

纳秒激光加工(超)疏水/(超)亲水铝膜的润湿性和雾水收集实验研究

丁雅玉¹, 苏亚辉^{1,2,3*}, 陈亮¹

¹安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601;

²安徽大学电子信息工程学院, 安徽 合肥 230601;

³安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230009

摘要 用纳秒光纤激光加工结合表面活性剂调控的方式制备了(超)疏水/(超)亲水铝膜,研究了(超)疏水/(超)亲水铝膜表面的润湿性以及雾水收集实验。实验步骤如下:采用纳秒光纤激光钻孔技术加工微孔阵列于 35 μm 厚的铝箔上;在底部铝膜表面喷涂 Glaco 涂层试剂两三次,Glaco 试剂中的疏水二氧化硅颗粒黏附在其表面,以改变铝膜表面的润湿性;通过激光二次扫描获得(超)疏水/(超)亲水铝膜。保持通孔量一致,研究了不同孔径下(超)疏水/(超)亲水铝膜的润湿状态、液滴渗透情况以及最佳的雾水收集孔径。结果表明:通孔量一致时,孔径的不同影响(超)疏水/(超)亲水铝膜的润湿状态和水滴的渗透时间以及雾水收集的功能,(超)疏水/(超)亲水铝膜的最佳雾水收集孔径为 108 μm ,其雾水收集量高达最低雾水收集量的 31.3 倍左右。

关键词 激光技术; 纳秒激光; 铝膜润湿性; 液滴渗透; 雾水收集

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111412

Experimentally Investigating Wettability and Fog Collection Characteristics of (Super) Hydrophobic/(Super) Hydrophilic Aluminum Membranes Processed by Nanosecond Laser

Ding Yayu¹, Su Yahui^{1,2,3*}, Chen Liang¹

¹ School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, Anhui, 230601, China;

² School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui, 230601, China;

³ Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing of the Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui, 230009, China

Abstract Herein, (super) hydrophobic/(super) hydrophilic aluminum membranes were fabricated by nanosecond fiber laser processing combined with surfactant control. Further, the wettability and fog collection characteristics of the fabricated (super) hydrophobic/(super) hydrophilic aluminum membranes were studied. First, a microporous array was fabricated on 35- μm -thick aluminum foil using the nanosecond fiber laser drilling technology. Then, the bottom surface of the aluminum membrane was sprayed with Glaco coating reagent two-three times. Hydrophobic silica particles in the reagent adhered to the surface, thereby changing the wettability of the aluminum membrane surface. Finally, a (super) hydrophobic/(super) hydrophilic aluminum membrane was obtained using laser secondary scanning. The (super) hydrophobic/(super) hydrophilic aluminum membrane was examined for wettability, droplet penetration, and optimum fog collection aperture with varying pore sizes and the same through-hole quantity. Results showed that the pore size affected the wettability of aluminum membrane to water, infiltration time of water droplets, and function of fog collection in aluminum foil membranes with the same through-hole quantity. The optimal fog collection pore size of the synthesized (super) hydrophobic/(super)

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-04-15; 录用日期: 2020-04-17

基金项目: 安徽省高校自然科学基金(KJ2018A0014)

* E-mail: ustcsyh@ahu.edu.cn

hydrophilic aluminum membrane was 108 μm , and its fog collection amount was as high as approximately 31.3 times the lowest fog collection amount.

