

皮秒激光制备超疏水聚四氟乙烯表面及其水下全反射研究

曹文深 赵艳 吴燕 蒋毅坚

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 在室温空气条件下,利用 1064 nm 皮秒激光加工系统在聚四氟乙烯(PTFE)表面加工出平均缝宽为 25 μm 、壁厚为 25 μm 、深度为 75 μm 的沟槽阵列和边长为 30 μm 、缝宽为 25 μm 、高度为 43 μm 的柱状阵列。加工后的聚四氟乙烯表面静态接触角达到 167°,为超疏水表面。将制备出的超疏水聚四氟乙烯完全浸入纯净水中,通过玻璃器皿观察,其超疏水表面在水下出现金属光泽。实验发现,超疏水聚四氟乙烯表面在水下可使以一定角度斜入射的可见光反射光强增加。利用浸润性模型分析该现象出现的原因是超疏水表面在水下发生了全反射。

关键词 激光技术;皮秒激光加工;聚四氟乙烯;超疏水性;水下全反射

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0903008

Super-Hydrophobic Surface of Polytetrafluoroethylene Fabricated by Picosecond Laser and Phenomenon of Total Internal Reflection Underwater

Cao Wenshen Zhao Yan Wu Yan Jiang Yijian

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A groove-shaped array with average 25 μm interval, 25 μm wall thickness, 75 μm depth and a columnar array with average 30 μm side length, 25 μm interval, 43 μm depth are processed by 1064 nm picosecond laser on polytetrafluoroethylene (PTFE) surface at room temperature. The water contact angle of the modified PTFE surface is 167° so that super hydrophobic surface of PTFE is prepared. It is observed that the super-hydrophobic surface reflects metal luster underwater through the glassware when the super-hydrophobic PTFE is entirely immersed in pure water. The experiment conducts that the super-hydrophobic surface can enhance reflection intensity of visible light due to total internal reflection of super-hydrophobic surface underwater.

Key words laser technique; picosecond laser processing; polytetrafluoroethylene; super-hydrophobicity; total internal reflection underwater

OCIS codes 140.3390; 160.5470; 310.3840; 350.3850

1 引言

受自然界中荷叶效应启发^[1-2],超疏水材料因其对水有出色的排斥能力,在自清洁、抗结冰、抗凝血等方面有着光明的应用前景^[3-6]。聚四氟乙烯(PTFE)本身碳-氟链结构决定其具有极低的表面自由能以及良好的生物惰性,这使得其在作为人工

血管、人工器官材料方面有着实际意义。虽然未经改性的 PTFE 已经具有很好的疏水性,但利用其制造出的人工器官在临床试验上还有较高血栓率,试图对 PTFE 表面进行超疏水改性,来降低人工器官的血栓率^[7-8]。

固体表面浸润性是由固体表面自由能与其表面

收稿日期: 2014-02-18; **收到修改稿日期**: 2014-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(51005005)、北京市自然科学基金重点项目(JC101311201201)

作者简介: 曹文深(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光辐照效应方面的研究。E-mail: c07061206@163.com

导师简介: 蒋毅坚(1962—),男,博士,教授,主要从事激光先进制造技术方面的研究。

E-mail: yijiang@bjut.edu.cn(通信联系人)

微结构共同决定的。若能在已具有良好疏水性的 PTFE 表面加工出符合超疏水模型的微结构,便可以使其具有超疏水性质。但 PTFE 本身具有优良的化学稳定性、耐腐蚀性,这使得如何在其表面制造微结构成为亟待解决的难题^[9-10]。近期也出现了许多关于解决这方面难题的研究。Zhang 等^[11]对结晶度在 95%左右的 PTFE 胶带进行拉伸,随着拉伸强度的增加,PTFE 表面逐渐由于晶区分离而产生膨松微结构,接触角可达 165° ,实现超疏水改性。该方法虽然比较简单,但在加工过程中需对整体材料进行拉伸,对整体性能及外形有一定影响。Kwong 等^[12]报道利用脉冲激光沉积技术(PLD)制备了拥有纳米级粗糙度的 PTFE 膜,接触角高达 170° ,滑动角小于 2° ,具有优良的超疏水性能。利用 PLD 获得的超疏水 PTFE 薄膜虽然性能优异,但 PLD 制备薄膜需要高真空实验条件,而且制备周期较长,薄膜面积较小,不利于工业生产。黄宗明等^[13]报道利用飞秒激光刻蚀 PTFE 表面,并使其表面产生非常明显的膨化结构,使其具备了超疏水性能。但通过该方法制备出的超疏水表面经过激光刻蚀后,表面功能的稳定性有所下降。因此,找到一种操作简单、适于生产而且超疏水稳定性较高的加工方法具有重要意义。

