

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.06.011

基于碳纳米管涂装的超疏水表面及性能研究

余金桂*, 阮赣江, 章桥新

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了实现绿色环保的方式制备超疏水表面, 采用碳纳米管(CNT)涂装与SLM-3D打印结合的方式制备金属基底的超疏水表面。利用扫描电子显微镜和表面成分能谱分析进行表征, 发现碳纳米管成功涂装至3D打印的类水稻沟槽结构上, 并呈现出团簇结构。碳纳米管团簇与试样表面的沟槽结构形成了两级结构特征, 无需氟硅烷等含氟物质修饰便获得超疏水特性, 其接触角为 153.1° , 滚动角为 8.2° 。对碳纳米管涂装和氟硅烷修饰这两种方式制备的试样表面进行耐腐蚀性能、黏附性能、机械性能等测试。结果表明: 碳纳米管涂装的超疏水表面不仅具有优异的耐腐蚀性能, 而且表面黏附力极小, 仅为 $23.2\ \mu\text{N}$ 。碳纳米管涂装的试样表面经过线性磨损280 cm后, 接触角依然在 150° 以上。采用3D打印结合碳纳米管涂装的超疏水表面抗破坏力强, 疏水功能稳定。

关键词: 碳纳米管; 超疏水; SLM-3D打印; 疏水性能表征

中图分类号: TB34

文献标识码: A

Study on superhydrophobic surface and properties based on carbon nanotube coating

Yu Jingui*, Ruan Ganjiang, Zhang Qiaoxin

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to prepare superhydrophobic surfaces in a green and environmentally friendly way, the combination of carbon nanotube (CNT) coating and SLM-3D printing was used to prepare superhydrophobic surfaces on metal substrates. Characterized by scanning electron microscopy and surface composition energy spectrum analysis, it was found that carbon nanotubes were successfully coated on the 3D printed rice-like groove structure and presented a cluster structure. The carbon nanotube clusters and the groove structure on the surface of the sample formed a two-level structural feature, and the superhydrophobic property was obtained without the modification of fluorine-containing substances such as fluorosilicate. The contact angle was 153.1° and the rolling angle was 8.2° . The corrosion resistance, adhesion and mechanical properties of the samples prepared by carbon nanotube coating and fluorosilane modification were tested. The results showed that the superhydrophobic surface coated with carbon nanotubes not only had excellent corrosion resistance but also had a minimal surface adhesion of only $23.2\ \mu\text{N}$. The contact angle of the sample coated with carbon nanotubes was still above 150° after linear wear of 280 cm. The superhydrophobic surface coated with 3D printing combined with carbon nanotubes had strong damage resistance and stable hydrophobic function.

Keywords: carbon nanotube; superhydrophobic; SLM-3D printing; characterization of hydrophobic

收稿日期: 2023-11-06

修回日期: 2023-12-19

*通信作者: 余金桂(1984—), 男, 博士, 副教授, email: yujingui@whut.edu.cn

properties

超疏水在大自然中是很常见的界面现象,通常其表面的静态接触角大于 150° ,动态滚动角小于 10° ^[1]。例如自然界的水稻叶,水滴在水稻叶上面通常呈现为水珠形态,在出现倾角时能够滚离叶面并且带走灰尘,因为超疏水表面非常特殊的润湿性能,在自清洁^[2]、防腐抗菌^[3]、减阻^[4]、油水分离^[5]等众多领域都有应用。制备超疏水表面的方法有很多种,目前主流的制备方法大多都是通过构建表面微纳结构来达到超疏水的表面效果,例如电化学沉积法^[6-7]、激光加工法^[8-9]、模板法^[10-11]、喷砂涂层法^[12-13]和电火花线切割加工法^[14-15]等。然而,目前制备方法存在一些限制,如微纳结构形状控制困难、使用含氟物质可能带来环境负担等。因此需要进一步研究和改进制备方法,以实现更加绿色环保的方式制备超疏水表面。

