

变形破碎特性对 SLD 结冰过程影响

桑为民¹, 蔡 旸¹, 鲁 天²

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072;

2. 中国飞行试验研究院 飞行部, 西安 710089)

摘 要: 基于结冰过程数值模拟, 针对过冷大水滴 (SLD) 条件下的变形破碎特性及其对成冰过程影响进行了研究。利用动态阻力计算模型, 分析了水滴变形对水滴运动轨迹影响, 采用基于泰勒类比理论的计算模型, 研究了水滴破碎过程、子液滴粒径分布特性等。完成了 NACA 0012 翼型典型 SLD 结冰算例的数值分析, 与参考文献计算结果和实验数据进行对比。结果表明: 对于 SLD 结冰, 变形和破碎主要改变了水滴运动轨迹和表面撞击水分布, 使水滴撞击极限变小, 在加入变形破碎特性的计算模型后, 可以较好预测结冰极限位置和冰形轮廓, 说明该方法对 SLD 变形破碎效应及其影响的模拟是可行和正确的。

关 键 词: 飞机结冰; 过冷大水滴; 水滴变形与破碎; 泰勒类比理论; 有限体积法

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Effect of deformation and breakup characteristic on supercooled large droplet icing process

SANG Weimin¹, CAI Yang¹, LU Tian²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Institute of Flight, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: To reveal and master the effects of the droplets deformation and breakup under supercooled large droplet (SLD) conditions, a numerical solver was developed to simulate the ice accretion. The ice accretion on the NACA 0012 airfoil was predicted. For the SLD movement, the droplet deformation and breakup process was investigated using a dynamically varying drag model and Taylor analogy method. Using the above methods, the numerical simulation of ice accretion and icing effects at the deformation and breakup of SLD was performed. These numerical results were compared with the computational and experimental data in several past literatures. The results are in good agreement with experimental data, indicating that the models and methods are feasible and effective. And the comparative results show that accounting of deformation and breakup has made significant improvement to the simulation of the droplet trajectory and ice shape distribution for the SLD icing prediction.

Key words: aircraft icing; supercooled large droplet; droplets deformation and breakup; Taylor analogy method; finite volume method

收稿日期: 2015-11-08

基金项目: 国家自然科学基金 (11072201); 航空科学基金 (2015ZA53007)

作者简介: 桑为民 (1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事空气动力学和计算流体力学研究。

引用格式: 桑为民, 蔡旸, 鲁天. 变形破碎特性对 SLD 结冰过程影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(7): 1537-1544. SANG Weimin, CAI Yang, LU Tian. Effect of deformation and breakup characteristic on supercooled large droplet icing process[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(7): 1537-1544.

飞机结冰是过冷水滴撞击机体表面并冻结形成,是危害飞行安全的重要因素之一,尤其在过冷大水滴(supercooled large droplet, SLD)条件时,会引起水滴运动和撞击特性变化,容易出现冰脊等复杂结冰情况,对飞行安全造成更加严重的危害。当前,SLD 运动及撞击特性及其结冰影响研究已成为飞机结冰研究的热点。

自美国鹰航 ATR-72-212 飞机事故后,人们对 SLD 结冰进行了深入研究^[1-2]。SLD 通常是指大粒径水滴(粒径为 50 μm 以上),与常规小水滴的主要区别是 SLD 动力学效应及其影响,例如水滴重力以及水滴的变形破碎,会造成水滴运动轨迹和撞击区域的变化,从而对水滴收集率、结冰位置和结冰冰形等产生显著影响。

NASA 研究机构对于 SLD 动力学特性及其对飞机结冰影响开展了比较系统的研究,内容涵盖 SLD 环境和结冰防护、SLD 结冰对气动及飞行性能的影响等^[3-4];同时众多著名的结冰计算模拟软件,如 FENSAP-ICE, LEWICE 等,通过吸收和利用 SLD 研究成果,改进其计算模块,使其结冰模拟能力获得不断的完善和提高^[5-6]。对于 SLD, Luxford 等^[7]通过高速成像技术试验研究了不同直径水滴的变形和破碎过程及其对水滴阻力影响,并指出粒径为 250 μm 的水滴由于变形特性的影响其阻力会增大到原来的 4 倍; Wierzbna^[8]综合分析了关于水滴破碎的实验数据,发现各研究测得的水滴破碎临界韦伯数覆盖范围较大,并进一步将水滴破碎过程按照韦伯数大小划分为几种不同形式; Vargas^[9]还采用 DDB(droplet deformation and breakup)模型数值研究变形和破碎影响,分析不同尺寸水滴在不同风速下运动轨迹及撞击位置变化。国内对 SLD 结冰数值模拟的研究工作开展得比较晚,罗辉等^[10]进行了 SLD 结冰过程中的水滴破碎效应研究;吴佩佩等^[11]对 SLD 条件下的结冰过程进行了数值模拟和对比分析;杜晨慧等^[12]对 SLD 环境下二维翼型结冰过程撞击特性及对冰形影响进行了研究。

