

并列双方柱的疏水涂层防冰效果结冰风洞实验评估

肖春华^{1,2}, 程尧², 乔宝英², 唐乔乔²

- (1. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;
2. 中国空气动力研究与发展中心 飞行器结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 采用结冰风洞实验研究的方法,利用0.3m×0.2m结冰风洞主实验段,在不同结冰气象条件下对涂覆在并列双方柱实验模型表面的不同纳米疏水涂层结冰特性进行了实验研究,对左右并排的方柱实验模型表面的结冰外形进行了测量和比较,建立了基于9个结冰外形几何特征量的防冰效果量化评估方法,对有、无纳米疏水涂层表面的结冰外形几何特征量无量纲化偏差进行了计算和分析。研究表明:基于结冰外形几何特征量的防冰效果量化评估方法可以较好地评估纳米疏水涂层的防冰效果。与未涂覆防冰涂层的铝合金材料相比,硅橡胶及其添加颗粒的纳米涂层均具有一定的防冰性能,与硅橡胶涂层相比,有的添加颗粒的纳米涂层防冰效果略好一点,而有的略差一点,没有明显提高。在硅橡胶基底材料中添加纳米疏水颗粒,可以在涂层表面构筑一些微纳结构,从而起到防冰作用。因此,在硅橡胶涂层中添加纳米疏水颗粒是一种值得探索的防冰涂层制备研究方向,但如果仅采用物理混合搅拌的方法,纳米颗粒难以在硅橡胶涂层表面形成稳定疏水性微纳乳突结构。纳米疏水涂层只能降低结冰速率,无法完全杜绝材料表面的结冰现象。

关 键 词: 防冰; 疏水涂层; 并列双方柱; 结冰风洞; 微纳结构

中图分类号: V211

文献标志码: A

Icing wind tunnel test evaluation on anti-icing effects of hydrophobic coating on two parallelized square cylinders

XIAO Chunhua^{1,2}, CHENG Yao², QIAO Baoying², TANG Qiaoqiao²

- (1. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Centre, Mianyang Sichuan 621000, China;
2. Key Laboratory of Aircraft Icing and Anti/De-Icing, China Aerodynamics Research and Development Centre, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Anti-icing effects of different nano hydrophobic coatings on two parallelized square cylinders test model were studied using icing experimental method in the main test section of 0.3m×0.2m icing wind tunnel under different icing weather conditions. The ice shapes on left and right parallelized square cylinders test model were measured and compared respectively. The quantitative method of evaluating anti-icing effect was established on the basis of nine geometric characteristics parameters of ice profile. The nondimensional deviation of ice profile geometric characteristics parameters were calculated and analyzed between the coated model and the clean model. The study shows that the quantitative test evaluation

收稿日期: 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会资助面上项目(11572338); 国家重点基础研究计划(973计划)(2015CB755804)

作者简介: 肖春华(1976—),男,副研究员,博士,主要从事结冰机理与防除冰应用研究。

引用格式: 肖春华,程尧,乔宝英,等. 并列双方柱的疏水涂层防冰效果结冰风洞实验评估[J]. 航空动力学报,2018,33(3):540-548.
XIAO Chunhua, CHENG Yao, QIAO Baoying, et al. Icing wind tunnel test evaluation on anti-icing effects of hydrophobic coating on two parallelized square cylinders[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 540-548.

method based on ice profile geometric characteristics parameters can evaluate the anti-icing effect of nano hydrophobic coating. The silicone rubber coating and other coatings added in different nano particles have some anti-icing capability. The silicone rubber coating added in different proportion of nano particles show comparative anti-icing capability compared with the silicone rubber coating in the present study. Adding small amount of nano hydrophobic particles in the silicone rubber coating can construct some micro-nano structures, which can enhance the hydrophobic and anti-icing effects. Therefore, it is a valuable way to fabricate anti-icing coating by adding different nano hydrophobic particles into the silicone rubber coating. But it is not easy for the nano hydrophobic particles to form a stable micro-nano structures with hydrophobic and anti-icing performance on the silicone rubber coating just by physical mixing and stirring methods. The nano hydrophobic coating can reduce the icing velocity, but can't stop icing phenomena completely.

Key words: anti-icing; hydrophobic coating; two parallelized square cylinders; icing wind tunnel; micro-nano structures

飞机在结冰气象环境下飞行时,大气中悬浮的过冷水滴撞击到飞机表面,很容易在机翼和尾翼、进气道唇口、挡风玻璃和仪器仪表传感器等部件表面发生结冰现象^[1]。结冰增加了飞机质量,改变了飞机的表面外形,改变了升力机构周围的流场,破坏了空气动力性能,造成了飞机的最大升力降低、阻力升高、操纵性和稳定性下降^[2],是飞行安全的重大隐患和威胁,由于结冰而引发的飞行事故比较常见,严重结冰甚至可以导致飞机发生坠毁^[3]。

