

文章编号:1000-8055(2013)11-2419-11

一种用于飞机结冰的海绵冰模型及应用

李 鑫, 白俊强, 王 昆
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘 要: 基于两相流理论, 采用欧拉法对飞机结冰进行数值模拟, 在空气流场速度分布的基础上, 求解水滴流场, 得到水滴收集率和撞击极限。结果表明: 欧拉法比拉格朗日法在计算水滴收集效率和撞击极限方面有优势, 尤其是在较大的水滴平均等效直径情况下。对翼型的冰形和圆柱表面的温度预测数据和实验数据进行对比, 圆柱冰形厚度误差在 15.0% 之内, 计算结果与实验结果吻合较好, 同时表明结冰模型是有效可行的。

关 键 词: 海绵冰模型; 数值模拟; N-S 方程; 欧拉两相流法; 飞机结冰

中图分类号: V211

文献标志码: A

A spongy icing model for aircraft icing and application

LI Xin, BAI Jun-qiang, WANG Kun

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An Eulerian method to simulate aircraft icing was developed based on two-phase flow theory, and the water collection efficiency and impingement limits were solved based on the velocity distribution of air flow. Results show that Eulerian method performs better on water collection efficiency and impingement limit than Lagrangian method, especially under large median volumetric diameter conditions. The predicted ice shape and surface temperature were compared with experimental results, the thickness error of the cylinder ice shape was less than 15.0% and the computational results were in good agreement with the experiment data, showing that the icing model and two-phase flow simulation are feasible and effective.

Key words: spongy icing model; numerical simulation; N-S equations; Eulerian two-phase flow method; aircraft icing

飞机结冰对飞机的飞行安全有很大的威胁, 大气中, 存在很多 0°C 以下而没有冻结的水滴, 称之为过冷水滴, 这类水滴经常出现在 $-20^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围内的云层中, 有时过冷水滴的温度能够达到 -40°C 。结冰问题的研究, 通常采用飞行测试、风洞实验、工程估算、数值模拟等方法^[1]。飞行测试得到的结果是最准确、最直接的, 但是受到飞行安全、费用等因素的制约; 风洞实验的结果准确, 但是对设备的要求较高, 花费较高, 而且不能完全真实地模拟结冰条件; 工程估算简单实用, 但精度不够, 难以反映结冰过程; 数值模拟所受到的制约很

少, 不需要大量的人力物力, 而且可以尽可能地模拟多种结冰条件, 因此发展一种准确的数值模拟方法和结冰模型势在必行。

飞机机翼结冰问题, 目前主要基于两种方法: 拉格朗日法和欧拉法。20 世纪 50 年代起, 国外就基于拉格朗日法开始了数值模拟研究, 欧拉法出现得比较晚, 但是欧拉法在处理多段翼、复杂的三维结构上面有很大的优势, 而且不需要大量的插值运算, 因此现在变得越来越流行, 很多人在飞机结冰方面做了大量的理论和实验工作^[2-4], 但是对于结冰机理, 还有待深入探索。

收稿日期: 2013-01-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131105.1002.003.html>

作者简介: 李鑫(1983—), 男, 山东临沂人, 博士生, 主要从事飞行器设计、计算流体力学研究。

1983 年 LEWICE 软件问世, Potapczuk 等把基于势流法的 LEWICE 扩展到求解 N-S 方程, 通过 N-S 方程的求解, 可以直接得到表面传热系数, 考虑黏性对结冰的影响^[5]. 1991 年 Potapczuk 等把 LEWICE 扩展到三维的后掠翼计算^[6], 在结冰领域作出了卓越的贡献. 拉格朗日法在过去的几十年中得到了大量的应用, 拉格朗日法通过求解单个水滴的运动方程得到水滴的运动轨迹; 而欧拉法则是将水滴和空气当作相互渗透的拟流体, 通过求解水滴控制方程得到全流场的水滴信息. 自 1997 年 Bourgault 等用欧拉法研究了翼型的结冰^[7], 欧拉法因为其简单高效的特性, 受到了很多学者的青睐^[8-10]. 国内 20 世纪 90 年代才进行结冰数值模拟研究, 但是已经取得了较好成果^[11-13].

在结冰模型的研究方面, Messinger 于 1953 年建立了经典的 Messinger 结冰模型^[14], Myers, Bourgault 和 Otta 等也分别建立了各自的结冰模型^[15-17], 纵观这些模型, LEWICE 采用的是基于 Messinger 思想的结冰模型, ICECREMO 采用的是 Myers 开发的模型, Bourgault 开发的模型被用在 FENSAP-ICE 里面. 很多学者指出, 结冰表面的冰水混合物的温度是低于冰点的, Karev 等在冰风洞中对圆柱体的温度分布进行了研究, 研究发现, 表面冰水混合物的温度一直是低于 0℃ 的^[18], 但是传统的飞机结冰模型, 例如 Messinger 模型, 对表面冰水混合物的温度定义是 0℃, 另一个传统飞机结冰模型忽略的物理现象是冰的含水现象, 也就是海绵冰现象. 在气象结冰领域, 很多人在海绵冰和冰面过冷现象上进行了研究^[19]. Blackmore 等指出, 水滴温度和液态水含量决定了含冰量、结冰速度和结冰界面的过冷程度^[20]. 和气象结冰所关心的不同, 飞机结冰关心的是冰形对飞机的气动性能和飞行品质的影响, 美国、加拿大、法国、英国等国家对于结冰进行了大量的研究, 20 世纪 90 年代以后, 出现了一批结冰预测软件, 例如美国的 LEWICE, 英国的 DRA, 法国的 ONERA, 加拿大的 FENSAP-ICE, 意大利的 CIRAMIL, 这些软件在飞机的防/除冰设计中发挥了很大的作用.

1 计算过程

1.1 结冰模拟流程

本文的目的首先是验证欧拉法在计算水滴收集率和撞击极限方面的精度; 其次是发展并验证一种考虑结冰含水和结冰表面温度过冷的结冰模

型, 本文数值模拟结冰的步骤如下:

- 1) 网格生成;
- 2) 忽略水滴的影响, 计算空气流场;
- 3) 在空气流场的基础上, 计算水滴轨迹;
- 4) 通过求解质量、能量方程计算结冰量;
- 5) 计算冰形;
- 6) 在下一个时间步, 重复步骤 1)~步骤 5).

给定时间步长, 以上步骤需要反复迭代, 直到结冰完成为止.

1.2 空气相和水滴相计算

为了在同一套网格上计算空气和水滴流场, 本文采用了欧拉坐标系下的空气-水滴两相流控制方程.

