

直升机旋翼结冰影响及防/除冰方法综述

李伟斌¹, 郝云权^{1,2}, 王建涛¹, 周 铸¹, 肖中云¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000;

2. 西南石油大学 理学院, 成都 610500)

摘 要: 为深入认识旋翼结冰的影响, 从结冰强度和桨尖冰脱落两个方面阐述了旋翼结冰的特征及其主要响应因素, 进而归纳了结冰对直升机升阻力特性、悬停特性、操纵特性等气动影响, 并提出了评估旋翼冰脱落对直升机物理损伤的主要思路和方法。介绍了旋翼防/除冰应用中的电热防/除冰、液体防冰和气动除冰等主要技术, 系统分析了它们的优缺点: 电热防/除冰除冰效率高, 但能耗较大; 液体防冰能耗低, 但作用时间短, 且防冰效率不高; 气动除冰系统虽然能耗低, 但其安装部位有限, 并且易造成直升机气动损失。在此基础上, 还针对当前直升机防除冰系统存在的缺点, 从旋翼结冰的高精度预测、多种防/除冰系统的耦合开发、大面积超疏水材料制备工艺提升等多个方面, 全面展望防/除冰未来发展中亟需解决的重要问题。

关 键 词: 旋翼结冰; 防/除冰; 结冰脱落; 电热防/除冰; 液体防冰

中图分类号: V244.1

文献标志码: A

Review on influences of helicopter rotor icing and anti-/de-icing methods

LI Weibin¹, HAO Yunquan^{1,2}, WANG Jiantao¹, ZHOU Zhu¹, XIAO Zhongyun¹

(1. Computational Aerodynamics Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. School of Sciences, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to deeply understand the influence of rotor icing, the characteristics of rotor icing and its main corresponding factors were described from icing intensity and icing shedding from the tip part. Then the aerodynamic influences of icing on helicopter lift resistance, hovering and control characteristics were summarized, and the probable ideas of evaluating rotor ice shedding on helicopter physical damage were proposed. Main technologies in the application of rotor anti-/de-icing, such as electrothermal anti-/de-icing, fluids anti-icing and pneumatic de-icing, were introduced, and their advantages and disadvantages were systematically analyzed. Concretely, electrothermal anti-/de-icing had high efficiency, but high energy consumption. Liquids anti-icing had low energy consumption, but short functional time and low anti-icing efficiency. Although the pneumatic de-icing system had low energy consumption, its installation position was limited, making it easy to cause aerodynamic losses of helicopters. On this basis, focus was put on the shortcomings of the current helicopter anti-/de-icing system, the important problems to be solved in the future development of anti-/de-icing were comprehensively prospected from the aspects of high-precision prediction of rotor icing, coupling

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YJ0526); 国家数值风洞工程(National Numerical Windtunnel Project)

作者简介: 李伟斌(1985—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事飞机结冰特性及视觉测量研究。

通信作者: 王建涛(1982—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事气-液两相流研究。E-mail: wangjiantao@cardc.cn

引用格式: 李伟斌, 郝云权, 王建涛, 等. 直升机旋翼结冰影响及防/除冰方法综述[J]. 航空动力学报, 2023, 38(2): 257-268. LI Weibin, HAO Yunquan, WANG Jiantao, et al. Review on influences of helicopter rotor icing and anti-/de-icing methods[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(2): 257-268.

development of various icing systems, and large-area preparation of super hydrophobic materials.

Keywords: helicopter rotor icing; anti-/de-icing; ice shedding; electrothermal anti/de-icing; fluids anti-icing

直升机具有机动速度快、功能覆盖全、生存能力强等特点,在侦察、攻击、运输等军事活动中发挥重要作用^[1-3]。同时,作为一种特殊的运输工具,被广泛应用于医疗救援、执法警戒、探矿探油、游览航拍等多个民用领域。截至 2018 年底,在册的民用直升机数量已经由 2008 年的 179 架增加至 1 064 架,年增速高达 20%。随着国民经济的发展,直升机的应用面和深度也将会持续增加。

直升机的飞行高度一般低于 6 000 m,处于云层活跃范围,尤其是在西南高原或者东南沿海地区,温度低于 0 ℃ 时,常出现冻雨天气,全天候、长航时的飞行要求使得直升机不可避免地遭遇旋翼结冰问题^[4-5]。

旋翼作为直升机动力装置,结冰会直接改变旋翼外形、增加旋翼质量,从而影响直升机飞行性能^[6];同时,冰块会从高速旋转的旋翼桨叶上脱落,运动随机性大,有可能高速撞击驾驶舱、发动机、武器系统等关键部位,造成物理伤害。如果直升机结冰后的气动损失无法从发动机处得到弥补,将会导致升力下降,酿成飞行事故,带来严重后果^[7-8]。

为解决直升机旋翼结冰问题,从 20 世纪中叶起,国外就已经开展了桨叶防/除冰的研究,在旋翼桨叶防/除冰系统^[9]设计方面取得了较多成果,能够应对直升机结冰的突发情况。国内相关研究起步较晚,还处于经验积累和模式探索阶段,面临着“温度过高烧坏桨叶,温度过低无法除冰”^[10]的设计问题。为了更清楚认识旋翼结冰对飞行的严重影响,对直升机防/除冰系统有较为深入的理解,本文开展直升机旋翼防/除冰的研究综述,主要涉及旋翼结冰特征、危害、防/除冰手段等三个方面。

1 旋翼结冰特征

与固定翼结冰机理相同,旋翼结冰必须同时满足温度小于 0 ℃ 和液态水含量大于 0,受飞行高度、飞行速度、环境温度、液态水含量、水滴中值粒径等条件共同影响。当桨叶快速旋转时,旋翼周围的空气会被自上而下吸入桨盘,流动至旋翼下方机身上。此时,夹杂在空气中的水滴会快速撞击桨叶前缘,使得一部分水滴附着于桨叶表

面,一部分则在复杂受力下发生飞溅,跟随气流逃逸至流场下游。另外,旋翼表面结冰也可由水蒸气凝华而成。

当温度小于 0 ℃ 且足够低的时候,桨叶表面所收集到的水滴会直接发生冻结现象,在桨叶表面累积,此时结冰类型更趋向于霜冰,如图 1(a)所示。当温度小于 0 ℃ 且较高时,桨叶表面部分水滴在动能为正的情况下,并不会迅速结冰,而是汇集形成水膜,从桨叶前缘向后缘、桨根至桨尖流动,发生溢流现象,最终在复杂传热传质作用下形成结冰,此时结冰趋向于明冰,几何外形上接近羊角冰^[11],如图 1(b)所示。



(a) 霜冰



(b) 明冰

图 1 冰形的宏观形貌

Fig. 1 Category of ice shape

不同于固定翼流场,旋翼流场更为复杂,水滴在旋转流场中的运动、撞击、飞溅和凝固等动/热力学行为更为活跃。因此,旋翼结冰有着不同于固定翼结冰的显著特征,主要表现在以下几个方面。

1.1 结冰强度

在旋翼结冰中,结冰强度不仅受到来流温度、速度、液态水含量、水滴中值粒径等影响^[12],同时还额外受到桨叶转速的影响,这是因为撞击桨叶的水滴相对速度主要与桨叶线速度相关。