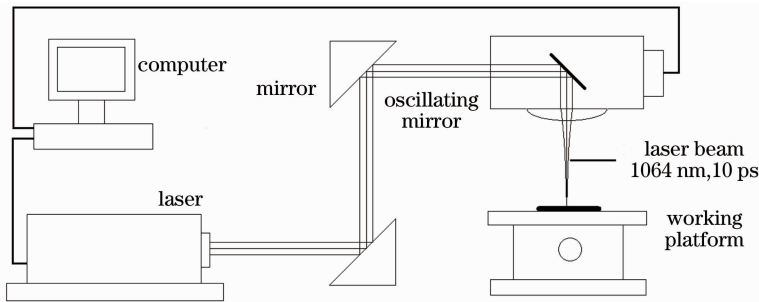


图 1 皮秒激光加工系统

Fig. 1 Picosecond laser processing system

利用 248 nm 准分子激光器对 PTFE 加工的加工效果并不理想。主要原因有两点:1) PTFE 是抗紫外线材料,对 248 nm 激光吸收较少;2) 由于 PTFE 本身有耐高温特性,纳秒激光无法达到皮秒激光所能达到的峰值功率,因而光热加工过程中皮秒激光更能令 PTFE 发生光热裂解汽化,便于加工。

采用激光共聚焦显微镜(Olympus LEXT OLS3000)表征加工后 PTFE 表面微沟槽的形貌及参数,利用接触角测量仪(OCA20)测定加工后 PTFE 表面的静态接触角,每次测量液滴体积

本文报道了采用 1064 nm 皮秒激光加工系统在 PTFE 表面快速扫描加工出微米尺度结构而使其表面获得稳定的超疏水性能的过程与结果,以及随之发现的新现象,并对该新现象的机理进行了分析。

2 实 验

2.1 超疏水 PTFE 的制备

PTFE 材料由英国 Goodfellow[®] 公司提供,材料厚度为 0.5 mm,剪裁成 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 正方形片材。在激光加工前,对所有样品进行超声清洗、烘干。

实验采用 Edgewave[®] 皮秒激光器作为加工光源,加工系统如图 1 所示。皮秒激光经过振镜下的会聚透镜后投射在处于焦点的样品上,通过控制振镜在样品表面按等间隔重复扫描直线,可得到沟槽阵列。若沿最初扫描方向的垂直方向继续按等间隔重复扫描直线,便可得到柱状阵列。加工过程中皮秒激光输出波长为 1064 nm,输出平均功率为 10~12 W,单脉冲能量为 $100\ \mu\text{J}$,重复频率为 100 kHz,聚焦后光斑直径为 $50\ \mu\text{m}$,扫描速度为 100~200 mm/s,单沟槽扫描 10 次。

为 $2\ \mu\text{L}$ 。

2.2 超疏水 PTFE 水下高反光性质的表征

为了证明超疏水 PTFE 表面在水下对可见光反射能力的提升,将加工后的 PTFE 水平放置在装满水的透明玻璃水槽底部正中。在暗室中,令半导体激光器出射光从水槽一侧入射到其底部超疏水 PTFE 表面上。并在水槽另一侧设置光屏,以观察出射光的光强变化。为了深入了解水下高反光的规律与机理,令光线入射角从 45° 向 90° 改变,并观察该过程中出射光强的改变。

3 结果与分析

3.1 PTFE 表面疏水及水下高反光性能

图 2(a) 显示未加工前 PTFE 表面的静态接触角(CA)。图 2(b)所示为利用皮秒激光加工系统在 PTFE 片材表面以 $50\ \mu\text{m}$ 扫描间隔进行微沟槽制备后,该沟槽阵列 PTFE 表面的静态接触角为 143° 。通过与未加工前 PTFE 表面静态接触角 110° 对比,可以发现由于微结构的产生使得 PTFE 表面疏水

