

PTFE/epoxy 全有机超疏水涂层制备

Preparation of all-organic superhydrophobic

PTFE/epoxy composite coatings

李为民¹, 彭超义², 杨金水², 邢素丽²

(1 中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所,
四川 绵阳 621000; 2 国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073)

LI Wei-min¹, PENG Chao-yi², YANG Jin-shui², XING Su-li²

(1 Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics
Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China;

2 College of Aerospace Science, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China)

摘要: 采用纳米粒子构筑微-纳粗糙结构制备的超疏水涂层一般存在抗水流冲击能力差的缺点, 极大限制了其户外应用前景。利用环氧树脂和聚四氟乙烯(PTFE)纳米粒子, 通过喷涂和模压两种工艺分别制备低声阻系数的全有机超疏水涂层, 基于水流冲击破坏机理设计实验分析涂层的抗水流冲击性能, 并与商用超疏水涂层对比。结果表明: PTFE 粒子为 70% (质量分数, 下同) 时, 其疏水性能最佳, 静态接触角为 164.13°, 滚动角为 3°; PTFE 粒子为 75% 时, 其抗水流冲击性能最佳, 在被速度为 22.77 m/s 的水流冲击后接触角仍达到 154.62°; 与喷涂法相比, 模压法能进一步提高涂层的抗水冲击性能。本研究所制备的全有机超疏水涂层同时还具有良好的附着性能和耐磨性能, 在进行 25 次黏附剥离实验后涂层表面接触角为 150.51°, 滚动角为 4°, 在进行 20 次磨损实验后涂层表面接触角为 149.21°, 滚动角为 9°。

关键词: 超疏水涂层; PTFE; 环氧树脂; 喷涂法; 模压法; 抗水冲击性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.001097

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)07-0162-08

Abstract: Superhydrophobic coatings with micro-nano hierarchical structure constructed by nano particles usually have a poor behavior in water impact situation. This weakness limits superhydrophobic coatings' outdoor potential applications. A low-acoustic resistance all-organic superhydrophobic coating was prepared by spraying and compression molding methods with epoxy and PTFE particles. Water impact test was designed according to impact failure mechanism, and then water impact resistance was evaluated and compared with commercial superhydrophobic coatings'. The results indicate that the hydrophobicity reaches peak when coating contains 70% (mass fraction, the same below) PTFE particles, with 164.13° water contact angle(WCA) and 3° water slide angle(WSA). For water impact resistance, the coating with 75% PTFE particles has the best performance, it can keep the WCA at 154.62° after 22.77 ms⁻¹ water jet impact test. And the molding coatings have better performance than sprayings. Besides, the results also show coating's good adhesion and wearability, for example, it can keep the WCA at 150.51° and WSA at 4° after 25-cycle tape peeling test, and keep the WCA at 149.21° and WSA at 9° after 20-cycle wear test.

Key words: superhydrophobic coating; PTFE; epoxy; spraying; compression molding; water impact resistance

自然界中存在很多超疏水现象, 如荷叶表面不沾水、水黾可以在水上自由行走等, 都与超疏水表面有关。超疏水表面一般定义为水静态接触角大于 150° 且滚动角小于 10° 的表面^[1]。受自然界超疏水现象的

启发得出超疏水表面的两个要素: 低表面能和高的表面粗糙度^[2]。因此制备超疏水表面的主要途径有三种^[3]: 一是在低表面能物质基底上构筑微纳多尺度分级结构; 二是用低表面能物质修饰表面能高但具有微

纳多尺度分级结构的表面;三是利用低表面能物质直接在基底表面构筑微纳分级结构。

构筑粗糙结构不仅仅局限在低表面能基底上直接构筑超疏水所需微纳二级结构,还包括在如铁、铝、铜等具有高表面能的基底上使用低表面能物质直接构筑结构。目前,常用的方法包括喷涂法^[4-6]、刻蚀法^[7-9]、滴涂法^[10]、溶胶-凝胶法^[11-13]等。其中,喷涂法因工艺实施简便、适合大面积使用等特点而被广泛应用。但是,传统喷涂法制备的超疏水涂层,多采用无机纳米粒子作为构筑超疏水表面微结构或表面粗糙度的主要途径,存在着抗水流冲击能力、耐环境腐蚀能力以及粘接附着力学等缺点,极大地限制了超疏水涂层的应用。已报道的传统超疏水涂层抗水流冲击能力多在 10 m/s 以内^[14-15]。

