

超疏水表面的过冷水滴捕获规律研究



王文帅,陈增贵,燕则翔,吕湘连,何洋

西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710072

摘要:飞机在飞行过程中经常面临结冰危险,具有迫切的防冰需求,高效节能的超疏水电热复合防冰蒙皮具有广阔的应用前景,但目前设计流程中尚未考虑超疏水表面过冷水滴收集特性。为充分发挥超疏水表面对飞机防冰系统的作用,本文设计了一套液滴直径与流量可精准控制的喷雾装置,确定了过冷水滴捕获率试验的方案,并结合传热及表面特性相关理论总结了不同试验条件下表面捕获率变化规律。试验结果表明,在一定环境条件中,超疏水表面与聚酰亚胺(PI)表面的过冷水滴捕获率相对值保持稳定,约为25%。结合热传递及受力分析,超疏水表面能够有效减少水滴在表面的停留总量及停留时间,从而降低过冷水滴捕获率。本文为新一代超疏水电热复合蒙皮的防冰功率精确设计与能耗优化提供了依据,对保证恶劣环境下无人机正常工作具有重要意义。

关键词:超疏水表面; 过冷水滴捕获率; 飞机防冰; 温度; 倾斜角度; 喷雾时间

中图分类号:V259

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.12.003

云层中温度在冰点以下,仍保持液态的水滴称过冷水滴。飞机穿过过冷水滴云层时,液滴与飞机表面发生碰撞,进而发生结冰^[1]。飞机表面结冰,使得气动结构发生变化,从而影响飞机整体的操纵稳定性,干扰内部的仪表设备。若表面覆冰脱落,还有可能会破坏发动机的结构,引起更严重的飞行问题,甚至导致飞机坠毁^[2-3]。基于超疏水表面特性的防冰技术是一种新型的飞机防冰方案,针对超疏水表面防冰机理的研究可以促进防冰系统功耗的精准设计,拓宽技术应用面。

实际飞行条件下,单一的超疏水涂层无法实现有效防冰。目前,采用主动与被动相结合的防/除冰技术是满足飞机防冰需求的最佳方案。杨军等^[4]从润湿性模型及微观层面出发,证明了超疏水表面通过减少液滴与表面的接触面积来降低冰黏附强度,可降低约34%的电加热防冰能耗。A. Dolatabadi等^[5]通过冰风洞试验发现复合防/除冰方法能够减少75%的除冰时间。Morita等^[6]提出了一种防冰涂层和电加热相结合的混合防冰系统,在试验条件下可有效降低30%~70%的能耗。孙永阳等^[7]制备了具有超疏水性质的仿生纳米

复合膜,配合电热除冰系统,在测试条件下能够保持表面不结冰。何洋等^[8]开展了一系列复合式防/除冰技术的研究,包括具有仿生功能表面的制备、超疏水表面防冰机理的研究^[9],以及超疏水电热复合蒙皮的冰风洞防冰试验等^[10-11]。

现有防/除冰系统设计仅从机理上分析了超疏水表面节省功率的可能性,并未探究得出超疏水表面过冷水滴收集特性的量化参数。本文通过设计试验测量超疏水表面的过冷水滴捕获率,对捕获规律开展了机理研究,并结合传热及表面特性理论对不同试验条件下表面过冷水滴捕获率的差异进行了分析。

1 过冷水滴捕获率喷雾系统设计

在过冷水滴捕获率试验中,喷雾系统的作用是产生具有一定初速度的均匀过冷水滴,模拟结冰条件下云雾场环境。喷雾系统由喷嘴、液路和气路组成,通过调节液压和气压控制液滴大小和速度。

1.1 喷雾系统总体结构设计

喷雾系统总体结构设计如图1所示,主要包括气路系

收稿日期: 2023-06-16; 退修日期: 2023-09-27; 录用日期: 2023-11-01

基金项目: 翼型叶栅空气动力学重点实验室稳定支持经费项目(61422010102, 6142201200403)

引用格式: Wang Wenshuai, Chen Zenggui, Yan Zexiang, et al. Study of supercooled water droplet capture patterns on superhydrophobic surfaces[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(12): 20-29. 王文帅, 陈增贵, 燕则翔, 等. 超疏水表面的过冷水滴捕获规律研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 20-29.

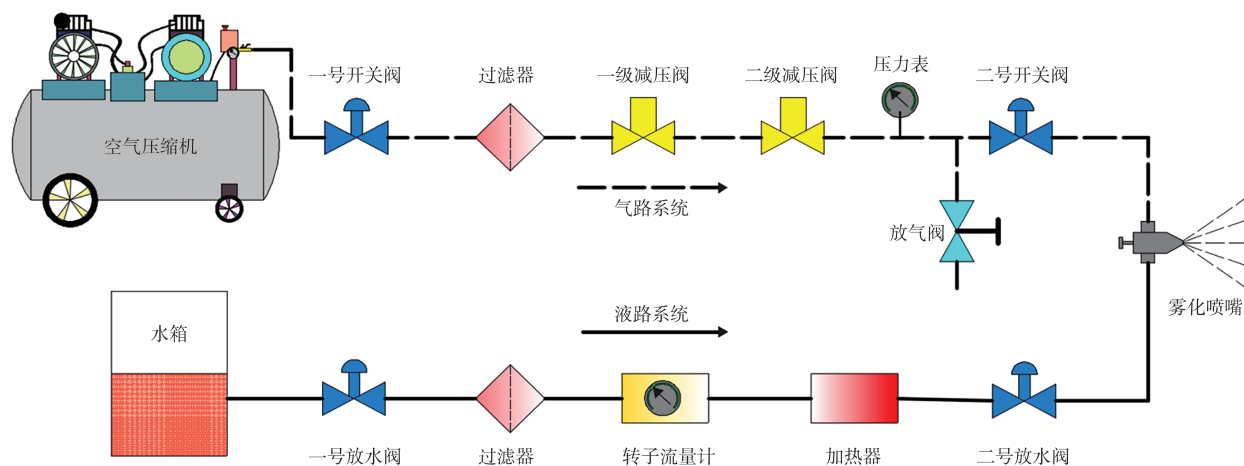


图1 喷雾系统总体结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of the overall structure of the spray system