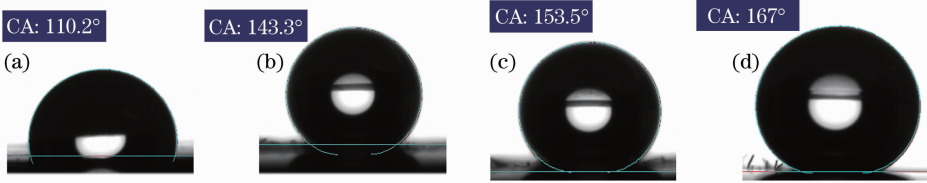


图 2 (a) 未加工前 PTFE 表面静态接触角; (b) $50\ \mu\text{m}$ 扫描间隔微沟槽阵列 PTFE 表面静态接触角;

(c) $50\ \mu\text{m}$ 扫描间隔柱状阵列 PTFE 表面静态接触角; (d) $25\ \mu\text{m}$ 扫描间隔柱状阵列 PTFE 表面静态接触角

Fig. 2 (a) Static contact angle of unprocessed PTFE; (b) static contact angle of $50\ \mu\text{m}$ spacing groove-shaped array;

(c) static contact angle of $50\ \mu\text{m}$ spacing columnar array; (d) static contact angle of $25\ \mu\text{m}$ spacing columnar array

图 3 所示为对比实验。将制备后的超疏水 PTFE 样品放置于水槽底部。在暗室中,当有可见光入射到样品超疏水表面时,存在微结构的 PTFE 表面可以使得水槽另一侧光屏上有光斑产生。且光屏上产生的光斑光强与未加工的原始 PTFE 表面存在明显的明暗差异。由此可以推断出由皮秒激光加工出微阵列的 PTFE 表面在水下对可见光的反光能力大幅提高。改变光线入射角,令半导体激光以 45° 入射,然后不断向 90° 入射角改变,发现反射光斑亮度随入射角增大而减小。

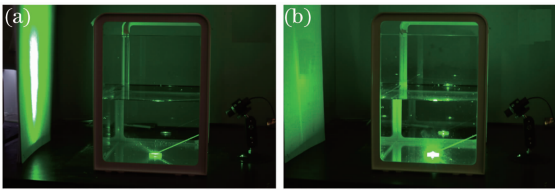


图 3 (a) 加工后 PTFE 水下可见光增强现象图;

(b) 未加工 PTFE 水下可见光增强实验对比图

Fig. 3 (a) Phenomenon of processed PTFE reflecting visible light underwater; (b) phenomenon of unprocessed PTFE reflecting visible light underwater

3.2 微结构对疏水性能影响分析

为了解释微结构参数对 PTFE 表面疏水性有何影响,进一步利用浸润性模型理论进行分析。当液滴处于一个绝对平整的平面上时,则该平面对水的润湿性只取决于固/液界面的自由能。通过 Young 方程计算出的本征接触角可以表征固体的

性提高。由图 2(c)可知,若采用皮秒激光以 $50\ \mu\text{m}$ 扫描间隔进行二维直线扫描,可以获得柱状阵列 PTFE 表面,该表面静态接触角达到 150° ,处于超疏水状态。若减小扫描间隔到 $25\ \mu\text{m}$ 制备柱状阵列,由于其表面微结构密集程度进一步上升,因而测量到的静态接触角可达 167° ,如图 2(d)所示。上述结果表明,随着 PTFE 表面微结构密集程度上升,其表面疏水性也逐渐增强。

亲疏水性:

$$\cos \theta_e = (\sigma_{\text{SG}} - \sigma_{\text{SL}}) / \sigma_{\text{LG}}, \quad (1)$$

式中 θ_e 是本征接触角, σ_{SG} 、 σ_{SL} 、 σ_{LG} 分别是固/气、固/液、液/气间界面自由能。实际上,当液体与固体表面接触时,并不存在完全平整的表面。因此,为了解释表面粗糙结构对润湿性的影响,分别有 Wenzel、Cassie 两种不同固液接触方式的粗糙表面润湿模型,通过引入表观接触角表征非平整表面的亲疏水性。

Wenzel 模型中,水能够进入微结构中的所有缝隙,间接上扩大了水与表面的接触面积。因而, Wenzel 模型公式可表述为^[14-17]

$$\cos \theta^* = r \cos \theta_e, \quad (2)$$

式中 θ^* 是表观接触角, r 是固体表面粗糙度。由(2)式可以发现,若设本征接触角为自变量,表观接触角为因变量,则可以得到一个以 r 为斜率的线性函数。通过该线性函数,若本征接触角确定后便可以从直线上找到对应的表观接触角。

