. Surface Texturing and Wettability Modification by Nanosecond Pulse Laser Ablation of Stainless Steels[J]. Coatings, 2024, 14(4):467.
- [11] CUI Xiaobin, JIAO Yunxiu, GUO Jingxia, et al. Reconciliation and Performance of Dual-bionic Microstructure on Tool Surface [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 282: 109616.
- [12] 李田.金属表面皮秒激光纹理刻蚀工艺及润湿性能研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
LI Tian. A Study on Process Technology and Surface Wettability of Picosecond Laser Texturing Metal[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [13] WANG Rong, BAI Shaoxian. Influence of Laser Geometric Morphology Type on SiC Surface Wettability[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(4):592-596.
- [14] 占彦龙,李文,李宏,等.激光微加工技术制备浸润性可控聚四氟乙烯超疏水表面[J].高分子材料科学与工程,2018,34(4):147-151.
ZHAN Yanlong, LI Wen, LI Hong, et al. Fabrication of Polytetrafluoroethylene Superhydrophobic Surface with Controllable Wettability by Laser Micromachining Technology [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(4):147-151.
- [15] 孙集一.纳秒激光加工铝基超疏水表面制备及性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2024.
SUN Jiyi. Preparation and Properties of Superhydrophobic Surface of Aluminum Processed by Nanosecond Laser[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2024.
- [16] HOU Shuangshuang, HOU Yanyan, XIONG Pingxin, et al. Formation of Long- and Short-periodic Nanoripples on Stainless Steel Irradiated by Femtosecond Laser Pulses[J]. Journal of Physics

- D: Applied Physics, 2011, 44: 50-54.
- [17] ÇAKIR F H. Enhancing the Adhesive Bonding Strength of Ti_6Al_4V Sheets with Fiber Laser Texturing[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022, 114: 103117.
- [18] 翟帅杰. 表面织构液相辅助激光制备及摩擦性能研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2023.
ZHAI Shuaijie. Study on Liquid-phase Assisted Laser Preparation and Friction Properties of Surface Texture[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2023.
- [19] POU P, del VAL J, RIVEIRO A, et al. Laser Texturing of Stainless Steel under Different Processing Atmospheres: from Superhydrophilic to Superhydrophobic Surfaces [J]. Applied Surface Science, 2019, 475: 896-905.
- [20] 杨丁槐. 微沟槽特性对不锈钢织构化表面摩擦特性影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
YANG Dinghuai. Investigation of the Influence of Microgroove Property on Tribological Property of Stainless Steel Textured Surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [21] 郑博源, 底月兰, 王海斗, 等. 激光加工制备金属基体超疏水表面的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(23): 23109-23120.
ZHENG Boyuan, DI Yuelan, WANG Haidou, et al. Research Progress in Preparation of Superhydrophobic Surface of Metal Matrix by Laser Processing[J]. Materials Reports, 2020, 34(23): 23109-23120
- [22] 陈彤. 人工髋关节表面微凹槽润湿性与减摩性研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.
CHEN Tong. Wettability and Anti-friction of Micro-grooves on the Surface of Artificial Hip Joint [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023.
- [23] ZHAO Wen, ZHANG Jing, YU Zhou, et al. Effects of Bioinspired Leaf Vein Structure on Biological Properties of UV Laser Patterned Titanium Alloy [J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 38: 102785.
- [24] 刘克, 刘子源, 陶海岩, 等. 飞秒激光制备可调控铝合金表面微沟槽结构研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(3): 6-13.
LIU Ke, LIU Ziyuan, TAO Haiyan, et al. Research on Femtosecond Laser Fabrication of Adjustable Micro-groove Structure on Aluminum Alloy Surface[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 45(3): 6-13.
- [25] 王广安, 章玉珠, 倪晓武, 等. 离焦量对空气中纳秒激光打孔效率的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1621-1624.
WANG Guangan, ZHANG Yuzhu, NI Xiaowu, LU Jian, et al. Effect of Deviation Distance to Focal Spot on Nanosecond-pulsed-laser Drilling Rates in Air [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(12): 1621-1624.
- [26] 谢明锋, 吴勇华, 闫永君, 等. 激光参数对陶瓷微孔加工质量的影响[J]. 现代制造工程, 2023(6): 78-84.
XIE Mingfeng, WU Yonghua, YAN Yongjun, et al. The Influence of Picosecond Laser Processing Parameters on the Quality of Micropore Punching on Alumina Ceramic [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(6): 78-84.
- [27] 郭杨. 激光诱导微射流辅助烧蚀制备单晶碳化硅微结构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
GUO Yang. Research of Laser Induced Microjet Assisted Ablation for Microstructure Fabrication on single Crystal Silicon Carbide[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [28] 汪帮富, 张永康, 王中旺, 等. 飞秒激光制备 PMMA 表面微结构的作用机理和润湿性研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(9): 1057-1064.
WANG Bangfu, ZHANG Yongkang, WANG Zhongwang, et al. Study on the Mechanism and Wettability of PMMA Surface Microstructure Prepared by Femtosecond Laser [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(9): 1057-1064.
- [29] 肖蒲庐, 陈观华, 陈宇, 等. 飞秒激光织构钛合金表面形貌及润湿性研究[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602208.
XIAO Pulu, CHEN Guanhua, CHEN Yu, et al. Morphology and Wettability of Titanium Alloy Surface Textured by Femtosecond Laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602208.
- [30] 何婉盈, 姚鹏, 褚东凯, 等. 钛表面微凹凸织构的激光加工及其细胞黏附研究[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002605.
HE Wanying, YAO Peng, CHU Dongkai, et al. Fabrication and Cell-adhesion Evaluation of Laser-Ablated Microprotrusion or Microgroove on Titanium [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002605.
- [31] 王鹏飞. 模具表面微织构的激光加工及其摩擦磨损性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
WANG Pengfei. Friction and Wear Properties of Laser Processed Micro-textured Die Surfaces [D]. Jinan: Shandong University, 2023.

