

结冰风洞液态水含量测量方法研究

易 贤, 桂业伟, 肖春华, 黄志祥

中国空气动力研究与发展中心计算所空气动力学国家重点实验室, 四川绵阳 621000

摘要 液态水含量是影响结冰形状和结冰类型的重要结冰云雾参数。获知结冰风洞中的液态水含量, 是得到定量结冰风洞实验结果的基础。本文提出了一种采用数值计算和结冰风洞实验相结合的手段, 测量结冰风洞中液态水含量的方法。该方法首先采用拉格朗日法数值计算水滴运动轨迹, 得到物体表面水滴的总收集系数; 其次, 计算不同液态水含量所对应的结冰质量, 建立液态水含量与结冰质量的关系曲线; 在此基础上, 进行结冰风洞实验, 测量实验得到的结冰质量, 通过在液态水含量与结冰质量的关系曲线上进行插值, 进而得到实验液态水含量的大小。用本文提出的方法进行结冰风洞液态水含量测量, 只需一般的质量测量工具即可进行, 操作方便, 成本低廉, 避免了常规的液态水含量测量或标定需要专门设备的不足。采用 25 和 35 m/s 两种速度条件对 $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞的液态水含量进行了测量, 两种条件得到的结果一致, 相差不超过 0.01 g/m^3 , 说明本文提出的方法是合理的。研究显示, $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞在开启一个喷嘴时, 液态水含量值在 0.15 g/m^3 左右。

关键词 飞机结冰; 结冰风洞; 过冷水滴; 液态水含量; 总收集系数; 拉格朗日法

中图分类号 V211.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)21-0086-05

A Method of Liquid Water Content Measurement in Icing Wind Tunnel

YI Xian, GUI Yewei, XIAO Chunhua,
HUANG Zhixiang

State Key Laboratory of Aerodynamics, CAI of China
Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang
621000, Sichuan Province, China

Abstract Liquid Water Content (LWC) is an important parameter in the process of aircraft icing. Ice shape and type can be greatly affected by LWC. For a valid icing wind tunnel test it is necessary to obtain the value of LWC before test. The present paper proposes a method to measure LWC in an icing wind tunnel, which combines both numerical and experimental results. Firstly, droplet trajectories are computed with a Lagrangian method to obtain the total collection coefficient of water droplet. Secondly, ice mass is computed, and the curve relating LWC with ice mass is obtained. Lastly, the experimental results of ice mass are used to determine the value of LWC from the curve. It is a convenient and economical

method to measure LWC without the need of expensive and complex devices and with only an instrument for mass measurement. The value of LWC, in an icing wind tunnel with a $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ test section, is then obtained. The results from test speeds of 25 m/s and 35 m/s are found in agreement, with a difference of not more than 0.01 g/m^3 , which validates the method. The study shows that when one nozzle is opened, the LWC value in the $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ icing wind tunnel is about 0.15 g/m^3 .

Keywords aircraft icing; icing wind tunnel; super-cooled water droplet; liquid water content; total collection coefficient; Lagrangian method

0 引言

飞机在低于冰点的温度下飞行时, 如果遇到含有过冷水滴的云层, 云层中的水滴撞击在飞机表面上, 就会导致结冰。飞机结冰是飞行实践中广泛存在的一种现象, 也是造成飞行安全事故的主要隐患之一^[1]。结冰会改变飞机的绕流流场, 导致部件载荷分布发生变化, 从而破坏空气动力学性能, 影响飞机的操纵性和稳定性, 危害飞行安全, 轻者会使安全飞行范围减小, 重者会导致机毁人亡的严重事故。自飞机发明以来, 由于结冰而导致的空难时有发生, 飞机结冰及其防护问题也一直是航空领域重要的研究内容^[2-3]。结冰风洞是开展飞

收稿日期: 2009-09-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672174, 10772191)

