

低频振动对超疏水电热除冰方法的增益效果探究



魏卓,姚井淳,石小鑫,陈增贵,唐亚林,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:飞机结冰会给飞行安全带来严重损害。针对除冰问题,本文提出了一种超疏水电热低频振动复合式除冰方案。通过热压合工艺制备了电热薄膜,以喷涂方式在薄膜上制备了超疏水表面,并在超疏水电热薄膜的基础上复合低频振动器件,完成了超疏水电热低频振动复合除冰装置的设计制备,同时进行了冰风洞验证试验。结果表明,超疏水电热低频振动复合方法能有效除冰。对试验结果进行了理论分析,认为微小功率的低频振动产生的机械剪切作用是促使冰脱落的主要原因。低频振动的添加对超疏水电热复合除冰方案有显著增益效果,在飞机除冰领域有一定的实际应用潜力。

关键词:飞机除冰;超疏水;电热;低频振动;冰风洞

中图分类号:V242

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.11.010

飞机结冰会破坏气动布局^[1]、干扰仪器设备^[2]、劣化操纵性能^[3],影响飞行安全。严重时极易导致飞行事故,造成大量人员伤亡与财产损失^[4-8]。传统的防除冰技术包括防冰液^[9]、气动式^[10]、气热式^[11]、电热式^[12]等,然而这些防除冰技术存在附加装置复杂、能耗过大等明显缺点^[13-15]。针对这些问题,研究人员提出了复合式防除冰技术的概念。

如今研究较多、发展较快的复合式防除冰方法是将主动型电加热方法与被动型超疏水表面^[16-17]相结合的超疏水电热防除冰技术。杨常卫等探讨论证了超疏水表面在电热防除冰系统中的节能原理^[18],介绍了超疏水材料的机理和特点以及超疏水表面的制备方法。G.Fortin等开展了电热与疏水涂层复合防冰技术研究^[19],试验结果表明,复合防冰技术相比纯电热技术降低能耗33%,这是由于疏水表面有助于使水脱离表面,从而减少结冰。C.Antonini等研究了超疏水与电热复合式防除冰节能策略^[20],进行了冰风洞试验,结果表明超疏水涂层的应用显著降低了机翼前缘防冰所需加热功率并有效抑制了溢流冰的产生。T.Wang等设计了一种超疏水石墨烯加热防除冰薄膜^[21],该薄膜利用了全氟化碳的低极化率和石墨烯纳米带的固有导电特性。陈华伟等制备出一种超疏水电热复合防除冰涂层^[22],将商用气相二氧化硅用氟硅

烷改性,再与树脂、导热颗粒按适当比例混合,提出了一种新的复合防除冰技术设计思路。A.Dolatabadi等通过冰风洞试验研究了超疏水电热蒙皮的防除冰性能^[23]。试验表明,与铝制翼型相比,超疏水表面翼型可在-10℃下完成防冰,并且可以降低50%的防冰能耗。陈增贵等通过冰风洞试验证实超疏水电热复合技术在显著降低能耗的同时能很好地抑制溢流冰,并从冰黏附的角度揭示了抑制溢流冰的原理^[24],且在冰风洞试验中发现,超疏水电热复合系统在达到一定加热功率时,蒙皮表面的冰黏附强度很低,但仍需提供较多功率才能使积冰脱落而完成除冰^[25]。

在超疏水电热复合系统将冰黏附强度降到一定程度时,提供微小功率的机械作用即可使积冰脱落,由此提出在超疏水电热方法上再复合低频振动的复合除冰方法,冰风洞试验表明低频振动的增益效果明显,并阐释了振动辅助除冰的原理。

1 超疏水电热低频振动复合除冰装置设计制备

超疏水电热低频振动复合除冰装置由超疏水表面、电加热薄膜和微致动器三个部分构成。电加热薄膜的制备过

收稿日期: 2022-04-20; 退修日期: 2022-06-11; 录用日期: 2022-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(51875478, 52111530127); 航空科学基金(2017ZC53036); 翼型、叶栅空气动力学重点实验室基金(6142201200403)

引用格式: Wei Zhuo, Yao Jingchun, Shi Xiaoxin, et al. Study on gain effect of low frequency vibration on superhydrophobic electrothermal de-icing method[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(11): 70-75. 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.