连续性方程

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_w \chi)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_w v_j \chi)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

动量方程

$$\frac{\partial (\rho_a u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho_w v_i \chi)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_w v_j v_i \chi)}{\partial x_j} = \frac{0.75 \chi \cdot \mu \cdot C_d Re_w}{D_{mvd}^2} \cdot (u_i - v_i) + \rho_w ag \left[1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} \right] \quad (4)$$

能量方程

$$\frac{\partial (\rho_a H - p)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_j H)}{\partial x_j} = \frac{\partial (u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (6)$$

在水滴撞击前, 暂不考虑空气和水滴的能量交换, 所以此处只有空气的能量方程, 水滴撞击之后, 采用结冰模型来考虑水滴和空气流场的能量交换. 式中 ρ_w, ρ_a 分别为水滴密度和空气密度; u_i, u_j 代表空气流场速度; v_i, v_j 代表水滴流场速度; $H, p, \mu, \tau_{ij}, g, Re_w$ 和 δ_{ij} 分别为总焓、压力、空气黏度、应力张量、重力加速度、水滴相对空气运动的雷诺数和 Kronecker 算子; D_{mvd} 为水滴平均等效直径; C_d 为阻力系数; χ 为体积因子, 采用 Spalart-Allmaras 模型来封闭 N-S 方程, 具体实施方法参见文献[21].

2 结冰模型的建模

为了考虑冰的含水和冰水混合物的过冷现

象,首先对海绵冰模型进行建模.图 1 为海绵冰微观图像,冰层中可以清晰地看到液态水的存在.在进行结冰模型的建模之前,需要对模型作如下一些假设:

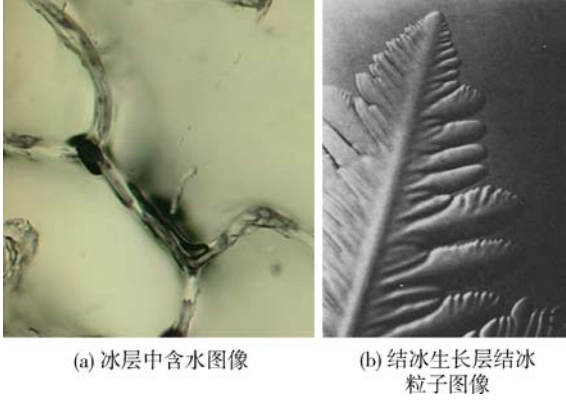


图 1 海绵冰微观图像

Fig. 1 Microcosmic photograph of spongy ice

- 1) 每一个结冰生长层的结冰粒子,都有一个圆柱形的底部和半圆形的头部;
- 2) 结冰生长层的结冰粒子是枝状冰,如图 1(b)所示;
- 3) 结冰生长层的厚度和结冰粒子的半圆形头部成比例关系;
- 4) 结冰生成的潜热直接传递到水膜;
- 5) 结冰粒子的半径是由液态水含量(C_{lwc})和周围温度决定的,但是周围温度起主导作用.

2.1 层流水膜建模

Dukler 等把适用于空气流场的广义速度分布方程推广到水膜层^[22].冯·卡门认为,层流底层中流体维持严格的层流,完全依靠分子运动进行动量传递,层流层中流体微团脉动引起的紊流动量传递远大于分子动量传递,积分后得到层流层中的速度分布是线性的,表达式为

$$u^+ = \zeta \quad 0 < \zeta \leq 5 \quad (7)$$

其中 $u^+ = u/u_t$, u 为切向速度, u_t 为切应力速度, ζ 为垂直于结冰表面的无量纲坐标,定义如下:

$$\zeta = \frac{\sqrt{y_t^3 g \rho_w}}{\mu_w} \quad (8)$$

其中 y_t 是水膜的厚度, μ_w 为水的黏度.对于飞机结冰来说,绝大多数情况 $\zeta < 5$,意味着水膜是层流的,当 $5 < \zeta \leq 30$ 和 $\zeta > 30$ 时,分别代表缓冲层和湍流层.

水膜的连续性方程为

$$\dot{m}_{in} + \dot{m}_{imp} = \dot{m}_{wf-ifl} + \dot{m}_{out} \quad (9)$$

其中 $\dot{m}_{in}$ 是从上一个控制体流入的质量流量, $\dot{m}_{imp}$ 是水滴撞击质量流量, $\dot{m}_{out}$ 是流出控制体的质量流量,结冰质量流量 $\dot{m}_{oi} + \dot{m}_{ol}$ 和从层层转移到结冰生长层的质量流量 $\dot{m}_{wf-ifl}$ 是相等的, $\dot{m}_{oi}$ 为纯冰的质量流量, $\dot{m}_{ol}$ 为液态水的质量流量,流出控制体的质量流量是

$$\dot{m}_{out} = \mu_w f(\zeta) L_{en}^{-1} \quad (10)$$

其中 L_{en} 是控制体的长度.

$$f(\zeta) = 0.5 \zeta^2 \quad 0 \leq \zeta \leq 5 \quad (11)$$

为了得到 I_0 ,对水膜内热交换方程进行建模

$$Q_{in} + Q_{ifl-wf} + Q_{wf-a} + Q_{out} = 0 \quad (12)$$

其中 Q_{in} 是上一个控制体流入的热流量, Q_{ifl-wf} 是从结冰层到水膜的热流量, Q_{wf-a} 是从水膜到空气的热流量, Q_{out} 初值为 0,在迭代过程中延迟更新, Q_{in} 的表达式为

$$Q_{in} = c_w \dot{m}_{in} \left[t_{in} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right] \quad (13)$$

其中 c_w 是水的比热容, t_{in} 是上一个控制体内的平均温度, $(t_1 + t_2)/2$ 是当前控制体的平均温度.

从结冰层到水膜的热流量为

$$Q_{ifl-wf} = \dot{m}_{oi} L_f + c_w \dot{m}_{wf-ifl} \left[\frac{t_1 + t_2}{2} - t_0 \right] \quad (14)$$

其中 L_f 是 0°C 时水的冻结比潜热, t_0 是海绵冰冰层温度.

介于水膜和空气中的热流量为

$$Q_{wf-a} = -\kappa_w \frac{(t_1 - t_2)}{(y_2 - y_1)} - c_w \dot{m}_{wf-ifl} \left[\frac{t_1 - t_2}{2} \right] \quad (15)$$

其中 κ_w 是水的热导率, t_1 和 t_2 分别为结冰生长层与水膜层交界面的温度和水膜的表层温度, y_1 和 y_2 分别为结冰生长层和水膜层的纵坐标.