本文在结冰过程数值模拟的基础上,通过对 SLD 条件下结冰条件进行分析,对比常规小水滴运动,针对 SLD 变形特性,分析模拟 SLD 结冰过程及其影响规律;基于泰勒类比理论,对 SLD 破碎临界条件和状态进行了研究,利用相关计算模型分析了破碎后子液滴大小及其影响;进一步结合翼型前缘结冰过程,研究了 SLD 变形和破碎对成冰过程和结冰冰形的影响。通过以上研究工

作,对于 SLD 结冰数值预测,必须考虑水滴变形和破碎特性及其影响。

1 结冰过程数值模拟方法

结冰数值预测首先要完成空气流场的计算和分析,在此基础上进行水滴运动和撞击特性分析以及冰生长过程研究。对于空气,非定常 N-S (Navier-Stokes) 方程可写成如下的积分形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \int_S \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} ds = \frac{1}{Re} \int_S \mathbf{F}_v \cdot \mathbf{n} ds \quad (1)$$

其中 $\mathbf{F}$ 为无黏对流项, $\mathbf{F}_v$ 为黏性耗散项。采用有限体积法,利用 S-A (Spalart-Allmaras) 湍流模型,物面固壁采用无穿透边界条件,远场采用无反射边界条件^[13]。

在以上空气流场计算的基础上,采用数值方法求解水滴运动方程,基于拉格朗日方法来分析撞击特性并获得水滴收集系数^[14]。由牛顿第二定律获得水滴的运动方程为

$$\rho_d V_d \frac{d^2 \mathbf{x}_d}{dt^2} = (\rho_d - \rho_a) W_d \mathbf{g} + \frac{1}{2} \rho_a A_d C_{dd} |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_d| (\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_d) \quad (2)$$

其中下标 d 表示水滴的参数,下标 a 表示空气的参数, ρ 为密度, W 为体积, $\mathbf{u}$ 为速度, C_{dd} 为水滴的阻力系数。

目前,结冰计算中普遍采用的质传热模型是基于 Messenger 提出的模型,将结冰表面划分为若干控制体,在一些假设前提下分别讨论质量和能量守恒,在空气流场及水滴撞击特性已知的情况下联立求解,该计算模型提出之后不断进行完善,本文选取一种改进形式^[13]。

参照图 1 所示,根据质量和能量守恒,控制体内的质量和能量描述方程分别为

$$\dot{m}_{im} + \dot{m}_{in} - \dot{m}_{va} - \dot{m}_{out} = \dot{m}_{so} \quad (3)$$

$$\dot{E}_{so} + \dot{H}_{va} + \dot{H}_{out} - \dot{H}_{in} - \dot{H}_{im} = \dot{Q}_t - \dot{Q}_c \quad (4)$$

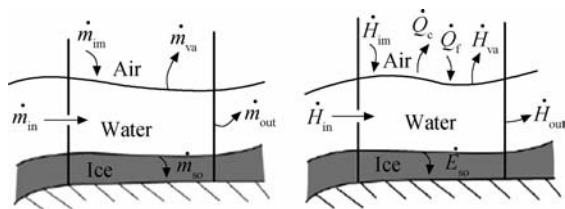


图 1 控制体内质量和能量变化示意图^[13]

Fig. 1 Sketch of mass and energy variation in control volume^[13]

对于霜冰,所有水滴在碰撞时刻就可能完全凝结,所以可以不考虑相变热传导等能量项的变化情况,只考虑质量守恒。对于光冰,关键是建立合适的传质传热计算模型,当物面温度 T_s 和冻结系数 n 求出以后,结冰厚度和冰生长过程可以通过壁面几何重构而获得。

2 SLD 变形和破碎分析

由于 SLD 粒径尺寸较大,其运动和撞击过程与常规小水滴存在较大的差别。在飞行和环境条件相同的情况下,大尺寸水滴表面张力与气动力相比变小,容易发生较大程度的变形,因此不能假设水滴为刚性颗粒,同时当水滴形变超过一定限度时,水滴会发生破碎,破碎后生成的子水滴的数量和尺寸大小等,会造成水滴的运动轨迹发生变化,进而影响水滴撞击特性以及结冰表面局部水滴收集量的大小和分布状态。

2.1 SLD 变形特性

当水滴发生变形后,其阻力系数将发生较大的变化,进而通过式(2)的求解,获得水滴运动轨迹。因此,必须对变形后水滴阻力系数进行合理评估,一般通过球形颗粒和完全变形颗粒之间关系,获取变形颗粒的阻力系数。