程如图1(a)所示,通过在下层PI绝缘层上沉积康铜金属层,湿法刻蚀金属层后形成加热线路,再热压合上层PI绝缘层的方式制成。线路设计如图1(b)所示,制备完成的电热膜厚度仅 $50\mu\text{m}$,延展性良好,柔软易贴附。

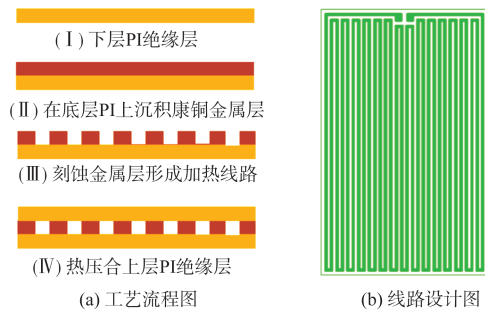


图1 电热薄膜设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrothermal film design

参照参考文献[24]的方法,在电热薄膜上表面均匀喷涂超疏水涂料获得超疏水表面。超疏水性能由接触角的大小来表征,如图2所示,制备出的超疏水表面接触角为 152.5° 。

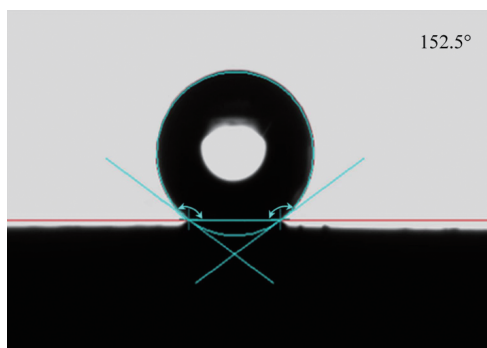


图2 超疏水表面接触角测量图

Fig. 2 Contact angle measurement diagram of super hydrophobic surface

根据偏心振动原理,产生低频振动^[25]。在设计时,致动器的振动频率必须避开装置固有频率,避免发生共振从而破坏试验装置。因此需对已贴装超疏水电热薄膜的平板进行模态测试。试验装置主体为 $320\text{mm}\times 100\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的复材平板。采用力锤敲击的方法进行模态测试,如图3所示,在平板上均匀选取若干点进行标记,使用力锤敲击,利用加速度传感器依次采集到各点的加速度变化,使用软件进行分析。

模态测试结果如图4所示,试验装置的一阶固有频率约 90Hz 。根据振型以及曲线复杂程度分析, $130\sim 150\text{Hz}$ 频段是局部共振段。设计时应避开一阶固有频率以及局部共振频率,以避免共振破坏试验装置。因此选择 110Hz 作为致动器的激励频率。

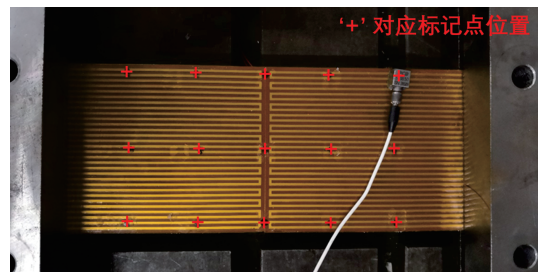


图3 力锤敲击法

Fig. 3 Hammer percussion method

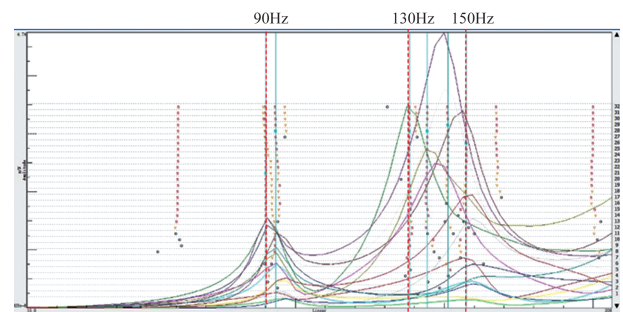


图4 模态测试结果图

Fig. 4 Diagram of modal test results

考虑试验装置的材料力学性质,将致动器振幅选取为 $20\mu\text{m}$ 。最终设计的微致动器如图5所示,设计尺寸为 $20\text{mm}\times 20\text{mm}$,质量为 10g 。

