

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.03.011

激光表面织构铝基低黏附双疏表面*

李 晶¹, 赵言辉¹, 李 红¹, 杜 锋², 鲁树珍¹

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 长春 130022; 2. 装甲兵技术学院 机械工程系, 长春 130117)

摘 要: 通过激光表面织构化加工方法在铝合金表面制备出一种微米尺度的特殊凹坑结构, 利用扫描电子显微镜(SEM)、超景深三维显微镜观测表面形貌; 用接触角测量仪表征液滴在表面的润湿特性; 通过高温稳定性、低温抗结冰实验和自清洁实验研究表面的温度特性和自清洁特性。结果表明: 表面由规则有序的凹坑结构排列组成, 且各凹坑带有一定的凸肩结构。表面对水滴的静态接触角最高达到154.6°, 滚动角小于5.2°; 对甘油的接触角最高达到150.3°, 滚动角小于8.7°。超疏水表面在抗结冰和自清洁方面表现出优异的性能, 为表面在油、水或两者的混合介质等领域内的应用提供一定的参考。

关键词: 激光织构化; 超疏水; 疏油; 抗结冰; 自清洁

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2016)03-0080-07

Fabrication of Amphiphobic Surface on Aluminum via Laser Surface Texturing

LI Jing¹, ZHAO Yan-hui¹, LI Hong¹, DU Feng², LU Shu-zhen¹

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;

2. Department of Mechanical Engineering, Changchun Institute of Engineering, Changchun 130117)

Abstract: A micro-scale crater-like structure on aluminum substrates was fabricated by laser textured technology. Surface morphology of the sample was investigated by scanning electron microscopy (SEM) and ultra-depth three-dimensional scanning system. The wettability of the surface was obtained by optical contact angle measurement. A thermal stability test and a deicing test were carried out to evaluate the temperature characteristic. Self-cleaning test was performed to evaluate the anti-fouling and anti-contamination property. Results indicate that the self-ordering craters surrounded by convex were formed on the surface. This particular structure makes the surface superhydrophobic character. The maximum value of contact angle of water is 154.6° with a sliding angel less than 5.2°. Meanwhile, the maximum value of contact angle of glycerol is 150.3° with a sliding angle less than 8.7°. This textured surface also shows excellent deicing capability and self-cleaning properties. The fabrication technique is a promising method to provide superhydrophobic surface with potential applications including fluid transfer, fluid power systems, stain-resistant and anti-fouling surfaces, anti-creeping of oils, anti-contamination, and oil transport.

Keywords: laser textured; superhydrophobic; oleophobic; deicing; self-cleaning

0 引 言

润湿性通常依据静态接触角和滚动角来表征分析, 一般将接触角大于150°, 滚动角小于10°的表面称作超疏水表面。超疏水^[1-2]特性由于其具有

较强的实用性在自清洁^[3-5]、管道运输^[6]、流体减阻^[7-8]、抗结冰^[9-11]等领域被广泛重视和研究。随着经济的发展, 单一疏水特性已不能完全满足实际需求, 需要结合其它特性形成多功能

收稿日期: 2016-01-29; 修回日期: 2016-05-06; 基金项目: *吉林省教育厅科学技术研究项目(22215096); 中国博士后科学基金(2014M551145); 长春理工大学青年科学基金(2021000522)

通讯作者: 李晶(1975—), 女(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 金属功能表面; Tel: (0431) 8558 2412; E-mail: jl2015edu@163.com

网络出版日期: 2016-06-20 09:33; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20160620.0933.014.html>

引文格式: 李晶, 赵言辉, 李红, 等. 激光表面织构铝基低黏附双疏表面[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 80-86. LI J, ZHAO Y H, LI H, et al. Fabrication of amphiphobic surface on aluminum via laser surface texturing[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 80-86.