根据超疏水的理论可知,液滴与粗糙的超疏水表面有三种基本接触类型:Wenzel 态、Cassie 态和 Wenzel 与 Cassie 过渡态。液滴撞击超疏水表面后的接触类型由撞击过程中的水动压(P_D)、水锤压^[16](P_{WH})和毛细压^[17](P_C)决定。其中

$$P_D = \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (1)$$

$$P_C = -\lambda \cos\theta_0 \frac{L}{A} \quad (2)$$

$$P_{WH} = \frac{\alpha}{2}(c\rho V) \quad (3)$$

式中: ρ 是液滴密度; V 是液滴与超疏水表面的接触速度; λ 是液滴表面张力; θ_0 是液滴与材料表面的杨氏接触角; L 是毛细柱截面周长; A 是单个毛细柱由于液体表面张力存在而实际支撑起的平均面积; c 是液滴中声速; α 是液滴撞击过程中速度改变部分液体的速度变化系数。 P_D 和 P_{WH} 是使得液滴渗入超疏水表面毛细缝隙的主动力,而 P_C 是抵抗液体渗入的被动力。因此,该三个力的大小决定了液滴撞击后的接触状态^[18-21]:当 $P_C > P_{WH} > P_D$ 时为 Cassie 态; $P_{WH} > P_C > P_D$ 时为过渡态; $P_{WH} > P_D > P_C$ 时为 Wenzel 态。

可见,与材料本征性质有关的压力是 P_C ,因此可以通过提高 P_C 的方法如降低材料的表面能和增加表面粗糙度来提高材料的抗水冲击性能;同时,为了减轻高速水流冲击时 P_{WH} 的锤压破坏作用,采用声阻系数更低的有机纳米粒子代替传统无机纳米粒子来构筑超疏水涂层微结构。

本研究通过喷涂法制备了 PTFE/epoxy 超疏水复合涂层,并测试涂层的抗水冲击性能;而后改变涂层制备方法为模压法,探究了液滴在不同涂层表面的撞击行为,并对比了两种涂层的抗水冲击性能。

1 实验材料与方法

1.1 主要原材料

环氧树脂(牌号为 F170,台湾南亚环氧树脂公司);聚四氟乙烯颗粒(粒径 100 nm,3M 中国有限公司);对对-二氨基-二苯-甲烷(化学纯,上海三爱思试剂有限公司);全氟癸基三乙氧基硅烷($C_{16}H_{19}F_{17}O_3Si$,上氟科技有限公司);丙酮(分析纯,湖南汇虹试剂有限公司);NeverWet 涂料(市售 RUST-OLEUM 牌)。

1.2 制备超疏水涂层

(1)喷涂法制备涂层

第一步,按环氧树脂、丙酮、PTFE 颗粒、全氟癸基三乙氧基硅烷的顺序依次称取配方(取树脂与颗粒质量总和为 1,其中颗粒含量分别占 50%,55%,60%,65%,70%,75%,80%,氟硅烷为 5%)中的原料置于烧杯内用玻璃棒搅拌均匀;而后用高速剪切分散仪(型号 FA25)分散混合液 10 min;最后称取对,对-二氨基-二苯-甲烷加入已分散好混合液中用玻璃棒搅拌均匀等待喷涂。第二步,将上述混合液置于喷枪料杯内,调整喷涂压力为 1.5×10^5 Pa,喷涂距离为 10~15 cm,均匀喷于已经过乙醇超声清洗 5 min 并干燥后的载玻片表面;逐层喷涂 3 次,每次间隔 2~5 min。第三步,将喷好的样品置于鼓风烘箱内按 50 ℃加热 1 h,100 ℃加热 3 h 的顺序固化,而后随炉冷却至室温,取出样品。

(2)模压法制备涂层

第一步,按照喷涂法中的一、二步制好涂层样品,室温放置 1 h。第二步,将样品放于两片可用螺栓紧固的钢板之间,由下往上依次按照脱模纸、样品(涂层向上)、脱模布(两层)、脱模纸的顺序放置,然后紧固螺栓使压力为 1 MPa。第三步,固化,固化制度与喷涂法一致。

(3)NeverWet 涂层制备

购买市售产品,按照使用说明制备涂层。第一步,将底料均匀喷于经乙醇超声清洗并干燥后的载玻片表面,室温放置 1 h;第二步,将外层料均匀喷于底料表面,室温放置 1 h,待涂层固化形成稳定的涂层样品。

1.3 性能测试

(1)疏水性能测试与微观形貌观测

涂层表面疏水性能采用 SL-200B 光学接触角仪测量试样的静态接触角和滚动角来表征,液滴体积取 5 μ L,在样品表面取 5 个不同位置进行测量,取平均值作为最终值。用双束电子显微镜(型号 Helios NanoLab 600i)对试样表面的微观结构形貌进行观测。

(2)抗水冲击性能测试

首先,采用一定高度自由下落的液滴撞击试样表面,液滴体积取 $10\text{ }\mu\text{L}$,用高速摄像机捕捉液滴撞击过程,观察液滴与试样表面的黏附情况评价涂层的抗水冲击性能。进一步用一定速度的液柱冲击试样表面,液柱直径为 2.5 mm ,冲击时间约为 15 ms ,实验装置如图 1 所示,测量冲击后试样表面的接触角,评价涂层的抗水冲击性能。