Key words laser technology; nanosecond lasers; wettability of aluminum membranes; droplet penetration; fog collection

OCIS codes 140.3510; 140.3390; 140.7090

1 引言

控制表面润湿性的关键因素是表面结构和表面成分,无论是超亲水还是超疏水表面的获得,都需要在其表面构建一定的粗糙结构,并控制表面成分。因此,研究者们对表面微纳米结构进行了深入而细致的研究。Wang 等^[1]结合 *Stenocara* 甲虫和 *Stipagrostis Sabulicola* 叶子的结构特性,制作了超疏水表面分布超亲水轨道的各向异性和混合润湿性的表面,利用表面润湿性的差异促使水滴定向运动,获得高效的雾水收集性能,实现了对液滴的操控^[2-4]。该结构表面制备结合了超声波的热压过程、图案表面在疏水改性网格空穴中镶嵌、尺寸测量、热压温度等一系列流程,工艺流程复杂,且其制备过程存在采用的材料性质不稳定等不足。Yang 等^[5]采用电化学腐蚀的方法,在金属超疏水性基底上制造了超疏水性-超亲水性图案表面。在铝试样上研究了超疏水衬底的抗电化学腐蚀性能以及电化学腐蚀电位对所制备的表面润湿性的影响,并对所制备的图案表面进行了水雾收集实验,结果表明该表面具有较高的集水能力。

上述方法中化学修饰的方法均存在着制备工艺复杂以及材料不稳定等不足之处。采用纳秒激光^[6]快速制备微纳结构表面的方法,操作方便,精度高,结构稳定,可实现大面积制备,如 Yang 等^[7]采用纳秒光纤激光制备了超疏水铝板表面,并研究了激光能量密度对制备样品的润湿性和样品表面粗糙度的影响,结果表明增强疏水特性或者样品表面粗糙度可以通过提高激光能量密度来实现。

本文基于纳秒激光快速制备微孔阵列铝膜的方法,结合涂层试剂改性、激光二次扫描等方式获得具有润湿特性的铝膜,研究了孔径对铝膜润湿性、水滴渗透速率的影响,并定量研究了(超)疏水/(超)亲水铝膜的雾水收集效果。

2 实验

2.1 (超)亲水/(超)亲水铝膜的制备

选取纯度(质量分数)为 99.5% 的金属铝箔作为

实验样品,其厚度为 35 μm 。采用纳秒光纤激光器,利用打点方式加工铝箔时,样品会在加工过程中因重复脉冲冲击而受力不均,铝箔表面凸起,故本研究采用扫描的方式对铝箔进行微孔阵列的加工操作,设置功率占比为 40%,采用扫描速度参数控制为 30 mm/s,扫描次数为 30 次。改变孔径直径(30~150 μm ,20 μm 的等间距递增),将厚度为 35 μm 的铝箔加工成微孔阵列铝膜,铝箔表面微孔形貌通过场发射扫描电子显微镜(SEM)来表征。图 1 显示加工后铝膜底部的 SEM 图像:根据比例尺计算可得顶部孔径为 28.6 μm ,微坑织构最大宽度为 46.5 μm ,间距为 200 μm ,深度为 35 μm ,织构密度 ϵ 为 4.2%。由于激光脉冲的重复冲击,铝膜顶部与底部表面呈现出规则的微孔阵列,而在微孔周围产生了微纳米碎屑结构。这些结构使激光烧蚀溅射的颗粒结构附着在铝膜表面,增大了表面结构的粗糙度,进而增强了底部的润湿性。

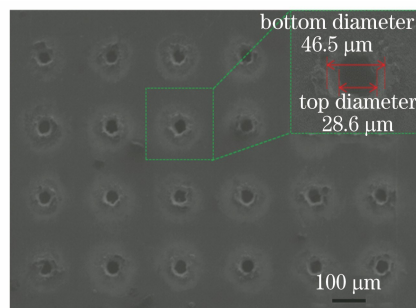


图 1 微孔形貌图像

Fig. 1 Microporous morphology image

从 SEM 图像可以看出,膜的底部表面在激光脉冲的重复冲击下形成了规则的微孔阵列结构,微孔边缘处产生了花瓣形的次级结构,微孔的间隙中也增加了溅射的纳米颗粒结构,这些结构增强了底部表面的亲水性能^[8]。

