

# CF/PEEK复合材料表面构筑微纳米结构及其防冰性能的研究\*

张磊,王斐,潘蕾

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 211100)

**[摘要]** 为提高材料表面防结冰性能,同时满足航空航天轻质高强的要求,通过表面光刻、喷砂、喷砂+阳极氧化等方法在 A5083 铝合金表面构筑微纳米形貌,采用模板法将该形貌复制到碳纤维增强的聚醚醚酮复合材料(CF/PEEK)表面。使用接触角测试仪测量水滴在其表面的静态接触角,运用扫描电镜(SEM)分析表面形貌,利用自制结冰延迟性能测试仪记录表面结冰时间,并借助粘附力测试仪计算冰层的宏观粘附力大小。试验结果表明,与未经表面处理的试样对比,构筑微纳米结构的 CF/PEEK 疏水性能均提高;其中,利用表面喷砂+阳极氧化处理金属模板制备得到的 CF/PEEK 试样的表面疏水性能及防冰性能最好,当砂砾目数为 120 目时,接触角达 150.4°,结冰时间达到 538s(较未处理试样表面延长了 12 倍);最后讨论分析了表面结构与疏水、防结冰性能之间的关系。

**关键词:** 复合材料;模板法;微纳米结构;接触角;结冰时间;粘附力

## Fabricating Micro-Nano Structure on Surface of CF/PEEK Composite and Study on Its Anti-Icing Property

ZHANG Lei, WANG Fei, PAN Lei

(College of Material Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

**[ABSTRACT]** We have utilized the template method in our research to fabricate micro-nano structure on the surface of carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone (CF/PEEK) for the sake of improving the anti-icing property which is meanwhile in accordance with the request of lightweight and high strength in aeronautics and astronautics area. Contact angle tester and scanning electron microscopy (SEM) are then used to measure the contact angle (CA) of water on the composite surface and analyze its topography, respectively. We can record the time for icing by the icing-delay time tester. The adhesion tester is also used to obtain the adhesive strength. Compared with the sample of no treatment, fabricating micro-nano structure could improve the hydrophobicity of CF/PEEK, and the sample replicating the topography of sand blasting & anodic oxidized metal template has the most manifest impact with the CA achieving 150.4°, prolonging the time for icing to 538s (12 times of the figure of no-treatment sample) when the mesh is 120. Finally, the relationship between the surface structure and hydrophobicity & the anti-icing property has been discussed.

**Keywords:** Composite; Template method; Micro-nano structure; Contact angle; Icing time; Adhesive strength

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.17.095

超疏水(Super-hydrophobic)结构因其特有的界面性质,使材料在延缓结冰、防雾、防腐蚀、水下防阻等方面发挥显著作用,尤其在国防航空等长期处于气候多变条件下服役的设施中表现出了优异的性能。飞机在高空飞行过程中,过冷液滴附着、结晶进而形成冰层,当冰

层大面积积聚时,会对飞机的飞行造成严重危害。传统除冰/防冰基于主动除冰技术,如电热融冰或机械除冰,但在除冰的同时需在飞机上装配除冰装置,增加了飞机的重量且降低了燃油的经济性。从结冰的源头抑制冰层的形成,以及即使结冰也能通过高速飞行时的气流冲击使冰层自然脱落,即被动防冰技术。利用材料的本征属性设计并构筑微纳米结构使其具有超疏水、防结冰的能

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51503099); 国家重点研发计划(2017NFB0703301); 2017年江苏省政策引导类计划(BZ2017063)。

力,是目前国内外被动防结冰研究的热点之一<sup>[1-4]</sup>。研究表明,超疏水表面的非润湿特性主要取决于材料的表面能和微观粗糙结构,且调控材料表面微结构的形貌和尺寸,可显著改善固体表面的疏水性能,同时降低液滴粘滞阻力,进而使材料表面具有一定的宏观防冰性能。应运而生的工艺有模板法、物理刻蚀法、化学合成法,以及通过在材料表面喷涂可降低表面能的物质等。其中,模板法是通过一定工艺流程将模塑物质与模板表面结合,加热加压一定时间后拆除或溶解模板,从而得到与模板表面形貌互补的粗糙结构。模塑物质一般为聚合物。谢永元等<sup>[5]</sup>以不同型号砂纸为模板、聚二甲基硅氧烷(PDMS)为模塑物质,通过浇注、热压成型等工艺获得与荷叶疏水性能相当的表面(接触角可以达到155°)。Feng等<sup>[6-7]</sup>均将多孔氧化铝作为模板、聚丙烯腈(PAN)为模塑物质,通过热压固化获得了接触角达173°的纤维纳米材料。Koch等<sup>[8]</sup>以环氧树脂为模塑物质,通过两步模板法复制荷叶表面的微观形貌,并使用半径为15μm的硼硅探头的原子力显微镜测试试样表面的粘附力。作者对比了表面形貌为微米尺度、微米多尺度结构的试样表面的粘附力,试验结果显示,表面形貌为微米尺度的试样的粘附力更小,并将影响粘附力大小的因素归结为探头与试样表面的实际接触面积。微米尺度多尺度结构的构筑减小了探针与试样表面实际接触面积,因而粘附力减小。Yuan等<sup>[9]</sup>以聚丙烯(PP)为模塑物质,同样通过两步模板法制备超疏水表面,并对比了表面未构筑微观形貌的PP试样和具有超疏水表面的PP试样的自清洁能力,结果显示具有超疏水表面的PP试样的自清洁能力更加突出,作者认为这与实际接触面的大小有关。本文采用模板法在热塑性树脂基复合材料表面构筑微纳米结构,可以实现大面积、高强度、耐久性好的表面微纳米形貌的制备。所用复合材料为碳纤维增强的聚醚醚酮(CF/PEEK),高温下固化,有较高的强度和尺寸稳定性。材料本身不具备疏水特性,因此可以更加直观地反映微纳结构的构筑对疏水性能及防结冰性能的改善。