碳纳米管(CNT)是一种由碳原子组成的纳米级管状结构,其轴向尺寸为微米量级,径向尺寸为纳米量级,此微观几何特征能够用来构建特殊的微观表面形貌。此前已经有部分研究学者将其应用于超疏水涂层表面研究。Chen F等^[16]通过真空过滤将多壁碳纳米管沉积在坚固的单壁碳纳米管薄膜上。其中静态接触角可达 152° ,滚动角仅为 2° 。Zhang F等^[17]将双酚A二缩水甘油醚环氧树脂与多壁碳纳米管相结合,制备出一种新型的超疏水纳米复合涂层。其中静态接触角可达 154° ,经过100次胶带剥离试验依旧具有超疏水特性。

选择性激光熔化(SLM)是一种金属增材制造技术,被扫描的金属粉末通过熔化和凝固成型^[18]。据此,本研究利用水稻叶沟槽作为仿生研究对象,通过SLM-3D打印制备微米级的表面微结构,利用碳纳米管(CNT)涂装的方式构建纳米级结构来代替氟硅烷等含氟的低表面能物质修饰处理。并对用这两种方法制备的超疏水表面在耐腐蚀性、黏附性能和机械耐磨性能方面进行对比研究。

1 超疏水表面的制备与表征

1.1 碳纳米管涂装超疏水表面的制备

超疏水试样先通过广东汉邦激光科技有限公司的HBD-80型号的金属3D打印机制备出一级结构。

选用316L不锈钢粉末作为SLM-3D打印的粉末原材料,通过参考相关的文献资料^[19-20]并结合打印设备的实际情况,选定金属粉末的打印参数为:激光功率 $P=170\text{ W}$,激光扫描速度 $v=1000\text{ m/s}$,扫描间距 $s=70\text{ }\mu\text{m}$,铺粉厚度 $h=30\text{ }\mu\text{m}$,扫描方式为条形扫描。

碳纳米管涂装超疏水表面的制备过程主要分为两大步骤。如图1所示,首先是碳纳米管混合溶液的制备,在室温的环境下将碳纳米管、丙酮、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、固化剂按照质量比 $1:110:0.5:0.05$ 进行混合。PDMS的加入利于后续的喷涂过程中将碳纳米管稳定地附着在3D打印试样表面。其次是碳纳米管涂装超疏水表面的制备,通过SLM-3D打印的方式制备出类水稻叶的沟槽结构。然后在常温环境下利用藤原W71G口径 1.0 mm 的雾化喷枪进行喷涂,空压机压力调至 1.0 MPa ,将配制好的碳纳米管混合溶液喷至试样表面,将制备的样品置于 60°C 环境下干燥 6 h 。另外取一部分试样通过氟硅烷进行修饰做对比试验。

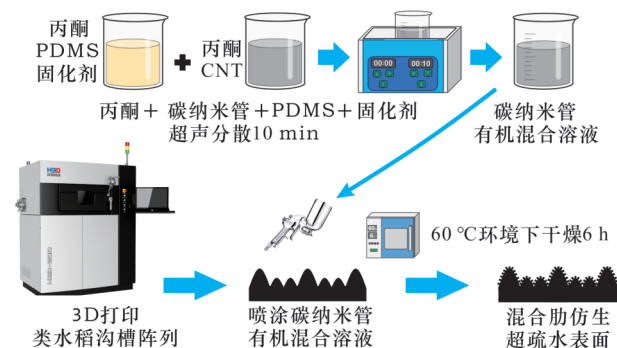


图1 碳纳米管涂装超疏水表面的制备

Fig.1 Preparation of superhydrophobic surface coated with carbon nanotubes

1.2 超疏水表面的组织观察与性能测试

通过东莞晟鼎SDC-80光学接触角测量仪器测量试样的接触角和滚动角,静态接触角使用 $5\text{ }\mu\text{L}$ 的去离子水,动态接触角使用 $10\text{ }\mu\text{L}$ 的去离子水,并且任意取5处测量结果的平均值作为测量结果。试样表面的微观形貌通过JSM-IT300扫描电子显微镜(SEM)表征。采用三电极体系,通过上海辰华CHI660D电化学工作站测试试样表面的耐腐蚀性能;其中参比电极选择饱和甘汞电极,辅助电极选择尺寸 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的铂片,工作电极则采用