统、液路系统和喷嘴^[12]。气路系统和液路系统相互独立,工作时分别从喷嘴的两侧进入^[13]。

气路系统主要由空气压缩机、开关阀、过滤器、减压装置、压力表、放气阀组成。通过开关阀可以实现对气源的总体控制。空气过滤器可以防止雾化喷嘴被微小固体颗粒堵塞。减压装置可以将气压降低到0.6MPa以内,精度控制在0.02MPa,实现对气体压力的精准控制。

液路系统主要包括水箱、放水阀、过滤器、转子流量计、加热器等。通过调节带刻度水箱中液柱的高度可以实现对喷嘴水压的控制。通过转子流量计可以测量液路中的流量。设置加热器是为了防止低温环境下液体结冰堵塞喷嘴。综合考虑喷射角度、喷雾面积及均匀性,本试验选择实心锥形内混式喷嘴。

1.2 喷雾系统流量可控性测量

喷雾系统对过冷水滴流量的可控性在一定程度上影响着过冷水滴捕获率试验的准确性,提高喷雾系统流量的可控性是该试验的一项重要任务。试验前,需要分别测量喷雾系统液压、气压与喷雾流量的代数关系,进而实现喷雾流量的可控性。

(1) 液面高度与喷雾流量的关系

液面高度是指水箱中液面高度与喷嘴之间的垂直高度,它直接影响着连接喷嘴的液路输入压力。通过设置试验,在输入气压0.25MPa、液面高度20~200cm条件下,流量与液面高度的关系如图2所示。

线性拟合得出喷雾流量与液面高度的关系式,即

$$y = 0.0023x + 0.7384 \quad (1)$$

在统计学中,对变量进行线性回归分析时,一般采用最

小二乘法进行参数估计,其中判定系数 R^2 反映了回归方程的拟合程度,其取值在0~1之间,一般认为当 R^2 超过0.8时,模型的拟合优度比较高。经计算, R^2 误差为0.9703,线性拟合程度高,式(1)较为准确地描述了喷雾流量与液面高度的代数关系,由此得出结论:在气压不变的情况下,喷雾流量与液面高度呈线性关系,即可以通过调节液面高度控制喷雾流量。

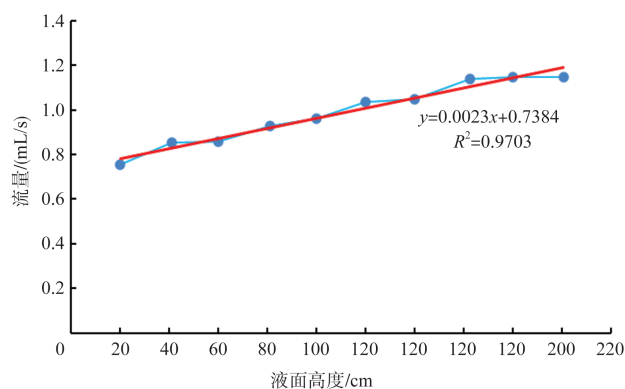


图2 喷雾流量与液面高度的关系

Fig.2 Spray flow rate in relation to liquid level

(2) 气压与喷雾流量的关系

气压是保证喷雾均匀、液滴初速度稳定的重要参数。以0.05MPa为步长进行多次重复试验,得到流量与气压间的对应关系如图3所示。

拟合得到喷雾流量与输入气压之间的关系式,即

$$y = 1.2379x + 0.5641 \quad (2)$$

经计算, R^2 误差为0.9693,线性拟合程度高,并得出结论:其他试验条件相同时,喷雾流量与输入气压呈线性关

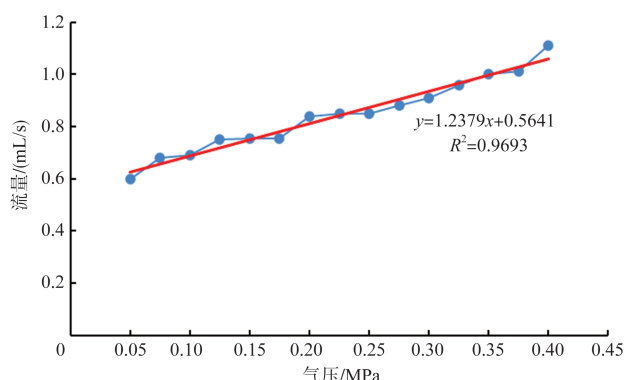


图3 喷雾流量与输入气压的关系

Fig.3 Spray flow rate in relation to air pressure

系,可以通过调节气路气压控制喷雾流量。

1.3 液滴直径

为提高准确性,在喷雾系统设计完成后必须对液滴直径和喷嘴出口风速等参数进行测量^[14]。

在航空领域,使用液态水含量(LWC)来衡量单位体积内液态水的重量(质量),以描述环境中液滴分布情况;使用平均容积直径(MVD)来描述液滴的大小,即所有小于该直径的全部水滴所构成的液态水含量与所有大于该直径的全部水滴所构成的液态水含量相等^[15]。飞机容易发生结冰的水滴平均容积直径范围是20~50 μm ,由图4可得,本试验中产生液滴的MVD值为35.0 μm ,符合试验要求。

