

机翼防/除冰技术研究进展

胡琪¹, 黄安平¹, 孙涛¹, 韩少奇¹, 官磊², 王玫¹, 肖志松¹

1. 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191
2. 北京航空材料研究院钢与稀贵金属研究所, 北京 100095

摘要 在复杂的气象条件下飞机机翼容易出现结冰现象, 结冰会导致机翼的气动布局改变, 恶化飞机的气动特性与飞行性能, 影响飞行安全, 因此开展飞机机翼的防/除冰技术研究意义重大。介绍了机翼结冰的主要部位、典型冰形及其危害, 采用 FLUENT 软件计算分析了 2 种典型翼型 NACA23012 和 NACA0012 结冰前后的气动特性变化, 总结了机翼结冰对飞机气动特性的影响规律, 阐述了机翼防/除冰技术的原理、优缺点及近年的研究进展, 分析了机翼防/除冰技术未来的发展方向。

关键词 机翼; 防/除冰; 疏水涂层防冰; 电脉冲除冰; 电热防/除冰

中图分类号 V244.1*5

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.07.019

Progress of airfoil anti-icing and de-icing technologies

HU Qi¹, HUANG Anping¹, SUN Tao¹, HAN Shaoqi¹, GUAN Lei², WANG Mei¹, XIAO Zhisong¹

1. School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China
2. Department of Steel and Rare-Noble Metals, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

Abstract In some particular flight environment, ice is easy to adhere to the airfoil and change the aerodynamic configuration of the airfoil. Icing will influence the aerodynamic characteristics and flight performance of the airfoil. Thus it is very important to carry out the research on anti-icing and de-icing technologies of airfoil. The major parts of icing, representative ice types on the airfoil and the damage of icing are introduced respectively in this paper. The aerodynamic characteristics of airfoils NACA23012 and NACA0012 before and after icing are analyzed using the software of FLUENT. Based on them, the principle, advantage, disadvantage and research advances of airfoil anti-icing and de-icing technologies are expounded; The development of the airfoil anti-icing and de-icing technologies is also prospected.

Keywords airfoil; anti-icing and de-icing; hydrophobic coating anti-icing; electro-impulse de-icing; electrothermal anti-icing and de-icing

随着航空技术的快速发展, 飞机的各项性能大幅提升, 在军事和民用的各个领域具有不可替代的作用。飞机的广泛应用提高了飞机的飞行密度, 要求飞机能够应对不同的飞行环境。低温、大雾、雷电等都会严重影响飞机的飞行安全。其中, 低温容易造成飞机表面结冰, 导致飞机各项性能下降, 是危害飞行安全的重要因素之一。

飞机表面结冰是指在温度较低、过冷水滴含量较高的气象条件下, 飞机表面会与大气中的过冷水滴碰撞后形成冰层

的现象^[1]。这不仅会增加飞机的重量, 而且关键部位结冰会危害飞机的飞行安全。飞机表面易结冰的关键部位主要有机翼、水平尾翼、风挡玻璃、大气数据传感器、发动机进气道等。机翼作为飞机产生升力的主要部位, 结冰后平整度和外形发生改变, 气动布局随之改变, 导致飞机升阻比和升力系数下降、起降性能恶化, 严重危害飞机的飞行安全^[2]。

为了保证飞机的飞行安全, 必须设计合适的机翼防/除冰系统。传统的机翼防/除冰系统通常采用机械应力或者加热

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51172009, 51172013, 51372008)

作者简介: 胡琪, 博士研究生, 研究方向为飞机结冰机理和防除冰系统, 电子信箱: huqi1992@buaa.edu.cn; 黄安平(通信作者), 教授, 研究方向为表面材料与器件, 电子信箱: aphuang@buaa.edu.cn

引用格式: 胡琪, 黄安平, 孙涛, 等. 机翼防/除冰技术研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(7): 114-119.