控制铝膜的通孔量保持一致,将其样品进行扫描电镜观察,并基于 ImageJ 软件测量孔径,将微孔阵列铝膜加工区域控制在 1 cm^2 面积内,此时微孔阵列的间距以及阵列参数发生相应的变化,即间距 Λ 可由阵列宽度 1 cm 与阵列每行的数目的比值得出,即 l/c ,其中 l 表示加工区域宽度, c 表示阵列每行的数目。表 1 给出对应的加工参数。

表 1 实验加工参数

Table 1 Experimental processing parameters

Arraysize	100×100	62×62	45×45	37×37	32×32	26×26	24×24
Diameter $d/\mu\text{m}$	28.6	45.8	63.5	76.6	90.5	108.0	120.5

纳秒激光加工所得的铝膜,用接触角系统并结合视频录制,借助 ImageJ 软件测得滴有 $4\ \mu\text{L}$ 水滴的微孔阵列铝膜的顶部表面以及底部表面对于水的接触角(WCA, θ),并基于不同位置滴 3 次水滴取 WCA 的平均值,根据不同微孔直径(孔径 d 范围从 $28.6\sim 120.5\ \mu\text{m}$,间距 Δ 的范围为 $100\sim 417\ \mu\text{m}$)测量得到其润湿性与孔径之间的关系,如图 2 所示。

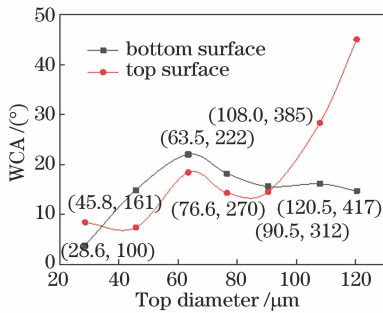


图 2 通孔量一致时不同孔径的铝膜顶部表面与底部表面对水的润湿性

Fig. 2 Wettability of top surface and bottom surface of aluminum foil membrane with the same through-hole quantity and different pore sizes to water

从图中可以看出,对于纳秒激光在铝箔表面制备出微孔阵列之后的铝膜对于水的接触角小于未加工时铝箔表面对于水的接触角 73.5° 。铝箔的底部表面对于水的接触角转变为 $3^\circ\sim 25^\circ$,其在孔径为 $28.6\ \mu\text{m}$ 、间距为 $100\ \mu\text{m}$ 时变为小于 10° 的超亲水状态;铝箔的顶部表面对于水的接触角转变为 $7^\circ\sim 45^\circ$,其在间距为 $100\ \mu\text{m}$ 、孔径为 $28.6\ \mu\text{m}$ 时以及间距为 $161\ \mu\text{m}$ 、孔径为 $45.8\ \mu\text{m}$ 时变为小于 10° 的超亲水状态。随着间距增大,孔径的增大,微孔阵列的铝膜均表现出超亲水或者亲水状态。由此表明,通过纳秒激光的加工,铝膜表面的润湿性变得更亲水,

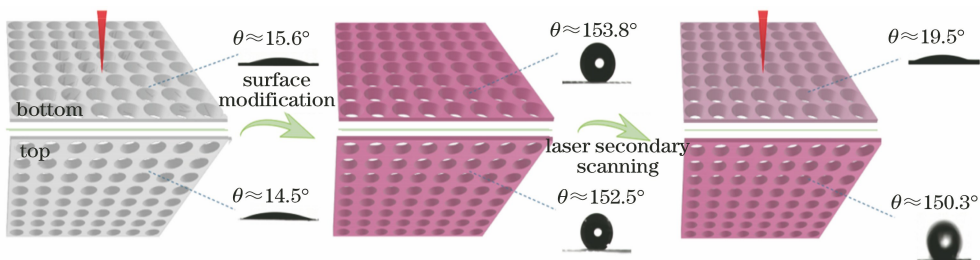


图 3 (超)疏水/(超)亲水铝膜的制备过程

Fig. 3 Preparation process of (super) hydrophobic/(super) hydrophilic aluminum foil membrane