413-428.

- [8] LI Lele, XU Jiawang, LI Juguang. Estimating Remaining Useful Life of Rotating Machinery Using Relevance Vector Machine and Deep Learning Network[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 146: 107125.
- [9] CAO Yudong, DING Yifei, JIA Minping, et al. A Novel Temporal Convolutional Network with Residual Self-attention Mechanism for Remaining Useful Life Prediction of Rolling Bearings[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 215:107813.
- [10] RATHORE M S, HARSHA S P. An Attention-based Stacked BiLSTM Framework for Predicting Remaining Useful Life of Rolling Bearings[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 131:109765.
- [11] WANG Yaping, ZHAO Jiajun, YANG Chaonan, et al. Remaining Useful Life Prediction of Rolling Bearings Based on Pearson Correlation-KPCA Multi-feature Fusion [J]. *Measurement*, 2022, 201:111572.
- [12] 雷亚国, 韩天宇, 王彪, 等. XJTU-SY 滚动轴承加速寿命试验数据集解读[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(16):1-6.
- LEI Yaguo, HAN Tianyu, WANG Biao, et al.

XJTU-SY Rolling Element Bearing Accelerated Life Test Datasets; a Tutorial[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(16):1-6.

- [13] HU Likun, HE Xujie, YIN Linfei. Remaining Useful Life Prediction Method Combining the Life Variation Laws of Aero-turbofan Engine and Auto-expandable Cascaded LSTM Model [J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 147:110836.
- [14] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long Short-term Memory [J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8):1735-1780.

(编辑 张 洋)

作者简介:张建宇*,男,1975年生,副教授。研究方向为机电设备故障诊断、系统结构动力学分析。发表论文50余篇。E-mail: zhjy_1999@bjut.edu.cn.

本文引用格式:

张建宇,肖勇,马雅楠.滚动轴承的退化特征信息融合与剩余寿命预测[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(7):1553-1561.

ZHANG Jianyu, XIAO Yong, MA Yanan, et al. Fusion of Degradation Feature Information and Remaining Life Prediction for Rolling Bearings[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(7):1553-1561.

(上接第 1429 页)

- [32] BRANDON S, HAIMOVICH N, YEGER E, et al. Partial Wetting of Chemically Patterned Surfaces: the Effect of Drop Size[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 263(1):237-243.
- [33] 李元可, 魏昕, 汪永超, 等. 皮秒激光加工工艺对微沟槽表面的疏水性研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(3):301-306.
- LI Yuanke, WEI Xin, WANG Yongchao, et al. Study on Hydrophobicity of Micro-groove Surface by Picosecond Laser Processing[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(3):301-306.
- [34] 郭永刚, 吴云飞, 朱东坡, 等. 织构几何参数对超疏水钛合金表面润湿性的影响[J]. *表面技术*, 2024, 53(22):180-190.
- GUO Yonggang, WU Yunfei, ZHU Dongpo, et al. Effect of Texture Geometric Parameters on Wettability of Superhydrophobic Titanium Alloy Surface[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(22): 180-190.
- [35] 曹祥康, 孙晓光, 蔡光义, 等. 耐久型超疏水表面: 理论模型、制备策略和评价方法[J]. *化学进展*,

2021, 33(9):1525-1537.

CAO Xiangkang, SUN Xiaoguang, CAI Guangyi, et al. Durable Superhydrophobic Surfaces: Theoretical Models, Preparation Strategies, and Evaluation Methods[J]. *Progress in Chemistry*, 2021, 33(9):1525-1537.

(编辑 张 洋)

作者简介:倪 敬,男,1979年生,教授、博士研究生导师。研究方向为集成电路、航空航天与核电风电装备制造工艺、人工智能化(加工与装配精准建模、精确设计和精密调控)。发表论文120余篇。E-mail:nj2000@hdu.edu.cn. 蒙 臻*(通信作者),男,1986年生,副教授、硕士研究生导师。研究方向为航空材料及核心构件的高性能制造、制造过程建模仿真、制造过程监测调控。发表论文20余篇。E-mail:mengzhen@hdu.edu.cn.

本文引用格式:

倪敬,卢蝶,蒙臻,等.激光创成微结构几何精度与润湿性能的关键机制[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(7):1423-1429.

NI Jing, LU Die, MENG Zhen, et al. Correlation Mechanism between Geometric Accuracy and Wettability Performance of Laser-induced Micro-structures [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(7):1423-1429.