

文章编号: 1674-8190(2024)04-143-09

## 飞机燃油系统结冰研究综述

万恒成<sup>1,2,3</sup>, 张爱聆<sup>1,2,3</sup>, 竺宏杰<sup>1,2,3</sup>, 赵梁<sup>1,2,3</sup>, 汝佳兴<sup>1,2,3</sup>, 刘翔<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国民用航空飞行学院 民航安全工程学院, 广汉 618307)

(2. 中国民用航空飞行学院 民机火灾科学与安全工程四川省重点实验室, 广汉 618307)

(3. 四川省全电通航飞行器关键技术工程研究中心, 广汉 618307)

**摘要:** 飞机燃油系统结冰是航空运输中一项关键问题, 其涉及到飞行的安全性和可靠性。本文主要介绍了飞机燃油系统结冰的相关标准、规章以及研究进展。首先, 结合国内外相关标准和结冰试验流程等多个角度, 全面描述了民用飞机与军用飞机在设计标准方面的异同; 然后, 从燃油系统结冰的机理、冰层生长及附着力测试方面, 详细阐述了飞机燃油系统结冰研究的最新进展; 最后, 指出绿色环保、智能化、精细化的飞机燃油系统结冰实验标准是未来的重点研究方向, 并对发动机燃油系统结冰的相关研究进行了展望。

**关键词:** 发动机; 燃油系统; 结冰; 附着力测试

**中图分类号:** V228.1; V328

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.04.16

## Review of research on icing in aircraft engine fuel systems

WAN Hengcheng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ailing<sup>1,2,3</sup>, ZHU Hongjie<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Liang<sup>1,2,3</sup>,  
RU Jiaying<sup>1,2,3</sup>, LIU Xiang<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(2. Civil Aircraft Fire Science and Safety Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(3. Sichuan Key Technology Engineering Research Center for All-electric Navigable Aircraft, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** Icing of aircraft engine fuel system is a key problem in air transportation, which is related to the safety and reliability of flight. The relevant standards, regulations and research progress of icing in aircraft engine fuel system are mainly introduced in this paper. Firstly, combined with domestic and foreign relevant standards and icing test process and other aspects, the similarities and differences of civil aircraft and military aircraft in design criteria are described. Then, the latest progress of icing research on fuel system is described in detail from the aspects of icing mechanism, ice growth and adhesion test. Finally, the key research direction in the future of green, intelligent and fine icing test standard of engine fuel system are pointed out, and the related research of engine fuel system icing is prospected.

**Key words:** engine; engine fuel system; icing; adhesion test

**收稿日期:** 2023-12-28; **修回日期:** 2024-03-07

**基金项目:** 四川省科学技术厅项目(2021YFSY0023); 四川省重点实验室项目(MZ2023KF04); 中国民用航空飞行学院面上项目(PHD2023-066)

**通信作者:** 刘翔(1983-), 男, 博士, 副教授。E-mail: Liux710@163.com

**引用格式:** 万恒成, 张爱聆, 竺宏杰, 等. 飞机燃油系统结冰研究综述[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 143-151.

WAN Hengcheng, ZHANG Ailing, ZHU Hongjie, et al. Review of research on icing in aircraft engine fuel systems[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(4): 143-151. (in Chinese)

## 0 引言

飞机燃油系统结冰,会直接影响航空器的飞行安全。在航空业全球化不断发展的背景下,极地航线的数量急剧增加,新航道连接了全球主要经济体,为国际贸易提供了更为便捷和经济的运输通道<sup>[1]</sup>。极端的气象条件是极地航线的重要特性,解决飞机燃油系统在极地航线飞行结冰的问题是保障极地飞行安全的重要手段。中国民航一直紧密关注国际民航先进的适航标准,探索有效的飞机燃油系统结冰适航符合性方法,从而提升民用飞机设计水平,确保民用飞机在低温运行时的安全性,有助于解决当前的技术挑战,推动燃油系统结冰适航方法的研究,有效提高飞机性能和保障极地航线的飞行安全性<sup>[2]</sup>。

飞机燃油系统的结冰过程十分复杂,对飞机燃油系统结冰难题进行深入分析具有一定的难度。尽管通过飞行实测方法可以获取相对准确的燃油温度变化曲线,但由于此类实测手段的费用昂贵、周期较长、风险较高、可重复性差,并且不同的航空器所得到的实测数据存在较大差异,因此该方法并不具备普适性。根据现有的方法及各单位研究结果表明,开展飞机燃油系统结冰试验主要通过地面试验方法,模拟不同工况下的燃油系统状态<sup>[3-5]</sup>。

本文总结一系列规章及试验研究,包括冰晶形成机理、燃油系统冰层积聚理论等;介绍系统结冰测试以及测试的相关规章;通过对现有研究的综述,以期为民用飞机发动机燃油系统结冰适航认证问题提供解决思路。

## 1 典型结冰事故案例分析

根据飞机事故档案局(Bureau of Aircraft Accidents Archives)的记载,自1958年美国空军B-52的坠机事故以来,燃油系统结冰导致的飞行事故已经超过了200起<sup>[6]</sup>。该事故后,燃油系统结冰首次在航空界引起关注。在2008年1月17日,一架从中国北京飞往英国伦敦的B777-236 ER飞机因为冰晶堵塞热交换器,供油中断、推力下降,在距离跑道330 m的地方迫降,打破了波音777在伦敦希斯罗机场长达10多年的“零事故”纪录。同年11月26日,一架波音777也因为燃油系统结冰堵塞

