

基于矩形面积法的激光表面织构润湿性研究

周耀¹, 郑凯雯², 徐松松², 冯绪琛², 李岩^{2*}

(1.烟台理工学院, 山东 烟台 264005; 2.烟台大学 机电汽车工程学院, 山东 烟台 264005)

摘要: **目的** 获取减摩性能优异的织构化表面, 研究织构参数对润湿性的影响。**方法** 基于 Wenzel 模型提出了矩形面积法, 设计了菱形、圆形和方形 3 种微坑织构。以菱形的对角线、圆形的直径和方形的边长为微坑尺寸, 利用光纤激光器在 316L 不锈钢表面加工出微坑尺寸为 0.1、0.2、0.4 mm, 间距为 0.1、0.2、0.4 mm 的菱形、圆形、方形微坑织构, 即 3 (尺寸) × 3 (间距) × 3 (形状), 共 27 组。采用悬滴法, 使用接触角测量仪测量了光滑平面以及微坑织构表面的接触角。通过 Wenzel 模型计算得到其表面粗糙度因子。通过矩形面积法对不同微坑织构表面粗糙因子建立了不同的数学模型。基于该模型分析了织构形貌、尺寸和间距对表面粗糙因子的影响。对水滴接触角测试结果与矩形面积法模型预测值进行了定量分析, 在矩形面积法理论中引入了修正因子 K , 建立了相关的回归方程 ($R^2=0.9975$), 从而完善了粗糙度因子预测模型。**结果** 接触角测试所得织构化表面润湿性的变化趋势与矩形面积法分析的规律一致。当尺寸和形貌不变时, 随着间距增大, 润湿性随之减弱; 在粗糙度系数相等的情况下, 矩形包含的织构面积越大, 润湿性越强; 当尺寸与间距相同时, 润湿性最强。在实验范围内, 尺寸为 0.1 mm、间距为 0.4 mm 的方形微坑织构的润湿性最强, 其水滴接触角为 30.6°。**结论** 矩形面积法对于预测织构化表面润湿性具有可行性, 该方法可以减少测试量, 用理论来优化织构化表面润湿性, 为加工具备优异润湿性的织构化表面提供了参考依据和优化方法。

关键词: 润湿性; 激光技术; 微织构; 亲水性; 表面粗糙因子; 接触角

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)04-0191-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.04.015

Wettability of Laser Surface Texture Based on Rectangular Area Method

ZHOU Yao¹, ZHENG Kaiwen², XU Songsong², FENG Xuchen², LI Yan^{2*}

(1. Yantai Institute of Technology, Shandong Yantai 264005, China; 2. School of Electrical and Mechanical Engineering, Yantai University, Shandong Yantai 264005, China)

ABSTRACT: To achieve textured surfaces with superior friction reduction properties, it is crucial to investigate the impact of laser surface texturing technology on wettability. Based on the wettability theory, the rectangular area method was proposed to analyze the relationship between different micro-pit textures and wettability. With this method, the variation of hydrophilic textured surface wettability was explored through the morphology, spacing, and size of micro-pits. The fiber laser was used to process diamond-shaped, round, and square micro-pit textures with different spacing of 0.1, 0.2, and 0.4 mm and dimensions of 0.1, 0.2, and 0.4 mm on the surface of the 316L stainless steel. The contact angles of the smooth stainless steel and the surface of

收稿日期: 2024-04-10; 修订日期: 2024-09-05

Received: 2024-04-10; Revised: 2024-09-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (51805463)

Fund: Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (51805463)

引文格式: 周耀, 郑凯雯, 徐松松, 等. 基于矩形面积法的激光表面织构润湿性研究[J]. 表面技术, 2025, 54(4): 191-200.

ZHOU Yao, ZHENG Kaiwen, XU Songsong, et al. Wettability of Laser Surface Texture Based on Rectangular Area Method[J]. Surface Technology, 2025, 54(4): 191-200.

*通信作者 (Corresponding author)

the micro-pit texture were tested by a contact angle measuring instrument. The surface roughness factor was calculated by the Wenzel model. Through the theory of the rectangular area method, mathematical models were established for the surface roughness factors of different micro-pit textures. The the roughness factor was obtained with the rectangular area method by calculating the ratio of the actual contact area of the solid-liquid interface in the rectangle to the rectangular area. The wettability of the textured surface of the groove was analyzed by the rectangular area method. It was found that increasing the groove spacing resulted in a decrease in the roughness factor, an increase in the contact angle, and a weakening of the wettability. In addition, when the size of the micro-pit texture remained the same, the wettability decreased with the increase in spacing. When the roughness coefficient was the same, the larger the texture area in the rectangle, the stronger the wettability. When the size and spacing were equal, the wettability was the strongest. In the range of this experiment, the wettability of the square micro-pit texture with a dimension of 0.1 mm and a spacing of 0.4 mm was the strongest, and the contact angle was 30.6°. The trend analysis of textured surface changes obtained through contact angle testing aligned with the conclusions drawn from the proposed rectangular area method, confirming the feasibility of the rectangular area method. In order to verify the accuracy of the model, the test results of the contact angle were quantitatively analyzed with the predicted values of the model. The results showed that the roughness factor calculated by the rectangular area method was slightly lower than the roughness factor calculated by the actual contact angle. This might be due to the V-shaped cross-section of the micro-texture prepared by the fiber laser, and due to the presence of the recast layer, the interior of the micro-pit was not a smooth plane, which made the true area of the micro-pit texture greater than the theoretical area of the micro-pit texture. In addition, the tiny bumps inside the micro-pits were irregular and difficult to calculate. In order to more accurately calculate the roughness factor of different micro-pit textures, a correction factor K was introduced in the theory of the rectangular area method, and the relevant regression equation ($R^2=0.997\ 5$) was established, thereby improving the roughness factor prediction model. The larger correlation index showed that the regression equation was accurate and effective. The method provides a reference basis and an optimization method for processing textured surfaces with excellent wettability.

