

1-2-2019

Relevance Analysis of Deicing Parameters and Deicing Efficiency of Aircraft Ground

Bin Chen

1.Department of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ;2.Ground Support Equipments Research Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Liwen Wang

1.Department of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ;2.Ground Support Equipments Research Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Relevance Analysis of Deicing Parameters and Deicing Efficiency of Aircraft Ground

Abstract

Abstract: Aircraft ground freezing could lead to potential danger and delay for flight. To alleviate these problems, the main method is to use the deicing fluids to clean ice or snow on the aircraft body, which lacks of reference of the deicing fluids parameters and efficiency. *To study the effect of the deicing fluids parameters on the aircraft deicing efficiency, the deicing mechanism is analyzed. The black box mathematical model of the deicing process is generalized abstractly. The deicing process is divided into two subprocesses to establish the deicing model. The relevance between the deicing fluids parameters and deicing efficiency is studied through numerical simulation method.* Experiments show that the deicing efficiency is positively related to the deicing fluids temperature. But the deicing velocity could not be enhanced with a big fluids flux in a moment, yet more deicing fluids are wasted massively. Experimental results verify that the deicing mechanism is reasonable, which provides a basis for deicing equipment qualification and performance optimization.

Keywords

aircraft, deicing fluids, aircraft ground deicing, efficiency, relevance analysis

Recommended Citation

Chen Bin, Wang Liwen. Relevance Analysis of Deicing Parameters and Deicing Efficiency of Aircraft Ground[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1118-1126.

飞机地面除冰效能与除冰参数相关性分析

陈斌^{1,2}, 王立文^{1,2}

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300072; 2. 中国民航大学航空地面特种设备民航研究基地, 天津 300300)

摘要: 飞机地面积冰导致飞行安全隐患和航班延误, 除冰液除冰是缓解上述问题的主要方法, 但缺乏除冰液使用参数和除冰效能的参考依据。以研究除冰液参数对除冰效能的影响为目的, 分析了除冰液除冰机理, 抽象出该过程的黑箱数学模型, 建立了除冰过程的分段模型, 通过数值模拟方法研究了除冰液温度和流量对除冰效能相关性。实验表明: 除冰效能和除冰液温度正相关, 但流量增加不能迅速提高除冰速度, 反而造成除冰液浪费。验证了仿真结论的合理性, 为除冰装备技术指标和性能优化奠定基础。

关键词: 飞机; 除冰液; 除冰; 效能; 相关性分析

中图分类号: V351.392

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1118-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803044

Relevance Analysis of Deicing Parameters and Deicing Efficiency of Aircraft Ground

Chen Bin^{1,2}, Wang Liwen^{1,2}

(1. Department of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2. Ground Support Equipments Research Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aircraft ground freezing could lead to potential danger and delay for flight. To alleviate these problems, the main method is to use the deicing fluids to clean ice or snow on the aircraft body, which lacks of reference of the deicing fluids parameters and efficiency. To study the effect of the deicing fluids parameters on the aircraft deicing efficiency, the deicing mechanism is analyzed. The black box mathematical model of the deicing process is generalized abstractly. The deicing process is divided into two subprocesses to establish the deicing model. The relevance between the deicing fluids parameters and deicing efficiency is studied through numerical simulation method. Experiments show that the deicing efficiency is positively related to the deicing fluids temperature. But the deicing velocity could not be enhanced with a big fluids flux in a moment, yet more deicing fluids are wasted massively. Experimental results verify that the deicing mechanism is reasonable, which provides a basis for deicing equipment qualification and performance optimization.

Keywords: aircraft; deicing fluids; aircraft ground deicing; efficiency; relevance analysis

引言

飞机停泊在地面环境中, 冻雨、冰、雪和霜会

聚集在飞机表面, 形成积聚。飞机地面积冰、雪/霜对飞行安全造成严重隐患。飞机积冰改变了飞机起飞过程中的绕流流场, 破坏了飞机的气动性能, 导致飞机部件的载荷分布发生改变, 使得飞机的操纵性和稳定性恶化。美国波音公司的研究数据表明, 在飞机表面每平方厘米均匀分布一个 1 ms 的霜点, 将直接导致飞机升力下降 33%^[1-2]。飞机表



收稿日期: 2016-04-13 修回日期: 2016-06-13;
基金项目: 科技部科技支撑计划项目子课题 (2012BAG04B02), 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项项目 (3122016B004);
作者简介: 陈斌(1974-), 男, 陕西凤翔, 博士生, 副研究员, 研究方向为机场地面运行控制与保障技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 1118 •

面积冰也是冬季航班延误的直接起因。2008 年 1 月, 中国南方发生的大面积冻雨自然灾害共造成 814 次航班返航、备降, 4 600 多个航班取消, 13 500 多行航班延误, 多个机场关闭, 由此引发全国枢纽机场航班的大面积延误或者取消。可见, 飞机积冰对航班安全运行和延误等问题提出挑战, 应当采取措施解决或缓解上述问题。