本文采用动态阻力系数计算模型

$$C_{dd} = C_{d_sph}(1 + 2.632\gamma) \tag{5}$$

其中 γ 表示水滴变形程度的大小,其表达式为

$$\gamma = 4\delta/d_0 \quad (0 \leq \gamma \leq 1) \tag{6}$$

式中 d_0 为没有发生变形的水滴原始直径, δ 为直径方向上水滴变形量大小,如图 2 所示(图中 p 表示压强)。其中 γ 值越大,表明水滴的变形程度越大。水滴达到完全变形即 $\gamma=1$ 时,水滴阻力系数达到最大值,此时是球形颗粒的 3.632 倍^[15]。式(5)中 C_{d_sph} 为球形颗粒阻力系数,可取如下表达式:

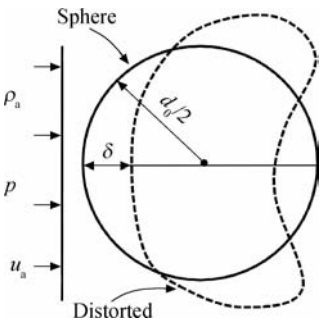


图 2 气动力作用下水滴变形示意图

Fig. 2 Sketch of droplet deformation under the aerodynamic force

$$\begin{cases} C_{d_sph} = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{\frac{2}{3}} \right) & (Re \leq 1000) \\ C_{d_sph} = 0.424 & (Re > 1000) \end{cases} \tag{7}$$

2.2 SLD 破碎特性

研究表明 Weber 数在 11.0~14.0 区间范围内水滴变化比较敏感,相对速度、水滴粒径或流场波动的微小变化都可能导致破碎发生^[15]。

水滴 Weber 数代表了水滴惯性力与其表面张力的比值

$$We = \frac{\rho_a V^2 d}{\sigma} \tag{8}$$

其中 V 是水滴与空气的相对运动速度, σ 为水滴表面张力。对于破碎问题,采用基于泰勒类比(TAB)模型模拟水滴变形后破裂的分析方法,主要思路是将弹簧质量系统与水滴振荡变形之间进行泰勒类比分析,从而得到水滴破碎过程及其影响规律,通过对 TAB 模型方程进行求解,在水滴振荡达到某临界值之后,将发生破碎现象,同时水滴的阻力系数也会随之发生变化。水滴振荡变形的控制方程为

$$F - k\delta - d \frac{d\delta}{dt} = m \frac{d^2\delta}{dt^2} \tag{9}$$

方程中各系数有如下形式

$$\frac{F}{m} = C_F \frac{\rho_a u^2}{\rho_d u r}, \quad \frac{k}{m} = C_k \frac{\sigma}{\rho_d r^3}, \quad \frac{d}{m} = C_d \frac{\mu_d}{\rho_d r^2}$$

其中 u 和 r 分别表示水滴的相对速度、没有发生变形时水滴的半径, C_F, C_k, C_d 为 3 个无量纲常数。假定水滴破碎时,其变形达到水滴半径的某个临界比值即 $\delta > C_b r$, 此时水滴位移公式可表达为如下的方程:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{C_F}{C_b} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_d} \cdot \frac{u^2}{r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_d r^3} y - \frac{C_d \mu_d}{\rho_d r^2} \cdot \frac{dy}{dt} \tag{10}$$

其中破碎时的临界 Weber 数 $We_c = \frac{C_F}{C_k C_b} We$ 。

各无量纲常数依据实验数据经过理论推导可知 $C_F = \frac{1}{3}, C_k = 8, C_d = 5$ 。由此,水滴破碎时的临界 Weber 数约为 13。

根据 Pilch 和 Erdman 的水滴破碎理论^[16], 定义水滴破碎的临界 Weber 数为

$$We_c = 12(1 + 1.077 Oh^{1.6}) \tag{11}$$

其中 Ohnesorge 数(Oh)表示液滴的黏性与其惯性表面张力之比,表达式为

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu_d}{\sqrt{\rho_d \sigma d}}$$

(12)

对于一般水滴来说,其 Oh 数的取值在 0.01 左右,此时也可得出水滴的破碎临界 Weber 数值约为 13,即与泰勒类比方法所得结果相同。因此将基于空气密度的 Weber 数作为水滴是否破碎的判断依据是可行的。

由于水滴破裂相比其运动时间十分迅速,破碎可以被认为是瞬时的。水滴破碎后会形成各种不同的子液滴,由于问题的复杂性,通常取子液滴为同一大小值,其预估公式如下^[17]:

$$d_b = 6.2 \left(\frac{\rho_d}{\rho_a} \right)^{\frac{1}{4}} Re_d^{-\frac{1}{4}} d_0$$