作者简介: 易贤, 副研究员, 研究方向为低速空气动力学和飞机结冰的理论、模拟方法及应用, 电子信箱: yixian_2000@163.com

机结冰研究的重要设备,主要用于在试验模型上进行结冰试验。结冰风洞除了具备常规风洞的部件以外,还有两个重要的部件系统,一是冷却系统,可以将空气冷却到水的冻结温度以下,二是喷雾系统,喷雾系统一般安装于风洞的收缩段之前,可以把水滴喷射到气流中。通过这两套系统,可以在风洞内制造结冰气象条件,对结冰现象进行模拟^[4]。

液态水含量(Liquid Water Content, LWC)是指单位体积的空气中所含有的液态水的质量,在结冰研究中,其单位为 g/m^3 。LWC 是影响结冰形状和结冰类型的重要结冰云雾参数,获知结冰风洞中的 LWC,是得到定量结冰风洞实验结果的基础。对于结冰风洞中 LWC 的测量,有直接法和间接法两种方法。直接法是指采用专门的方法如前向散射粒子谱探测(FSSP)^[5-6]、光学阵列探测(OAP)^[7]等对 LWC 进行直接测量。直接法的特点是准确、快速,但是需要专门的测量系统,成本较高。间接法最常用的设备是冰刀(icing blade)^[8],将冰刀置于结冰风洞中进行实验,通过分析冰刀上结冰的质量,反算出 LWC。这种方法的不足之处是在进行反算时,认为水滴在冰刀上的总收集系数为 1,同时也未考虑结冰过程中液态水蒸发的影响,而实际的水滴总收集系数总是小于 1,另外由于冰刀很薄,在冰形比较均匀的时间段内结冰的质量很小,蒸发的质量不可忽略。本文提出了一种采用数值计算和结冰风洞实验相结合的手段测量结冰风洞中 LWC 的方法,这种方法基于间接法的思路,以圆柱作为实验模型,无需专门的设备,同时考虑了水滴的实际收集率和蒸发的影响。采用本文方法对 $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞的 LWC 进行了测量,得到了该风洞在开启一个喷嘴时的 LWC 大小。

1 结冰风洞 LWC 测量思路

1.1 水滴总收集系数的定义

结冰是由于过冷水滴碰撞在物面而导致的,结冰表面上水滴总收集系数是指实际撞击在物面上的液态水质量与物面可能的最大水收集量之比^[9]。在物体外形和空气绕流条件一定的情况下,水滴运动轨迹只和水滴直径有关。在水滴的所有运动轨迹中,物体上下表面最远撞击点所对应的轨迹为极限轨迹,极限轨迹分别与物体的上下表面相切,显然,位于极限轨迹之间的水滴,会与物面碰撞,而在极限轨迹范围之外的水滴,将绕过物体。记水滴总收集系数为 E_m ,对于直径为 L 的圆柱,如图 1,设远场中两条极限轨迹之间的距离为 Δy ,有