桨叶截面弦向结冰范围主要受水滴中值粒径和温度的影响, 粒径越大, 水滴的气流跟随性越差, 撞击在弦向上的范围就越大, 反之越小; 温度越小时, 溢流发生的可能性就越大, 水滴会顺着前缘流向后缘, 弦向的结冰范围就会越大^[13-14]。

一般情况下, 从桨根到桨尖, 结冰量沿着展向逐渐增加, 这是因为越靠近旋转中心, 桨叶的线速度越小, 水滴撞击的相对速度就越小, 那么单位时间内收集于桨叶表面的液态水就越少^[15-17], 如图2、图3所示, 图中 y 为桨叶高度方向坐标, β 为水滴收集率, R 为桨盘半径。

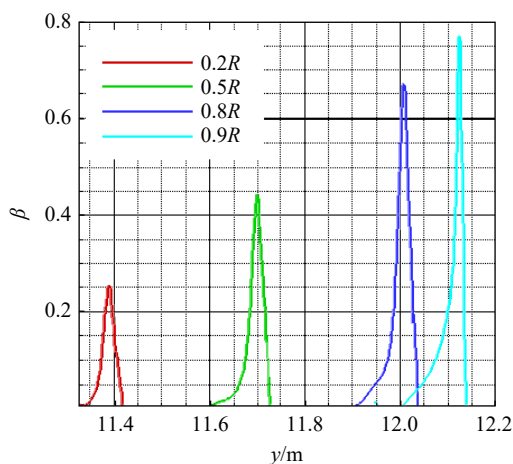


图2 桨叶水滴收集情况^[15]

Fig. 2 Droplet collection efficiency of the blade^[15]



图3 旋翼桨叶结冰试验结果^[18]

Fig. 3 Test result of rotor blade icing^[18]

1.2 桨尖冰脱落

旋翼高速旋转过程中, 桨叶会发生不同程度的变形, 这种变形不但会甩脱收集于表面但未及时冻结的水膜^[19], 还会对桨叶上已形成的结冰带来较大力学载荷, 使得表面结冰发生破碎, 并在准周期形变与离心力的共同作用下, 最终发生脱落现象^[18-19](图4所示)。

桨叶表面结冰脱落的程度与形变大小有关,



图4 桨尖结冰脱落^[17]

Fig. 4 Ice shedding from blade tip^[17]

而形变的影响因素包括桨叶长度、材料属性、转速等。桨叶旋转过程中, 桨尖应变变量大于桨根, 这就使得桨尖的冰脱落现象尤为明显, 更甚时会产生不结冰的状态。

在固定翼结冰中, 随着结冰时间的增加, 结冰厚度几乎呈线性增长。然而, 在旋翼结冰中, 受冰脱落的影响, 表面附着的冰会不定时发生脱落现象, 使得结冰几何外形的变化没有规律可循。冰脱落的影响还不仅局限于此, 以往固定翼结冰中, 速度、液态水含量、粒径等对结冰范围和强度的影响规律在旋翼结冰中将不再保持^[19], 例如图5中展示的是0.6R和0.8R截面上二维冰形图, 图中 c 为当地弦长, 可以看出旋翼转速(N)对结冰厚度的影响在桨叶不同位置表现不同, 而不再统一遵循“速度越大, 厚度越大”的规律。

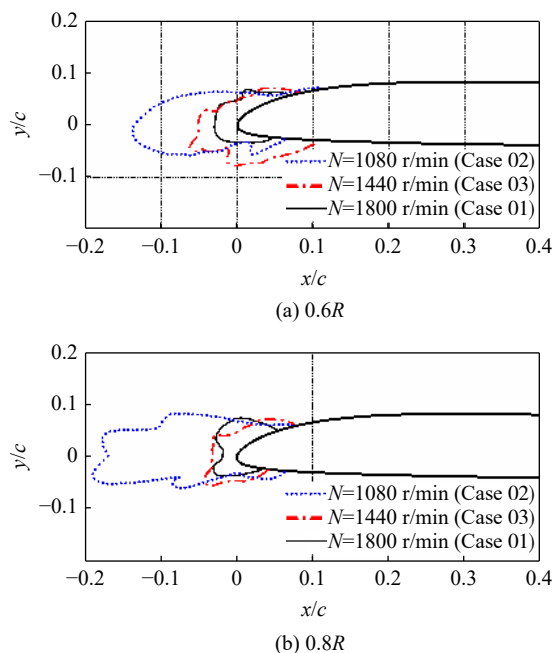


图5 旋翼转速对翼型剖面冰形的影响^[17]

Fig. 5 Influence of rotor rotational speed on airfoil ice accretion^[17]

2 旋翼结冰严重危害

2.1 直升机气动损失

桨叶截面多为二维翼型,能够为旋翼提供气动拉力。当桨叶表面出现结冰时,截面处的桨叶外形发生变化,这种变化有流线型的,也有羊角型的,几何外形的改变多与结冰条件相关。同时,由于桨叶结冰的累积,体积和质量随之发生增加,破坏了桨叶设计时的优化初衷,引起桨叶力学属性发生变化,导致同一状态下旋翼的桨平面和桨叶振动频率发生变化,甚至由于过载影响桨叶的额定转速。

目前,主要通过数值模拟和冰风洞试验的手段开展直升机升阻力特性、悬停特性、操纵特性等研究。桨叶结冰后,飞机最大平飞速度和垂直爬升率会降低^[20],在冰形后方会出现明显的负压区,甚至出现涡流,从而使桨叶拉力减小。同时扭矩在短时间内急剧增加,最终导致悬停效率的急剧下降^[17, 21-23](如图6和图7所示,其中横坐标的 t 是时间,纵坐标的 C_T 和 C_Q 分别表示拉力和扭矩, r/R 是桨叶的无量纲矢径)。此外,随着结冰质量的增加和结冰的不规则分布,桨叶的重心位置发生改变导致升力分布不再对称,整机振动加剧,从而破坏了直升机的操纵特性^[24]。

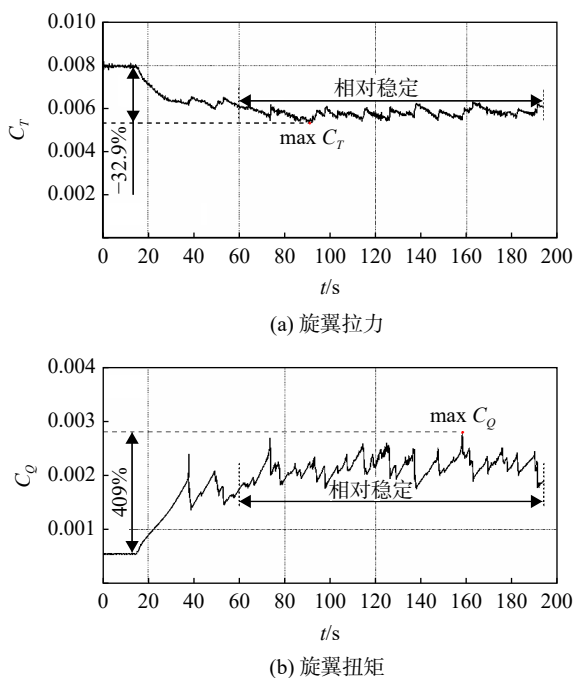


图6 旋翼结冰后性能变化试验结果(Case 01)^[17]