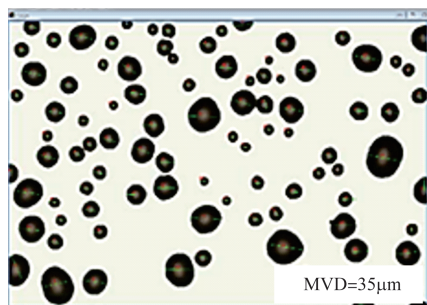


图4 测量液滴直径

Fig.4 Droplet diameter measurement

2 超疏水表面过冷水滴捕获率试验

过冷水滴捕获率表示材料表面捕获过冷水滴结冰的能力,主要受温度、LWC、MVD、表面能等因素影响。当飞机在过冷水滴云层中飞行时,假设云雾场的LWC与MVD相对稳定,则环境温度、穿云时间及飞行姿态将直接导致机身不同表面上的过冷水滴捕获率差异,进而影响机身不同区

域的覆冰情况。

本文选取温度、喷雾时长、倾斜角度三个变量模拟实际飞行场景,探究不同条件下超疏水表面过冷水滴捕获率的变化规律。

2.1 试验材料制备

聚酰亚胺(PI)是一种高性能的工程材料,具有优异的高温稳定性、耐腐蚀性及良好的力学性能,在航空航天领域应用广泛。

过冷水滴捕获率试验中采用的样板分别是PI表面样板和超疏水表面样板,具体制备过程如图5所示。

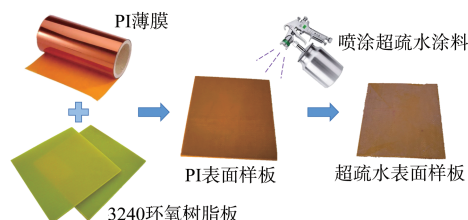
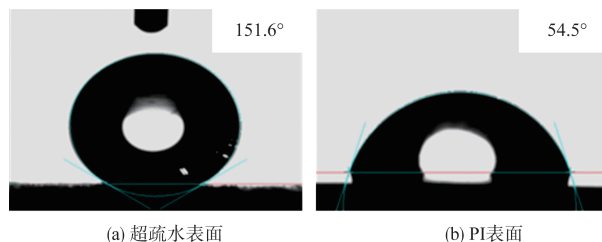


图5 制备试验样板流程

Fig.5 Preparation of an experimental template

不同材料表面接触角如图6所示。其中,超疏水表面样板的静态接触角为151.6°>150°,滚动角<5°,为超疏水表面。PI样板表面静态接触角为54.5°<90°,为亲水表面。



(a) 超疏水表面 (b) PI表面

图6 材料表面静态接触角

Fig.6 Material static contact angle

2.2 试验平台

图7为过冷水滴捕获率试验平台,整个试验平台处于低温冷库内。使用固定支架安装喷嘴,通过调节气路系统的进气压力和液面高度来控制喷嘴的喷雾速度和流量;试验工作台用于布置固定支架和角度倾斜台,角度倾斜台上放置试验样板,通过旋转旋钮可以控制试验样板与水平面的夹角;采用相机记录试验,用于观察样板的表面结冰情况。

2.3 风速均匀性

实心锥形内混式喷嘴产生的出口风速理论上呈圆形分布,因此采用十字交叉法测量其风速分布。将样板置于与喷嘴的垂直方向距离为40cm处,并且使十字交叉点正对喷

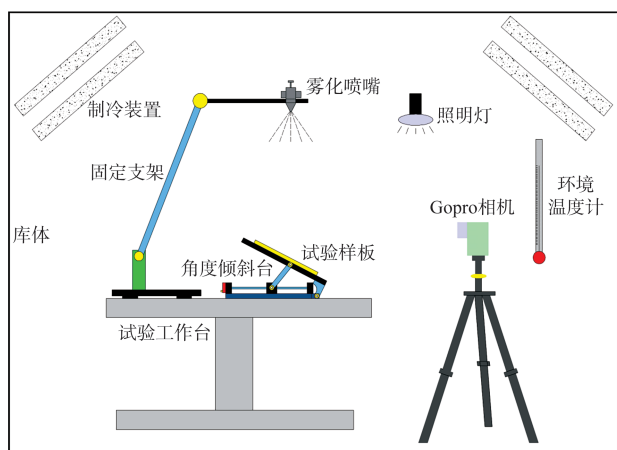


图7 过冷水滴捕获率试验平台

Fig.7 Supercooled water droplet capture rate experimental platform

嘴出口,使用皮托管测量每个测量点的风速。

由图8可知,此区域内的平均风速为4.96m/s,且相对偏差不得超过 $\pm 5\%$ 。后续试验中,可认为该区域内水滴到达试验样板表面的速度相同,样板表面过冷水滴收集系数的差异仅由试验条件的改变造成。