在 Cassie 模型中,水与表面接触时微结构中还存在空气,因而形成一种混合接触状态,可以用(3)式表示^[14-17]:

$$\cos \theta^* = f_s (1 + \cos \theta_e) - 1, \quad (3)$$

式中 f_s 是固体接触面积占混合接触面积的比例。由(3)式也可以得到一个以 f_s 为斜率的线性函数。若将两个函数图用一张图表示,则可得到图 4 所示函数关系。

从图 4 中可以看出,当水滴与一种粗糙表面接触

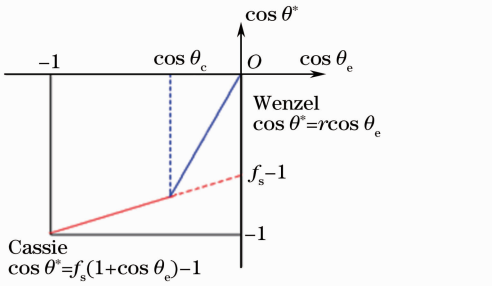


图4 Wenzel和Cassie模型函数关系

Fig. 4 Wenzel and Cassie model function diagram

时,根据两种模型会出现两种表观接触角。而图中 $\cos \theta_c$ 为两模型函数交点横坐标,表征了在某种固体表面结构下 Wenzel、Cassie 状态相互转化的临界本征接触角。研究者也发现处于 Cassie 接触下的水滴在压力作用下向 Wenzel 接触转变的情况^[18-22],但这种共存的状态只存在于 $90^\circ < \theta_c < \theta_e$ 时。当 $\theta_e > \theta_c$ 时,水滴的接触状态会更倾向于更加稳定的 Cassie 接触状态。通过(2)、(3)式可以求出:

$$\cos \theta_c = (f_s - 1)/(r - f_s), \quad (4)$$

利用(4)式可以得到临界本征接触角 θ_c ,而通过 θ_c 与 θ_e 对比可判断出此时水滴在固体表面处于何种接触状态。

对于理想沟槽结构的表面,其 r, f_s 可由(5)式表示:

$$r_1 = \frac{a + b + 2H}{a + b}, \quad f_{s1} = \frac{a}{a + b}, \quad (5)$$

式中 r_1, f_{s1} 分别为理想沟槽结构的 Wenzel、Cassie 函数斜率, a 是理想沟槽槽壁厚度, b 是沟槽缝宽, H 是沟槽深度。

对于理想柱状结构的表面,其 r, f_s 可由(6)式表示^[18]:

$$r_g = \frac{(a + b)^2 + 4aH}{(a + b)^2}, \quad f_{sg} = \frac{a^2}{(a + b)^2}, \quad (6)$$

式中 r_g, f_{sg} 分别为理想二维柱状结构的 Wenzel、Cassie 函数斜率, a 是正方柱体的边长, b 是柱体间隔, H 是柱体高度。

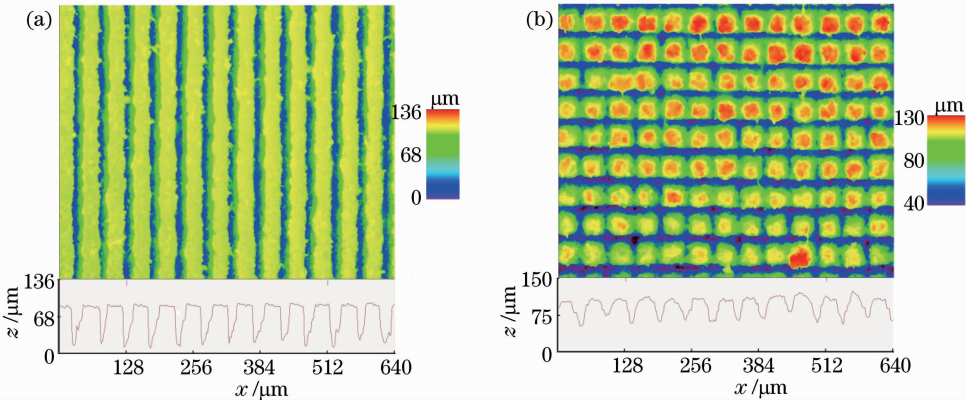


图5 皮秒激光加工后 PTFE 表面激光共聚焦显微镜表征形貌图。(a) PTFE 表面沟槽阵列结构形貌图; (b) PTFE 表面柱状阵列结构形貌图

Fig. 5 Laser scanning confocal microscope images of processed PTFE. (a) Microscopic topography of PTFE groove-shaped array; (b) microscopic topography of PTFE columnar array