复合, 由此疏水、疏油的双疏表面^[12-13]逐渐被人们所关注。它集疏水、疏油特性为一体, 除在疏水领域应用外, 在交通运输、石油化工等多个领域中的减阻、脱附、防腐蚀和自清洁方面具有更大的需求。疏水表面的制备方法越来越多, 一般分为两大类: 在低表面能表面上构造粗糙结构和在高表面能表面上构造粗糙结构, 并进行低表面能物质修饰^[14-15]。但由于油具有比水更小的表面张力, 一般情况下油在表面会出现更小的接触角。常见的双疏表面制备方法主要有自组装法、聚合反应法、相分离法等, 这些方法大多需要采用低表面能物质进行修饰或者需要特定的大型加工设备, 其生产成本低、加工难易实现。而激光加工技术具有精度容易控制、操作界面简单, 生产周期短, 成本低廉等优点, 近几年常被用于材料表面加工和处理。

铝合金材料由于具有强度高、塑性好、导电性强等优异特性而在工业生产中被广泛使用。但在一些多油、水的工作环境中, 铝合金材料由于其高表面能特性, 使液体介质在表面容易粘联、浸湿等现象, 从而使表面容易结垢、结灰等, 造成使用寿命缩短, 维护成本增加, 降低了使用价值。所以, 文中研究以铝合金材料为基底, 采用激光微加工技术在铝合金材料表面通过构造特殊的粗糙结构, 制得超疏水、疏油的双疏表面。

1 材料和方法

1.1 材料和试剂

试验材料为7075系列铝合金, 试样尺寸为15 mm×15 mm×1.5 mm, 试验中使用测试油为甘油, 试验用水为去离子水。

1.2 样品制备

预处理: 对基体表面进行抛光处理, 依次使用去离子水、丙酮和去离子水超声波清洗去除表面油渍、杂质等, 最后将表面烘干备用。

激光加工: 将抛光铝合金用激光打标机(HBS-GQ-20, 激光功率20 W, 波长1060 nm)进行表面的凹坑构造, 激光扫描间距为0.05 mm, 扫描速度为500 mm/s, 重复进行2次扫描, 将工件进行表面清洗, 并放入电热炉进行150 ℃烘干处理2 h, 且随炉冷却至室温, 进一步加速表面的氧化速度, 有效降低加工表面的表面能。

1.3 试样表征

采用韩国扫描电子显微镜(SEM, EM-30, COXEM, Korea)和超景深显微镜(KEYENCE, VHX-S15, Japan)进行表面形貌观测, 利用接触角测量仪(OCA15 Pro, Dataphysics, Germany)在样件表面选取6个典型位置点测量液体的接触角, 测试液体体积为4 μL。自清洁实验过程中采用碳粉作为污染物颗粒。

2 结果与讨论

2.1 形貌分析

图1分别给出了铝合金抛光基底和激光加工表面的微观形貌。从图1(a)可以看出, 实验所使用的铝合金基底表面相对光滑平整, 进一步通过超景深三维图像(图1(d))观测, 也未看到任何特殊表面结构。图1(b)是激光微加工构造的表面形貌, 表面凹坑结构紧密有序排列。在平行方向上, 各凹坑之间近似刚好接触, 无间隙存在, 凹坑中心间距约43 μm; 在竖直方向上, 彼此之间存在4 μm左右的间隙, 此时的凹坑间距约为48 μm。从图1(e)中可以看出, 制备表面主要是由有序排列的凹坑与周围的凸肩构成的复合结构。凸肩主要是由于激光加工使固体处于熔融状态后冷却堆积形成的。为了更清晰地观察表面凹坑, 对单个凹坑图形进一步放大, 如图1(c), 并结合图1(f)可以看出, 凸肩高度约为2.6 μm, 凹坑深度约5.3~6.28 μm, 表面凸肩从结构上增加了表面对空气的截取容量。