供油管路而出现了发动机推力下降的问题<sup>[7]</sup>。根据事故调查报告:高度为720 ft(1 ft=0.304 8 m)时,G-YMMM的右发动机停止响应,流量不受控制地减少,发动机压力比降低至1.03;7 s后,左侧发动机压力比降至1.02,导致空速下降,流向两台发动机的燃油流量也受到限制;仪表显示,此时流向发动机的燃油流量远低于所需要的水平。

波音公司的调查结果证明了发动机燃油系统内管路中的燃油结冰,在加大燃油流量时导致了燃油热交换器表面的冰晶堵塞,引起燃油供应中断、发动机停车,最终引发了事故<sup>[8]</sup>。在燃油存放和加注的过程中也会带入部分水分,并且在高空巡航和低温的条件下,接触到炎热且潮湿的空气,飞机燃油系统无油内壁表面的空气遇冷凝结成液体,逐渐增加燃油中的含水量<sup>[9-10]</sup>。

油箱和燃油过滤器是燃油系统热交换中冷却效应较强的部位。此部位中,燃油中的水分、高分子烃类物质更容易凝结成固体(行业统称这一混合物为“冰”)发生结晶。冰层累计会导致燃油流动性下降,甚至堵塞管道,阻碍正常的燃油供应,会对发动机的燃烧过程产生负面影响,导致性能下降。

## 2 燃油系统结冰特性及机理研究

燃油系统结冰的机理研究旨在防止燃油系统结冰故障,满足“安全至上”的航空器设计理念,确保航空器运行的可靠性和安全性。

### 2.1 燃油系统结冰特性

在燃油存放和加注的过程中会不可避免地带入部分水分,并且在高空巡航和低温的条件下,接触到炎热且潮湿的空气,飞机燃油系统结构和表面的冷却效应会导致水蒸气凝结成液体水,导致燃油中的溶解水含量与周围潮湿空气达到湿度平衡,进一步增加了燃油中的含水量。

燃油中主要包含溶解水和加油时带入的水,水分长时间在油箱底部沉积、累积。当燃油系统暴露于极端低温环境时,燃油溶解水的能力降低,在低于0℃以后,水分逐渐冷却形成冰晶。燃油中水组成及冰晶形成图如图1所示。

- 1) 在-3~-1℃时:冰晶开始形成。
- 2) 在-19~-10℃时:冰晶开始具有附着力,

逐渐黏附在管壁内侧,而在 $-13\sim-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,黏性达到最大。

3) 在低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时:冰层失去黏性,在燃油流量增大时会随着燃油流向滤网,造成堵塞。

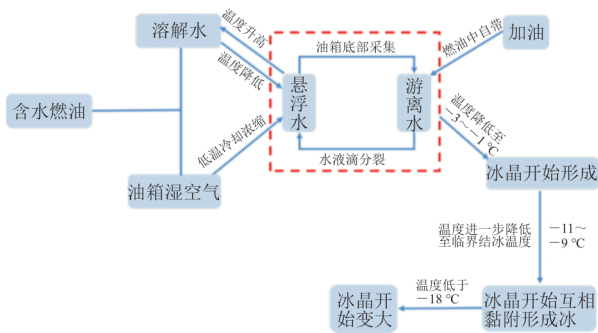


图1 燃油中水的组成及冰晶形成图

Fig. 1 Composition of water and ice crystal formation in fuel oil

航油中的水以三种形式存在,分别为溶解水(在燃烧时会被蒸发)、乳状悬浮水、自由水(沉积于油箱底部)<sup>[11]</sup>。在特定条件下(如温度、湿度、气压等保持不变),随着时间的推移,水在燃油中的溶解逐渐达到饱和状态,此时,水在燃油中的浓度即为其在燃油中的溶解度。

这些水可以沉积在燃油系统的各个部分,尤其是燃油箱、滤清器和输油管道。在更低的温度下,凝结的冰堆积,可能会堵塞燃油流通的路径,例如燃油管道、喷嘴和换热器,影响燃油的流动,导致燃油供应不足、发动机停车。

## 2.2 燃油系统结冰机理

解决飞机燃油系统结冰一直是研究机构和飞机制造商面临的重大挑战。为了解决上述问题,需要深入研究冰在燃油系统内部的的形成机理及附着演变过程,有助于提高飞机燃油系统防冰技术的有效性,也为制定更加安全可靠的防冰措施和飞行规范提供科学依据。

燃油系统结冰机理涉及水分的来源、温度效应、冷却效应以及水分在燃油系统中的行为。冰的表面平衡温度能够维持在 $273.13\text{ K}$ 附近,因此冰被视为均匀稳定的固体,也认为燃油系统壁面冰的形成界面是稳定的<sup>[12]</sup>。在此基础上,Blackmore等<sup>[13]</sup>建立了一种新的结冰模型,预测未完全冻结的冰水混合物(也称为“海绵冰”)的生长。通过该模型,研究者能够更准确地预测海绵状冰水

混合物的生长特性和速率,有助于深入了解该类型结冰的形成过程。

Lam等<sup>[14]</sup>研究飞机燃油系统中积聚的冰的特性和界面剪切强度,试验后发现,表面覆盖积冰的特征是柔软且蓬松的,其形态更像是雪和霜,而不是长时间低温冻结而成的坚硬的冰。测得结冰的孔隙率约为 $0.95$ ,试块顶部和垂直表面的界面剪切强度分别约为 $0.36$ 和 $2.19\text{ Pa}$ ,这一结论与“海绵冰”模型一致。