$$E_m = \Delta y / L \quad (1)$$

1.2 结冰风洞 LWC 测量思路

如上所述,位于极限轨迹之间的水滴,会与物面碰撞并结冰,设流动速度为 V ,则单位时间、单位展长物面上冰的质量 M_i 为

$$M_i = E_m \cdot LWC \cdot V \cdot L - M_e \quad (2)$$

其中, M_e 为单位时间物体表面蒸发的 LWC, 流场条件给定之后, M_e 可通过计算得到。由式(2)可知,在流场、物体外形和 E_m

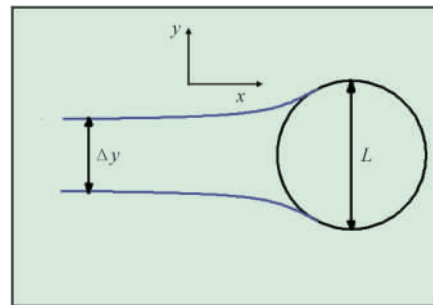


图 1 水滴总收集系数定义

Fig. 1 Definition of total collection coefficient

确定的条件下,结冰质量只和液态水含量有关。为此,本文提出采用数值计算和结冰风洞实验相结合的方法对结冰风洞内的 LWC 进行测量,该方法无需专门的 LWC 测量装置,只要常规的质量测量工具即可实现。其基本步骤为:①选取典型外形(本文选用圆柱)进行结冰风洞实验,测量一定速度和结冰时间下冰的质量;②采用与实验相同的流场和结冰条件,用数值模拟的手段计算不同液态水含量条件所对应的结冰质量,建立 LWC 与结冰质量的关系曲线 $LWC=LWC(M_i)$;③将实验测量的结冰质量在 $LWC=LWC(M_i)$ 曲线上进行插值,获得实验 LWC 的值。

2 水滴运动轨迹的数值计算方法

水滴的运动轨迹可以通过数值求解水滴运动方程得到,水滴运动方程的计算必须基于空气流场的计算结果,因此,要计算水滴运动轨迹,需要先计算空气流场,在得到空气流场分布的基础上,再求解水滴运动方程。

2.1 空气流场计算方法

空气流场计算的控制方程为低速黏流的时均 N-S 方程,其通用形式为

$$\frac{\partial(\rho_a \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{u}_a \phi - \Gamma_a \text{grad} \phi) = q_\phi \quad (3)$$

式中, ρ_a 为空气密度; $\mathbf{u}_a$ 为空气速度; ϕ 、 Γ_a 和 q_ϕ 分别为输运量、扩散系数和源项,它们取不同值,分别代表空气场的连续性方程、动量方程和湍动能方程等其他标量的输运方程,本文采用 Simple 方法求解式(3),其中各项的物理意义及具体表达式参见文献[10]。

2.2 水滴运动方程及其数值求解方法

本文采用拉格朗日法计算水滴运动轨迹,流场中水滴的运动受很多因素的影响,水滴运动方程是通过分析运动中的水滴所受到的力,根据牛顿第二运动定律建立的,水滴运动方程的基本形式为^[11]

$$M_d \frac{d^2 \mathbf{x}_d}{dt^2} = (\rho_d - \rho_a) V_d \mathbf{g} + \frac{1}{2} \rho_a A_d C_d |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_d| (\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_d) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{x}_d$ 为水滴位置, M_d 为水滴质量, V_d 为水滴体积, ρ_d 为水滴密度, $\mathbf{g}$ 为重力加速度, A_d 为水滴的迎风面积, C_d 为水滴阻力系数, $\mathbf{u}_d$ 表示水滴速度。

采用一阶 Euler 方法离散求解水滴运动方程。对于方程 (4), 对于物理空间 x 轴方向的方程, 由于在这个方向没有重力和浮力项, 可以写成

$$M_d a_x = \frac{1}{2} \rho_a A_d C_d |u_a - u_d| (u_a - u_d) \quad (5)$$

其中, a_x 为 x 方向的水滴加速度。记水滴直径为 D , 将水滴质量和迎风面积表达式

$$M_d = V_d \rho_d = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho_d \quad (6)$$

$$A_d = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (7)$$

代入式 (5), 可得

$$a_x = \left(\frac{C_d Re}{24} \right) \frac{1}{K_a} (u_a - u_d) \quad (8)$$

其中, K_a 为惯性因子, Re 为相对雷诺数。令空气黏性系数为 μ_a , 有

$$K_a = \frac{\rho_d D}{18 \mu_a} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho_a |u_a - u_d| D}{\mu_a} \quad (10)$$

对于在物理空间 y 轴方向的方程, 需要考虑重力和浮力。使用与 x 轴方向类似方法, 可以推导出 y 方向水滴加速度为

$$a_y = \left(\frac{C_d Re}{24} \right) \frac{1}{K_a} (v_a - v_d) + \left(\frac{\rho_a - \rho_d}{\rho_d} \right) g \quad (11)$$