疏水涂层表面防冰是通过改变涂层表面的物理化学性质,降低水滴在涂层表面的黏附力,减少结冰的发生,从而达到防冰目的的方法。该方法具有污染小、能耗低、实施方便的特点,成为目前防冰研究的热点之一^[4-6]。因此,一直以来,发达国家都很重视结冰气象条件下疏水涂层表面对结冰特性的影响规律。Anderson等^[4]分别针对水滴静止条件下和水滴跟随气流运动撞击条件下的结冰,对具有较低的黏附力特性的涂层防冰性能进行了实验研究。Ayres等^[5]通过表面释放三聚丙烯乙二醇和丙三醇以降低水的冻结点,发展了一种能降低结晶和结冰速度的涂层,研究发现防冰效果主要取决于三聚丙烯乙二醇和丙三醇的释放速度。Cao等^[6]在实验室和自然环境下利用纳米粒子-聚合物结构验证了超疏水涂层表面的防冰性能,研究表明聚合物的防冰性能不仅依赖于超疏水性能,还依赖于涂层表面的粒子尺寸。在寒冷气候环境下,Karmouch等^[7]对风力机叶片表面的疏水涂层进行了实验研究,发现良好疏水性能的涂层可降低冰与固体表面间的剪切强度。

在不同的结冰气象条件下,Petrenko等^[8]利用低压直流电对疏水涂层表面的覆冰进行电解,发现电解可以有效降低或消除冰层和涂层表面间的黏附力。Varanasi等^[9]、Cai等^[10]对金属表面的疏水涂层和亲水涂层进行了实验研究,发现在结霜的初始阶段,两种涂层均能很好地抑制结霜。Xiao等^[11]采用多尺度模拟方法对纳米复合材料涂层的防冰性能进行了预测,并采用纳米尺度原子模拟方法对不同涂层的化学特性和结冰动力学进行了计算。Antonini等^[12]在机翼上构造出超疏水表面,实验研究发现这种超疏水表面可以降低防冰能耗达80%之多。Wang等^[13]也在铝合金上构造出超疏水表面,通过实验发现冰与超疏水表面之间的黏附强度是亲水表面的13%。这些研究工作极大地推动了防冰涂层制备及其防冰机理研究的进展。

我国从2008年开始发生了多次南方雪灾,造成了许多省份经济财产的重大损失,其中,高压输电设备的结冰造成了大量导线的断裂、塔架的倒塌、设备的损毁,自此我国更加重视输电设备的防冰问题,主要是高压输电线路、高压绝缘子等的防冰问题。为了减少绝缘子在结冰后出现闪络现象的频率,Liao等^[14]将具有半导体特性的硫化硅树脂涂层涂覆在高压绝缘子表面进行了防冰效果的研究。Jiang等^[15]对直流绝缘子的表面结冰以及结冰后绝缘子的闪络性能进行了实验研究,通过研究发现硫化硅树脂涂层并不能减少绝缘子表面的结冰。针对电网输电线的结冰问题,Wang等^[16]在铝导线表面构筑了超疏水的微尺度纳米结构,通过结冰实验发现,该表面结构的防冰效果

要好于氟烷基聚硅氧烷涂层。

结冰风洞是研究疏水涂层防冰效果的重要实验平台,但由于其投资巨大、能耗较大,一直没有得到广泛的应用,以上研究大多数是采用冷库和冰箱等低温环境而开展,这种静态实验设备很难模拟来流速度。结冰风洞既能模拟高空中的低温环境,又能模拟大气中过冷水滴云雾参数,最重要的是可以准确模拟来流速度等条件,具有冷库和冰箱等低温环境无法比拟的优势和条件。过冷水滴云雾参数均匀区是进行定量分析和研究的关键实验区域,分布在结冰风洞试验段的横截面 60% 区域,充分利用云雾场均匀区进行结冰特性和防冰效果的评估,具有传统结冰称重法无法替代的优势。肖春华等^[17]利用结冰风洞实验设备,对圆柱实验模型表面涂覆疏水涂层的防冰效果进行了实验研究,发现在结冰气象条件下,疏水涂层只能降低结冰速率。

本文利用结冰风洞作为实验平台,在文献^[17]研究的基础上,采用结冰风洞实验方法,从宏观角度对疏水涂层表面的防冰效果进行了初步研究,获得了不同纳米疏水涂层表面的结冰外形,分析比较了不同纳米疏水涂层表面的结冰特性,建立了综合考虑结冰外形几何特征量的防冰效果实验评估方法。

1 实验设备和模型

1.1 实验设备

本研究以中国空气动力研究与发展中心的 0.3 m×0.2 m 结冰风洞主实验段为实验环境(图 1)。该结冰风洞^[18]是一座闭口式、回流式、串列双实验段结冰风洞,次实验段尺寸为 0.48 m×0.32 m×0.9 m(宽×高×长),最大风速为 25 m/s。主实验段尺寸为 0.3 m×0.2 m×0.65 m(宽×高×长),最大风速为 60 m/s。风洞洞体长为 8