为了得到 t_2 ,对水膜外层热交换进行研究

$$Q_c + Q_a = 0 \quad (16)$$

其中 Q_c 是结冰层直接传导到空气中的热流量, Q_a 是水膜外层所含的热流量,表达式分别为^[23]

$$Q_c = \kappa_w \frac{t_1 - t_2}{y_2 - y_1} \quad (17)$$

$$Q_a = -h_{cv}(t_2 - t_a) - \frac{\varepsilon h_{cv} L_v}{c_p p_a} \left[\frac{Pr}{C_{STB}} \right]^{0.63} \cdot (p_{\beta} - R_{hum} \cdot p_a) - \sigma k_a (t_2 - t_a) - c_w R_{imp} (t_2 - t_{imp}) \quad (18)$$

其中 h_{cv} 为表面传热系数; t_a 和 t_{imp} 分别为空气温度和撞击水滴的温度; p_a , p_{β} , p_a 分别为空气压力、温度 t_3 时的饱和蒸汽压、温度 t_a 时的饱和蒸汽压; L_v 为水的蒸发比潜热; c_p 是空气的比定压

热容; Pr , Sc , k_a 和 C_{STB} 分别为普朗特数、Schmidt 数、热传导线性化常数和 Stefan-Boltzmann 常数, ϵ 和 R_{hum} 分别为水和空气的分子摩尔质量比和空气的相对湿度。

2.2 结冰层建模

在 List 的结冰模型中,在水膜和海绵冰冰层之间有一个薄层^[19]为结冰生长层,这一层含有枝状冰和水,它的厚度是 $y_1 - y_0$,如图 2 所示。为了预测结冰的生长速度和冰层中的含冰量 f ,需要详细研究结冰生长层。含冰量代表海绵冰中冰的质量分数,定义为

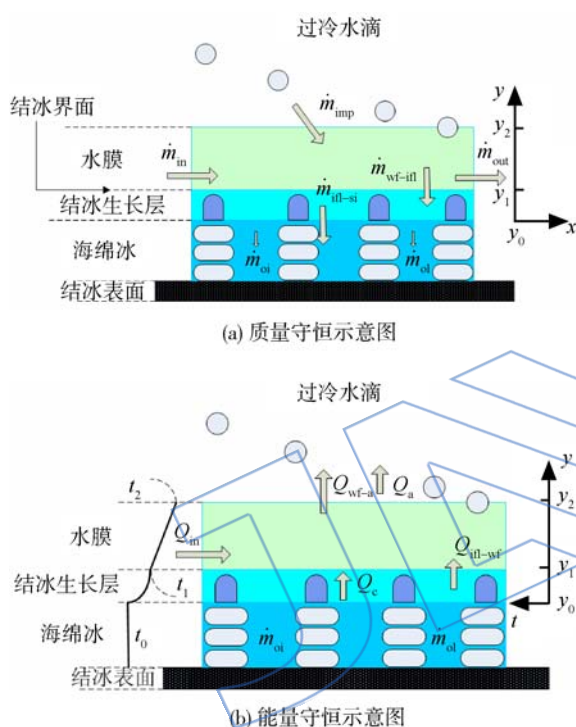


图 2 结冰模型示意图

Fig. 2 Schematic of icing model

$$f = \frac{\dot{m}_{oi}}{\dot{m}_{oi} + \dot{m}_{ol}} \quad (19)$$

结冰生长层的热传导满足一维稳态扩散方程

$$\frac{d}{dy} \left[\kappa \frac{dT(y)}{dy} \right] + q_v = 0 \quad (20)$$

方程的特解是

$$t_0 - t_1 = q_v (y_1 - y_0)^2 / (2\kappa) \quad (21)$$

其中 q_v 为潜热传导的体积率, κ 为结冰生长层的热导率。

潜热传导的体积率为

$$q_v = q_l / (y_1 - y_0) \quad (22)$$

其中 q_l 是从结冰生长层到层流水膜的潜热

$$q_l = \dot{m}_{oi} L_f - c_w (t_0 - t_1) (\dot{m}_{oi} + \dot{m}_{ol}) \quad (23)$$

枝状冰的生长速度的表达式为

$$V_c = a \Delta t^b \quad (24)$$

其中 $\Delta t = t_0 - t_1$ 为结冰生长层上下表面温度差, a 和 b 是经验常数, Timizi 等建议 a 和 b 的取值是 1.87×10^{-4} 和 2.09 ^[24], 为了考虑周围温度的影响和在飞机结冰领域应用此海绵冰结冰模型, 经过标定, 建议 b 的取值由 $b = -3.79 \times 10^{-4} t_a^3 - 1.843 \times 10^{-2} t_a^2 - 0.15406 t_a + 1.6569$ 给出, t_a 是周围空气的温度, b 是温度的敏感函数, 对结冰界面的速度有决定性作用, 对结冰类型的划分也具有重要作用。

$$V_c = V_1 = (\dot{m}_{oi} + \dot{m}_{ol}) / \rho_w \quad (25)$$

其中 V_1 代表液态水通过结冰界面的速度。

结冰粒子的头部半径和生长层的温度差有如下的线性关系:

$$r = c + d / \Delta t \quad (26)$$

其中 r 是结冰粒子的头部半径, 对于飞机结冰, 推荐 $c = 4.36 \times 10^{-5}$ 和 $d = 2.864 \times 10^{-5}$. 这 2 个参数的主要作用是保证此海绵冰模型的迭代求解是收敛的。

根据假设 3), 结冰生长层的厚度和结冰粒子的头部半径 r 关系为

$$y_1 - y_0 = k_r r \quad (27)$$

其中 k_r 为比例因子, 对于飞机结冰, $k_r = 1.32$. 文中给出了适用于飞机结冰的一些参数, 这些参数是通过一系列不同温度、不同液态水含量 C_{lwc} 和不同飞行速度的 NASA 冰风洞的实验数据进行标定的, 标定的结果必须要适用于典型的飞机结冰状态, 在保证收敛的基础上预测的结果必须具有物理意义。

3 海绵冰模型对飞机结冰的预测

一旦结冰模型的各个截面的质量和能量关系确定, 结冰情况就能确定, 传统模型中, 结冰通常分为明冰、混合冰和霜冰, 随着温度的降低, 海绵冰模型将结冰情况分为 4 类: 明冰、有水膜的海绵冰、无水膜的海绵冰、霜冰。水膜表面的温度 t_2 是由水膜表面的能量方程决定的, 对于当前的控制体, 如果 $t_2 < 0^\circ\text{C}$, 结冰的质量流量不小于水滴撞击质量流量, 没有水膜形成也没有水进入到海绵冰层中, 结冰速度是由水滴撞击的质量流量决定的, 这种情况的结冰叫做霜冰。随着温度升高, 结冰速度逐渐降低(式(24)), 如果水滴撞击质量流量 $\dot{m}_{imp}$ 达到一定程度, 能够形成海绵冰但是没有表面水膜形成, $\dot{m}_{oi}$

小于水滴撞击质量流量,这时叫做无水膜的海绵冰.如果水滴撞击质量流量足够大,结冰表面有水膜生成,此时的结冰类型是有水膜的海绵冰.如果进入到海绵冰层的水为 0,就是 $\dot{m}_{oi}=0$,同时在结冰表面有水膜生成,此种结冰类型叫做明冰.