KEY WORDS: wettability; laser technique; micro texture; hydrophilicity; surface roughness factor; contact angle

在自然界中, 荷叶、水虻的腿、蟋蟀的附足、壁虎的抓足和蛇等动植物表面均具备微小的微纹理结构, 这些表面通过改变润湿性来改善摩擦性能^[1-3]。目前表面微结构的制备方法有微铣削、电火花加工、激光表面织构技术和电化学腐蚀等^[4-5]。其中, 激光表面织构技术 (Laser Surface Texturing, LST) 因在平面或复杂表面均可加工复杂形貌微结构, 具备热影响区小、可控度高和操作简单等优势^[6]而备受关注。

对于光滑的固体表面, 在 LST 加工后, 表面润湿性会发生一定程度的变化^[7-10]。在相同微结构形貌的前提下, 摩擦性能与表面润湿性强弱有较大的关联性, 润湿性越好, 其减摩擦性能就越好^[11-12]。Ge 等^[13]通过摩擦实验研究了激光织构化 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷表面润湿性对摩擦性能的影响, 发现微结构可改善表面的润湿性, 随着润湿性越强, 摩擦因数越低, 摩擦性能越好。Qin 等^[14]通过摩擦磨损试验研究激光织构化 Co-Cr-Mo 表面摩擦性能与表面润湿性的关系, 得出具备较强润湿性的表面可以形成能承受载荷和隔离接触表面的润滑膜, 使其表面摩擦性能较好的结论。杨奇彪等^[15]用飞秒激光在硬质合金 YG6 表面加工出微凹坑形貌, 分析了微凹坑形状、分布密度和单个面积对表面接触角的影响, 并基于 Wenzel 模型和 Cassie 模型的中间状态理论, 分析了微凹坑形状对表面接触

角的影响机理。Zhao 等^[16]研究了亚微米级平行沟槽织构表面的润湿性, 结果显示从平行于凹槽方向测量的接触角大于垂直方向的测量接触角。Liang 等^[17]对具有单向平行纹理的各向异性表面润湿性进行了研究, 发现粗糙度对亲水材料的润湿性影响大于疏水材料。付川等^[18]通过激光加工在钛合金表面制备出不同尺寸的沟槽织构, 发现随着沟槽间距的增加, 表面的各向异性润湿性逐渐增强。以上学者虽然在形状、面积和排布等方面对表面润湿性进行了探究, 但是并未形成综合性的润湿性理论。因此, 为获得减摩擦性能优异的织构化表面, 对润湿性理论进行综合性的深入研究是必不可少的。目前, 为揭示固体表面润湿现象和机理, 前人建立了简化的理论模型来分析固体表面润湿现象, 包括 Young's 方程、Wenzel 模型、Cassie-Baxter 模型等经典理论^[19], 但这些理论不能直接应用于织构化表面润湿性的计算, 需对其进行分析优化。

虽然国内外为获取减摩擦性能优异的织构化表面, 针对微结构改善表面润湿性进行了大量研究, 但大多数研究只分析了沟槽织构化表面的润湿性变化, 本文基于润湿性理论, 提出了矩形面积法, 不仅能对沟槽织构化表面润湿性进行分析, 还可以分析微坑织构化表面润湿性, 并通过了测试验证。

1 织构化表面润湿性理论

1.1 传统润湿性理论

如图 1 所示, 表面润湿性是液体在固体表面上铺开的能力, 可以通过测量水滴接触角来判断^[20]。接触角的大小由表面自由能和形貌决定, 接触角越小, 润湿性越好。表面润湿性在很大程度上取决于 LST 产生的表面形貌^[21]。可润湿表面的水滴接触角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。由于大部分金属摩擦副表面为可润湿表面, 所以本文主要对可润湿表面进行分析研究。

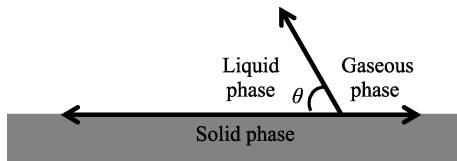


图 1 接触角示意图

Fig.1 Schematic diagram of the contact angle

Wenzel^[22]对液体表面张力进行了分析研究, 从而得到了经典的 Young's 方程:

$$\cos \theta_Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

式中: θ_Y 为本征接触角, γ_{SV} 、 γ_{SL} 和 γ_{LV} 分别为固气表面张力、固液表面张力和液气表面张力。

由于 Young's 方程只适用于理想的光滑表面, 因此 Wenzel 对粗糙表面进行了分析, 将表面粗糙度因子 r 引入 Young's 方程, 并假设液滴可以完全润湿粗糙表面^[23]。激光加工的织构化表面润湿性规律符合 Wenzel 模型^[24]。

$$\cos \theta_w = r \cos \theta_Y \quad (2)$$

式中: θ_w 为表观接触角, r 为表面粗糙度因子, 可表示为:

$$r = \frac{S_{\text{真实固液接触面积}}}{S_{\text{表观固液接触面积}}} \quad (3)$$

一般来说, 粗糙表面的真实固液接触面积大于表观接触面积, 因此表面粗糙度因子大于 1 ($r > 1$)。通

过对 Wenzel 公式进行分析, 可以得出亲水表面的表观接触角 θ_w 小于本征接触角 θ_Y 。李岩^[11]通过对直线沟槽微结构的研究, 提出了利用长度的计算方法来近似计算表面粗糙度因子 r 。如图 2 所示, 假设水滴覆盖了 n 个沟槽, 在垂直于微结构的方向上固-液界面的实际接触长度 $L_{\text{实}}$ 与固-液界面的表观接触长度 $L_{\text{表}}$ 分别为:

$$L_{\text{实}} = n(d + a + 2h) \quad (4)$$

$$L_{\text{表}} = n(d + a) \quad (5)$$

式中: n 为沟槽数量; d 为沟槽宽度; a 为沟槽间距; h 为沟槽深度。其表面粗糙因子为:

$$r = \frac{L_{\text{实}}}{L_{\text{表}}} = 1 + \frac{2h}{d + a} \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 粗糙度因子随沟槽间距以及沟槽宽度的增大而减小。通过 Wenzel 式 (2) 可知, 表观接触角随表面粗糙度因子减小而增大。长度计算法是通过真实接触长度 (球冠的直径加上其所覆盖织构两侧高度) 与表观接触长度 (球冠的直径) 之比来计算粗糙度因子, 但是长度计算法只能对沟槽织构化表面的粗糙度因子进行计算。在此基础上, 本文提出了矩形面积法, 这种方法不仅能计算沟槽织构化表面的粗糙度因子, 还可对理想情况下微坑织构化表面的粗糙度因子进行分析计算。