原理,不利于飞机的气动性能而且会增加能耗,亟需改进。本文介绍了飞机机翼结冰的原理及危害,阐述了机翼防/除冰技术的原理与优、缺点,重点介绍了疏水涂层防冰等新型防/除冰方法,并展望了机翼防/除冰技术的未来发展方向。

1 机翼结冰的主要部位及典型冰型

1.1 机翼结冰的主要部位

机翼结冰的主要部位包括机翼前缘与机翼的上下翼面。当飞机穿过含有过冷水滴的云层时,如果机翼表面温度低于 0°C ,过冷水滴会与机翼碰撞并聚集在机翼表面形成冰层,导致结冰现象发生^[5]。碰撞过程中,机翼前缘与过冷水滴的接触面积最大,在气流的作用下过冷水滴绕过了机翼翼面,因此机翼前缘较机翼翼面更易结冰,如图1所示。当云中的过冷水滴含量很高时,水滴的运动受气流和机翼的影响较小,运动轨迹趋于平直,过冷水滴与机翼表面碰撞的面积较大,机翼翼面也会出现比较严重的结冰现象^[4]。

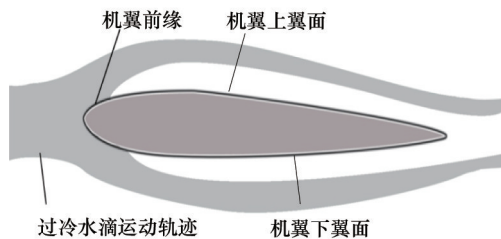
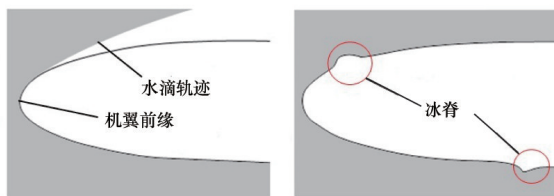


图1 机翼处过冷水滴运动轨迹示意

Fig. 1 Schematic diagram of the motion trail of supercooled water droplets on the airfoil

此外,当机翼前缘除冰系统提供的热量不足时,冰层融化后的液态水会在气流吹拂下回流,转而在机翼未设热防护的上下翼面区域重新结冰并形成冰脊,如图2所示^[5]。



(a) 过冷水滴运动轨迹 (b) 冰脊

图2 机翼翼面结冰示意

Fig. 2 Schematic diagrams of icing on airfoil

飞机的飞行姿态及气流方向也会影响机翼上下翼面的结冰过程,如图3所示。当飞机平飞时,由于气流的作用,机翼翼面不容易与过冷水滴碰撞,此时机翼的上下翼面均不容易结冰;当飞机爬升时,机翼的下翼面作为迎风面与过冷水滴大面积碰撞,容易结冰;当飞机下降时,机翼的上翼面则作为迎风面与过冷水滴碰撞,是主要的结冰部位^[6]。

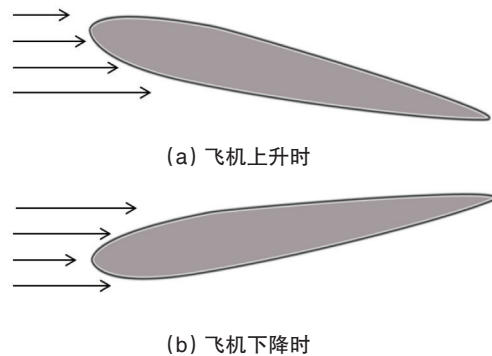


图3 不同飞行姿态下机翼结冰示意

Fig. 3 Schematic diagrams of airfoil icing in different flight attitudes

1.2 机翼结冰的典型冰形

机翼翼面的典型冰形有霜冰、光冰和混合冰,如图4^[4]所示。霜冰通常形成于 $-40\sim-10^{\circ}\text{C}$ 的云层中,云层过冷水滴较小,霜冰表面粗糙,组织松散,含有大量气泡,附着力差,易脱落,危害相对较小。光冰形成的环境温度通常为 $-18\sim 0^{\circ}\text{C}$,过冷水滴较大,光冰表面较为光滑,组织致密,一般不含气泡,法向附着力大,难以脱落,危害最大。混合冰是介于霜冰和光冰之间的一种冰形,形成的环境温度通常为 $-20\sim-10^{\circ}\text{C}$,形成过程中大小过冷水滴并存。结冰区域的前部具有光冰特性,后部具有霜冰特性,危害较大^[4,7]。