4 对海绵冰模型的进一步分析

在传统的结冰模型中(如 Messinger 模型),结冰表面冰水混合物的温度是 0°C ,而且没有结冰生长层,但是在海绵冰模型中,结冰生长层必须是过冷的,这样才能驱动热流量从结冰界面到空气流场,实验已经证明了这一点.如果没有水进入到冰层,含冰量 f 为 1,在明冰和霜冰情况下,含冰量都是 1,在海绵冰模型中,存在如下的关系:

$$V_0 = \frac{\dot{m}_{oi}}{\rho_i} + \frac{\dot{m}_{ol}}{\rho_w} \geq V_c = a\Delta t^b = \frac{\dot{m}_{oi} + \dot{m}_{ol}}{\rho_w} \quad (28)$$

在霜冰或者明冰情况下,进入到冰层的液态水的质量流量 $\dot{m}_{oi}=0$,将式(22)代入到式(21)中,得到

$$t_0 - t_1 = \frac{q_1(y_1 - y_0)}{2\kappa} = \frac{(\dot{m}_{oi}L_f - c_w\dot{m}_{ol}\Delta t)(y_1 - y_0)}{2\kappa} \quad (29)$$

将式(26)和式(27)代入到式(29)中,得到

$$I_0 = \frac{2\kappa\Delta t}{\kappa_r(c + d/\Delta t)(L_f - c_w\Delta t)} \quad (30)$$

将式(30)代入到式(28)中,式(28)变为

$$-c_w c \Delta t^b + (L_f c - c_w d) \Delta t^{b-1} + L_f d \Delta t^{b-2} - \frac{2k}{a\kappa_r \rho_i} \leq 0 \quad (31)$$

求解式(31),假设 $t_a = -4.4^{\circ}\text{C}$,可以得到 $\Delta t \leq 0.743^{\circ}\text{C}$,这表明当空气温度为 -4.4°C 的时候,出现了明冰现象,但是结冰表面不是无限过冷的,温度 t_1 的范围是 $0^{\circ}\text{C} > t_1 \geq -0.743^{\circ}\text{C}$.

5 算例分析

为了验证欧拉法在计算水滴收集率和撞击极限方面的精度,首先对结冰的 NACA 23012 水滴撞击进行研究.结冰翼形是具有 2 个冰角的 15 min 的模拟冰形^[25],参数在表 1 中.为了研究水滴等效直径 D_{mvd} 对撞击的影响,对于结冰翼型计算的 D_{mvd} 为 20,52 μm 和 111 μm .然后就温度对结冰外形的影响进行了研究,并和文献[4]的计算结果进行了对比,计算的几何条件、气动条件、气象条件参数在表 2 中^[4],计算温度分别是: -4.4 ,

-6.1 , -7.8 , -10 , -13.3 , -19.4 , -28.3°C .本文结冰模型和传统结冰模型的一个不同点是表面温度的模拟,所以在 -4.4°C 结冰表面,有一个表面预测温度的对比.最后为了验证本结冰模型对表面温度的预测性能,对圆柱表面的温度进行了预测,并和实验数据进行了对比^[18],圆柱体的半径是 0.019 m,模拟参数在表 3 中,结冰时间取为 300 s 和 462 s.

表 1 NACA 23012 水滴撞击参数

Table 1 Parameters for NACA 23012 water drop impingement

参数	数值
攻角 $\alpha/(^{\circ})$	2.5
自由来流速度 $u_{\infty}/(\text{m/s})$	78.22
液态水含量 $C_{lwc}/(\text{g/m}^3)$	0.5
弦长 C/m	0.9144
自由来流压强 p_{∞}/kPa	94.8

表 2 NACA 0012 冰形预测参数

Table 2 Parameters for ice shape predicted computation on NACA 0012

参数	数值
结冰时间 t_i/s	360
攻角 $\alpha/(^{\circ})$	4
水滴等效直径 $D_{mvd}/\mu\text{m}$	20
自由来流速度 $u_{\infty}/(\text{m/s})$	67.05
液态水含量 $C_{lwc}/(\text{g/m}^3)$	1.0
弦长 C/m	0.5334
自由来流压强 p_{∞}/kPa	101.3

表 3 圆柱体模拟参数

Table 3 Parameters for simulation on cylinder

参数	数值
来流温度 $t/^{\circ}\text{C}$	-17.0
水滴等效直径 $D_{mvd}/\mu\text{m}$	43.4
自由来流速度 $u_{\infty}/(\text{m/s})$	30.0
液态水含量 $C_{lwc}/(\text{g/m}^3)$	3.0
自由来流压强 p_{∞}/kPa	101.3

在水滴收集率的计算中,横坐标是从翼型参考点算起的表面距离,参考点对应的是 $y=0$ 这一点.对于干净翼型,参考点就是前缘点;对于结冰翼型,参考点在冰角之间,翼型下表面对应正的表面距离.