2.2 静态润湿性

为了研究制备的特殊结构对表面润湿性的影响, 分别对光滑铝合金基体和制备表面的静态接触角(测试液滴为去离子水和甘油)进行测量分析, 如图2所示。图2(a)为甘油液滴在铝合金抛光表面的存在状态, 油滴基本铺展在表面, 接触角大小为55.1°, 呈亲油性; 图2(b)为激光加工表面油滴存在状态, 近似呈球形状态, 由于油滴自身重力、分子间作用力等因素使油滴产生微小的横向变形, 接触角达到150.3°, 展现优异的疏油性能。图2(c)(d)为表面与水滴的结合形式, 从图中可以看出, 由于液体表面张力的增大, 两种试样的接触角度均有所增大, 水滴与光滑基体表面的接触角度为79.2°, 水滴形貌也呈现半球冠状; 而在激光加工制备表面, 水滴以较完美的球形状态存在

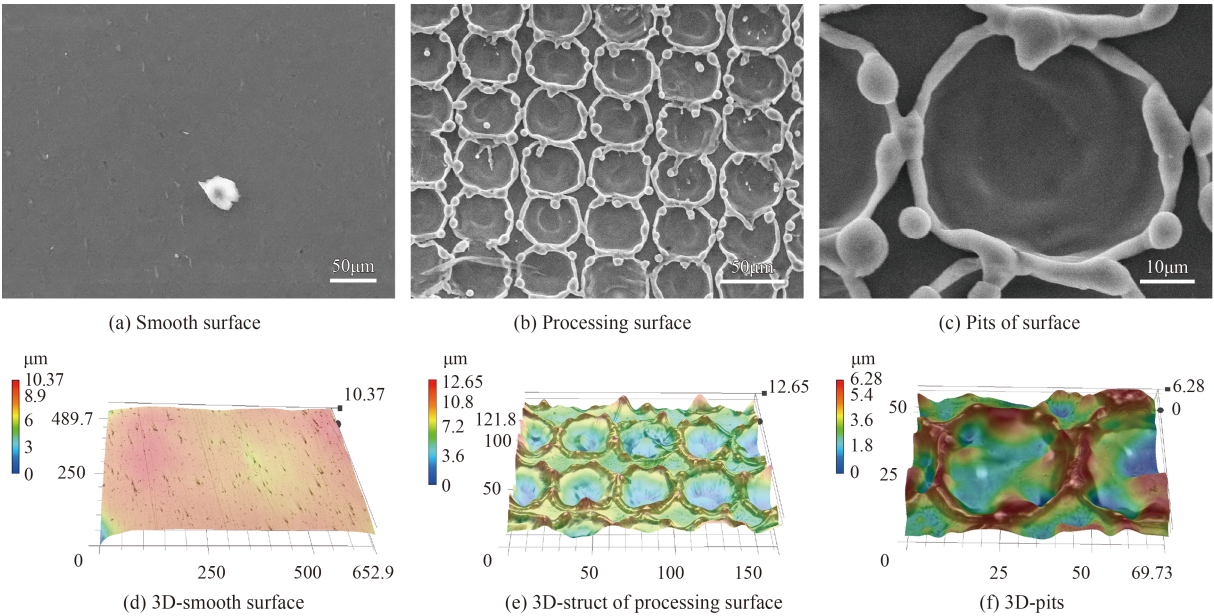


图1 铝合金表面加工前后的二维和三维形貌

Fig. 1 2D and 3D surface morphologies before and after processing of the aluminum alloy surface

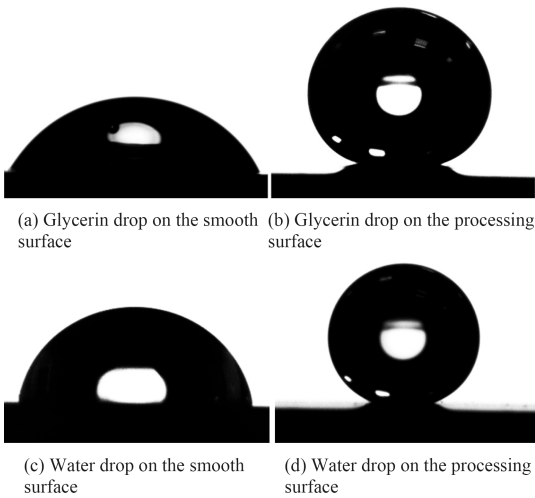


图2 两种液体在不同铝合金表面的接触状态

Fig. 2 Contact state with two kinds of liquid on different aluminum alloy surfaces