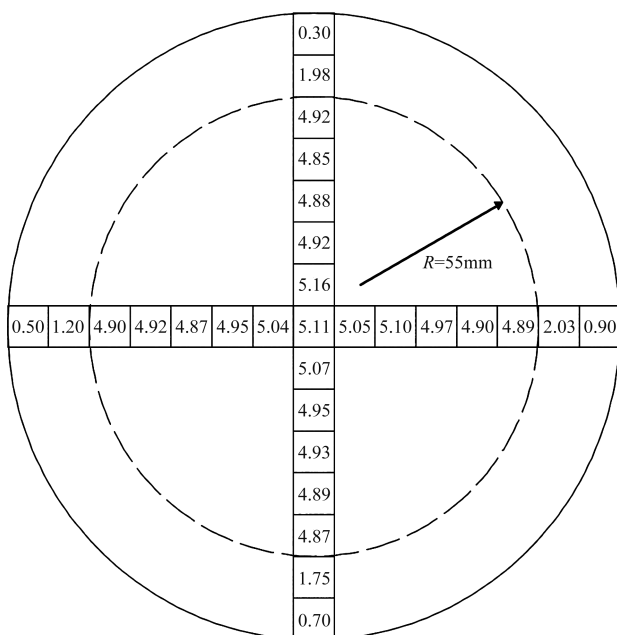


图8 十字交叉法测量风速分布

Fig.8 The cross method measures the wind speed distribution

2.4 测试方案

过冷水滴捕获率是指过冷水滴在与固体表面碰撞的过程中,被表面捕获而冻结的水滴重量占所有接触过表面的

水滴重量的比例,计算方法如式(3)所示

$$a = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (3)$$

式中, a 为样板表面过冷水滴捕获率; m 为在样板上冻结的过冷水滴质量; M 为所有接触过样板表面的水滴质量。具体测量方案如图9所示。

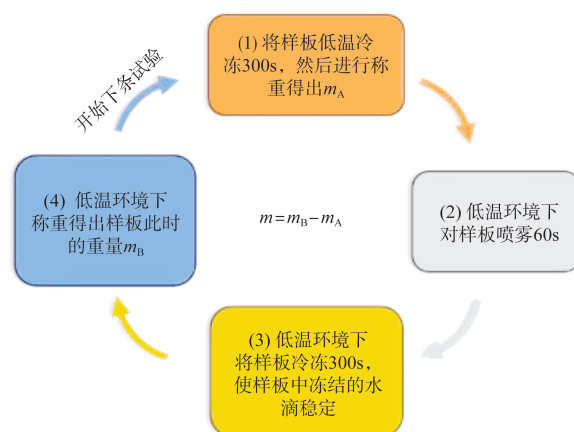


图9 冻结水滴质量测试方案

Fig.9 Test programme for freezing water droplet mass

过冷水滴捕获率试验容易受各种因素的影响,导致试验结果出现很大的波动。本试验分别从试验样板质量称量过程、试验温度等方面严格控制误差。

(1) 质量测量

试验中使用高精度电子秤对试验样板进行称重,精度为0.01g。为防止未被捕获的过冷水滴流走,导致 M 值的测量结果变小,将试验样板换为垂直投影面积相等的正方形凹槽,在凹槽内铺上一层海绵块,用于吸收喷雾过程中落入正方形凹槽内的过冷水滴。

(2) 环境温度

本试验在封闭的恒温冷库中进行,试验过程中环境温度变化小于 0.5°C ,可以认为每个工况试验中环境温度保持稳定。每个条件下进行三次重复试验,以保证试验结果的准确性。

3 不同试验条件对过冷水滴捕获率的影响

从环境温度、样板倾斜角度、喷雾时长三个方面探究不同表面过冷水滴捕获率规律,并根据试验现象与数据进行分析。

3.1 环境温度变化的过冷水滴捕获率试验

为探究环境温度对水滴捕获率的影响,试验中,保持每次试验喷雾时长为60s,样板倾斜角度为 40° ,设定5组环境

温度(-2°C 、 -5°C 、 -8°C 、 -11°C 、 -14°C),记录PI表面样板、超疏水表面样板在不同温度下的前后质量差,最终试验结果如图10所示。图10中, a_1 、 a_2 分别表示PI表面样板和超疏水表面样板的过冷水滴捕获率, a_2/a_1 为超疏水表面样板占PI表面样板水滴捕获率的百分比。

两组试验样板在不同温度下表面结冰情况如图11所示,其中,左图为PI表面样板,右图为超疏水表面样板。试验结果表明,环境温度为 -2°C 和 -5°C 时,大多数过冷水滴在试验表面撞击与滚动过程中没有结冰,两组试验表面轻微结冰,呈点状分布。超疏水表面的过冷水滴收集系数保持在10%左右,约占PI表面的20%。

随着温度继续降低,当环境温度为 -8°C 时,部分过冷水滴在撞击过程中便开始结冰,超疏水表面上的结冰现象变得严重,几乎覆盖整个表面,过冷水滴收集系数出现骤增,达到同温度下PI表面的70%,超疏水表面特性开始失效。

当环境温度为 -11°C 、 -14°C 时,大多数过冷水滴在撞击

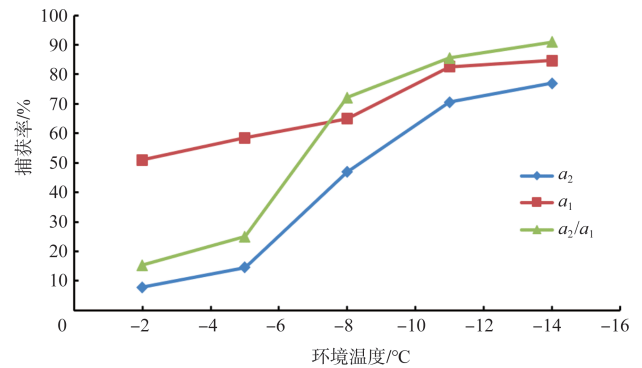


图10 不同环境温度对水滴捕获率的影响

Fig.10 Effect of ambient temperature on water droplet capture rate

过程中便立即发生结冰,超疏水表面的结冰情况进一步加重,覆冰情况与PI表面基本相同。超疏水表面过冷水滴收集系数与PI表面的差异进一步缩小,且存在随着温度持续降低,两表面的收集系数增加且趋于相同的趋势。此时,超疏水表面特性完全失效。