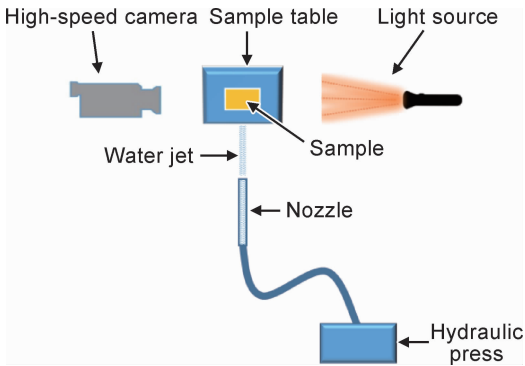


图 1 水冲击实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of water jet impact test device

(3)附着性能测试

采用胶带黏附剥离的方法来破坏涂层,并测量胶带剥离后涂层表面的接触角与滚动角来表征涂层的抗附着性能。胶带黏附剥离测试示意图如图 2 所示,首先将胶带(3M 公司,型号为 VHB 4610)轻压黏附在超疏水涂层表面,而后用质量为 2 kg 的砝码平稳匀速滚过待测部分涂层,最后剥离胶带用洗耳球轻吹涂层表面后测量其接触角与滚动角,完成单次胶带黏附剥离实验。

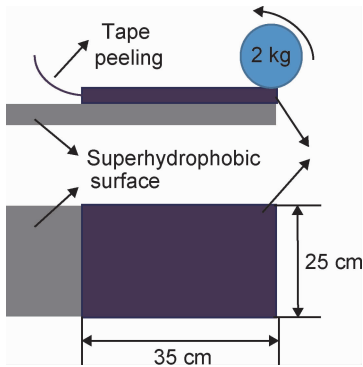


图 2 胶带黏附剥离实验示意图

Fig. 2 Diagram of tape peeling test

(4)耐磨性能测试

采用砂纸打磨的方法来测试涂层的耐磨性能。磨损实验如图 3 所示,用质量为 500 g 的砝码压住边长

为 2.5 cm 的 600 目金刚砂砂纸,平稳匀速推过涂层表面,而后用洗耳球吹净涂层表面测量其接触角和滚动角完成单次磨损实验。

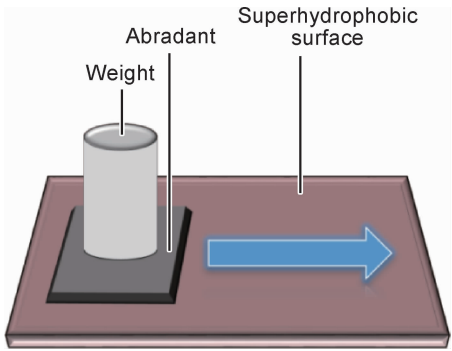


图 3 磨损实验示意图

Fig. 3 Diagram of abrasion test

2 结果与分析

2.1 微观形貌分析

在涂层制备过程中发现当涂料体系中 PTFE 颗粒含量低于 50% (质量分数,下同)时,涂料黏度较低,喷涂过程中易出现挂流现象,不易形成平整均匀的涂层;其次涂层疏水性能很差,因此仅测试 PTFE 颗粒含量高于 50% 的涂层试样。图 4 所示为液滴在涂层表面的光学照片与接触角示意图,图 5 是涂层试样表面的微观结构形貌。由喷涂法制备 PTFE 含量为 50% 的试样表面仅具有一层突起结构,其尺寸约为 $50\text{ }\mu\text{m}$,且表面大部分被树脂平整覆盖,与水接触角为 142.93° ;PTFE 含量为 75% 的试样表面存在密集的珊瑚状突起结构,珊瑚状结构由粒径约为 $70\text{ }\mu\text{m}$ 块体表面覆盖一层粒径在几微米的球状突起结构组成,突起表面无明显树脂覆盖,与水接触角为 162.11° 。模压法制备 PTFE 含量为 75% 的试样表面呈织物状,由边长约为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的方块组成,方块由同向沟槽构成,沟槽的宽度在 $15\text{ }\mu\text{m}$ 左右且比较均匀规整,相邻方块间的沟槽方向相互垂直,构成突起结构形貌规则的表面,沟槽表面无明显树脂覆盖,与水接触角为 158.46° 。

2.2 PTFE 颗粒含量对涂层疏水性能的影响

涂层接触角与滚动角测试结果如图 6 所示,从图中可以看出随着 PTFE 颗粒含量的增加,涂层表面的静态接触角升高,滚动角下降,当颗粒含量达到 60% 后,两者都趋于稳定,静态接触角均大于 150° ,滚动角均小于 10° 达到了超疏水状态。疏水性能最优的涂层颗粒含量为 70% ,静态接触角为 164.13° ,滚动角为 3° 。