1.2 矩形面积法

水滴在固体表面上近似呈现为球缺状, 其与固体表面所接触的表面为球冠, 覆盖多个微坑织构。矩形面积法通过近似地截取矩形内部真实接触面积与矩形面积之比来计算粗糙度因子 r 。真实接触面积是矩形面积及内部微坑织构部分表面积。如图 3 所示, 在固体表面上截取了长度为 L (球冠的直径)、宽度为 D (间距加微坑尺寸即中距) 的矩形, 作为其表观接触面积, 其矩形的宽度远远小于矩形的长度。表观接触面积可以表示为:

$$S_0 = DL = (d + a)L \quad (7)$$

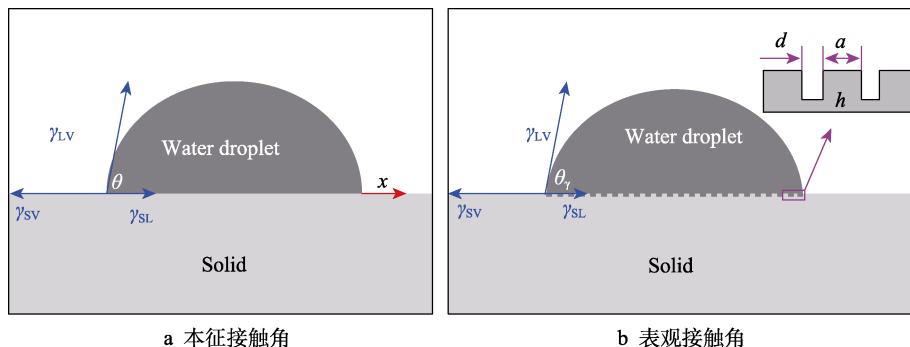


图 2 本征接触角 (a) 及表观接触角 (b) ^[11]

Fig.2 Intrinsic contact angle (a) and apparent contact angle (b) ^[11]

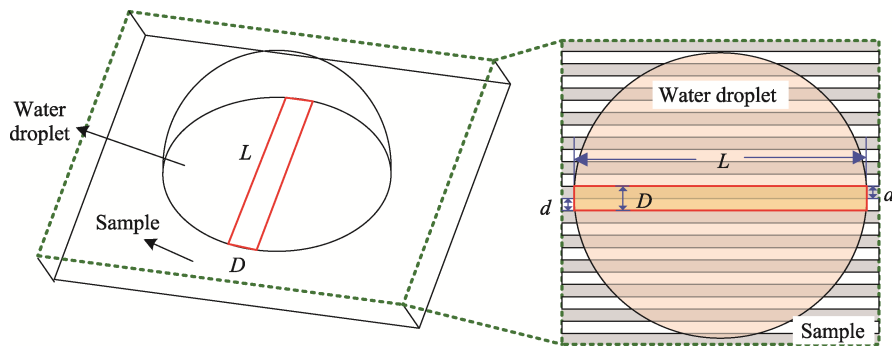


图 3 矩形面积法的表观接触面积示意图(沟槽结构化表面)

Fig.3 Schematic diagram of the apparent contact area of the rectangular area method (grooved textured surface)

1.3 基于矩形面积法分析不同结构化表面润湿性

1.3.1 沟槽结构化表面润湿性分析

直线沟槽通过固定激光加工参数来直接加工。因此,假设沟槽深度为固定值 h 。由图 3 可知,沟槽结构化表面的真实面积 S_1 为:

$$S_1 = DL + 2hL \quad (8)$$

因此,沟槽结构化表面的粗糙度因子为:

$$r_1 = \frac{S_1}{S_0} = \frac{DL + 2hL}{DL} = 1 + \frac{2h}{d+a} \quad (9)$$

通过式 (9) 可知,间距增大,导致沟槽结构化表面的粗糙度因子减小,从而增大了接触角,润湿性减弱。此结论与通过长度计算法得出的结果相同,证明矩形面积法存在一定的可行性。

1.3.2 微坑结构化表面润湿性分析

基于矩形面积法,在亲水表面上对常见的 3 种微坑结构化表面(菱形、圆形、方形)的水滴接触角随结构间距、尺寸的变化趋势进行了理论计算。菱形的对角线、圆形的直径和方形的边长,统一设计为 d ;深度由激光加工参数决定,并将其假设为 h ;微坑的间距设为 a 。使用固定激光加工参数对微坑结构化进行加工,通过矩形面积法研究微坑结构化 2 个变量(间距 a 和尺寸 d)的变化对结构化表面润湿性的影响。

如图 4 所示,矩形覆盖的微坑结构在垂直于试样的方向上固-液界面的实际接触面积为:

$$A = \frac{4dh}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

矩形覆盖的微坑结构的数量 N 约为:

$$N = \frac{L}{D} \quad (11)$$

矩形面积法的菱形微坑结构的真实面积 S_2 和粗糙度因子 r_2 为:

$$S_2 = DL + AN = DL + \frac{2\sqrt{2}dhL}{D} \quad (12)$$

$$r_2 = \frac{S_2}{S_0} = 1 + \frac{2\sqrt{2}dh}{D^2} = 1 + \frac{2\sqrt{2}dh}{(d+a)^2} \quad (13)$$

设粗糙度系数 $x = \frac{dh}{(d+a)^2}$, 代入式 (13), 简化

公式得:

$$r_2 = \frac{S_2}{S_0} = 1 + 2\sqrt{2}x \quad (14)$$

矩形面积法的圆形微坑结构的真实面积 S_3 和粗糙度因子 r_3 为:

$$S_3 = DL + \frac{\pi dhL}{D} \quad (15)$$

$$r_3 = 1 + \frac{\pi dh}{(d+a)^2} = 1 + \pi x \quad (16)$$

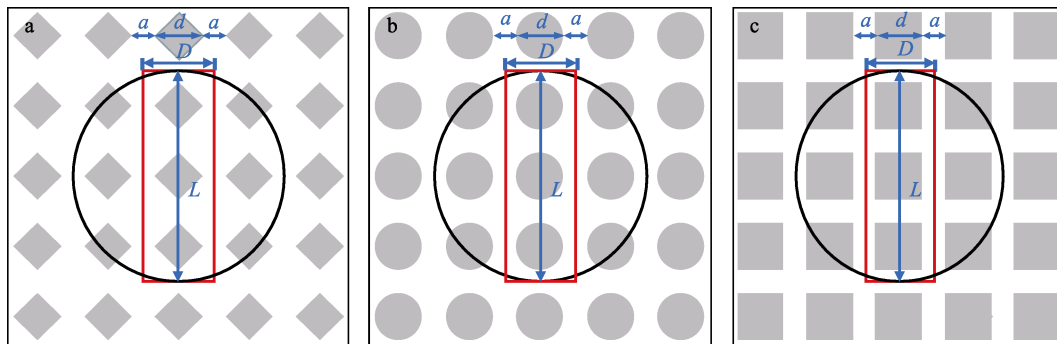


图 4 菱形微坑结构化表面 (a)、圆形微坑结构化表面 (b) 及方形微坑结构化表面 (c)

Fig.4 Diamond-shaped micro-pit textured surface (a), round micro-pit textured surface (b) and square micro-pit textured surface (c)