纳秒激光增加了铝箔表面的粗糙度。从图中还可以看出,对于孔径为 $28.6, 108.0, 120.5\ \mu\text{m}$ 的铝膜顶部表面对于水的接触角大于铝膜底部表面对于水的接触角,底部表面相比于顶部表面更亲水;对于孔径为 $45.8, 63.5, 76.6, 90.5\ \mu\text{m}$ 的铝膜顶部表面对于水的接触角小于铝膜底部表面对于水的接触角,顶部表面相比于底部表面更亲水。

对材料进行激光辐照后,材料表面形成微纳结构;同时,材料表面的化学成分也发生改变。上述数据表明,激光在金属铝箔表面制备微纳结构时,形成了具有不同粗糙度的材料表面,并使该表面发生氧化,氧化过程中,由于 Al_2O_3 具有较高的表面自由能,材料被激光辐射后其润湿性发生变化。根据 Wenzel 模型^[9],可知铝箔表面粗糙度的增加提高了铝箔表面的润湿性。

2.2 (超)疏水/(超)亲水铝膜的制备

实验中,对通孔量一致的微孔阵列的铝膜顶部喷涂两三次 Glaco 涂层试剂,并对其表面进行化学修饰,得到超疏水/超亲水铝膜,底部表面和顶部表面 $4\ \mu\text{L}$ 水的接触角分别为 153.8° 和 152.5° 。由于纳秒激光第一次通过扫描轨迹的方式烧蚀铝箔时所溅射的次级粗糙结构颗粒会附着在铝箔的顶部与底部表面,附着的颗粒在表面化学物质的影响下降低了材料的表面能,从而增大了顶部与底部表面的超疏水特性。

得到的超疏水/超亲水铝膜借助飞秒激光器进行二次扫描,工艺参数为:功率为 $50\ \text{mW}$,扫描速度为 $50\ \text{mm/s}$,间距为 $0.0125\ \text{mm}$,加工次数设置为 1,在这种情况下对微孔阵列铝膜底部表面进行去氟化操作,得到(超)疏水/(超)亲水铝膜,其制备过程如图 3 所示。

经过激光二次扫描去除表面的低表面能物质后,(超)疏水/(超)亲水铝膜的底部表面 4 μL 水的接触角约为 19.5°,其顶部表面 4 μL 水的接触角约为 150.3°。铝膜底部的表面润湿性与孔径间的关系,如图 4 所示,用 Glaco 涂层试剂对(超)亲水状态的微孔阵列铝膜进行低表面能修饰后,对铝膜底部表面采取去氟化操作,最终得到铝膜底部表面对于水的接触角小于 22°。在孔径为 28.6 μm 、间距为 100 μm 以及孔径为 45.8 μm 、间距为 161 μm 时铝膜底部表面对于水的接触角变为小于 10°的超亲水状

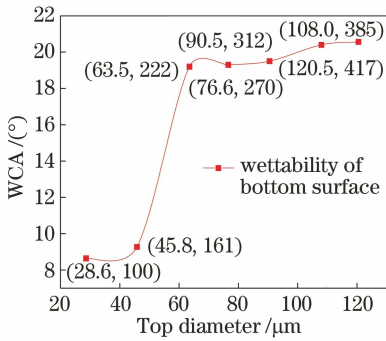


图 4 二次扫描的铝膜底部表面对于水的润湿性

Fig. 4 Wettability to water of the bottom surface of the aluminum foil membrane after secondary scanning

态;在孔径大于 45.8 μm 时铝膜底部表面对于水的接触角转变为 18°~22°的亲水状态。

3 分析与讨论

3.1 水滴在(超)疏水/(超)亲水膜的润湿性研究

对于(超)疏水/(超)亲水膜的润湿性研究,本实验通过视频记录其顶部表面对于 4 μL 水的接触角变化的整个过程,底部表面对于水的接触角测量值为 9.27°,顶部表面对于水的接触角(WCA)测量值在 159°~0°范围内动态变化(微孔直径为 45.8 μm ,间距为 161 μm),如图 5 所示。