面积 1 cm^2 的试样;动电位极化曲线的扫描幅值范围选用 $-0.8\sim 0.2\text{ V}$,扫描速度为 10 mV/s 。在常温下状态下,将试样置入 $3.2\text{ wt.}\%\text{NaCl}$ 的模拟海水溶液中测量其耐腐蚀性能。利用梅特勒-托利多 AL204-IC 电子天平(精度 0.0001 g)搭建测试平台,近似测量水滴与表面之间的黏附阻力。采用 800 目的砂纸,利用 150 g 重物将试样的表面压在砂纸上,对试样的表面进行破坏,记录试样表面接触角的变化来评估其机械耐久性。

2 结果与讨论

2.1 碳纳米管涂装超疏水表面的润湿性能分析

如图 2 所示为 SLM-3D 打印制备的类水稻叶面沟槽结构。初步选择一个截面尺寸打印,经过氟硅烷修饰发现其接触角接近 150° ,表明了此类结构的可行性。选择 $0.20\sim 0.50\text{ mm}$ 之间的尺寸进行打印,单道截面形状选择等边三角形。图 2(a)为单肋表面结构,单肋表面结构的滚动角都比较大。图 2(b)为混合肋表面结构,选用高肋和低肋混合的结构。经过修饰后发现其中尺寸为 $0.45\text{ mm}+0.30\text{ mm}\times 2$ 的结构拥有较大的接触角(152.7°)和较低的滚动角(11.7°)。混合肋的表面结构之所以更出色,是因为表面的组合结构使其与水滴的接触面积相对减少,降低了表面的黏附力,表面的疏水性能得到增强。

在多数超疏水表面的制备方法中,常用含氟物质修饰做最后一步的处理,但上述表面结构经过氟硅烷修饰后其滚动角仍然大于 10° 。本研究将碳纳米管涂装至 SLM-3D 打印试样的微米级结构上,利用其纳米级的尺寸结构来构建特殊的微观表面形貌。碳纳米管涂装在 SLM-3D 打印试样表面的喷涂量受到有机溶液中碳纳米管含量、喷涂距离和喷涂次数的影响。为控制其喷涂量,本研究将有机溶液中碳纳米管含量和喷涂距离 25 cm 保持不变。图 3 中可以发现,喷涂次数增加,表面接触角增大,这是因为表面涂有碳纳米管的部分区域隔离了金属基底与液滴之间的接触。

随着喷涂次数的继续增加,图 4(a)和图 4(b)可以看到喷涂达到 8 次后碳纳米管团簇布满试样表面,其接触角达到 153.1° 。喷涂次数的增加必然导致喷量的增加,碳纳米管喷涂量过大会覆盖 SLM-3D 打印表面的一级结构。图 4(c)和图 4(d)所示为喷涂 12 次试样的 SEM 图像,图 4 中可以观察到低肋

部分被碳纳米管团簇覆盖,间隙处部分液-气接触界面被固-液接触界面代替。固-液接触界面面积分数增加,接触角减小,与图 3 中反应的结果一致。图 3 可以看到最佳喷涂次数为 8 次,其表面接触角为 153.1° ,滚动角为 8.2° ,表明碳纳米管涂装能使试样拥有优良的超疏水性能。