图 1 0.3 m×0.2 m 结冰风洞

Fig. 1 0.3 m×0.2 m icing wind tunnel

m,宽为 3.2 m,风洞的收缩比为 13.75。在风洞的第三、第四拐角段之间安装有蒸发器,在第四拐角段后的稳定段安装有喷雾装置,在第二拐角段前安装有电加热防护网。整个风洞洞壁外侧包裹有一层保温材料。实验段温度范围为 0~−20℃。

1.2 实验模型

实验模型采用铝合金材料制作的并列双方柱实验模型(如图 2 所示),安装在 0.3 m×0.2 m 结冰风洞主实验段中心位置,与实验段上、下壁面垂直连接。实验模型高为 200 mm、宽为 60 mm、厚为 20 mm,上下两端的圆形突台直径为 10 mm、长为 10 mm,用于上、下洞壁固定作用。实验模型共有上、下、左、右 4 个矩形方柱,每个方柱宽为 15 mm,厚度为 20 mm,左右平行排列的方柱间距为 30 mm,用于收集来流中的过冷水滴。

测量结冰外形的切剖面是垂直于实验模型的中央横截面,平行来流的方向(见图 2 虚线箭头方向)。

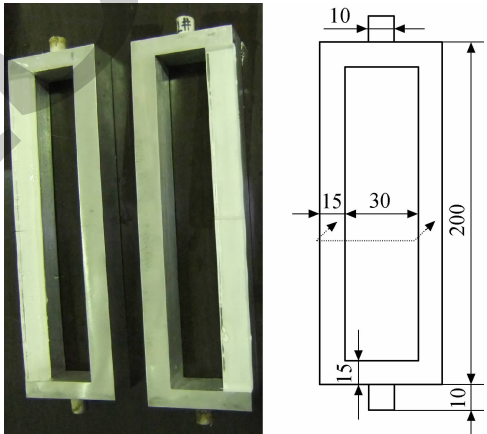


图 2 并列双方柱实验模型(单位:mm)

Fig. 2 Two parallelized square cylinders test model
(unit:mm)

1.3 纳米疏水涂层

纳米疏水涂层是采用硅橡胶复合高分子材料作为基底材料,在此基础上往基底材料添加不同含量的疏水纳米颗粒制作而成,纳米疏水涂层分别为硅橡胶+十六烷、硅橡胶+十八烷、硅橡胶+十六烷+十八烷、硅橡胶+甲基硅油、硅橡胶+甲基硅油、硅橡胶+十六烷+十八烷+甲基硅油。各种配方的主要区别是添加纳米颗粒的材料和比例不同而已。纳米疏水涂层均由中国科学院国家纳米科学中心提供。

1.4 结冰外形测量装置

结冰外形测量装置由加热后的薄钢板、刻度纸板和铅笔组成,用于对并列双方柱实验模型表面的结冰外形进行切割和测绘。其中,薄钢板内含方柱轮廓线,可以进行受热,受热后的薄钢板可直接切割方柱表面结冰。刻度纸板具有和薄钢板相同的形状和尺寸,也内含方柱轮廓线,可插入到切割后的沟槽内进行结冰外形的绘制(如图 3 所示)。

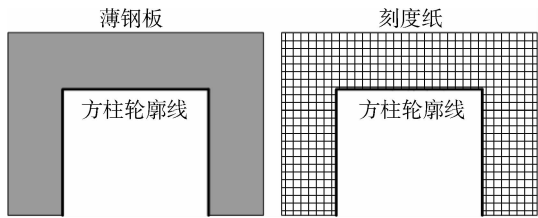


图 3 结冰外形测量装置示意图

Fig. 3 Sketch of ice profile measurement equipment

1.5 其他测量仪器

采用高清数码摄像机对实验模型结冰的过程进行记录,用于对结冰外形的辅助分析。摄像机的最高分辨率 5 184 像素×3 456 像素,有效像素为 1 800 万,焦距为 18~55 mm,快门速度为 30~1/4 000 s,满足实验模型表面结冰过程的记录要求。

2 实验方法和条件

2.1 实验方法

首先,开启 0.3 m×0.2 m 结冰风洞电动机和制冷系统,建立稳定的实验段流场参数^[17-18](来流速度和环境温度),待实验模型表面温度和环境温度达到平衡。其次,调节喷雾系统的水压、气压和温度,建立实验所需的结冰云雾参数(液态水含量和水滴平均直径)。然后,启动喷雾系统,在实验所需的流场和云雾场条件下进行结冰实验,采用高清数码摄像机记录模型表面结冰外形。并利用冰型测量装置对并列双方柱实验模型中央横截面的结冰外形进行测量,将结冰外形进行数字化处理并存储。

2.2 实验条件

本实验的目的是研究不同纳米涂层对模型表面防冰效果的评估,根据实验的目的,最终确定来流风速为 30 m/s、实验段环境温度为-9℃左右、结冰时间为 300 s,平均水滴直径为 40 μm,液态水含量为 0.7 g/m³,具体实验条件见表 1 所示。