飞机地面除冰是缓解或者解决上述问题的有力方法之一, 因而飞机地面除冰技术的研究成为航空领域的热点^[3-4]。文献[5]介绍了美国 Innovative Dynamics 公司采用形状记忆合金(Shape Memory Alloy)在飞机除冰方面的设计原理和实验。该方法是在机翼表面安装一个形状记忆合金薄板, 当薄板上面积冰时, 该板产生的膨胀/收缩除冰运动使冰块脱落, 采用形状记忆合金除冰可以大量节省能源。文献[6]介绍了美国国家气象参数研究中心在 1991 年研制了一套除冰决策气象支持系统 WSDDM (Weather Support to De-icing Decision Making), 该系统可以提前 30 min 输出机场小范围的预测的积冰类型、积冰严重程度和降雪率等参数, 但并没有给出该天气状况下的除冰液使用标准和配比等参数。文献[7]研究考虑了温度变化时的除冰液保持时间, 建立了考虑温度变化时的除冰液保持时间模型, 采用数值模拟方法得出了温度变化条件下除冰液保持时间变化关系。

基于以上分析可以看出, 除冰液使用量、浓度和配比等使用粗放, 常常造成除冰液过度使用, 由此带来除冰成本增加, 一定程度上也破坏了机场周围的地下水资源环境^[8]。同时, 现有的除冰装备和技术落后, 除冰过程运行效能低下, 缺乏科学性, 不利于除冰装备保障能力的最大化, 特殊情况下甚至加重航班延误^[9]。遗憾的是对于上述问题很少有相关的研究报道, 也缺乏科学、系统的理论和技术标准。基于此, 本文探讨飞机地面除冰机理, 分析除冰参数与除冰效能(效率和能力)的相关性, 优化除冰参数, 为除冰装备设计和运行提供标准。

1 除冰液除冰物理模型及能量方程

将除冰液和水混合物加热后喷射到机体表面, 依靠加热液体本身的热量融化掉机体表面的积冰, 此时在机翼表面形成了液体和积冰共存的状态, 该过程是一个典型的固液相变过程, 遵循热量传递和守恒规律, 此为除冰阶段。当机翼表面的积冰全部融化后, 形成水和除冰液的混合物, 该混合物形成的薄膜容易二次结冰, 该液膜再次结冰的时长定义为除冰液保持时间(Hold Time)^[10-11]。为了确保飞机在等待起飞时间内不再次结冰, 还要进行防冰操作, 往飞机表面喷洒防冰液, 以阻止和延缓飞机表面在一定时间内二次结冰, 此为防冰阶段。

1.1 除冰过程热量分析

机翼表面喷射除冰液后, 由于机翼表面和周围环境有温差, 所以除冰液和周围环境之间发生热量传递, 同时机翼和积冰也吸收一部分热量。由于液膜的温度高于外界环境, 所以液膜和外界大气环境之间存在对流和辐射热交换^[12-13]。图 1 为飞机地面除冰过程中热量变化和热传递的示意图。其中: Q_0 表示除冰液带来的热量, 由除冰液的喷射温度、流量和喷射时间决定; Q_1 表示除冰液表面与外界环境对流换热所消耗的热量; Q_2 表示除冰液表面与外界环境辐射换热所消耗的热量; Q_3 表示积冰从环境温度升温到冰点所消耗的热量; Q_4 表示积冰融化的潜热; Q_5 表示除冰液表层与底层的热传递能量; Q_6 表示机翼本体升温所消耗的能量。

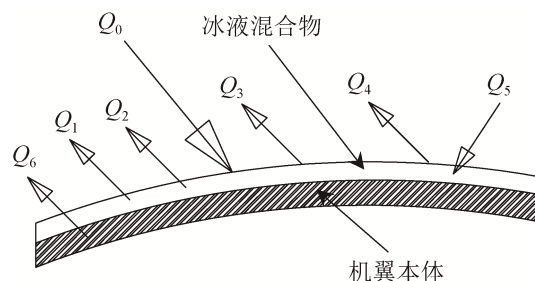


图 1 飞机地面除冰过程中热量变化和传递示意图
Fig. 1 Heat change and transfer during aircraft ground deicing

1.2 除冰参数与模型分析

飞机地面除冰过程的影响因素涉及到风速、环境温度、空气湿度和机翼积冰状况等多类型参数, 这些参数具有明显的时变、非线性特性。为了研究除冰过程中机翼表面积冰融化状况的动态变化, 将除冰液表层温度 T_s 和积冰融化厚度 H (冰层厚度减少量) 作为系统的状态(输出)参数, 反映除冰过程的状态变化。选取除冰液流量 F_f 、温度 T_f 作为该过程的输入参数。这样, 整个除冰过程简化为 2 个输入 2 个输出的控制对象, 建立该过程的状态方程就可以研究除冰液表层温度 T_s 和积冰融化厚度 H 在给定输入流量 F_f 、温度 T_f 条件下的动态变化过程。图 2 为飞机地面除冰过程模型示意图。