将(超)疏水/(超)亲水膜的顶部表面置于上方,则其上方对水的润湿表现为超疏水状态,在其顶部表面滴加 4 μL 水滴,从图中可以看出,水滴在顶部表面时,水滴呈现出 159°的球形形状;在 0.42, 1.20, 1.60, 1.80 s 时水滴依然以球形水滴保持超疏水状态穿过微孔阵列转移至(超)疏水/(超)亲水膜的底部表面。随着时间的变化,水滴形状慢慢变小,在 2.04 s 时水滴以疏水状态到达(超)疏水/(超)亲水膜的超亲水层底部表面,在接下来的 0.04 s 内,缩小的水滴在顶部表面快速消失并转移至(超)疏水/(超)亲水膜的底部表面。

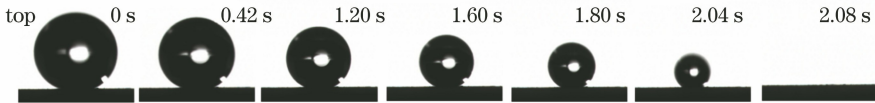


图 5 (超)疏水/(超)亲水膜顶部表面对水的动态接触角测量

Fig. 5 Dynamic contact angle measurement to water on the top surface of the (super) hydrophobic/(super) hydrophilic membrane

再将底部表面置于下方,微孔内部区域充满水时,底部表面将被水完全覆盖,底部表面的液膜曲率近似为零,进而说明底部表面的低表面能物质经过激光的二次扫描操作被去除。与此同时,水在顶部表面呈现出球形形状,有滚动的趋势,顶部表面的液膜曲率趋于无穷大,进而说明顶部表面附着着大量的低表面能物质。超疏水的顶部表面是由激光诱导的微纳结构和低表面能改性材料共同作用所致。这一现象可间接说明微孔内部对水的润湿性有着从高表面能到低表面能的梯度变化。

将(超)疏水/(超)亲水膜的顶部表面置于上方,记录其 4 μL 水滴与不同孔径的(超)疏水/(超)亲水膜顶部表面的接触角,如表 2 所示,激光二次扫描用 Glaco 涂层试剂修饰之后的铝膜,可得(超)疏水/(超)亲水膜,其中水滴与膜顶部表面的接触角近似呈现下降趋势。

同时本实验通过视频记录了(超)疏水/(超)亲

表 2 (超)疏水/(超)亲水膜顶部表面的接触角

Table 2 Contact angle to water of the top surface of the (super) hydrophobic/(super) hydrophilic membrane

Diameter / μm	28.6	45.8	63.5	76.6	90.5	108.0
Contact angle / (°)	163.5	159.0	154.1	157.2	150.3	137.0

水膜底部表面(微孔直径为 120.5 μm ,间距为 417 μm)对于 4 μL 水的接触角变化的整个过程,(超)疏水/(超)亲水膜的底部表面对于水的接触角测量值从初始的 20.56°慢慢铺展(同时水滴也会随着时间慢慢挥发),这一动态过程如图 6 所示。

将(超)疏水/(超)亲水膜的底部表面置于上方,在其底部表面滴加 4 μL 水滴,从图中可以看出,水滴在底部表面时,水滴呈现出 20.56°亲水的铺展形状;在 0.80, 9.00, 12.00, 31.00, 62.00 s 时水滴依然保持铺展状态,水滴被拦截在底部表面,无法