图5所示为皮秒激光加工后 PTFE 表面微结构。从图5(a)、(b)两种微结构表面分别取10个点读取其 a, b, H 值,并取平均值用于计算。经测量和计算,沟槽 $a_1 = 26 \mu\text{m}, b_1 = 24 \mu\text{m}, H_1 = 74 \mu\text{m}$,代入(5)式可以得到 $r_1 = 3.96, f_{s1} = 0.48$ 。再将 r_1, f_{s1} 值代入(4)式,解出 $\theta_{cl} = 99.6^\circ$ 。正方柱状 $a_g = 30 \mu\text{m}, b_g = 22.0 \mu\text{m}, H_g = 46 \mu\text{m}$,最后可解出 $\theta_{cg} = 104.2^\circ$ 。

根据图2(a)所示实验结果,本研究采用的 PTFE 片材的本征接触角为 110° ,与文献报道的结果一致^[10-13]。通过与计算出的 θ_{cl}, θ_{cg} 进行比较,发现 θ_{cl}, θ_{cg} 均小于本征接触角。所以可以认为,在

PTFE 表面制备的沟槽、柱状阵列均可以使水在 PTFE 表面处于 Cassie 接触,即有空气层的存在使液滴在空气膜上滚动时较少产生粘附,因而一般情况下制备的超疏水表面都希望处于 Cassie 模型下。

3.3 超疏水 PTFE 水下高反光机理分析

从前面分析可知,皮秒激光加工后的 PTFE 表面微结构能使得水与其接触状态处于 Cassie 模型下。在 Cassie 模型中,水覆盖于微结构缝隙之上,缝隙中存在有空气介质。由于水的折射率为 1.33,而空气折射率为 1,所以当可见光以一定角度从水中入射进缝隙间空气时,相当于光由光密介质进入光疏介质,满足了全反射条件。为了证实皮秒激光

制备的 PTFE 超疏水表面在水下确实存在空气层，利用激光共聚焦显微镜对样品在水中直接进行了表征。图 6(a) 中，白色区域是存留于微沟槽中的气泡，黑色区域主要由 PTFE 和水组成。在理想加工条件下，白色气泡应能够组成网状空气膜填充于沟槽中。但由于加工精度的限制使得有部分沟槽中填入水。通过与图 6(b) 对比也能看出气泡大致填充在沟槽中。由此推断经过皮秒激光加工过后的 PTFE 表面在水下对于可见光反射率提高，是由于其微结构中存在空气介质，使得可见光在水下产生全反射现象。

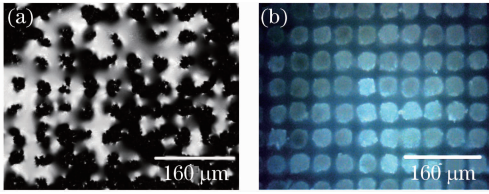


图 6 (a) 柱状阵列 PTFE 表面水下平面显微形貌图；
(b) 柱状阵列 PTFE 表面空气中平面显微形貌图

Fig. 6 (a) Microscopic topography of PTFE columnar array underwater; (b) microscopic topography of PTFE columnar array in air

由于全反射现象存在全反射临界角，即当入射角度小于全反射临界角度时，全反射现象将会消失。而在考察入射角变化对反射光斑亮度影响的实验中，反射光只是亮度随入射角增大而减小；但无论入射角如何改变，光斑一直都没有消失。这一实验现象与熟知的全反射有所出入，因而通过热力学计算来进一步表征微结构中水-空气界面的形状。

根据毛细现象基本公式，可得到本实验中水因与 PTFE 微结构接触形成曲面后，表面张力产生的压强表达式：

$$P_s = \sigma \left(\frac{1}{R_1} \right), \quad (7)$$

式中 R_1 为三相接触产生的水曲面在微结构横截面中的曲率半径。

通过建立如图 7 所示的坐标系，可以进一步将 R_1 表示为

$$\frac{1}{R_1} = \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}}, \quad (8)$$

