

基于Messinger扩展模型蒸发对结冰溢流特性的影响研究



宁义君¹, 谢文龙², 朱东宇¹, 张付昆¹

1. 中国航空工业空气动力研究院 辽宁省飞行器防除冰重点实验室, 辽宁 沈阳 110034

2. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016

摘要:传统Messinger扩展模型将蒸发简化为壁面温度的线性函数,以便推导冰层和水膜温度微分方程的原函数。但结冰过程中蒸发与壁面温度并非线性关系,若引入蒸发非线性计算式,冰层和水膜温度微分方程将无法推导出原函数。而且有研究者应用Messinger扩展模型时忽略了蒸发对结冰的影响,在某些状态下可能造成较大误差。针对以上问题,本文对Messinger扩展模型做出改进。将冰层和水膜温度假设为带未知系数的线性方程,建立未知系数的隐式表达式,采用牛顿迭代对未知系数进行求解,以数值迭代代替方程推导。基于NACA0012翼型,对忽略蒸发以及采用不同蒸发计算式对结冰外形的影响进行了分析。通过计算不同环境温度下的结冰外形,并与FENSAP-ICE软件和试验冰形进行对比,验证了该改进方法的有效性。

关键词: Messinger模型; Messinger扩展模型; 飞机结冰; 结冰计算; 结冰软件

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.02.007

数值模拟是研究飞机结冰的重要手段。1953年, B.L. Messinger^[1]提出飞机结冰条件下的结冰模型,该模型将飞机结冰过程假设为定常问题,采用代数方程组定义结冰控制方程,容易程序实现,可快速得到计算结果,至今仍然被普遍采用。虽然很多研究者对Messinger模型做出改进^[2-3],但是理论框架基本不变。

在Messinger模型基础上, Y. Bourgault等^[4-5]提出Shallow Water模型,假设结冰表面未冻结的水会形成一层薄水膜,水膜受外部气流剪切力的作用而流动,建立水膜高度和温度的偏微分方程组,主要应用于FENSAP-ICE软件。在2000年前后, T. G. Myers等^[6-7]联立冰层和水膜热传导方程,基于线性假设将结冰速率方程简化为一阶常微分方程,并称之为Messinger扩展模型。考虑结冰过程中的水膜流动特性, Myers将浅水膜流动方程^[8-9]耦合进了Messinger扩展模型中^[10],并进一步发展至可预测任意三维表面浅水膜的流动与冻结^[11-12]。后续很多研究者基于Myers模型开展了结冰数值模拟研究^[13-14]。

国内结冰数值模拟研究早期以Messinger模型为

主^[15-16],近些年对Myers模型开展了非常多的研究工作。侯硕等^[17]将Myers模型由二维笛卡尔坐标系^[12]推广至正交曲线坐标系,并与Messinger模型计算结果进行了对比。曹广州等^[18-19]将水膜模型扩展至三维复杂表面,分析了水膜流动对结冰模拟的改善作用。雷梦龙等^[20]对Myers模型结冰类型的判断标准进行了修改,并将单步法、多步法计算结果与试验冰形进行了对比。李浩然等^[21]将Messinger模型预估的壁面温度作为Myers模型的边界条件,从而解决了Myers模型壁面温度设置的经验性问题。

无论是Messinger模型,还是Messinger扩展模型,抑或是引入浅水膜流动方程的Myers模型,都涉及对流换热、蒸发等热流项的计算,其中蒸发一般为结冰表面温度的非线性函数。在使用Messinger模型时,一般采用LEWICE使用手册提出的蒸发计算式^[22]。而为推导冰层和水膜温度的显示表达式, Myers在提出Messinger扩展模型时,将非线性蒸发计算式进行线性化处理^[10]。国外研究者基本沿用了相同的计算式^[13-14],国内研究者虽然在文献中未列出蒸发的具体计算式^[17,20-21],但结冰速率方程与Messinger扩展模型是

收稿日期: 2023-07-21; 退修日期: 2023-11-28; 录用日期: 2024-01-04

基金项目: 航空科学基金(2022Z006026005)

引用格式: Ning Yijun, Xie Wenlong, Zhu Dongyu, et al. Research on the influence of evaporation on runback icing characteristics based on extended Messenger model[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(02): 58-67. 宁义君, 谢文龙, 朱东宇, 等. 基于Messinger扩展模型蒸发对结冰溢流特性的影响研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(02): 58-67.

一致的^[6-7],可以推断蒸发仍然采用线性计算式。

根据现有研究,未见有研究者在使用 Messinger 扩展模型时采用蒸发非线性计算式。而且参考文献[18]和[19]忽略了蒸发,其出现液态水过度溢流的现象有可能是忽略蒸发导致的。因此,本文将蒸发非线性计算式引入 Messinger 扩展模型,以牛顿迭代代替微分方程原函数繁琐的推导,以提高该模型对热流任意计算式的适用性。另外,通过对比是否考虑蒸发计算得到的冰形,以验证蒸发对结冰表面溢流水结冰特性的影响。计算 NACA0012 翼型在不同环境温度下的结冰外形,与 FENSAP-ICE 软件计算结果和试验冰形进行对比,以验证本文研究方法的有效性。

1 Messinger 扩展模型

1.1 控制方程

Myers 基于 Stefan 方法构建了描述结冰相变过程的控制方程^[7],包括冰层和水膜热传导方程、质量守恒方程以及冰/水界面移动方程,各方程表达式如下

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_i}{\rho_i C_{pi}} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, 0 \leq y \leq b \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{k_w}{\rho_w C_{pw}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}, b \leq y \leq b+h \quad (2)$$

$$\rho_i \frac{\partial b}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial h}{\partial t} = \dot{m} \quad (3)$$

$$\rho_i L_F \frac{\partial b}{\partial t} = k_i \frac{\partial T}{\partial y} - k_w \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad (4)$$

式中, t 为结冰时间;坐标 y 垂直于结冰表面; $b(y,t)$ 和 $h(y,t)$ 分别为冰层和水膜厚度; $T(y,t)$ 和 $\theta(y,t)$ 分别为冰层和水膜温度; k_i 和 k_w 分别为冰和水的导热系数; C_{pi} 和 C_{pw} 分别为冰和水的比热容; ρ_i 和 ρ_w 分别为冰和水的密度; L_F 为冻结潜热。 $\dot{m} = \dot{m}_{im} + \dot{m}_{in} - \dot{m}_e$, $\dot{m}_{im}$ 为撞击水质量流量, $\dot{m}_{in}$ 为来自上游控制体的液态水质量流量, $\dot{m}_e$ 为水蒸发/冰升华质量流量。 $\dot{m}_{im} = \beta LWC_\infty V_\infty$,其中, β 为水滴收集系数, LWC_∞ 为自由来流液态水含量, U_∞ 为自由来流速度。