如图2(d), 此时水滴的静态接触角达到 154.6° , 展现优异的超疏水特性。基于激光加工(局部高温处理)原理, 使被加工表面在空气中形成一层致密的氧化薄膜, 有效降低了铝合金材料的表面能, 并结合所制备的特殊表面结构, 使表面获得了良好的双疏性能。

2.3 动态润湿性

静态接触角只能体现液滴某一瞬时接触角度, 对其运动状态无法解释说明。即使表面具有很小的接触角度, 水滴也可能很容易发生滚动。

反之, 像玫瑰花瓣虽然拥有超过 150° 的接触角度, 但水滴利用微小的接触面积紧紧黏附在表面, 很难发生滚动。这也是静态接触角在表现疏水效果方面的局限性。对于表面水滴的运动难易程度还可通过对其动态接触角的测量进行表征。利用接触角测量仪采用加减液滴法分别对抛光表面和制备表面动态接触角进行测量, 结果如表1所示(对激光加工表面进行3次测量)。

表1 激光加工前后铝合金表面水滴的动态接触角

Table 1 Dynamic contact angle of water drop on the aluminum alloy surface before and after laser texturing

Samples	Advance angle/($^{\circ}$)	Receding angle/($^{\circ}$)	Contact angle hysteresis/($^{\circ}$)
Smooth surface	83.9°	65.6°	18.3°
Processing of sample 1	156.4°	150.2°	6.2°
Processing of sample 2	155.3°	148.5°	6.8°
Processing of sample 3	157.1°	150.6°	6.5°

接触角滞后的大小理论上代表了水滴在表面运动的难易程度, 为获得低黏附特性表面, 往往需要尽量小的滞后角度。从表1中测量数据可以看出, 制备表面相对于抛光表面拥有更小的接触角滞后, 说明液滴在制备表面具备更容易发生运动的可能。带有凸肩的特殊凹坑结构使表面水滴呈固-液-气三相接触线的不连续状态, 接触角滞后现象得到明显改善, 间隙气囊的存在会降低表面

黏附力, 同时表层固体分子对液体分子的牵引力下降。为了更好的说明制备表面对油滴、水滴的低黏附性, 对表面液体的滚动角进行测量。图3记录了两种液滴在倾斜表面不同时刻的滚动动态过程。从图中可以看出, 两种液滴起始状态均为静止于表面, 没有任何晃动或者运动趋势, 当斜面倾斜约 5.2° 时, 表面水滴出现滚动趋势, 并且瞬间从斜面滚落, 而表面油滴还处于倾斜的静止状态, 斜面继续增大到 8.7° 左右时, 油滴也开始发生滚动, 但滚动速度相对较慢。从图中滚动瞬时虚影图片的对比可以发现, 两种液体的滚动速度大小差距明显。分别对两种液滴的滚动速度进行测算, 水滴的滚动速度约为 11.43 mm/s , 油滴相对较小, 约为 6.5 mm/s (根据录像参数采用 Nano Measure 测量软件进行测算)。由于油滴本身特殊的黏附性能、表面状态变形等因素导致滚动速度小于水滴的速度。制备表面对于两种液体均展现出了较低的黏附性, 液体在表面具有非常活跃的运动倾向。

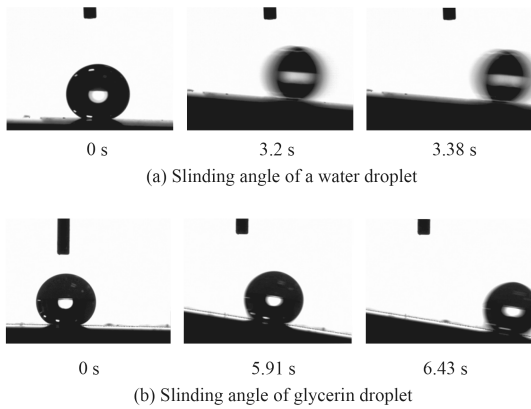


图3 两种液体的滚动特性

Fig. 3 Sliding angle tests with two kinds of liquid

2.4 结构对表面润湿性的影响

润湿性是固体表面的重要性能, 描述液滴润湿性的物理参数为静态接触角。Cassie理论^[16]认为: 表面构造的凹坑、间隙等会截留有空气, 水滴在固体表面上有一部分是与空气直接接触并通过空气来支撑, 进而使表面接触角增大。激光加工的表面在空气中会发生氧化, 对表面的疏水性能有一定的影响。文中主要探讨结构对表面润湿性的影响。