结合涂层的微观形貌分析,喷涂法制备的涂层表

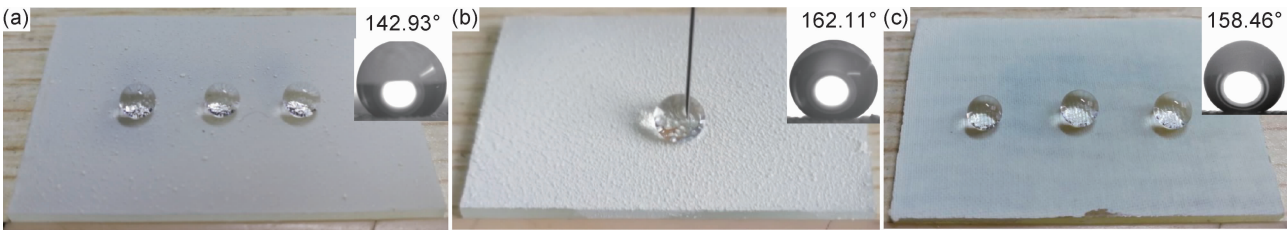


图 4 液滴(30 μL)在 PTFE/epoxy 复合涂层表面光学照片和接触角光学显微图
(a)喷涂法制备 PTFE 颗粒含量为 50% 的涂层;(b)喷涂法制备 PTFE 颗粒含量为 75% 的涂层;(c)模压法制备 PTFE 颗粒含量为 75% 的涂层
Fig. 4 Optical images of droplets (30 μL) on PTFE/epoxy composite coatings and contact angles micro-optical images
(a)spraying coating with 50% PTFE particles;(b)spray coating with 75% PTFE particles;(c)molding coating with 75% PTFE particles