Fig. 6 Test results of characteristics after rotor icing (Case 01)^[17]

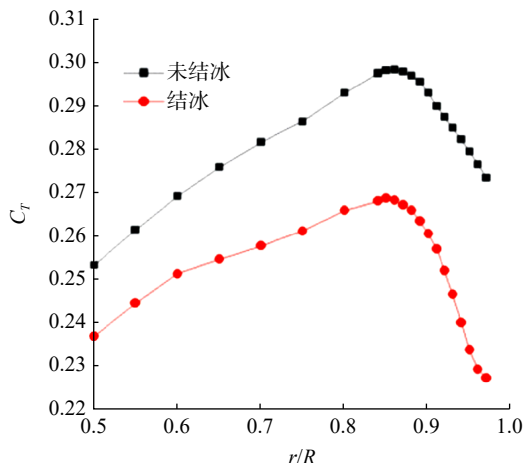


图7 不同位置桨叶拉力系数计算结果^[21]

Fig. 7 Computational results of the blade lift coefficient at different positions^[21]

2.2 直升机物理损伤

当旋翼结冰厚度累积到一定程度时,在除冰装置或桨叶形变的作用下,桨叶表面冰层会发生破碎和冰脱落现象。旋翼表面脱落的结冰具有一定质量和体积,气流跟随性变差,在高速旋转旋翼和流场的共同作用下,成为动量较大的撞击源。由于旋翼位于直升机机身上方,受下洗气流影响,脱落的冰块有可能撞击机身、武器系统、尾桨等关键部位,造成直升机机身受损、武器系统故障、尾桨平稳特性降低。

为确保飞机的飞行安全,美国飞机适航要求已经就冰脱落对飞机造成的损害程度阈值做出了明确的规定^[25],在固定翼结冰脱落研究中,可以对结冰脱落的形状进行简化假设,并建立冰块的气动数据库,进而通过求解六自由度运动方程更新结冰脱落后的轨迹,最后开展不同位置不同姿态的大量计算统计得到冰块被吸入发动机的概率,相关方法已在ARJ(Advanced Regional Jet for 21st Century)飞机中得到应用^[26-27],图8展示的机头结冰脱落轨迹。另外,关于结冰易脱落区域也开展了相关数值计算和试验研究^[28-29],为后续冰脱落的风险评估和适航认证提供了一定支持。

对于旋翼结冰脱落,也可以按照固定翼的简化做法开展。然而,由于旋翼流场属于非定常流动,在评估结冰脱落时需要计算桨叶不同方位的定常流场,进而考虑桨叶不同位置、不同姿态的结冰运动轨迹。更简单的做法是,计算桨叶某一方位角的定常流场以后,在桨叶旋转曲面上释放冰块,计算获取其运动轨迹。

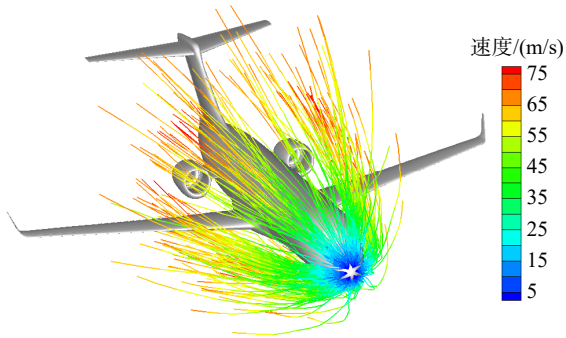


图 8 扇形冰块飞机头部脱落轨迹图^[26]

Fig. 8 Tracks of fan-shaped ices shedding from the aircraft head^[26]

当旋翼发生极为严重结冰时,覆冰量的剧烈增加会导致桨叶发生断裂现象,断裂的叶片有可能会撞击到直升机机身的任意位置,引起极大的物理损伤。对于大段叶片的断裂及运动轨迹计算可以基于重叠网格的多体分离计算方法进行模拟^[30],目前采用该方法开展的螺旋桨叶片断裂不同时刻模拟结果如图 9 所示。

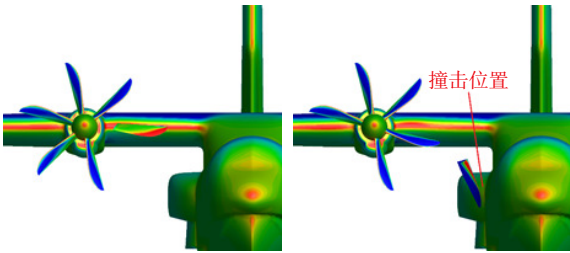


图 9 螺旋桨断裂脱落数值模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results of propeller blade shedding

3 旋翼结冰防/除冰手段

在桨叶防/除冰系统设计前,首先需要明确结冰的范围,主要研究手段有飞行试验^[31]、冰风洞试验^[18-19]、数值模拟^[13]、喷洒塔试验^[32],如图 10 所示。其次,通过计算空气动力学的方法获得桨叶水滴撞击特性和热载荷。在完成这些预先研究后,才能开展防除冰组件的设计、布置、控制律等。

表 1 中给出了目前正在应用的防/除冰方法、技术原理和特点,可以看出每种方法都有一定

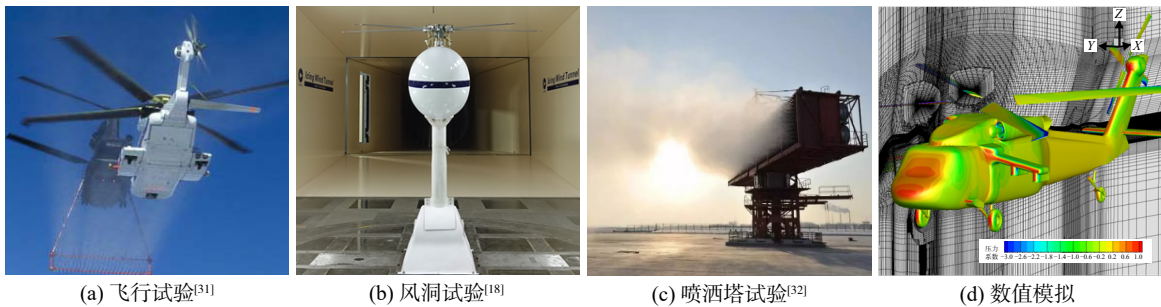


图 10 旋翼结冰研究手段

Fig. 10 Evaluating means of rotor icing

表 1 几类防/除冰技术的原理及特点

Table 1 Principle and characteristics of the main anti-/de-icing technologies

方法	原理	特点
电热防/除冰	通过在防冰部位布置加热元件,将电能转化为热能,使防冰表面温度升高,冰层融化、脱落	除冰效率高、具有广泛的可接受性,但电能消耗大、系统复杂
液体防冰	将冰点较低的防冰液喷洒至防冰表面,降低结冰的冰点,从而达到防冰效果	消耗功率小、成本低,但防冰时间有限,除冰液占直升机有效载质量大
气动除冰	前缘布置除冰带,通过充气膨胀变形,破坏冰层与蒙皮间的黏附力,并利用气流将冰层甩出	除冰效率高、能耗低,但易造成气动损失、降低机翼的疲劳寿命
超声波除冰	利用 Lamb 波和 SH 波在结冰与基底处产生切应力,使冰发生破碎和脱落	能耗小、使用方便,但除冰效率不高
电脉冲除冰	利用机翼内部线圈产生电脉冲,激励机翼蒙皮快速鼓动,除去冰层	结构简单、能耗小,但易损伤蒙皮
气热防/除冰	将发动机产生的热空气经过调温调压后,输送于机翼防冰段,使表面温度升高,达到防/除冰目的	热源足、维修简单,但对发动机工作效率有较大影响

