

旋转整流罩积冰过程中水膜流动和脱离的数值研究

菅锦锦¹, 吉洪湖¹, 曹广州², 胡娅萍¹, 陈宁立¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 无人机研究院, 南京 210016)

摘 要: 为了更准确地模拟旋转整流罩积冰过程,在现有三维积冰与冰层表面薄水膜流动耦合模型基础上,基于功平衡分析的方法引入了旋转部件表面水膜脱离模型,并发展了相应的计算方法,给出了水膜脱离的判定依据:当气流曳力做的功和由于离心力使水膜增加的势能之和大于黏附功时整流罩表面的水膜会发生脱离。对旋转整流罩积冰进行数值模拟,计算结果与实验结果吻合得较好,验证了该模型的合理性和计算方法的可行性。之后分析了转速和来流速度对整流罩表面水膜脱离和积冰的影响,结果表明:转速和来流速度越大,水膜发生脱离的比例越大。在研究范围内,转速为3000 r/min和6000 r/min时,因水膜脱离导致积冰总量分别减少13.4%和15.8%;来流速度为40、50 m/s和60 m/s时,因水膜脱离导致积冰总量分别减少为12.2%、13.4%、14.2%。

关 键 词: 旋转整流罩; 水膜流动; 水膜脱离; 离心力; 气流曳力; 积冰

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Numerical study on water film flow and shedding in ice accretion of rotating spinner

JIAN Jinjin¹, JI Honghu¹, CAO Guangzhou²,

HU Yaping¹, CHEN Ningli¹

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Research Institute of Unmanned Aircraft,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to simulate ice accretion accurately, a water film shedding model on rotating surface was introduced with the method of work balance analysis based on the current three-dimensional coupled model of ice accretion and thin water film on ice surface. A computational methodology and a criteria of water film shedding were then presented. Water film shedding occurred when the work done by air drag force plus potential energy caused by centrifugal force was greater than adhesive work. When the method to numerical simulation of rotating spinner, the simulation results agreed well with experimental results, indicating the current model was reasonable and computational method was feasible. The effect of rotating speed and air speed on water film shedding and ice shape was also simulated. The results

收稿日期: 2018-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51506084); 江苏省自然科学基金(BK20150740)

作者简介: 菅锦锦(1986—),女,硕士生,主要研究方向为航空发动机传热传质。

引用格式: 菅锦锦,吉洪湖,曹广州,等. 旋转整流罩积冰过程中水膜流动和脱离的数值研究[J]. 航空动力学报,2018,33(11):2725-2736. JIAN Jinjin,JI Honghu,CAO Guangzhou,et al. Numerical study on water film flow and shedding in ice accretion of rotating spinner[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(11):2725-2736.

show that the proportion of water film shedding increased with larger rotating speed and air speed. The ice mass decreased 13.4% and 15.8% respectively due to water film shedding, when rotating speed was 3 000 r/min and 6 000 r/min. The ice mass decreased 12.2%, 13.4% and 14.2% respectively due to water film shedding, when air speed was 40 m/s, 50 m/s and 60 m/s.

Key words: rotating spinner; water film flow; water film shedding; centrifugal force; air drag force; ice accretion

当飞机穿过含有过冷水滴的云层时,发动机进口迎风部件会发生积冰现象。其中旋转整流罩表面积冰会导致空气流通面积减小,进气量减小,从而使发动机推力减小^[1-2]。因此对旋转整流罩表面的积冰现象进行研究对发动机的设计和应用有重要的意义。

国外对于旋转部件的积冰研究展开得较早。Shaw等^[3]对直升机旋翼进行了冰风洞实验,对旋翼的积冰特性和气动性能进行了分析。Britton^[4]利用 LEWICE 冰风洞对 1/6 缩比的直升机旋翼积冰进行实验,并将实验结果与 LEWICE 模拟结果进行了对比。Baruzzi等^[5]用 FENSAP-ICE 软件对飞机螺旋桨进行积冰模拟,结果可用来评估飞机螺旋桨和旋翼的安全。Belz等^[6]利用视频图像系统观察了旋转整流罩表面的冰生长和脱落现象,给出了不同时刻的冰层图片。俄罗斯中央航空研究所 McVey等^[7]在典型积冰条件下对旋转整流罩进行了实验,发现表面会产生“羽毛”状或“针”状冰。Li等^[8]对三种形状的整流罩进行冰风洞实验,发现随着转速的增加,椭圆形的整流罩积冰厚度增长更明显。