将(7)式代入(8)式可得最终表面张力压强公式：

$$P_s = \sigma \left[\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} \right]. \quad (9)$$

通过前面对毛细现象的分析可知，若想使得水、空气和 PTFE 的三相接触能够处于稳定状态，则微沟槽中水因弯曲产生的额外表面张力的压强要与水在某

一深度下在该处产生的压强相等，因而可得：

$$\rho gh = \sigma \left[\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} \right]. \quad (10)$$

利用计算微分方程的方法求解可得：

$$\left[y + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho gh} \right)^2 - \left(\frac{b}{2} \right)^2} \right]^2 + x^2 = \left(\frac{\sigma}{\rho gh} \right)^2, \quad (11)$$

(11) 式为水在 PTFE 微结构表面横截面上的分布函数，从该函数可以看出水在微结构中的三相接触曲面在横截面上的投影为从一圆形上截下的圆弧。

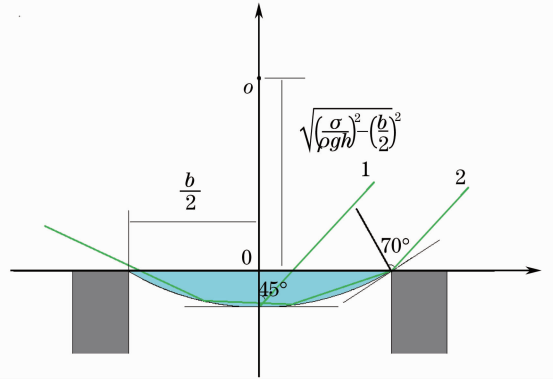


图 7 光线在圆弧状水-空气界面中传播示意图

Fig. 7 Schematic diagram of light propagating in the arc-shaped water-air interface

从图 7 可以看出，当光线 1 以 45° 入射角射入圆弧状水-空气界面的底部时，由于此时底部切线成水平，所以法线与入射光线即为 45° ，无法产生全反射现象。而光线 2 为光线 1 的平行光线，当其入射到圆弧顶部边缘时，该点切线与水平线大约成 25° 夹角，因而此时法线与光线 2 的入射方向夹角为 70° ，此时入射角大于水-空气全反射临界角 48° ，可以产生全反射。图 7 中，经过全反射的光线会在圆弧内经过多次全反射，最终从圆弧中射出。由此可见，当入射进圆弧的平行光对于水平线而言入射角度可能已经小于全反射临界角，但由于圆弧上各点的切线均会与水平线具有夹角，使得法线方向也产生变化。所以同一入射方向的光入射到具有不同法线方向的圆弧上的点时，它们的入射角也产生变化，在有些点上的入射角将大于全反射临界角从而产生全反射。但随着入射光线与水平线法线夹角不断减小，圆弧上通过改变法线方向使得入射角满足全反射条件的点也会逐渐变少，因而使得入射角越小于全反射临界角时，光斑亮度越弱。综上可知，在水下全反射实验中无法观测到全反射临界角主要是由于水在微结构中与水-空气的界面形状并非平面而是呈圆弧分布。

4 结 论

利用波长为 1064 nm 的皮秒激光对 PTFE 表面进行一维、二维直线扫描加工。经过加工后的 PTFE 表面产生了槽壁宽 26 μm 、深 74 μm 、间隔为 24 μm 的周期性沟槽阵列和边长 30 μm 、高度 46 μm 、间隔为 22 μm 的周期性柱状阵列。利用 Wenzel、Cassie 模型公式验证加工后的 PTFE 表面微结构处于 Cassie 模型状态,最大静态接触角可达 167°,产生超疏水表面。利用 Cassie 模型中存在空气介质的特点解释超疏水 PTFE 表面在水下对可见光的反射增强的原因是光由光密介质向光疏介质传导产生全反射。