假设表面水滴处于典型的Cassie模型状态。根据凹坑结构的疏水模型(查阅相关文献并结合所制

备表面结构进行建模)计算公式对水滴在接触表面的最大下垂高度进行计算, 两种模型如图4所示, 图中 h 为液滴的嵌入深度。凹坑结构模型公式为:

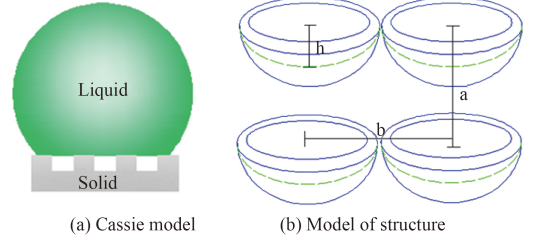


图4 Cassie模型和激光加工表面结构模型

Fig. 4 Cassie model and structure model of laser surface texturing

$$\cos \theta_r = \frac{2\pi R h}{a \times b} (1 + \cos \theta_0) - 1 \quad (1)$$

公式由Cassie理论公式演变而来, 用来表征凹坑结构与表面润湿性关系。式中 R 、 h 为凹坑的半径、凹坑深度或者水滴的下垂深度, μm ; a 、 b 为凹坑两方向的间距, μm 。 θ_r 代表制备表面的表观接触角, θ_0 为抛光铝合金表面接触角。将所测得的接触角数值 $a=50 \mu\text{m}$, $b=41 \mu\text{m}$, $R_a=21.05 \mu\text{m}$, $R_b=19.55 \mu\text{m}$, 分别带入公式(1)中可得, $h_{\text{水}}=1.36 \mu\text{m}$, $h_{\text{油}}=1.4 \mu\text{m}$ 。从结果可以看出两种液滴的下垂高度均小于表面的凸肩高度和凹坑的深度。液滴没有完全浸满凹坑或者间隙结构内部, 表面更多的是与凸肩结构的直接接触。因此, 进一步对表面接触状态与Cassie模型的关系进行验证。由表面的凸肩结构可以推断出面积计算公式:

$$f_s = \frac{\pi(R_a^2 - R_b^2)}{a \times b} \quad (2)$$

式中 R_a 、 R_b 分别代表凹坑的外壁和内壁半径, μm ; a 、 b 代表交叉方向上的凹坑间距, μm 。将所测得的数值带入公式(2)中求得面积比 $f_s=0.093$ 。进而将所得到的面积比 f_s 代入Cassie理论公式:

$$\cos \theta_r = f(1 + \cos \theta_0) - 1 \quad (3)$$

从而可以求出 $\theta_{\text{水}}$ 的理论接触角为 152.8° , 与实际测量数值(154.6°)基本接近(由于理论模型与实际形貌在表面凸起顶端部分存在部分误差); $\theta_{\text{油}}=148.6^\circ$, 与实际数值(150.3°)也相差不大, 所以两种液体在表面的存在形式与Cassie状态基本相同, 与实验假设基本统一。水滴在表面凸肩结构与空气共同作用下, 仅有微小的下垂高度。同时, 表

