

冻黏系统中非金属基底对结冰黏附强度的影响

金敬福^{1,2}, 代雨^{1,2}, 王家旭^{1,2}, 闻秀华^{1,2}, 陈奕颖^{1,3}, 陈廷坤^{1,2,4,5}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 3. 吉林建筑大学土木工程学院, 长春 130022; 4. 结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000; 5. 四川省全电通航飞行器关键技术工程研究中心, 四川 广汉 618307)

摘要: 本文选用聚四氟乙烯、聚氨酯、聚丙烯、聚甲基丙烯酸甲酯4种非金属材料作为黏附基底, 研究不同非金属基底材料对切向结冰黏附强度的影响。首先, 测量不同非金属基底表面的静态接触角及表面硬度; 其次, 利用自制试验装置, 在-20℃环境下, 测量5 mL附着水冻结1 h后的切向结冰黏附强度。试验结果表明: 覆冰在4种非金属基底表面的切向结冰黏附强度分别为82.89、45.26、99.53、151.27 kPa。4种非金属材料表面的切向结冰黏附强度与表面润湿性不存在线性关系, 但与材料硬度呈正线性相关。分析认为, 水在材料表面冻结过程中发生相变膨胀现象; 在低温环境下, 低硬度材料遇冷易收缩。在冰-固黏附系统中, 与覆冰接触的材料表面产生微变形, 该变形会干扰冰与基底之间黏附界面的稳定性, 降低冰在非金属基底表面的切向结冰黏附强度。本文可为工程领域中防/除冰技术开发与优化提供理论支持, 尤其为待防/除冰部件中非金属材料的选择提供参考。

关键词: 结冰黏附; 非金属材料; 切向结冰黏附强度; 表面特性; 相变; 界面稳定性

中图分类号: TB131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)10-3423-06

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240096

Influence of non-metallic materials in freezing adhesion system on shear ice adhesion strength

JIN Jing-fu^{1,2}, DAI Yu^{1,2}, WANG Jia-xu^{1,2}, WEN Xiu-hua^{1,2}, CHEN Yi-ying^{1,3}, CHEN Ting-kun^{1,2,4,5}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. School of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 4. Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing, Mianyang 621000, China; 5. Sichuan Key Technology Engineering Research Center for All-electric Navigable Aircraft, Guanghan 618307, China)

Abstract: In this paper, four non-metallic materials, polytetrafluoroethylene, polyurethane, polypropylene, polymethyl methacrylate, were selected as adhesion substrates to study the effect of different non-metallic

收稿日期: 2024-01-25.

基金项目: 结冰与防除冰重点实验室开放课题项目(IADL20230104); 国家自然科学基金青年项目(52205309); 吉林省科技厅项目(20220101215JC); 吉林大学研究生创新基金项目(2024CX213); 四川省全电通航飞行器关键技术工程研究中心开放课题项目(CAFUC202401KF001).

作者简介: 金敬福(1978-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 工程仿生学及表面与界面效应分析. E-mail: jinjingfu@jlu.edu.cn

通信作者: 陈廷坤(1989-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 工程仿生学及防冻黏机理. E-mail: chentk@jlu.edu.cn

substrate materials on shear ice adhesion strength. Firstly, the static contact angle of the non-metallic substrate surfaces and the surface hardness of different substrates were measured; secondly the shear ice adhesion strength of 5 mL of water frozen at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1 h was measured by a self-made experiment device. The test results showed that the shear ice adhesion strengths on the four non-metallic substrate surfaces were 82.89, 45.26, 99.53, 151.27 kPa, respectively. The shear ice adhesion strength on the non-metallic substrate surface was not linearly to surface wettability, but positively linearly related to the hardness. It was found that the water attached to the substrate surface could undergo phase transformation during the freezing process; in low-temperature environments, low-hardness materials could be prone to shrinkage when exposed to cold. In an ice-solid adhesion system, the micro-deformation would occur on the substrate surface in contact with the accreted ice. This deformation interferes with the stability of the adhesion interface between the ice and the substrate. Hence, the shear ice adhesion strength on the non-metallic substrate surface would be reduced. This paper could provide theoretical support for the development and optimization of the anti/de-icing method in the engineering field, especially for the selection of non-metallic materials in the components to be anti/de-iced.