(13)

当子液滴大小获得之后,由破碎前后质量守恒就可知子液滴的数目。为了更好模拟 SLD 条件下的运动特性,在涉及大尺寸水滴的情况下需要在水滴流场求解模块中加入本节所介绍的水滴变形破碎模型,其流程图如图 3 所示。

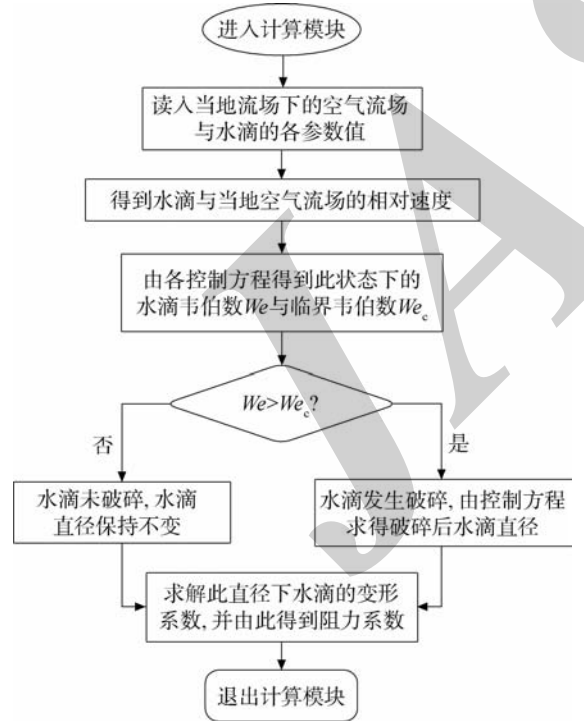


图 3 水滴变形破碎数值模拟流程图
Fig. 3 Flowchart of droplet deformation and breakup numerical simulation

变形破碎模型具体求解过程如下:

- 1) 读入之前已获得的当地空气流场信息和该追踪水滴的流场信息及参数值;
- 2) 计算当前水滴与当地空气流场的相对速度大小,根据当地流场信息,可得水滴 Weber 数

和破碎临界 Weber 数;

3) 当 $We < We_c$ 时,水滴只发生变形而不会发生破碎,此时只考虑水滴变形对其受力和运动轨迹的影响;当 $We > We_c$ 时说明此时水滴发生破碎现象,由式(13)计算子液滴直径,利用动态阻力计算模型获得水滴阻力系数;

4) 将上面得到的计算结果传回水滴运动计算模块,获得下一时间步的水滴位置。

3 算例及计算结果

3.1 常规小水滴结冰过程计算模拟

取 NACA 0012 翼型为例,计算条件为:弦长为 0.5334 m,来流速度为 67.05 m/s,攻角为 4°,水滴的平均容积直径(MVD,量符号记为 D_{mv})为 20 μm ,液态水含量(LWC,量符号记为 C_{lw})为 1.0 g/ m^3 ,结冰时间 $t=360$ s,并选取 3 种不同的结冰温度条件: $T=244.85$ K(霜冰状态)、 $T=263.15$ K(混合冰状态)、 $T=268.75$ K(明冰状态)。

图 4、图 5 比较了 3 种不同温度下冻结系数 f 大小和结冰质量分布,图中 s 表示沿壁面流向的

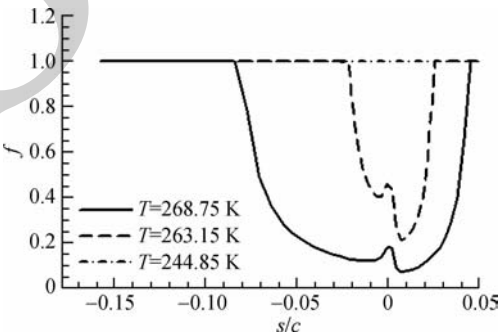


图 4 水滴冻结系数
Fig. 4 Droplet freeze coefficient

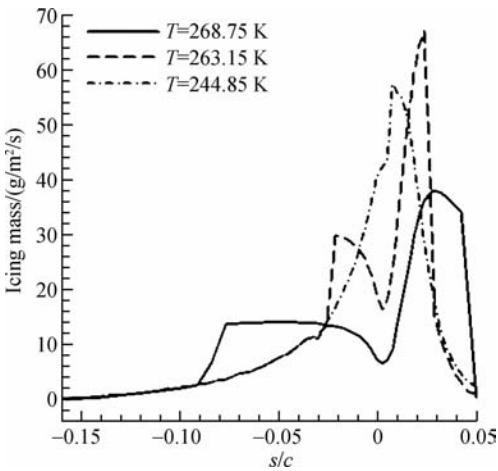


图 5 结冰质量
Fig. 5 Icing mass

位置, c 表示弦长. 由此可见随着温度升高成冰区域在逐渐变大; 图 6(a)、图 6(b) 分别为霜冰和明冰状态下冰形计算结果及其对比, 说明采用的方法能较好模拟常规小水滴结冰过程。