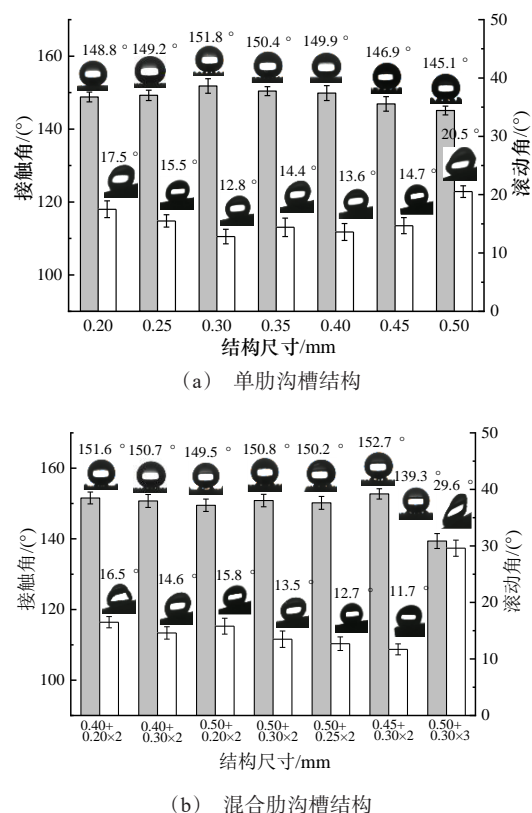


图 2 SLM-3D 打印制备表面润湿性的表征数据

Fig.2 Characterization data of surface wettability prepared by SLM-3D printing

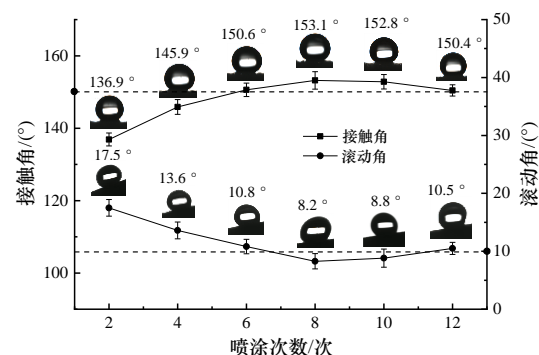


图 3 不同喷涂次数表面润湿性的表征数据

Fig.3 Characterization data of surface wettability with different spraying times

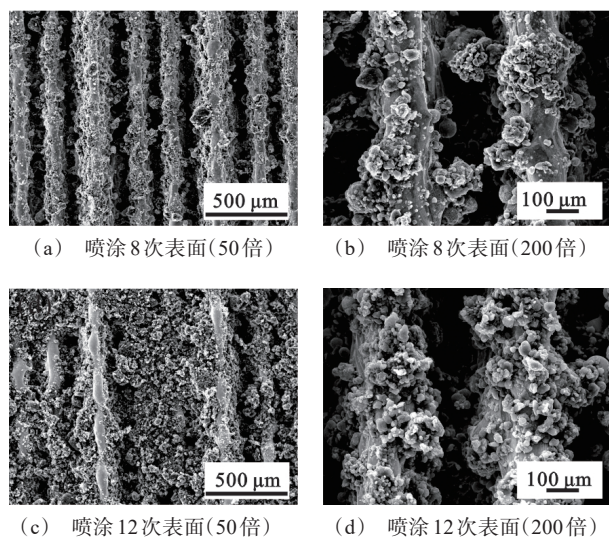


图4 不同喷涂次数表面在不同尺度下的SEM图

Fig.4 SEM images of surfaces with different spraying times at different scales

对碳纳米管涂装试样表面成分进行表征。图5所示为碳纳米管涂装表面团簇的EDS能谱分析,其中C元素占比最大,和碳纳米管的主要成分相符。其中少量的Si元素和O元素表明PDMS(聚二甲基硅氧烷)作为黏合剂成功地将碳纳米管保留在试样表面,证明了碳纳米管成功涂装至试样表面。

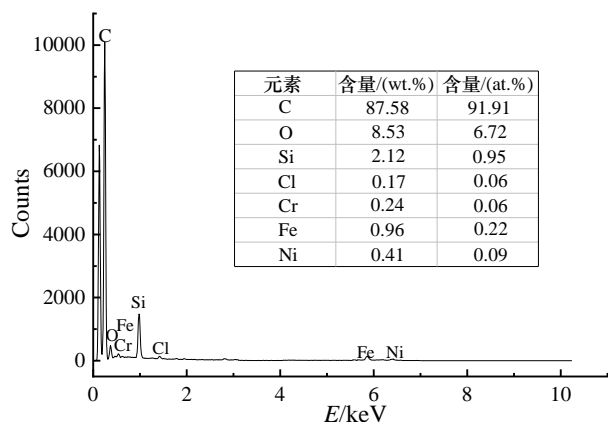


图5 碳纳米管涂装表面的EDS能谱分析

Fig.5 EDS energy spectrum analysis of carbon nanotube coating surface

图6(a)~(c)为氟硅烷修饰试样表面不同尺度的SEM图像,图6(e)~(g)为碳纳米管涂装试样表面不同尺度的SEM图像。相较于氟硅烷修饰表面,碳纳米管涂装表面上附着大量的碳纳米管团簇,表面粗糙度相较于氟硅烷修饰的表面更大。图6(e)和

图6(f)中能够看到碳纳米管团簇上面分布着许多纳米级的碳纳米管,这些碳纳米管团簇与微米级的沟槽结构形成了两级结构特征。此结构特征能够在液滴接触表面时,将空气困在微结构之间,形成空气层,表现出固-液-气三相复合接触界面特性。