5.1 结冰 NACA 23012 水滴撞击模拟

图 3 为结冰 NACA 23012 翼型水滴撞击特

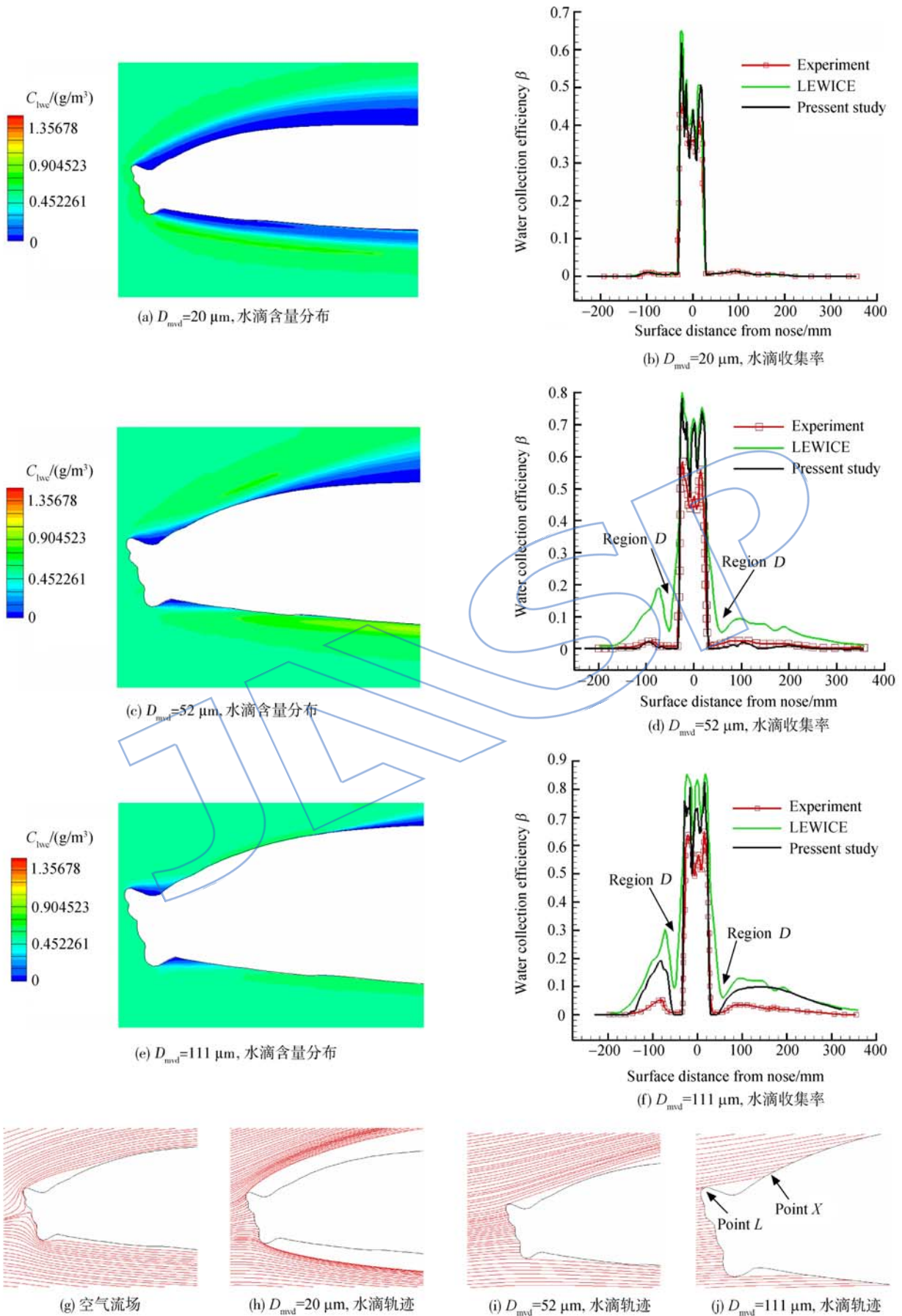


图 3 结冰 NACA 23012 翼型水滴撞击特性

Fig. 3 Water drop impingement characteristics for iced NACA 23012

性,其中图 3(g)和图 3(h)分别表示结冰翼型的空气流场和水滴轨迹,对应 $D_{mvd}=20\mu\text{m}$,从空气流场和水滴轨迹可以看出,水滴由于惯性撞击到翼型前缘,但是空气流场有阻止水滴撞击到翼型的趋势.当 $D_{mvd}=20\mu\text{m}$ 时,计算结果和实验数据符合很好,随着 D_{mvd} 的变大,计算结果和实验数据的差异越来越大.对于 D_{mvd} 为 $52\mu\text{m}$ 和 $111\mu\text{m}$ 的情况,水滴收集率在参考点(冰角之间)附近比实验数据要大.产生这个现象的原因是随着 D_{mvd} 的变大,尤其是 $D_{mvd}>52\mu\text{m}$ 时,水滴的飞溅越来越明显,本文和 LEWICE 都没有加入水滴飞溅模型.

在大的 D_{mvd} 情况下,LEWICE 计算的水滴收集率 β 在对应冰角下游的区域(区域 D,图 3(d),图 3(f))表现出缓慢地降低,而实验数据和本文结果在此处表现出突然降低,这个现象是拉格朗日法所采用的插值方法导致的.在遇到多块撞击现象时,这种插值方法就会遇到困难.多块撞击现象一般会在多段翼、大弯度翼型和复杂构型的撞击中.在拉格朗日法中,某点水滴收集率是通过此点附近相邻的两个水滴轨迹来计算的,当相邻的水滴轨迹击中了不同的区域时,问题就产生了.例如,前撞击区域的后撞击极限点(图 3(j)中点 L)和后撞击区域的前撞击极限点(图 3(j)中点 X),在这两点之间的区域没有水滴撞击,收集率应该是 0,但是因为插值方案的原因,拉格朗日法的预测在此处不是 0,欧拉法却不存在这个问题,在此处的计算结果和实验数据吻合得很好.

在参考点附近,计算结果都要大于实验结果,原因有 3 个,首先是没有模拟水滴的飞溅功能,其次是模拟的流场和真实的流场有差别,最后是实验的误差.从图 3(h)~图 3(j)可以看出水滴轨迹的变化趋势,在 $D_{mvd}=20\mu\text{m}$ 时,水滴轨迹在翼型周围有一个明显的偏转,到 $D_{mvd}=52\mu\text{m}$ 时,偏转已经很小,当 $D_{mvd}=111\mu\text{m}$ 时,已经没有偏转,轨迹基本是直的,这是因为随着水滴直径的增大,惯性也在增大,空气流场越来越难以改变水滴的运动轨迹.

5.2 NACA 0012 冰形预测

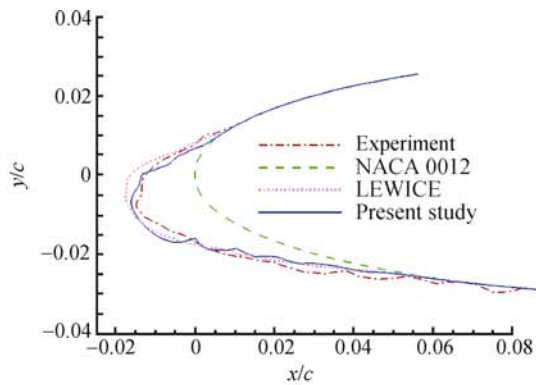
本文的目的之一是发展并验证一种新的结冰模型,为了验证模型的可靠性,预测了 NACA 0012 在 7 种不同温度下的冰形,计算参数在表 2 中.图 4 为预测的 6min 冰形和实验数据对比的结果,对于 -28.3°C (图 4(a)、图 4(b))和 -19.4°C (图 4(c)、图 4(d))的情况,含冰量为 1,表面没有水膜形成,是一种典型的霜冰.预测冰形