在计算过程中,由驻点开始沿结冰表面控制体进行结冰计算,并假设驻点 $\dot{m}_{in} = 0$,当前控制体的液态水全部移动到下一个控制体^[23],即

$$\dot{m}_{im} = \frac{ds_1}{ds_e} \dot{m}_{ou} \quad (5)$$

式中, ds_1 为上一个控制体长度; ds_e 为当前控制体长度; $\dot{m}_{ou}$ 为流出当前控制体的液态水质量流量。

因此,上述方程组包含 5 个方程、5 个未知数(T 、 θ 、 b 、 h 、 $\dot{m}_{in}$),方程组封闭可求解。

上述方程组的初始条件和边界条件如下所述,其中空气/水界面和空气/冰界面的边界条件来自 Messinger 模型中的能量守恒方程。

(1) 在冰/壁界面

假设彼此间完全热接触,壁面温度恒定不变

$$T = T_s, y = 0 \quad (6)$$

式中, T_s 为壁面温度。

(2) 在冰/水界面

温度是连续的且等于冻结温度

$$T = \theta = T_f, y = b \quad (7)$$

式中, T_f 为冻结温度。

(3) 在空气/冰界面

由于冰层表面没有液态水存在,能量交换只发生在空气/冰之间,加热项有水滴动能 Q_d 、结冰潜热 Q_i ,冷却项有净对流换热 Q_{nc} (包含对流换热和气动加热)、升华 Q_e 、热辐射 Q_r 和水滴温度改变带来的能量变化 Q_s ,边界条件为

$$k_i \frac{\partial T}{\partial y} = Q_{rime} T, y = b \quad (8)$$

$$Q_{rime} T = Q_i + Q_d - Q_{nc} - Q_e - Q_r - Q_s$$

(4) 在空气/水界面

当液态水附着在冰层表面时,能量交换只发生在空气/水之间,加热项有水滴动能 Q_d ,冷却项有净对流换热 Q_{nc} 、蒸发 Q_e 、热辐射 Q_r 和水滴温度改变带来的能量变化 Q_s ,边界条件为

$$k_w \frac{\partial \theta}{\partial y} = Q_{glaze}(\theta), y = b+h \quad (9)$$

$$Q_{glaze}(\theta) = Q_d - Q_{nc} - Q_e - Q_r - Q_s$$

(5) 在初始时刻

壁面既没有冰,也没有水,初始条件为

$$b = h = 0, t = 0 \quad (10)$$

由于式(1)和式(2)的数值求解比较复杂,Myers 假设冰层温度和水膜温度沿厚度方向线性分布^[7],可假设冰层和水膜温度线性方程为^[24]

$$T = a_2 + a_3 y \quad (11)$$

$$\theta = a_4 + a_5 y \quad (12)$$

式中, $a_2 \sim a_5$ 为待求解系数,代入相应的边界条件即可推导出具体表达式。

当过冷水滴撞击到温度在冻结温度以下的壁面时,冻结过程经历两个阶段^[7]。基于恒定壁温边界条件,水滴撞击到壁面时立即冻结。在该阶段只有冰存在,即霜冰。随着冰层逐渐增厚,当厚度足够大时,冰层热传导速率降低,过冷水滴冻结潜热将产生足够的热量使冰层表面温度达到冻结温度,

并出现液态水。在该阶段冰、水同时存在,即光冰。

1.2 霜冰

将恒定壁温边界条件(6)和空气/冰界面边界条件(8)代入冰层温度线性方程(11),有

$$a_2 = T_s \quad (13)$$

$$a_3 = \frac{Q_{\text{rimc}}(T = T_s + a_3 b)}{k_i} \quad (14)$$

在霜冰条件下,过冷水滴撞击到壁面立即冻结,没有液态水存在。霜冰厚度可以直接由质量传输方程(3)得到,令 $h = 0$,有

$$b = \frac{\dot{m}}{\rho_i} \quad (15)$$

1.3 光冰

将恒定壁温边界条件(6)和冰/水界面边界条件(7)代入冰层温度线性方程(11),有

$$a_2 = T_s \quad (16)$$

$$a_3 = \frac{T_f - T_s}{b} \quad (17)$$

将冰/水界面边界条件(7)和空气/水界面边界条件(9)代入水膜温度线性方程(12),有

$$a_4 = T_f - a_5 b \quad (18)$$

$$a_5 = \frac{Q_{\text{glaze}}(\theta = T_f + a_5 h)}{k_w} \quad (19)$$

将冰层温度线性方程(11)和水膜温度线性方程(12)代入冰/水移动界面方程(4),可得冰层厚度的一阶常微分方程

$$\rho_i L_f \frac{\partial b}{\partial t} = k_i a_3 - k_w a_5 \quad (20)$$

对于式(20),其右端第一项代表冰层的热传导,表明冰的生长速率随着壁面温度的升高和冰层厚度的增大而减小;右端第二项代表水膜的热传导,根据式(19)和式(9),可知该项包含加热项和冷却项,在一般结冰条件下,冷却项占主导地位,此时 $a_5 < 0$,起着促进结冰生长的作用。

1.4 临界结冰厚度

当霜冰表面温度达到冻结温度时,液态水首次出现,光冰开始生长,此时冰层厚度可称为临界结冰厚度^[20]。令式(11)等于 T_f ,则临界结冰厚度 b_g 为

$$b_g = \frac{k_i(T_f - T_s)}{Q_{\text{rimc}}(T = T_f)} \quad (21)$$

根据式(15),可得临界结冰时间 t_g 为

$$t_g = \frac{\rho_i}{\dot{m}} b_g \quad (22)$$

通过积分质量守恒方程(3),可得水膜厚度 h 为

$$h = \frac{\dot{m}}{\rho_w}(t - t_g) - \frac{\rho_i}{\rho_w}(b - b_g) \quad (23)$$

通过临界结冰厚度 b_g 可知,冰层厚度达到该厚度之前生长霜冰,之后生长光冰。 b_g 可能为正,也可能为负,可根据其具体值来判断结冰处于哪个阶段。假设 Δt 为结冰时间, $T_s < T_f$,有如下分类:(1)当 $0 < b_g < \infty$ 时,若 $t_g \geq \Delta t$,结冰时间段内还没有达到光冰生长的时刻,只有霜冰。若 $t_g < \Delta t$,霜冰生长已结束,光冰已开始生长,冰水混合。(2)当 $b_g \leq 0$ 时,没有足够的热量产生液态水,光冰不会出现,只有霜冰。(3)当 $b_g \rightarrow \infty$ 时,能量平衡,只有霜冰。