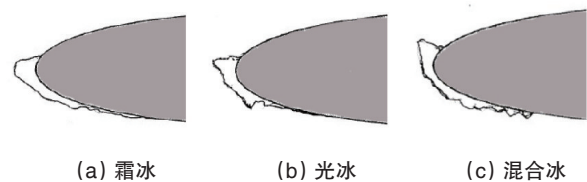


图4 机翼结冰的3种典型冰形

Fig. 4 Three typical ice shapes on the airfoil

2 机翼结冰的危害

根据伯努利原理,通过机翼的上气流流速快、压强小,在机翼上方形成负压区,反之,在机翼下方形成正压区,如图5所示。机翼结冰改变了机翼的气动布局,使得负压区产生的吸力减小,升力下降^[8]。

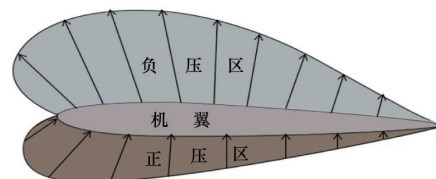


图5 机翼上压力分布的示意

Fig. 5 Schematic diagram of the airfoil pressure distribution

2.1 机翼前缘结冰对气动特性的影响

机翼前缘结冰促使气流提前分离,引起失速攻角提前。前缘外形改变后流场变化,造成翼面气动特性恶化——最大升力系数降低、阻力增加、升阻比下降。姚若鹏^[4]对对称翼型 NACA0012 结冰前后的升力与阻力系数变化进行了计算,结果表明结冰后翼型的升力系数明显下降,随着攻角的增大,下降的程度明显增加,阻力系数则明显上升,如表 1^[4]所示。为了模拟结冰对非对称翼型的影响,采用 FLUENT 软件对翼型 NACA23012 结冰前后的气动特性变化进行模拟计算,其升力系数变化曲线如图 6 所示。结果表明,当攻角大于 2° 后,非对称翼型结冰后,其升力系数下降明显。其中,气流速度为 201.24 km/h,温度为 -16℃,压强为 101325 Pa,雷诺数为 1.8×10^6 ,弦长为 40.64 cm。

表 1 结冰后机翼升力、阻力系数的变化
Table 1 Lift and drag coefficient changes after icing

攻角/(°)	升力系数	升力系数 (结冰后)	阻力系数	阻力系数 (结冰后)
0	0.0000	0.0000	0.0119	0.0144
2	0.2211	0.2022	0.0130	0.0157
4	0.4329	0.4045	0.0151	0.0170
6	0.6334	0.5850	0.0190	0.0214
8	0.8108	0.6690	0.0252	0.0364
10	0.9532	0.6560	0.0342	0.0673

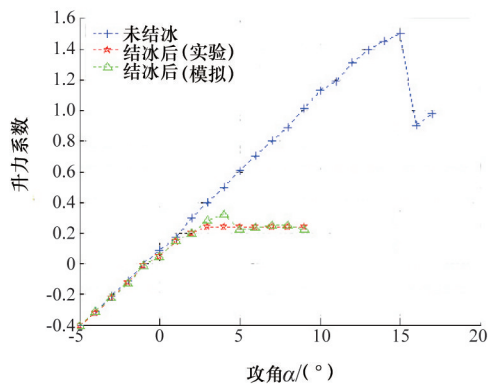


图 6 翼型 NACA23012 结冰前后升力系数对比
Fig. 6 Comparison of aerodynamic characteristics of airfoil NACA23012 before and after icing

2.2 机翼翼面结冰对气动特性的影响

机翼翼面结冰也会影响气动特性。结冰后翼面粗糙度增大,摩擦阻力增加,使层流层提前转变为紊流层;机翼增厚,飞机的迎风面积增大,压差阻力增大。常士楠等^[5]计算分析了不同温度机翼下翼面冰脊对飞机升力系数的影响(图 7),结果表明结冰后机翼的升力系数明显下降。