Schmitz等<sup>[15]</sup>进行了航空燃油结冰与脱落试验验证了积冰厚度与剪切强度有明显关联,并且冰在 $-20\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内黏性最大,更容易黏附在粗糙度更大的金属基体上。但在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冰的累计速率减慢,温度继续降低后,结冰速率降低、结冰量减少,附着冰层的性质也不会发生明显的变化。

探究燃油系统结冰的各类模型能够更准确地预测冰水混合物在燃油系统的生长特性和速率,上述研究结果有助于更全面地理解燃油系统结冰的特性和形成机制。基于已有的“海绵冰”模型,未来的研究可以进一步优化,以提高对未完全冻结的冰水混合物行为的准确预测。这将有助于制定更有效的防冰策略和技术,以确保航空器在寒冷环境下的安全运行

## 2.3 冰层附着研究

除了结冰机理,冰附着力的研究也极为重要,冰附着力的强度受多个相互作用因素的影响,主要强度是由水分子通过氢键相互连接形成的。氢键是一种相对较弱的非共价键,与共价键和离子键相比它的能量较低。因此,在讨论冰附着力时,通常涉及的是冰与物体表面之间的附着力<sup>[16-17]</sup>,物体表面和冰之间的附着力包括表面能、温度、湿度等。

冰层附着力主要受材料基底和周围环境(液态水含量、水滴粒径、环境温度、低温时长)因素<sup>[18-19]</sup>的影响。飞机燃油系统结冰问题不仅存在“过冷结冰”的特殊性质,还面临着复杂的结冰环境条件<sup>[20]</sup>。

燃油与空气在黏度、密度、温度特性等方面存在显著差异,可能导致在燃油系统中形成的冰的物理特性和行为不同于常规积冰试验中观察到的



情况。燃油系统中管道多用内径 12 mm 的小孔径 U 型管,小孔径可能使得冰的形成更为复杂,影响冰的结构和黏附强度。

铝是航空工业中应用最广泛的材料,从机身到主要燃油系统部件均会使用,在铝合金上进行燃油系统积冰试验探究不同条件对冰层的影响是常用的方法<sup>[21-22]</sup>。Schmitz 等<sup>[15]</sup>使用表面处理过的铝合金,对表面粗糙度和表面类型对流动燃料中冰的影响进行了评估,如图 2 所示,在接近 5 min 的时候,加大液滴的冲击流量,冰层开始脱落,导致冰层累积出现下降的趋势。这项研究表明冰在流动燃料中吸积过程的变化趋势。

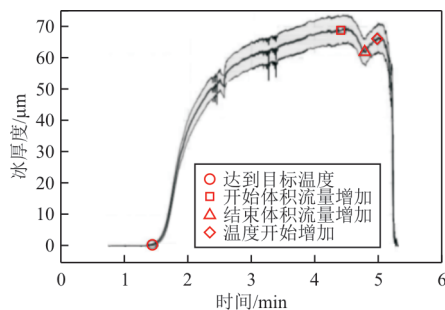


图 2 喷砂后铝表面平均冰厚度的变化趋势<sup>[15]</sup>  
Fig. 2 The trend of average ice thickness on an aluminium surface blasted<sup>[15]</sup>

Maloney 等<sup>[23-24]</sup>的研究指出,材料表面不仅受到过冷水滴大小和数量的影响,还受到包括流量、雷诺数以及所使用材料质量和性质的影响,使用可拆卸的测试管道段,便于检查和测量管道上的压降,以评估沿测试管道的冰堆积情况,证实冰堆积层随着雷诺数的增加和疏水性的增加而减少;Elliott 等<sup>[25]</sup>强调了管路内壁上的积冰生长完全取决于表面的亲、疏水性,这是因为粗糙表面相较水具有更强的表面能,因此粗糙度增加了水滴与表面的接触比表面积,从而导致更快的成核速率。

燃油系统内壁表面对冰层的生长有较大影响,但鲜有研究系统地评估不同材料对不同喷气燃料积冰的影响。这使得燃油系统内壁结冰所产生的附着力大小、性质及变化规律无法通过标准试验方法获得<sup>[26-27]</sup>,金属表面存在微观的凹凸、氧化物或其他不均匀性,这些因素都会影响冰在金属表面的附着和断裂行为<sup>[28-29]</sup>。

旋转离心法是一种常见的用于测量冰附着力的方法之一,如图 3 所示。该方法通过在旋转的试验台上放置试验用冰样品,模拟外界环境影响因素,用以测量冰在不同材料表面上的附着力。

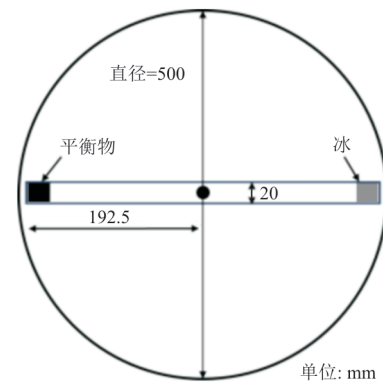


图 3 黏附测试的离心机设置的俯视示意图  
Fig. 3 Overhead diagram of centrifuge setup for adhesion test