1.5 热流项

在空气/冰、空气/水界面,发生多种能量交换过程,已在边界条件(8)和(9)中进行了介绍,下面列出各能量项的计算公式。

水滴发生冻结所释放的热流 Q_1 为

$$Q_1 = \rho_i \frac{\partial b}{\partial t} L_f \quad (24)$$

水滴动能转化的热流 Q_k 为

$$Q_k = \frac{1}{2} \dot{m}_{\text{im}} V_{\infty}^2 \quad (25)$$

将气动加热和对流换热合在一起考虑,并且使用边界层恢复温度 T_r 来表示气动加热带来的温差。则净对流换热热流 Q_{nc} 为

$$Q_{\text{nc}} = h_c(T_s - T_r) \quad (26)$$

式中, h_c 为对流换热系数。

辐射热流 Q_r 为

$$Q_r = \varepsilon \sigma_r(T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (27)$$

式中, T_{∞} 为环境温度; ε 为冰表面发射系数; σ_r 为 Stefan-Boltzman 常数。

显热热流 Q_s 为^[22]

$$\begin{cases} Q_s = -\dot{m}_{\text{im}}[C_{pw}(T_{\infty} - T_f) + C_{pi}(T_f - T_s)] - \dot{m}_{\text{in}}[C_{pw}(T_{\text{in}} - T_f) + C_{pi}(T_f - T_s)], & T_s < T_f \\ Q_s = -\dot{m}_{\text{im}}[C_{pw}(T_{\infty} - T_f) - \dot{m}_{\text{in}}C_{pi}(T_{\text{in}} - T_f)], & T_s = T_f \\ Q_s = -\dot{m}_{\text{im}}[C_{pw}(T_{\infty} - T_s) - \dot{m}_{\text{in}}C_{pi}(T_{\text{in}} - T_s)], & T_s > T_f \end{cases} \quad (28)$$

式中, T_{in} 为流入水温度。

根据 LEWICE 软件使用手册^[22],蒸发计算公式为

$$\dot{m}_e = \frac{h_c}{C_{pa}\rho_a R_v \text{Lew}^{2/3}} \left[\frac{e_s(T_s)}{T_s} - \frac{e_s(T_{\infty})}{T_{\infty}} \right] \quad (29)$$

式中, C_{pa} 为空气比热; ρ_a 为当地空气密度; $R_v = 463.19$, Lew 为热质传递类比准则 Lewis 数,一般情况下 Lew = 1.0。 $e_s(T_s)$ 和 $e_s(T_{\infty})$ 分别为结冰表面和边界层边界处的饱和水蒸气压力

$$\begin{cases} e_s = 6894.7e^{(14.56594634 - \frac{7129.219482}{1.8 \cdot T - 72.0})}, & T \geq T_f \\ e_s = 6894.7e^{(14.56594634 - \frac{7129.219482}{1.8 \cdot T - 72.0})}, & T < T_f \end{cases} \quad (30)$$

式(29)由于饱和水蒸气压力的存在,不能对 T_s 进一步展开。为便于推导冰层和水膜温度线性函数的具体形式,Myers将蒸发简化为壁面温度 T_s 的线性函数^[7,10]

$$\begin{aligned} \dot{m}_e &= \chi_e e_o (T_s - T_\infty) \\ \chi_e &= \frac{0.622 h_e}{C_{pa} p_i \text{Lew}^{2/3}} \end{aligned} \quad (31)$$

式中, $e_o = 27.03$; p_i 为总压。

根据蒸发/升华质量 $\dot{m}_e$,蒸发/升华热流 Q_e 为

$$Q_e = \dot{m}_e L_E \quad (32)$$

式中, L_E 为蒸发或升华潜热。

2 数值求解

2.1 求解步骤

由以上内容可知,Myers将结冰速率方程(4)转化为一阶常微分方程(20),该方程可通过Runge-Kutta多步迭代方法进行数值求解。下面详细介绍具体的求解步骤,如图1所示。该求解步骤只包含单步法,即整个结冰过程只使用一套网格、只计算一次流场和水滴撞击特性。具体步骤为:(1)设置飞行和结冰条件参数,计算开始,读取流场和水滴撞击特性

信息;(2)从驻点开始循环结冰表面控制体,每个控制体求解一次结冰模型;(3)根据式(21)和式(22)计算临界结冰厚度 b_g 和临界结冰时间 t_g ,根据分类方法判断结冰生长阶段;(4)当结冰处于霜冰阶段时,根据式(15)计算霜冰生长厚度 b ,根据式(14)迭代求解系数 a_3 ,根据式(11)得到冰层温度线性函数,代入冰层厚度 b 得到冰层表面温度 T_i ;(5)当结冰处于光冰阶段时,假设当前 b 的初值为极小值,代入式(17)得到系数 a_3 ,根据式(23)计算水膜厚度 h ,代入式(19),迭代求解系数 a_5 ,将 a_3 和 a_5 代入式(20),采用Runge-Kutta多步迭代法求解冰层厚度 b ;(6)根据式(5)计算流入水 $\dot{m}_{in}$;(7)遍历所有结冰表面控制体;(8)计算结束,输出计算结果。

2.2 方程系数迭代

根据Messinger扩展模型求解步骤,在求解结冰速率方程(20)之前,需要先求解系数 a_3 和 a_5 (见式(17)和式(19))。由式(19)可知,系数 a_5 的计算式并不是显示的,且其具体值取决于各热流项的计算式,(见式(24)~式(32))。Myers将蒸发简化为线性计算式(31),从而推导出系数 a_5 的显示计算式,以便于结冰速率方程(20)的求解。在各热流项当中,蒸发在不同文献中多出现不同的计算式,若针对每种蒸发计算式推导一种系数 a_5 的显示计算式,将使函数推导变得烦琐。若蒸发采用式(29),系数 a_5 的显示计算式将无法导出。