和实验数据总体吻合良好,在压力面两个预测冰形都比实验数据的撞击极限要小. LEWICE 预测的结冰体积要稍大一些,在上翼面 LEWICE 预测的冰形厚度要大,而本文预测的要小.从图 4 中可以看出某些冰形表面是波状的,这是因为结冰表面的表面传热曲线不是光滑的,而是波状的,这是实际物理现象的一种体现.对于 -13.3°C 的情况,表面没有水膜生成,含冰量在 $(0,1)$ 之间,这是另一种类型的干结冰,叫做无水膜的海绵冰, LEWICE 预测的体积偏大,本文预测的和实验更接近,当温度为 -10.0°C (图 4(g)、图 4(h))和 -7.8°C (图 4(i)、图 4(j))时,含冰量在 $(0,1)$ 之间, $\dot{m}_{out}$ 不为 0,这种类型的冰叫做有水膜的海绵冰,本文在吸力面的预测和实验数据很符合,在压力面,预测的体积偏大,但是 LEWICE 的预测几乎在每个点都要偏大.对于 -6.1°C (图 4(k)、图 4(l))和 -4.4°C (图 4(m)、图 4(n))的情况,含冰量为 1, $\dot{m}_{out}$ 不为 0,这种情况是明冰,也是一种最典型的湿结冰,本文的预测明显比 LEWICE 的预测要接近实验数据.

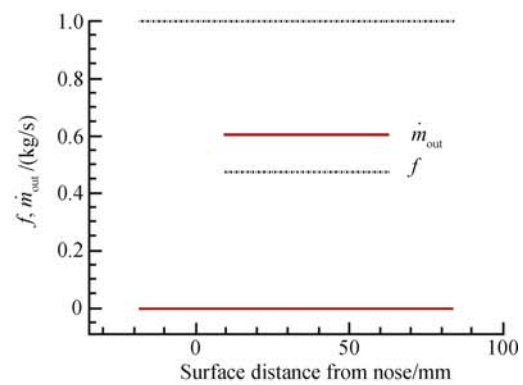
两种结冰模型的差别之一是表面温度的定义和预测能力,实验已经发现结冰表面的冰水混合物的温度低于 0°C . 在 -4.4°C 情况下,有一个本文模型和 Messinger 模型的表面温度预测对比,图 4(n)为对比结果, Messinger 模型的结果为 0°C ,但是本文模型的预测都是在 0°C 以下,从本文模型可知表面的过冷决定了枝状冰的头部半径和结冰速度,这也解释了为何海绵冰模型比 Messinger 模型的预测要好.

5.3 圆柱体冰形和表面温度预测

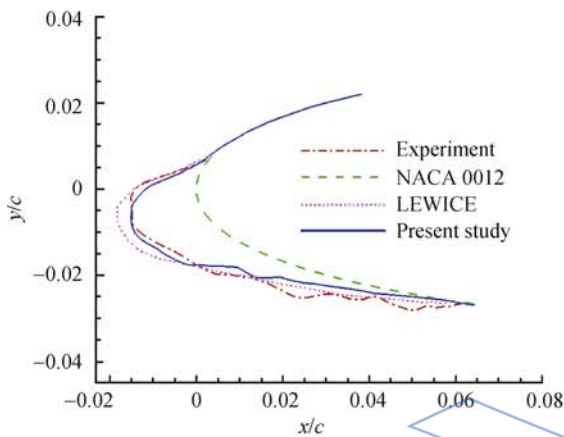
本文圆柱体冰形的预测数据与冰风洞的实验数据进行了对比, Karev 在冰风洞中测量了圆柱体的表面温度^[18],实验参数在表 3 中,冰形预测的结果在图 5(a)中,结冰时间为 300 s,预测的冰形和实验数据基本是一致的,在驻点附近厚度比实验数据大,但是在撞击极限附近,预测的厚度偏薄,厚度误差在 15.0% 以内.图 5(b)是预测温度和实验温度的对比,结冰时间为 462 s,预测的温度都在 0°C 以下,虽然预测值比实验值要高,但是预测的趋势是对的.图 5(b)中横坐标的定义:顺时针方向为正角度,逆时针方向为负角度.值得注意的是此时结冰为霜冰,表面无溢流水,含冰量 $f=1$,此时的表面温度实际上是结冰生长层的温度.此预测冰形和实验冰形的差异,体现在海绵冰模型里面,主要是前缘表面传热系数偏高导致的.