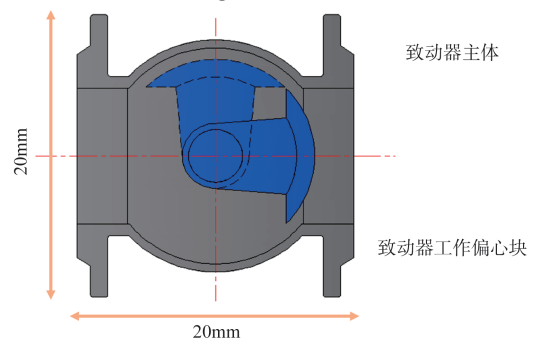


图5 低频振动致动器

Fig. 5 Low frequency vibration actuator

完成的超疏水电热低频振动复合除冰装置如图6所示。电加热薄膜布置在试验平板外侧,薄膜表面均匀喷涂超疏水涂层,通过连接件将单个低频振动致动器固定在试验平板内侧的几何中心。

2 试验平台、系统搭建及参数设置

2.1 冰风洞试验平台

在西北工业大学翼型、叶栅空气动力学国家级重点实验室的GS-3000F冰风洞开展验证试验。GS-3000F风洞是低速回流式风洞,基本结构如图7所示,基本参数见表1。

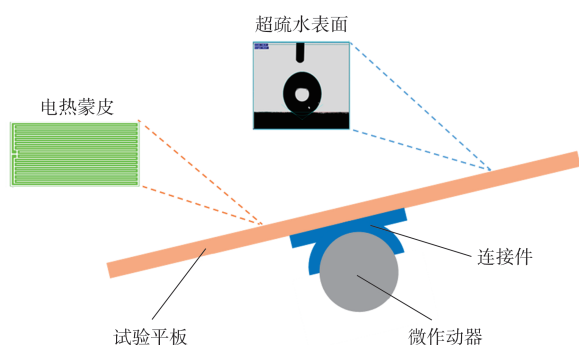
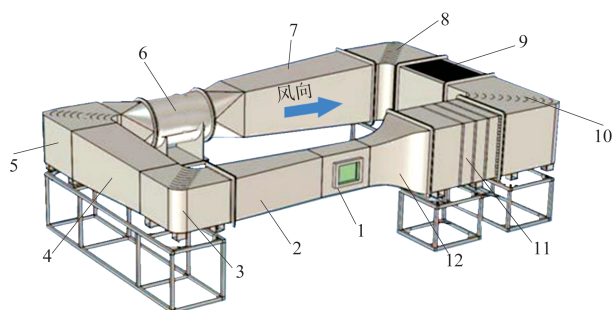


图6 超疏水电热低频振动复合除冰装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of superhydrophobic electrothermal low-frequency vibration compound deicing device



1-试验段;2-第一扩散段;3-第一拐角段;4-第二扩散段;5-第二拐角段;6-风机段;7-第三扩散段;8-第三拐角段;9-换热段;10-第四拐角段;11-稳定段;12-收缩段

图7 GS-3000F冰风洞基本结构

Fig.7 Basic structure of GS-3000F ice wind tunnel

表1 GS-3000F冰风洞性能参数

Table 1 GS-3000F ice wind tunnel performance parameters

试验段有效尺寸/mm	外形尺寸/mm	温度范围/℃	风速范围/(m/s)	降温速率/(℃/min)	喷嘴数/个
650×300×500	5700×3400×2000	10℃~ -25℃	5~18	≥2	5