的针对性,具有不同的优缺点,适用不同的应用需求。受直升机铰链机构的影响,超声波除冰^[33]、电脉冲除冰^[34]、气热防冰技术^[35]等在旋翼桨叶上的设计复杂度较大,可靠性和效率难以满足应用需求,因此尚未在旋翼防/除冰系统中得到应用。

针对电热除冰、液体防冰、气动除冰等三种常用的旋翼防/除冰手段,本节将主要对其技术特点、应用优缺点等作具体阐述。

3.1 电热防/除冰

电热防/除冰系统主要由控制器、供电电源、加热组件、过热保护装置等组成,其中供电电源负责提供电能,电流流经内埋于旋翼桨叶表面的加热元件,电能被转化为热能,加热桨叶表面,使得其温度高于冰点,冰层底部融化,利用高速旋转的旋翼桨叶产生的离心力甩出残冰。美国 Sikorsky 公司作为最早开始直升机防/除冰系统研发的公司之一,先后尝试使用疏冰条、热气、电热等技术进行防冰和除冰^[36]。实际应用中,疏冰条耐侵蚀性能差,热气防/除冰系统严重影响发动机的功率,因此限制了这两类技术在旋翼桨叶防/除冰系统中的应用。采用能耗可降减、效率可提升、除冰方式可优化的电热技术设计直升机旋翼桨叶的防/除冰系统,并被成功应用于美国的 CH-47、UH-60A 等多种直升机机型。

直升机电力系统的容量一般不能满足电热防/除冰系统的高功率需求,这就促生了电热防/除冰系统能耗的不断优化研究,包括热力学计算分析、低功率新型加热元件开发、加热方式优化、复合除冰探索等。

在热力学计算分析方面,除冰传热特性计算分析关系电热防/除冰系统总功率设定、加热组件布局、控制系统设计等,直接影响旋翼防/除冰系统的除冰性能。自 20 世纪 70 年代开始,国内外学者以热焓法为基础,先后建立一维^[37-38]、二维^[39-40]、三维^[41-42]的热传导计算模型,用于研究电热除冰过程冰层的相变传热特性,相关成果为旋翼结冰防护提供了理论支撑。

在新型加热元件原材料开发方面,国际上通用的主要是不锈钢箔、金属片、金属电阻丝、电镀金属膜等。考虑到电热防/除冰系统对加热元件功率要求越来越高,更多可替代的加热元件原材料需要被开发,以应对直升机电热防/除冰系统低能耗的需求。目前,已知的碳纤维、石墨烯涂

层^[43]、镍铬合金丝和聚合物材料制备的金属丝^[44]、碳纳米复合材料制作的碳纳米管^[45]以及导电氟塑料^[46]等都被证明能改善加热元件的导热性能(如图 11 所示),但这些加热元件目前尚未被正式应用于旋翼电热防/除冰系统中。

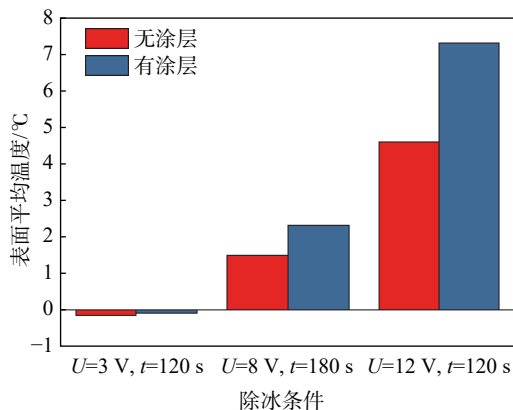


图 11 旋翼防/除冰组件有/无石墨烯涂层传热效果对比^[43]

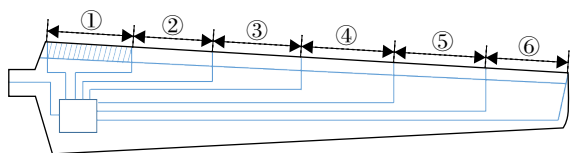
Fig. 11 Comparison of heat transfer effect of rotor anti-/de-icing component with and without graphene coating^[43]

加热方式优化主要包括加热元件结构布局、控制系统设计和加热控制律分区等三种方式。热力学计算分析结果表明,热流密度是影响除冰效率的重要因素^[47-48],采用金属丝编制成金属网(如图 12 所示)^[49]、以展向分区布局代替功率高且成型工艺复杂的弦向分区方式^[49-50](如图 13 所示)、监测并控制不同分区的加热功率和通断电时间^[51]等方式,都能使热流密度和防冰面温度分布更均匀,从而避免局部温度过高而烧坏桨叶的情况,最终实现热能的优化分配。这也可以看出,加热元件数、铺层方向、编织形式、网格尺寸、制备工艺等都是影响可靠性、相容性和使用寿命的重要因素。

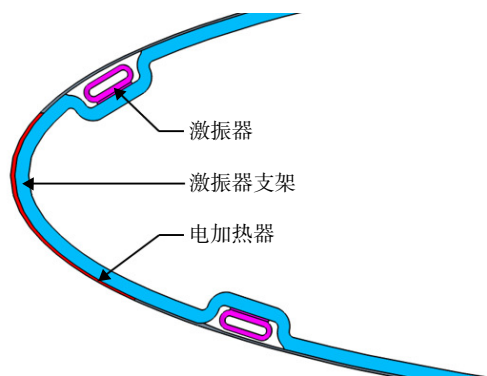


图 12 网状加热元件金属丝网^[49]

Fig. 12 Metal wire of mesh heating elements^[49]

图 13 加热元件展向分区布局示意图^[49]Fig. 13 Schematic diagram of directional zonal heating^[49]

对电热防/除冰系统进行优化设计,能在一定程度上提升系统除冰效率,但遗憾的是,对于机载供电有限的直升机而言,单一的电热防/除冰系统较难实现除冰效率与能耗之间的平衡。目前,通过耦合其他防/除冰手段是解决这一问题的有效途径。Al-Khalil 等人^[52]率先提出了耦合机械除冰方法的电热-机械复合式除冰系统,在机翼前缘位置铺设加热原件,而在机翼前缘靠后部分布置能耗低的机械除冰系统(如图 14 所示),用于除去经前缘电加热后溢流并冻结的积冰,这种复合式除冰系统的防/除冰效果在 LWICE 中心得到了验证。

图 14 电热-机械复合式除冰系统^[52]Fig. 14 De-icing system combined the electrothermal and mechanical means^[52]