得到水滴的加速度之后, 设在 t_n 时刻水滴的速度为 (u_d^n, v_d^n) , 所处位置为 (x_d^n, y_d^n) , 则在 t_{n+1} 时刻水滴速度和位置为

$$u_d^{n+1} = u_d^n + a_x(t_{n+1} - t_n) \quad (12)$$

$$v_d^{n+1} = v_d^n + a_y(t_{n+1} - t_n) \quad (13)$$

$$x_d^{n+1} = x_d^n + u_d^n(t_{n+1} - t_n) \quad (14)$$

$$y_d^{n+1} = y_d^n + v_d^n(t_{n+1} - t_n) \quad (15)$$

开始进行水滴轨迹计算时, 首先给定水滴的初始位置, 然后计算 $t_{n+1} - t_n$ 时间步长后水滴的新位置, 每计算一步, 要进行一次水滴是否与物面相碰撞的判断, 如此推进计算, 直到水滴与物面相碰撞或者水滴运动到界定的区域以外。

2.3 极限轨迹的确定

本文采用迭代方法寻找极限轨迹, 基本步骤如下。

1) 首先找到两条轨迹, 这两条轨迹一条从物体上表面绕过, 其起点坐标在纵向的位置为 y_{su} , 一条从物体下表面绕过, 其起点的纵坐标为 y_{sd} 。

2) 判断起点坐标纵向位置为 $y_m = (y_{su} + y_{sd})/2$ 的水滴是否与物面相碰撞, 如果碰撞, 则上极限轨迹的起始位置位于 y_m 和 y_{su} 之间, 下极限轨迹的起始位置位于 y_m 和 y_{sd} 之间。

3) 判断起点在 $y_u = (y_m + y_{su})/2$ 的轨迹是否与物面相碰撞, 若碰撞, 则令 $y_m = y_u$, 若绕过物体, 则令 $y_{su} = y_u$ 。

4) 重复步骤 3), 直到 $y_{su} - y_u$ 的值小于一个小量, 则可以得到上极限轨迹, 下极限轨迹可以用类似的方法得到。

5) 如果步骤 2) 中起点坐标纵向位置为 $y_m = (y_{su} + y_{sd})/2$ 的水滴没有与物面相碰撞, 则根据其是从上还是从下绕过物体的情况, 利用步骤 3) 和 4) 所叙述的方法, 找出一条新的与物面相

交的轨迹, 令其起点纵向坐标为 y_m , 再进行步骤 3) 和 4) 即可。

2.4 蒸发质量的计算

单位时间的蒸发质量主要受到结冰表面和边界层外相对湿度和水蒸汽分压的影响, 本文采用下式计算蒸发质量^[12]

$$M_e = \frac{0.7}{c_p} h_c A \left[\frac{p_{v,s} - H_r p_{v,e}}{P_e} \right] \quad (16)$$

式 (16) 中, c_p 为空气定压比热, h_c 为对流换热系数, A 为结冰表面的面积, H_r 为相对湿度, P_e 为边界层外缘的压力。 $p_{v,s}$ 、 $p_{v,e}$ 分别为结冰表面和边界层外缘对应的饱和水蒸气压, 可根据温度查饱和水蒸汽参数表得到。

3 实验设备、模型及测量方法

3.1 实验设备及模型

实验是在中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所的结冰风洞内进行的, 如图 2。该风洞包括两个实验段, 其中主实验段的宽×高×长为 0.3 m×0.2 m×0.65 m, 风洞的最大风速为 60 m/s, 制冷设备开启之后, 最低温度可达到 -25℃。喷雾装置位于收缩段之前, 共 24 个喷嘴。



图 2 中国气动中心的 0.3 m×0.2 m 结冰风洞图

Fig. 2 Icing wind tunnel in the China Aerodynamics Research and Development Center