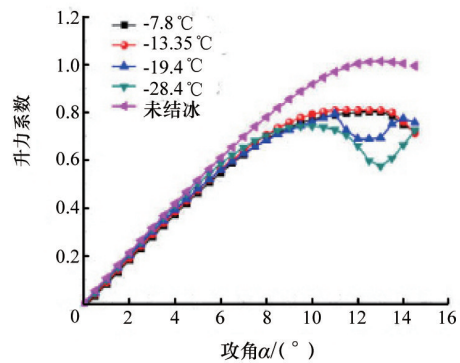


图 7 不同温度下冰脊对机翼升力系数的影响
Fig. 7 Influence of runback ice on aerodynamic characteristics of airfoil at different temperatures

3 机翼防/除冰方法

3.1 防冰方法

防冰方法旨在防止机翼表面结冰,通常采用化学或加热原理。采用化学原理的主要有化学液防冰法和疏水涂层防冰法;采用加热原理的主要有热气防冰法。

3.1.1 化学液防冰法

化学液防冰法是在机翼表面喷洒防冰液,降低过冷水滴的凝固点,防止机翼表面结冰。防冰液的主要成分是乙二醇、丙二醇等多元醇,可以溶解机翼表面的冰雪并防止其再度结冰,其中还含有表面活性剂和缓蚀剂,可以提高飞机表面的疏水性,提高除冰效率,防止飞机表面腐蚀^[9]。

防冰液用于融化冬季飞机机翼表面的冰层并防止飞行过程中机翼表面结冰,具有良好的防冰效果而且不需要消耗能量,但防冰液的作用时间短、用量大,而且多元醇等化学物质会污染环境^[10]。

3.1.2 疏水涂层防冰法

疏水涂层防冰通常分为低表面能涂层防冰和超疏水表面涂层防冰两类^[11]。低表面能涂层防冰是通过改变涂层表面的化学成分,降低表面自由能,使液滴与壁面的接触角增大至 90°~120°,水滴不易停留在涂层表面^[12]。涂层的主要成分是含氟或含硅的聚合物,用于机翼表面防水、防冰、防腐蚀、自清洁等。Paris 等^[13]制备了一种用于机翼蒙皮的低表面能防冰涂料,防冰效果明显并且具有较低的挥发性有机化合物(VOC)含量,可以减少对环境的污染及危害。

超疏水表面涂层防冰是通过构造微观结构,增大表面粗糙度,提高液滴与壁面的接触角至 150°以上^[14],使机翼表面达到超疏水性,减少液滴与冷表面的接触面积,延缓机翼表面结冰甚至防止结冰^[15]。Kimura 等^[16]制备了一种新型超疏水防冰涂层,主要成分为丙烯酸聚氨酯-聚四氟乙烯。在冰风洞中对喷涂了该涂层的铝机翼模型实验后发现,未加热情况下,该涂层与低表面能涂层的覆冰量没有明显区别,但在加热情况下,该涂层表现出优异的抗结冰性能。Avila 等^[17]使用

静电纺丝技术制作了用于机翼表面的掺杂不同元素的纳米超疏水表面膜,其中掺杂纳米锌的超疏水表面表现出了良好的防冰性能。

超疏水涂层防冰不消耗能量且应用范围广^[18],但目前只能延缓结冰。此外,超疏水表面结冰后会失去防冰效果^[19,20]。因此,如何提高超疏水表面的疏冰(icephobic)能力仍然是目前研究的重点和难点。

3.1.3 热气防冰法

热气防冰法是通过发动机引出的热气加热机翼前缘防止结冰^[21]。热气由发动机压气机引出,经供气管路分配到各段缝翼,再从缝翼内的笛形管喷出,加热机翼前缘蒙皮。B737的机翼前缘防冰腔结构如图8^[21]所示。

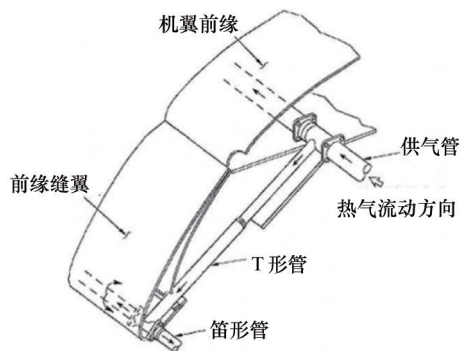


图8 B737机翼前缘防冰腔示意

Fig. 8 Schematic diagram of deicing cavity on B737 leading edge

热气防冰法是目前技术比较成熟的防冰方法,广泛应用于B737/747/757、A318/319/320等大型民航客机^[21]。热气防冰系统工作过程中持续产生热气,除冰效果好,机翼距离发动机较近,系统的设计难度小,但是加重了发动机的负担,影响发动机动力,增加了燃油的消耗。