华中科技大学的学者^[53-54]也通过除冰试验验证了电热-电脉冲复合式除冰方法的有效性,即节约近 40% 能耗且保持良好除冰效果。文献^[55-56]采用超疏水材料制备的防冰表面,发现能极大程度减少系统能耗。另外,Chen 等人^[57]考虑气热与电加热相结合方式,开展了直升机旋翼防/除冰的仿真计算,结论表明这种新型复合式防/除冰系统不仅防/除冰能力强、能耗低,还能适用于各种冻结条件。这些复合方式都取得了好的除冰效果,为未来旋翼防/除冰提供了可行的思路。

3.2 液体防冰

液体防冰的思路是,将冰点低于水的防冰液(如乙醇、乙二醇、异丙醇等)通过微孔分配

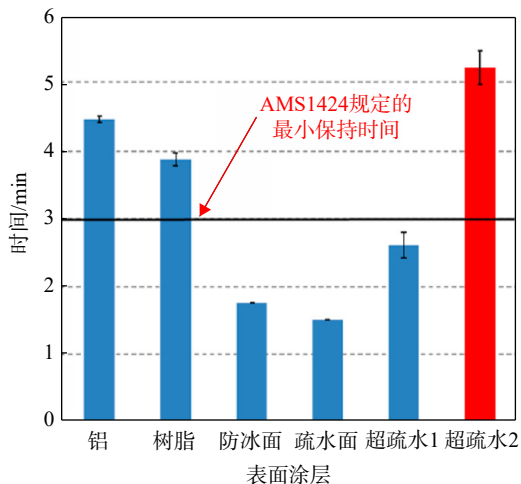
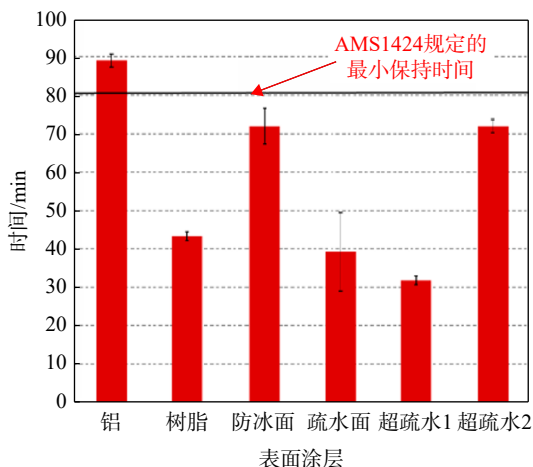
至防冰表面,从而降低表面冻结温度,达到防冰目的^[58],这种方式适用于轻度或中度结冰环境。目前,国际上使用的防冰液主要分为四类,包括 I 型液态牛顿流体和 II-IV 型液态非牛顿流体,美国宇航材料规范^[59-60]已针对 I-IV 型防冰液使用的技术要求做出了规定,国内也在 2001 年颁布了中国民用航空行业标准,制定了 I 型防/除冰液的技术性能要求。

液体防冰方法很早便被应用在直升机防/除冰系统中,早在 20 世纪 60 年代, Bell 直升机公司就为 HU-1 直升机的主旋翼和尾桨开发了液体防冰系统,防冰液经旋翼前缘开设的孔流向防冰表面降低冻结冰点^[61]。但防冰液的稳定性受剪切速率的影响较大,在剪切速率超过临界值时,会导致流体的黏稠体系被破坏,黏度和附着能力降低^[62-63]。由于旋翼在高速旋转过程中会破坏流体的黏稠体系^[64],部分防冰液在切应力的作用下被甩出防冰表面,导致经前缘孔洞流出至防冰表面的防冰液分布不均,影响系统的防/除冰效果。后来,英国的飞机除冰有限公司将翼型前缘孔布置改为多孔^[65],使得防/除冰液的分布更均匀,以此提升系统的防冰能力。

液体防冰系统虽然在一定时期内为直升机提供了安全、可靠的防冰效果,但由于防冰液占直升机的有效载质量大,防冰作用时间短,直升机在高寒地区执行飞行任务时,受低温环境的影响,防冰液的黏度会随温度的降低而降低^[63],导致系统的防冰能力显著降低。目前, II-IV 型防冰液可以通过添加纤维素类、聚丙烯酸酯类等增稠剂使其保持较高的黏度,从而提升有效防冰时间,这也是防冰液发展的重要方向。

此外,防冰面通常被制作为疏水面,以此来达到防冰的目的。然而,疏水表面的疏水性可能导致防冰液在旋翼表面还未湿润扩散就被快速排出,从而降低系统的防冰性能^[66]。尤其地,文献^[67-68]开展了不同类型防冰液与多种疏水涂层的相互作用试验研究,结果表明疏水涂层的使用会减少防冰液在防冰表面的保持时间(图 15 和图 16),从而降低系统的防冰能力。

防冰液稳定性差、防冰效率低,这些缺点极大地限制了液体防冰技术在直升机旋翼防/除冰系统中的应用。但是液体防冰具有消耗功率小、维护成本低、防止溢流结冰等优点,这就使得其成为轻度结冰条件下主要防冰手段之一,并在直升机型号上得到应用。另外,液体防冰也可以与

图 15 I 型流体在不同表面涂层之上的最低保持时间^[67]Fig. 15 Endurance time for the different surfaces for fluid I^[67]图 16 IV 型流体在不同表面涂层上的保持时间^[67]Fig. 16 Endurance time for the different surfaces for fluid IV^[67]

其他手段相结合, 开发出新型防/除冰系统。

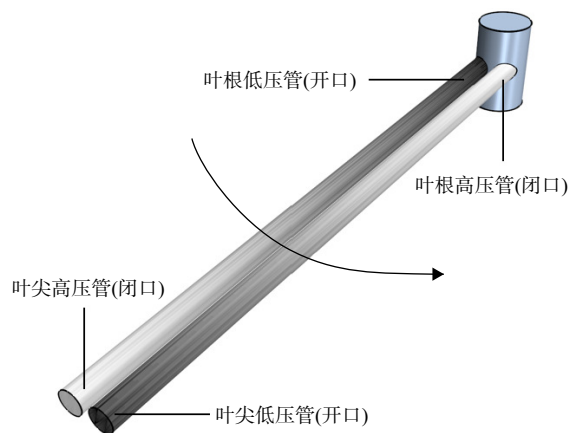
3.3 气动除冰

气动除冰技术通过对布置在防冰表面的气动除冰套充气, 除冰套经充气膨胀变形使冰层破碎脱落, 在离心力或气流作用下将碎冰带走, 放气后, 除冰套又收缩紧贴于前缘, 以此降低由翼型表面变化造成的气动损失。

20 世纪 80 年代开始, 美国宇航局就致力于寻找新的防/除冰方法来提高除冰效率, 并开始将气动除冰系统运用于直升机旋翼叶片^[69], 经过几十年的发展, 气动除冰系统已成功应用于固定翼中^[70]。然而, 气动滑环和除冰套的耐腐蚀能力弱, 桨叶操纵面积小, 加之将压力从固定位置转移到旋转叶片中需要复杂的气动滑环, 这些因素导致气动除冰技术在直升机应用中的不确定性, 使其在直升机旋翼防/除冰系统中的应用研究一度停

滞不前。

直到近年来, 复杂的飞行环境迫使直升机旋翼防/除冰系统朝着低能耗、高效率方向发展, 气动除冰技术才重新被重视起来。为克服旋翼气动除冰系统设计中复杂气动滑环固有缺点所带来的不利影响, Palacios 等人^[71]创造性地提出使用低-高压管路代替先前的气动滑环(图 17), 利用旋转产生的离心力对管路作用, 进而产生压差, 迫使气动隔膜膨胀与收缩, 从而实现对除冰套的充气 and 放气, 该方法的技术可行性已经在结冰风洞试验中得到了验证。