式(19)可以采用牛顿迭代方法进行求解,以使系数 a_5

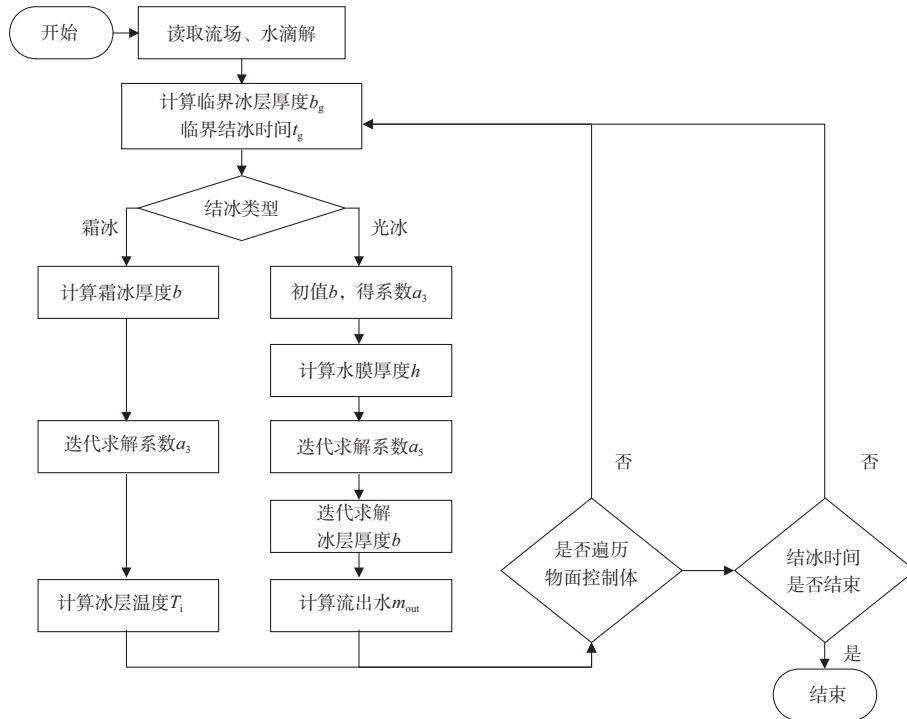


图1 Messinger扩展模型求解过程

Fig.1 The solution procedure of extended Messinger model

的求解可以适用于任意形式的蒸发计算式,而且系数 a_5 可直接代入式(20)求解结冰速率。根据式(19),系数 a_5 的牛顿迭代公式为

$$a_5^{\text{new}} = a_5 - \frac{f(a_5)}{f'(a_5)} \quad (33)$$

其中,

$$f(a_5) = a_5 k_w - Q_{\text{glaze}} (\theta = T_f + ha_5)$$

$$f'(a_5) = k_w + h(Q'_{\text{nc}} + Q'_e + Q'_r + Q'_s)$$

式中, $Q'_{\text{nc}}, Q'_e, Q'_r, Q'_s$ 分别为 $Q_{\text{nc}}, Q_e, Q_r, Q_s$ 基于 θ 的导数,根据式(26)、式(29)、式(27)、式(28)即可导出。

另外,根据式(9)和式(23), Q_{glaze} 和 h 中都含有蒸发项 $\dot{m}_e$,同样存在耦合关系,需要迭代求解。因此,根据式(20)求解结冰速率时,存在三重迭代,按顺序分别为蒸发项 $\dot{m}_e$ 迭代、式(20)的Runge-Kutta多步迭代和系数 a_5 迭代,如图2所示。

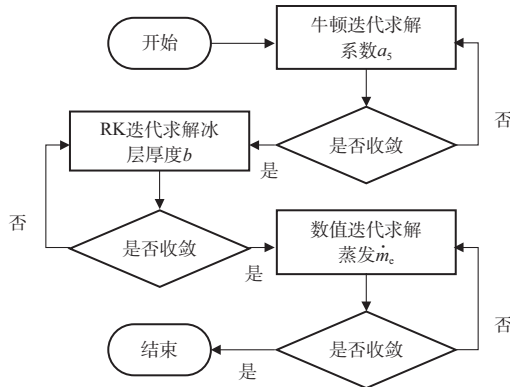


图2 光冰生长速率迭代过程

Fig.2 The iterative process of glaze ice growth rate

同理,式(14)中系数 a_3 的牛顿迭代公式为

$$a_3^{\text{new}} = a_3 - \frac{f(a_3)}{f'(a_3)} \quad (34)$$

其中

$$f(a_3) = a_3 k_i - Q_{\text{rime}} (T = T_s + a_3 b)$$

$$f'(a_3) = k_i + b(Q'_{\text{nc}} + Q'_e + Q'_r + Q'_s)$$

式中, $Q'_{\text{nc}}, Q'_e, Q'_r, Q'_s$ 分别为 $Q_{\text{nc}}, Q_e, Q_r, Q_s$ 基于 T 的导数,根据式(26)、式(29)、式(27)、式(28)即可导出。

求解霜冰冰层温度线性方程(11)时存在两重迭代,按顺序分别为蒸发项 $\dot{m}_e$ 迭代和系数 a_3 迭代,如图3所示。

3 计算结果与分析

空气流场基于航空工业气动院自主开发的航空飞行器气动仿真软件飞廉(FeiLian) V1.0^[25]进行计算,采用MENTER_SST湍流模型、Roe对流通量离散格式以及Venkatakrishnan限制器。水滴撞击特性基于航空工业气动

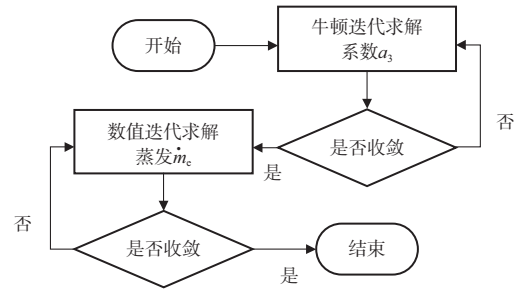


图3 霜冰温度迭代过程

Fig.3 The iterative process of rime ice temperature

院自主开发的航空飞行器结冰仿真软件穿云(ChuanYun) V1.0进行计算,采用中心对流通量离散格式。

3.1 临界结冰厚度分析

临界结冰厚度 b_g 是判断霜冰生长转为光冰生长的重要参数,对结冰生长速率有重要影响。这里忽略蒸发以及基于蒸发计算式(29)、式(31)分析蒸发对临界结冰厚度的影响,计算状态见表1,其中LWC为液态水含量。

表1 计算状态

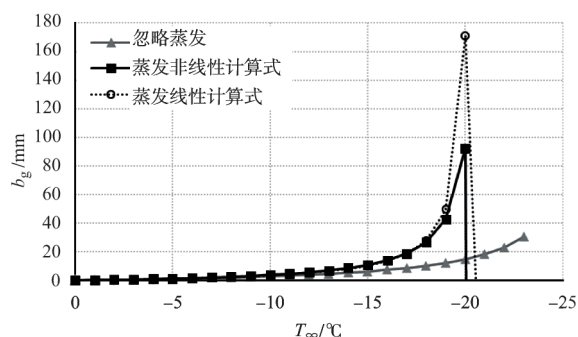
Table 1 Calculation condition

压力/ Pa	静温/ °C	速度/ (m/s)	迎角/ (°)	水滴 直径/ μm	LWC/ (g/m ³)	时间/s
101325	-10	67	4	20	1.00	360