面特殊的凹坑排列结构使液体与固体发生不连续接触,降低了表面对液体的黏附作用。

2.5 高温稳定性和低温抗结冰特性

将所制备的超疏水试样和抛光铝合金试样放在相同的温度区间内进行升-降温实验研究,探索表面润湿性在不同温度条件下的变化,结果如图5所示。水滴采用在表面的原位方式以室温(20℃)为起始温度进行升/降温试验,试验中温度变化速率为4℃/min。图中给出了两种试样表面在温度为-20~50℃的接触角变化及降温过程中的最终结冰现象。从图中可以看出,在进行降温过程中,两种表面均出现接触角下降趋势,最明显的区间是10℃到各自的结冰温度。在此区间内超疏水表面和光滑基底的降低速率分别为0.51°/℃和0.76°/℃,超疏水表面具有更小的降低速率。随着温度的不断下降,两种表面在不同的温度点出现了结冰现象。光滑基体上水滴结冰温度为-14.2℃,而超疏水表面水滴继续下降到-19.6℃时才发生迅速结冰现象。显然制备表面使水滴的结冰温度降低了5.4℃,即经过加工处理的表面抵抗低温结冰的能力有所提高。在进行升温过程中,表面水滴体积会出现不同程度的减小现象,光滑基底水滴的外表面裸露区域比较大,导致其减小速度非常快,表面接触角度有一定的减小。但制备表面的水滴接触角在此过程中变化不大,体积也仅发生微小变化,稳定效果比较好。对两种温度区间处理的超疏水表面均恢复至室温条件,此时的接触角较实验之前的数值基本没有变化。因此,超疏水表面具备一定的稳定性。

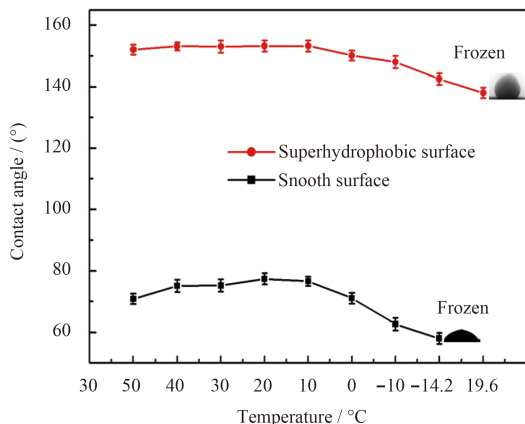


图5 接触角随温度变化趋势

Fig. 5 Change tendency of contact angle with temperature alter

为了进一步研究制备表面抗结冰方面的性能,对两种表面在同一低温条件下(-10℃)进行结冰时间的测量,如图6所示。结果表明,光滑基底结冰时间定格在6.5 min;此时间内,制备表面的水滴没有出现任何结冰现象的反应,随着时间的继续,制备表面的结冰时间最终定格在35 min。显然,制备表面在低温环境下的结冰时间被延长。图6中给出了两种表面结冰过程中的不同时刻形貌。从图中可以看出,表面在低温下的结冰现象并不是缓慢的渐进进行,当到达某一时刻时,表面的水滴会快速结晶。水滴的透明度不断下降,最终形成图中的锥形冰晶形貌。

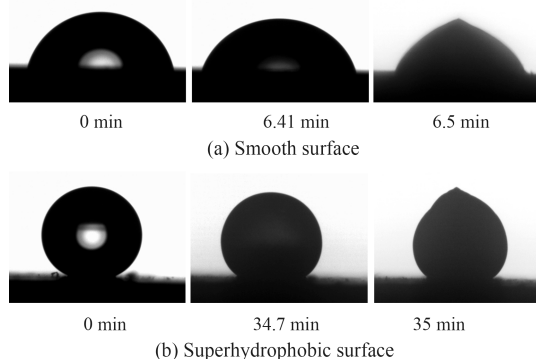


图6 两种表面在同一低温下的结冰时间及其结冰前后形貌

Fig. 6 Freezing time and shape of a water droplet on different surface before and after freezing