3.2 除冰方法

除冰方法通常是通过对冰层施加剪切应力,使冰层碎裂后脱落,主要有气动除冰法和电脉冲除冰法。

3.2.1 气动除冰法

气动除冰法是通过弹性塑管形变产生剪切应力除去机翼表面冰层。在机翼前缘安有弹性塑管,前缘表面结冰后,对弹性塑管充放高压气体使其产生形变对冰层施加剪切应力使冰层脱落^[22]。

气动除冰法具有结构简单、质量轻、能耗低等优点,已应用于中小型飞机。但是弹性塑管易受腐蚀需定期更换,除冰速率较慢,在重度结冰环境下除冰效果不好^[23],而且还会改变机翼前缘外形,影响飞机气动布局。上述缺点限制了气动除冰法在大型客机与运输机上的使用。

3.2.2 电脉冲除冰法

电脉冲除冰法是通过机翼内部线圈产生电脉冲激励机翼蒙皮高频振动产生剪切应力,将机翼表面的冰层除去^[24]。

电脉冲除冰系统的结构如图9^[25]所示,线圈固定在机翼蒙皮内部并与蒙皮留有微小尺寸间隔。电流脉冲激励时线圈产生变化磁场使机翼蒙皮产生感应涡流和感生磁场。线圈与蒙皮的2个磁场方向相反互相排斥,排斥力使蒙皮向外侧做高频振动,将冰层震碎并随气流脱离^[25]。

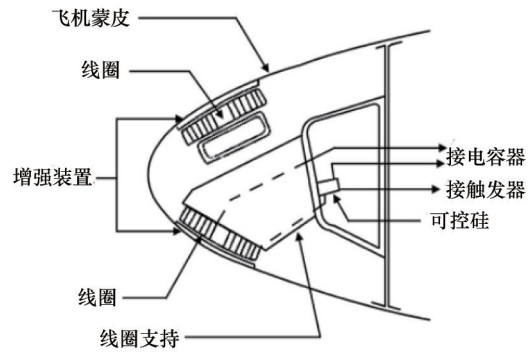


图9 电脉冲除冰系统原理

Fig. 9 Schematic diagram of the electro-impulse de-icing system

电脉冲除冰系统具有能耗低,不易受腐蚀等优点,曾在Cessna 206等飞机上进行测试^[26]。但系统产生的电磁排斥力可能引起蒙皮疲劳损伤,而且除冰时形成的电磁场可能会对飞机部分元件产生电磁干扰,虽然NASA(美国国家航天局)、Cessna(赛斯纳公司)、Boeing(波音公司)等进行了大量的冰风洞实验^[27]、电磁干扰实验^[28,29]以及蒙皮疲劳实验^[30],但是电脉冲除冰系统的安全性与除冰效果仍未达到欧美航空公司的标准,还需进行参数优化与进一步实验。

目前电脉冲除冰系统的研究主要是关于除冰残留率和除冰效果的影响因素。Labeas等^[31]采用有限元法通过冰层残留率的变化判断影响电脉冲除冰效果的因素,其中包括冰层厚度、线圈位置、线圈数量、线圈的振幅、机翼前缘外形等。朱春玲等^[32,33]通过模拟计算得出了电脉冲除冰系统脉冲强弱的影响因素包括电流大小、电频率、蒙皮材料的弹性模量、密度等。Möhle等^[34]通过实验测试了人工结冰条件下电脉冲除冰系统的除冰效果,并证实在0.1~0.5 mm范围内,冰层越厚,系统的除冰效果越好。

3.3 防/除冰方法

防/除冰方法同时具有防冰和除冰两种功能,机翼表面未结冰时可以防止冰层形成,机翼表面结冰后可以进行除冰。常用的机翼防/除冰方法主要是电热防/除冰法。电热防/除冰法在环境温度较高时开启防冰模式,节约耗能;环境温度较低时开启除冰模式,除去机翼表面的冰层。该系统已经成功用于黑鹰直升机的旋翼(图10)^[35],在主、尾桨叶前缘表面的下方装有电阻丝编织成的加热垫,结冰速率探测系统探测到冰层后由除冰控制系统开启除冰模式,飞行员也可根据环境条件选择防/除冰系统的工作模式。