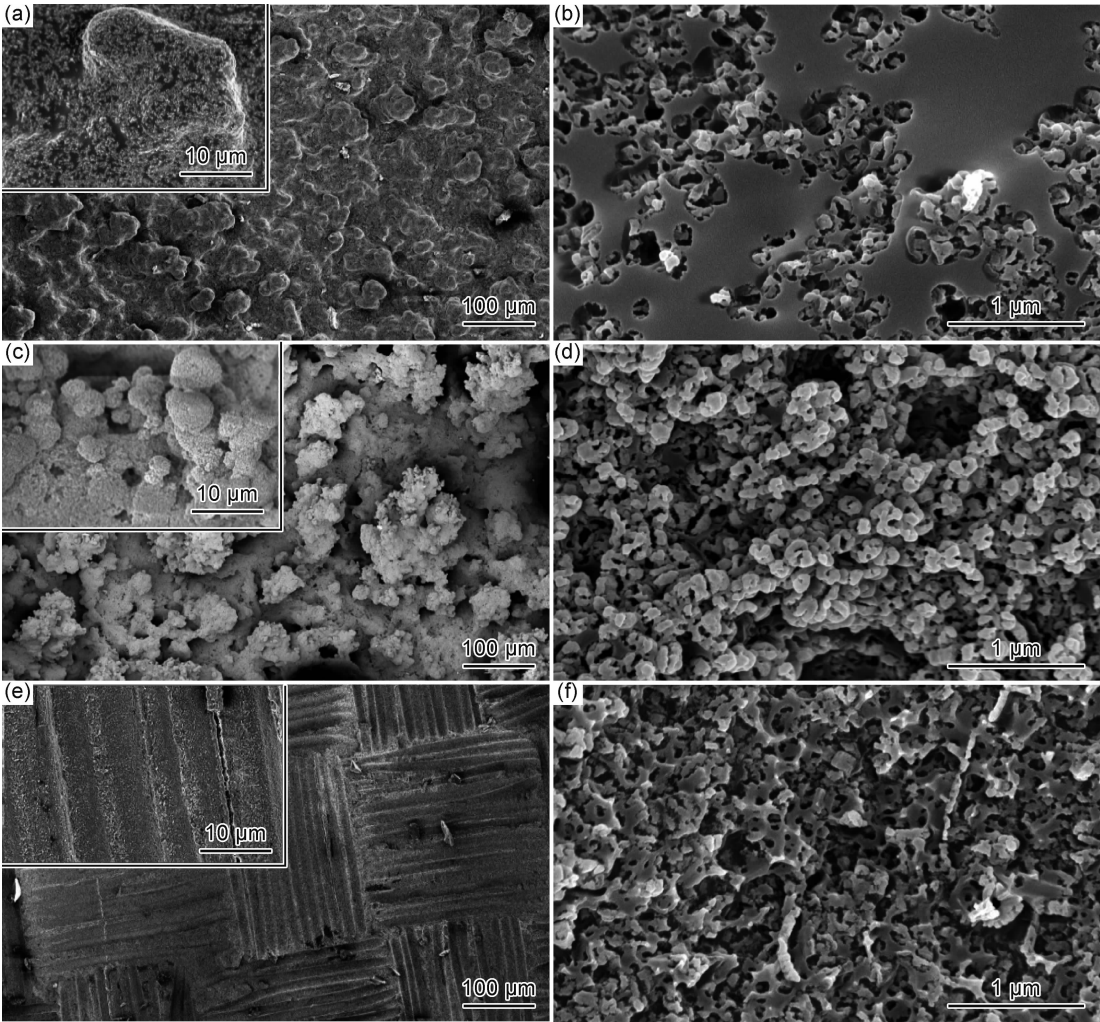


图 5 PTFE/epoxy 复合涂层的微观形貌图
(a),(b)喷涂法制备 PTFE 颗粒含量为 50% 的涂层;(c),(d)喷涂法制备 PTFE 颗粒含量为 75% 的涂层;
(e),(f)模压法制备 PTFE 颗粒含量为 75% 的涂层
Fig. 5 SEM images of PTFE/epoxy composite coatings
(a),(b)spraying coating with 50% PTFE particles;(c),(d)spraying coating with 75% PTFE particles;
(e),(f)molding coating with 75% PTFE particles

面,一方面存在球状突起粗糙结构,突起表面有大量的 PTFE 颗粒,形成微纳二级结构;另一方面 PTFE 有很低的表面能,加之利用氟硅烷修饰进一步降低涂层表面能,因此赋予了涂层良好的疏水性能。随着 PTFE 颗粒含量的增加,涂层表面的突起结构增多,突起结构表面的树脂覆盖面积降低,因此涂层的疏水性能提高。

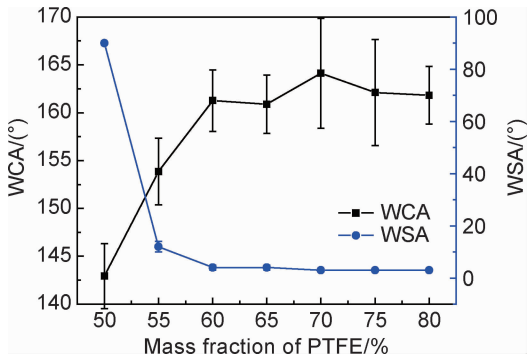


图 6 喷涂法制备 PTFE/epoxy 复合涂层接触角和滚动角
Fig. 6 WCA and WSA of PTFE/epoxy spraying composite coatings

2.3 水冲击测试

取 WCA 大于 150°且 WSA 小于 10°的涂层试样进行水冲击实验。5 cm 高度水滴在涂层表面撞击后水滴形状随时间变化的情况如图 7 所示,从图中可以看出水滴可以完全弹离涂层表面;不同制备工艺形成不同的表面形貌导致水滴在其表面上有不同的回弹行为。

水冲击实验结果如表 1 所示。从冲击结果可以看出,随着 PTFE 颗粒含量的增加涂层的抗水冲击性能提高,其中性能最优的试样是颗粒含量为 75%的涂层,在被速度为 22.77 m/s 的水流冲击后表面还能保持接触角为 154.62°。PTFE 颗粒含量增多,一方面涂

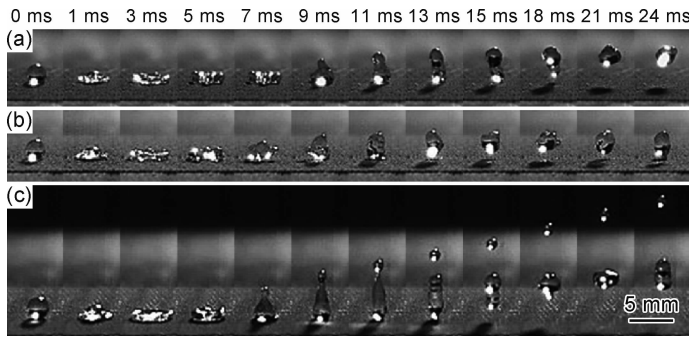


图 7 5 cm 高度水滴撞击涂层表面过程高速照片
(a)PTFE 含量为 60%喷涂法涂层;(b)PTFE 含量为 75%喷涂法涂层;(c)PTFE 含量为 75%模压法涂层
Fig. 7 High speed capture images of water droplets impacting coating surface from 5 cm height
(a)60% PTFE spraying coating;(b)75% PTFE spraying coating;(c)75% PTFE molding coating

表 1 不同 PTFE 含量的 PTFE/epoxy 复合
涂层水冲击实验结果

Table 1 Water jet impacting tests results of PTFE/epoxy composite spraying coatings with different PTFE content

| Water jet speed/ (m · s ⁻¹) | WCA (60%)/ (°) | WCA (65%)/ (°) | WCA (70%)/ (°) | WCA (75%)/ (°) |
|--------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 13.31 | 150.78 | 160.26 | 160.02 | 160.26 |
| 16.28 | 139.67 | 159.98 | 160.38 | 160.98 |
| 19.87 | | 137.86 | 158.55 | 159.29 |
| 22.77 | | | 121.59 | 154.62 |
| 26.42 | | | | 98.47 |

Note: when WCA < 150°, the water jet impacting tests are no longer performed.