## 1 试验及方法

### 1.1 试验材料及仪器

碳纤维增强的聚醚醚酮(CF/PEEK)预浸料(AS4荷兰Tencate),其密度为1.4g/cm<sup>3</sup>,拉伸强度为165MPa,弯曲强度为260MPa,热变形温度为300℃。金属材料为无锡五创金属材料有限公司生产的A5083铝合金,材料状态为退火态(O态);硫化热压机;南京航空航天大学参与研制的JC2000D7M型接触角测量仪;HITACHI S-4800型扫描电镜。

### 1.2 金属模板的制备

#### 1.2.1 表面光刻处理

光刻处理的基材是A5083铝合金,尺寸为120mm×100mm。表面依次构筑直径为200μm、300μm、400μm、500μm的微坑。光刻处理后使用剪板机将样板裁剪成尺寸为120mm×25mm的长条试样,光刻试验设备如表1所示。

#### 1.2.2 表面喷砂处理

采用压缩空气将砂粒高速喷射到A5083铝合金上,构筑砂砾目数分别为80目、100目、120目、150目的模板各两组。喷砂试验设备如表2所示。

#### 1.2.3 表面磷酸-硫酸阳极氧化处理

磷酸-硫酸阳极氧化处理所用试验试剂见表3,试验设备见表4。阳极氧化试验流程如图1所示。阳极氧化所用金属板为表面喷砂处理之后的A5083铝合金,可达到在粗糙表面构筑二次微结构的目的。

### 1.3 CF/PEEK预浸料的处理

将CF/PEEK按纤维取向裁剪为120mm×25mm大

表1 光刻试验设备

Table 1 Lithography test equipment

| 设备名称 | 型号         | 生产厂家         |
|------|------------|--------------|
| 匀胶机  | KW-4A      | 上海鑫有电子科技有限公司 |
| 光刻机  | URE2000/35 | 苏州炬烽仪器设备有限公司 |
| 电热板  | MiNi 微型    | 北京莱伯仪器股份有限公司 |

表2 喷砂试验设备

Table 2 Sandblasting test equipment

| 设备名称   | 型号       | 生产厂家       |
|--------|----------|------------|
| 多用喷砂机  | JG5832   | 天津精工医疗设备公司 |
| 超声波发生器 | KH3200DE | 昆山禾创超声仪器公司 |

表3 试验用化学试剂

Table 3 Chemical reagents for testing

| 试剂   | 规格  | 作用         |
|------|-----|------------|
| 丙酮   | 分析纯 | 除油         |
| 碳酸钠  | 分析纯 | 化学清洗       |
| 磷酸钠  | 分析纯 | 化学清洗       |
| 氢氧化钠 | 分析纯 | 化学清洗、碱蚀    |
| 硫酸   | 分析纯 | 酸洗出光、电解液成分 |
| 草酸   | 分析纯 | 电解液成分      |
| 磷酸   | 分析纯 | 电解液成分      |
| 丙三醇  | 分析纯 | 电解液成分      |

小的预浸料,与制备好的金属模板一并用丙酮超声波清洗 2min,之后用蒸馏水冲洗。放入 BP-2B 型平板烘箱,调节温度至 50℃干燥 2h。为保证热压结束后脱模顺利,首先在金属板表面喷涂 BEAUTREE MS-606 聚氨酯脱模剂,然后紧靠模板一端依次叠放 4 层预处理之后的预浸料,裁剪 20mm×25mm 大小的锡纸,放在另一端(起开模作用)。上下层模板整齐合拢,最后用锡纸包裹以防树脂溢出。热压过程如图 2 所示。将热压后具有 A5083 模板表面形貌的复合材料试样依次标记,如表 5 所示。光刻组中,数字分别为模板表面微坑直径(μm);喷砂组中,数字分别为砂砾目数(目);喷砂+阳极氧化工艺中,数字分别为喷砂处理后模板表面的微坑目数(目);字母 P、S、S+A 分别是制备 A5083 模板表面形貌工艺的英文首字母。