矩形面积法的方形微坑织构的真实面积 S_4 和粗糙度因子 r_4 为:

$$S_4 = DL + \frac{4dhL}{D}$$

(17)

$$r_4 = 1 + \frac{4dh}{(d+a)^2} = 1 + 4x$$

(18)

由式 (14)、(16) 和 (18) 可知, 当微坑织构尺寸的设定值 d 不变时, 随着间距 a 减小, 粗糙度因子 r 变大, 接触角减小, 润湿性增强。并且在粗糙度系数 x 相等的情况下, 可得 $r_4 > r_3 > r_2$, 所以织构化表面的接触角由小到大依次为方形、圆形、菱形, 织构化表面润湿性由强到弱依次为方形、圆形、菱形。在选取的矩形中, 微坑所占面积由大到小依次为方形、圆形、菱形。由此可以推出, 在 x 相等的情况下, 矩形包含的织构面积越大, 织构化表面的润湿性越强。

在尺寸 d 改变、间距不变的情况下, 粗糙度系数 x 的变化如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 当 $d=a$ 时, x 取最大值, 此时相同形貌织构化表面的接触角最小, 润湿性最强。

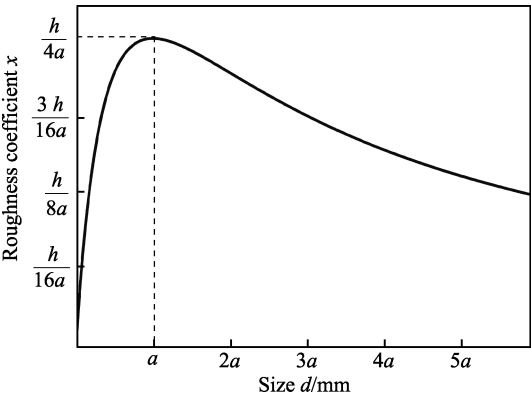


图 5 粗糙度系数 x 的变化示意图
Fig.5 Schematic diagram of the change of roughness coefficient x

综上所述, 通过矩形面积法对微坑织构化表面的不同间距、尺寸和形貌进行了理论分析, 得出以下规

律: 当微坑织构尺寸的设定值 d 不变时, 随着间距 a 的增大, 其粗糙度因子 r 减小, 接触角随之增大, 润湿性越差; 在粗糙度系数 x 相等的情况下, 矩形包含的织构面积越大, 织构化表面的润湿性越好; 在尺寸 d 改变、间距 a 不变的情况下, 当 $d=a$ 时, x 取最大值, 即相同微坑织构形貌的情况下, 尺寸与间距相同时, 接触角越小, 润湿性越好。

2 测试验证

2.1 测试材料

使用长宽高为 20 mm×20 mm×4 mm 的 316L 不锈钢平板作为样品, 材料属性如表 1 所示。测试前对样品进行预处理, 在金相磨抛机上使用 300 目、1000 目和 2000 目砂纸对试样表面进行打磨以去除毛刺, 用金相研磨膏和抛光布对试样进行抛光使表面粗糙度 $Ra < 0.5$, 随后将其放入无水乙醇中进行 2 次超声波清洗, 在无尘纸擦拭后用冷风吹干备用。

2.2 测试设备及使用

采用光纤激光器作为 LST 的加工设备, 型号为 LQL-F20, 其主要参数如表 2 所示。激光器的可调参数为激光功率、调制频率、扫描速度和扫描次数。本文使用课题组在 316L 不锈钢材料上确定的最优激光加工参数来制备织构化表面, 激光加工参数为: 激光功率 1 W、调制频率 65 kHz、扫描速度 350 mm/s^[12], 此时对应的沟槽深度为 8 μm。

接触角测量平台由接触角测量仪 (JC2000C1) 与 CNC 系统组成。如图 6 所示, JC2000C1 具有专用的 CCD 相机, 可以将图像清晰地显示在 CNC 系统中的测量软件上, 还具备精确加样器可以精准地控制液滴的大小, 并且试样平台可以移动和升降, 能够准确地将试样区域放置在针尖下面。JC2000C1 中注射器的容量为 10 μL, 每一小格的精度为 0.2 μL。

表 1 316L 不锈钢材料的力学属性^[11]
Tab.1 Mechanical properties of 316L stainless steel material^[11]

Materials	Hardness (HV)	Yield strength/MPa	Strength of extension/MPa	Melting point/℃
316L stainless steel	~200	269.17	603.50	1 371-1 398

表 2 LQL-F20 光纤激光器主要参数
Tab.2 Main parameters of LQL-F20 fiber laser

Technical index	Parameter
Optical maser wavelength/nm	1 064
Laser power/W	0-20
Modulation frequency/kHz	20-80
Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	100-1 500
Scan times	1-n

在使用接触角测量平台之前, 要先对其进行调试: 将注射器吸满液体, 固定到精确加样器上; 利用倾角调节台配合水平尺来调整 CCD 相机的轴线; 打开 JC2000C1 自带的光源, 并开到最大亮度; 将不锈钢试样放在试样平台上, 并通过平移试样平台使其位于针尖下方; 打开 CNC 系统的接触角测量软件, 通过调节 CCD 相机的倍率, 使图像清晰地呈现在测量软件上; 通过调整试样平台的高度和软件的设置, 使

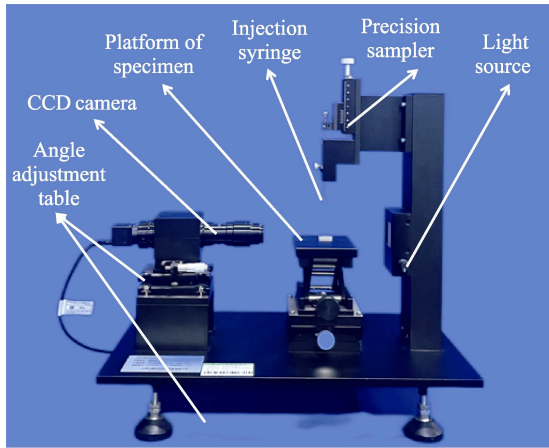


图 6 接触角测量仪
Fig.6 Contact angle measuring instrument

针尖和平板都处在图像合适位置。调试完成后，即可开展水滴接触角测试。

由于微结构的整体尺寸设计为 5 mm×5 mm，常规的 5 μL 液滴量过多，会溢出结构边缘，影响水滴角测量，因此液滴量选用 2 μL ^[11-12]。因为测试过程中