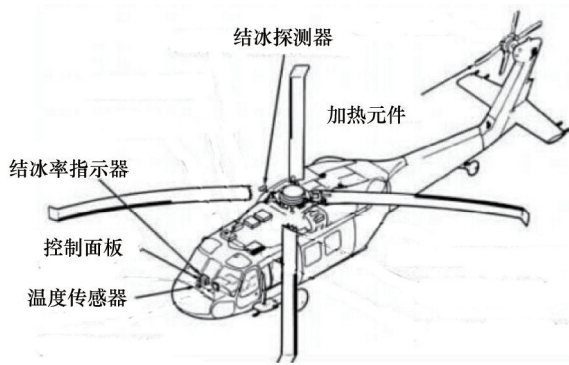


图 10 直升机防/除冰系统示意

Fig. 10 Schematic diagram of the de-icing and anti-icing system in helicopter

尽管电热防/除冰法已成功应用于黑鹰直升机旋翼,但是大型飞机机翼在应用电热防/除冰法时却会面临能耗过高等问题。为了降低电热除冰法的能耗, Petrenk^[36]设计了一种用于机翼的低能耗电热除冰系统(low power electrical de-icing system)。该系统由 Goodrich 公司制造并测试,除冰效果好、能耗明显降低而且通过了疲劳测试^[37]。Strobl 等^[38]也设计了一种新型混合防/除冰系统,该系统结合了电热和 EMEDS 系统(electro-mechanical expulsion deicing system),并在机翼表面使用了具有超疏水能力的纳米多孔状材料,相比传统的电热防/除冰方法节约能耗高达 95%。

此外,化学液等防/除冰方法也被用于机翼的防冰与除冰。

4 展望

本文从机翼结冰的主要部位和危害出发,分析了目前机翼的典型防/除冰技术进展、原理及优缺点。尽管机翼防/除冰技术已经广泛应用,但仍然存在一些不足。主要有除冰液会对环境造成污染,热气防冰、电热防/除冰用于大型飞机机翼能耗过高,气动除冰影响气动布局,电脉冲除冰引起蒙皮疲劳损伤等。

近年来,机翼防/除冰方法的研究主要集中于探索新原理、开发新技术和应用新材料等方面。其中,新原理方面, Daniel 等^[39]针对翼型 NACA0012 设计了一种形状记忆合金除冰系统,利用形状记忆合金在温度变化下收缩、膨胀的特性,成功除去了表面的冰层。新技术方面, Nakhla 等^[40,41]提出了一种新型高效、节能的机翼防除冰方法——TASJ (thermally activated synthetic jets)。该方法通过激发器产生一种周期性的微型喷流,阻碍过冷水滴与机翼表面的碰撞并除去已经形成的冰层。新材料应用方面,用性能更好、质量更轻的新型材料替代传统的金属材料,提高系统的除冰效率。Buschhorn 等^[42]在电热除冰系统中使用碳纳米管制作电热元件。该系统具有更高的除冰效率,能耗也大幅降低。