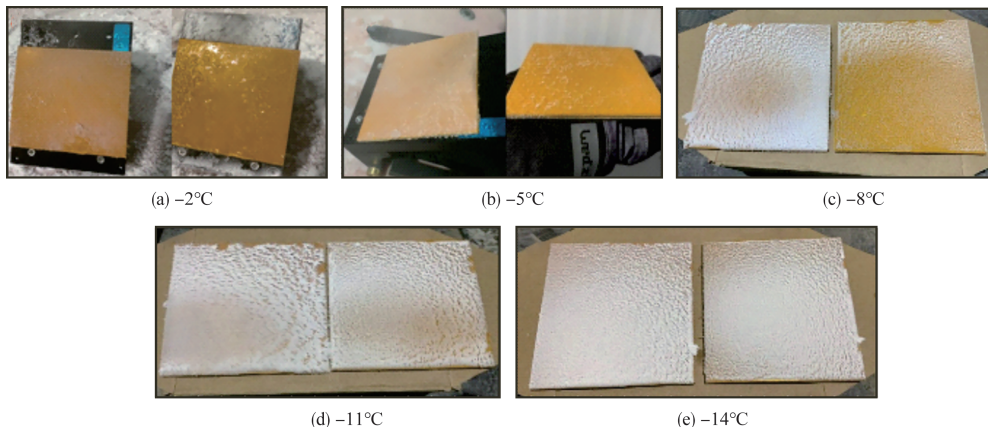


图11 不同环境温度条件下的试验现象

Fig.11 Experimental phenomenon under different ambient temperature conditions

3.2 倾斜角度变化的过冷水滴捕获率试验

在倾斜角度对水滴捕获率的影响测试试验中,保持每次试验喷雾时长为60s,环境温度为 -5°C ,设定7组倾斜角度(10° 、 25° 、 40° 、 55° 、 60° 、 70° 、 80°),记录样板在不同试验环境温度下的前后质量差。试验结果如图12所示。

试验结果表明,当倾斜角度为 10° ,两种表面上的过冷水滴捕获率均较高。随着倾斜角度的增加,受重力作用,过冷水滴在不同表面上滚动的的时间减短,两种表面的过冷水滴捕获率均降低。且在不同倾斜角度下,超疏水表面样板水滴捕获率占PI表面样板水滴捕获率的比例保持稳定,约为25%。

3.3 喷雾时长可变的过冷水滴捕获率试验

在探究喷雾时长对水滴捕获率的影响试验中,保持试验样板倾斜角度为 10° ,环境温度为 -5°C ,分别设定5组喷雾时长(30s、60s、90s、120s、150s),记录PI表面样板、超疏水表面样板在不同喷雾时长下的前后质量差。试验结果如图13所示。

试验结果表明,随着喷雾时长的增加,两试验样板的水滴捕获率均逐渐升高,但超疏水表面的捕获率增长较慢。不同的喷雾时长下,超疏水表面的过冷水滴捕获率保持为PI表面过冷水滴捕获率的25%。

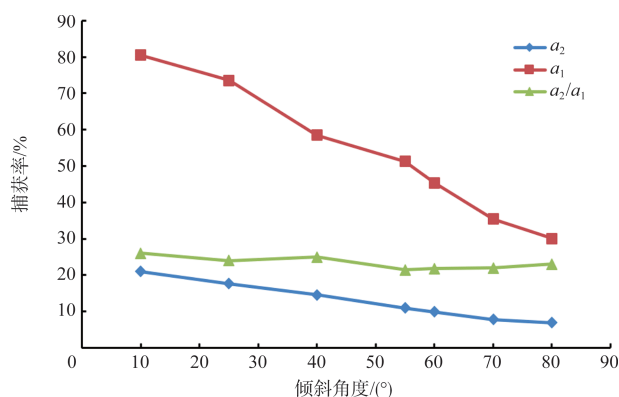


图12 倾斜角度对水滴捕获率的影响

Fig.12 Effect of tilt angle on water droplet capture rate

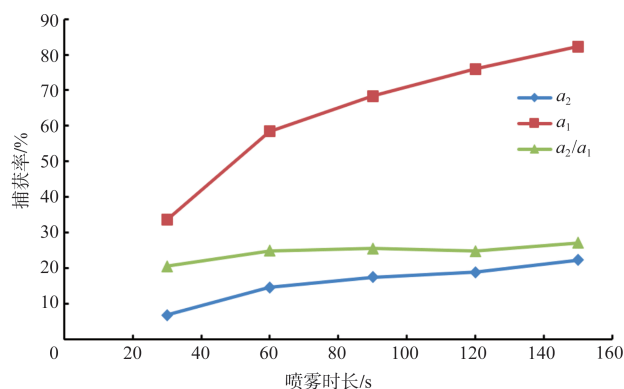


图13 喷雾时长对水滴捕获率的影响

Fig.13 Effect of spray duration on droplet capture rate

4 超疏水表面低过冷水滴捕获率的机理研究

4.1 过冷水滴在表面滚动过程中的热传递

通过上述试验可以发现:超疏水表面能降低水滴捕获率;当倾斜角度或喷雾时长在一定范围内变化时,两种表面的过冷水滴捕获率相对值 a_2/a_1 保持稳定;只有当温度降低时, a_2/a_1 出现显著变化。因此,推断超疏水表面过冷水滴捕获率较低主要与过冷水滴接触样板表面时发生的热传递有关。

过冷水滴与样板表面发生碰撞而冻结的过程中,伴随热量传递,此过程中发生的热传递形式主要是热传导。热传导是指物体之间因温度差而发生的能量传递,方向如图14所示。过冷水滴自身热量释放的快慢直接影响着水滴在表面滚动过程中结冰的快慢,进而造成不同试验条件过冷水滴捕获率的差异。