的液滴量为 2 μL ，相对较小，受液体表面张力和黏附力等影响，水滴并不会自然下落，因此使用悬滴法来测量水滴接触角，如图 7 所示。首先观察测量平台上的刻度，转动精确加样器，直到刻度下降 10 小格时，停止转动，此时液滴量为 2 μL ，并且能从图像上可以看到液滴的出现。随后调节试样平台的高度使不锈钢试样与液滴接触后，再让试样平台下落，确保图像出现试样上边缘及水滴。最后，利用接触角测量软件冻结接触角图像并保存，利用 CNC 系统的接触角算法进行精确测量，并计算其水滴接触角的大小。

2.3 测试设计及过程

首先测量光滑 316L 不锈钢平板试样表面的接触角数值，通过上述测量方式进行测量，并取平均值，得出光滑试样表面的接触角 $\theta_0=74.4^\circ$ 。随后通过光纤激光器对 316L 不锈钢平板进行加工。因为沟槽结构的宽度和深度都是由激光加工参数确定的，所以只改变沟槽间距来观察接触角的变化情况，考虑到沟槽存在重铸层，设计了长度为 5 mm，间距为 100、200 和 300 μm 的微结构阵列，如图 8 所示。

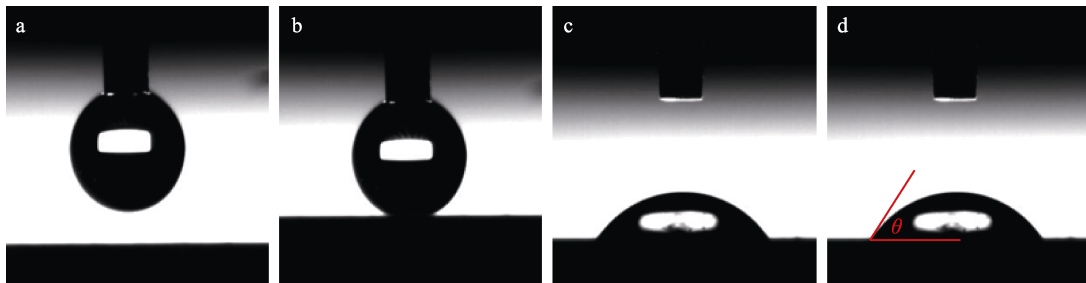


图 7 滴出 2 μL 液滴 (a)、试样与液滴接触 (b)、试样平台回落 (c) 及测量结果 (d)
Fig.7 2 μL droplets (a), sample in contact with the droplet (b), sample falling back to the platform (c) and measurement result (d)

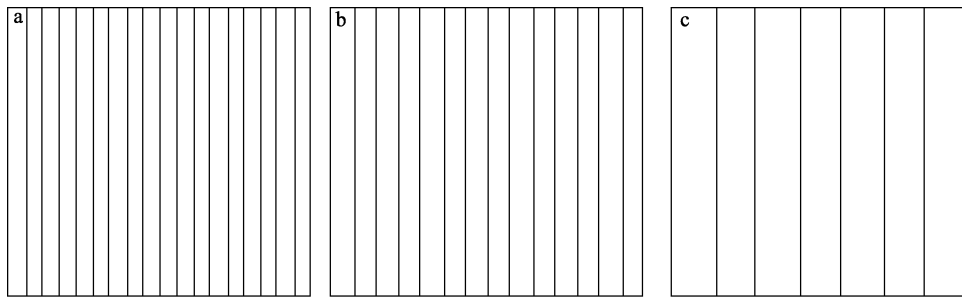


图 8 间距为 100 μm 的沟槽结构化表面示意图 (a)、间距为 200 μm 的沟槽结构化表面示意图 (b) 及间距为 300 μm 的沟槽结构化表面示意图 (c)

Fig.8 Schematic diagram of grooved textured surfaces with a spacing of 100 μm (a), schematic diagram of grooved textured surfaces with a spacing of 200 μm (b) and schematic diagram of grooved textured surfaces with a spacing of 300 μm (c)

结合矩形面积法得出的规律，设计了如表 3 所示的尺寸、间距和形貌的织构化表面，共加工了 27 组微坑织构化表面。通过软件控制光纤激光器，按照表 3 的测试设计顺序加工出图 9 所示的微坑织构化表面。从图 9 可以看出，微坑结构的加工较为复杂，不仅需要加工外框，而且还要在内部填充直线。考虑到

表 3 LST 测试设计表
Tab.3 LST test design

Level	Micro-pit morphology	Size/mm	Spacing/mm
1	Diamond	0.1, 0.2, 0.4	0.1, 0.2, 0.4
2	Round	0.1, 0.2, 0.4	0.1, 0.2, 0.4
3	Square	0.1, 0.2, 0.4	0.1, 0.2, 0.4

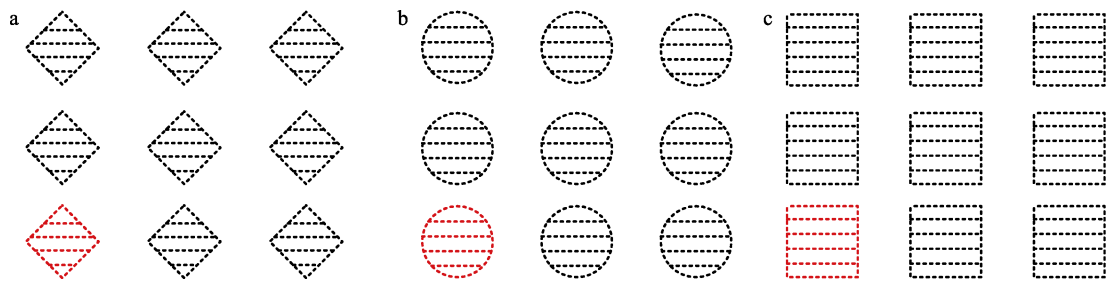


图 9 菱形微坑结构化表面示意图 (a)、圆形微坑结构化表面示意图 (b) 及方形微坑结构化表面示意图 (c)
Fig.9 Schematic diagram of the textured surface of the diamond-shaped micro-pit (a), schematic diagram of the textured surface of the round micro-pit (b) and schematic diagram of the textured surface of the square micro-pit (c)

直线沟槽的宽度大约为 20 μm ，为确保填充合适，设定填充间距为 20 μm 。

3 测试结果及分析

3.1 沟槽结构化表面接触角

通过光纤激光器对样品进行加工后，放入无水乙醇中用超声波清洗 20 min，取出用无尘纸擦拭后吹干，其表面形貌如图 10 所示。采用 JC2000C1 测量表面接触角，在加工区域内取 3 个位置测量接触角，并取平均值作为最终结果。