该过程将冰黏附到基底上,以不同速度的离心力为试验条件,通过调整旋转半径和速度,实验冰体逐渐脱落,在此时计算离心力,可以间接得出附着力的数值<sup>[30]</sup>。无论冰以何种形式脱落,离心力都可以被认为等于冰的附着力<sup>[31-32]</sup>。

Pittenger<sup>[33]</sup>使用显微载荷技术研究冰—固体界面的流动特性和附着力,如图 4 所示,在纯水蒸气环境中,通过原子力显微镜探针尖端与沉积冰相互作用模型,找出附着力和最大施加力的关系及差异影响因素。

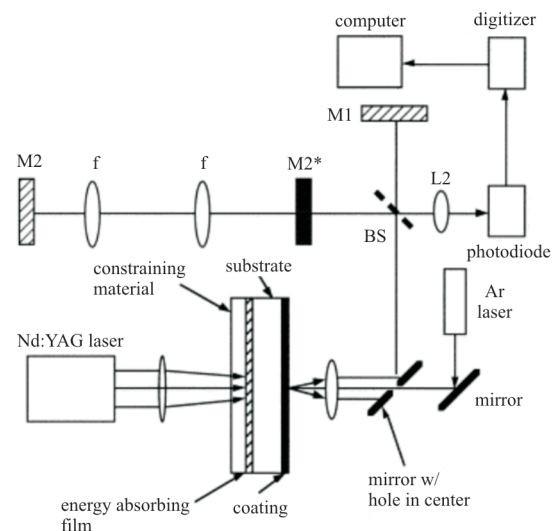


图 4 激光散裂装置与激光多普勒差分位移速度干涉仪的示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of the laser spallation setup along with the laser Doppler differential displacement-velocity interferometer<sup>[33]</sup>

显微载荷技术是一种基于原子力显微镜的方法,通过在微尺度下对冰—固体界面的相互作用进行观察和测量。通过这项技术,研究者可以观

察冰在固体表面的流动特性,了解冰在纯水蒸气环境中的行为。同时,通过推导原子力显微镜探针尖端与沉积冰相互作用的模型,研究者能够揭示附着力与最大施加力之间的关系。该技术可以模拟冰层与基底之间微观相互作用过程,有助于理解冰附着力的分子层面机理。

利用激光裂变技术测量冰层与基底分开的强度,可以获得准确的界面实际强度,测量值即为附着力的强度。激光裂变技术能够对冰附着力强度进行直接测量,可以在实验室环境中模拟冰在真实条件下的附着行为。

上述两种技术的结合使用为研究冰附着力提供了良好的实验基础,从微观到实际强度,为深入解析冰附着力机理提供了丰富的信息。

Matsumoto 等<sup>[34]</sup>使用了纳米级的微观扫描仪对冰在金属基材上的附着力进行研究,如图5所示,为了便于将结果与其他研究进行比较,金属的剪切应力也由冰附着力和冰黏附面积给出,通过与表面能和其他数值的比较(通过将金属的剪切应力定义为冰附着力与冰黏附面积的比值来实现),证明冰层附着力试验的有效性。

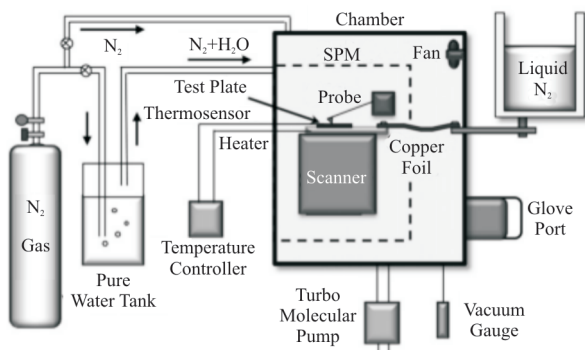


图5 纳米级的微观扫描仪原理<sup>[34]</sup>

Fig. 5 Principle of nanoscale micro scanner<sup>[34]</sup>

纳米级微观扫描仪是一种高分辨率的仪器,可在纳米级别上观察和测量冰的形貌和结构,获取关于冰附着行为的高分辨率图像和数据。

进一步深入研究冰层附着力所受到的影响因素,如材料基底、周围环境(液态水含量、水滴粒径、环境温度、低温时长)等,有助于更全面地理解在不同条件下冰附着力的变化规律<sup>[35]</sup>。针对飞机燃油系统等存在复杂结冰环境的场景,研究者可以通过模拟实际工作条件,探究冰在不同表面上的附着力及其特性,有助于制定更适用于实际应

用的防冰技术。

## 2.4 发展展望

飞机燃油系统结冰特性与机理研究不仅能够后续研究方案提供有效且有针对性的思路,也提供了更充分的理论依据和分析参考,有助于改进现有的防冰技术,并为未来的飞机设计和操作提供更可靠的保障<sup>[36]</sup>。针对飞机燃油系统结冰问题,科研人员应持续创新机理研究技术,采用先进技术和设备提高航空安全性能<sup>[37]</sup>,这包括:1)采用更先进的智能传感器和人工智能系统,以实时监测燃油系统的状态,并记录冰层形成的时间、对应状态及图像;2)未来的研究可能更加强跨学科合作,将工程学、材料科学、气象学、化学等多个领域的专业知识整合起来,共同解决燃油系统结冰的复杂问题。燃油系统结冰问题的研究将继续推动技术和工程解决方案的发展,以确保飞机在极端气象条件下的安全运行。在未来,更多的关注可能会集中在综合利用多种人工智能技术手段,以提高地面试验数据的可靠性、可操作性。