热传导定律表明单位时间内通过给定截面的热量,正比于垂直该截面方向上的温度变化率和截面面积,可由式

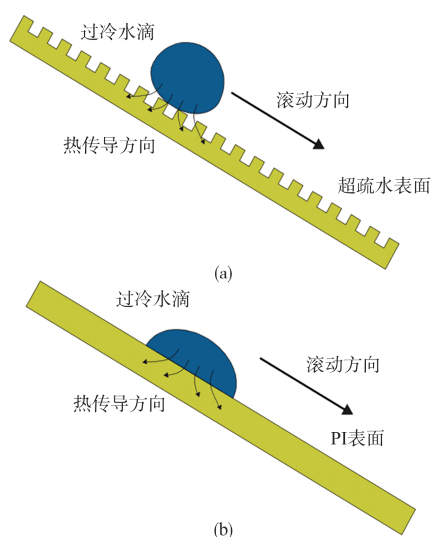


图14 过冷水滴在不同表面上的热传导方向

Fig.14 Heat conduction process of supercooled water droplets hitting the surface of the template

(4)表示

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dx} dA \quad (4)$$

式中, A 为导热面积; dT/dx 为温度梯度; λ 为导热系数。因此,水滴热量释放的过程主要和以下因素有关。

(1) 样板表面涂层的热导系数

原PI薄膜的热导系数为 $0.3670\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,喷涂有超疏水涂料的PI薄膜的热导系数仅为 $0.07050\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,相对较低的热导系数使得超疏水样板表面减缓了过冷水滴自身热量的释放速度,降低了液滴在表面滚动时结冰的概率。

(2) 水滴和样板表面间的温度梯度

在过冷水滴与样板表面发生碰撞的瞬间,过冷水滴和两样板表面间的温度差相同,故温度梯度对两样板表面的过冷水滴捕获率的影响较小。

(3) 水滴接触样板表面时的接触面积

由于静态接触角的差异,过冷水滴碰撞超疏水表面铺展面积小于PI表面。

图15中,左图为低放大倍数下的超疏水表面,右图为高放大倍数下的表面。超疏水表面具有微纳二维复合粗糙结构,尺寸远小于前文测得喷雾装置射出的过冷水滴平均直径,水滴被托起在微结构之上^[16];同时,超疏水表面的表面能极低,导致大多数过冷水滴与超疏水表面不完全接触,接触面包括固—气接触面和固—液接触面,即过冷水滴在超疏水表面为Cassie润湿状态^[17],液体与固体不完全接触,存在气腔,液滴与样板间的实际接触面积进一步减小^[18]。

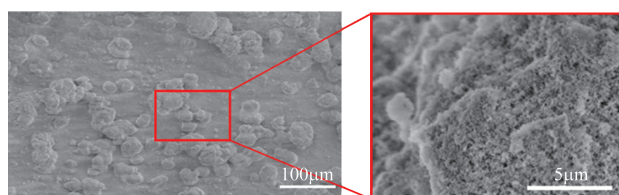


图15 电镜观测下的超疏水表面

Fig.15 Superhydrophobic surface under electron microscopy

(4) 水滴和样板表面间的接触时间

由于超疏水表面的疏水性能以及其微纳结构凸起的存在,液滴和超疏水表面间的实际接触面积减小,使得液滴所受到的摩擦阻力较小,因此,在相同的倾斜角度下,过冷水滴在超疏水表面上滚动时间更短,用于进行热传递的时间更短,热传导的热量相对较小。

结合试验结果及上述分析可知,超疏水表面的疏水特性主要体现为液态水滴在样板表面铺展、滚动的过程。当过冷水滴在样板表面以液态形式滚动时,由于超疏水表面的导热系数小于PI表面,且过冷水滴与超疏水表面间的接触面积和接触时间均小于PI表面,过冷水滴在超疏水表面的热量释放速度远小于PI表面,不易发生冻结被捕获。大部分水滴可以在样板表面保持液态滚动的情况下,样板的倾斜角度或喷雾的时间在一定范围内改变时,超疏水表面过冷水滴捕获率均小于PI表面,约占原PI表面的25%。

4.2 温度对过冷水滴捕获率的影响

试验开始前,将纯净水提前放置在冷库环境中,待其温度降至接近0℃,接入喷雾装置中。此外,为防止喷嘴喷雾时发生结冰导致液路堵塞,在液路的最后阶段设置用于除冰的加热器。除冰完成后,待喷头完全冷却,再重新开始喷雾。

试验时,过冷水从喷嘴处射出,雾化成平均直径为35μm的小液滴,以一定的速度到达试验样板表面。参考相关文献,当液滴初始温度约为2℃,液滴直径小于100μm,液滴在由雾化核喷嘴向样板表面飞行过程中可被进一步冷却成温度为环境温度(-2℃、-5℃、-8℃、-11℃、-14℃)的过冷水滴^[19]。

环境温度为-2℃、-5℃时,大部分过冷水滴在样板上保持液态,不容易黏附在两个试验样板上。对于超疏水表面样板,水滴在其表面发生滚动时,少数小水滴因完全释放自身热量发生冻结,从而被表面捕获。超疏水表面具有良好的自清洁特性^[20],水滴在滚动的过程中将样板中已冻结的少量冰滴冲击带走,从而降低了超疏水表面的过冷水滴捕获率。对于PI表面样板,过冷水滴在其表面发生铺展并

在重力的作用下发生滚动。由于水滴与样品表面的接触面积较大,受到的摩擦力较大,导致滚动速度相对缓慢,过冷水滴在此过程中发生冻结的概率较大,因而PI表面的过冷水滴收集系数较高。

当环境温度降低到-8℃时,液态水滴的黏度增高。超疏水表面上液滴的滚动速度减慢,液滴与表面的接触时间增加,表面出现较大面积的结冰现象。同时,表面覆冰会进一步降低超疏水表面的疏水性能,减少了液滴直接接触超疏水表面的接触面积,导致液滴被捕获的概率进一步增大。而PI表面上部分液态水滴以铺展的方式滚动,被捕获的概率更高。且随着温度的降低,部分水滴开始在撞击过程中发生结冰,所以,两种表面的过冷水滴收集系数均呈增加趋势。