Key words: ice adhesion; non-metallic material; shear ice adhesion strength; surface property; phase transformation; interface stability

0 引言

在冬季或低温环境下,水滴会在固体表面发生相变并冻结成冰。部件表面覆冰不仅会遮挡工作部件、改变部件表面形貌、增加工作部件载荷、限制机械部件自由度,还会给航空、电力运输、船舶、农产品冷藏设备、高铁等行业领域带来严重影响^[1-6]。例如,2008年我国发生的冷冻灾害导致线缆断裂、输送塔倒塌,并引起电网大面积瘫痪,造成1 500余亿元的直接经济损失^[3,7]。为降低结冰黏附对工程领域的危害,研究人员已开发了多种防/除冰方法。根据工作原理,常规防/除冰技术可分为机械类、热融类、化学类及新型防/除冰涂层^[8-12]。虽然常规防/除冰技术在工程领域中应用广泛且具有良好的效果,但通常以高能耗、高成本、污染环境及腐蚀部件为代价^[13-15]。基于荷叶效应开发的超疏水防/除冰涂层因在耐久性、稳定性和力学强度等方面存在不足,实际应用受到限制^[16-19]。

在低温环境下,附着水在材料表面相变冻结成冰是难以避免的,因此当前结冰领域的研究主要集中在防/除冰方法的开发与优化、结冰过程及结冰黏附强度的影响因素等方面。例如,Jin等^[8]通过改变内置溶液浓度实现结冰时间的错位,从而破坏结冰界面,达到降低结冰黏附强度的效果;Chen等^[20]研究发现,结冰过程中会产生相变潜热且水体会发生膨胀,利用其产生的热能和膨胀势

能可以有效降低结冰黏附强度;Momen等^[21]在结冰风洞内探究了单位体积水含量对冰黏附强度的影响,发现随着环境含水量的增加,冰黏附强度逐渐降低;王国刚等^[22]测试了不同冻结时间下抛光铝表面的冰黏附强度,试验结果表明,抛光铝表面的冰黏附强度随着冻结时间的延长而逐渐增大,最终趋于稳定。在相同的冻结条件下,随着环境温度的降低,冰在基底表面的黏附力逐渐增加;但随着环境温度持续降低,基底表面的冰黏附力增加到一定数值后,逐渐达到稳定值^[23,24]。研究人员往往关注如何减小冰的黏附量及降低结冰黏附强度,而忽略了低温黏附系统中黏附基底对结冰黏附强度的影响。

金敬福等^[25]通过在铝基和PMMA基底表面加工弹性涂层后进行黏附强度测试试验,发现弹性涂层的弹性系数及其分布规律会影响结冰黏附强度。因此,本文选用工程中常用的4种非金属材料作为冻黏系统中的黏附基底,结合基底表面特性,探究不同非金属材料对切向结冰黏附强度的影响机理,为工程领域中待防/除冰部件非金属材料的选择提供支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

为分析非金属材料表面润湿性对黏附强度的影响,试验选用工程中常用的聚四氟乙烯

(Polytetrafluoroethylene, PTFE)、聚氨酯(Polyurethane, PU)、聚丙烯(Polypropylene, PP)、聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl methacrylate, PMMA)4种材料作为试验基底。试验中,试样尺寸均为 50 mm×50 mm×5 mm,且试验基底均经过超声清洗处理。

润湿性可用于反映水滴在材料表面的铺展能力,通常用静态接触角进行表征。因此,试验利用 Dataphysics-OCA20 视频光学接触角测量仪(见图 1),将 5 μL 水滴分别滴加在 4 种非金属材料表面,测量其接触角。每种材料重复测试 10 次,以水在非金属材料表面静态接触角的平均值作为最终表征结果。

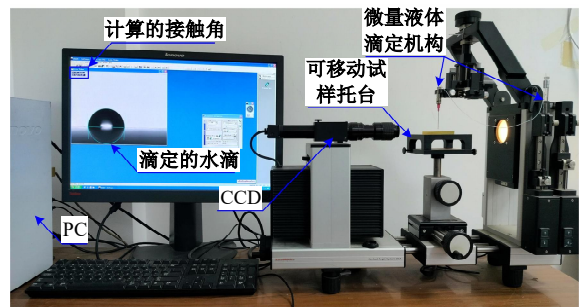


图 1 材料表面接触角测量仪
Fig. 1 Material surface contact angle measuring instrument

通过 560-10D 型数显硬度计测量非金属材料表面不同位置的硬度。

1.2 黏附强度测试装置及方法

本文采用“水杯法”测量冰在不同非金属材料表面的黏附强度。试验采用内径为 32 mm、外径为 40 mm、高度为 41 mm 的铝制水杯,通过上方注水口向水杯内部注入 5 mL 水。将待测试样整体(见图 2(a))置入环境箱内,在-20℃环境下冻结 1 h 后,利用自制结冰黏附强度测量装置(见图 2(b))进行测试。在试验过程中,将覆冰从材料表面剥离时的最大拉力作为该条件下覆冰的切向