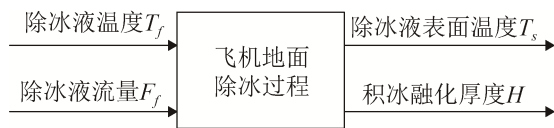


图 2 飞机地面除冰过程模型示意图

Fig. 2 The model of aircraft ground deicing process

1.3 除冰过程分段模型

在飞机地面除冰中, 除冰液的热量使积冰升温融化, 机翼表面是积冰、除冰液和水的混合物, 积冰逐渐变薄直至积冰全部融化, 此为除冰过程的第一阶段, 除冰阶段。除冰液喷射后, 再次喷射防冰液, 防冰液使机翼在限定时间内无法在表面形成凝霜、结冰和积雪, 此为飞机地面除冰的第二阶段, 即防冰阶段。防冰阶段是机翼材料升温 and 热量传递过程, 不涉及融冰和相变过程, 其机翼表面物质分布、除冰作用和除冰阶段完全不同^[14-15]。除冰阶段除冰液流量和温度起主要作用, 防冰阶段除冰液温度是除冰的决定参数。根据上述分析, 结合除冰过程热量消耗和传递模型, 分别建立每阶段除冰能量平衡模型。

通过上述分析, 我们假设在除/防冰阶段, 不考虑除冰液汽化、蒸发消耗的热量、不考虑除冰液喷射所携带的动能对积冰的冲击除冰等物理作用的影响、假设机翼表面除冰液处于平稳的层流状

态、认为水平方向不存在温度差, 热量沿机翼表面垂直方向传递, 且机翼上层蒙皮与周围环境、机翼内部和机翼下层蒙皮没有热量交换。

1. 除冰阶段模型

由以上假设条件之后针对机翼除冰过程提出如下方程:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (1)$$

式(1)即为除冰阶段的除冰的整体能量守恒关系, 除冰液携带的热量一部损耗在除冰现场外界环境中, 一部分传递到积冰融化所需潜热和导致积冰升温的热量。针对融冰过程的热量传递关系, 可用下式表示:

$$Q_5 = Q_3 + Q_4 \quad (2)$$

式(2)表示积冰融化的热量通过除冰液的导热途径获得。

可以看出在除冰阶段, Q_0, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 和 Q_5 参数起主要作用, 按照每种热量传递形式, 分别表示出 $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5$, 根据式(1)和(2), 得出热交换过程中除冰液表层温度 T_s 和积冰融化厚度 H 变化的动态方程:

$$\frac{dT_s}{dt} = -Lv \cdot$$

$$\frac{\lambda_f (T_s - 273) / \delta + \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) + h_4 (T_s - T_a)}{\rho_f c_f F_f} \quad (3)$$

$$\frac{dH}{dt} = - \frac{\lambda_f (T_s - 273) / \delta}{\rho_{ice} c_2 (273 - T_a) + \rho_{ice} h_5} \quad (4)$$

2. 防冰阶段模型

根据上述假设, 可以列出下列方程:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_6 \quad (5)$$

防冰阶段没有积冰升温 and 融化所需的热量, 仅考虑除冰液携带热量的自身损耗和机翼本体吸收的关系, 该阶段热量损耗包含 Q_1, Q_2, Q_6 。按照每种热量传递形式, 分别求出 Q_0, Q_1, Q_2, Q_6 , 根据式(5)得出热交换过程中除冰液表层温度 T_s 的动态方程:

$$\frac{dT_s}{dt} = - \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) + h_4 (T_s - T_a)}{\rho_f c_f F_f / Lv + H_1 \rho_1 c_1} \quad (6)$$

上述分段模型对飞机除冰过程进行全面的描

述与解释, 对该模型假设不同的输入条件, 通过模型输出参数的状态来反映除冰效能与除冰液参数的相关性^[16]。

2 除冰液参数与除冰效能仿真

2.1 仿真参数及条件界定

1) 仿真参数

表1给出了以波音737-800机型为仿真对象的仿真参数。根据维修手册提供数据^[17], 该机型大翼尺寸呈梯形分布, 机翼根部宽度为5.7 m, 翼梢宽度为1.251 m, 单侧大翼总面积为49.69 m², 考虑机翼整体面积, 此处平均弦长取机翼宽度平均值3.47 m, 翼展长14.3 m。

表1 仿真模型基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the simulation model

参数	单位	数值
机翼平均弦长 L	m	3.47
机翼等效翼长 W	m	14.3
机翼蒙皮厚度 H_1	m	0.005
机翼材料密度 ρ_1	kg/m ³	2630
机翼材料比热容 c_1	kJ/(kg·k)	0.875
积冰密度 ρ_{ice}	kg/m ³	913
积冰比热容 c_2	kJ/(kg·k)	1.930
积冰融化潜热 h_3	kJ/kg	33.500
环境温度 T_a	°C	-10
除冰液热导率 λ_f	W/(m·K)	0.3
初始积冰厚度 H_0	m	0.002
除冰液保持时间	min	15~30