表 1 实验条件
Table 1 Test condition

状态	防冰涂层	环境 温度/℃	来流速度/ (m/s)	结冰 时间/s
1	硅橡胶	-7.0	30	300
2	硅橡胶+十六烷	-8.5	30	300
3	硅橡胶+十八烷	-9.0	30	300
4	硅橡胶+十六烷+ 十八烷	-9.2	30	300
5	硅橡胶+甲基硅油	-8.2	30	300
6	硅橡胶+十六烷+ 十八烷+甲基硅油	-8.9	30	300

2.3 防冰效果评估方法

实验模型表面的结冰外形,即并列双方柱实验模型对应横截面位置的结冰外形,可以通过冰型测绘装置获得。根据结冰外形的几何特征,本文定义结冰外形特征的 9 个参量^[19-20],分别为①驻点位置结冰厚度、②最大结冰厚度、③最大结冰宽度、④上边缘撞击范围、⑤下边缘撞击范围、⑥上冰角长度、⑦下冰角长度、⑧上冰角角度、⑨下冰角角度,结冰外形几何特征量如图 4 所示。其中,驻点位置结冰厚度反映了过冷水滴立刻发生冻结时的结冰程度,最大结冰厚度和最大结冰宽度均反映了整个冻结过程的严重程度,上边缘撞击范围和下边缘撞击范围分别反映了过冷水滴的撞击极限和溢流极限,上冰角角度和下冰角角度分别反映了过冷水滴偏离驻点位置的冻结生长方向,上冰角长度和下冰角长度分别反映了过冷水滴偏离驻点位置的冻结生长程度。

结冰外形的 9 个几何特征量用 X_i 表示,计算比较结冰外形的几何特征量偏差并将其进行无量纲化,计算如下:

$$\Delta X_i = \left| \frac{X_{ic} - X_{in}}{X_{in}} \right| \times 100\% \tag{1}$$

式中 X_i 为结冰外形几何特征量, X_{ic} 为涂覆了纳米防冰涂层的结冰外形几何特征量, X_{in} 为没有涂覆纳米防冰涂层的结冰外形几何特征量。

若进行了 N 次结冰实验,可用 N 次实验结果的测量平均值代替 X_{in} 。为评估涂覆纳米涂层和未涂覆纳米涂层的防冰效果差异,定义 9 个几何特征量平均偏差如下:

$$\overline{\Delta X} = \frac{\sum_{j=1}^9 \Delta X_j}{9} \tag{2}$$

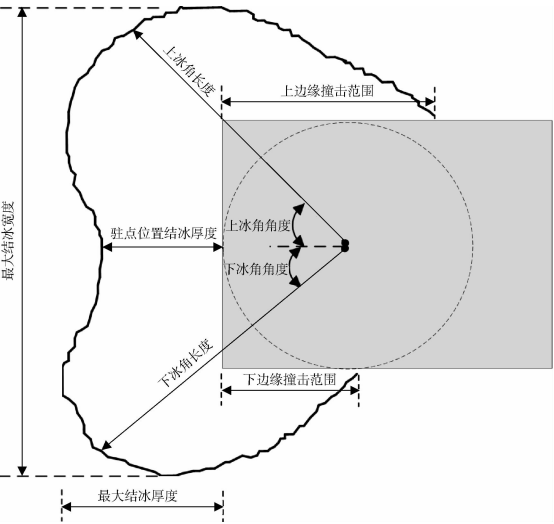


图 4 结冰外形几何特征量

Fig. 4 Geometric characteristics of ice profile

式中的 j 为结冰外形几何特征量编号。

本文采用结冰外形几何特征量无量纲化的偏差作为防冰效果量化评估方法,并将纳米涂层防冰效果评估标准分为三种:一是“好”;二是“中”;三是“差”。定义单个几何特征量偏差和几何特征量平均偏差大于 20% 的为防冰效果“好”,偏差大于 15% 小于 20% 的为防冰效果“中”,偏差小于 15% 的为防冰效果“差”。

3 实验结果和分析

图 5 是不同纳米疏水涂层表面的结冰照片,其中实验模型的左侧表面没有涂覆防冰涂层,右侧表面涂覆了防冰涂层。从照片可以看出,无涂层表面的结冰略大,而左侧由于涂覆了硅橡胶、硅橡胶+十六烷、硅橡胶+十八烷等防冰涂层,其表面的结冰要少于右侧表面的结冰。因此,初步判断:硅橡胶、硅橡胶+十六烷、硅橡胶+十八烷涂层均具有一定的防冰效果,但具体效果需要进一步的定量分析和评估。

分别用 1~9 代表驻点位置结冰厚度、最大结冰厚度、最大结冰宽度、上边缘撞击范围、下边缘撞击范围、上冰角长度、下冰角长度、上冰角角度、下冰角角度等 9 个几何特征量编号。根据式(1)计算该结冰外形的几何特征量偏差,再根据式(2)计算该结冰外形的平均几何特征量偏差。