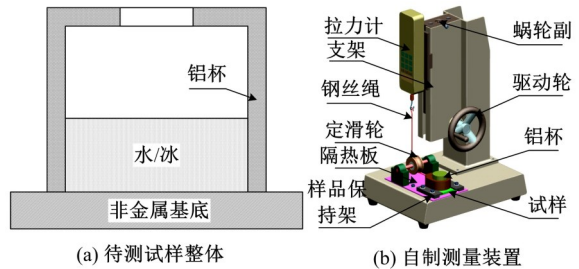


图 2 切向结冰黏附强度测量装置
Fig. 2 Shear ice adhesion strength Measuring device

结冰黏附力。根据式(1)计算覆冰在非金属材料表面的切向结冰黏附强度:

τ=F/S (1)

式中:F为切向结冰黏附力;S为覆冰与材料之间的接触面积,即铝杯内面积。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

2.1.1 接触角测试结果

通过接触角测量,4种不同非金属材料表面的接触角如图 3 所示。结果显示,PTFE 的接触角平均值为 113.49°,PU 的接触角平均值为 105.13°,PP 的接触角平均值为 96.42°,PMMA 的接触角平均值为 81.04°。由图 3 可以看出,PTFE、PU、PP 材料的表面接触角均>90°,呈现疏水特性。

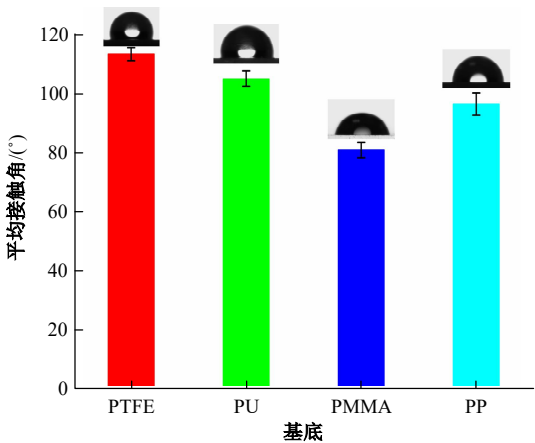


图 3 非金属材料表面的静态接触角
Fig. 3 Static contact angles on the surface of non-metallic materials

2.1.2 材料硬度测试结果

试验中,4种基底材料表面的平均硬度从大到小依次为 PMMA、PP、PTFE、PU,具体数值如表 1 所示。同时,为探究不同非金属材料对结冰黏附强度的影响,通过查阅相关手册确定 4 种材

表 1 4种非金属材料的硬度及弹性模量
Table 1 Hardness and elastic modulus of four non-metallic materials

材料	硬度/HD	弹性模量/ 10 ³ MPa	线膨胀系数/ 10 ⁻⁵ ℃ ⁻¹
PTFE	66	0.4	10~12
PU	41	0.005 5~0.007 4	15.1~17.4
PP	79	1.2~1.6	10.8~11.2
PMMA	82	3	5~6

料^[26,27]的弹性模量及线膨胀系数。弹性模量越大,材料抵抗变形的能力越强,4种非金属材料抵抗变形的能力由强到弱依次为 PMMA、PP、PTFE、PU。在低温环境下,材料的变形量大小顺序与其抵抗变形能力大小顺序相反。

2.1.3 切向结冰黏附强度

利用图 2 所示结冰黏附强度测试装置测试冰在 4 种非金属材料表面的切向结冰黏附强度,并计算每种基底材料表面的平均切向结冰黏附强度,如图 4 所示。由图 4 可以看出,覆冰在非金属材料表面的切向结冰黏附强度并未随表面润湿性的增大而增大,而是与表面硬度近似呈正线性相关。冰在 4 种非金属材料表面的平均切向结冰黏附强度由大到小依次为 PMMA、PP、PTFE、PU,与基底材料表面平均硬度的排序一致。冰在 PMMA 表面的平均切向结冰黏附强度最大,为 151.27 kPa;在 PU、PTFE、PP 基底表面的平均切向结冰黏附强度分别为 45.26、82.89、99.53 kPa。