总之,新原理、新技术、新材料的探索与应用会使得机翼

防/除冰技术的效率提高、能耗降低。由此可见,高效、节能是机翼防/除冰技术未来的发展方向。机翼防/除冰技术的研发与应用,不仅会提高飞机飞行的安全系数,同时也能预防甚至防止结冰对高压输电、轨道交通等领域的危害,对中国的电力、交通等重要行业的发展具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] 马成樑. 飞机机翼除冰过程的数值研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Ma Chengliang. Numerical research on de-icing process on airfoils[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [2] 胡鑫. 飞机的结冰与防(除)冰[J]. 科技创新导报, 2012(16): 73.
Hu Xin. Icing and anti-icing (de-icing) of airplane[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2012(16): 73.
- [3] 周莉, 徐浩军, 龚胜科, 等. 飞机结冰特性及防除冰技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(6): 105-110.
Zhou Li, Xu Haojun, Gong Shengke, et al. Research of aircraft icing characteristics and anti-icing and de-icing technology[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(6): 105-110.
- [4] 姚若鹏. 翼型的结冰数值模拟及相关控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Yao Ruopeng. The numerical simulation of ice accretion on airfoil and control research[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [5] 王超, 常士楠, 杨波, 等. 机翼防冰过程中冰脊问题的数值分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(6): 776-781.
Wang Chao, Chang Shinan, Yang Bo, et al. Investigation of runback ice during aircraft anti-icing process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(6): 776-781.
- [6] 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.
- [7] 朱东宇. 翼型结冰过程的数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
Zhu Dongyu. Numerical simulation of ice accretion on airfoil[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [8] Broeren A P, Bragg M B. Effect of airfoil geometry on performance with simulated intercycle ice accretions[J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(1): 121-130.
- [9] 李斌. 飞机除冰/防冰液及除冰技术[J]. 清洗世界, 2012, 28(1): 26-31.
Li Bin. Brief survey of deicing/anti-icing fluid and techniques for aircraft[J]. Cleaning World, 2012, 28(1): 26-31.
- [10] 夏祖西, 彭华乔, 苏正良. 机场除冰液对环境的影响[J]. 中国民用航空, 2008(9): 51-52.
Xia Zuxi, Peng Huaqiao, Su Zhengliang. Impact of airport de-icing fluid on the environment[J]. China Civil Aviation, 2008(9): 51-52.
- [11] 张梅, 孟军锋, 孙哲, 等. 低表面能涂层在飞机防除冰领域的研究进展与应用[J]. 现代涂料与涂装, 2010, 13(9): 10-15.
Zhang Mei, Meng Junfeng, Sun Zhe, et al. Research progress and application of low surface energy coating in the anti-icing areas of aircraft[J]. Modern Paint and Finishing, 2010, 13(9): 10-15.
- [12] Young T. An essay on the cohesion of fluids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1805, 95: 65-87.
- [13] Paris H G, Deng F, Liotta C L, et al. Surface treatments for articles