图 6 给出了状态 1 的结冰外形及其几何特征量偏差,也即未添加纳米颗粒的硅橡胶涂层表面结冰外形,实验条件是来流速度 $V=30\text{ m/s}$ 、结冰环境温度 $t=-7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、结冰时间 $\tau=300\text{ s}$ 。由图 6 可知,表面未涂覆防冰涂层的结冰外形明显比表

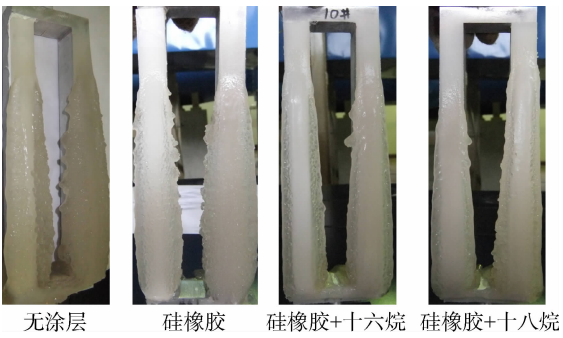


图 5 不同纳米疏水涂层表面的结冰

Fig. 5 Ice accretion on different hydrophobic coatings

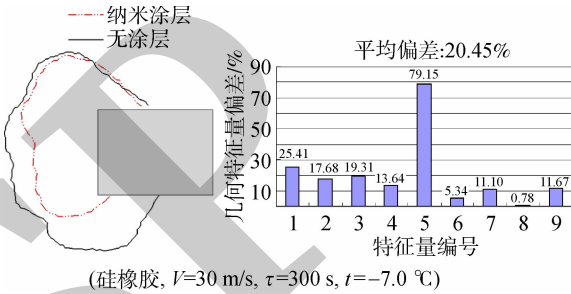


图 6 状态 1 的结冰外形及其几何特征量偏差

Fig. 6 Ice profiles and its geometry characteristics deviation for case 1

面涂覆了硅橡胶涂层的要大。同时,图 6 右图也给出了硅橡胶涂层表面结冰外形的 9 个几何特征量偏差和平均偏差。下边缘撞击范围偏差为 79.15%,偏差较大,说明硅橡胶涂层和无涂层表面在模型下边缘的结冰范围相差很大。上边缘撞击范围、上冰角长度、下冰角长度、上冰角角度和下冰角角度分别为 13.64%、5.34%、11.10%、0.78%、11.67%,偏差小于 15%,说明这些位置的结冰比较接近。而驻点位置结冰厚度、最大结冰厚度、最大结冰宽度分别为 25.41%、17.68%、19.31%,说明这些位置的结冰外形相差较大。结冰外形的平均几何特征量偏差为 20.45%,平均偏差大于 20%。根据本文建立的防冰效果量化评估方法,实验采用的硅橡胶涂层具有一定的防冰效果,防冰效果为“好”。

图 7 给出了状态 2 的结冰外形及其几何特征量偏差,也即往硅橡胶中添加了 20% 十六烷颗粒涂层的表面结冰外形,实验条件是来流速度 30 m/s 、结冰环境温度 $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、结冰时间 300 s 。同样的,表面涂覆了添加十六烷颗粒的硅橡胶涂层的结冰外形明显比表面未涂覆防冰涂层的要小。采用防冰效果量化评估方法对结冰外形特征量偏差数据进行分析,图 7 也给出了该涂层表面结冰

外形的几何特征量偏差和平均偏差。驻点位置结冰厚度偏差为 49.08%，下边缘撞击范围偏差为 59.04%，偏差很大，说明该涂层表面和无涂层表面在驻点和下边缘位置的结冰外形相差很大。结冰外形的平均几何特征量偏差为 21.47%，平均偏差大于 20%，说明该涂层的防冰效果和硅橡胶涂层的相差不大。

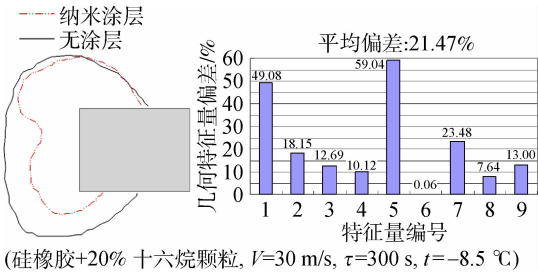


图 7 状态 2 的结冰外形及其几何特征量偏差
Fig. 7 Ice profiles and its geometry characteristics deviation for case 2

图 8 给出了状态 3 的结冰外形及其几何特征量偏差,也就是往硅橡胶中添加了 20% 十八烷颗粒涂层的表面结冰外形,实验条件是来流速度为 30 m/s、结冰环境温度为 -9.0℃、结冰时间为 300 s。未涂覆防冰涂层的表面结冰外形要比涂覆了添加十八烷颗粒的硅橡胶涂层表面结冰外形明显要大。图 8 也给出了该疏水涂层表面结冰外形几何特征量偏差和平均偏差,采用文中所建立的防冰效果量化评估方法对结冰外形特征量偏差进行分析。上边缘撞击范围、下边缘撞击范围偏差分别为 49.63%、47.90%，偏差较大,说明该涂层表面和无涂层表面的模型上下边缘的结冰范围相差较大。结冰外形的平均几何特征量偏差为 20.34%，平均偏差大于 20%，该涂层的防冰效果和前两种涂层的相差不大。