2.2 试验系统

如图8所示,试验系统主要包括冰风洞、试验模型、直流电源、上位机、摄像机等。试验模型用于验证超疏水/电热/低频振动复合除冰方法,直流电源用于提供除冰系统所需能量,并通过相机记录完整除冰过程。

2.3 试验参数

选择CCAR-25部附录C标准中的典型结冰气象条件,平板与来流方向保持30°夹角。在相同条件下进行两次试验:(1)超疏水/电热除冰试验;(2)超疏水/电热/低频振动除冰试验,试验参数见表2。

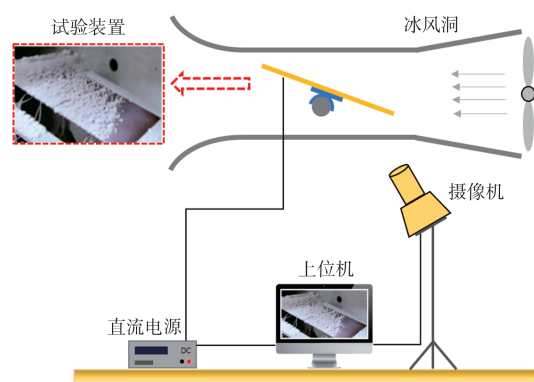


图8 冰风洞试验系统

Fig.8 Ice wind tunnel test system

表2 冰风洞试验参数

Table 2 Ice wind tunnel test parameters

$T/^\circ\text{C}$	$V/(\text{m/s})$	$\text{LWC}/(\text{g/m}^3)$	$\text{MVD}/\mu\text{m}$
-12	15	0.697	18.74

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

3.1.1 超疏水/电热除冰试验

除冰过程如图9所示。此时,电加热膜工作电压为28V,电流为1.2A,功率为33.6W。试验结果表明,在1min内积冰未发生脱落,判定除冰无效。

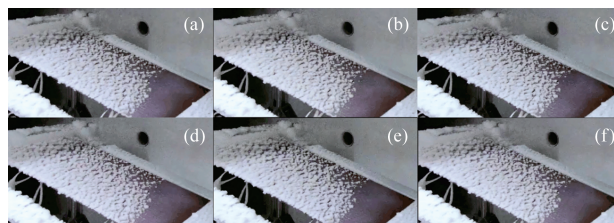


图9 超疏水/电热除冰方法除冰过程

Fig.9 Superhydrophobic/electrothermal deicing process

3.1.2 超疏水/电热/低频振动除冰试验

除冰过程如图10所示。此时,电加热膜工作电压为28V,电流为1.2A,功率为33.6W。微致动器工作电压为1.2V,工作电流为0.5A,功率为0.6W。试验结果表明,除冰系统开启后积冰即开始脱落,并最终在30s内全部脱落,判定除冰有效。

两次试验的总功率分别为33.6W和34.2W。低频振动所需功率为0.6W,只占到电热功率33.6W的1.8%,以微小功率产生了显著的除冰效果差异,因此认为低频振动对超疏水/电热除冰系统有明显的增益作用。

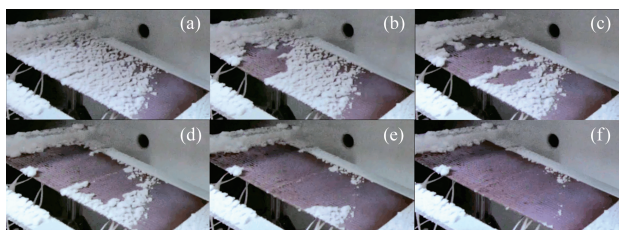


图10 超疏水/电热/低频振动除冰方法除冰过程图

Fig.10 Superhydrophobic/electrothermal/low-frequency vibration deicing process diagram