图 17 旋转状态下低高压管示意图^[71]Fig. 17 Schematic of low- and high-pressure lines under rotation^[71]

橡胶除冰套在低温环境下长时间工作, 容易发生褶皱、僵硬变脆、裂纹破碎等情况, 从而导致除冰套失效, 影响系统的除冰效果。针对这一问题, 柔性金属肋^[72]开始替代先前的橡胶除冰套, 并且取得了较好的效果。此外, 通过调整除冰套的安装方式, 也可以有效改善气动除冰系统的防/除冰能力。

相比于电热、液体等防/除冰系统, 尽管气动除冰系统具有能耗更小、质量更轻、维修更方便等优势, 但受其自身工作特点的制约, 该系统只能用作允许结冰部位的除冰装置, 而不能用作防冰装置。另外, 除冰套充气过程会改变旋翼桨叶的气动外形, 造成气动损失, 这也对其在直升机旋翼防/除冰系统中的应用带来障碍。

4 结论与展望

直升机结冰试验、飞行试验和数值模拟的难度要远远大于固定翼飞机, 而且旋翼的系统设计考虑因素多、工作原理复杂, 因此虽然已有部分

关于结冰影响和防/除冰方法的成果,但对其研究还不够深入,制约着直升机复杂环境飞行性能的提升。

通过梳理现有旋翼结冰与防/除冰的研究成果,本文总结了旋翼结冰特征及结冰对直升机飞行的严重危害,概述了电热防/除冰、液体防冰、气动除冰等方法的工作原理及其在旋翼桨叶防/除冰系统中的应用优缺点,同时提出了可能改进的方向。结合直升机旋翼设计和工作的特殊性,以及各种方法的应用现状,为提高防/除冰系统的工作效率,还需要在以下几个方面进行持续性的研究:

1) 旋翼结冰的高精度预测

与固定翼相比,旋翼结冰过程更为复杂,其额外受到离心力、桨叶变形等因素的影响,使旋翼结冰三维几何外形更加难以预测。并且,旋翼结冰呈现出“冰生长-冰脱落-再生长-再脱落”的准周期特征,使得旋翼冰形数值预测结果与自然条件真实结冰之间存在一定差距。随着国内旋翼结冰风洞试验和喷洒塔试验的相继开展,通过结冰试验与数值模拟相结合的手段,开展结冰预测研究,发现旋翼结冰新机理,提出相变传热传质新模型,提高预测精度,为旋翼防/除冰系统的优化设计提供理论和数据支撑。

2) 多种防/除冰系统的耦合开发

电热防/除冰系统可通电时间和可防冰面积有限,经前缘加热区域融化后的冰可能会流至桨叶前缘后方部位,进而在未防冰区域发生冻结现象。目前,电热防/除冰系统在加热区域、加热区顺序、加热时间优化等方面都在试图避免这种回流再冻结问题。虽然已有研究表明,在允许少量结冰的部位耦合机械除冰方式能有效解决这一问题,但是由此会引发总质量增加、除冰结构布局困难等新问题。因此,开发兼顾防/除冰性能和旋翼设计稳定性的耦合方式是未来旋翼防/除冰系统需要考虑的方向之一。

3) 大面积超疏水材料的制备

超疏水材料的发明使直升机旋翼桨叶自防冰成为可能,能极大减小对能耗的设计要求。然而,直升机桨叶大面积超疏水材料的化工制备方法还不够成熟,并且高寒环境下材料疏水性容易丧失,使得这种技术在直升机旋翼防冰的应用中尚有发展空间。因此,发展耐低温、高湿的超疏水材料,在确保原桨气动结构设计和强度要求的基础上,

完善超疏水材料的大面积化工制备方法,可以进一步提升直升机旋翼的防冰性能,是未来需要考虑的方向之一。

参考文献:

- [1] 黄明其,徐栋霞,何龙,等.常规旋翼构型复合式高速直升机发展概况及关键技术[J].航空动力学报,2021,36(6):1156-1168.
HUANG Mingqi, XU Dongxia, HE Long, et al. Development overview and key technologies of high speed hybrid helicopter with single main rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1156-1168. (in Chinese)
- [2] 王适存.直升机空气动力学[M].南京:航空专业教材编审组,1985:10-50.
- [3] 黄明其.直升机风洞试验[M].北京:国防工业出版社,2014:1-5.
- [4] 陈希,招启军.考虑遮蔽区影响的旋翼三维水滴撞击特性计算新方法[J].航空学报,2017,38(6):120745.1-120745.12.
CHEN Xi, ZHAO Qijun. New method for predicting 3-D water droplet impingement on rotor considering influence of shadow zone [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(6): 120745.1-120745.12. (in Chinese)
- [5] 陈希,招启军,赵国庆.计入离心力影响的直升机旋翼翼型结冰数值模拟[J].航空动力学报,2014,29(9):2157-2165.
CHEN Xi, ZHAO Qijun, ZHAO Guoqing. Numerical simulation of ice accretion on rotor airfoil of helicopter considering effects of centrifugal force[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(9): 2157-2165. (in Chinese)
- [6] 陈宁立,杜健民,吉洪湖,等.离心力对于旋转叶片表面积冰影响的数值模拟研究[J].推进技术,2020,41(6):1314-1323.
CHEN Ningli, DU Jianmin, JI Honghu, et al. Numerical study of effects of centrifugal force on ice accretion on a rotor blade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(6): 1314-1323. (in Chinese)
- [7] CHEN Ningli, JI Honghu, CAO Guangzhou, et al. A three-dimensional mathematical model for simulating ice accretion on helicopter rotors[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(8): 083602.1-083602.12.
- [8] WANG Zhengzhi, ZHU Chunling. Numerical simulation of three-dimensional rotor icing in hovering flight[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2018, 232(3): 545-555.
- [9] 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,2011,166(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, 166(1): 37-44. (in Chinese)
- [10] 观察者.掌握这项关键技术的全世界算上中国只有4个[EB/OL]. [2020-11-27]. https://www.guancha.cn/military-affairs/2020_11_27_572743.shtml.
- [11] 易贤.飞机积冰的数值计算与积冰试验相似准则研究[D].四川 绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2007.
YI Xian. Numerical computation of aircraft icing and study on icing test scaling law[D]. Mianyang Sichuan: China Aerodynamics Research and Development Center, 2007. (in Chinese)
- [12] 倪章松,刘森云,张军,等.环境参数对飞机防冰热载荷的影响规律[J].航空动力学报,2021,36(1):8-14.