2) 仿真条件界定

i) 除冰阶段

假设积冰表面温度和除冰液膜表层温度相同, 都用 T_s 表示。假设机翼表面积冰初始厚度 $H_0 = 0.002$ m, 则机翼表面积冰厚度 $H' = H_0 - H$, 这里 H 为仿真模型中的参数, 表示除冰阶段积冰融化的厚度。除冰阶段仿真模型如式(3)和(4)所示。

ii) 防冰阶段

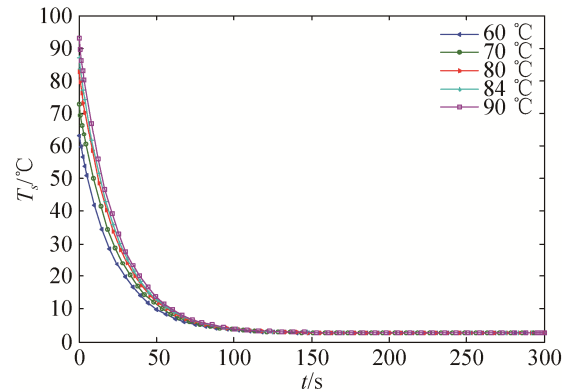
假设除冰液膜和机翼本体在垂直方向无温度变化, 用除冰液表层温度 T_s 表示该过程的除冰液膜温度, 以液膜温度判断是否二次结冰。防冰阶段

根据式(6)进行仿真研究。

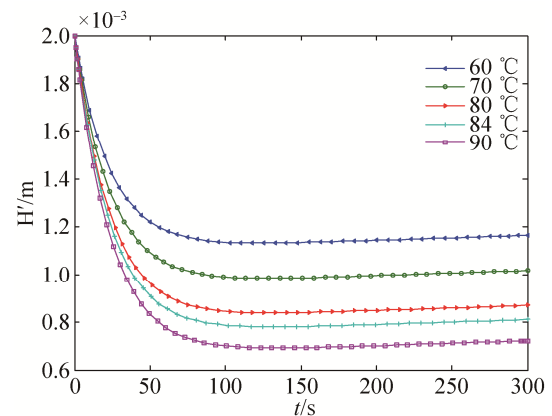
2.2 仿真结果

1) 除冰液温度对除冰效能影响

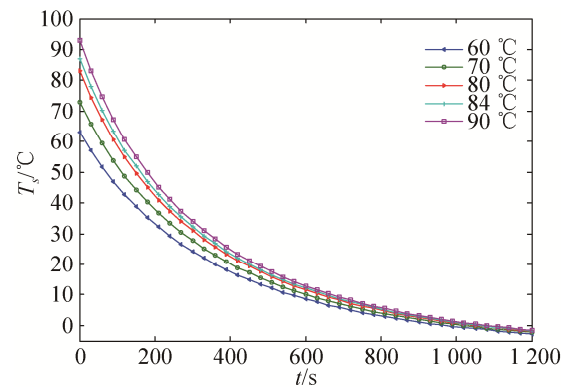
图3分别表示除/防冰阶段不同除冰液温度时积冰表层温度和积冰厚度的变化情况。



(a) 除冰阶段表面温度变化



(b) 除冰阶段积冰厚度变化

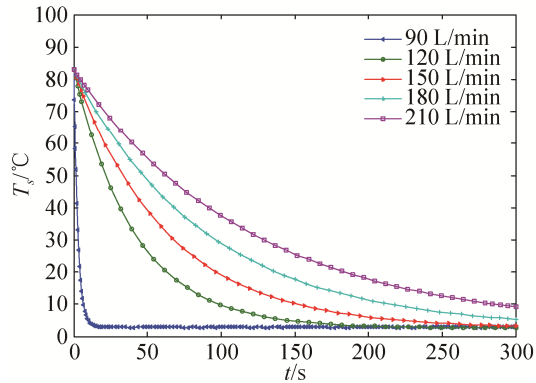


(c) 防冰阶段表面温度变化

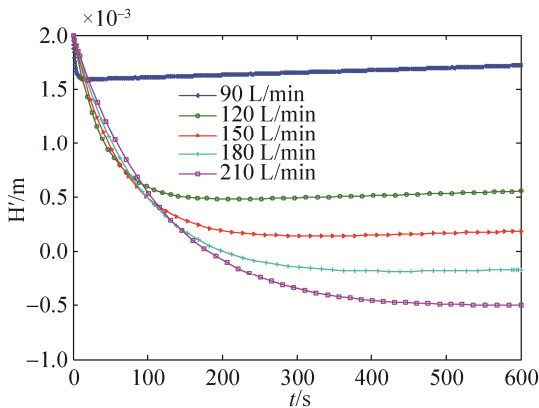
图3 除/防冰阶段除冰液温度对除冰效能影响
Fig. 3 The effect of deicing fluids temperature on deicing efficiency during deicing/anti-icing phase

2) 除冰液流量对除冰效能影响

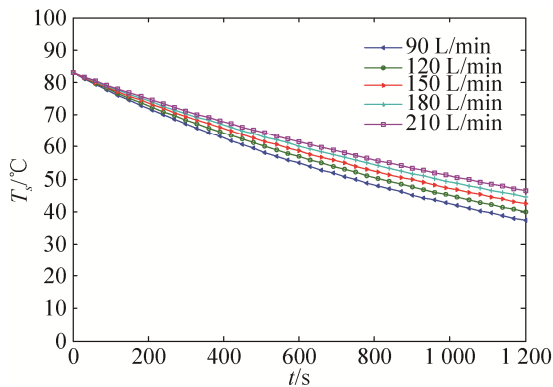
图4分别表示除/防冰阶段不同除冰液流量时积冰表层温度和积冰后的变化趋势。



(a) 除冰阶段表面温度变化



(b) 除冰阶段积冰厚度变化



(c) 防冰阶段表面温度变化

图4 除/防冰阶段除冰液流量对除冰效能影响

Fig. 4 The effect of deicing fluids flux on deicing efficiency during deicing/anti-icing phase