## 3 飞机燃油系统结冰试验标准

局方及飞机制造商针对飞机燃油系统已经制定了相应的标准、规章和试验程序。在民用航空器适航过程中,燃油系统结冰的符合性设计及审定仍然存在一些复杂并难以解决的问题。这需要进一步深入研究,制定更为准确、接近实际工况的方案,以确保飞机燃油系统在设计、制造和适航全过程满足结冰标准要求。

### 3.1 国外标准

国外开展飞机燃油系统结冰试验的研究较早,相关要求、程序及试验方法已有完整体系。美国、加拿大、英国等航空业发达的国家已经开展了大量试验研究和作用机理探索,经过多年的论证、创新和成果沉淀,建立了系统、全面的标准规范。

美国汽车工程师协会(SAE)1964年发布的《飞机燃油系统结冰问题的考虑》<sup>[38]</sup>,结合飞机实际飞行配置和条件,规定控制燃油含水量的措施及注意事项:试验应当采用与实际飞机情况相符的配置和条件,在燃油系统可接受的最临界含水量情况下,每升燃油中未溶解水的含量应保持在

0.2 mg。

《飞机燃油系统安装和设计》<sup>[39]</sup>是关于飞机燃油系统安装和设计的军用标准,没有提供详细参数,但其作为国际上飞机燃油系统结冰的指导性文件,首次规定了燃油系统结冰的相关要求、试验方法和程序。《飞机燃油系统和部件结冰试验》<sup>[40]</sup>在此基础上更详细制定了燃油系统及其部件和过滤器结冰的详细试验程序,提供配水方法,为燃油含水试验中的配水过程提供依据。

《运输类飞机适航准则》<sup>[41]</sup>和《军用航空器适航准则》<sup>[42]</sup>分别作为民用飞机和军用飞机的指导性规范文件,规定了飞机燃油系统结冰验证的相关温度及含水量的要求。

国外各类飞机燃油系统结冰试验相关标准和规章仍指导着全球飞机燃油系统防冰的工程设计及适航认证,维护和促进了航空活动的安全、有效和可持续发展。

### 3.2 国内标准

国内科研机构根据国产民用飞机设计、特殊飞行环境进行了燃油系统结冰设计标准和试验标准的自主创新研究工作。

《运输类飞机适航标准》<sup>[43]</sup>涉及燃油系统和部件结冰相关的设计标准,关于结冰做了具体要求,CCAR29.951(c)条款规定“燃油先在 27℃时用水饱和,并且每 10 L 燃油含有所添加的 2 mL 游离水(每 1 gal 含 0.75 mL,其中 1 gal=3.785 L),然后冷却到在运行中很可能遇到的最临界结冰条件”,CCAR25.952(a)规定“必须用分析和适航当局认为必要的试验表明燃油系统在各种可能的运行条件下功能正常,如果需要进行试验则试验时必须使用飞机燃油系统或能复现燃油系统被试部分工作特性的试验件”。同时要求“燃油先在 27℃时用水饱和,然后每 10 L 燃油添加 2 mL 游离水”,上述加水操作是为了保证燃油中水污染达到可接受的最临界状态,与《飞机燃油系统结冰问题的考虑》<sup>[38]</sup>一致。

《飞机燃油系统与附件的结冰要求和试验》<sup>[44]</sup>中规定燃油系统结冰试验不仅需要进行地面验证与飞行试验相结合,对试验要求、测量参数和设备等进行了规定。

《民用飞机燃油系统和部件结冰试验要求》<sup>[45]</sup>规定民用航空燃油结冰试验的标准,相关条件和

试验程序均参考《飞机燃油系统和部件结冰试验》<sup>[40]</sup>。

《燃油系统和部件结冰试验》<sup>[46]</sup>是民用航空进行燃油系统结冰试验的标准,对民用航空燃油系统结冰试验做了较为完整的要求和规定,其试验条件和程序均参考《飞机燃油系统和部件结冰试验》<sup>[40]</sup>。

《民用飞机燃油系统和部件结冰试验要求》<sup>[45]</sup>和《燃油系统和部件结冰试验》<sup>[46]</sup>是国内关于地面试验最新发布的标准,其试验条件及程序与《飞机燃油系统和部件结冰试验》<sup>[40]</sup>相同,试验装置则与《飞机燃油系统结冰问题的考虑》<sup>[44]</sup>中使用的相同。

在试验结束后,含水量的要求也与国外不同,《民用飞机燃油系统和部件结冰试验要求》<sup>[45]</sup>和《燃油系统和部件结冰试验》<sup>[46]</sup>要求不小于 0.009%,而《飞机燃油系统结冰问题的考虑》<sup>[38]</sup>并没有给出具体要求。国内在试验程序要求上基本与国外标准一致。

国内多家研究机构对航空器燃油系统结冰行为、机理等进行深入研究<sup>[47-49]</sup>,为后期国产民用飞机飞行试验、适航认证提供宝贵经验及技术支持。ARJ21 和 C919 的燃油系统结冰验证研究,由我国独立完成,能更好地适应我国航空器在多样化气象条件下的运行环境,确保飞机在极寒天气中的可靠性和适航性。