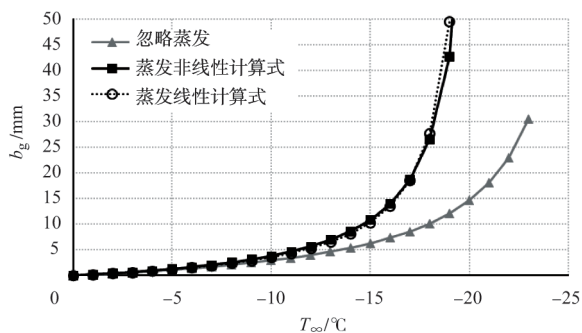
以表1状态为基准,设水滴收集系数为0.5,对流换热系数为 $300\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$,环境温度 T_∞ 为 $0\sim-23^\circ\text{C}$ ($T_s=T_\infty$),忽略蒸发以及使用不同蒸发计算式得到的临界结冰厚度 b_g 随环境温度 T_∞ 的变化关系如图4所示。在图4(a)中, $b_g < 0$ 代表在对应环境温度条件下液态水不会出现,只生长霜冰,不会生长光冰。考虑蒸发时,临界温度为 -17°C ;忽略蒸发时,临界温度为 -23°C 。在图4(b)中,当环境温度 T_∞ 低于 -10°C 时,考虑蒸发对临界结冰厚度 b_g 的影响是否明显增大。根据 $Q_{\text{rime}}T$ 的具体展开式,其中含有 $\dot{m}_e(L_F + L_s)$ 这一项,其数量级达到 10^3 ,与其他冷却热流项之和基本相当;而当环境温度进一步降低,其他冷却热流项与加热热流项基本相当时,两者互相抵消, $Q_{\text{rime}}T$ 的值基本只由 $\dot{m}_e(L_F + L_s)$ 决定。因此,对于较低温结冰条件,计算临界结冰厚度时务必考虑蒸发,否则将导致较大误差。不同蒸发计算式对临界结冰厚度 b_g 的影响较小。

根据 $Q_{\text{rime}}T$ 的具体展开式,对临界结冰厚度 b_g 存在重要影响的参数有撞击水质量 $\dot{m}_{\text{im}}$ 和对流换热系数 h_c 。

对于撞击水质量 $\dot{m}_{\text{im}}$ 的影响,在环境温度 T_∞ 为 -10°C 条件下,设液态水含量LWC为 $0.3\sim 2.0\text{g}/\text{m}^3$,则 $\dot{m}_{\text{im}}$ 为 $15.5\sim 103.0\text{g}/(\text{sm}^2)$,忽略蒸发以及使用不同蒸发计算式得到的临界结冰厚度 b_g 随撞击水质量 $\dot{m}_{\text{im}}$ 的变化关系如图5所示。在图5中,当



(a) 全局



(b) 局部

 图4 b_g 随 T_{∞} 变化曲线

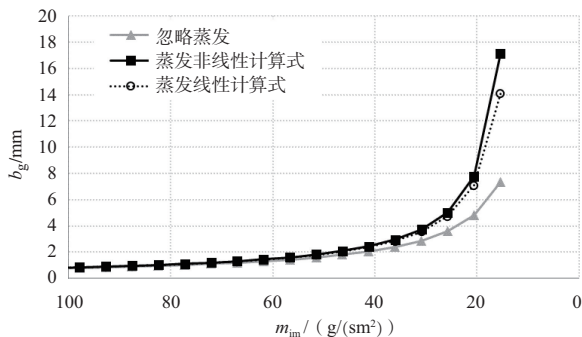
 Fig.4 The variation curve of b_g with T_{∞}

 图5 b_g 随 $\dot{m}_{im}$ 变化曲线

 Fig.5 The variation curve of b_g with $\dot{m}_{im}$

撞击水质量 $\dot{m}_{im}$ 低于 $40\text{g}/(\text{sm}^2)$ 时,是否考虑蒸发对临界结冰厚度 b_g 的影响是否明显增大,不同蒸发计算式对临界结冰厚度 b_g 的影响较小。当撞击水质量 $\dot{m}_{im}$ 低于 $20\text{g}/(\text{sm}^2)$ 时,不同蒸发计算式计算的临界结冰厚度 b_g 彼此间差别有所增大。

对于对流换热系数 h_c 的影响,在环境温度 T_{∞} 为 -10°C 条件下,设对流换热系数 h_c 为 $100\sim 500\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,忽略蒸发以及使用不同蒸发计算式得到的临界结冰厚度 b_g 随对流换热系数 h_c 的变化关系如图6所示。从图6中可知,考虑蒸发对临界结冰厚度 b_g 的影响。对流换热系数 h_c 越大,不同蒸发计算式计算的临界结冰厚度 b_g 彼此差别越大。因此,当对流换热系数 h_c 较高时,不同蒸发计算式对临界结冰厚度

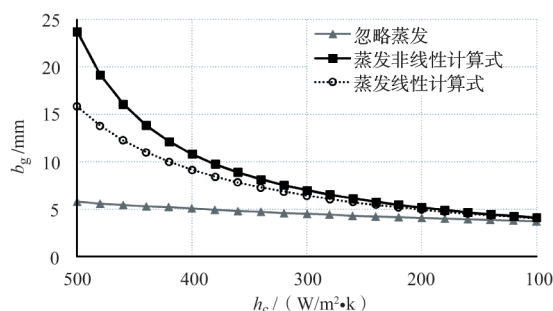

 图6 b_g 随 h_c 变化曲线

 Fig.6 The variation curve of b_g with h_c

b_g 的影响较大。

3.2 蒸发影响分析

基于 NACA0012 翼型,弦长 0.5334m ,以表1状态为基准,环境温度分别为 -4.46°C 、 -6.13°C 、 -10°C ,忽略蒸发以及使用不同蒸发计算式得到的冰形与试验冰形^[26]的对比如图7~图9所示。图中 x/c 、 y/c 代表量纲一坐标, c 代表弦长。

对比不同蒸发计算式得到的冰形,两者整体上差异很小,原因在于蒸发量占冻结量的比重很小;两者差异主要体现在结冰后半部分,与前面的分析结论一致,即当撞击水质量较低、对流换热系数较高时,蒸发对结冰的影响较大;在环境温度为 -4.46°C 时,如图7所示,与蒸发非线性计算式相比,蒸发线性计算式得到的冰形出现更靠后的溢流结冰。因此,使用简化的蒸发线性计算式整体对冰形的影响很小,但在高温结冰条件下,会产生更多的溢流水结冰,对结冰极限位置的预测造成一定影响。