- NI Zhangsong, LIU Senyun, ZHANG Jun, et al. Influence of environment parameters on anti-icing heat load for aircraft[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(1): 8-14. (in Chinese)
- [13] 何治, 常世楠, 袁修干. 悬停状态下直升机旋翼水滴撞击特性研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(11): 1055-1058. HE Zhi, CHANG Shinan, YUAN Xiugan. Research on droplet impingement property of rotor blade in hover[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(11): 1055-1058. (in Chinese)
- [14] 张威, 林永峰, 陈平剑. 基于欧拉方法的旋翼翼型结冰数值模拟及参数影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(3): 375-380. ZHANG Wei, LIN Yongfeng, CHEN Pingjian. Numerical simulation of ice accretion and parameter effects based on eulerian droplet model[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 43(3): 375-380. (in Chinese)
- [15] LI Weibin, LI Kaicheng, SONG Chao, et al. Effect of droplet MVD on icing collection efficiency for a helicopter blade[R]. Shanghai: 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2021.
- [16] KREEGER E R, TSAO J. Ice shapes on a tail rotor[R]. AIAA-2014-2612, 2014.
- [17] 黄明其, 王亮权, 袁红刚, 等. 直升机前飞状态旋翼结冰风洞试验研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(6): 929-936. HUANG Mingqi, WANG Liangquan, YUAN Honggang, et al. Icing wind tunnel test of a helicopter rotor model in forward flight state[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(6): 929-936. (in Chinese)
- [18] 袁红刚, 黄明其, 彭先敏, 等. 直升机旋翼模型结冰风洞试验技术[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(4): 60-66. YUAN Honggang, HUANG Mingqi, PENG Xianmin, et al. Research on icing wind tunnel test technology of helicopter rotor model[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(4): 60-66. (in Chinese)
- [19] 栗枢, 曹广州. 无人机螺旋桨三维积冰计算与积冰控制检测[J]. *测控技术*, 2021, 40(8): 95-100. LI Shu, CAO Guangzhou. 3D ice accretion calculation and its control detection of UAV propeller[J]. *Measurement and Control Technology*, 2021, 40(8): 95-100. (in Chinese)
- [20] 徐玉貌, 吕少杰, 曹义华, 等. 旋翼桨叶结冰对直升机飞行性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(2): 187-194. XU Yumao, LÜ Shaojie, CAO Yihua, et al. Effects of rotor blade icing on helicopter flight performance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(2): 187-194. (in Chinese)
- [21] 王正之, 杜孟华, 朱春玲, 等. 直升机旋翼结冰后三维桨叶气动特性数值分析[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(1): 33-38. WANG Zhengzhi, DU Menghua, ZHU Chunling, et al. A numerical analysis on aerodynamic characteristics of three-dimensional iced rotor[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2021, 22(1): 33-38. (in Chinese)
- [22] 唐扬刚, 唐虎, 吴敬涛. 旋翼结冰对直升机悬停性能影响的数值分析[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(2): 104-108. TANG Yanggang, TANG Hu, WU Jingtao. Numerical analysis on effects of rotor icing on helicopter performance in hover[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(2): 104-108. (in Chinese)
- [23] NARDUCCI R, KREEGER R E. Analysis of a hovering rotor in icing conditions[R]. NASA/TM-2012-217126, 2012.
- [24] 刘国强, 于琦, 董明明, 等. 旋翼结冰对“黑鹰”直升机飞行性能影响分析[J]. *航空科学技术*, 2013(1): 34-37. LIU Guoqiang, YU Qi, DONG Mingming, et al. The influence of rotor icing to the flight performance of black hawk helicopter[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2013(1): 34-37. (in Chinese)
- [25] Federal Aviation Administration. Certification of transport category airplanes for flight in icing conditions: AC 25.1419-1A[R]. Washington DC: US Department of Transportation, 2004.
- [26] 王建涛, 易贤, 肖中云, 等. ARJ21-700飞机冰脱落数值模拟[J]. *空气动力学学报*, 2013, 31(4): 430-436. WANG Jiantao, YI Xian, XIAO Zhongyun, et al. Numerical simulation of ice shedding from ARJ21-700[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2013, 31(4): 430-436. (in Chinese)
- [27] 冯丽娟, 谭广琨, 张强, 等. 民用飞机机头冰脱落特性数值模拟[J]. *空气动力学学报*, 2015, 33(4): 536-541. FENG Lijuan, TAN Guangkun, ZHANG Qiang, et al. Numerical simulation of ice shedding from civil airplane nose[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2015, 33(4): 536-541. (in Chinese)
- [28] JEREMY B, JUAN C, LAKSHMI S. Prediction of rotor blade ice shedding using empirical methods[R]. AIAA-2010-7985, 2010.
- [29] PAPADAKIS M, YEONG H W, SHIMO I K, et al. Ice shedding experiments with simulated ice shapes[R]. AIAA-2009-972, 2009.
- [30] 马率, 刘钊, 肖中云, 等. 基于多学科耦合仿真的螺旋桨飞机桨叶飞脱安全评估方法: 中国, ZL202111457289.6[P]. 2022-02-11.
- [31] 姜曙光. S-92完成人工结冰试验[EB/OL]. [2022-12-02]. <http://www.dsti.net/Information/News/18965>.
- [32] 中国航空报社. 入夏了还要除冰?什么情况![EB/OL]. [2022-12-02]. https://www.sohu.com/a/232016685_115926.
- [33] ZHU Y, PALACIOS J L, ROSE J L, et al. Numerical simulation and experimental validation of tailored wave guides for ultrasonic de-icing on aluminum plates[R]. AIAA-2010-3043, 2010.
- [34] 何舟东, 朱永峰, 周景峰. 飞机电脉冲除冰技术探讨[J]. *实验流体力学*, 2016, 30(2): 38-45. HE Zhoudong, ZHU Yongfeng, ZHOU Jingfeng. Study on electro-impulse de-icing technology[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(2): 38-45. (in Chinese)
- [35] 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)
- [36] ROSEN K M, POTASH M L. 40 years of helicopter ice protection experience at Sikorsky aircraft[R]. St. Louis, US: 19th Aerospace Sciences Meeting, 1981.
- [37] 肖春华, 于昆龙, 桂业伟, 等. 一维和二维电热除冰相变传热特性的参数影响分析[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(4): 882-893. XIAO Chunhua, YU Kunlong, GUI Yewei, et al. Analysis of parameteric influence on phase change heat transfer characteristics of 1-D and 2-D electrothermal deicing[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(4): 882-893. (in Chinese)
- [38] WRIGHT W, KEITH, JR T G, DEWITT K J. Numerical analysis of a thermal deicer[R]. AIAA-92-0527, 1992.
- [39] CHAO D F. Numerical simulation of two-dimensional heat transfer in composite bodies with application to de-icing of aircraft components[D]. Toledo, US: University of Toledo, 1983.
- [40] MASIULANIEC K C. A numerical simulation of the full two-di-