层表面的突起结构粒径更小,因此式(2)中 L/A 更大;另一方面颗粒含量增加涂层表面能降低,因此式(2)中 θ_0 更大,所以 P_c 增大,涂层的抗水冲击性能增加。但 PTFE 颗粒含量为 80%的涂层在水冲击实验中出现明显的脱粒现象,说明树脂含量过低不能有效地黏结涂层表面颗粒。

上述水冲击测试结果中 PTFE 颗粒含量为 75%

的涂层性能最佳,因此采用该配方的涂料体系通过模压法制备涂层,与喷涂法制备的涂层进行对比,另外将市售的 NeverWet 超疏水涂层进行水冲击实验与前二者进行对比。测试对比结果如图 8 所示。由图可知,模压法涂层的抗水冲击性能比喷涂法涂层更好,在进行速度为 26.42 m/s 的水冲击实验后,模压法涂层表面还能保持接触角为 149.39°,而此时喷涂法涂层表面接触角已降为 98.47°;而 NeverWet 涂层在 22.77 m/s

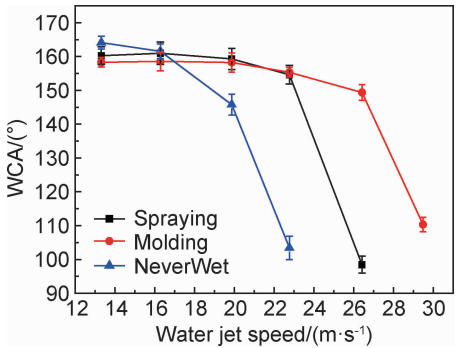


图 8 水冲击实验后涂层的润湿特性变化情况
Fig. 8 Changes of coatings' wetting situation after water jet impacting tests

的水冲击测试后表面接触角仅为 103.45° , 说明该组配方无论采用喷涂法还是模压法制备涂层, 其抗水冲击性能均优于商用超疏水涂层。

2.4 附着性能测试

分别对 PTFE 颗粒含量为 75% 的喷涂法涂层、模压法涂层和 NeverWet 涂层进行胶带黏附剥离实验, 实验结果如图 9 所示。

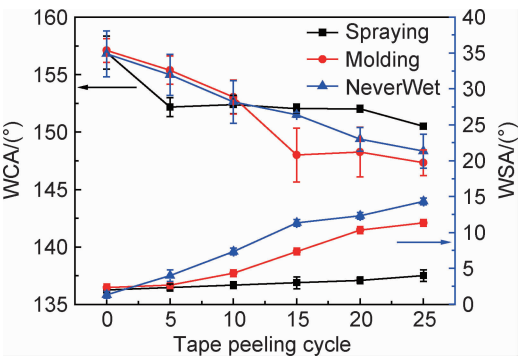


图 9 胶带黏附剥离实验结果
Fig. 9 Tape peeling test results

从上述实验结果可知, 随着胶带黏附剥离次数增加, 涂层表面的接触角降低, 滚动角增大。在进行 25 次黏附剥离实验后喷涂法涂层表面接触角为 150.51° , 滚动角为 4° ; 模压法涂层表面接触角为 147.34° , 滚动角为 12° ; NeverWet 涂层表面接触角为 148.35° , 滚动角为 15° 。可知喷涂法涂层的附着性能

最优, 这是由于喷涂法涂层有一定厚度, 在厚度方向上是由微米级颗粒堆叠而成, 外层的突起颗粒被剥离后暴露出新的突起, 因此在一定的黏附剥离情况下较易保持涂层的良好疏水性能; 而模压法涂层与 NeverWet 涂层表面突起结构与基体结合紧密, 当涂层表面的疏水粒子被剥离则留下亲水的树脂基体, 因此在涂层表面被黏附剥离后容易丧失疏水性能。

2.5 耐磨性能测试

对 PTFE 颗粒含量为 75% 的喷涂法涂层、模压法涂层和 NeverWet 涂层进行磨损实验, 实验结果如图 10 所示。可知随着磨损次数的增加, 涂层表面的接触角降低, 滚动角升高, 其中喷涂法涂层与 NeverWet 涂层表面磨损前后的宏观图片如图 11 所示。在进行 20 次磨损实验后, 喷涂法涂层表面接触角为 149.21° , 滚