对比是否考虑蒸发得到的冰形,若忽略蒸发,将产生非常明显的溢流结冰。在环境温度为 -6.13°C 时,如图8所示,考虑蒸发时上表面结冰极限位置与试验冰形基本一致,而忽略蒸发时结冰极限位置明显超出试验冰形。造成这一现象的主要原因是,虽然蒸发量占冻结量的比重很小,但蒸发热流占有冷却热流的比重很大,忽略蒸发将降低结冰过程中的冷却效应,导致冻结系数减小,未冻结的液态水量增大,液态水向下游溢流,超出水滴撞击极限并冻结。

3.3 翼型结冰

基于 NACA0012 翼型,弦长 0.5334m ,以表1状态为基准,环境温度分别为 -4.46°C 、 -6.13°C 、 -7.79°C 、 -10°C 、 -13.35°C 、 -23.35°C ,分别采用 Messinger 模型和 Messinger 扩展模型进行计算,蒸发采用非线性计算式(29),并与 FENSAP-ICE 和试验冰形进行对比,如图10~图15所示。

由于 FENSAP-ICE 采用的 Shallow Water 模型仍然基于平衡温度假设,这一点与 Messinger 模型是相同的,因此穿

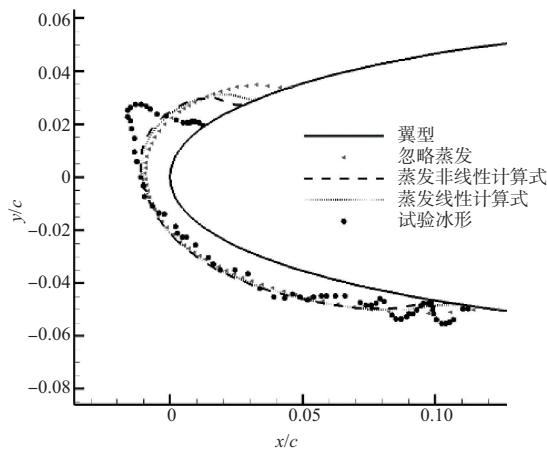


图7 -4.46°C环境温度下蒸发对冰形的影响对比

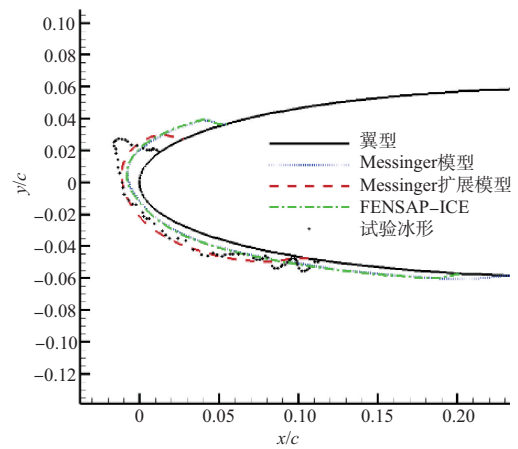
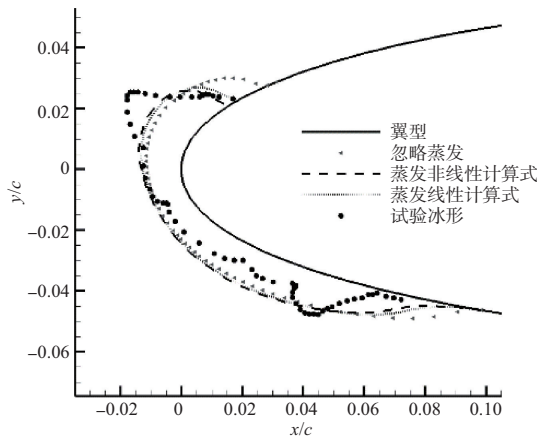
Fig.7 Comparison between effects of evaporation on ice shapes at an environmental temperature of -4.46°C 图10 环境温度为 -4.46°C 时冰形对比Fig.10 Comparison between ice shapes at an environmental temperature of -4.46°C 

图8 -6.13°C环境温度下蒸发对冰形的影响对比

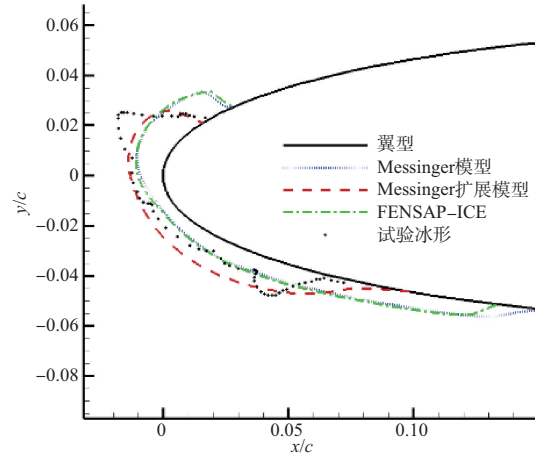
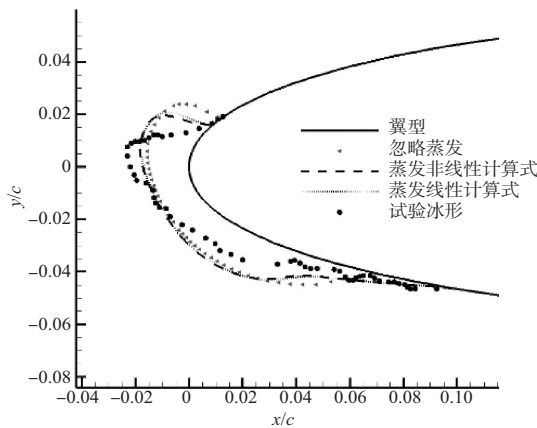
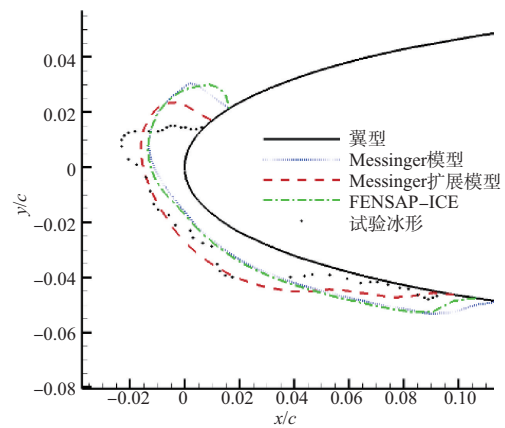
Fig.8 Comparison between effects of evaporation on ice shapes at an environmental temperature of -6.13°C 图11 环境温度为 -6.13°C 时冰形对比Fig.11 Comparison between ice shapes at an environmental temperature of -6.13°C 