图 11 为不同间距的直线沟槽微结构接触角，在间距为 100 μm 时，接触角为 38.5°，相较于光滑表面，结构化表面润湿性极大增强。而随着间距的增大，接

触角逐渐变大，润湿性减弱，但还是优于光滑表面的润湿性。测试结果与矩形面积法得出的规律一致。

3.2 微坑结构化表面接触角

将制备的微坑结构用超声波清洗机清洗 20 min。取出用无尘纸擦拭后吹干，观察其表面形貌，如图 12 所示。可以看出微坑的形貌较为规则，尺寸和间距也符合要求。

采用 JC2000C1 测量表面接触角，在加工区域内取 3 个位置进行数据采集，取平均值作为最终结果。

图 13 分别是菱形、圆形和方形微坑结构随间距的变化，以及不同结构尺寸水滴接触角的变化情况。从图 13 可以看出，随着间距的变大，微坑结构化表面的接触角均随之增大，润湿性减弱。对 3 张图片进

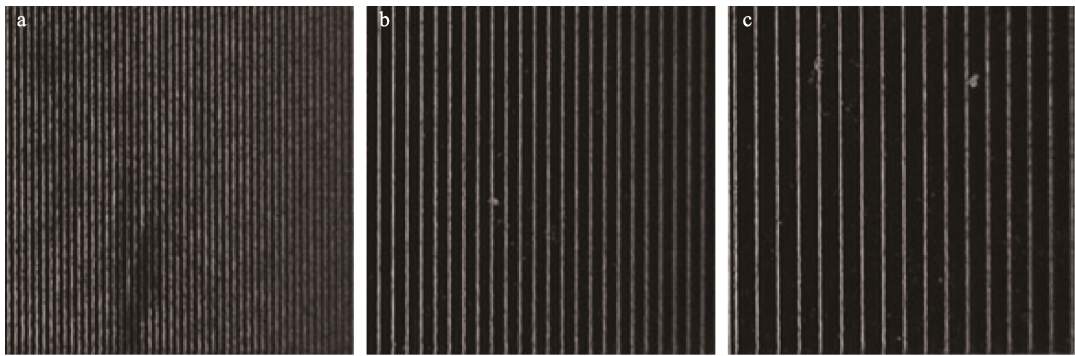


图 10 间距为 100 μm 的直线沟槽微结构 (a)、间距为 200 μm 的直线沟槽微结构 (b) 及间距为 300 μm 的直线沟槽微结构 (c)
Fig.10 Linear groove micro-texture with a spacing of 100 μm (a), linear groove micro-texture with a spacing of 200 μm (b) and linear groove micro-texture with a spacing of 300 μm (c)

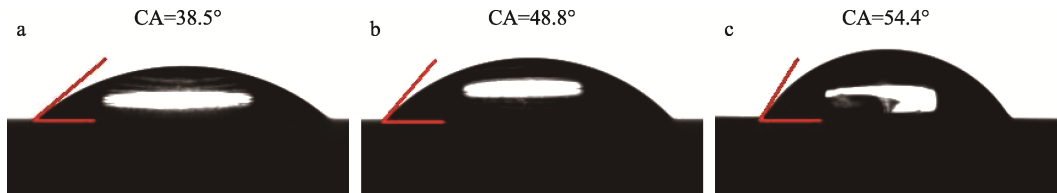


图 11 间距为 100 μm 的直线沟槽微结构接触角 (a)、间距为 200 μm 的直线沟槽微结构接触角 (b) 及间距为 300 μm 的直线沟槽微结构接触角 (c)
Fig.11 Contact angles of linear groove micro-texture with a spacing of 100 μm (a), contact angles of linear groove micro-texture with a spacing of 200 μm (b) and contact angles of linear groove micro-texture with a spacing of 300 μm (c)

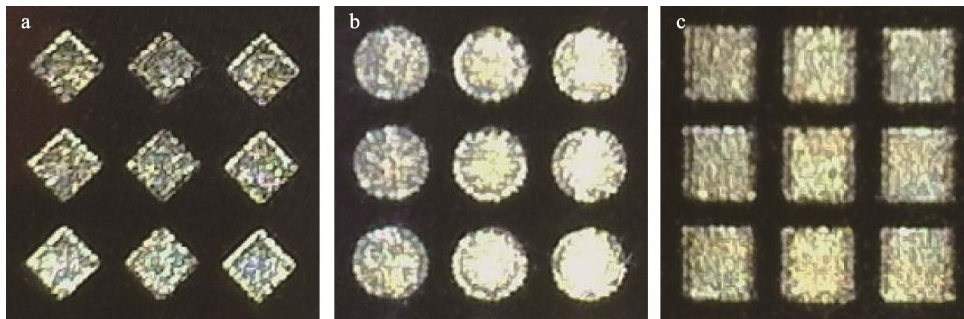


图 12 菱形微坑织构化表面部分示意图 (a)、圆形微坑织构化表面部分示意图 (b) 及方形微坑织构化表面部分示意图 (c)

Fig.12 Schematic diagram of the textured surface of the diamond-shaped micro-pit (a), schematic diagram of the textured surface of the round micro-pit (b) and schematic diagram of the textured surface of the square micro-pit (c)

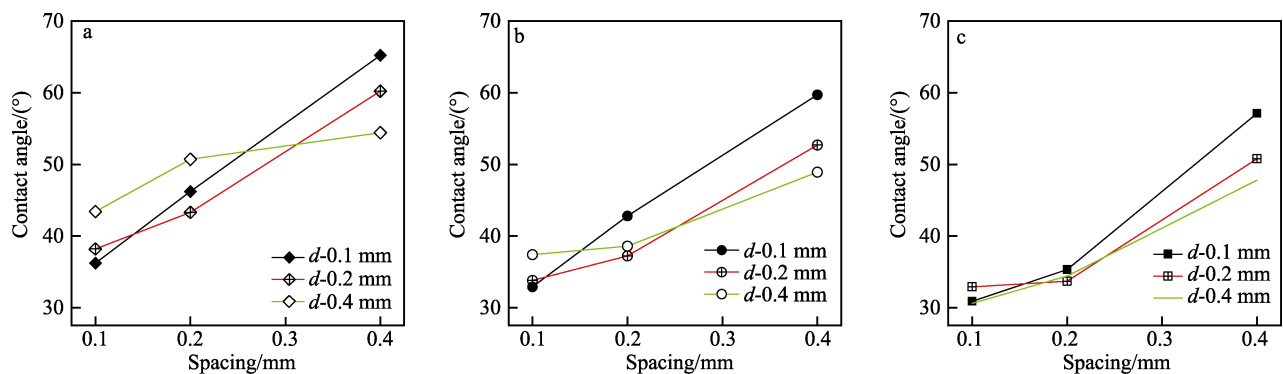


图 13 菱形微坑织构的接触角 (a)、圆形微坑织构的接触角 (b) 及方形微坑织构的接触角 (c)