国内近些年对旋转部件的积冰也开始有了研究。赵秋月^[9]采用拉格朗日法模拟了旋转整流罩表面的水滴撞击特性,结果显示随着转速和锥角的增大,水收集系数降低且撞击区域变小。胡娅萍^[10]对旋转整流罩表面的积冰进行了二维数值模拟,研究了温度、速度、液态水含量等参数对积冰的影响。王健、胡娅萍等^[11-14]采用冰风洞对缩比模型的旋转整流罩积冰和冰脱落进行了实验研究,得到了旋转整流罩表面的积冰生长特性,并对比分析了4种锥角对整流罩积冰的影响。Dong等^[15]对旋转整流罩积冰进行了数值模拟,分析了转速、来流速度、回流水对积冰的影响,但没有考虑水膜脱离。Mu等^[16]对旋转整流罩积冰进行了积冰模拟,用能量分析的方法分析了水膜脱离的机理,但只考虑了离心力和表面张力对水膜的影

响,未考虑气流曳力的影响。张丽芬、李静等^[17-18]采用欧拉-拉格朗日法对旋转整流罩积冰进行了数值模拟和实验验证,两者结果吻合得较好。Chen等^[19]通过求解非稳态的雷诺时均 N-S 方程,对旋翼建立了三维积冰数值模拟,考虑了离心力、水膜流动及方位角的变化对积冰的影响。

综上,国外目前对旋转部件的积冰研究主要针对旋翼等飞机部件展开,对整流罩的研究还比较少。国内对于整流罩的积冰研究近几年有所增加,但很少有考虑到积冰过程中水膜脱离的问题。

曹广州^[20]对三维冰层表面薄水膜在气流曳力和重力作用下流动进行了研究,发展了水膜流动与积冰相变耦合的三维积冰数值模拟;并对角状冰附近由于气流回流造成的水膜堆积进行了简单的处理,认为水膜厚度超过 10^{-4} m 时就会被气流吹走。但该处理方法与实际物理过程偏差较大,而且只适用于静止翼型的角状冰附近的积冰计算。

陈宁立^[21]在曹广州静止部件三维积冰与薄水膜耦合的基础上,发展了旋转部件表面薄水膜流动与积冰相变耦合的数学模型,考虑了离心力对水膜流动的影响。对旋翼进行了数值模拟,验证了该模型的准确性。还分别研究了来流速度、环境温度、转速等参数对于旋转部件积冰的影响。

本文在文献[21]的旋转部件三维积冰薄水膜流动模型的基础上,基于功平衡分析的方法对旋转整流罩表面的水膜流动进行分析,建立水膜在气流曳力和离心力的作用下发生脱离的数学模型和计算方法。对旋转整流罩进行数值模拟,将计算结果与实验结果进行对比,并分析转速、来流速度对旋转整流罩表面的水膜脱离和积冰过程造成的影响。

1 积冰过程中水膜流动与脱离的数学模型与计算方法

1.1 基本假设

根据三维积冰过程中冰层表面未冻结水膜流动及脱离的特点,提出以下假设:

1) 未冻结的液态水以连续水膜的形式在冰层表面流动。

2) 冰表面的水膜厚度很小,量级在 10^{-4} m,忽略水膜的曲率,气体、液体间的表面张力系数取常数。

3) 冰和水膜作常物性处理,水膜冻结成冰时,物性参数瞬间转换为冰的物性参数。

4) 积冰发生在冰-水交界面上,此界面的温度恒为相变温度 273.15 K,暂不考虑水膜蒸发、升华。

5) 暂不考虑水膜脱离对水膜主体造成的动量、能量的变化。

1.2 三维积冰与水膜流动相耦合的数学模型

由于明冰积冰时表面覆有一层薄水膜,因此明冰积冰微元控制体可分为冰层、水膜、空气-过冷水滴两相流三层。如图 1 所示,控制体底部是冰层,厚度为 H_i ;冰层之上是水膜,厚度为 H_w ;水膜主要在气流曳力 τ_a 的作用下在冰层表面流动,其中 m_{imp} 、 m_{ice} 、 m_{in} 、 m_{out} 分别为控制体单位面积的撞击率、积冰率、流入率、流出率,为控制体内的质量守恒; Q_{imp} 、 Q_{ice} 、 Q_c 分别为水滴撞击带来的能量、积冰释放的热量、对流换热带走的热量,为控制体内的能量守恒。