图9 -10°C环境温度下蒸发对冰形的影响对比

Fig.9 Comparison between effects of evaporation on ice shapes at an environmental temperature of -10°C 图12 环境温度为 -7.79°C 时冰形对比Fig.12 Comparison between ice shapes at an environmental temperature of -7.79°C

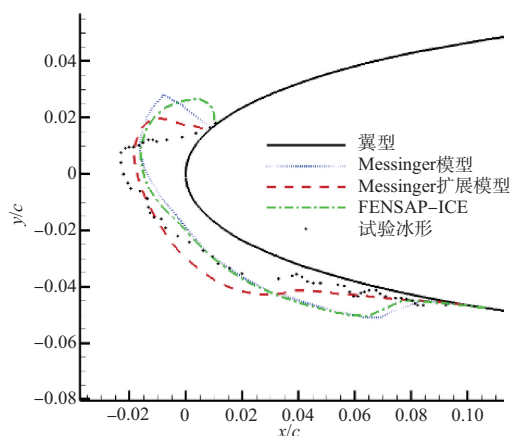

 图 13 环境温度为 -10°C 时冰形对比

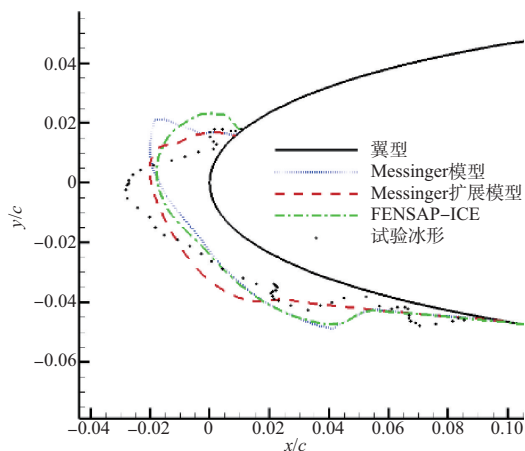
 Fig.13 Comparison between ice shapes at an environmental temperature of -10°C

 图 14 环境温度为 -13.35°C 时冰形对比

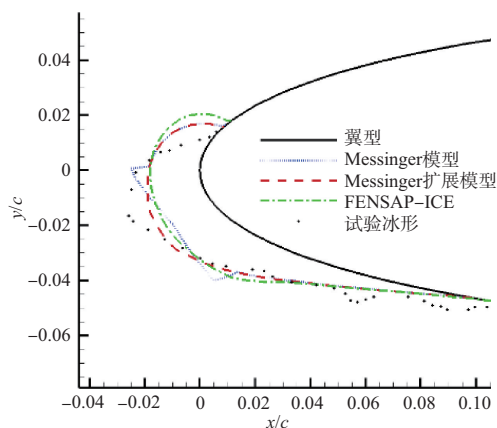
 Fig.14 Comparison between ice shapes at an environmental temperature of -13.35°C

 图 15 环境温度为 -23.35°C 时冰形对比

 Fig.15 Comparison between ice shapes at an environmental temperature of -23.35°C

云 V1.0 软件 Messinger 模型的计算结果与 FENSAP-ICE 软件的计算结果呈现出较好的一致性。在图 13 和图 14 中, FENSAP-ICE 在翼型上表面水滴撞击极限位置的溢流结冰更加明显,这可能是由 Shallow Water 模型中采用剪切力驱动水膜流动导致的。

Messinger 模型会明显低估冻结系数^[7,17],导致更多的溢流水产生并在下游冻结,尤其在环境温度为 -4.46°C (见图 10)和 -6.13°C (见图 11)条件下,溢流水结冰极限远超水滴撞击极限。而且在环境温度为 -23.35°C (见图 15)条件下, Messinger 模型在驻点处冻结系数的低估导致驻点处撞击水未完全冻结,向两侧溢出后立即冻结,导致非正常冰角出现。

与试验冰形相比,在结冰趋势上祥云 V1.0 采用 Messinger 扩展模型的计算结果要明显优于 Messinger 模型和 FENSAP-ICE 软件的计算结果。对于翼型下表面结冰极限, Messinger 扩展模型计算结果与试验冰形基本一致;对于翼型上表面结冰极限,除环境温度为 -4.46°C (见图 10)、 -6.13°C (见图 11)和 -7.79°C (见图 12)条件外,与试验冰形基本一致。在平均结冰厚度上, Messinger 扩展模型计算结果与试验冰形有较好的一致性,在最大结冰厚度上仍然有一定差距。

由于 Messinger 扩展模型引入冰层热传导,避免 Messinger 模型对冻结系数的低估,对未冻结液态水的溢流产生抑制作用,因此 Messinger 扩展模型对结冰极限和平均结冰厚度的预测更加接近试验冰形。而且在环境温度为 -23.35°C (见图 15)条件下, Messinger 扩展模型的计算结果并未出现 Messinger 模型计算的非正常冰角,这也是由于冰层热传导的作用。对于高温结冰条件, Messinger 扩展模型在翼型上表面仍然产生过度的溢流水结冰现象。原因可能是此处结冰表面较为粗糙,现有粗糙度模型低估了此处的对流换热系数,即使 Messinger 扩展模型引入冰层热传导,也无法抑制溢流水结冰。

4 结论

本文在原有 Messinger 扩展模型的基础上,引入蒸发非线性计算式,以牛顿迭代冰层和水膜温度线性方程未知系数的方法代替微分方程原函数的推导。通过计算与分析,得到如下结论:

(1)以牛顿迭代代替方程推导,使 Messinger 扩展模型能够适用于任意形式的蒸发计算式(或其他热流计算式),牛顿迭代可快速收敛,仅耗费较小计算资源。

(2)使用简化的蒸发线性计算式,整体上对冰形的影响很小,但在高温结冰条件下,会产生更多的溢流水结冰,对

结冰极限位置的预测造成一定影响。若忽略蒸发,冷却热能降低,液态水过度溢流,将导致明显的溢流水结冰现象。

(3) Messinger 模型计算结果与 FENSAP-ICE 软件计算结果基本一致, Messinger 扩展模型对水滴冻结量的预测更加合理,能够明显抑制溢流水结冰,计算结果更加接近试验冰形。对于高温结冰条件,在未来工作中通过对下游结冰粗糙区域的对流换热系数的精准模拟方法进行研究,将能够进一步提高结冰极限预测精度。