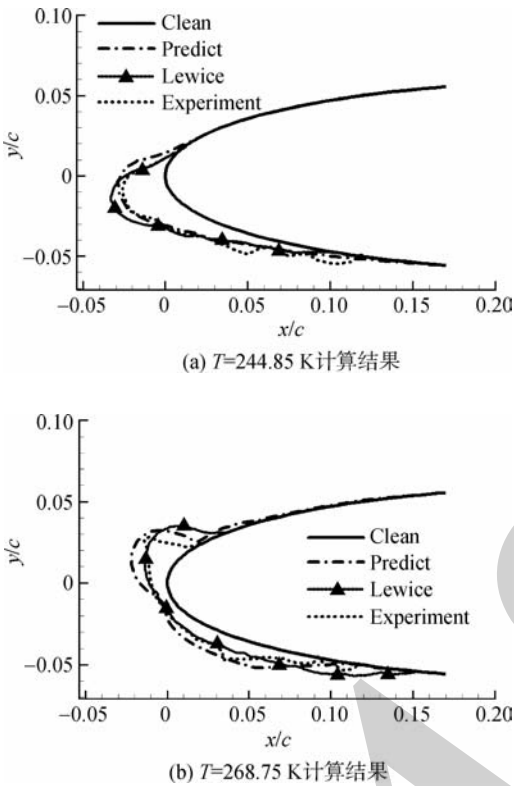


图 6 不同温度条件下结冰冰形结果
Fig. 6 Comparison of ice shape on different temperature conditions

3.2 SLD 变形和破碎影响分析

选取 NACA 0012 翼型, 结冰的计算条件如下所示: 弦长为 0.5334 m, 来流速度为 90 m/s, 攻角为 0° , 液态水含量 $C_{lw}=1.0\text{ g/m}^3$, 结冰时间 $t=360\text{ s}$, 结冰温度 $T=244.85\text{ K}$, 水滴平均容积直径 D_{mv} 分别取 160, 300, 490 μm 。

图 7、图 8 和图 9 分别比较了 3 种不同大小水滴在靠近翼型前缘过程中水滴阻力系数 C_d 、变形程度 γ 以及 We 的变化情况。可以看出在靠近过程中, 由于变形引起迎风面积变大导致水滴阻力系数出现明显的跃升, 同时 We 和变形程度都在不断增大, We 的增加说明作用于水滴的气动力变大, 由此造成水滴变形也越来越大, 可能加剧水滴破碎过程。同时, 相同位置处, 较大尺寸水滴会有更大的 We 和变形参数, 这说明水滴越大, 越容易受到气流作用影响而发生形变现象, 也直接导致越大尺寸水滴的破碎位置越靠前且越早发生