### 3.3 飞机燃油系统和部件结冰试验

《飞机燃油系统和部件结冰试验》<sup>[40]</sup>作为目前燃油系统结冰试验指导文件,给出了详细的标准。根据试验情况分为三类:连续运转试验、应急运转试验及燃油滤旁通功能试验,也分别对应三种不同模拟条件<sup>[50-53]</sup>。

1) 连续运转试验:模拟航空器在低温、湿度饱和,但未达到过量水分的状态下进行巡航飞行。不加防冰添加剂的燃油,燃油温度为 $(29 \pm 3)^\circ\text{C}$ ,含水量达到饱和的情况下,水浓度在 0.009%~0.013%。

2) 应急运转试验:当模拟航空器在低海拔高度时,过量的冷凝水可能进入燃油系统。不加防冰添加剂的燃油,在燃油温度为 $(29 \pm 3)^\circ\text{C}$ 含水量达到饱和的情况下,每升燃油中再加入 0.2 mL 的游离水,总浓度为 0.028 8%。



3) 燃油滤旁通功能试验:进行试验时,燃油应为室温下的水饱和状态,然后每升燃油添加0.53 mL的水。

试验温度分别为 $(-2\pm 1)^\circ\text{C}$ 、 $(-11\pm 1)^\circ\text{C}$ 以及航空器运行的最低温度。

1) 连续运转试验:在温度为 $(-2\pm 1)^\circ\text{C}$ 的测试中,持续时间占25%;在温度为 $(-11\pm 1)^\circ\text{C}$ 的测试中,持续时间占50%;而在航空器运行最低温度测试中,持续时间占25%。

2) 应急运转试验:在模拟航空器应急状态下,燃油系统的每一个试验温度需要进行持续30 min的测试。

3) 燃油滤旁通功能试验要求与连续运转试验相同。

地面试验时,需要根据不同型号的飞机搭建不同台架,试验耗费时间长,单次试验需要使用大量液氮进行冷却,加注特定机型飞行一次的燃油量,导致单次试验成本高昂。燃油系统含水量、冷却条件受到内部和外界多重因素影响,试验可重复性弱;地面燃油系统和部件结冰试验已经有了完整的程序,但目前几乎没有进行公开的飞行试验,导致无法获取在飞行状态中的真实数据。

突破燃油结冰试验技术难点的同时,应依托完整的试验标准体系,实现燃油系统结冰理论研究和工程实践的结合,主要包括:基于试验结果调整和优化飞行试验标准方法和技术方案;校正燃油系统结冰/防冰的设计、计算模型;验证地面实验和飞行试验的匹配度和准确性;根据飞行试验中的数据,对理论模型和标准体系进行改进和迭代,以适应实际应用的需要。

### 3.4 发展展望

国内外对飞机燃油系统结冰试验符合验证方法进行了研究,不同飞机制造商提供的试验条件、程序存在较大差异。在未来燃油系统结冰试验发展中,应主要聚焦于全球标准化的制定<sup>[54]</sup>:1) 提高国际民航燃油结冰试验标准的一致性和相互操作性,制定全球性通用标准,健全全球航空器持续运行体系及快速响应支援体系;2) 加强整机协同,包括与发动机、机翼、机身等其他系统的协同工作,确保在结冰条件下航空器整机系统的正常运行,提升风险防控能力,有助于满足不断增长的极地航线运行需求,确保飞机在极寒天气条件下执行任务的性能水平。

## 4 结束语

对燃油系统结冰的研究涵盖多个方面,包括高空飞行环境下的低温条件、燃油中的水分和与外界条件的相互作用等因素。然而,目前对于燃油系统内壁冰层附着力的研究仍然不足。有关系统的内壁研究仅通过使用相同材料进行模拟,无法完全模拟飞行过程中不同工况的影响,是目前燃油系统结冰研究的最大瓶颈。

通过梳理国内外飞机燃油系统结冰的标准和规章,有助于了解该领域的标准化情况和研究进展,为后续深入的防冰技术研究和燃油系统改进提供了基础标准方案;环保、智能化的防冰应用为提高燃油系统在低温条件下的抗结冰性能提供了有力支持;实验测试设备的不断改进也为实际应用提供了更可靠的数据基础。

预计在未来会有更多先进的监测和诊断技术的应用,以提前预警结冰风险,有助于飞机制造商提高发动机燃油系统防冰的设计制造技术水平,使其能够满足在极寒气象条件下适航认证的要求,同时对提高飞机的安全性具有积极的推动作用,实现以民航创新发展为基础,以促进安全运行为依托的目标。

### 参考文献

- [1] SCOTTY L R. Above and beyond: fire and ice[J]. Air and Space Magazine, 2010, 26: 1-15.
- [2] Boeing. Air accident report: 1/2010 G-YMMM[R]. US: Boeing, 2010.
- [3] 顾鹏翔,黄毅. 飞机燃油系统过滤器结冰堵塞模拟实验研究[C]//中国化学会第五届全国化学推进剂学术会议. 大连:中国化学会,2011:504-507.  
GU Pengxiang, HUANG Yi. Simulation experimental research on ice clogging of aircraft fuel system filters[C]//The Fifth National Academic Conference on Chemical Propellants of the Chinese Chemical Society. Dalian: Chinese Chemical Society, 2011: 504-507. (in Chinese)
- [4] 陈凯,向海,孙婷. 燃油系统防冰剂对水在不同喷气燃料中溶解度影响研究[J]. 化学工程与技术,2015,5(5):95-102.  
CHEN Kai, XIANG Hai, SUN Ting. Study on the effect of fuel system anti-icing agent on water solubility in different jet fuels[J]. Chemical Engineering and Technology, 2015, 5(5): 95-102. (in Chinese)
- [5] MURRAY B J, BROADLEY S L, MORRIS G J. Supercooling of water droplets in jet aviation fuel[J]. Fuel, 2011, 90(1): 433-435.
- [6] 段安鹏. 基于量纲分析法分析民用飞机燃油系统管路结冰