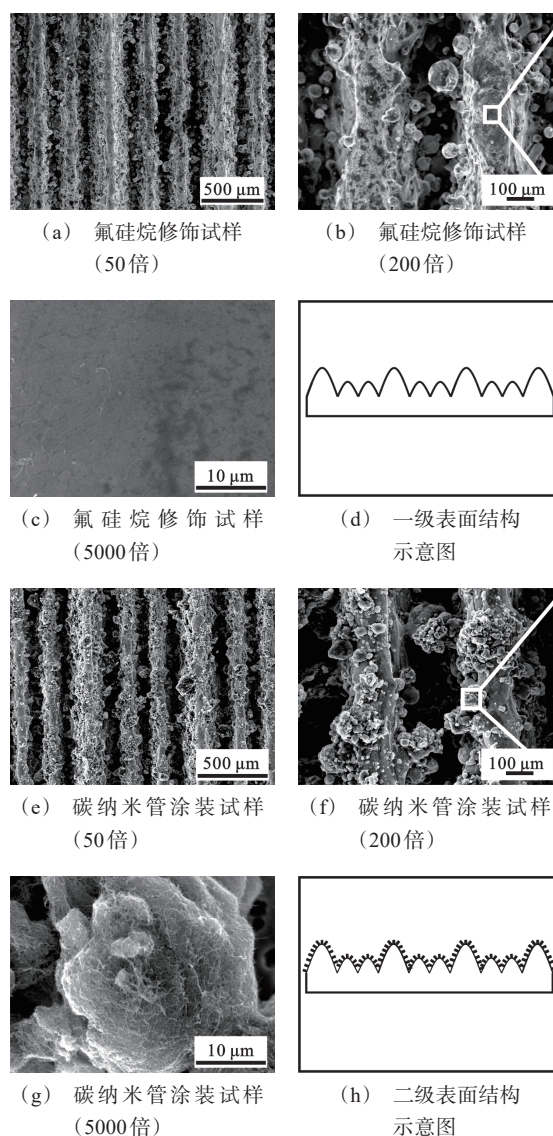


图6 试样的SEM表面形貌图及表面结构示意图

Fig.6 The SEM surface morphology of the sample and the diagram of surface structure

从氟硅烷修饰试样表面微结构的形貌特征可以看出,发现其呈现出单一结构特征,其结构简图如图6(d)所示,水滴在该表面上运动需要克服的能量势垒较大,故而表现出相对较大的滚动角(11.7°)。碳纳米管涂装表面的结构简图如图6(h)所示,碳纳

米管团簇与表面沟槽结构形成了两级结构特征,固-液接触界面面积占比在一级结构基础上进一步降低,从而降低了试样表面对液滴的黏滞阻力,表面展现出更好的动态疏水效果(滚动角为 8.2°)。

为了解释表面的微观结构对疏水特性的影响,Cassie A等^[21]考虑了水滴与粗糙平面的复合接触状态并且提出了解释方程。由于水与空气的本征接触角为 180° ,因此该解释方程可以简化成:

$$\cos \theta_c = f(\cos \theta + 1) - 1 \quad (1)$$

式中: θ_c 为粗糙表面表观接触角, f 为固-液接触界面面积占总面积的比例, θ 为固体表面的本征接触角。

由式(1)可以求得碳纳米管涂装表面的液-气接触界面面积占比为91.9%,相对于未经任何处理的SLM-3D打印试样($f=0$)比例增加明显。这说明表面二级微纳结构极大地改善了表面的抗水滴渗入能力。

对于动态滚动角,Muarse H等^[22]将表面的微纳结构假设为针尖阵列,并且建立起有关滚动角的理论模型:

$$\sin a = \frac{2rk \sin \theta_c (\cos \theta_c + 1)}{g(r \cos \theta + 1)} \left[\frac{3\pi^2}{m^2 \rho (2 - 3 \cos \theta_c + \cos^3 \theta_c)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中: r 表示针尖侧面与底面的比值, k 表示光滑表面的滚动角比例常数。