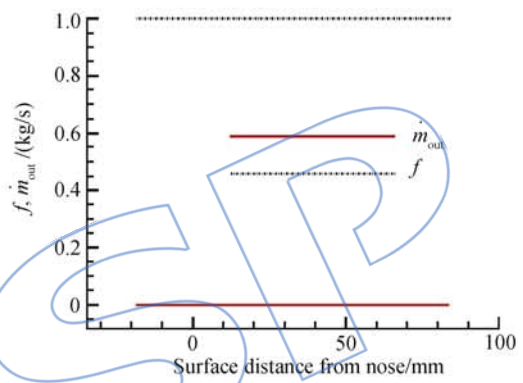
(a) -28.3 °C 时的冰形对比



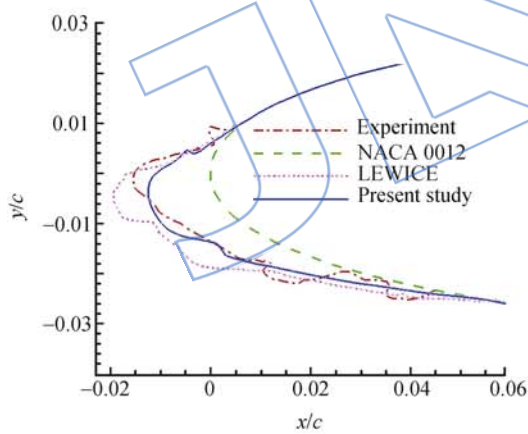
(b) -28.3 °C 时的含冰量和溢流质量流量



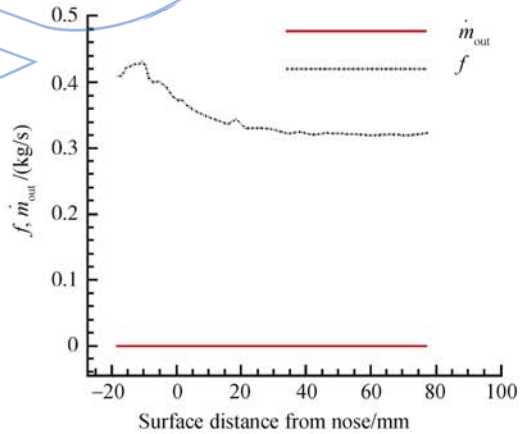
(c) -19.4 °C 时的冰形对比



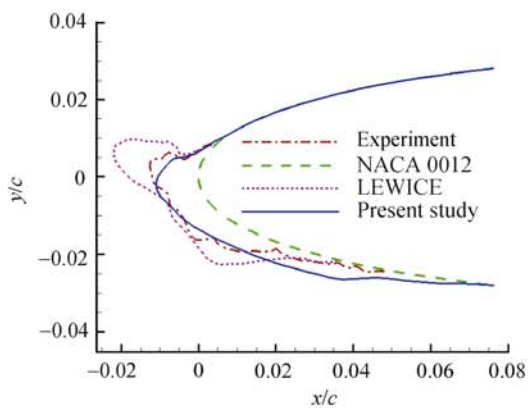
(d) -19.4 °C 时的含冰量和溢流质量流量



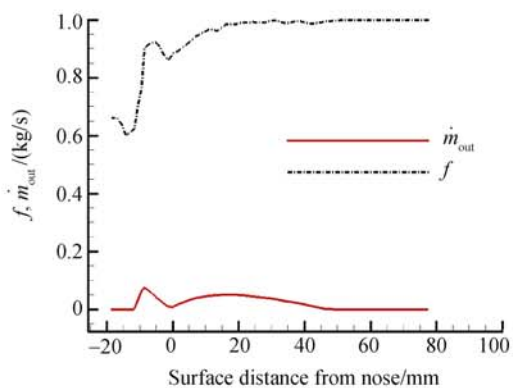
(e) -13.3 °C 时的冰形对比



(f) -13.3 °C 时的含冰量和溢流质量流量



(g) -10.0 °C 时的冰形对比



(h) -10.0 °C 时的含冰量和溢流质量流量

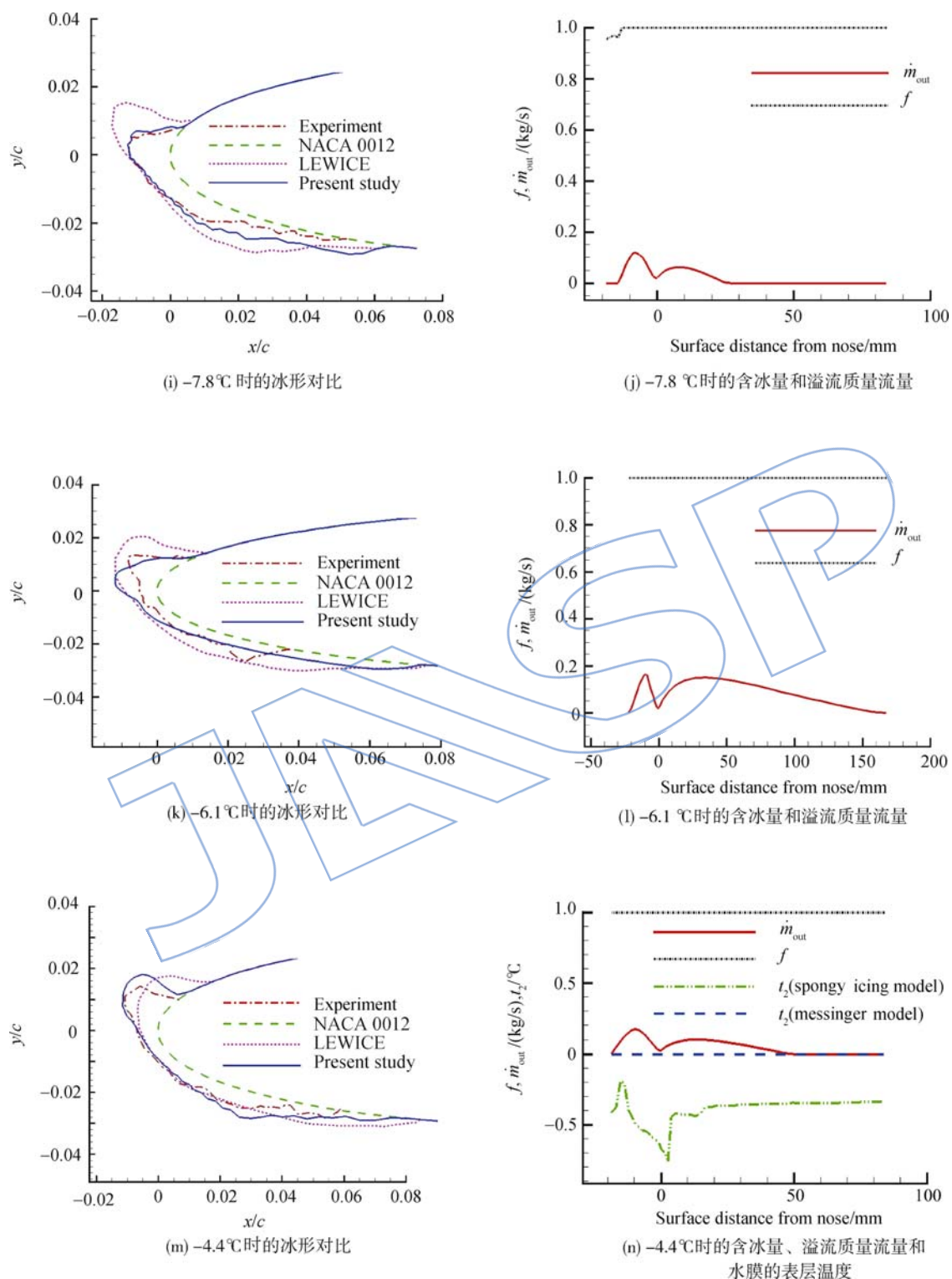


图 4 预测冰形和实验数据对比

Fig. 4 Comparison of predicted ice shape and experimental data

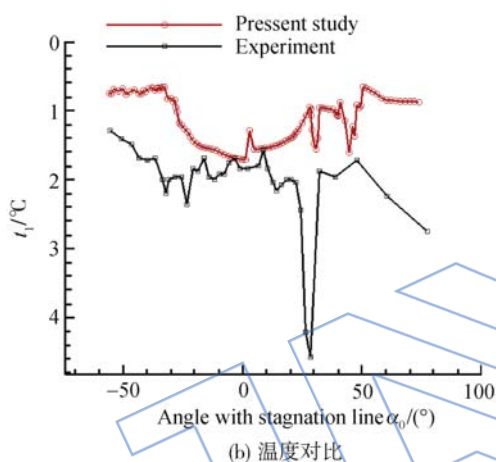
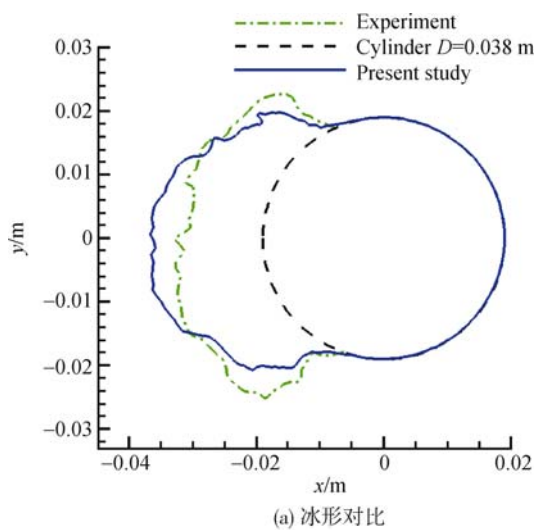