- mensional electrothermal de-icer pad[D]. Toledo, US: University of Toledo, 1987.
- [41] YASLIK A D, DEWITT K J, KEITH T G. Further developments in three-dimensional numerical simulation of electrothermal deicing systems[R]. AIAA-92-0528, 1992.
- [42] 刘重洋. 飞机电热防/除冰系统数值计算及实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- LIU Chongyang. Numerical calculation and experimental study of aircraft electrothermal anti/de-icing system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [43] 陈龙, 刘慧, 张一术. 石墨烯涂层对直升机旋翼防/除冰组件传热的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(1): 239-245.
- CHEN Long, LIU Hui, ZHANG Yishu. Effect of graphene coating on heat transfer of anti-/deicing component for helicopter rotor[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(1): 239-245. (in Chinese)
- [44] IBRAHIM Y, KEMPERS R, AMIRFAZLI A. 3D printed electrothermal anti- or de-icing system for composite panels[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 166(10): 102844.1-102844.10.
- [45] BUSCHHORN S T, LACHMAN N, GAVIN J, et al. Electrothermal icing protection of Aerosurfaces using conductive polymer nanocomposites[R]. AIAA-2013-1709, 2013.
- [46] BOGOSLOV E A, DANILAEV M P, MIKHAILOV S A, et al. Energy efficiency of an integral anti-ice system based on fluoroplastic films[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, 89(4): 815-820.
- [47] 常士楠, 侯雅琴, 袁修干. 周期电加热控制律对除冰表面温度的影响[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(8): 1247-1251.
- CHANG Shinan, HOU Yaqin, YUAN Xiugan. Influence of periodic electro-heating pulse on deicing surface temperature[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(8): 1247-1251. (in Chinese)
- [48] 肖春华, 林贵平, 桂业伟, 等. 冰脱落对电热除冰传热特性的影响研究[J]. *空气动力学学报*, 2012, 30(4): 551-556.
- XIAO Chunhua, LIN Guiping, GUI Yewei, et al. Study on effect of ice shedding on heat transfer characteristics of electrothermal aircraft deicing[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, 30(4): 551-556. (in Chinese)
- [49] 谌广昌, 纪双英, 赵文明, 等. 直升机旋翼除冰系统加热垫试验研究[J]. *航空工程进展*, 2019, 10(2): 201-205.
- CHEN Guangchang, JI Shuangying, ZHAO Wenming, et al. Experimental study on heating pad of helicopter rotor deicing system[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(2): 201-205. (in Chinese)
- [50] 邹小玲. 直升机旋翼防除冰设计与分析[J]. *直升机技术*, 2009, 159(3): 39-46.
- ZOU Xiaoling. The design and analysis of helicopter rotor anti-icing/deicing system [J]. *Helicopter Technique*, 2009, 159(3): 39-46. (in Chinese)
- [51] 吴斌, 於二军, 滕国飞, 等. 飞机机翼电热除冰控制系统设计[J]. *山西电子技术*, 2018(2): 21-23.
- WU Bin, YU Erjun, TENG Guofei, et al. Design of electrothermal deicing control system for aircraft wing[J]. *Shanxi Electronic Technology*, 2018(2): 21-23. (in Chinese)
- [52] AL-KHALIL K M, FERGUSON T W, PHILLIPS D M. A hybrid anti-icing ice protection system[R]. AIAA-97-0302, 1997.
- [53] 郭艳亮. 复合式除冰控制技术及其试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- GUO Yanliang. The control technique and experimental research for aircraft hybrid deicing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [54] 郑春涛. 复合式除冰技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- ZHENG Chuntao. Researches on hybrid de-ice methods [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [55] FORTIN G, ADOMOU M, PERRON J. Experimental study of hybrid anti-icing systems combining thermoelectric and hydrophobic coatings[M]. Montreal, Canada: SAE International, 2011.
- [56] STROBL T, STORM S, THOMPSON D, et al. Feasibility study of a hybrid ice protection system[J]. *Journal of Aircraft*, 2015, 52(6): 2064-2076.
- [57] CHEN L, ZHANG Y D, WU Q, et al. A novel anti/de-icing system combining heat expansion film and electric heating for helicopter rotor[C]// Proceedings of 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Piscataway, US: IEEE, 2017: 1072-1076.
- [58] 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. (in Chinese)
- [59] SAE. Deicing/anti-icing fluid, aircraft, SAE Type I : AMS 1424J [S]. Warrendale, Pennsylvania, US: SAE, 2009: 1-12.
- [60] SAE. Fluid, aircraft deicing/anti-icing, non-Newtonian (Pseudoplastic), SAE Types II, III, and IV: SAE AMS1428K[S]. Warrendale, Pennsylvania, US: SAE, 2018: 1-12.
- [61] COFFMAN, H. J. Helicopter rotor icing protection methods[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 1987, 32(2): 34-39.
- [62] 赵芯, 张亚博, 苏正良, 等. 非牛顿型飞机除冰/防冰液增稠体系及增稠机理研究[J]. *精细与专用化学品*, 2015, 23(2): 9-12.
- ZHAO Xin, ZHANG Yabo, SU Zhengliang, et al. Study on thickening agent of the deicing/anti-icing fluid of no N-newtonian aircraft and thickening mechanism[J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2015, 23(2): 9-12. (in Chinese)
- [63] 吴海涛, 彭华乔, 张帆, 等. 非牛顿型飞机除冰/防冰液黏度影响因素分析[J]. *精细与专用化学品*, 2017, 25(1): 18-21.
- WU Haitao, PENG Huaqiao, ZHANG Fan, et al. Analysis on effective factors of non-newtonian de-icing/anti-icing fluids viscosity[J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2017, 25(1): 18-21. (in Chinese)
- [64] 王强, 彭华乔, 吴海涛, 等. 飞机除冰液流变特性研究[J]. *应用化工*, 2016, 45(4): 732-736.
- WANG Qiang, PENG Huaqiao, WU Haitao, et al. Study on rheological properties of deicing/anti-icing fluids[J]. *Applied Chemical Industry*, 2016, 45(4): 732-736. (in Chinese)
- [65] COFFMAN H J. Review of helicopter icing protection system[R]. AIAA-83-2529, 1983.
- [66] 高淑蓉, 焦丽丽, 易孟超, 等. 疏水/超疏水表面防/除原理及其研究进展[J]. *空气动力学学报*, 2021, 39(2): 151-160.
- GAO Shurong, JIAO Lili, YI Mengchao, et al. Mechanism and research progress of anti/de-icing using hydrophobic/superhydrophobic surfaces[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2021, 39(2): 151-160. (in Chinese)
- [67] VILLENEUVE E, BRASSARD J D, VOLAT C. Effect of various surface coatings on de-icing/anti-icing fluids aerodynamic and endurance time performances[J]. *Aerospace*, 2019, 6(10): 114-130.
- [68] ZHANG Z C, LUSI A, HU H Y, et al. An experimental study on the detrimental effects of deicing fluids on the performance of icephobic coatings for aircraft icing mitigation[J]. *Aerospace Science*

- and Technology, 2021, 119: 107090.1-107090.16.
- [69] BLAHA B J, EVANICH P L. Pneumatic boot for helicopter rotor deicing [C]// Proceedings of Air Transportation And Safety. Hampton, US: Langley Research Center, 1981: 425-445.
- [70] 高郭池, 李保良, 丁丽, 等. 气动除冰飞机结冰风洞试验技术[J]. 实验流体力学, 2019, 33(2): 95-101.
GAO Guochi, LI Baoliang, DING Li, et al. Icing wind tunnel test technology for pneumatic de-icing aircraft[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2019, 33(2): 95-101. (in Chinese)
- [71] PALACIOS J, WOLFE D, BAILEY M, et al. Ice testing of a centrifugally powered pneumatic deicing system for helicopter rotor blades[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2015, 60(3): 1-12.
- [72] DRUY M D, SZEFI J T, PALACIOS J L. Full-scale testing of a centrifugally powered pneumatic de-icing system for helicopter rotor blades[J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(1): 220-228.

(编辑: 陈 越)