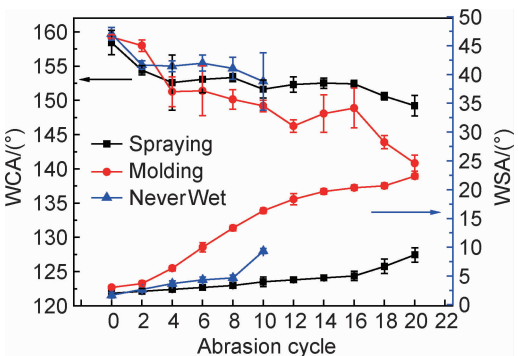


图 10 磨损实验结果
Fig. 10 Abrasion test results

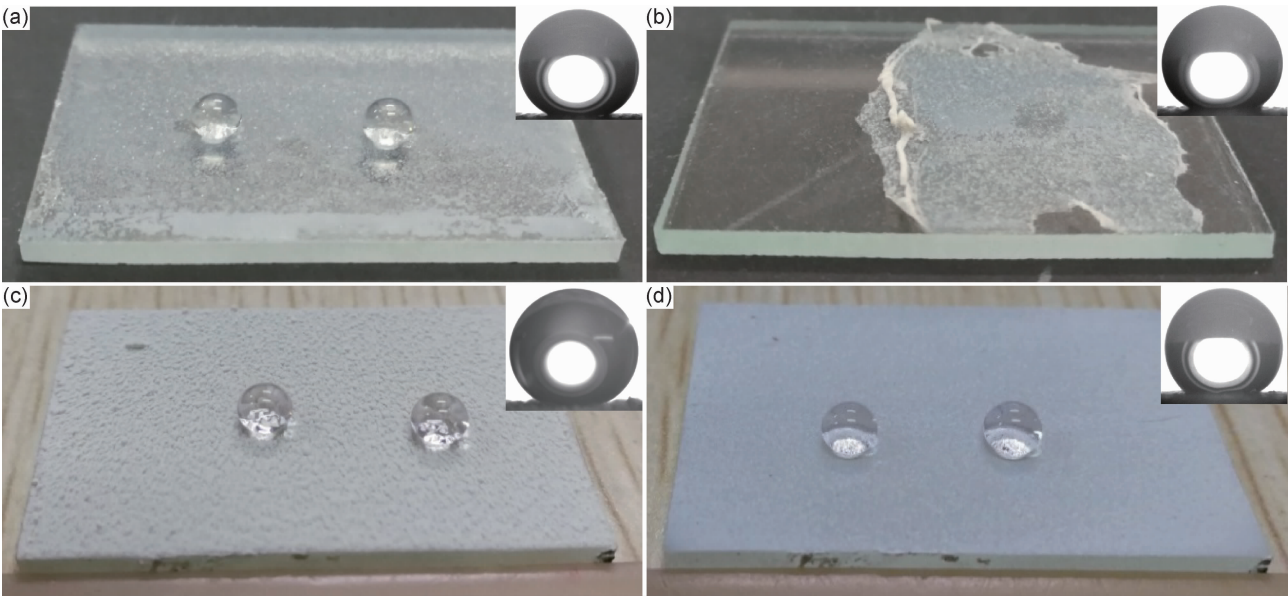


图 11 NeverWet 涂层与喷涂法涂层磨损实验前后表面光学照片

(a)NeverWet 涂层磨损前;(b)NeverWet 涂层 10 次磨损实验后;(c)喷涂法涂层磨损前;(d)喷涂法涂层 20 次磨损实验后
Fig. 11 Optical images of NeverWet coating and spraying coating before and after abrasion test
(a)NeverWet coating before abrasion test;(b)NeverWet coating after 10 cycles abrasion test;
(c)spraying coating before abrasion test;(d)spraying coating after 20 cycles abrasion test

动角为 9° ; 模压法涂层表面接触角为 140.82° , 滚动角为 22° ; 由于 NeverWet 涂层与玻璃基板黏附性较差, 在 10 次磨损实验后即出现大面积脱粘的情况, 如图 11(b) 所示, 因此磨损实验仅为 10 次, 磨损实验后涂层的接触角为 152.76° , 滚动角为 9° 。从磨损实验结果可知喷涂法涂层耐磨性能最优。在磨损实验过程中发现, 喷涂法涂层表面剥离的颗粒尺寸较大, 这是因为喷涂法涂层由多层突起结构堆叠形成, 在磨损过程中单个突起颗粒直接被剥离出, 暴露出新的突起结构来保持涂层的疏水性能; 而模压法涂层和 NeverWet 涂层粗糙结构与涂层基体结合紧密, 表面的粗糙结构在磨损实验中逐渐被磨平整, 因此涂层表面的疏水性能降低较快。

3 结论

(1) 利用喷涂法制备 PTFE/epoxy 复合涂层, 随着 PTFE 颗粒含量的增多, 涂层表面的疏水性能提高, 当颗粒含量达 60% 时涂层表面达到超疏水状态, 疏水性能最优的涂层颗粒含量为 70%, 静态接触角为 164.13° , 滚动角为 3° 。

(2) 与传统超疏水涂层相比, 本研究制备的 PTFE/epoxy 全有机超疏水涂层抗水流冲击性能显著提高。其中, 抗水冲击性能最佳是颗粒含量为 75% 的涂层, 在进行速度为 22.77 m/s 的水冲击实验后表面还能保持接触角为 154.62° ; 利用模压法制备涂层, 能进一步提高涂层的抗水冲击性能。

(3) 喷涂法涂层有较好的附着性能和耐磨性能, 在进行 25 次黏附剥离实验后涂层表面接触角为 150.51° , 滚动角为 4° ; 在进行 20 次磨损实验后涂层表面接触角为 149.21° , 滚动角为 9° 。