由图2(b)和图3可知,氟硅烷修饰和碳纳米管涂装的表面接触角 θ_c 非常接近,分别为 152.7° 、 153.1° ,滚动角分别为 11.7° 、 8.2° 。超疏水表面的滚动角通常小于 10° ,因此两者滚动角的差异存在着本质的区别。由式(2)可知这两者的差异主要是 r 值的不同导致的,在相同微结构底面的情况下,表面的针尖阵列越多, r 值越大。当 θ_c 恒定时,式(2)呈现单调递减趋势,表现为针尖阵列越多,滚动角越小。碳纳米管喷涂至试样表面的团簇结构形成了更多的针尖阵列,使得液滴在其表面上滚动克服的能量壁垒减小,动态疏水性能得到增强。

2.2 碳纳米管涂装超疏水表面的耐腐蚀性能研究

通过图7所示的极化曲线,评估了试样的腐蚀行为和腐蚀倾向。其腐蚀电位(E)数值越小,表示金属越容易发生腐蚀;腐蚀电流密度(i)数值越小,表示金属表面腐蚀速率越慢^[23]。

表1为不同试样的腐蚀特性参数,由表1可知

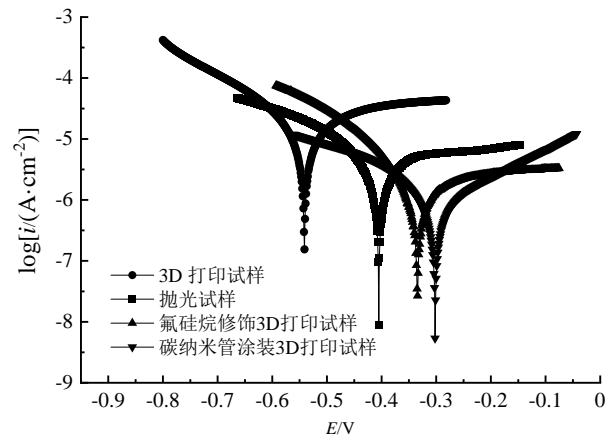


图7 不同试样在模拟海水腐蚀的动电位极化曲线

Fig.7 Potentiodynamic polarization curves of different samples in simulated seawater corrosion

SLM-3D打印和抛光试样的腐蚀电位分别为 -0.541 V 、 -0.405 V ,SLM-3D打印试样腐蚀电位数值更小。这是因为对于同一种材料来说SLM-3D打印试样表面存在着许多沟槽,更容易被模拟海水溶液腐蚀。

表1 不同试样的腐蚀特性参数表

Tab.1 Corrosion characteristic parameter table of different samples

试样	腐蚀电压/V	腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)
3D打印试样	-0.541	17.83
抛光试样	-0.405	3.59
氟硅烷修饰3D试样	-0.334	1.87
碳纳米管涂装3D试样	-0.302	0.74

SLM-3D打印试样经过氟硅烷修饰和碳纳米管涂装后,其腐蚀电位分别为 -0.334 V 、 -0.302 V 。其数值增大,这是因为经过表面处理的试样获得了疏水性能,试样表面在模拟海水溶液中形成了空气层,阻碍了腐蚀反应。SLM-3D打印试样、抛光表面试样和氟硅烷修饰SLM-3D打印试样的腐蚀电流密度分别为 $17.83\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $3.59\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 和 $1.87\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$,都大于碳纳米管涂装SLM-3D打印试样的 $0.74\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$,表明碳纳米管涂装SLM-3D打印试样发生腐蚀的速度最为缓慢。对于同为SLM-3D打印的表面结构,氟硅烷修饰和碳纳米管涂装均能使表面获得超疏水性能。碳纳米管涂装SLM-3D打印试样的耐腐蚀性能更优,这是因为碳纳米管团簇在试样表面构建的二级结构,进一步降低了试样表面的

固-液接触界面面积占比,故而表现出更加优异的超疏水性能。

2.3 碳纳米管涂装超疏水表面的黏附性能研究

为了进一步研究碳纳米管涂装表面处理方式的界面特性,采用梅特勒-托利多 AL204-IC 电子天平搭建测试平台,记录平台的竖直位移,对试样表面的黏附力进行了近似测量。图8为各个表面对液滴的黏附阻力。图中可以看出对于SLM-3D打印的表面结构,碳纳米管涂装表面在液滴向上移动了0.3 mm便发生分离,其对液滴的黏附力最大仅为23.2 μN ;采用氟硅烷修饰的表面最大黏附力为58.2 μN ,是碳纳米管涂装表面的两倍多。而对于同一种表面结构,采用碳纳米管涂装能够大大降低其表面的黏附力,增强表面的疏水性能。抛光结合低表面能修饰虽然也有一定的疏水性,但其表面的粗糙度较小,较难形成大面积的空气层,表现出黏附力阻力较大。