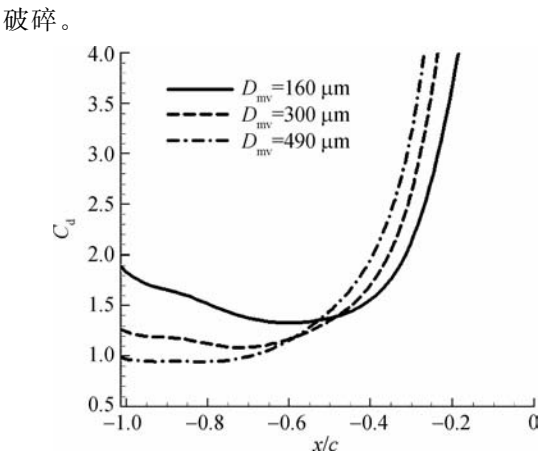


图 7 不同 MVD 水滴的阻力系数
Fig. 7 Drag coefficient of droplets at different MVDs

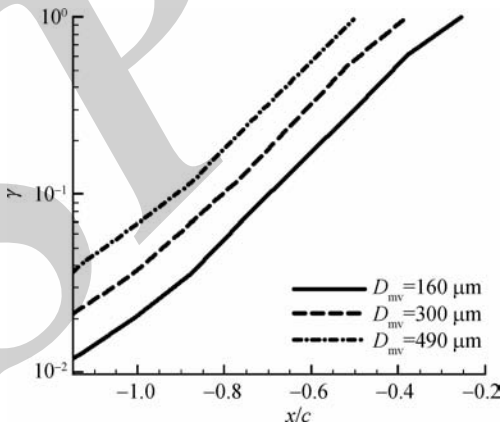


图 8 水滴变形程度比较
Fig. 8 Comparison of droplet deformation

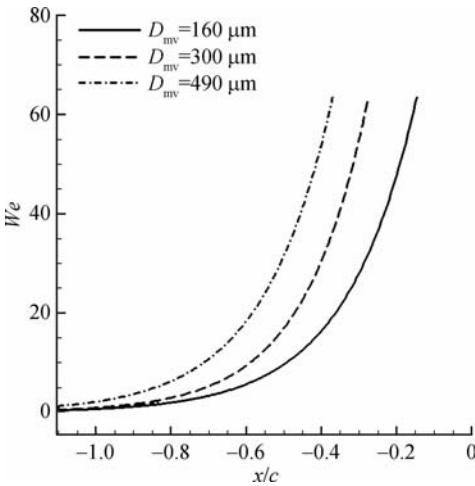


图 9 水滴 We 比较
Fig. 9 Comparison of droplet We

图 10 给出了 $D_{mv}=490\mu\text{m}$ 时, 水滴在撞击翼型前缘过程中 3 种不同情况下 (不考虑变形和破

碎、只考虑变形影响、考虑变形和破碎)水滴速度的变化,并将其与实验数据^[18]比较。可以看出对于没有任何变形破碎水滴由于其直径较大即惯性力较大而受到的空气动力影响较小,水滴速度变化不明显;在加入变形模型后,水滴受到的空气阻力相比于球形状态会变大,在运动过程速度会逐渐变小;此时再加入破碎模型,水滴会在气流影响下破碎成小水滴,更容易受到空气流动影响,导致水滴速度进一步降低。与实验数据比较可知,大水滴加入变形和破碎模型后,能够更好地模拟水滴在空气流动中的真实速度变化趋势和速度值。

为例,选取 case 1 为 $D_{mv}=30\text{ }\mu\text{m}$ 状态,case 2 为 $D_{mv}=300\text{ }\mu\text{m}$ 状态,通过水滴收集系数和结冰冰形对比,讨论 SLD 变形破碎对结冰过程的影响规律。

如图 12 所示,case 1 为小尺寸水滴状态,此时翼型表面的水滴的收集系数在有无变形破碎模型两种情况下几乎完全重合,没有区别。说明对于小尺寸水滴有无变形破碎对水滴收集系数以及翼型结冰的冰形几乎没有影响。由图 13 可以看出,case 2 条件为大尺寸水滴状态,在考虑变形破碎影响后,水滴收集系数的最大值减小了约 0.4,撞击极限减小约 1.1,说明对于大尺寸的水滴来说,变形破碎的影响主要是改变了水滴的撞击区域和范围。

3.3 SLD 变形破碎计算模型应用

由于 SLD 变形破碎,在 SLD 结冰过程需要综合考虑水滴动力学特性影响,本节选取 NACA 0012 翼型进行结冰过程影响的数值模拟,计算条

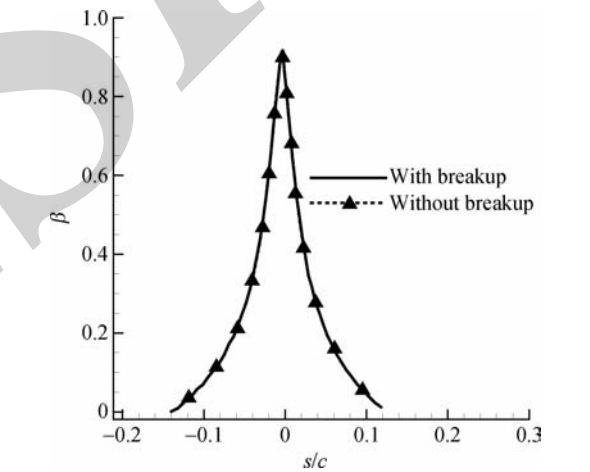


图 12 Case 1 水滴收集系数比较
Fig. 12 Comparison of droplet collection coefficient for case 1

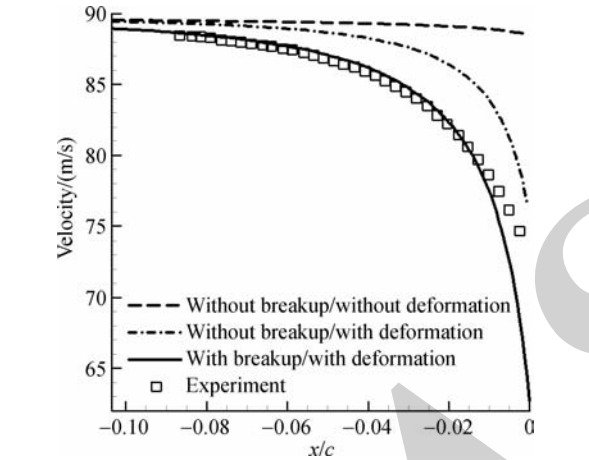


图 10 不同状态的水滴速度变化曲线
Fig. 10 Droplet velocity of droplet under different conditions