当环境温度降至-11℃、-14℃时,大部分过冷水滴滴落在试验样板表面来不及扩散便已完全发生冻结。超疏水表面结霜会显著降低超疏水表面的疏水性能^[21],从而导致在此温度下的超疏水表面过冷水滴捕获率接近PI表面的过冷水滴捕获率,两种表面上的结冰特征相似。

因而,温度通过影响过冷水滴撞击到表面的行为控制收集系数。若直接撞击冻结,则超疏水表面与PI表面的过冷水滴收集系数无较大差异;如果水滴继续在表面滚动,则超疏水表面的水滴收集系数小于PI表面。

4.3 倾斜角度对过冷水滴捕获率的影响

过冷水滴在倾斜表面上滚动的受力分析如图16所示。由图16可知,当倾斜角度不变时,相同质量液滴的重力沿平面向下的分力相同。由于水滴与超疏水表面的接触面积更小,滚动过程中受到的阻力更小,速度更快,因此在表面停留的时间更短,传递的热量更少,超疏水表面的过冷水滴收集系数比PI表面更低。

当两种样板的倾斜角增大时,重力加速度沿着水滴运动方向的分量均增大,使得水滴在样板表面的移动速度变快,水滴与两种样板的接触时间变短。同时,在相同条件下,水滴在超疏水表面停留时间的减少,意味着水滴通过热传导给样板的热量随之减少,进而导致水滴在表面冻结概率的下降,最终降低了过冷水滴捕获率,导致超疏水表面的过冷水滴系数降低得更快。相同条件下,超疏水表面的过冷水滴收集系数约为普通表面的25%。

4.4 喷雾时长对过冷水滴捕获率的影响

随着喷雾时长的增加,超疏水表面出现水滴堆积。连续水膜的出现导致用于疏水的有效面积减小,超疏水表面特性对水滴的作用变小。同时,冻结在表面的冰层还会阻

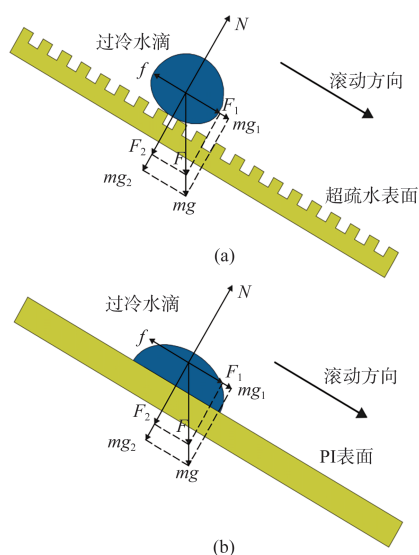


图16 过冷水滴在样板表面滚动受力分析

Fig.16 Force analysis of supercooled water droplets rolling on the surface of the template

碍过冷水滴的流动,不断发生堆积结冰,导致过冷水滴捕获率随着喷雾时长的增加而增加。但是由于大部分过冷水滴在超疏水表面上滚动的过程中均保持液态,当空气中的液滴来临时,这些液滴会随表面滚动的液滴一起离开表面,在喷雾试验过程中保持一定程度的动态平衡,超疏水表面的水滴捕获率保持相对稳定。

由于PI表面为亲水表面,且过冷水滴在PI表面中容易发生铺展而冻结产生较多的冰滴,双重因素使得过冷水滴容易在PI表面发生更为严重的结冰现象,导致PI表面的过冷水滴捕获率远高于超疏水表面,且随着喷雾时长的增加,PI表面的过冷水滴捕获率的增长率高于超疏水表面。

5 结论

为探究超疏水表面过冷水滴捕获率规律,本文搭建了液滴直径与速度精确可控的喷雾系统,在PI表面喷涂制备得到超疏水表面,设计并完成了试验,得到以下结论:

(1) 当环境温度为 -5°C 时,通过对比两种表面的覆冰量,得出超疏水表面的过冷水滴捕获率约占PI表面的25%,原因是超疏水表面能够降低液滴在表面的停留时间和总量。

(2) 倾斜角或喷雾时间的变化直接影响了液滴在表面停留的时间和总量,导致两种表面的过冷水滴收集系数均发生变化;但由于单位时间内撞击到表面的液滴数量及液滴在表面的运动行为不变,超疏水表面的过冷水滴捕获率

与PI表面的相对值保持稳定。

(3) 通过分析液滴运动过程中的热传递及受力,证明超疏水表面低水滴收集特性主要作用于液滴在表面铺展、滚动的过程,进而直接影响过冷液滴与表面的接触时间和总量。当环境温度过低时(本试验为 -8°C 以下),液滴直接撞击表面结冰,不在表面运动,超疏水表面便不表现低水滴收集特性,产生大量覆冰。

综上,本文对不同试验条件下超疏水表面的低水滴收集系数进行了试验研究,并总结了相关规律,证明了超疏水表面在降低过冷水滴捕获率方面存在一定的优势,有利于新一代超疏水电热复合蒙皮的防冰功率精确设计与能耗优化。