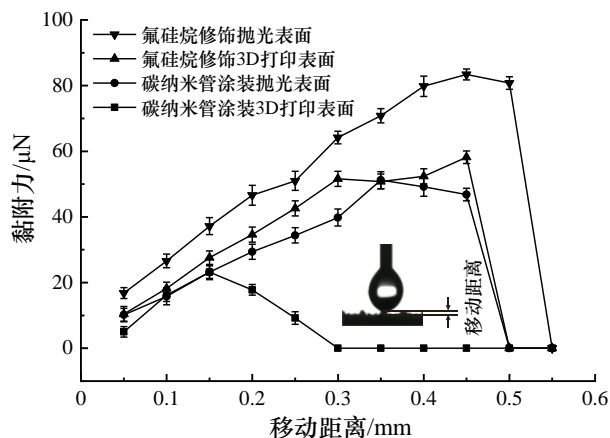


图8 不同表面与液滴之间的黏附力测量

Fig.8 Measurement of adhesion between different surface and droplets

2.4 碳纳米管涂装超疏水表面的机械性能研究

碳纳米管团簇和基底的结合力是影响超疏水表面机械耐久性的一个重要因素。如图9所示用砂纸对试样表面进行破坏,记录其接触角大小随着磨损距离的变化情况。两种试样没有发生特别大的变化,这是因为316L金属本身较为耐磨的特性所致。图9中可以看到,经过280 cm的线性磨损之后,经氟硅烷修饰的试样在经过100 cm的距离磨损之后其接触角一直小于150°。而碳纳米管涂装试样的接触角基本上能够保持在150°左右,这是因为处于沟槽内部的碳纳米管涂装试样,其表面沟槽内部的碳纳米管团簇得到了一定的保护。即使表面被磨掉一

层,沟槽内部的碳纳米管仍然完好无损,使试样仍表现出超疏水特性。

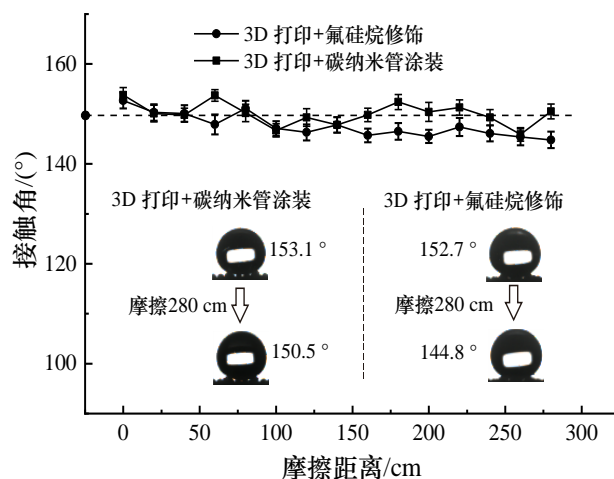


图9 不同处理方式表面的机械性能测试

Fig.9 Measurement of adhesion between surface by different modification methods and droplets

3 结论

(1)通过SLM-3D打印的方法制备出类水稻叶表面沟槽结构,并结合碳纳米管(CNT)涂装构建纳米级结构。其制备表面的接触角为153.1°,滚动角为8.2°。

(2)利用梅特勒-托利多AL204-IC电子天平搭建测试平台,近似测量出液滴与表面之间的黏附力,更加直观的展现出碳纳米管涂装制备超疏水表面的优势所在。

(3)与氟硅烷修饰表面对比研究发现,碳纳米管涂装制备的超疏水表面拥有优异的耐腐蚀性能、机械稳定性能以及极低的表面黏附力(最高23.2 μN)。能够在一级微结构表面上构筑出二级结构,增强其超疏水性能。

参考文献

- [1] Xiao X, Xie W, Ye Z. Preparation of corrosion-resisting superhydrophobic surface on aluminium substrate[J]. Surface Engineering, 2019, 35(5): 411-417.
- [2] Chen J, Yuan L, Shi C, et al. Nature-inspired hierarchical protrusion structure construction for washable and wear-resistant superhydrophobic textiles with self-cleaning ability[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(15): 18142-18151.