表4 阳极氧化试验设备  
Table 4 Anodic oxidation test equipment

| 设备名称   | 型号          | 生产厂家     |
|--------|-------------|----------|
| 电子分析天平 | FA2004B     | 上海平轩科学仪器 |
| 超声波发生器 | KH3200DE    | 昆山禾创超声仪器 |
| 直流稳压电源 | WYJ-0-6V/3A | 上海全力电器   |
| 恒温水浴锅  | DF-101S     | 巩义予华仪器   |
| 恒温干燥箱  | DZF-6021    | 上海精密实验设备 |

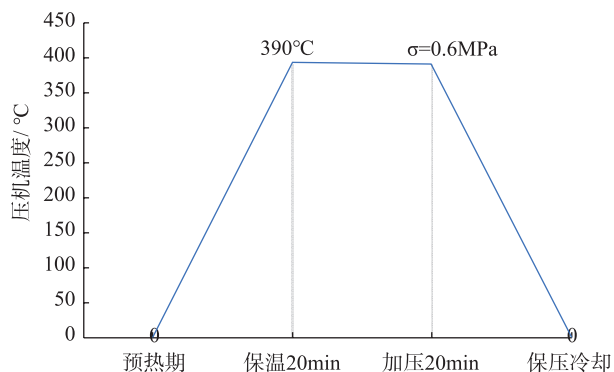


图2 热压过程  
Fig.2 Process of hot-press treatment

#### 1.4 测试与表征

使用 JC2000D7M 接触角测试仪测量水滴在不同表面形貌的试样上接触角的大小,接触角测试仪工作原理图与图 3 相近,所不同的是载物台没有连接循环降温箱,测试在恒温干燥箱中进行。为避免液滴体积对试验结果的影响,试验时严格控制液滴体积均为 4μL,且每组试样测量 4 次取其平均值。采用扫描电镜 SEM 观察试样表面微观结构,将试样裁剪为适当大小的尺寸,表面镀金之后于每个样品表面取 3 个点,放大至不同倍率进行观察。使用自制结冰延迟性能测试仪记录结冰时间随表面形貌的变化趋势,为严格模拟真实结冰条件,试验开始前,需将试样置于干燥箱同时降温至 -20℃,测试原理图如图 3 所示<sup>[10]</sup>。使用粘附力测试仪测试并计算其宏观粘附力大小,装置如图 4 所示。为方便测试,剪切力测试装置布置在室内环境,将试样置于循环降温载物台上。循环降温载物台通过进液管和出液管与液体降温箱连接,箱体内装有导热液体酒精,其温度可以数字显示,工作时先使酒精降温至预设温度 -20℃,然后打开循环装置,通过进液管与出液管使温度为 -20℃

表5 热压后CF/PEEK试样编号  
Table 5 CF/PEEK specimen number after hot pressing

| 金属模板表面处理工艺 | 复合材料试样编号 |        |        |        |
|------------|----------|--------|--------|--------|
| 光刻         | 200P     | 300P   | 400P   | 500P   |
| 喷砂         | 80S      | 100S   | 120S   | 150S   |
| 喷砂+阳极氧化    | 80S+A    | 100S+A | 120S+A | 150S+A |