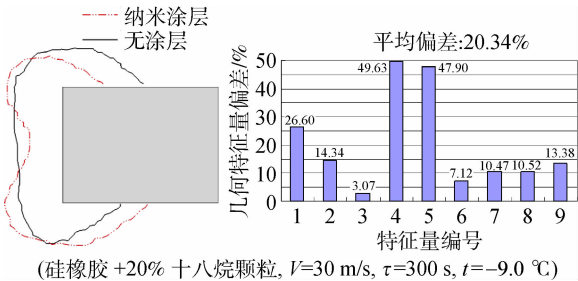


图 8 状态 3 的结冰外形及其几何特征量偏差
Fig. 8 Ice profiles and its geometry characteristics deviation for case 3

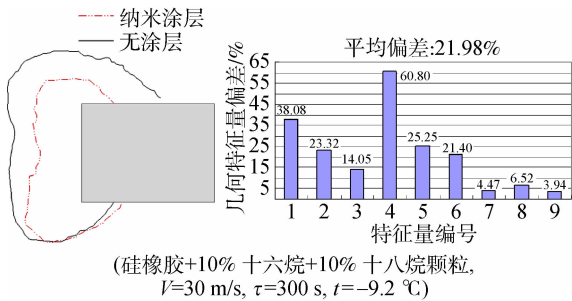


图 9 状态 4 的结冰外形及其几何特征量偏差
Fig. 9 Ice profiles and its geometry characteristics deviation for case 4

图 9 给出了状态 4 的结冰外形及其几何特征量偏差,也即是往硅橡胶中添加了 10% 十六烷和 10% 十八烷颗粒涂层的表面结冰外形,实验条件是来流速度为 30 m/s、结冰环境温度为 -9.2℃、结冰时间为 300 s。硅橡胶+10% 十六烷+10% 十八烷涂层也体现了一定的防冰效果,涂覆了添加十六烷和十八烷颗粒的硅橡胶涂层表面结冰外形要比未涂覆防冰涂层的表面结冰外形明显要小。同样的,由图可知,驻点位置结冰厚度、上边缘撞击范围偏差分别为 38.08%、60.80%，偏差很大,说明该涂层表面和无涂层表面在模型驻点和上边缘位置的结冰外形相差很大。结冰外形的平均几何特征量偏差为 21.98%，平均偏差大于 20%，说明该涂层的防冰效果没有明显改进。

图 10 给出了状态 5 的结冰外形及其几何特征量偏差,也即是硅橡胶+20% 甲基硅油涂层表面结冰外形,实验条件是来流速度为 30 m/s、结冰环境温度为 -8.2℃、结冰时间为 300 s。通过往基底材料硅橡胶中添加甲基硅油颗粒等,期望能增强该涂层的疏水性。采用文中所建立的防冰效果量化评估方法对结冰外形特征量偏差进行分析。由图可知,结冰外形的平均几何特征量偏差为 18.76%，平均偏差大于 15% 小于 20%，说明该涂层的防冰效果为“中”。这种配方的纳米防冰涂层没有达到理想稳定的防冰效果,甲基硅油颗粒略微降低了该涂层的防冰性能。

图 11 给出了状态 6 的结冰外形及其几何特征量偏差,也即是硅橡胶+10% 十六烷+10% 十八烷+10% 甲基硅油涂层表面结冰外形,实验条件是来流速度为 30 m/s、结冰环境温度为 -8.9℃、结冰时间为 300 s。通过往基底材料硅橡胶中添加各种比例的十六烷、十八烷和甲基硅油颗粒等,也期望能增强涂层的防冰性能。结冰外形的

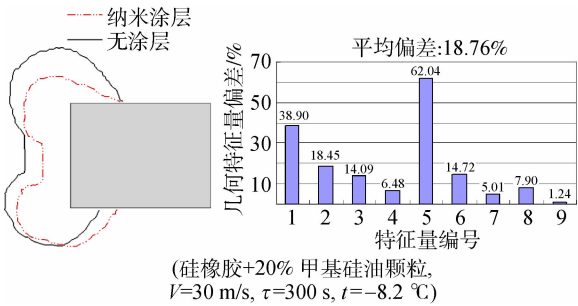


图 10 状态 5 的结冰外形及其几何特征量偏差
Fig. 10 Ice profiles and its geometry characteristics deviation for case 5