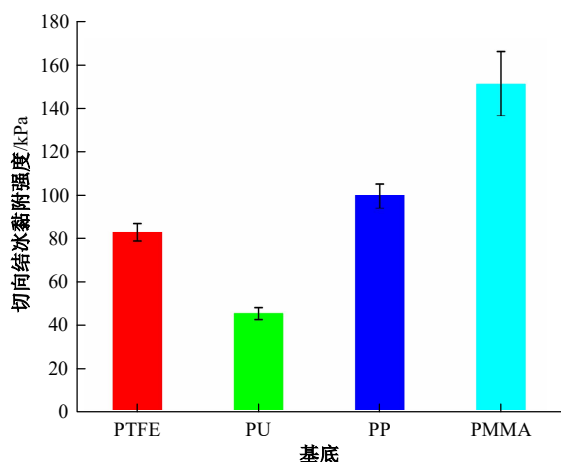


图 4 不同非金属材料表面的切向结冰黏附强度

Fig. 4 Shear ice adhesion strength on surface of different non-metallic materials

2.2 机理分析

由图 4 可以看出,不同非金属材料对其表面平均切向结冰黏附强度具有不同的影响,且表面润湿性越高并不意味着冰在其表面的切向黏附强度越高。同时,基于试验基底表面的润湿性、硬度测量结果及材料弹性模量可以看出,4种非金属材料具有不同的表面特性。由于水在冻结成冰的过程中会伴随相变膨胀,体积增大,且基底材料在低温环境下会收缩。因此,本文基于不同非金属材料表面特性,结合低温环境下水的相变膨胀及材料遇冷收缩特征,探究不同非金属材料对切

向结冰黏附强度的影响机理。

本文利用自制的结冰过程显微观测装置,观察了附着水在非金属材料表面的冻结过程。图 5 为附着水在 PMMA 基底表面的冻结过程。由图 5 可以看出,随着冻结时间的延长,附着水在 PMMA 表面的冻结过程可分为初始阶段(见图 5(a))、润湿及铺展阶段(附着水处于过冷状态,见图 5(b)(c))、冻结锋面出现(开始相变结冰,见图 5(d))、相变并冻结成冰(水与冰混合物,见图 5(e)~(g))及冻结完成(见图 5(h))过程。同时,由图 5 可以看出,随着冻结时间的继续推进,附着水开始相变,内部出现冻结锋面。此时,附着水与 PMMA 基底表面的接触直径明显大于初始状态下二者的接触直径,沿基底表面向外膨胀扩张。当表面附着水完全相变冻结成冰后,冰与基底表面的接触直径仍大于初始状态下附着水与基底的接触直径。这与文献[28]的研究成果一致。

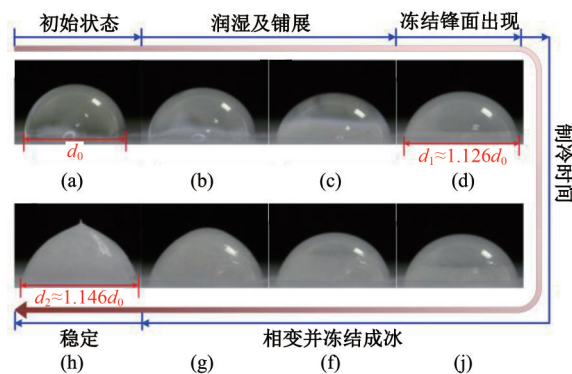


图 5 附着水在 PMMA 基底表面的冻结过程

Fig. 5 Freezing process of attached water on PMMA

虽然附着水在 PTFE 表面的静态接触角大于水在 PU 表面的静态接触角,预期覆冰在 PTFE 表面的切向结冰黏附强度应小于其在 PU 表面的切向结冰黏附强度,但试验结果显示 PTFE 表面的切向结冰黏附强度高于 PU 表面的切向结冰黏附强度。因此,覆冰在材料表面的切向结冰黏附强度并非仅受表面润湿性影响。由表 1 可见,试验中 4 种非金属材料具有不同的弹性模量及线膨胀系数。在低温环境下,4 种非金属材料的收缩性能为 $PU > PTFE > PP > PMMA$ 。课题组前期研究表明,附着水在冻结过程中会沿附界面向外产生界面应变^[29]。