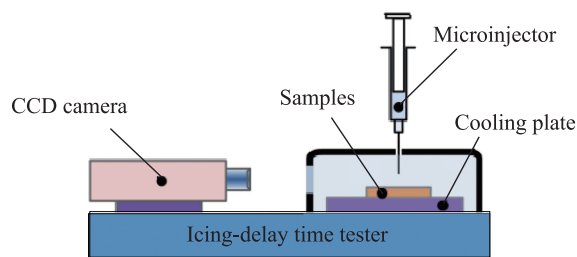


图3 结冰延迟性能测试仪示意图  
Fig.3 Diagram of icing-delay time tester

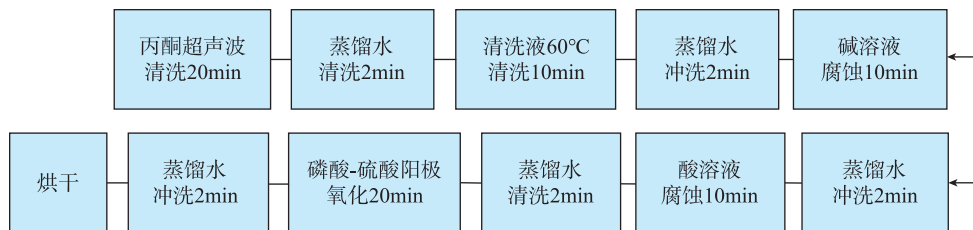


图1 阳极氧化流程  
Fig.1 Anodic oxidation process

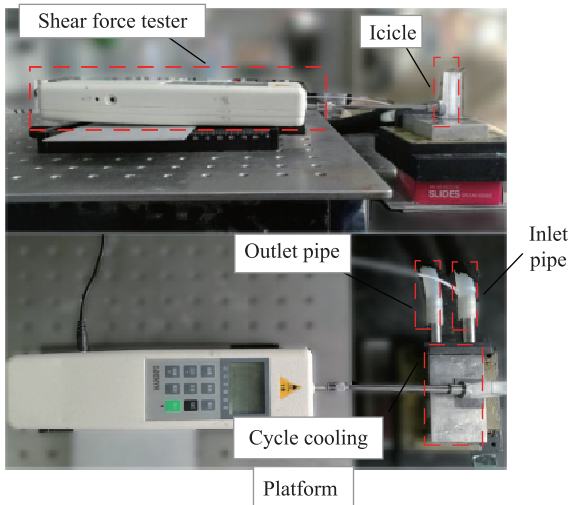


图4 粘附力测试仪工作图  
Fig.4 Pictures of adhesion tester

的酒精流过载物台,以消除环境温度对冰柱的影响。冰层粘附力可以用剪切强度  $\tau$  来表征,  $F$  为测试仪施加外力的示数,  $A$  为冰柱与试样接触的面积,本试验中  $A=100\text{mm}^2$ 。推动过程为手动,速率恒定,约为  $1\text{mm/s}$ ,施加于冰柱上的力通过剪切力测试仪的示数读出,每种形貌的 CF/PEEK 试样表面进行 3 组冰层粘附力测试,粘附力大小为 3 组的平均值,单位: kPa。

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 静态接触角 (CA) 测试与SEM扫描结果分析

图 5 为水滴在 CF/PEEK 上接触角随表面形貌的变化及其综合对比。由图可知,光刻组中,水滴在试样 300P 的接触角最大,其平均值为  $120.65^\circ$ ; 喷砂组及喷砂 + 阳极氧化组中,试样 120S/120S+A 的疏水性能改善最

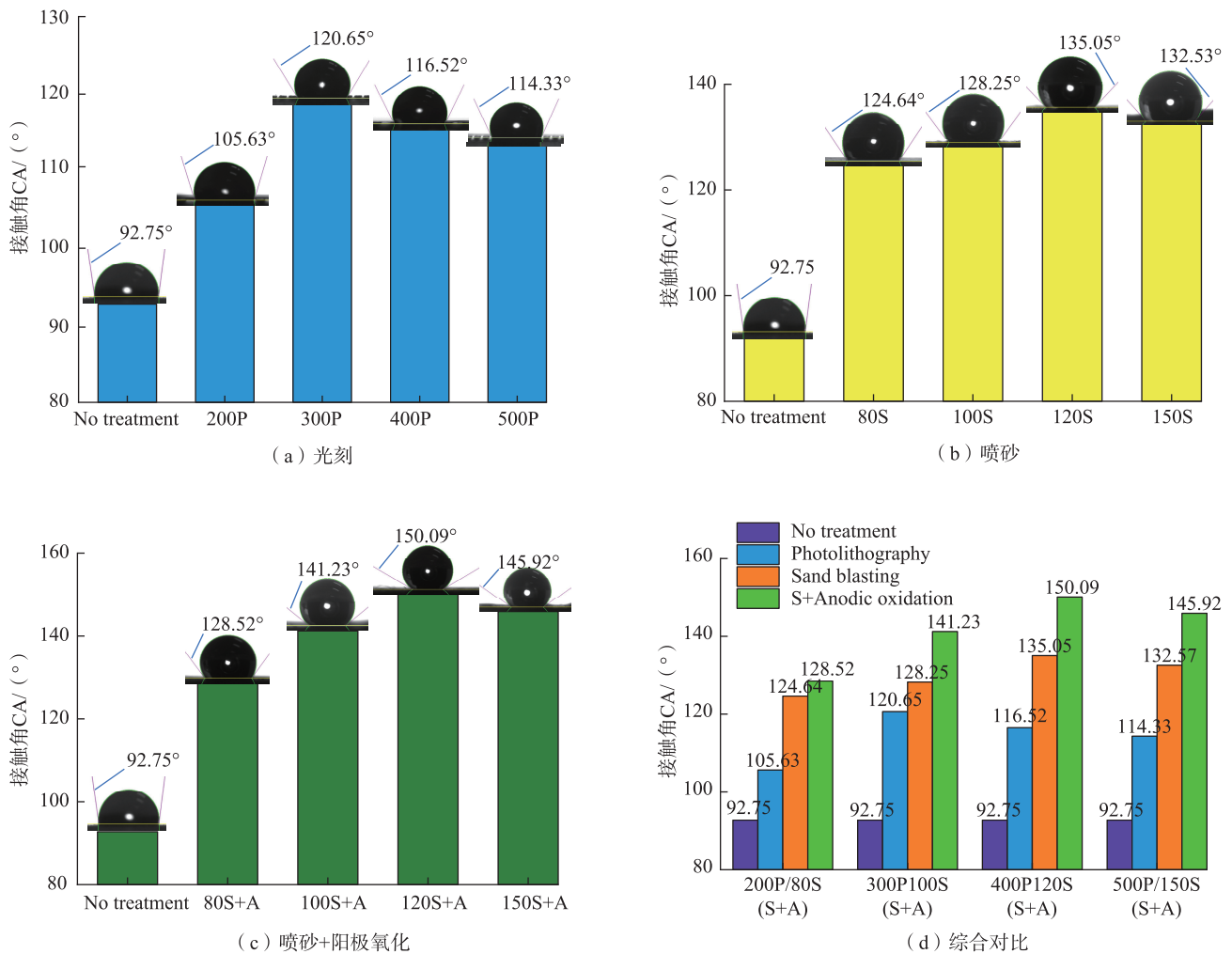
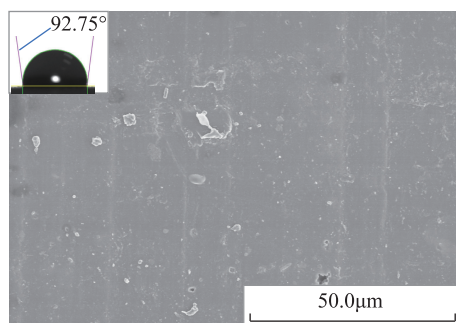