3.2 低频振动作用形式分析

由于平板与冰层的厚度均远小于其长度与宽度,因此可将其近似等效为薄板模型,薄板受到横向载荷的作用而发生弯曲,根据克希霍夫假设,薄板变形后,其中面在垂直方向上的投影形状保持不变,如图11所示。

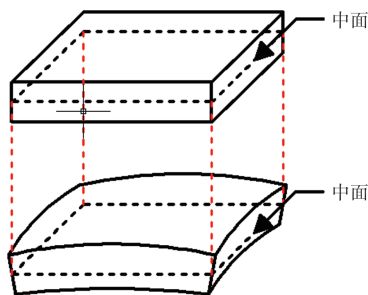


图11 薄板中面理论

Fig.11 Thin plate midplane theory

建立连接层受力断裂的除冰模型^[26],将冰层分为两部分,取与平板表面接触的极薄一层冰作为连接层,该连接层只能传递剪切力,如图12所示。若不定义连接层,在低频振动作用时冰层与平板会分别满足薄板弯曲模型而产生相对位移。但在试验过程中,冰层脱落之前并未与平板发生相对位移,因此须定义连接层。

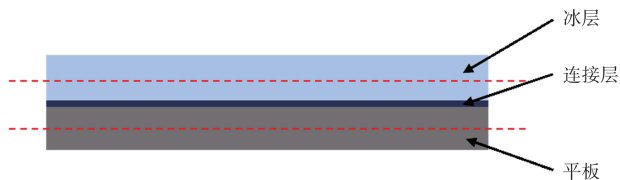


图12 有连接层的除冰模型

Fig.12 Deicing model with connecting layers

假设平板内的应力分布符合伯努利-欧拉假设。在此分析以及假设上建立冰-平板结构的力学模型,如图13所示。

冰层与平板发生弯曲变形后沿 z 方向产生线性分布的应力,单次振动产生与传递的力矩如式(1)所示

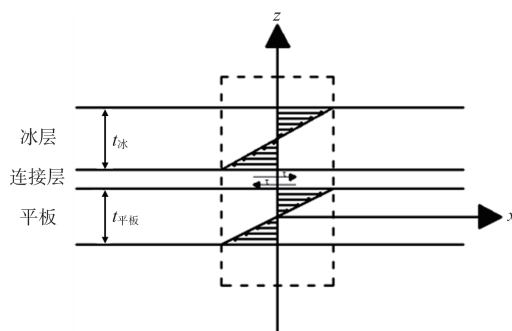


图13 冰-平板结构的力学模型

Fig.13 Mechanical model of ice-plate structure

$$M(x) = \int_{-t/2}^{+t/2} [2\sigma(x)z/t]zdz = (t^2/6)\sigma(x) \quad (1)$$

式中, σ 为平板与冰层所受的正应力; t 为平板的厚度。从模型中抽取一个微元进行分析,列出微元平衡方程,如式(2)所示

$$M + \tau \cdot \frac{t}{2} = 0 \quad (2)$$

联立式(1)、式(2)可得式(3)

$$\tau = -\frac{t\sigma(x)}{3} \quad (3)$$

式中,负号表示方向,正应力 $\sigma(x)$ 由平板的形变即振动的振幅决定。式(3)表明,在平板厚度不变时,冰层受到的平板剪切力的大小取决于低频振动的振幅。在致动器按一定频率工作时,连接层会受到剪切力冲量的累积作用,导致冰与平板的黏附强度不断降低,最终从表面脱落。这就是超疏水电热薄膜除冰失效,而复合微小功率低频振动即可成功除冰的原因。

4 结束语

本文针对飞机除冰问题,提出了用低频振动辅助超疏水电热薄膜的复合除冰方案,并通过冰风洞试验对该复合方案进行了验证,结果表明低频振动对超疏水电热薄膜的除冰效果有明显的增益作用。低频振动通过提供微小功率的机械作用,破坏超疏水电热膜表面的积冰黏附,使表面冰层成功脱落,在飞机除冰领域有一定的工程应用潜力。