图 6 为非金属材料基底对切向结冰黏附强度的影响机理图。在低温环境下,基底表面的附着水逐渐进入过冷状态,同时基底遇冷向内收缩,产

生收缩应变。随着冻结时间延长,附着水开始相变冻结成冰,并伴随体积膨胀,导致覆冰与基底之间的接触界面增大(见图5),形成沿冻结界面向外的膨胀应变,同时覆冰与基底表面形成稳定的黏附界面。此时,非金属基底遇冷收缩,会破坏冰与基底表面已形成的稳定黏附界面,使黏附界面形成冻结缺陷,影响覆冰在材料表面的黏附稳定性,降低覆冰在材料表面的切向结冰黏附强度。

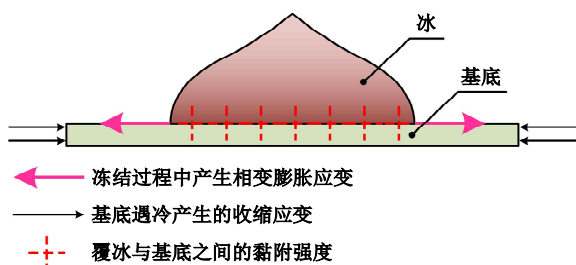


图6 低温环境下非金属材料基底对切向结冰黏附强度的影响

Fig. 6 Effect of non-metallic materials substrate on shear ice adhesion strength in low-temperature environments

由表1可以看出,试验中4种非金属材料的抗变形能力由强到弱依次为PMMA、PP、PTFE、PU,且在相同低温环境下,4种非金属材料的收缩量由大到小依次为PU、PTFE、PP、PMMA。当表面附着水完全冻结后,相较于其他非金属基底,PU基底向内收缩量最大,使得覆冰与非金属基底之间形成的冻结缺陷更大,对其黏附稳定性的影响最大,因此覆冰在PU基底表面形成的切向结冰黏附强度最小。PMMA的线膨胀系数最小、抗变形能力最低,覆冰在PMMA表面形成的稳定黏附界面受PMMA遇冷收缩的影响最小。因此,在4种非金属材料中,冰在PMMA表面的切向结冰黏附强度最大。

3 结束语

本文探究了非金属基底对切向结冰黏附强度的影响。试验结果表明,覆冰在非金属材料表面的切向结冰黏附强度不会随表面润湿性的增加而增加。随着冻结时间的持续,基底表面附着水相变冻结成冰的同时,覆冰与基底表面形成稳定的黏附界面;而非金属基底遇冷收缩,破坏了覆冰与基底表面已形成黏附界面的稳定性,降低了覆冰在材料表面的切向结冰黏附强度。本研究成果有助于工程领域中防/除冰技术的开发与优化,也为

工程领域中不同部件的使用性能及基底材料的选择提供了基本参考,有利于后期降低部件表面覆冰的清除难度和防/除冰成本。

参考文献:

- [1] Chen T K, Dong X J, Han L M, et al. Changing the freezing interface characteristics to reduce the ice adhesion strength[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: No. 120796.
- [2] Caliskan F, Hajiyev C. A review of in-flight detection and identification of aircraft icing and reconfigurable control[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 60: 12-34.
- [3] Lv J Y, Song Y L, Jiang L, et al. Bio-inspired strategies for anti-icing[J]. ACS Nano, 2014, 8(4): 3152-3169.
- [4] Ruan M, Wang J W, Liu Q L, et al. Superhydrophobic and anti-icing properties of sol-gel prepared alumina coatings[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2016, 57(6): 638-645.
- [5] 陈奕颖, 丛茜, 任露泉, 等. 冷藏设备防除冰表面非连续特征设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 261-267.
Chen Yi-ying, Cong Qian, Ren Lu-quan, et al. Design and experiment of the non-continuous anti-icing surface for refrigeration equipment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 261-267.
- [6] 丛茜, 陈廷坤, 孙成彬, 等. 利用冻胀能的农产品冷藏设备防结冰表面优化设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 283-289.
Cong Qian, Chen Ting-kun, Sun Cheng-bin, et al. Design of active de-icing surface for refrigeration equipment of agricultural by-products[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 283-289.
- [7] Jin J F, Chen Y Y, Qi Y C, et al. Changes in the interfacial stress of water on aluminum alloy surface during the freezing and thawing process[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 194: No. 103460.
- [8] Chen T K, Jin J F, Qi Y C, et al. Disturbing stability of interface by adopting phase-change temperature gradient to reduce ice adhesion strength[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 158: 69-75.
- [9] Guerin F, Laforte C, Farinas M I, et al. Analytical model based on experimental data of centrifuge ice adhesion tests with different substrates[J]. Cold Regions