图 11 给出水滴流场对比图。实线为不加入破碎模型时的水滴流场,虚线为加入破碎模型后的水滴流场。水滴的破碎主要发生在靠近翼面的区域,同时越靠近上下撞击极限位置,水滴由于破碎而发生的流场偏转就越严重,从而越容易绕过翼面向下游飞去。这也解释了水滴变形破碎导致水滴收集系数变小的原因。

下面仍以本节的 NACA 0012 翼型的计算条件

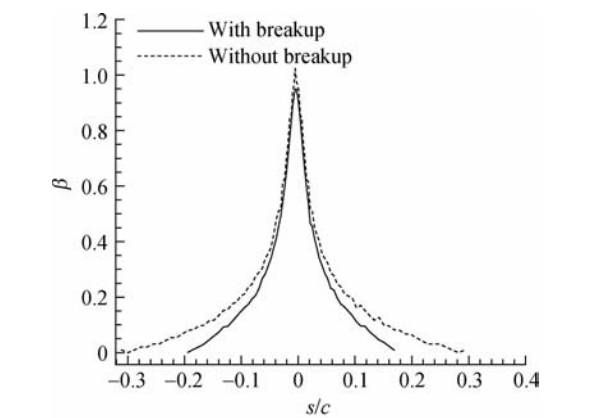


图 11 水滴流场对比图
Fig. 11 Comparison of droplet flow field

(a) 水滴收集系数

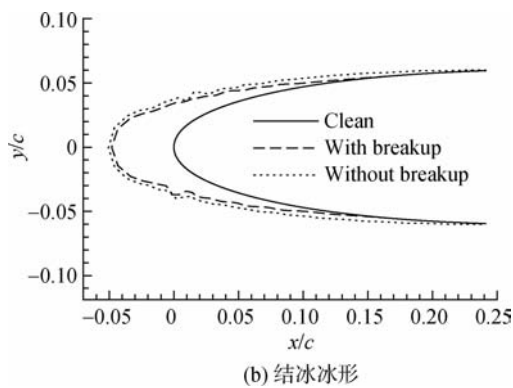


图 13 Case 2 计算结果比较

Fig. 13 Comparison of computed results for case 2

件如下所述:液态水含量 $C_{lw}=1.04\text{ g/m}^3$,来流速度为 77 m/s ,结冰时间 $t=336\text{ s}$,结冰温度 $T=253.95\text{ K}$, $D_{mv}=160\text{ }\mu\text{m}$ 。

将本文数值预测得到的冰生长过程及结冰冰形,与参考文献[3]中提供的实验数据和软件 LEWICE 计算结果进行对比,如图 14 所示。

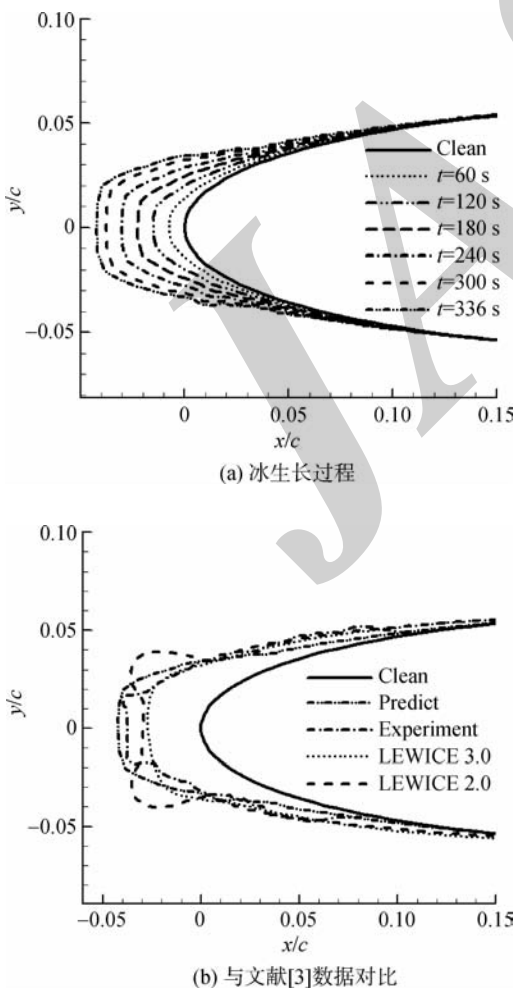


图 14 冰形计算结果比较

Fig. 14 Comparison of ice shape computed result

图 14 中给出了不同时刻的冰形,可以看出本文预测结果与实验数据具有较好的一致性,能够较准确地预测极限位置和冰形轮廓。说明本文计算方法对 SLD 结冰过程中变形破碎影响特性的模拟和冰形生成的预测具有较好准确性。