AST

参考文献

- [1] 陈宇,罗艳春,刘国庆,等.飞机结冰对飞行安全的影响[J].装备制造技术,2014(5):254-255.
Chen Yu, Luo Yanchun, Liu Guoqing, et al. Aircraft icing effect on flight safety[J]. Equipment Manufacturing Technology,

- 2014(5):254-255.(in Chinese)
- [2] 罗茜,王亚莉.飞机结冰对于飞行安全的重大危害分析[J].科技视界,2012(20):125-126.
- Luo Xi, Wang Yali. Analysis on the significant harm of aircraft icing to flight safety[J]. Science & Technology Vision, 2012 (20):125-126. (in Chinese)
- [3] 魏扬,徐浩军,薛源,等.机翼前缘积冰对大飞机操稳特性的影响[J].北京航空航天大学学报,2019,45(6):1088-1095.
- Wei Yang, Xu Haojun, Xue Yuan, et al. Influence of ice accretion on leading edge of wings on stability and controllability of large aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(6): 1088-1095. (in Chinese)
- [4] 战培国.美国SAE飞机结冰研究标准综述[J].标准科学,2019 (10):152-156.
- Zhan Peiguo. Review of American SAE standards on aircraft icing research[J]. Standard Science, 2019(10):152-156. (in Chinese)
- [5] 王洪伟.失速警告装置防冰冰风洞试验验证技术研究[J].航空科学技术,2021,32(10):61-67.
- Wang Hongwei. Research on anti-icing validation technology through icing wind tunnel test for stall warning device[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(10): 61-67. (in Chinese)
- [6] 常磊.飞机积冰与航空安全[J].航空科学技术,2009,11(5): 12-14.
- Chang Lei. Aircraft ice accumulation and aviation safety[J]. Aeronautical Science & Technology, 2009, 11(5): 12-14. (in Chinese)
- [7] 李林,王立新,彭小东.结冰对民机飞行性能的影响研究[J].飞行力学,2004,22(3):12-16.
- Li Lin, Wang Lixin, Peng Xiaodong. The effect of icing on the flight performance of civil airplane[J]. Flight Dynamics, 2004, 22(3):12-16. (in Chinese)
- [8] 战培国.NASA结冰试验设备体系综述[J].航空科学技术, 2021,32(5):1-6.
- Zhan Peiguo. Review on the system of icing facilities in NASA[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(5):1-6. (in Chinese)
- [9] Jung J M, Lee D H, Cho Y I. Non-newtonian standard viscosity fluids[J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2013,49:1-4.
- [10] Weisend J, Norbert A. Design of an advanced pneumatic deicer for the composite rotor blade[J]. Journal of Aircraft, 1989, 26 (10): 947-950.
- [11] 贺继林,杨勤,何清华.飞机发动机进气管热气防冰研究[J].现代制造工程,2011(2):115-118.
- He Jilin, Yang Qin, He Qinghua. Research on the steam anti-icing of the aircraft engine[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011(2):115-118. (in Chinese)
- [12] Mohseni M, Amirfazli A. A novel electrothermal anti-icing system for fiber-reinforced polymer composite airfoils[J]. Cold Regions Science & Technology, 2013,87:47-58.
- [13] 王毅,元辛,张峰.飞机机翼防除冰系统研究进展[J].河南科学,2012,30(9): 1246-1250.
- Wang Yi, Yuan Xin, Zhang Feng. The development of the wing ice protection system[J]. Henan Science, 2012, 30(9): 1246-1250. (in Chinese)
- [14] 王冠,张德远,陈华伟.飞机防冰:从传统到仿生的发展[J].工业技术创新,2014,1(2): 241-250.
- Wang Guan, Zhang Deyuan, Chen Huawei. The development of aircraft anti-icing: from traditional to bionic[J]. Industrial Technology Innovation, 2014, 1(2): 241-250. (in Chinese)
- [15] 王晋,纪双英,益小苏,等.飞行器防/除冰技术研究进展[J].航空制造技术,2015(S2):30-32+35.
- Wang Jin, Ji Shuangying, Yi Xiaosu, et al. Progress of the aircraft anti-icing /de-icing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(S2):30-32+35. (in Chinese)
- [16] Shi Xiaoxin, Lyu Xianglian, Lu Jiangbo, et al. Anti-icing polyimide thin film with microcolumns fabricated by RIE with cooling and PCVD[J]. Micro & Nano Letters, 2022,17(1):1-8.
- [17] 赵一鉴,燕则翔,苏建民,等.仿生防冰表面研究进展[J].表面技术,2021,50(10):29-39.
- Zhao Yijian, Yan Zexiang, Su Jianmin, et al. Research progress of biomimetic anti-icing surface[J]. Surface Technology, 2021, 50(10): 29-39. (in Chinese)
- [18] 杨常卫,胡和平,马艳玲,等.直升机旋翼桨叶防/除冰技术新思路[J].直升机技术,2009(3): 47-51.
- Yang Changwei, Hu Heping, Ma Yanling, et al. An new idea on anti-icing and de-icing of helicopter rotor blade[J]. Helicopter Technique, 2009(3): 47-51. (in Chinese)
- [19] Fortin G, Adomou M, Perron J. Experimental study of hybrid anti-icing systems combining thermoelectric and hydrophobic