- Science and Technology, 2016, 121: 93-99.
- [10] Rashid T, Khawaja H A, Edvardsenm K. Review of marine icing and anti-/deicing systems[J]. Journal of Marine Engineering and Technology, 2016, 15(2): 79-87.
- [11] Ronneberg S, Xiao S B, He J Y, et al. Nanoscale correlations of ice adhesion strength and water contact angle[J]. Coatings, 2020, 10(4): No. 379.
- [12] Zhang P, Lv F Y. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications[J]. Energy, 2015, 82: 1068-1087.
- [13] Borrebaek P O A, Jelle B P, Zhang Z L. Avoiding snow and ice accretion on building integrated photovoltaics - challenges, strategies, and opportunities [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 206: No. 110306.
- [14] Tong W, Xiong D S, Wang N, et al. Mechanically robust superhydrophobic coating for aeronautical composite against ice accretion and ice adhesion[J]. Composites Part B—Engineering, 2019, 176: No. 107267.
- [15] Piscitelli F, Chiariello A, Dabkowski D, et al. Superhydrophobic coatings as anti-icing systems for small aircraft[J]. Aerospace, 2020, 7(1): No. 2.
- [16] Zheng S L, Cheng L, Fu Q, et al. Development of stable superhydrophobic coatings on aluminum surface for corrosion-resistant, self-cleaning, and anti-icing applications[J]. Materials and Design, 2016, 93: 261-270.
- [17] Kulinich S A, Farzaneh M. On ice-releasing properties of rough hydrophobic coatings[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65: 60-64.
- [18] Wang F J, Shen T H, Li C Q, et al. Low temperature self-cleaning properties of superhydrophobic surfaces[J]. Applied Surface Science, 2014, 317: 1107-1112.
- [19] Kulinich S A, Farhadi S, Nose K, et al. Superhydrophobic surfaces are they really ice-repellent[J]. Langmuir, 2011, 27: 25-29.
- [20] Chen T K, Cong Q, Li Y, et al. Utilizing swelling force to decrease the ice adhesion strength[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 146: 122-126.
- [21] Momen G, Jafari R, Farzaneh M. Ice repellency behaviour of superhydrophobic surfaces: Effects of atmospheric icing conditions and surface roughness[J]. Applied Surface Science, 2015, 349: 211-218.
- [22] 王国刚, 穆静静, 周红未, 等. 覆冰垂直粘结强度的测试研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(2): 282-284.
- Wang Guo-gang, Mu Jing-jing, Zhou Hong-wei, et al. Experimental study on vertical adhesion strength of ice cover[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(2): 282-284.
- [23] Chen T K, Cong Q, Sun C B, et al. Influence of substrate initial temperature on adhesion strength of ice on aluminum alloy[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 148: 142-147.
- [24] Raraty L E, Tabor D. The adhesion and strength properties of ice[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1958, 245(1241): 184-201.
- [25] 金敬福, 李杨, 陈廷坤, 等. 涂层弹性模量对结冰附着强度的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2017, 47(5): 1548-1553.
- Jin Jing-fu, Li Yang, Chen Ting-kun, et al. Effect of elastic modulus of coating on ice-adhesion strength on substrate[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2017, 47(5): 1548-1553.
- [26] 成大先. 机械设计手册-第一册(第六版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [27] 山西省化工研究所. 聚氨酯弹性体手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [28] 金敬福, 韩丽曼, 曹敏, 等. 水滴结冰相变体积膨胀规律[J]. 吉林大学学报:工学版, 2016, 46(5): 1546-1551.
- Jin Jing-fu, Han Li-man, Cao Min, et al. Volume expansion rule of water droplets during process[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5): 1546-1551.
- [29] 陈奕颖, 金敬福, 王家旭, 等. 冻结过程冰黏附界面应力特性规律与分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2022, 52(10): 2466-2473.
- Chen Yi-ying, Jin Jing-fu, Wang Jia-xu, et al. Stress characteristic of ice adhesion interface during freezing process[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(10): 2466-2473.