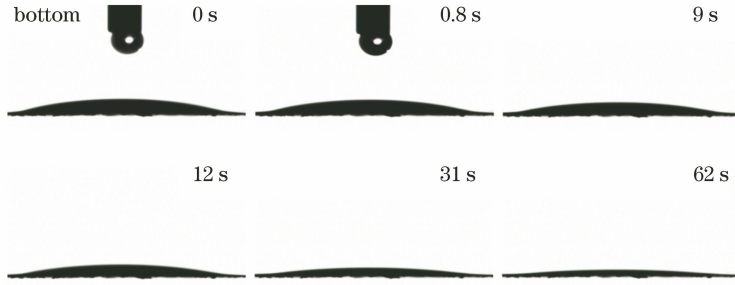


图 6 (超)疏水/(超)亲水膜底部表面对于水滴的动态变化过程

Fig. 6 Dynamic process of water droplets on the bottom surface of (super) hydrophobic/ (super) hydrophilic membrane

穿过微孔阵列转移至(超)疏水/(超)亲水膜的顶部表面。随着时间的变化,水滴形状慢慢变小。

为了明确这种(超)疏水/(超)亲水膜渗透现象的形成机理,本实验中测量了微孔直径分别为 28.6, 45.8, 63.5, 108.0, 120.5 μm 的(超)疏水/(超)亲水膜对液滴的吸入过程,该膜对于水的接触角的变化如图 7 所示,对于不同直径的(超)疏水/(超)亲水膜,水滴都会随着时间的变化自驱动至底部表面,驱动过程中基本都保持(超)疏水状态,最终水滴被完全转移至底部(超)亲水表面。这种(超)疏水/(超)亲水膜的自驱动性能对水滴运输具有重要意义。

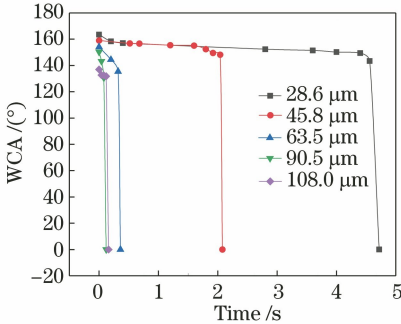


图 7 不同微孔直径的(超)疏水/(超)亲水膜顶部表面对于水的润湿性接触角变化测量

Fig. 7 Measurement of wettability contact angle to water on the top surface of the (super) hydrophobic/ (super) hydrophilic membranes with different micro-pore diameters

3.2 水滴在通孔量一致的(超)疏水/(超)亲水膜的渗透实验研究

实验过程中,为研究通孔量一致的(超)疏水/(超)亲水膜的水滴渗透过程,对该膜注入大小相等的 4 μL 水滴,并对铝膜渗透的时间进行相应的统计。首先将底部表面置于上方,再用针管挤压 4 μL 水滴至其微孔区域部分,并拍摄视频进行记录,水滴在底部表面的铺展时间如图 8 所示。从图中数据可以看出,4 μL 水滴滴在底部表面时,会在其表面铺

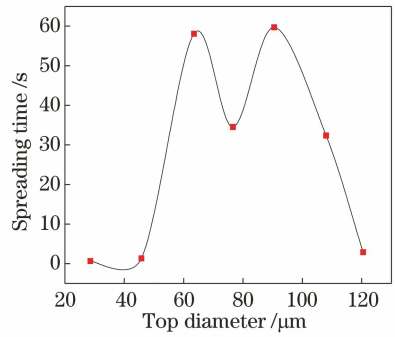


图 8 水滴在(超)疏水/(超)亲水膜底部表面的铺展时间
Fig. 8 Spreading time of water droplets on the bottom surface of the (super) hydrophobic/ (super) hydrophilic membrane