Fig.13 Contact angles of diamond-shaped micro-pit texture (a), contact angles of round micro-pit texture (b) and contact angles of square micro-pit texture (c)

行对比分析,在相同间距和尺寸的前提下,织构化表面的接触角由小到大依次为方形、圆形、菱形,织构化表面润湿性由强到弱依次为方形、圆形、菱形,这与矩形面积法得出的规律一致。除了在间距为 0.1 mm 的情况下,尺寸为 0.4 mm 的方形微坑织构的接触角要略小于尺寸为 0.1 mm 的接触角,其余在尺寸改变、间距不变的情况下,当尺寸与间距相等时,均为接触角最小,润湿性最好。经分析,产生这一误差的原因因为 LST 会生成亲水氧化物并且表面氧原子数量也会增多^[23]。而尺寸越大的微坑织构,其微坑内部填充的沟槽数量翻倍,氧化物和氧原子数量相对较多,导致化学改性增强了表面润湿性,从而使接触角较小。由于正方形的面积较大,填充的沟槽面积要远远大于菱形和圆形,因此织构内外都会产生大量的氧化物,导致化学改性增强了表面润湿性,从而使接触角较小^[24]。

将不同微坑织构形貌测得的水滴接触角以及光滑试样表面的接触角代入式 (2) 获得粗糙度因子,将该粗糙度因子与通过矩形面积法计算得到的粗糙度因子进行比较,以验证矩形面积法的准确性。结果如表 4~6 所示,结果显示通过矩形面积法计算得到的粗糙度因子要略低于通过实际接触角计算得到的粗糙度因子。

由于通过激光打标机制备得到的微织构截面呈 V 形,并且重铸层的存在使微坑内部并不是光滑平面的,这使得微坑织构的真实面积要大于矩形面积法中微坑织构的理论面积。此外由于微坑内部微小凸起并不规则且难以计算,因此为了更加准确地计算不同微坑织构的粗糙度因子,引入修正因子 K 。修正后的菱形、圆形以及方形微坑织构的粗糙度因子表达式为:

表 4 菱形微坑织构化表面粗糙度因子结果
Tab.4 Surface roughness factor results of diamond-shaped micro-pit texture

Size/mm	Spacing/mm	Wenzel model	Rectangular area method
0.1	0.1	3.00	1.06
0.1	0.2	2.57	1.03
0.1	0.4	1.56	1.01
0.2	0.1	2.92	1.05
0.2	0.2	2.71	1.03
0.2	0.4	1.85	1.01
0.4	0.1	2.70	1.04
0.4	0.2	2.36	1.03
0.4	0.4	2.16	1.01

表 5 圆形微坑织构化表面粗糙度因子结果
Tab.5 Surface roughness factor results of round micro-pit texture

Size/mm	Spacing/mm	Wenzel model	Rectangular area method
0.1	0.1	3.12	1.06
0.1	0.2	2.73	1.03
0.1	0.4	1.88	1.01
0.2	0.1	3.09	1.06
0.2	0.2	2.96	1.03
0.2	0.4	2.25	1.01
0.4	0.1	2.95	1.04
0.4	0.2	2.91	1.03
0.4	0.4	2.44	1.02

表 6 方形微坑织构化表面粗糙度因子结果
Tab.6 Surface roughness factor results of square micro-pit texture

Size/mm	Spacing/mm	Wenzel model	Rectangular area method
0.1	0.1	3.19	1.08
0.1	0.2	3.03	1.04
0.1	0.4	2.02	1.01
0.2	0.1	3.12	1.07
0.2	0.2	3.09	1.04
0.2	0.4	2.35	1.02
0.4	0.1	3.20	1.05
0.4	0.2	3.07	1.04
0.4	0.4	2.50	1.02

$$r_{\text{菱形}} = 1 + \frac{2\sqrt{2}dh + K}{(d + a)^2} \quad (19)$$

$$r_{\text{圆形}} = 1 + \frac{\pi dh + K}{(d + a)^2} \quad (20)$$

$$r_{\text{方形}} = 1 + \frac{4dh + K}{(d + a)^2} \quad (21)$$

根据实验结果，计算得出不同微坑织构修正值。根据修正值随微坑织构面积的变化趋势，利用 MATLAB R2022b 中的 Curve Fitting 功能对其进行函数拟合，线性拟合多项式为：

$$K = -19.82S^2 + 7.191S + 0.095 \ 89 \quad (22)$$

相关指数 $R^2=0.997 \ 5$ ， $R^2 \geq 0.85$ 表明模型拟合效果显著^[26]。

4 结论

1) 通过矩形面积法分析沟槽织构化表面的润湿性，得出随着沟槽间距增大，粗糙度因子减小，接触角增大，润湿性减弱。

2) 通过矩形面积法分析得出微坑织构化表面的

润湿性变化规律：当尺寸不变时，随着间距增大，润湿性随之减弱；在粗糙度系数相等的情况下，矩形包含的织构面积越大，润湿性越强；当尺寸变化，而间距和形貌不变的情况下，尺寸与间距相同时，润湿性最强。

3) 通过接触角测试分析得到的织构化表面变化趋势与提出的矩形面积法得出的结论一致，证实了矩形面积法的可行性。该方法可以减少测试量，用理论来优化织构化表面润湿性，为加工具备优异润湿性的织构化表面提供了参考依据和优化方法。

4) 通过对比矩形面积法与 Wenzel 模型（基于实际接触角）计算得到的粗糙度因子，发现结果相差较大，因此引入了修正因子 K ， K 值由微坑织构的面积决定，建立了相关的回归方程，较大的相关指数表明了该回归方程准确有效，从而完善了粗糙度因子预测模型。

参考文献：

[1] SHAFIEI M, ALPAS A T. Nanocrystalline Nickel Films with Lotus Leaf Texture for Superhydrophobic and Low Friction Surfaces[J]. Applied Surface Science, 2009, 256(3): 710-719.

[2] 孙晓雨, 孙树峰, 王津, 等. 超疏水表面激光加工技术研究进展[J]. 中国表面工程, 2022, 35(1): 53-71.

SUN X Y, SUN S F, WANG J, et al. Research Progress of Laser Processing Technology for Superhydrophobic Surface [J]. China Surface Engineering, 2022, 35(1): 53-71.

[3] 郑凯瑞, 杨发展, 姜芙林, 等. 激光功率与扫描速度对微织构形貌影响试验研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(1): 61-65.