参考文献

- [1] CELIA E, DARMANIN T, GIVENCHY E T D, et al. Recent advances in designing superhydrophobic surfaces[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 402(2): 1-18.
- [2] KE Q P, FU W Q, JIN H L, et al. Fabrication of mechanically robust superhydrophobic surfaces based on silica micro-nanoparticles and polydimethylsiloxane[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(21/22): 4910-4914.
- [3] FENG L, LI S H, LI Y S, et al. Super-hydrophobic surfaces: from nature to artificial[J]. *Advanced Materials*, 2004, 14(24): 1857-1860.
- [4] SEYEDMEHDI S A, ZHANG H, ZHU J. Fabrication of superhydrophobic coatings based on nanoparticles and fluoropolyurethane[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 128(6): 4136-4140.
- [5] YANG J, ZHANG Z, MEN X, et al. Reversible superhydrophobicity to superhydrophilicity switching of a carbon nanotube film via alternation of UV irradiation and dark storage[J]. *Langmuir*, 2010, 26(12): 10198-10202.
- [6] 罗晓民, 魏梦媛, 曹敏. 耐腐蚀超疏水铜网的制备及其在油水分离中的应用[J]. *材料工程*, 2018, 46(5): 92-98.
- [7] LUO X M, WEI M Y, CAO M. Preparation of superhydrophobic cu mesh with corrosion resistance and applications in oil-water separation[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(5): 92-98.
- [8] WU B, ZHOU M, LI J, et al. Superhydrophobic surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using a femtosecond laser[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 256(1): 61-66.
- [9] LIAO R, ZUO Z, GUO C, et al. Fabrication of superhydrophobic surface on aluminum by continuous chemical etching and its anti-icing property[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 317: 701-709.
- [10] 李晶, 赵世才, 杜锋等. 激光构筑槽棱与网格状结构超疏水耐腐蚀表面研究[J]. *材料工程*, 2018, 46(5): 86-91.
- [11] LI J, ZHAO S C, DU F, et al. Fabrication of groove and grid structure surface with superhydrophobicity and corrosion resistance by laser[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(5): 86-91.
- [12] CHENG J, ZHANG Y, WANG Q, et al. Superhydrophobic polyurethane and silica nanoparticles coating with high transparency and fluorescence[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 129(5): 2959-2965.
- [13] LATTHE S S, IMAI H, GANESAN V, et al. Superhydrophobic silica films by sol-gel co-precursor method[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 256(1): 217-222.
- [14] VILCNIK A, JERMAN I, ŠURCA VUK A, et al. Structural properties and antibacterial effects of hydrophobic and oleophobic sol-gel coatings for cotton fabrics[J]. *Langmuir*, 2009, 25(10): 5869-5880.
- [15] 刘建峰, 肖新颜. 溶胶-凝胶法超疏水含氟硅聚氨酯丙烯酸酯/SiO₂ 杂化涂层的制备[J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(6): 130-135.
- [16] LIU J F, XIAO X Y. Preparation of superhydrophobic FSiPUA/SiO₂ hybrid coatings via sol-gel method[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2014, 30(6): 130-135.
- [17] PANDA A, VARSHNEY P, MOHAPATRA S S, et al. Development of liquid repellent coating on cotton fabric by simple binary silanization with excellent self-cleaning and oil-water separation properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 181: 1052-1060.
- [18] BAGHERI H, ALIOFKHAZRAEI M, FOROOSHANI H M, et al. Electro deposition of the hierarchical dual structure (HDS) nano crystalline Ni surface with high water repellency and self-cleaning properties[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, 80: 883-893.
- [19] ENGEL O G. Water drop collisions with solid surfaces[J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1955, 54(5): 292-295.

[17] ADAMSON A W, GAST A P. Physical chemistry of surface [M]. 6 th ed. New York:Wiley,1997.

[18] ALTTI TORKKLI. Droplet microfluidics on a planar surface [D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2003.

[19] TAO D, KRIPA K, VARANASI, et al. Nonwetting of impinging droplets on textured surfaces[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94: 133109.

[20] HYUKM K, ADAM T P, KRIPA K V, et al. Rapid deceleration-driven wetting transition during pendant drop deposition on superhydrophobic surfaces[J]. Physical Review Letters, 2011, 106:036102.

[21] TANMOY M, MARISH K T, CARLO A, et al. On the nano

engineering of superhydrophobic and impalement resistant surface textures below the freezing temperature[J]. Nano Letters, 2014, 14: 172-182.

基金项目:国家自然科学基金(51403235)

收稿日期:2018-09-17;修订日期:2020-01-03

通讯作者:彭超义(1977—),男,副教授,博士,研究方向:高分子复合材料,联系地址:湖南省长沙市开福区德雅路 109 号国防科技大学空天科学学院(410073),E-mail:chaoyi. peng@foxmail. com

(本文责编:宗希宽)