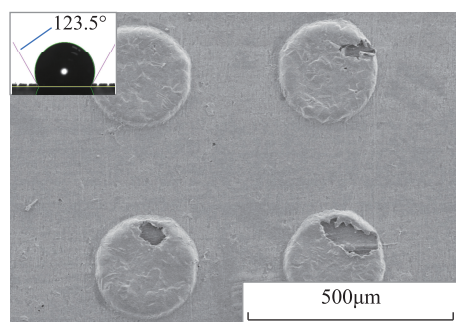
图5 水滴在CF/PEEK上接触角随表面形貌的变化及其综合对比  
Fig.5 Changes of CA of water on CF/PEEK surface and integral comparison

显著,接触角分别达到 135.05°,150.09°,这说明 CF/PEEK 试样经模板法构筑微纳结构后,疏水性能均得到改善。

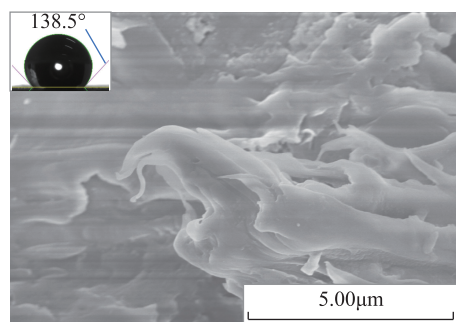
图 6 为各组疏水性能最佳的及未经表面处理的试样的扫描电镜图片。模板法热压后,金属模板的表面形貌



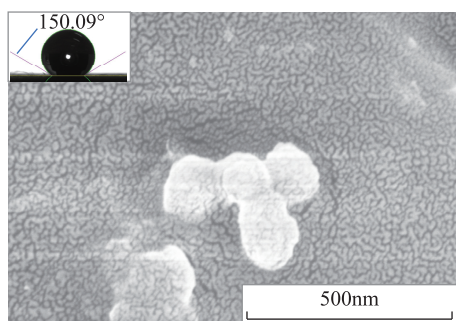
(a) No treatment



(b) 300P



(c) 120S



(d) 120S+A

图6 CF/PEEK4种表面形貌的扫描电镜图

Fig.6 SEM of CF/PEEK with four surface topographies

较完整地复制到复材表面,图 6 (a)为未经表面处理试样的微观形貌,平整光滑;图 6 (b)为试样 300P,分布规则排布的微坑;图 6 (c)为试样 120S,具有杂乱致密的毛刺结构;图 6 (d)为试样 120S+A,具有纳米级的突起。

由 Cassie-Baxter 方程<sup>[9]</sup>

$$\cos\theta^* = f_1 \cos\theta_1 + f_2 - 1 \quad (2)$$

将其变形可得:

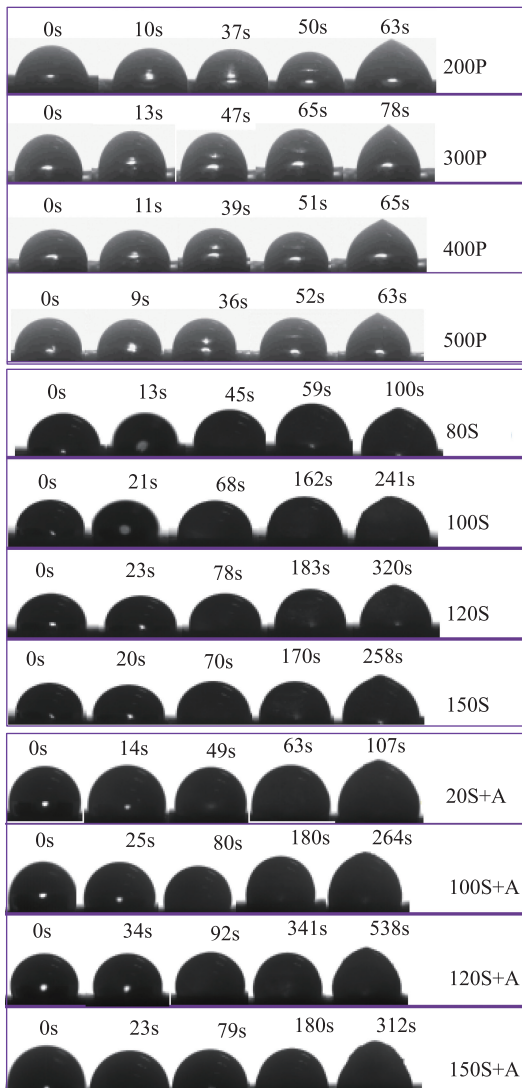
$$f_1 = \frac{\cos\theta^* + 1}{\cos\theta_1 + 1}$$

式中,  $f_1$  为固-液接触面积分数,  $\theta^*$  为水滴在试样表面的表观接触角(试验测得),  $\theta_1$  为水滴在相同材料的理想光滑表面的本征接触角。对于同一种材料,其本征接触角均相同,当经过表面处理呈现疏水状态时( $\theta^* > 90^\circ$ ),表观接触角的余弦值  $\cos\theta^*$  越大,固-液接触面积分数  $f_1$  就越小,相应的固-气接触面积分数( $1-f_1$ )就越大。试样 300P 表面的微坑增大了固-气接触面积分数,水滴收缩趋势增大,从而提高了表观接触角。与光刻类似,喷砂、喷砂+阳极氧化组中,试样的表面形成了更加细小的微纳结构,进一步增大固-气接触面积分数,从而使疏水性能大大提高。此外,树脂固化过程中表面还可能大量出现被拉长的微米或纳米级的毛刺结构,使水滴浸润模型更加符合 Cassie-Baxter 模型,试样疏水性能提升。与单独的喷砂处理相比,喷砂+阳极氧化处理使 A5083 模板表面产生更加细小的纳米凹坑,实现层级微纳结构,试样 120S+A 成功复制了该结构,在扫描电镜下可以观察到微米级的毛刺结构上出现纳米级的突起,而这种结构更易实现超疏水。同一种工艺中,接触角并没有随微纳结构尺度的变化呈现单调变化趋势,而是出现极值,反映出每种工艺对疏水性能的改善都存在最适结构尺度。低于这一结构尺度,固-气接触面积分数起主导因素,且随微纳结构尺度的增加而增大,导致接触角增大;而高于最适结构尺度时,界面处由于复杂形貌的构筑反而使其内聚力增加,固体表面张力增大,使水滴铺展的趋势增大,接触角反而减小。

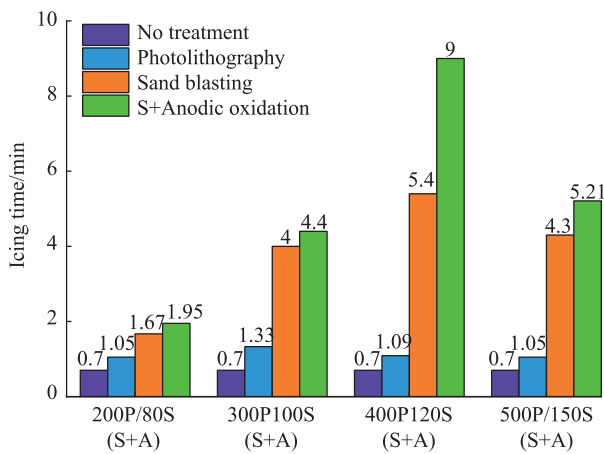
## 2.2 结冰时间及其微观机制的分析

图 7 为在  $-20^\circ\text{C}$  的时试样表面的结冰时间。光刻组中,试样 300P 的结冰时间最长,为 78s。喷砂组及喷砂+阳极氧化组中,试样 120S (S+A) 的结冰延迟最显著,结冰时间分别达 320s、538s,且各组试样中,最佳结冰延迟效果均对应最佳疏水性能。未经表面处理的试样,能够迅速结冰(仅用 42s)。