AST

参考文献

- [1] Messinger B L. Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of airspeed[J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1953, 20(1): 29-42.
- [2] Montreuil E, Chazottes A, Guffond D. Enhancement of prediction capability in icing accretion and related performance penalties[R]. AIAA-2009-3969, 2009.
- [3] 战培国. 美国 NASA 结冰试验设备体系综述[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(5): 1-6.
Zhan Peiguo. Review on the system of icing facilities in NASA[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(5): 1-6. (in Chinese)
- [4] Bourgault Y, Habashi W G, Beaugendre, H. Development of a shallow water icing modeling FENSAP-ICE[R]. AIAA-1999-0246, 1999.
- [5] Bourgault Y, Boutanios Z, Habashi W G. Three-dimensional Eulerian approach to droplet impingement simulation using FENSAP-ICE, Part 1: Model, algorithm and validation[J]. *Journal of Aircraft*, 2000, 37(1): 95-103.
- [6] Myers T G, Hammond D W. Ice and water film growth from incoming supercooled droplets[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42: 2233-2242.
- [7] Myers T G. Extension to the Messinger model for aircraft icing[J]. *AIAA Journal*, 2001, 39(2): 211-218.
- [8] Myers T G. Thin films with high surface tension[J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1998, 40(3): 441-462.
- [9] Myers T G, Thompson C P. Modelling the flow of water on aircraft in icing conditions[J]. *AIAA Journal*, 1998, 36(6): 1010-1013.
- [10] Myers T G, Charpin J P F, Thompson C P. Slowly accreting glaze ice due to supercooled water impacting on a cold surface[J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(1): 240-256.
- [11] Myers T G, Charpin J P F, Chapman S J. The flow and solidification of a thin fluid film on an arbitrary three dimensional surface[J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(8): 2788-2803.
- [12] Myers T G, Charpin J P F. A mathematical model for atmospheric ice accretion and water flow on a cold surface[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 5483-5500.
- [13] Özgen S, Canibek M. Ice accretion simulation on multi-element airfoils using extended Messinger model[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2009, 45(3): 305-322.
- [14] Özgen S, Canibek M. In-flight ice formation simulation on finite wings and air intakes[J]. *The Aeronautical Journal*, 2012, 116: 337-362.
- [15] 朱程香, 孙志国, 付斌, 等. 水滴多尺寸分布对水滴撞击特性和结冰增长的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(5): 620-624.
Zhu Chengxiang, Sun Zhiguo, Fu Bin, et al. Effects of multidispersed droplet distribution on droplet impingement and ice accretion[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 42(5): 620-624. (in Chinese)
- [16] 孙志国, 朱程香, 付斌, 等. 二维翼型结冰数值计算[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(7): 1485-1490.
Sun Zhiguo, Zhu Chengxiang, Fu Bin, et al. Numerical research of ice accretion on two-dimensional airfoils[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(7): 1485-1490. (in Chinese)
- [17] 侯硕, 曹义华. 基于润滑理论的二维积冰数值模拟[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(10): 1442-1450.
Hou Shuo, Cao Yihua. Numerical simulation of two dimensional ice accretion based on lubrication theory[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(10): 1442-1450. (in Chinese)
- [18] 曹广州, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 模拟飞机迎风面三维积冰的数学模型[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(9): 1953-1963.
Cao Guangzhou, Ji Honghu, Hu Yaping, et al. An icing model for simulating three dimensional ice accretion on the upwind surfaces of a plane[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(9): 1953-1963. (in Chinese)
- [19] 曹广州, 吉洪湖, 斯仁. 迎风面三维结冰过程中水膜流动的计算方法[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(3): 677-685.
Cao Guangzhou, Ji Honghu, Si Ren. Computational methodolo-

- gy of water film flow in three-dimensional ice accretion on up-wind surface[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(3): 677-685. (in Chinese)
- [20] 雷梦龙, 常士楠, 杨波. 基于 Myers 模型的三维结冰数值仿真[J]. 航空学报, 2018, 39(9): 121952.
Lei Menglong, Chang Shinan, Yang Bo. Three-dimensional numerical simulation of icing using Myers model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(9): 121952. (in Chinese)
- [21] 李浩然, 段玉宇, 张宇飞, 等. 结冰模拟软件 AERO-ICE 中的关键数值方法[J]. 航空学报, 2021, 42(S1): 726371.
Li Haoran, Duan Yuyu, Zhang Yufei, et al. Numerical method of ice-accretion software AERO-ICE[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(S1): 726371. (in Chinese)
- [22] Wright W B. User's manual for LEWICE version 3.2[R]. NASA-CR-2008-214255, 2008.
- [23] Cansdale J T. Helicopter rotor ice accretion and protection research[J]. Vertica, 1981, 5(4): 357-368.
- [24] Verdin P, Charpin J P F, Thompson C P. Multistep results in ICECREMO2[J]. Journal of Aircraft, 2009, 46(5): 1607.
- [25] 乔龙, 李艳亮, 杨思源, 等. 基于面向对象的非结构航空 CFD 软件体系结构设计[J]. 航空科学技术, 2022, 33(7): 66-72.
Qiao Long, Li Yanliang, Yang Siyuan, et al. Software architecture of an unstructured aviation CFD solver using object-oriented techniques[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(7): 66-72. (in Chinese)
- [26] Shin J, Bond T. Results of an icing test on a NACA 0012 airfoil in the NASA Lewis Icing Research Tunnel[R]. NASA-TM-105374, 1992.

Research on the Influence of Evaporation on Runback Icing Characteristics Based on Extended Messinger Model

Ning Yijun¹, Xie Wenlong², Zhu Dongyu¹, Zhang Fukun¹

1. Liaoning Provincial Key Laboratory of Aircraft Ice Protection, AVIC Aerodynamics Research Institute, Shenyang 110034, China

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: The traditional extended Messinger model simplifies evaporation as a linear function of the wall temperature in order to derive the original functions of the differential equations of the ice layer and water film temperature. However, the relationship between evaporation and wall temperature is not linear in the process of icing. If the nonlinear equation of evaporation is introduced, the original functions of the differential equations of ice layer and water film temperature cannot be derived. In addition, some researchers ignored the effect of evaporation on icing when applying extended Messinger model, which may cause large errors in some icing conditions. To solve the problems above, the extended Messinger model is improved. The ice layer and water film temperature are assumed to be a linear equation with unknown coefficients, the implicit expressions of unknown coefficients are established, the unknown coefficients are solved by Newton iteration, and the equation derivation is replaced by numerical iteration. Based on NACA0012 airfoil, the effects of ignoring evaporation and using different evaporation formulas on the icing shape were analyzed. The icing shapes at different ambient temperatures were calculated and compared with FENSAP-ICE software and experimental ice shapes, and the effectiveness of the improved method was verified.

Key Words: Messinger model; extended Messinger model; aircraft icing; icing calculation; icing software

Received: 2023-07-21; Revised: 2023-11-28; Accepted: 2024-01-04

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2022Z006026005)