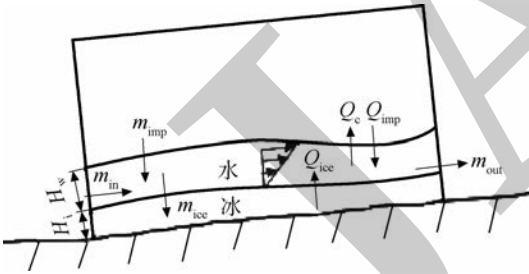


图 1 微元控制体示意图

Fig. 1 Sketch of typical control volume

本文是基于文献[21]的旋转部件三维积冰薄水膜流动模型进一步发展的。根据量纲分析法简化 N-S 方程,建立旋转部件表面薄水膜流动和积冰相变耦合的控制方程,分别对控制体进行质量、动量、能量分析。

1) 水膜流动的连续方程

积冰表面水膜流动过程中,上表面有过冷水滴的撞击加入,下表面有一部分水发生结冰,将此两项处理为源项,得到水膜流动连续方程为

$$\frac{\partial H_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^{H_w} u dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_0^{H_w} v dz \right) = \frac{m_{\text{imp}}}{\rho_w} - \frac{\rho_i}{\rho_w} \cdot \frac{\partial H_i}{\partial t} \quad (1)$$

其中, u 、 v 分别为水膜在 x 、 y 方向的流动速度, ρ_w 、 ρ_i 分别为水和冰的密度。

2) 水膜流动的动量方程^[21]

旋转部件表面的水膜主要在气流曳力的驱动下在冰层表面流动,同时受到离心力的作用,量纲分析法简化得到水膜流动的动量方程为

$$-\frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + |\omega|^2 r_x = 0 \quad (2)$$

$$-\frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + |\omega|^2 r_y = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + |\omega|^2 r_z = 0 \quad (4)$$

边界条件

$$u|_{z=0} = 0 \quad (5)$$

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} \bigg|_{z=H_w} = \tau_a \quad (6)$$

$$p|_{z=H_w} = p_a \quad (7)$$

其中 ν 为水的运动黏度,本文取值为 1.78×10^{-6} m^2/s ; τ_a 、 p_a 分别为水膜表面的气流曳力、空气压力。

3) 水膜流动的能量方程

飞机迎风面上的水膜厚度非常薄,流动速度也非常小,每个积冰时间步长又很小,因此在积冰过程中,可以将水膜流动过程视为稳态过程,量纲分析法简化 N-S 方程,得到水膜流动能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial T_w}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (8)$$

其中 T_w 是水膜的温度。

冰-水交界面处的温度为水的冰点温度,水-气交界面处既有过冷水滴在其撞击冰层表面后的动能向热能的转换,又有水滴由于温度变化释放的热量。因此水膜在冰-水界面和水-气界面的边界条件分别为

$$T_w|_{z=0} = T_f \quad (9)$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial z} \bigg|_{z=H_w} = h[T_w|_{z=H_w} - T_a] - \frac{1}{2} m_{\text{imp}} V_{\infty}^2 + m_{\text{imp}} c_{pw} [T_w|_{z=H_w} - T_{\infty}] \quad (10)$$

式中 T_f 是结冰相变温度; h 为表面传热系数; λ_w 、 c_{pw} 分别为水的导热系数和比定压热容,分别取值为 $0.551 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $4212 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_a 、 T_{∞} 分别为空气温度和来流温度; V_{∞} 为来流速度。

4) 冰层的能量方程

与水膜同样的分析方法,得到冰层中的能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T_i}{\partial z} \right) = 0 \quad (11)$$

边界条件为

$$T_i|_{z=0} = T_f \tag{12}$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \Big|_{z=-H_i} = 0 \tag{13}$$

其中 T_i 是冰层的温度, λ_i 为冰的导热系数, 本文取值为 $2.18 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

5) 冰层的生长速度方程

冰层生长速度由 Stefan 条件决定, 由于相变产生的潜热分别从水膜和冰层导出, 可以得到冰层的生长速度方程为

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho_i L_f} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} - \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial z} \right) \tag{14}$$