AST

参考文献

- [1] 林贵平,卜雪琴,申晓斌,等. 飞机结冰与防冰技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2016.
Lin Guiping, Bu Xueqin, Shen Xiaobin, et al. Aircraft icing and anti-icing technology[M]. Beijing: Beihang University Press, 2016.(in Chinese)
- [2] 蒋天俊. 结冰对飞机飞行性能影响的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
Jiang Tianjun. Investigation of icing accretion influences on aircraft flight performance[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [3] Cao Yihua, Wu Zhenlong, Su Yuan, et al. Aircraft flight characteristics in icing conditions[J]. Aeronautical Journal, 2015, 74(1183):963-979.
- [4] 杨军,张靖周,郭文,等. 超疏水表面技术在发动机防冰部件中的应用[J]. 燃气轮机试验与研究,2013,26(1): 58-62.
Yang Jun, Zhang Jingzhou, Guo Wen, et al. Application of super-hydrophobic surface technique on the anti-icing components of aero-engine[J]. Gas Turbine Test and Research, 2013, 26(1): 58-62.(in Chinese)
- [5] De Pauw D, Dolatabadi A. Effect of superhydrophobic coating on the anti-icing and deicing of an airfoil[J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(2): 490-499.
- [6] Morita K, Kimura S, Sakaue H. Hybrid system combining ice-phobic coating and electrothermal heating for wing ice protection[J]. Aerospace, 2020, 7(8):102.
- [7] Sun Yongyang, Sui Xin, Wang Yubo, et al. Passive anti-icing and active electrothermal deicing system based on an

- ultraflexible carbon nanowire (CNW)/PDMS biomimetic nanocomposite with a superhydrophobic microcolumn surface[J]. *Langmuir*, 2020, 36(48): 14483-14494.
- [8] He Yang, Jiang Chengyu, Cao Xiaobo, et al. Reducing ice adhesion by hierarchical micro-nano-pillars[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 305: 589-595.
- [9] He Yang, Jiang Chengyu, Hu Peijun, et al. Reducing ice accumulation and adhesion by using a flexible micro-rod film[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 118: 57-63.
- [10] 魏卓, 姚井淳, 石小鑫, 等. 低频振动对超疏水电热除冰方法的增益效果探究[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(11): 70-75.
- Wei Zhuo, Yao Jingchun, Shi Xiaoxin, et al. An investigation of the gain effect of low-frequency vibration on superhydrophobic electrothermal deicing methods[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(11): 70-75. (in Chinese)
- [11] 朱宝. 低能耗超疏水电热蒙皮设计及防冰性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- Zhu Bao. Low power superhydrophobic electrothermal skin and its anti-icing performance[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
- [12] Mohammadi A, Ommi F, Saboohi Z. Experimental and numerical study of a twin-fluid two-phase internal-mixing atomizer[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, 147(5): 3673-3687.
- [13] Zhao Jin, Ning Zhi, Lyu Ming. Experimental study on the two-phase flow pattern and transformation characteristics of a flow mixing nozzle under a moderate flow rate[J]. *Meccanica*, 2019, 54: 1121-1133.
- [14] 杜骞. 小型回流式冰风洞试验参数测量与标定方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- Du Qian. Investigation on the methods of parameter measurement and calibration for small return-flow icing wind tunnels [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [15] 李宇钦. 冰风洞水滴参数测量方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- Li Yuqin. Research on the measurement method of water droplet parameters in ice wind tunnel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [16] Zhang Rui, Hao Pengfei, Zhang Xiwen, et al. Supercooled water droplet impact on superhydrophobic surfaces with various roughness and temperature[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 122: 395-402.
- [17] 周玉玲. Cassie 润湿模式下超疏水翅片的结霜/融霜特性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- Zhou Yuling. Study on frosting/defrosting characteristics of superhydrophobic fins under Cassie wetting mode[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [18] 陈增贵, 肖冰, 王宇, 等. 超疏水电热薄膜对溢流冰的抑制效果探究[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(9): 75-80.
- Chen Zenggui, Xiao Bing, Wang Yu, et al. Inhibition of run-back ice via superhydrophobic electrothermal film[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(9): 75-80. (in Chinese)
- [19] 赵玉顺. 绝缘子超疏水涂层制备方法与防冰性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- Zhao Yushun. Research on the preparation method of superhydrophobic coating for insulators and anti-icing performance [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [20] Geyer F, D'Acunzi M, Sharifi-Aghili A, et al. When and how self-cleaning of superhydrophobic surfaces works[J]. *Science Advances*, 2020, 6(3): 9727.
- [21] Varanasi K K, Deng T, Smith J D, et al. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(23): 234102.

Study of Supercooled Water Droplet Capture Patterns on Superhydrophobic Surfaces

Wang Wenshuai, Chen Zenggui, Yan Zexiang, Lyu Xianglian, He Yang

Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: Aircraft often face the danger of icing during flight with urgent anti-icing needs, and energy-efficient superhydrophobic electro-thermal composite anti-icing skins have broad application prospects, but the superhydrophobic surface supercooled water droplet collection characteristics have not been considered in current design methods. In order to give full play to the role of superhydrophobic surfaces in aircraft anti-icing solutions, this paper firstly designs a spray device with accurate control of droplet diameter and flow rate, then determines a scheme for the experiments on the capture rate of supercooled water droplets, and finally explains the differences in surface capture rate under different experimental conditions and summarises the relevant laws by combining the theories related to heat transfer and surface properties. The results show that under the experimental conditions, the superhydrophobic surface supercooled water droplet capture rate is about 25% of that of the PI surface, which proves that the superhydrophobic surface reduces energy consumption due to the reduction of the total amount and duration of water droplets on the surface, and provides a basis for the accurate design of the minimum anti-icing power of the new generation superhydrophobic electro-thermal composite skin, which is of great significance for the normal operation of UAVs in harsh environments.

Key Words: superhydrophobic surfaces; supercooled water droplet capture rate; aircraft anti-icing; temperature; tilt angle; spraying time

Received: 2023-06-16; **Revised:** 2023-09-27; **Accepted:** 2023-11-01

Foundation item: National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research(61422010102, 6142201200403)