4 结 论

1) 对于常规小水滴结冰过程,通常不会考虑水滴的变形和破碎,有无变形破碎模型对水滴收集系数以及结冰冰形没有影响。

2) 计算结果显示,SLD 运动过程中变形和破碎的影响是比较明显的,动态阻力系数计算模型和 TAB 破碎计算模型能够较好模拟变形和破碎特性及其影响规律。

3) 对于 SLD 结冰过程,变形和破碎主要改变了水滴运动轨迹和表面撞击分布,使水滴的撞击极限变小,在加入相关计算模型后,可以较好预测冰形极限位置和轮廓趋势。

参考文献:

[1] LEE S,BRAGG M B. Experimental investigation of simulated large-droplet ice shapes on airfoil aerodynamics[J]. Journal of Aircraft,1999,36(5):844-850.

[2] DUNN T A,LOTH E,BRAGG M B. Computational investigation of simulated large-droplet ice shapes on airfoil aerodynamics[J]. Journal of Aircraft,1999,36(5):836-843.

[3] WRIGHT W B,POTAPCZUK M G. Semi-empirical modeling of SLD physics[R]. AIAA-2004-412,2004.

[4] POTAPCZUK M G. Aircraft icing research at NASA Glenn Research Center[J]. Journal of Aerospace Engineering,2013,26(2):260-276.

[5] REID T,BARUZZI G,OZCER I,et al. FENSAP-ICE simulation of icing on wind turbine blades;Part 1 performance degradation[R]. AIAA-2013-0750,2013.

[6] COLIN S,BIDWELL C S. Super cooled large droplet analysis of several geometries using LEWICE3D: version 3 [R]. AIAA-2010-7675,2010.

[7] LUXFORD G,HAMMOND D W,IVEY P. Modelling,imaging and measurement of distortion,drag and break-up of aircraft-icing droplets[R]. AIAA-2005-0071,2005.

[8] WIERZBA A. Deformation and breakup of liquid drops in a gas stream at nearly critical Weber numbers[J]. Experiments in Fluids,2001,9(1):59-64.

[9] VARGAS M. Droplet deformation prediction with the droplet deformation and breakup model[R]. AIAA-2012-3131,2012.

[10] 罗辉,孔维梁,刘洪. SLD 破碎效应对冰型的影响研究[J]. 力学季刊,2011,32(4):597-604.

LUO Hui,KONG Weiliang,LIU Hong. The effect of SLD

breakup and the influence on icing simulation[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(4): 597-604. (in Chinese)

[11] 吴佩佩, 朱春玲, 刘文平, 等. 过冷大水滴条件下机翼结冰数值仿真[J]. 计算机仿真, 2014, 31(9): 51-55.

WU Peipei, ZHU Chunling, LIU Wenping, et al. Numerical simulation of aircraft icing under supercooled large droplet conditions[J]. Computer Simulation, 2014, 31(9): 51-55. (in Chinese)

[12] 杜晨慧, 郁嘉, 林贵平, 等. 二维翼型大尺寸过冷水滴撞击特性及冰形分析[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4): 783-791.

DU Chenhui, YU Jia, LIN Guiping, et al. Analysis on supercooled large droplet impingement characteristics and ice shape of two-dimensional airfoils[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 783-791. (in Chinese)

[13] 鲁天. 大水滴多尺度分布翼型结冰过程数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.

LU Tian. Numerical simulation of iceaccretion at multi-scale distribution of large droplets over airfoil[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014. (in Chinese)

[14] VILLEDIEUL P, TRONTIN P, GUFFOND D, et al. SLD Lagrangian modeling and capability assessment in the frame of ONERA 3D icing suite[R]. AIAA-2012-3132, 2012.

[15] LIU A B, REITZ R D. Modeling the effects of drop drag and breakup on fuel sprays[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper 930072, 1993.

[16] PILCH M, ERDMAN C A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1987, 13(6): 741-757.

[17] DAI Z, FAETH G M. Temporal properties of secondary drop breakup in the multimode breakup regime[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(2): 217-236.

[18] IULIANO E, MINGIONE G, PETROSINO F, et al. Eulerian modeling of SLD physics towards more realistic aircraft icing simulation[R]. AIAA-2010-7676, 2010.

(编辑: 王碧琚)