- 特性[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(3): 67-72.
- DUAN Anpeng. Based on the outline analysis method analysis of the freezing characteristics of the fuel system of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(3): 67-72. (in Chinese)
- [7] 李炎. 寒冷天气运行燃油结冰事故调查分析与风险控制[J]. 民航管理, 2016(7): 61-68.
- LI Yan. Cold weather running fuel freezing accident investigation and analysis and risk control[J]. Civil Aviation Management, 2016(7): 61-68. (in Chinese)
- [8] Boeing. Air accident report: AAR1/2014 [R]. US: Boeing, 2008.
- [9] 屈元元. 低温下航空燃油中水的存在形式和特性研究[J]. 科技视界, 2018(5): 45-46.
- QU Yuanyuan. Research on the existence form and characteristics of water in aviation fuel at low temperature[J]. Science and Technology Vision, 2018(5): 45-46. (in Chinese)
- [10] 乔继鑫. 燃油管路结冰试验方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- QIAO Jixin. Research on fuel pipeline icing test method [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [11] 刘振国, 王榆淞, 朱程香, 等. 基于成核理论的水温对结冰黏附强度影响研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(2): 64-70.
- LIU Zhenguo, WANG Yusong, ZHU Chengxiang, et al. Research on the effect of water temperature on ice adhesion strength based on nucleation theory[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 64-70. (in Chinese)
- [12] MESSINGER B L. Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of air speed [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1953, 20(1): 29-42.
- [13] BLACKMORE R Z. A new model of spongy icing from first principles [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107: 9-15.
- [14] LAM K W, LAO L, HAMMOND D W, et al. Character and interface shear strength of accreted ice on subcooled surfaces submerged in fuel [J]. Aeronautical Journal, 2016, 119: 1377-1396.
- [15] SCHMITZ M, SCHMITZ G. Experimental study on the accretion and release of ice in aviation jet fuel[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 82/83: 294-303.
- [16] LEE R W, SCHULSON E M. The strength and ductility of ice under tension[J]. Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, 1988, 110: 187-191.
- [17] RYZHKIN I A, PETRENKO V F. Physical mechanisms responsible for ice adhesion [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 1997, 101: 6267-6270.
- [18] ARCHER P, GUPTA V. Measurement and control of ice adhesion to aluminum 6061 alloy[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1998, 46(10): 1745-1771.
- [19] FORTIN G, PERRON J. Ice adhesion models to predict shear stress at shedding [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012, 26(4/5): 523-553.
- [20] SAITO H, YAMAUCHI K T. Water and ice-repellent coatings [J]. Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions, 1997, 16(3): 3-17.
- [21] LI A Y, MCGILLICUDDY D J, DINNIMAN M S, et al. Processes influencing formation of low-salinity high-biomass lenses near the edge of the ross ice shelf[J]. Journal of Marine System, 2016, 166: 108-119.
- [22] PLUS A, LEE J, KIM M Y. Integrated gasification combined cycle process simulation using [J]. Environmental Science, 2010, 35: 1-12.
- [23] MALONEY T C. The collection of ice in Jet A-1 fuel pipes [M]. Rutgers: The State University of New Jersey, 2012.
- [24] MALONEY T C, DIEZ F J, ROSSMANN T. Ice accretion measurements of Jet A-1 in aircraft fuel lines[J]. Fuel, 2019, 254: 115616.
- [25] ELLIOTT J W, SMITH F T. Ice formation on a smooth or rough cold surface due to the impact of a supercooled water droplet[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2017, 102: 35-64.
- [26] 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.
- [27] SOLTIS J, PALACIOS J, EDEN T, et al. Ice adhesion mechanisms of erosion-resistant coatings [J]. AIAA Journal, 2015, 53(3): 654-662.
- [28] MAKKONEN L. Ice adhesion: theory, measurements and countermeasures[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012, 26(4/5): 413-445.
- [29] KRAJ A G, BIBEAU E L. Measurement method and results of ice adhesion force on the curved surface of a wind turbine blade[J]. Renewable Energy, 2010, 35(4): 741-746.
- [30] TARQUINI S, ANTONINI C, AMIRFAZLI A, et al. Investigation of ice shedding properties of superhydrophobic coatings on helicopter blades [J]. Cold Regions Science & Technology, 2014, 100: 50-58.
- [31] 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 & Technology, 2016, 121: 93-99.
- [32] JANJUA Z A. The influence of freezing and ambient temperature on the adhesion strength of ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 140: 14-19.
- [33] PITTENGER B. Investigation of ice-solid interfaces by force microscopy: Plastic flow and adhesive forces[J]. Journal of Vacuum Science & Technology: A Vacuum Surfaces & Films, 1998, 16(3): 1832-1837.
- [34] MATSUMOTO K, HONDA M, MINAMIYA K, et al. Measurements of correct ice adhesion forces to metal test plates in nano-scale by using SPM[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 66: 84-92.