通过低温实验结果可以得出,同样环境下,经过激光加工处理的铝合金表面,通过降低结冰温度、延长结冰时间方式表现出了更强的抗结冰能力。

2.6 自清洁特性

荷叶以其“出淤泥而不染”的性质而闻名;超疏水表面的自清洁原理正是来源于“荷叶效应”^[17-18]。由于液体吸附杂质的能力往往强于固体表面,所以当水滴在表面滚动时,就会将表面的灰尘等颗粒杂质一并带走,从而实现表面的自清洁。通过荷叶表面的自清洁现象得到启发,对两种试样表面的清洁性能进行研究。图7为水滴在覆盖有碳粉颗粒(假设污染物)的光滑基底和激光加工表面的自清洁图像,表面的倾斜角约为5°,水滴距离斜面的垂直高度约为1.5 cm。从图7(a)可以看出,水滴在倾斜的光滑基底上表现出了较强的黏附性,随着水滴体积的增加,水滴与表面杂质逐渐融合形

成水渍, 当水滴重力超出张力极限时, 水滴会发生流动, 并且不规则的带走部分杂质, 但剩余杂质在水的浸润下更贴紧于表面, 没达到清洁的效果。图7(b)则出现不同的现象, 水滴接触表面的瞬间就沿重力方向滚落, 滚动轨迹上的灰尘被一并带走, 滚动的球状水滴使表面完全裸露出来, 并且清洁过后的表面没有发生任何浸湿现象, 实现了良好的自清洁效应。

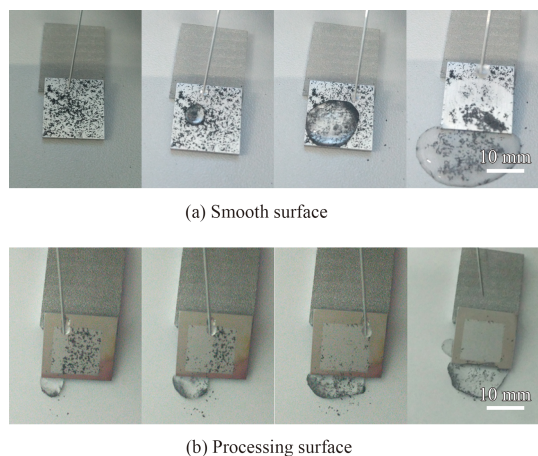


图7 抛光铝合金表面和超疏水铝合金表面的自清洁效果

Fig. 7 Self-cleaning effect images of bare aluminum alloy surface and superhydrophobic surface

3 结 论

(1) 通过激光织构化加工方法在铝合金表面构筑微米级凹坑结构, 成功制备出超疏水、疏油的双疏表面。制备表面对水的静态接触角最大达到 154.6° , 滚动角小于 5.2° ; 对甘油的静态接触角最大达到 150.3° , 滚动角小于 8.7° , 均展现出较低的黏附性。

(2) 激光加工处理的铝合金表面在不同温度条件下表现出了较好的稳定性, 使水滴的结冰速率降低、结冰温度下降, 结冰时间被延长, 表现出更优异的抵抗低温结冰能力。

(3) 自清洁实验表明, 激光加工制备表面在倾斜角度较小时, 落在表面的水滴就会在自身重力的作用下沿一定的方向滚落, 并在不湿润表面的情况下, 将附着在表面的杂质一并带走, 实现了表面的自清洁性。

参考文献

[1] 弯艳玲, 廉中旭, 娄俊, 等. 超疏水铝合金表面的制备及耦合机理分析[J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 112-116.

WAN Y L, LIAN Z X, LOU J, et al. Fabrication and coupling mechanism of super-hydrophobic aluminium alloy surface[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(4): 112-116 (in Chinese).

[2] 张谦, 曹凯, 陈福明. 脉冲镀铜-化学镀银法制备金属基超疏水表面[J]. 中国表面工程, 2015, 28(5): 1-8.

ZHANG Q, CAO K, CHEN F M. Fabrication of superhydrophobic surface on metallic substrate by pulse Cu electroplating and silver plating[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(5): 1-8 (in Chinese).

[3] PARK E J, YOON H S, KIM D H, et al. Preparation of self-cleaning surfaces with a dual functionality of superhydrophobicity and photocatalytic activity[J]. Applied Surface Science, 2014, 319: 367-371.