实验模型为铝质圆柱, 如图 3, 圆柱直径为 2 cm, 长 20 cm。



图 3 实验模型

Fig. 3 Test model

3.2 结冰质量的测量

采用如下方法测量结冰质量: 当冰风洞内模型上的结冰达到预定时间 Δt 之后, 将带冰的模型取出, 迅速用刀片在模型中部截取外形比较均匀的一段冰, 测量该段冰的展长 b 和质量 M_i , 有

$$M_i = \frac{M_1}{b \Delta t} \quad (17)$$

4 0.3 m×0.2 m 结冰风洞液态水含量测量结果和分析

选取直径为 2 cm 的圆柱作为实验和计算的外形。首先用数值方法计算了圆柱上的总收集系数。计算条件为:空气温度-10℃,压强 101 300 Pa,水滴直径 19 μm,速度 35 m/s,计算采用 O 型网格,如图 4,网格数量为 96×64。

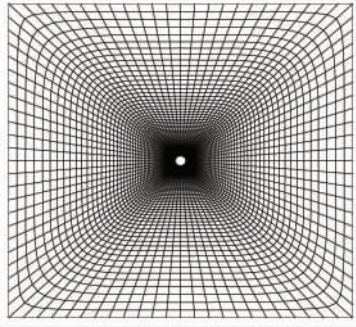


图 4 计算网格示意图
Fig. 4 Mesh for computation

图 5 给出了空气流线和水滴的极限运动轨迹。可以看出,在远离物体时,水滴沿直线前进,随着水滴逐渐靠近物体,在气动力作用下,水滴运动的轨迹开始随空气流线偏折,计算显示,35 m/s 时,总收集系数为 0.567。

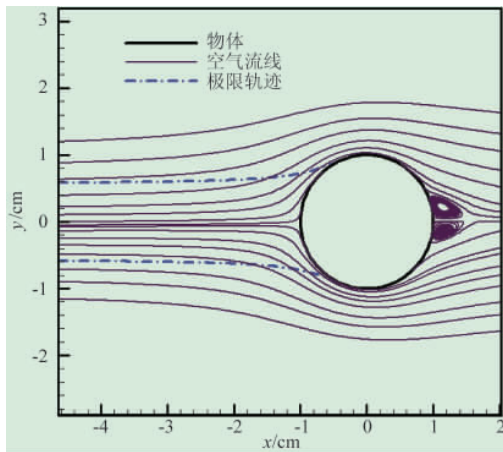


图 5 空气流线和极限轨迹
Fig. 5 Stream lines and limit trajectories

以 0.1 g/m³ 为一个间隔,采用数值方法计算了 LWC 从 0.1~1.0 g/m³ 时的结冰质量,图 6 给出了冰的质量随 LWC 变化情况,可见,由于蒸发质量占物面液态水收集量的比例较小,冰的质量随 LWC 线性改变。

将实验模型安装于结冰风洞的实验段,开启一个离风洞截面中心位置最近的喷嘴,采用与计算相同的温度和水滴直径进行结冰实验。图 7 给出了速度为 35 m/s、结冰时间为

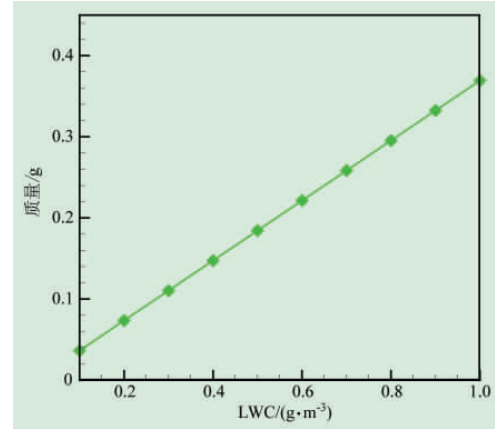


图 6 不同液态水含量下的结冰质量
Fig. 6 Mass of ice for different LWC

200 s 时圆柱结冰之后的照片,可以看到,沿圆柱的展向,冰的外形分布比较一致,说明流场中 LWC 分布比较均匀。

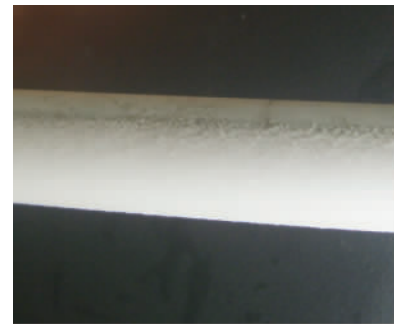


图 7 200 s 后圆柱结冰外形 (v=35 m/s)
Fig. 7 Ice on body after 200 seconds (v=35 m/s)