- [3] Zhang Q, Feng Y, Liao W, et al. Preparation and corrosion resistance of superhydrophobic Ni-Co-Al₂O₃ coating on X100 steel[J]. RSC Advances, 2023, 13(10): 6847-6860.
- [4] Rad S V, Moosavi A, Nouri-Boroujerdi A, et al. Drag reduction in internal turbulent flow by fabricating superhydrophobic Al₂O₃/waterborne polyurethane coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421: 127406.
- [5] Yuan H, Pan Y, Wang X, et al. Simple water tunable polyurethane microsphere for super-hydrophobic dip-coating and oil-water separation[J]. Polymer, 2020, 204: 122833.
- [6] Park J, Kim D, Kim H, et al. Superhydrophobic electrodeposited copper surface for robust condensation heat transfer[J]. ACS Omega, 2022, 7(22): 19021-19029.
- [7] 侯珂珂, 陈新华, 张万强, 等. 电沉积法制备仿生超疏水滤网及其油水分离性能[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(4): 1-6.
- [8] 林立峰, 何秀权, 章桥新, 等. 飞秒激光制备超疏水镍基合金及性能研究[J]. 应用激光, 2022, 42(10): 93-98.
- [9] Zhan Y, Yu S, Amirfazli A, et al. Preparations of versatile polytetrafluoroethylene superhydrophobic surfaces using the femtosecond laser technology[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 629: 127441.
- [10] He Q, Xu Z, Li A, et al. Study on hydrophobic properties of fluororubber prepared by template method under high temperature conditions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 612: 125837.
- [11] Rajab F H, Liu Z, Wang T, et al. Controlling bacteria retention on polymer via replication of laser micro/nano textured metal mould[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 530-536.
- [12] Menga N, Di Mundo R, Carbone G. Soft blasting of fluorinated polymers: The easy way to superhydrophobicity[J]. Materials & Design, 2017, 121: 414-420.
- [13] 李可婷, 徐丽慧, 潘虹, 等. 基于纤维素纳米纤维的超疏水涂层制备研究[J]. 功能材料, 2022, 53(7): 7215-7221.
- [14] Xing L, Zhang Q, Zhang L, et al. Controllable preparation of wear-resistant superhydrophobic surfaces fabricated with square column microstructures[J]. Materials Letters, 2022, 309: 131468.
- [15] Yanling W, Jian Y, Huadong Y. Superhydrophobic surface prepared by micro-milling and WEDM on aluminum alloy[J]. Materials Research Express, 2018, 5(6): 066504.
- [16] Chen F, Jia Y, Wang Q, et al. Strong and super-hydrophobic hybrid carbon nanotube films with superior loading capacity[J]. Carbon, 2018, 137: 88-92.
- [17] Zhang F, Qian H, Wang L, et al. Superhydrophobic carbon nanotubes/epoxy nanocomposite coating by facile one-step spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 341: 15-23.
- [18] 兰芳, 梁艳娟, 黄斌斌. 选区激光熔化成形质量研究[J]. 装备制造技术, 2018(5): 156-158, 166.
- [19] Dutt A K, Bansal G K, Tripathy S, et al. Optimization of selective laser melting (SLM) additive manufacturing process parameters of 316L austenitic stainless steel[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2023, 76(2): 335-345.
- [20] Xu S, Zhang S, Ren G, et al. Optimization of structural and processing parameters for selective laser melting of porous 316L bone scaffolds[J]. Materials, 2022, 15(17): 5896.
- [21] Cassie A, Baxter S. Wettability of porous surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40: 546-551.
- [22] Murase H, Fujibayashi T. Characterization of molecular interfaces in hydrophobic systems[J]. Progress in Organic Coatings, 1997, 31(1): 97-104.
- [23] Li H, Jin Y, Tao S. Characterization of the electrochemical corrosion of a beryllium-bronze alloy[J]. Analytical Letters, 2022, 55(5): 841-856.