展,在孔径为 28.6 μm 时水滴扩散最迅速,孔径为 90.5 μm 时水滴扩散最缓慢。

接着将顶部表面(超疏水状态)置于上方,用针管挤压 4 μL 水滴至其微孔区域部分,并拍摄视频进行记录,水滴在顶部表面自驱动至底部表面的渗透时间如图 9 所示。

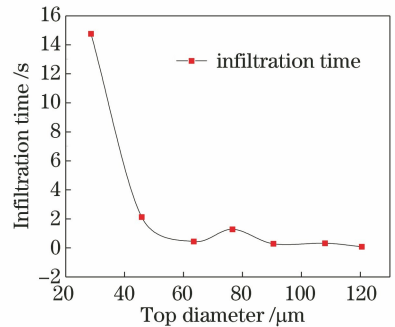


图 9 水滴在(超)疏水/(超)亲水膜的渗透时间
Fig. 9 Infiltration time of water droplets on the (super) hydrophobic/ (super) hydrophilic membrane

液体在具有微孔结构的材料表面上会自驱动运输至更具亲和力的区域部分,材料表面能可以用于解释这一物理现象特性,即液体由于润湿特性将会沿着表面能增大的方向向更具亲和力的区域移动。此外,

将底部表面置于下方,微孔内部区域充满水时,底部表面将被水完全覆盖,形成比较平整的一层水膜;而水在顶部表面形成一层半球形水膜。这是由于液体表面张力存在差异产生了一种驱动力所致。

由于润湿性驱动力以及膜的微结构粗糙度,水在膜上的表面张力差异产生了拉普拉斯力的共同作用,故水滴会自驱动至更具亲和力的区域(底部表面)。从图中可以看出,4 μL 水滴滴在顶部表面时,水滴渗透时间近似随着孔径(28.6 μm -45.8 μm -63.5 μm ,90.5 μm -108.0 μm -120.5 μm)的增大逐渐变短;在孔径为 76.6 μm 时水滴渗透较孔径为 90.5 μm 时快,有反向变慢的趋势;孔径为 28.6 μm 时的水滴扩散最缓慢,孔径为 120.5 μm 时水滴扩散最迅速。对于通孔量一致的(超)疏水/(超)亲水膜的水滴渗透过程,与 4 μL 水滴和不同孔径的(超)疏水/(超)亲水膜顶部表面的接触角随孔径的变化趋势一致。这说明:水滴从高表面能向低表面能的扩散过程与其和(超)疏水/(超)亲水膜顶部表面的接触角变化量有关;驱动力影响其渗透时间。

同时,将(超)疏水/(超)亲水膜的顶部表面置于上方,依次滴加 5 滴 4 μL 水滴,记录其转移到(超)亲水的底部表面的时间,如图 10 所示,水滴在(超)疏水/(超)亲水膜的渗透时间随着水滴的浸润,水滴自驱动至底部表面的时间越来越短。

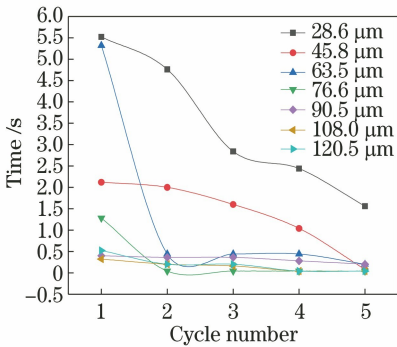


图 10 5 滴水滴在(超)疏水/(超)亲水膜的渗透时间
Fig. 10 Penetration time of 5 droplets on the (super) hydrophobic/(super) hydrophilic membrane

3.3 (超)疏水/(超)亲水膜的水雾收集效率测量

为了测定这种(超)疏水/(超)亲水膜的水雾效率,实验中基于饱和水蒸气环境进行测量,通过加湿器设定雾量速度约为 350 mL/h,方向设为垂直于水雾收集膜,距离为 5 cm。控制(超)疏水/(超)亲水膜的有效区域大小为 1 cm \times 1 cm,并测量通孔量一致的不同孔径的(超)疏水/(超)亲水膜在 10 min 的测试时间内收集的水雾量,将上述通孔量一致不同