2.3 仿真结果分析

1) 温度影响结果分析

除冰阶段,从图3(a)可以看出,除冰液表层温度开始随着初始温度快速下降,除冰液初始温度越高,喷射到机翼上表面的除冰液表层温度下降速度越快,初始温度低者,下降速度次之。同时,还可以看到60s之前,5条曲线下下降趋势基本一致。60s后,除冰液表层温度变化的5条曲线变化趋势基本重合。约150s后,除冰液表层温度趋于恒定。从图3(b)可以看出,除冰液出口温度分别为60°C,70°C,80°C,84°C和90°C,除冰液开始喷射后,机翼表面积冰厚度开始下降,且除冰液温度越高,积冰厚度下降越快,除冰液初始温度低者,下降速度次之。在60s后由于积冰融化滞后,此时的积冰厚度还在缓慢下降,除冰液温度越高,积冰缓慢融化过程持续时间较短。同时,机翼表面积冰厚度和除冰液温度反相关,即除冰液温度越高,剩余的积冰厚度越小。在100s时,随除冰液温度由高到低,剩余积冰的厚度呈现由小到大的分步,图3(b)中,除冰液为90°C时,积冰的厚度约为0.007m,当除冰液温度为60°C时,积冰的厚度约为0.015m。据此,可以得出升高除冰液温度可以提高除冰效率。

防冰阶段,如图3(c),待机翼表面积冰融化后,喷射防冰液,除冰液表面温度从开始的初始温度(60°C、70°C、80°C、84°C和90°C)下降,大约800s时,除冰液表面温度达到6°C~9°C之间。随着机翼表面附着的除冰液继续和周围环境继续进行热交换,其温度继续降低,到1000s时,除冰液表面温度下降达到1°C左右,一直持续到1200s时,温度接近0°C。该时间远远大于防冰液保持时间45min,据此判断机翼表面没有二次结冰的温度条件形成。

2) 流量影响结果分析

除冰阶段,从图4(a)可以看出,除冰液流量越大,除冰液表面温度下降越快。当除冰液出口流量为90L/min和210L/min时,在60s时除冰液表层温度分别为0°C和47°C。从图4(b)可以看出,刚开始时,在一定范围内增大除冰液流量并不能加速积冰融化速率,因为积冰融化需要一定的时间过

程。但 100 s 后, 积冰的厚度也随除冰液流量不同开始呈现不同的结果, 流量大的积冰融化快, 而流量较小的, 积冰融化缓慢。可见, 在积冰融化阶段, 简单地增大除冰液流量对除冰效率的提高并不明显, 反而过大的流量造成了除冰液浪费。

防冰阶段, 从图 4(c)可以看出, 喷射除冰液后, 除冰液表层温度缓慢下降, 喷嘴流量越大, 温度下降越缓慢; 反之, 除冰液表层温度下降越快。在 1 200 s 处, 喷嘴流量为 90 L/min 时的温度约 37 °C, 喷嘴流量为 210 L/min 时, 除冰液表层温度约为 47 °C, 两者相差 10 °C。

3 除冰效能实验研究

3.1 除冰效能与除冰参数实验系统

如图 5(a)所示, 实验系统包括了模拟机翼、镶嵌于模拟机翼上的积冰厚度传感器、温度传感器, 传感器信号调理装置及计算机系统, 此外还包括除冰液温度和流量计量装置。在实验中采用尺寸为 800 mm×800 mm×2.5 mm 的航空铝板, 实验用的铝板表面经过打磨处理, 使其粗糙度与飞机机体表面相似。在该模拟机翼铝板上嵌入光纤式积冰传感器和 Pt100 铂电阻温度传感器。在实际实验中铝板与水平面成 5°倾角, 模拟飞机在地面时的机翼水平角度。将上述模拟机翼、传感器及信号调理装置和计算机系统集成后, 实验系统实物图如图 5(b)所示。

3.2 实验过程及方法

除冰过程中, 为保证实验的可重复性, 挑选室外环境温度为 -5 °C~-7 °C, 风速为 1~2 m/s, 天气为阴天的环境下进行。在除冰前, 通过喷雾使铝板表面结冰。依据实验相似原则^[18], 根据模拟机翼面积大小和实际机翼面积大小, 此处选择喷嘴流量为 0.8~2.4 L/min 可以调节, 除冰液温度分别设定在 40 °C、50 °C、60 °C 和 70 °C, 实验过程中分别采集机翼表面除冰液表面温度和积冰厚度, 具体实验结果和分析如下。