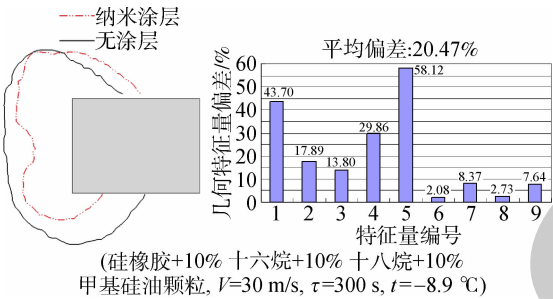


图 11 状态 6 的结冰外形及其几何特征量偏差
Fig. 11 Ice profiles and its geometry characteristics deviation for case 6

平均几何特征量偏差为 20.47%，平均偏差大于 20%，利用文中建立的防冰效果量化评估方法可看出，该涂层的防冰效果并没有得到明显提高，与前面几种纳米疏水涂层的防冰效果相当。与图 10 相比，十六烷、十八烷颗粒的加入稍微提升了该涂层的防冰效果。

从图 6~图 11 均可以看出，在实验模型的迎风面，涂覆防冰涂层表面的结冰外形在前缘区域均出现了凹面，两侧出现了羊角状冰形。这是因为过冷水滴撞击到具有超疏水性能的防冰涂层表面后，过冷水滴无法马上在壁面发生冻结，在来流剪切作用下沿模型前缘两侧往后溢流，边溢流边发生冻结，从而在水滴撞击、水膜溢流过程中逐渐形成了类似于羊角状的结冰外形。所以，在结冰外形的几何特征量偏差上反映出驻点位置的结冰厚度相差较大，也说明涂覆防冰涂层表面的过冷水滴没有立刻发生冻结，而是往两侧溢流形成角状冰。因此，冰角角度和长度存在一定的差异，说明过冷水滴溢流并偏离了驻点位置。

不管是硅橡胶涂层，还是往硅橡胶涂层中添加十六烷、十八烷、甲基硅油等纳米颗粒，所有的涂层都表现出一定的防冰效果，但与基底硅橡胶

涂层基本上相当，添加纳米颗粒的方法并没有明显改进涂层的防冰效果，因此还需要进一步研究其配方。

硅橡胶是一种常用的疏水材料，通常的接触角超过 90° 。往硅橡胶涂层内添加烷烃纳米颗粒，实际上是期望在涂层表面形成更多的微纳乳突结构，增加过冷水滴在疏水涂层表面的接触角，同时减小滚动角。通过对文献[21]的分析，可以发现，当烷烃颗粒在低温条件下析出到涂层表面时，确实可以为涂层表面构筑一些微纳结构(如图 12 所示)，这种微纳结构具有憎水性能，进而也具有一定的防冰效果。但是，由于结冰风洞的结冰气象条件非常恶劣，所以，从实验结果可以发现，这种微纳结构的防冰效果并不能杜绝结冰的发生，而只能延缓和部分减少，与没有涂层的另外一侧模型表面的结冰外形相比，结冰外形的平均几何特征量偏差约 20%，具有一定的防冰效果，但效果并不是非常理想，还需要进一步的改进。

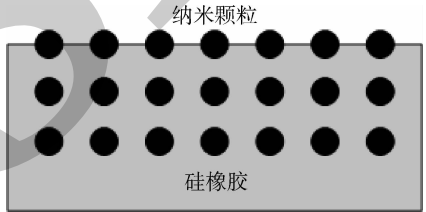


图 12 防冰机理分析示意图
Fig. 12 Sketch of anti-icing mechanism analysis

另外，由于添加纳米颗粒的工艺是采用物理混合搅拌的方法，很难保证在每个硅橡胶涂层表面都形成疏水性能更优的微纳乳突结构，所以，无法根本性改变纳米疏水涂层表面的防冰性能，这也是硅橡胶涂层、硅橡胶涂层添加十六烷、十八烷、甲基硅油等纳米颗粒所形成的涂层表面防冰性能相差不大的原因。

4 结 论

本文采用结冰风洞的实验方法，建立了基于结冰外形几何特征量的防冰效果评估方法，并对几种超疏水涂层表面的防冰效果进行了实验评估，得到了如下结论：

- 1) 基于结冰外形几何特征量的防冰效果量化评估方法合理有效，可以较好地通过结冰风洞实验的方法评估纳米疏水涂层的防冰效果。
- 2) 与未涂覆防冰涂层的铝合金材料相比，硅橡胶及其添加颗粒的纳米涂层均具有一定的防冰

性能,与硅橡胶涂层相比,有的添加颗粒的纳米涂层防冰效果略好一点,而有的略差一点,没有明显提高。甲基硅油颗粒可略微降低该涂层的防冰性能,而十六烷、十八烷颗粒可以稍微提升该涂层的防冰效果。

3) 在硅橡胶基底材料中添加纳米颗粒,可以在涂层表面构筑一些微纳结构,从而起到防冰作用,这是本研究涂层的防冰机理。由于采用物理混合搅拌的方法,纳米颗粒难以在硅橡胶涂层表面形成稳定疏水性能的微纳乳突结构,这是防冰涂层制备需要特别注意的地方。