[4] ZHENG S L, LI C, FU Q T, et al. Fabrication of self-cleaning superhydrophobic surface on aluminum alloys with excellent corrosion resistance[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 276: 341-348.

[5] LI W, KANG Z X. Fabrication of corrosion resistant superhydrophobic surface with self-cleaning property on magnesium alloy and its mechanical stability[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 253: 205-213.

[6] 陈俊, 王振辉, 王玮, 等. 超疏水表面材料的制备与应用[J]. 中国材料进展, 2013, 32(7): 399-405.

CHEN J, WANG Z H, WANG W, et al. Preparation and application of super hydrophobic surfaces[J]. Materials China, 2013, 32(7): 399-405 (in Chinese).

[7] LYU S, NGUYEN D C, KIM D, et al. Experimental drag reduction study of super-hydrophobic surface with dual-scale structures[J]. Applied Surface Science, 2013, 286: 206-211.

[8] ASHWIN K, BALASUBRAMANIAN, ADAM C, et al. Microstructured hydrophobic skin for hydrodynamic drag reduction[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003, 42(2): 411-419.

[9] 余斌, 吴学忠, 肖定邦. 仿生超疏水表面技术及其军事应用[J]. 国防科技, 2015, 36(5): 42-45.

YU B, WU X Z, XIAO D B. The bionic superhydrophobic surface technology and its military application[J]. National Defense Science & Technology, 2015, 36(5): 42-45 (in Chinese).

[10] 冯杰, 卢津强, 秦兆倩. 超疏水表面抗结冰性能研究进展[J]. 材料研究学报, 2012, 26(4): 337-343.

FENG J, LU J Q, QIN Z Q. Research progress on anti-icing performance of superhydrophobic surfaces[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2012, 26(4): 337-343 (in Chinese).

[11] 晏忠钠, 车彦馥, 冯利邦, 等. 超疏水铝合金表面的防覆冰和防黏附行为[J]. 材料工程, 2015, 43(9): 25-29.

- YAN Z N, CHE Y H, FENG L B, et al. Anti-icing and anti-adhesion behavior of superhydrophobic aluminum alloy surface[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(9): 25-29 (in Chinese).
- [12] 汪怀远, 孟旻, 赵景岩, 等. 双疏表面的制备及性能研究新进展[J]. 材料工程, 2014, (3): 90-96.
- WANG H Y, MENG Y, ZHAO J Y, et al. New progress on preparation and properties of amphiphobic surface[J]. Journal of Materials Engineering, 2014 (3): 90-96 (in Chinese).
- [13] 宋金龙, 徐文骥, 陆遥, 等. 电化学和化学加工方法制备铝基体超双疏表面[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 182-190.
- SONG J L, XU W J, LU Y, et al. Research on electrochemical and chemical machining technology of superamphiphobic surfaces on Al substrates[J]. Journal of Mechanical engineering, 2013 49(5): 182-190 (in Chinese).
- [14] 陈恒真, 耿铁, 张霞, 等. 超疏水表面研究进展[J]. 化学研究, 2013, 27(4): 434-440.
- CHEN H Z, GENG T, ZHANG X, et al. Research progress of superhydrophobic surface[J]. Chemical Research, 2013, 27(4): 434-440 (in Chinese).
- [15] 邱宇辰, 刘克松, 江雷. 花生叶表面的高黏附超疏水特性研究及其仿生制备[J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(2): 403-408.
- QIU Y C, LIU K S, JIANG L. Peanut leaves with high adhesive superhydrophobicity and their biomimetic materials[J]. Scientia Sinica Chimica, 2011, 41(2): 403-408 (in Chinese).
- [16] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40: 546-550.
- [17] LIU K S, JIANG L. Metallic surfaces with special wettability[J]. Nanoscale, 2011, 3(3): 825-838.
- [18] FAN L, LI B C, ZHANG J P. Antibioadhesive superhydrophobic syringe needles inspired by mussels and lotus leaves[J]. Advanced Materials Interfaces, 2015(2): 1500019.

(责任编辑: 陈茜)