进一步分析可知,光刻组中,虽然试样的疏水性能提高,但是防结冰效果并不突出,因为低温环境使液滴润湿模型由 Cassie-Baxter 模型过渡到 Wenzel 模型。



(a) 具体结冰时间



(b) 综合对比

图7 水滴在不同表面形貌试样上的结冰时间

Fig.7 Time for water to freeze on specimens' surface of different topographies

在这种状态下,液滴并非完全悬于微坑上,而是存在向微坑凹陷的现象,这使得固-气接触面积分数增大的同时,固-液接触的实际面积也增大,热导率提高,液滴结冰所需过冷条件更易形成,因此结冰延缓效果较差;喷砂组中,试样疏水性能进一步提高的同时,为液滴结冰提供的有效附着面积大大减小,推迟了液滴形核的第一阶段<sup>[11]</sup>,因此结冰时间延长。而喷砂+阳极氧化组中,试样表面的疏水性能达到最佳,此时除影响结冰的过冷条件及形核面积之外,能量成为主导因素。由以下公式<sup>[12]</sup>

$$\Delta G_c = \frac{4}{3} \pi r_c^2 \sigma_{lv} f_{(\theta)}$$

$$f_{(\theta)} = \frac{(2 + \cos \theta^*)(1 - \cos \theta^*)^2}{4} \quad (3)$$

式中,  $\Delta G_c$  是形核所需克服的吉布斯自由能垒;  $\cos \theta^*$  是表观接触角;  $r_c$  是临界形核半径;  $\sigma_{lv}$  是液体表面张力。当界面达到超疏水状态 ( $\theta > 150^\circ$ ) 时,  $f_{(\theta)}$  较高,形核所需克服的能垒比普通界面状态高出许多,使液滴结冰时间大大延长。同时,纳米尺度的微结构进一步增大气-液接触面积,而气体作为热的不良导体,使热量的散失受到了阻碍,故而延缓了结冰过程,所以试样 120S+A 的结冰延迟时间最长,达到 538s。

### 2.3 粘附力大小与表面形貌的关系

进一步分析可知,超疏水结构虽然可以延缓结冰时间,但是较大的过冷度仍然不能完全阻止冰层在固体表面的聚集。因此,测试分析微纳分级结构超疏水防冰表面的冰层粘附性能和掌握冰层粘附的界面作用机制,对推进超疏水防覆冰表面的应用研究具有更为重要的实践意义与理论基础。

试验结果如图 8 所示。未经表面处理的粘附力为

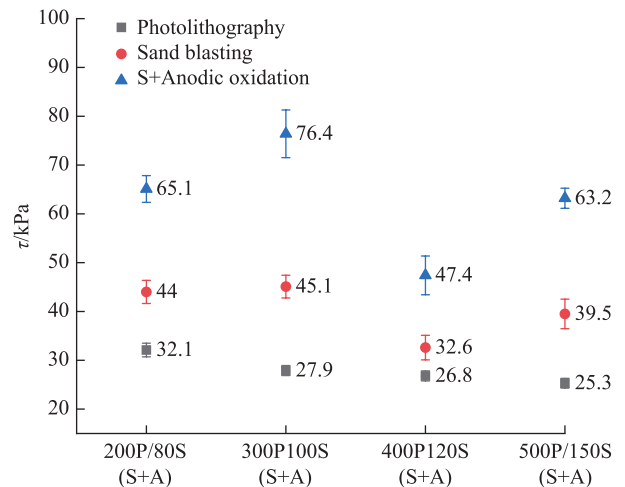


图8 粘附力测试结果线图

Fig. 8 Line graph of adhesive test

150kPa,图中未列出。光刻组的粘附力下降最明显,试样500P的粘附力仅为25.3kPa,误差在 $\pm 1$ kPa;喷砂+阳极氧化、喷砂组粘附力下降幅度依次减小,试样120S+A/120S的粘附力与同组试样相比最小,分别为32.6kPa、47.4kPa。