总而言之,高分子复合材料的纳米涂层通过改善表面的疏水性能从而达到防冰效果,但是疏水性能不等于疏冰性能,涂层表面一旦结冰,表面特性将发生改变,纳米防冰涂层只能降低或延缓涂层表面的结冰速率,但无法杜绝涂层表面的结冰现象。必须对其配方和形成机理进行更深入的研究,才可能获得更好的防冰效果,下一步打算从微观或细观尺度对纳米涂层表面的防冰机理进行研究。

致谢:

感谢中国科学院张晖研究员、李晓冬博士、郭翎硕士的指导。感谢中国科学院国家纳米科学中心提供纳米疏水涂层。感谢中国空气动力研究与发展中心的李明研究员、王政高级工程师、陈辅政工程师、康铭洪工程师等在结冰风洞实验过程中的帮助。

参考文献:

[1] LYNCH F T,KHODADOUST A. Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences,2001,37(8):669-767.

[2] KIND R J,POTAPCZUK M G,FEO A,et al. Experimental and computational simulation of in-flight icing phenomena[J]. Progress in Aerospace Sciences,1998,34(5/6):257-345.

[3] PETTY K R,FLOYD C D J. A statistical review of aviation airframe icing accidents in the U. S[R]. Hyannis, MA;11th Conference on Aviation,Range, and Aerospace,2004.

[4] ANDERSON D N,REICH A D. Tests of the performance of coating for low ice adhesion[R]. AIAA-97-0303,1997.

[5] AYRES J,SIMENDINGER W H,BALIK C M. Characterization of titanium alkoxide sol-gel systems designed for anti-icing coatings: II mass loss kinetics[J]. Journal of Coatings Technology & Research,2007,4(4):473-481.

[6] CAO L L,JONES A K,SIKKA V K,et al. Anti-icing superhydrophobic coatings[J]. Langmuir,2009,25(21):

12444-12448.

[7] KARMOUCH R,COUDÉ S,ABEL G,et al. Icephobic PT-FE coatings for wind turbines operating in cold climate conditions[C]// Proceeding of IEEE Electrical Power & Energy Conference. Halifax,Canada;Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE),2010,1-6.

[8] PETRENKO V,COURVILLE Z. De-icing coating for aerofoils[R]. AIAA 2000-0632,2000.

[9] VARANASI K K,DENG T,SMITH J D,et al. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces[J]. Applied Physic Letters,2010,97(23):234102.1-234102.3.

[10] CAI L,WANG R H,HOU P X,et al. Study on restraining frost growth at initial stage by hydrophobic coating and hygroscopic coating[J]. Energy & Buildings,2011,43(5):1159-1163.

[11] XIAO J,CHAUDHURI S. Design of anti-icing coatings using supercooled droplets as nano-to-microscale probes [J]. Langmuir,the ACS Journal of Surfaces & Colloids,2012,28(9):4434-4446.

[12] ANTONINI C,INNOCENTI M,HORN T,et al. Understanding the effect of superhydrophobic coating on energy reduction in anti-icing system[J]. Cold Regions Science & Technology,2011,67(1/2):58-67

[13] WANG Y,XUE J,WANG Q,et al. Verification of icephobic/anti-icing properties of a superhydrophobic surface [J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2013,5(8):3370-3381.

[14] LIAO W Y,JIA Z D,GUAN Z C,et al. Reducing ice accumulation on insulators by applying semiconducting RTV silicone coating[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(6):1446-1454.

[15] JIANG X L,MA J,ZHANG Z J,et al. Effect of hydrophobicity coating on insulator icing and DC flashover performance of iced insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation,2010,17(2):351-359.

[16] WANG F C,LI C R,LÜ Y Z,et al. Reducing ice accumulation on aluminum conductor by applying superhydrophobic coating[R]. Virginia,USA;IEEE Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena,2009.

[17] 肖春华,胡站伟,桂业伟,等. 疏水涂层表面防冰效果的结冰风洞实验研究[J]. 实验流体力学,2013,27(2):41-45.

XIAO Chunhua, HU Zhanwei, GUI Yewei, et al. Test study on anti-icing effects of hydrophobic coating in icing wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2013,27(2):41-45. (in Chinese)

[18] 肖春华,桂业伟,杜雁霞,等. 电热除冰传热特性的结冰风洞实验研究[J]. 实验流体力学,2010,24(4):22-24.

XIAO Chunhua, GUI Yewei, DU Yanxia, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of aircraft electrothermal deicing in icing wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2010,24(4):21-24. (in Chinese)

[19]

RUFF G A,ANDERSON D N. Quantification of ice accretions for icing scaling evaluations[R]. AIAA-98-0195, 1998.

[20]

DILL L H,CHOO Y K. Representation of ice geometry by parametric functions: construction of approximating

NURBS curves and quantification of ice roughness:year 1 approximating NURBS curves [R]. NASA/CR-2004-213071,2004.

[21]

关丽,张晖,杨延莲,等. 一种具有防覆冰功能的材料及其制备方法和用途:CN201010174289.0[P]. 2010-11-16.

(编辑:李岩梅)