按以上实验条件重复进行了 4 组实验,测量了圆柱中部展长为 3 cm 的冰体的质量 M_i 。表 1 给出了每组实验测量的 M_i 值及相应的 M_1 值,表中也给出了对每组 M_i 通过在图 6 中插值所得到的 LWC 值,共进行 4 组实验,LWC 的最大值为 0.164 g/m³,最小为 0.145 g/m³,平均值为 0.154 g/m³。

为了验证以上 LWC 测量结果,将速度改为 25 m/s 进行了校核。由于风洞中的液态水含量大小不变,因而采用不同速度所得到的结果应该一致。

表 1 速度为 35 m/s 时的结果
Table 1 Results for the velocity of 35 m/s

序号	M_1/g	M_i/g	$LWC/(g \cdot m^{-3})$
1	0.36	0.060	0.164
2	0.32	0.053	0.145
3	0.33	0.055	0.151
4	0.34	0.057	0.156

图 8 显示的是水滴极限运动轨迹,与速度为 35 m/s 时的极限运动轨迹对比可知,速度越大,能够与物面碰撞的水滴区域也越大,相应的总收集系数也越大,计算显示,速度为 25 m/s 时,总收集系数为 0.504,小于 35 m/s 时的总收集系数。

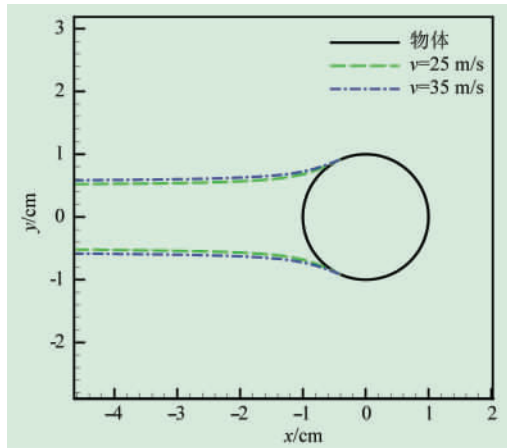


图 8 不同速度时的极限轨迹

Fig. 8 Limit trajectories for different velocities

图 9 给出了速度为 25 m/s 时, 冰的质量随 LWC 变化关系曲线, 图中同时也绘制了速度为 35 m/s 时的曲线, 该图显示, 速度增加使得相同 LWC 所对应的冰的质量增加。

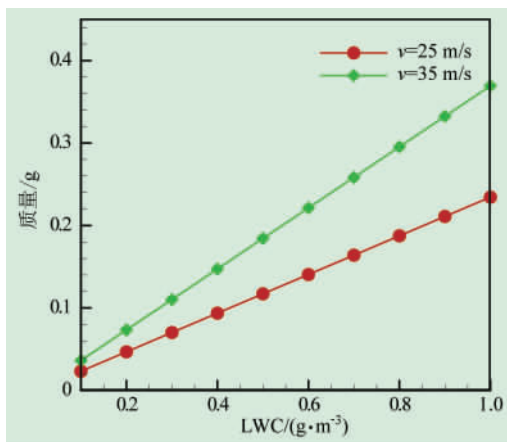


图 9 不同速度时的结冰质量

Fig. 9 Mass of ice for different velocities

以 25 m/s 的速度进行结冰风洞实验, 结冰时间为 500 s, 共进行 3 组实验, 相应的 LWC 测量结果见表 2。可以看出, LWC 最大值为 0.163 g/m³, 最小值为 0.15 g/m³, 平均值为 0.157 g/m³, 平均值与速度为 35 m/s 时的测量结果一致, 相差不超过 0.01 g/m³, 说明本文提出的方法是合理的。