孔径的(超)疏水/(超)亲水膜钻孔固定置于培养皿上方,水雾被培养皿收集,随后进行称重,并作相应的统计,统计误差为 5%,如图 11 所示。

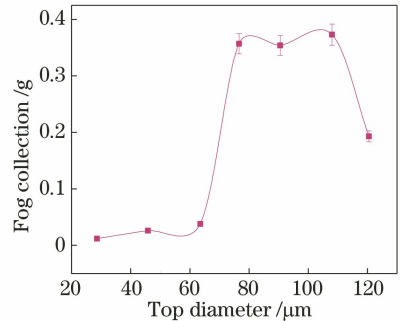


图 11 (超)疏水/(超)亲水膜的水雾收集量测量
Fig. 11 Measurement of fog collection in (super) hydrophobic/(super) hydrophilic membrane

从图中可以看出,当 10 min 以后,对于这种(超)疏水/(超)亲水膜的水雾收集量分别收集了 0.012,0.026,0.038,0.357,0.354,0.372,0.193 g 的水。收集效率分别为 0.0012, 0.0026, 0.0038, 0.0357,0.0354,0.0372,0.0193 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。对不同孔径的(超)疏水/(超)亲水膜的收集效率进行比较,可以看出孔径为 108 μm ,间距为 385 μm 时的(超)疏水/(超)亲水膜表现出强大的收集性能,即为雾收集的最佳直径,其雾水收集量高达最低雾水收集量的 31.3 倍左右。

4 结 论

基于对铝膜表面润湿特性的研究,提出采用纳秒光纤激光制备微孔阵列铝膜的方法。保持通孔量一致的情况下,研究了孔径对(超)疏水/(超)亲水铝膜润湿性以及雾水收集能力的影响。利用纳秒光纤激光技术,能够高效快速制备出尺寸均匀的微孔阵列结构的铝膜,操作简单,成本低;结合疏水涂层试剂对制备表面进行改性,高效快速。纳秒光纤激光微纳加工技术在快速制备微纳结构方面具有极大的优势,在水雾收集、液滴脱离、微流体等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] Wang Y C, Zhang L B, Wu J B, et al. A facile strategy for the fabrication of a bioinspired hydrophilic-superhydrophobic patterned surface for highly efficient fog-harvesting [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3: 18963-18969.
[2] Wang B L, Heng L P, Jiang L. Temperature-

- responsive anisotropic slippery surface for smart control of the droplet motion [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(8): 7442-7450.
- [3] Gao A T, Liu J, Ye L J, et al. Control of droplet evaporation on oil-coated surfaces for the synthesis of asymmetric supraparticles [J]. *Langmuir*, 2019, 35(43): 14042-14048.
- [4] Wang J H, Huang Y, You K, et al. Temperature-driven precise control of biological droplet's adhesion on a slippery surface [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(7): 7591-7599.
- [5] Yang X L, Song J L, Liu J K, et al. Atwice electrochemical-etching method to fabricate superhydrophobic-superhydrophilic patterns for biomimetic fog harvest [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 8816.
- [6] Gao Q, Wang K H, Guo S, et al. Effects of nanosecond laser process parameters on Al/Mg dissimilar metal weld formation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0102004.
- 高琼, 王克鸿, 郭顺, 等. 纳秒激光工艺参数对铝/镁异种焊缝成形的影响 [J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0102004.
- [7] Yang Q B, Liu S J, Wang Y T, et al. Superhydrophobic micro-nano structures on aluminum surface induced by nanosecond laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091406.
- 杨奇彪, 刘少军, 汪于涛, 等. 纳秒激光诱导铝板表面超疏水微纳结构 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091406.
- [8] Zhang X, Liu K, Wang M D, et al. Etching technology for copper-clad laminates based on femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1214003.
- 张晓, 刘凯, 王明娣, 等. 基于飞秒激光的覆铜板刻蚀工艺 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1214003.
- [9] Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936, 28(8): 988-994.