ZHENG K R, YANG F Z, JIANG F L, et al. Study on the Influence of Laser Power and Scanning Speed on Micro Texture Morphology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(1): 61-65.

[4] 杨海欧, 林鑫, 陈静, 等. 激光成形制备生物医用钛合金材料研究进展[J]. 铸造技术, 2011, 32(10): 1431-1434.

YANG H O, LIN X, CHEN J, et al. Laser Fabrication of Biomedical Titanium Materials[J]. Foundry Technology, 2011, 32(10): 1431-1434.

[5] 刘煜. 纳秒激光加工硬质合金表面微织构及其性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021: 5-6.

LIU Y. Study on Carbide Cutting Tool's Surface Micro-texture Processed by Nanosecond Laser and Its Correlative Mechanisms[D]. Changchun: Changchun University, 2021: 5-6.

[6] 郝秀清, 宋晓路, 李亮. 表面织构化刀具的研究现状与进展[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 170-181.

HAO X Q, SONG X L, LI L. Development and Perspective of Surface Texturing Tools[J]. Surface Technology,

- 2016, 45(9): 170-181.
- [7] 李元成, 张晓兵, 毛忠, 等. 紫外纳秒激光加工 316L 不锈钢微槽尺寸和形貌控制研究[J]. 应用激光, 2019, 39(6): 994-1001.
- LI Y C, ZHANG X B, MAO Z, et al. Study on Size and Morphology Control of 316L Stainless Steel Microgrooves Processed by Ultraviolet Nanosecond Laser[J]. Applied Laser, 2019, 39(6): 994-1001.
- [8] LI B J, LI H, HUANG L J, et al. Femtosecond Pulsed Laser Textured Titanium Surfaces with Stable Superhydrophilicity and Superhydrophobicity[J]. Applied Surface Science, 2016, 389: 585-593.
- [9] 张静娴, 姚朝晖, 郝鹏飞, 等. 复合超疏水表面制备及其上液滴运动特性研究[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(3): 322-330.
- ZHANG J X, YAO Z H, HAO P F, et al. Study of Pieparation and Dynamic Hydrophobicity of Superhydrophobic Surfaces with Micro-Nano Textures[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(3): 322-330.
- [10] CHEN Y K, MELVIN L S, RODRIGUEZ S, et al. Capillary Driven Flow in Micro Scale Surface Structures[J]. Microelectronic Engineering, 2009, 86(4/5/6): 1317-1320.
- [11] 李岩. 脑深部刺激电极颅内穿刺机理及靶点定向技术的研究[D]. 济南: 山东大学, 2017: 78-95.
- LI Y. Study on Intracranial Puncture Mechanism and Target Orientation Technology of Deep Brain Stimulation Electrode[D]. Jinan: Shandong University, 2017: 78-95.
- [12] 周耀. 低频振动下微结构电极对脑组织的穿刺性能研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2023: 34-57.
- ZHOU Y. Study on the Puncture Performance of Microtexture Electrode to Brain Tissue under Low Frequency Vibration[D]. Yantai: Yantai University, 2023: 34-57.
- [13] GE D L, DENG J X, DUAN R, et al. Effect of Surface Wettability on Tribological Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ Ceramic under Wet Lubrication[J]. Ceramics International, 2019, 45(18): 24554-24563.
- [14] QIN L G, LIN P, ZHANG Y L, et al. Influence of Surface Wettability on the Tribological Properties of Laser Textured Co-Cr-Mo Alloy in Aqueous Bovine Serum Albumin Solution[J]. Applied Surface Science, 2013, 268: 79-86.
- [15] 杨奇彪, 陈中培, 杨涛, 等. 飞秒激光加工 YG6 不同微结构表面浸润性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091404.
- YANG Q B, CHEN Z P, YANG T, et al. Surface Wettability of Different Micro-Textured YG6 Processed by Femtosecond Lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 091404.
- [16] ZHAO Y, LU Q H, LI M, et al. Anisotropic Wetting Characteristics on Submicrometer-Scale Periodic Grooved Surface[J]. Langmuir, 2007, 23(11): 6212-6217.
- [17] LIANG Y D, SHU L M, NATSU W, et al. Anisotropic Wetting Characteristics Versus Roughness on Machined Surfaces of Hydrophilic and Hydrophobic Materials[J]. Applied Surface Science, 2015, 331: 41-49.
- [18] 付川, 张红哲, 何福本, 等. 基于激光加工的微米级平行沟槽表面润湿性实验研究[J]. 机械工程师, 2018(3): 69-73.
- FU C, ZHANG H Z, HE F B, et al. Experimental Study on Wettability of Micro Periodic Grooved Surface by Laser Processing[J]. Mechanical Engineer, 2018(3): 69-73.
- [19] 李小兵, 刘莹. 微观结构表面接触角模型及其润湿性[J]. 材料导报, 2009, 23(24): 101-103.
- LI X B, LIU Y. Contact Angle Model and Wettability on the Surfaces with Microstructures[J]. Materials Reports, 2009, 23(24): 101-103.
- [20] 庞小龙. 二维微结构表面浸润性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013: 8-9.
- PANG X L. Study on Surface Wettability of Two-dimensional Microstructure[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013: 8-9.
- [21] YOUNG T. An Essay on the Cohesion of Fluids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I, 1805, 95: 65-87.
- [22] WENZEL R N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1936, 28(8): 988-994.
- [23] 肖晨光. 基于润湿性机制的陶瓷刀具激光表面改性[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018: 14-15.
- XIAO C G. Laser Surface Modification of Ceramic Tools Based on Wettability Mechanism[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018: 14-15.
- [24] 徐长风. 脑深部刺激套管电极织构化表面润湿及减摩性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2021: 36-42.
- XU C F. Study on Wetting and Antifricition Properties of Textured Surface of Deep Brain Stimulation Cannula Electrode[D]. Jinan: Shandong University, 2021: 36-42.
- [25] 张艺嘉, 潘永智, 王振达, 等. 医用钛植入体激光微纹理生物性能研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(6): 180-195.
- ZHANG Y J, PAN Y Z, WANG Z D, et al. Research Progress of Biological Properties of Medical Titanium Implants with Laser Micro Texture[J]. Surface Technology, 2023, 52(6): 180-195.
- [26] 刘小林, 吴长功, 张志怀, 等. 凡纳对虾形态性状对体重的影响效果分析[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 857-862.
- LIU X L, WU C G, ZHANG Z H, et al. Mathematical Analysis of Effects of Morphometric Attributes on Body Weight for *Penaeus Vannamei*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 857-862.