表 2 速度为 25 m/s 时的实验结果
Table 2 Results for the velocity of 25 m/s

序号	M_t/g	M_i/g	$LWC/(g \cdot m^{-3})$
1	0.55	0.037	0.158
2	0.52	0.035	0.150
3	0.57	0.038	0.163

通过以上研究可以认为, 0.3 m×0.2 m 结冰风洞在开启一个喷嘴时, LWC 值在 0.15 g/m³ 左右。

5 结论

提出了一种采用数值计算和结冰风洞实验相结合的手段测量结冰风洞中 LWC 的方法, 采用该方法对 0.3 m×0.2 m 结冰风洞的 LWC 进行了测量, 得到结论如下。

1) 采用本文提出的方法进行结冰风洞 LWC 测量, 考虑了结冰过程中液态水的蒸发和水滴的实际收集率, 并且只需要一般的质量测量工具即可进行, 操作方便, 成本低廉, 克服了常规 LWC 测量方法的不足。

2) 采用 25 m/s 和 35 m/s 两种速度条件对 0.3 m×0.2 m 结冰风洞的 LWC 进行了测量, 两种条件得到的结果相差不超过 0.01 g/m³, 说明本文提出的方法是合理的, 研究表明, 该结冰风洞在开启一个喷嘴时, LWC 值在 0.15 g/m³ 左右。

3) 本文只测量了开启一个喷嘴时的 LWC, 且喷嘴位于风洞截面的中心位置, 如果开启了多个喷嘴, 由于受喷嘴位置和收缩段粒子沉降的影响, 风洞内 LWC 的实际值还需重新测量, 不能简单用一个喷嘴的结果乘以喷嘴数量的值来代替。

参考文献 (References)

- [1] Frank T L, Abdollah K. Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37(8): 669–767.
- [2] Potapczuk M G. A review of NASA lewis' development plans for computational simulation of aircraft icing[R]. AIAA-99-0243, 1999.
- [3] Bragg M B, Broeren A P, Blumenthal L A. Iced-airfoil aerodynamics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, 41(5): 323–362.
- [4] Potapczuk M G, Reinmann J J. Icing simulation: A survey of computer models and experimental facilities[R]. AGARD CP-496, 1991.
- [5] 苏正军, 刘卫国, 王广河, 等. 青海一次春季透雨降水过程的云物理结构分析[J]. *应用气象学报*, 2003, 22(6): 584–589.
Su Zhengjun, Liu Weiguo, Wang Guanghe, et al. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 22(6): 584–589.
- [6] Hobbs P V, Radke L R. The nature of winter clouds and precipitation in Cascade Mountains and their modification by artificial seeding, Part II: Techniques for the physical evaluation of seeding [J]. *J Appl Meteor*, 1975, 14(5): 805–818.
- [7] 张佃国, 郭学良, 付丹红, 等. 2003 年 8—9 月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究[J]. *大气科学*, 2007, 31(4): 596–610.
Zhang Dianguo, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(4): 596–610.
- [8] Esposito B M, Ragni A, Ferrigno F, et al. Cloud calibration update of the CIRA icing wind tunnel[R]. SAE 2003-01-2312, 2003.
- [9] 裘雯纲, 韩凤华. 飞机防冰系统[M]. 北京: 航空专业教材编审组, 1985.
Qiu Xiegang, Han Fenghua. *Aircraft anti-icing system* [M]. Beijing: Compilation and Examination Group of Aero Specialized Teaching Materials, 1985.
- [10] Zhu G L, Kronast M. The calculation of ground effect on a car flow field using two dimensional navier-stokes equations [J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 1993, 11(1): 35–40.
- [11] Langmuir I, Blodgett K. A mathematical investigation of water droplet trajectories[R]. Army Air Force Technical Report No. 5418, 1946.
- [12] 易贤. 飞机结冰的数值计算与积冰试验相似准则研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2007.
Yi Xian. Numerical computation of aircraft icing and study on icing test sealing law[D]. Mianyang China Aerodynamics Research and Development Center, 2007.

(责任编辑 王芷)