图5 圆柱体实验和预测数据对比

Fig.5 Comparison of predicted data and experimental data on cylinder

6 结论

开发了一个可以预测霜冰、无水膜的海绵冰、有水膜的海绵冰、明冰的结冰模型,文中对质量和能量传递进行了详尽的描述,表面水膜的过冷驱动结冰过程,通过决定结冰生长速度和枝状冰的头部半径来决定冰形。

海绵冰模型的预测和实验与 NACA 0012 冰形的对比显示,海绵冰模型具有很好的预测精度。List 指出过冷水膜对结冰的影响是很大的^[19],因此在飞机结冰中,也必须要考虑结冰表面被传统结冰模型忽略的过冷问题,在圆柱体冰形表面温度预测中,预测的温度和实验数据的趋势是一致的,这也从一个侧面证明了本模型的正确性。必须要指出的是,最终冰形的预测结果是空气相流场、水滴相流场、表面传热系数及结冰模型共同作用

的结果,表面传热系数的分布具有主导作用。

海绵冰模型和传统结冰模型的不同点有如下几点:首先是对结冰状态的描述,海绵冰模型能描述4个状态,传统结冰模型只能描述3个状态;其次是海绵冰模型能描述结冰的含水量,而传统结冰模型没有考虑这个物理现象;最后是表面温度的定义,海绵冰模型结冰表面是过冷的,而传统结冰模型认为冰水混合的结冰表面是冰点温度,计算结果和实验数据的对比,显示了本文模型的正确性,对比结果还表明了加入水滴飞溅模型的重要性。

致谢:

感谢普渡大学 Shih T I P 教授和池兴开的帮助。

参考文献:

- [1] 裴燮纲,韩凤华.飞机防冰系统[M].北京:航空专业教材编审组,1985.
 - [2] Bragg M B. Rime ice accretion and its effects on airfoil performance [D]. Columbus: The Ohio State University, 1981.
 - [3] Lozowski E P, Oleskiw M M. Computer simulation of airfoil icing without runback[R]. AIAA 81-0402, 1981.
 - [4] Shin J, Bond T. Results of an icing test on a NACA 0012 airfoil in the NASA Lewis icing research tunnel[R]. AIAA 92-0647, 1992.
 - [5] Potapczuk M G, Al-Khalil K M, Velazquez M T. Ice accretion and performance degradation calculations with LEWICE/NS[R]. NASA TM-105972, 1993.
 - [6] Potapczuk M G, Bidwell C S. Numerical simulation of ice growth on a MS-317 swept wing geometry[R]. NASA TM-103705, 1991.
 - [7] Bourgault Y, Habashi W G, Dompierre J, et al. An Eulerian approach to supercooled droplets impingement calculations[R]. AIAA 97-0176, 1997.
 - [8] Hospers J M, Hoeijmakers H W M. Eulerian method for ice accretion on multiple-element airfoil sections [R]. AIAA-2010-1236, 2010.
 - [9] Cristhian N A, Martin S A, Guido S B, et al. FENSAP-ICE-unsteady: unified in-flight icing simulation methodology for aircraft, rotorcraft, and jet engines[J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(1): 119-126.
 - [10] Petrosino F, Mingione G, Carozza A, et al. Ice accretion model on multi-element airfoil [J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(6): 1913-1920.
 - [11] 杨倩,常士楠,袁修干.水滴撞击特性的数值计算方法研究[J].航空学报,2002,23(2):173-176.
- YANG Qian, CHANG Shinan, YUAN Xiugan. Study on numerical method for determining the droplet trajectories [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2):

- 173-176. (in Chinese)
- [12] 张强,胡利,曹义华. 过冷水滴撞击三维机翼的数值模拟[J]. 航空动力学报,2009,24(6):1345-1350.
ZHANG Qiang, HU Li, CAO Yihua. Three-dimensional numerical simulation of supercooled deoplets impinging on a wing[J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(6):1345-1350. (in Chinese)
- [13] 易贤,朱国林,王开春,等. 翼型积冰数值模拟[J]. 空气动力学学报,2002,20(4):428-433.
YI Xian, ZHU Guolin, WANG Kaichun, et al. Numerical simulating of ice accretion on airfoil[J]. ACTA Aerodynamic Sinica,2002,20(4):428-433. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 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(25):5483-5500.
- [16] Bourgault Y, Beaugendre H, Habashi W G. Development of a shallow water icing model in FENSAP-ICE[J]. Journal of Aircraft,2000,37(4):640-646.
- [17] Otta S P, Rothmayer A P. A simple boundary-layer water film model for aircraft icing[R]. AIAA-2007-902,2007.
- [18] Karev A R, Masoud F, Laszlo E K. Measuring temperature of the ice surface during its formation by using infrared instrumentation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2007,50(3):566-579.
- [19] List R. Physics of supercooling of thin water skins covering gyrating hailstones[J]. Journal of Atmospheric Sciences,1990,47(15):1919-1925.
- [20] Blackmore R Z, Lozowski E P. A theoretical spongy spray icing model with surficial structure[J]. Atmospheric Research,1998,49(4):267-288.
- [21] 张大林,杨曦,昂海松. 过冷水滴撞击结冰表面的数值模拟[J]. 航空动力学报,2003,18(1):87-91.
ZHANG Dalin, YANG Xi, ANG Haisong. Numerical simulation of supercooled water droplets impingement on icing surfaces[J]. Journal of Aerospace Power,2003,18(1):87-91. (in Chinese)
- [22] Dukler A E, Bergelin O P. Characteristics of flow in falling liquid films[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48 (11):557-563.
- [23] Szilder K, Lozowski E P, Gates E M. Modelling ice accretion on non-rotating cylinders-the incorporation of time dependence and internal heat conduction[J]. Cold Regions Science and Technology,1987,13(2):177-191.
- [24] Tirmizi S H, Gill W N. Effect of natural convection on growth velocity and morphology of dendritic ice crystals[J]. Journal of Crystal Growth,1987,85(3):488-502.
- [25] Papadakis M, Rachman A, Wong S C, et al. Water impingement experiments on a NACA 23012 airfoil with simulated glaze ice shapes[R]. AIAA-2004-0565,2004.