- coatings[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 38 (3): 281-283.
- [20] Antonini C, Innocenti M, Horn T. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67(1-2): 58-67.
- [21] Wang T, Zheng Y, Raji A R, et al. Passive anti-icing and active de-icing films[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8 (22):14169-14173.
- [22] 陈华伟,寇维鹏,张德远,等. 一种超疏水涂层与加热涂层复合的节能防除冰涂层制备方法: 中国, CN105032731A[P]. 2015-11-11.
- [23] De Pauw D, Dolatabadi A. Effect of superhydrophobic coating on the anti-icing and de-icing of an airfoil[J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(2): 490-499.
- [24] 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)
- [25] 姚井淳. 超疏水/电热/低频振动对冰黏附强度影响规律研究[D]. 西安:西北工业大学, 2021.
- Yao Jingchun. The effect of superhydrophobicity/ electric heating/low-frequency vibration on ice adhesion strength[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021. (in Chinese)
- [26] 白天,朱春玲,苗波,等. 平面铝板上的压电振动除冰方法[J]. 航空学报, 2015, 36(5):1564-1573.
- Bai Tian, Zhu Chunling, Miao Bo, et al. Vibration de-icing method with piezoelectric actuators on flat aluminum plate[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(5): 1564-1573. (in Chinese)

Study on Gain Effect of Low Frequency Vibration on Superhydrophobic Electrothermal De-icing Method

Wei Zhuo, Yao Jingchun, Shi Xiaoxin, Chen Zenggui, Tang Yalin, Lyu Xianglian, He Yang

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

Abstract: Icing on an aircraft can seriously impair flight safety. A hybrid de-icing scheme composed of superhydrophobic, electrothermal and low-frequency vibration method is proposed to solve the problem of de-icing. The electrothermal film is prepared by hot pressing process, and the superhydrophobic surface is prepared by spraying on the film, and the low-frequency vibration device is designed and prepared. An ice wind tunnel test is carried out, and the results show that the hybrid scheme composed of superhydrophobic, electrothermal and low-frequency vibration method can effectively deice. According to the theoretical analysis of the experimental results, it is believed that the main reason for ice shedding is the mechanical shear action caused by low frequency vibration of small power. In conclusion, the addition of low frequency vibration has significant gain effect on the superhydrophobic electrothermal de-icing method, which has practical application potential in the field of aircraft de-icing.

Key Words: aircraft de-icing; superhydrophobic; electrothermal; low-frequency vibration; ice wind tunnel

Received: 2022-04-20; **Revised:** 2022-06-11; **Accepted:** 2022-08-18

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51875478, 52111530127); Aeronautical Science Foundation of China(2017ZC53036); Foundation of National Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamic Design and Research (6142201200403)