- and vehicles: U S Patent 6,432,486[P/OL]. (2002-8-13) [2014-10-24]. <http://www.google.com/patents/US6432486>.
- [14] 李辉, 赵蕴慧, 袁晓燕. 抗结冰涂层:从表面化学到功能化表面[J]. 化学进展, 2012, 24(11): 2087-2096.
Li Hui, Zhao Yunhui, Yuan Xiaoyan. Anti-icing coatings: From surface chemistry to functional surfaces[J]. Progress in Chemistry, 2012, 24(11): 2087-2096.
- [15] 周艳艳. 铝基超疏水表面抗结霜结冰特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
Zhou Yanyan. A study of defrosting and anti-icing behavior on superhydrophobic aluminum surfaces[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [16] Kimura S, Yamagishi Y, Sakabe A, et al. A new surface coating for prevention of icing on airfoils[R]. Pittsburgh: SAE, 2007.
- [17] Avila A, Munhoz V, Dias M, et al. Superhydrophobic doped nanomembranes: A new approach for anti-ice formation on wings[R]. Honolulu: AIAA, 2012-1410, 2012.
- [18] 杨常卫, 黄珺, 艾剑波. 超疏水表面材料在电热防/除冰系统应用中的节能原理分析[J]. 直升机技术, 2010(3): 35-40.
Yang Changwei, Huang Jun, Ai Jianbo. The saving-energy effect of superhydrophobic surface[J]. Helicopter Technique, 2012(3): 35-40.
- [19] Kulinich S, Farhadi S, Nose K, et al. Superhydrophobic surfaces: Are they really ice-repellent?[J]. Langmuir, 2011, 27(1): 25-29.
- [20] 阎映弟. 新型超疏水涂层的微纳结构设计及其表面防覆冰作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Yan Yingdi. The micro-nano structure design of novel superhydrophobic coatings and their anti-icing & icenhibic properties [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [21] 霍西恒, 刘鹏, 贾丽杰. 民用客机机翼热气防冰系统问题初探[J]. 民用飞机设计与研究, 2010(4): 16-18.
Huo Xiheng, Liu Peng, Jia Lijie. Research of the wing hot air anti-icing system for the civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2010(4): 16-18.
- [22] 袁赫. 飞机电排斥除冰系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
Yuan He. Study on aircraft electro-expulsive de-icing system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [23] Broeren A P, Bragg M B. Effect of intercycle ice accretions on airfoil performance[J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(1): 165-174.
- [24] 杜骞. 电脉冲除冰系统设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
Du Qian. Design and research on electro-impulse de-icing system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [25] 李广超, 何江, 林贵平. 电脉冲除冰(EIDI)技术研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1728-1735.
Li Guangchao, He Jiang, Lin Guiping. Electro-impulse de-icing (EIDI) technology study[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1728-1735.
- [26] Kodet A C. Electro-impulse deicing[C]//Proceedings of Southern Tier Technical Conference, 1988. Binghamton, USA: IEEE, 1988: 193-200.
- [27] Bernhart W D, Zumwalt G W. Electro-impulse de-icing structural dynamic studies icing tunnel tests and applications[R]. Reno: AIAA, 1984-0022, 1984.
- [28] Zieve P, Huffer B, Ng J. Electromagnetic emissions from a modular low voltage electro-impulse de-icing system[R]. Seattle: AIAA, 1989-0758, 1989.
- [29] Zumwalt G. Electro-impulse de-icing: a status report[R]. Reno: AIAA, 1988-0019, 1988.
- [30] Zumwalt G, Friedberg R, Schwartz J. Electro-impulse de-icing research: Fatigue and electromagnetic interference tests[R]. Springfield: Federal Aviation Administration Report. DOT/FAA/CT-88/27, 1989.
- [31] Labeas G N, Diamantakos I D, Sunaric M M. Simulation of the electroimpulse de-icing process of aircraft wings[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(6): 1876-1885.
- [32] Li Q Y, Zhu C L, Bai T. Numerical simulation and experimental verification of the electro-impulse de-icing system[R]. Honolulu: AIAA, 2012-1992, 2012.
- [33] 李清英, 朱春玲, 白天. 电脉冲除冰系统除冰激励的简化与影响因素[J]. 航空学报, 2012, 33(8): 1384-1393.
Li Qingying, Zhu Chunling, Bai Tian. Simplification of de-icing excitation and influential factors of the electro-impulse de-icing system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(8): 1384-1393.
- [34] Möhle E, Haupt M C, Horst P. Coupled magnetic and structural numerical simulation and experimental validation of the electro impulse de-icing[R]. Boston: AIAA, 2013-1494, 2013.
- [35] 杨常卫, 张功虎, 孙涛, 等. 黑鹰直升机旋翼桨叶防/除冰系统研究[J]. 直升机技术, 2011(1): 37-44.
Yang Changwei, Zhang Gonghu, Sun Tao, et al. Development of black hawk helicopter rotor blade anti-/de-icing system[J]. Helicopter Technique, 2011(1): 37-44.
- [36] Petrenko V. Systems and methods for modifying ice adhesion strength: U S Patent 6, 427, 946[P/OL]. (2002-8-6) [2014-10-24]. <http://www.google.com/patents/US6027075>.
- [37] Botura G, Sweet D, Flosdorf D. Development and demonstration of low power electrothermal de-icing system[R]. Reno: AIAA, 2005-1460, 2005.
- [38] Strobl T, Storm S, Thompson D, et al. Feasibility study of a hybrid Ice protection system[R]. Atlanta: AIAA, 2014-2060, 2014.
- [39] Buschhorn S, Lachman N, Florent R. Shape memory alloy rotor blade deicing[R]. Boston: AIAA, 2013-1915, 2013.
- [40] Nagappan N, Golubev V, Nakhla H, et al. On icing control using thermally activated synthetic jets[R]. Dallas: AIAA, 2013-0093, 2013.
- [41] Nakhla H, Bourlier A, Nguyen L, et al. High-accuracy simulations of synthetic jets for low-Re flow control[R]. Orlando: AIAA, 2011-469, 2011.
- [42] Buschhorn S, Lachman N, Gavin J, et al. Electrothermal icing protection of aerosurfaces using conductive polymer nanocomposites[R]. Boston: AIAA, 2013-1729, 2013.

(责任编辑 王媛媛)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿: www.kjdb.org。