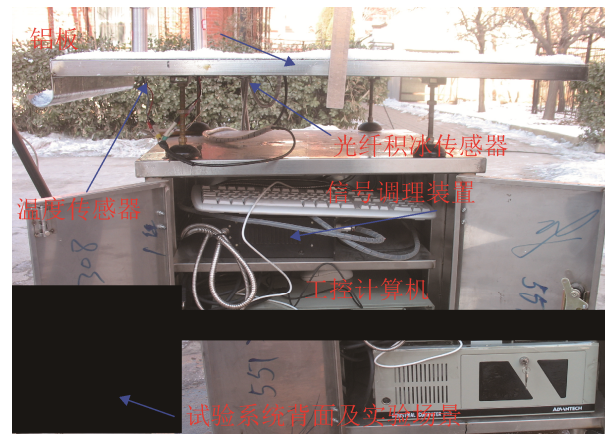
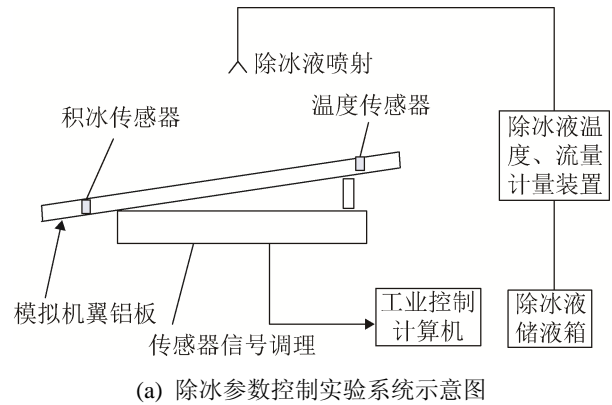
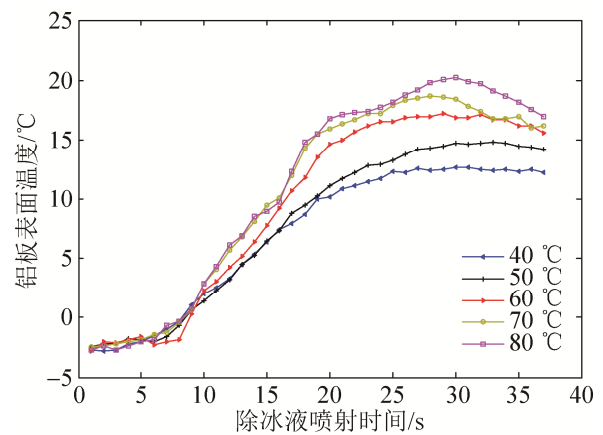


图 5 除冰参数及性能优化实验系统结构示意图和实物图
Fig. 5 Schematic diagram and physical picture of deicing parameters and performance optimization experimental system

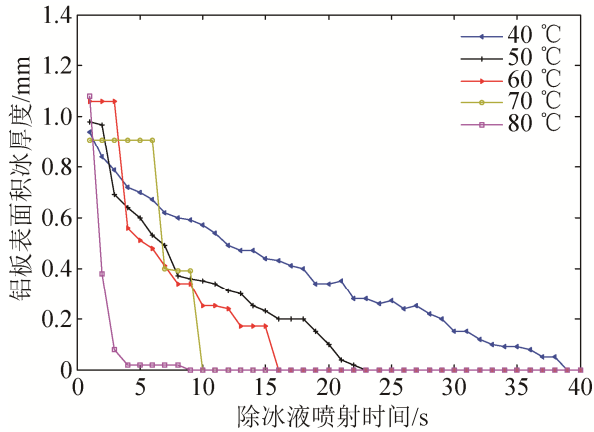
3.3 实验结果与分析

1) 除冰液温度对除冰效能的影响实验

采集的模拟机翼表面温度变化如图 6 所示。



(a) 机翼表面温度变化

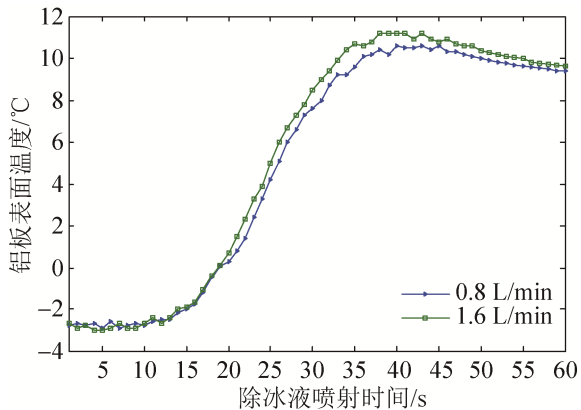


(b) 机翼表面积冰厚度变化

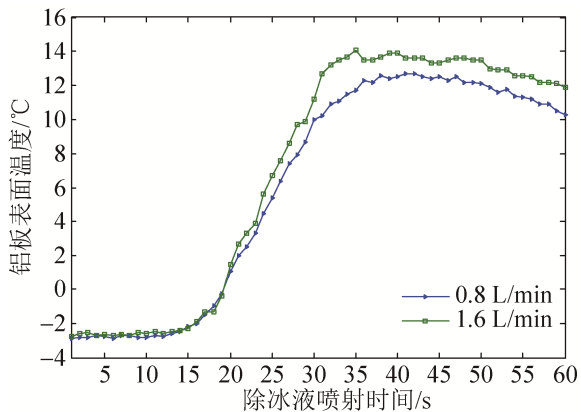
图6 不同除冰液温度下模拟机翼表面温度和积冰厚度
Fig. 6 Temperature and ice thickness of airfoil surface in different deicing fluids temperature