物体与物体的接触形式分为3类:点接触、线接触、面接触,且在相同的投影面积下,实际接触面积依次增大。Koch等<sup>[8]</sup>认为材料表面的粘附能力受实际接触面积大小的影响,而Yuan等<sup>[9]</sup>同样认为实际接触面积影响材料的自清洁能力。所以本文将接触方式这一概念引入,用来刻画冰层与试样之间的实际接触面积,从而解释冰层附着力降低的现象。从试验结果可以看出,光刻法虽然对疏水性能的改善效果不佳,但是对减弱冰层粘附力却效果显著。微坑的构筑,使水滴在试样表面由普通面接触变为点接触或线接触,导致冰层有效附着点减少;同时,间隙中的空气在液滴结冰过程中被有效的保留下来,形成了复合界面,因而冰层在较小的外力作用下,即可脱离试样表面。喷砂、喷砂+阳极氧化组试样表面的结构尺度虽然远远小于光刻组试样的结构尺度,但是粘附力数值却均大于光刻组。本文推测,可能由于微纳结构过于密集,使水滴在表面的实际附着形式趋于面接触,所以冰层附着强度增大。但是喷砂、喷砂+阳极氧化两组试样较好地体现了疏水性能与粘附力的正相关性,即疏水性能越好,推动冰柱所需的力越低,因为冰层附着形式相近,而表面毛细孔尺寸的改变,密闭毛细孔由微米尺度过度为纳米尺度,气体相体积变大,负压增强,从而减弱了固液两相的结合,导致结冰后处于弱联系状态。

### 3 结论

(1)复合材料表面构筑微纳米结构可以改善其疏水性能,且喷砂+阳极氧化构筑的微纳结构的改善效果最为明显,试样120S+A的接触角达到 $150.09^\circ$ 。

(2)水滴在试样表面的接触角越大,液滴形核所需克服的能量势垒也就越大,最终导致结冰时间大大延长。试样120S+A的结冰延迟时间达到538s,是未经表面处理试样结冰延迟时间的12倍。

(3)相同温度、相同介质条件下,冰层与试样表面为面接触形式的粘附力最强,线接触次之,点接触最弱,本文推测光刻组中的冰柱为点接触,所以粘附力最小,试样500P的粘附力仅为25.3kPa。

### 参考文献

[1] 阎映弟,罗能镇,相咸高. 防覆冰涂层构建机理及制备[J]. 化学进展, 2014, 26(1): 214.

YAN Yingdi, LUO Nengzhen, XIANG Xian'gao. Fabricating

mechanism and preparation of anti-icing & icephobic coating[J]. Progress in Chemistry, 2014, 26(1): 214.

[2] 陈小娇,武卫东,汪德龙. 超疏水表面抑制结霜研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 87-92.

CHEN Xiaojiao, WU Weidong, WANG Delong. Research progress in anti-frosting performance of super-hydrophobic surfaces[J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 87-92.

[3] 房振乾,陈群志,董兵,等. 飞机结构表面涂层体系改进研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 102-107.

FANG Zhenqian, CHEN Qunzhi, DONG Bing, et al. Improvement of aircraft structure surface coating system[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 102-107.

[4] 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 Bin, WU Xuezhong, XIAO Dingbang. The bionic superhydrophobic surface technology and its military application[J]. National Defense Science & Technology, 2015, 36(5): 42-45.

[5] 谢永元,周永亮,余小春,等. 以砂纸为模板制作聚合物超疏水表面[J]. 高等化学学报, 2007, 28(8): 1577-1580.

XIE Yongyuan, ZHOU Yongliang, YU Xiaochun, et al. Replication of superhydrophobic surfaces of polymer from abrasive papers[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2007, 28(8): 1577-1580.

[6] FENG L, LI S, LI H, et al. Super-hydrophobic surface of aligned polyacrylonitrile nanofibers[J]. Angewandte Chemie, 2002, 4(1): 1221-1223.

[7] FENG L, JIANG L. Preparation and investigation of super-hydrophobic nanoscale interfacial materials[J]. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005, 22(1): 106-109.

[8] KOCH K, BHUSHAN B, JUNG Y C, et al. Fabrication of artificial Lotus leaves and significance of hierarchical structure for superhydrophobicity and low adhesion[J]. Soft Matter, 2009, 5(7): 1386.

[9] YUAN Z Q, WU J L, HAO X H, et al. Preparation and characterization of superhydrophobic polypropylene surface with excellent self-cleaning property[J]. Advanced Materials Research, 2011, 295-297: 1613-1616.

[10] 沈一洲. Ti6Al4V超疏水表面的构建及其防/除冰机理研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.

SHEN Yizhou. Preparation and anti/de-icing mechanism of the superhydrophobic surface on Ti6Al4V[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[11] BORMASHENKO E, POGREB R, WHYMAN G, et al. Wetting transitions on post-built and porous reliefs[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012, 26(8-9): 1169-1180.

[12] DE GENNES P G. Wetting: statics and dynamics[J]. Review of Modern Physics, 1985, 57(3): 827-863.

通讯作者:潘蕾,副教授,研究方向为高分子基复合材料表面处理及防冰性能、金属材料表面处理及功能化涂层、金属/高分子基复合材料界面理化性能及力学行为、超混杂纤维金属层板制备及成形、高聚物的纳米粒子改性, E-mail: bettypan@nuaa.edu.cn.

(责编 铃兰)