- [35] MATSUMOTO K, AKAISHI M, TERAOKA Y, et al. Investigation of method for measuring adhesion force of ice in nano/micro scale by using SPM[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(1): 130-141.
- [36] 王海涛, 常奔, 李成行. 运输类飞机防冰除冰适航取证分析[J]. *航空工程进展*, 2012, 3(1): 116-119, 130. WANG Haitao, CHANG Ben, LI Chenghang. Forensic analysis of airworthiness of transport aircraft for anti-icing and deicing[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2012, 3(1): 116-119, 130. (in Chinese)
- [37] 岳海丽. 可持续发展视角下的航空公司安全管理策略研究[J]. *中国航务周刊*, 2023(47): 185-187. YUE Haili. Research on airline safety management strategy from the perspective of sustainable development[J]. *China Aviation Journal*, 2023(47): 185-187. (in Chinese)
- [38] SAE. Considerations on ice formation in aircraft fuel systems: SAE AIR 790C[S]. US: SAE, 1964.
- [39] Department of Defense. Fuel systems: aircraft, installation and test: MIL-F-17874B-1965 [S]. US: Department of Defense, 1965.
- [40] SAE. Aircraft fuel system and component icing test: SAE ARP 1401B[S]. US: SAE, 2012.
- [41] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards for transportation category airplanes: 14 CFR 25 [S]. US: Federal Aviation Administration, 1996.
- [42] Department of Defense. Airworthiness certification criteria: MIL-HDBK-516C [S]. US: Department of Defense, 2014.
- [43] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011. Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standards of transport category aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011. (in Chinese)
- [44] 中国人民解放军总装备部. 飞机燃油系统与附件的结冰要求和试验: GJB 3212—1998[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 1998. General Armament Department of Chinese People's Liberation Army. Icing requirements and tests for aircraft fuel systems and accessories: GJB 3212—1998[S]. Beijing: General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army, 1998. (in Chinese)
- [45] 中华人民共和国工业和信息化部. 民用飞机燃油系统和部件结冰试验要求: HB 8504—2014[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2014. Ministry of Industry and Information Technology, People's Republic of China. Icing test requirements for fuel systems and components of civil aircraft: HB 8504—2014[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, People's Republic of China, 2014. (in Chinese)
- [46] 中国民用航空局. 燃油系统和部件结冰试验: MH/T 9004—2013[S]. 北京: 中国民用航空局, 2013. Civil Aviation Administration of China. Icing test of fuel system and components: MH/T 9004—2013[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2013. (in Chinese)
- [47] 刘春阳, 李新. 民机燃油系统结冰威胁适航要求及符合性验证试验研究[J]. *航空维修与工程*, 2018(1): 40-42. LIU Chunyang, LI Xin. Research on airworthiness requirements and compliance verification test of civil aircraft fuel system icing threat[J]. *Aviation Maintenance and Engineering*, 2018(1): 40-42. (in Chinese)
- [48] 李琛, 韩崇鹏, 崔利丰. 航空发动机燃油结冰试验标准研究[J]. *航空标准化与质量*, 2022(4): 6-8. LI Chen, HAN Chongpeng, CUI Lifeng. Research on aviation engine fuel icing test standards[J]. *Aviation Standardization and Quality*, 2022(4): 6-8. (in Chinese)
- [49] 王慧丹, 徐鹏国, 舒振杰, 等. 燃油系统结冰试验标准研究[J]. *航空标准化与质量*, 2014(5): 3-6. WANG Huidan, XU Pengguo, SHU Zhenjie, et al. Research on fuel system icing test standards[J]. *Aviation Standardization and Quality*, 2014(5): 3-6. (in Chinese)
- [50] 温占永. 某无人机爬升过程中燃油温度变化规律仿真研究[J]. *航空工程进展*, 2021, 12(1): 91-96, 103. WEN Zhanyong. Simulation study of fuel temperature changes during the climb of a UAV[J]. *Advanced in Aeronautical Science and Engineering*, 2021, 12(1): 91-96, 103. (in Chinese)
- [51] 刘德刚, 周宇穗. 民用飞机燃油系统结冰适航验证方法研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2011(2): 32-34. LIU Degang, ZHOU Yusui. Research on icing airworthiness verification method of civil aircraft fuel system[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2011(2): 32-34. (in Chinese)
- [52] 王凯. 飞机燃油结冰试飞方法分析[J]. *中国科技信息*, 2023(10): 40-43. WANG Kai. Analysis of aircraft fuel icing test flight test methods[J]. *China Science and Technology Information*, 2023(10): 40-43. (in Chinese)
- [53] 董宏清, 孙中海, 李宏. 民用航空器燃油系统结冰适航审定符合性验证研究[J]. *航空标准化与质量*, 2023(3): 28-31. DONG Hongqing, SUN Zhonghai, LI Hong. Research on compliance verification of civil aircraft fuel system icing airworthiness certification [J]. *Aviation Standardization and Quality*, 2023(3): 28-31. (in Chinese)
- [54] 付金华, 刘薇薇, 常赫. 国产民机“走出去”高质量发展战略研究[C]// 第六届中国航空科学技术大会. 嘉兴: 中国航空学会, 2023: 22-34. FU Jinhua, LIU Weiwei, CHANG He. Research on high-quality development strategy of domestic civil aircraft "Going out"[C]// The 6th China Aeronautical Science and Technology Conference. Jiaxing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2023: 22-34. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)