2) 除冰液流量对除冰效能的影响实验

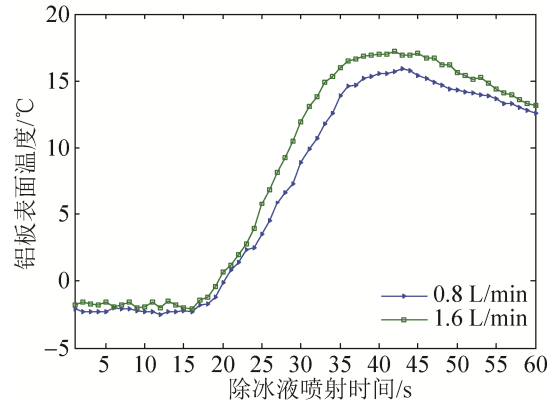
图7为流量变化时模拟机翼表面温度变化情况。



(a) 除冰液温度 40 °C



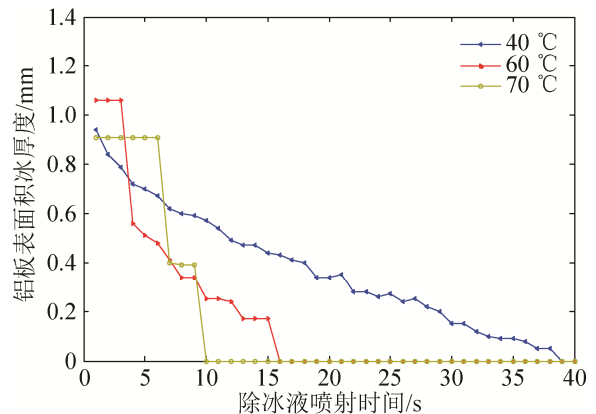
(b) 除冰液温度 60 °C



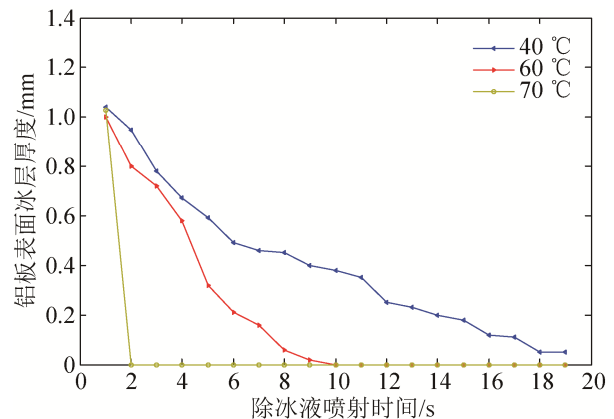
(c) 除冰液温度 70 °C

图7 不同除冰液流量下模拟机翼表面温度变化比较
Fig. 7 Comparing of temperature changing of airfoil surface in different deicing fluids flux

图8为流量变化时模拟机翼表面积冰厚度变化情况。



(a) 流量为 0.8 L/min



(b) 流量为 1.6 L/min

图8 不同除冰流量下模拟机翼表面冰层厚度变化
Fig. 8 Ice thickness changing of airfoil surface in different deicing fluids flux

3) 实验结果分析

由图 6(a)的曲线变化情况可知,当积冰融化一段时间后,铝板表面温度开始升高,其升高趋势随着除冰液温度升高而上升。如图中 20 s 时, 40 °C 和 60 °C 除冰液曲线对应的铝板表面温度分别为 10 °C 和 18 °C, 显然,随着除冰液温度上升,铝板的表面温度上升速率会变大。由图 6(b)可知除冰液温度在 40 °C 至 60 °C 范围内时,冰层厚度变化率随除冰液温度的升高而增大,比如在 10 s 时, 40 °C 和 60 °C 的除冰液对应的积冰厚度分别为 0.6 mm 和 0.25 mm。当除冰液温度上升到 70 °C 和 80 °C 时,积冰厚度减小速率明显加快,表示除冰液温度越高,除冰速率越快。

由图 7(a)、(b)和(c)中温度变化曲线可知,在一定范围内(40 °C~60 °C),当除冰液温度相同时,铝板表面温度随着除冰液流量增加而上升,但上升速率并没有应为除冰液流量增大而快速增大,而是和小流量时的温度上升速率基本保持一致。如图中,两种流量下铝板表面温度变化趋势基本相同,说明在一定范围内,适当增大除冰液流量,可以提高除冰速率。但由于温度的滞后特性,过大的除冰液流量,反而造成除冰液大量浪费。

如图 8 所示,以 60 °C 除冰液为例,当积冰厚度减小到零时,单喷嘴用时约 16 s,而双喷嘴用时约 10 s。该现象同样验证了给定除冰液温度下,在一定范围内增大除冰液流量,积冰厚度减小趋势加快。但图 8(b)中除冰液温度为 70 °C 时,显示冰层厚度在 2 s 内变为 0,这是由于冲击射流的缘故,此时除冰液消耗很大,不利于除冰成本控制和环境保护。射流冲击时的除冰机理和方式产生很大变化,本文对此现象未深入研究。

4 结论

分析了飞机除冰液地面除冰机理并建立了描述该过程的数学模型,对除冰液参数和除冰效能的相关性进行数值模拟与实验研究,实验结果验证了仿真结论的合理性。取得的结论如下:

1) 除冰效能和除冰液温度正相关,在合理的流量范围内,增大除冰液温度可以提高除冰速度,但除冰液温度受除冰液物理化学性能和设备技术条件的约束;

2) 当除冰液温度相同时,增加流量可以小幅度提高除冰速度,但由于温度的滞后特性,过大的除冰液流量,不能迅速提高除冰速度,反而造成除冰液过度使用。

通过上述研究,建立了除冰液参数和除冰效能的约束(定量)关系,其研究成果一方面可以优化除冰运行时的控制参数,减少除冰液用量,同时该研究成果为后续的除冰装备设计指标、运行参数奠定研究基础。

参考文献:

- [1] Reehorst, Ghung J, Potapczuk M. Study of icing effects on performance and controllability of an accident aircraft [J]. *Journal of aircraft*(S0021-8669), 2015, 37(2): 253-259.
- [2] 张宇飞. 浅析飞机积冰与航空安全[J]. *科技风*, 2013(14):194-194.
ZHANG Yu-fei. A brief analysis of aircraft icing and aviation safety[J]. *Technology Wind*, 2013(14): 194-194.
- [3] 沈海军, 史友进. 飞机除冰与防冰的若干技术[J]. *飞机工程*, 2004(1): 54-57.
SHEN Hai-jun, SHI You-jin. Several techniques on anti-icing and de-icing[J]. *Aircraft Engineering*, 2004(1): 54-57.
- [4] 杨浩然, 杨超. 飞机防除冰技术研究[J]. *科技展望*, 2015, 25(15): 120-122.
YANG Hao-ran, YANG Chao. Research on aircraft anti-icing technology [J]. *Science and Technology* (S1672-8289), 2015, 25(15): 120-122.
- [5] 肖春华, 胡站伟, 桂业伟, 等. 疏水涂层表面防冰效果的结冰风洞实验研究[J]. *实验流体力学*, 2013, 27(2): 41-45.
XIAO Chun-hua, HU Zhan-wei, GUI Ye-wei, et al. Test study on anti-icing effects of hydrophobic coating in icing wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in fluid mechanics*, 2013, 27(2): 41-45.
- [6] Roy Rasmussen, Mike Dixon, Frank Hage, et al. Weather Support to Deicing Decision Making (WSDDM): A Winter Weather Nowcasting System[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*(S0003-0007), 2001,

- 82(4): 579-595.
- [7] Yaman Boluk, Liyan zhao. Aircraft anti-icing fluids formulated with nanocrystalline cellulose[P]. US. Patent. 8105430B2. 2012-01-31.
- [8] 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.
- [9] 陈斌, 龚淼, 邢志伟. 飞机除冰液快速加热与供液自动配比装置[P]. 中国. 发明专利. 200910067923.8, 2010-10-06.
BIN Chen, MIAO Gong, XING Zhi-wei. Rapid heating and automatic liquid supply mixing apparatus for deice liquid for airplane[P]. China. ZL 200910067923.8. 2010-10-06.
- [10] Ouahid Harireche, Patrick Verdin, Chris P Thompson, et al. Explicit Finite Volume Modeling of Aircraft Anti-Icing and De-Icing [J]. Journal Of Aircraft (S0021-8669), 2008, 45(6): 1924-1936.
- [11] Sumio Kato. Solution for Aircraft Anti-Icing System Simulation by a Modified Perturbation Method[J]. Journal of Aircraft (S0021-8669), 2006, 43(2): 544-554.
- [12] Xiaobing Liu, Simon J Rees, Jeffrey D Spitler. Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part I: Model development[J]. Applied Thermal Engineering (S1359-4311), 2007, 27(5): 1115-1124.
- [13] Xiaobing Liu, Simon J Rees, Jeffrey D Spitler. Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part II: Experimental validation[J]. Applied Thermal Engineering (S1359-4311), 2007, 27(5-6): 1125-1131.
- [14] Guilherme Araújo Lima da Silva, Otávio de Mattos Silveiras, Euryale Jorge Godoy de Jesus Zerbini. Numerical Simulation of Airfoil Thermal Anti-Ice Operation Part 2: Implementation and Results[J]. Journal of Aircraft(S0021-8669), 2007, 44(2): 635-641.
- [15] Enrico Möhle, Matthias C Haupt, Peter Horst. Coupled Numerical Simulation and Experimental Validation of the Electro impulse De-Icing Process[J]. Journal of Aircraft (S0021-8669), 2013, 50(1): 96-102.
- [16] 陈斌, 王立文. 飞机除冰液地面除冰过程模型仿真与实验[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3): 556-560.
CHEN Bin, WANG Li-wen. Model Simulation and Experiment of Aircraft Deicing Process Using Deicing Fluids on Ground[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(3): 556-560.
- [17] Boeing Company. Boeing 737-800 aircraft maintenance manual[S]. 2008: 206-210.
- [18] 刘东亮, 徐浩军, 李嘉林, 等. 飞行结冰后复杂系统动力学仿真与风险评估[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(4): 643-647.
LIU Dong-liang, XU Hao-jun, LI Jia-lin, et al. Dynamic Simulation Study of Stalling in Wing Icing Conditions and Risk Evaluation[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(4): 643-647.