参 考 文 献

- 1 W Barthlott, C Neinhuis. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- 2 L Feng, S H Li, Y S Li, *et al.*. Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial[J]. *Adv Mater*, 2002, 14(24): 1857-1860.
- 3 Kesong Liu, Ye Tian, Lei Jiang. Bio-inspired superoleophobic and smart materials: design, fabrication, and application [J]. *Progress in Materials Science*, 2013, 58(4): 503-564.
- 4 Bharat Bhushan, Yong Chaejung. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction[J]. *Progress in Materials Science*, 2011, 56(1): 1-108.
- 5 Xinjia Feng, Lei Jiang. Design and creation of superwetting/antiwetting surfaces[J]. *Adv Mater*, 2006, 18(23): 3063-3078.
- 6 Liu Ying, Jiang Yijian. Super-hydrophobic surface of poly(vinylidene fluoride) film fast fabricated by KrF excimer laser irradiation[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0106002.
刘莹, 蒋毅坚. 准分子激光快速制备超疏水性聚偏氟乙烯材料[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0106002.
- 7 Luo Xinjin, Wu Qingyu. The development on small-caliber prosthetic graft[J]. *Chinese Journal of Clinical Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2001, 8(3): 193-196.
罗新锦, 吴清玉. 小口径人工血管的研究进展[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2001, 8(3): 193-196.
- 8 Huo Danqun, Chen Bingcan, Hou Changjun, *et al.*. Study on vascular prothesisi and its development[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2004, 28(3): 200-202.

- 霍丹群, 陈炳灿, 侯长军, 等. 人工血管及其研究进展[J]. *中国医疗器械杂志*, 2004, 28(3): 200-202.
- 9 Frank Barkusky, Armin Bayer, Klaus Mann. Ablation of polymers by focused EUV radiation from a table-top laser-produced plasma source[J]. *Appl Phys A*, 2011, 105(1): 17-23.
- 10 Liu Aihua, Zhang Yunhai, Man Baoyuan. Surface modification and ablation of polytetrafluorethylene by excimer laser irradiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 1073-1077.
刘爱华, 张运海, 满宝元. 聚四氟乙烯材料表面激光改性与刻蚀[J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 1073-1077.
- 11 Jilin Zhang, Jian Li, Yanchun Han. Superhydrophobic PTFE surfaces by extension [J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2004, 25(11): 1105-1108.
- 12 H Y Kwong, M H Wong, Y W Wong, *et al.*. Superhydrophobicity of polytetrafluoroethylene thin film fabricated by pulsed laser deposition[J]. *Appl Surf Sci*, 2007, 253(22): 8841-8845.
- 13 Huang Zongming, Zhou Ming, Li Chen, *et al.*. Femtosecond laser on the surface of PTFE [J]. *Journal of Functional Materials*, 2010, 12(41): 2163-2165.
黄宗明, 周明, 李琛, 等. 飞秒激光对聚四氟乙烯表面的影响[J]. *功能材料*, 2010, 12(41): 2163-2165.
- 14 Wang Guoqing, Shen Jun, Xie Zhiyong, *et al.*. AF2400-SiO₂ composite water-repellent film for KDP protection[J]. *Chinese J Laser*, 2006, 33(3): 380-384.
汪国庆, 沈军, 谢志勇, 等. 用于 KDP 晶体保护的 AF2400-SiO₂ 疏水光学薄膜[J]. *中国激光*, 2006, 33(3): 380-384.
- 15 J Bico, U Thiele, D Quere. Wetting of textured surfaces[J]. *Colloids Surf A*, 2002, 206(1-3): 41-46.
- 16 H M Shang, Y Wang, K Takahashi, *et al.*. Nanostructured superhydrophobic surfaces [J]. *J Mater Sci*, 2005, 40(13): 3587-3591.
- 17 A Marmur. Adhesion and wetting in an aqueous environment: Theoretical assessment of sensitivity to the solid surface energy [J]. *Langmuir*, 2004, 20(4): 1317-1320.
- 18 Zheng Lijun, Wu Xuedong, Lou Zeng, *et al.*. Super-hydrophobic surface fabricated with micro structure [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(17): 1691-1699.
郑黎俊, 乌学东, 楼增, 等. 表面微细结构制备超疏水表面[J]. *科学通报*, 2004, 49(17): 1691-1699.
- 20 A Dupuis, J M Yeomans. Modeling droplets on superhydrophobic surfaces: Equilibrium states and transitions [J]. *Langmuir*, 2005, 21(6): 2624-2629.
- 21 N A Patankar. On the modeling of hydrophobic contact angles on rough surfaces[J]. *Langmuir*, 2003, 19(4): 1249-1253.
- 22 N A Patankar. Transition between superhydrophobic states on rough surfaces[J]. *Langmuir*, 2004, 20(17): 7097-7102.

栏目编辑:张浩佳