其中 L_f 为水的凝固潜热, 本文取值为 $334\,400 \text{ J/kg}$ 。

1.3 旋转部件积冰表面的水膜脱离模型

静止部件积冰表面的水膜受气流曳力的作用, 可能引起水膜“吹离”; 旋转部件积冰表面的水膜同时还受到离心力的作用, 离心力的作用会使水膜更容易从冰层表面“甩脱”, 由于旋转部件同时受气流曳力和离心力的作用, 本文将旋转部件的水膜脱离主体的现象称为水膜“脱离”。

1.3.1 水膜脱离的功平衡分析

水膜在旋转部件冰层表面受气流曳力、离心力和表面张力的同时作用, 表面张力使水膜黏附在冰层表面, 即阻止水膜从表面脱离, 而气流曳力、离心力则可能使水膜脱离冰层表面。

基于一个接触角为的水滴, 其在壁面的受力情况如图 2 所示。由于重力与离心力方向相反, 因此两者的比值对于判断水膜的流动是十分重要的。典型民用涡扇发动机的旋转整流罩的底部直径尺寸一般为 400 mm , 积冰可能发生时的整流罩的转速约为 3500 r/min 。而本文的算例采用的旋转整流罩的底部直径尺寸为 300 mm , 转速最小取为 1400 r/min , 因此

$$\frac{G}{F_{ce}} = \frac{mg}{m\omega^2 r} = \frac{g}{\omega^2 r} \approx 1.5 \times 10^{-3} \tag{15}$$

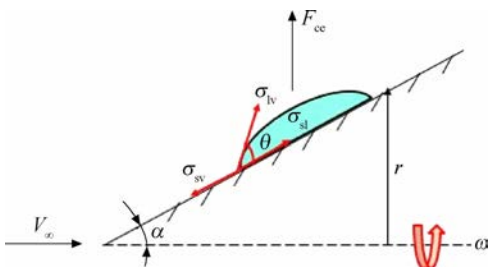


图 2 壁面上的水滴受力示意图

Fig. 2 Force analysis of water droplet on the wall

可见重力相对于离心力很小, 可以忽略不计, 因此在本文的水膜脱离模型中, 忽略重力的影响。

1) 黏附功

在气-液-固模型中, 水滴脱离交界面需要额外的能量, 该能量为黏附功^[16]

$$dW_\sigma = (\sigma_{lv} + \sigma_{sv} - \sigma_{sl}) \cdot ds \tag{16}$$

式中 σ_{lv} 、 σ_{sv} 、 σ_{sl} 分别为气-液、固-气、固-液间的表面张力系数。

由经典的 YOUNG 方程^[22]

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{sv} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lv}} \tag{17}$$

将其代入式(16)中

$$dW_\sigma = \sigma_{lv} (1 + \cos \theta) \cdot ds \tag{18}$$

式中 σ_{lv} 取值为 $75.64 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 。

对于水膜, 由于它是完全润湿的, 接触角 θ 为 0° , 所以式(18)的黏附功为

$$dW_\sigma = 2\sigma_{lv} \cdot ds \tag{19}$$

2) 气流曳力做的功

气流曳力对水滴做的功为

$$dW_a = \rho_a V_a^2 H \cdot ds \tag{20}$$

式中 ρ_a 为空气密度, V_a 为当地空气速度, H 为该水滴的高度。

对于水膜, 式(20)中 H 要转化为水膜厚度 H_w , 即

$$dW_a = \rho_a V_a^2 H_w \cdot ds \tag{21}$$

3) 由于受到离心力增加的潜能

旋转部件表面的水滴具有相同的角速度, 由于受到离心力而增加的潜能为

$$dW_{ce} = \int_0^r m\omega^2 r \cdot dr = \frac{1}{2} \rho_w \omega^2 r^2 H \cdot ds \tag{22}$$

对于水膜, 式(22)中 H 要转化为水膜厚度 H_w , 即

$$dW_{ce} = \frac{1}{2} \rho_w \omega^2 r^2 H_w \cdot ds \tag{23}$$

1.3.2 水膜脱离的判定依据

韦伯数 We 是衡量冰层表面水膜动力学特性的无量纲参数, 其表达式如下:

$$We_1 = \frac{\rho U^2 L}{\sigma} \tag{24}$$

式中 ρ 为流体密度, U 为当地气流速度, L 为特征尺寸。当气流曳力做的功和由于受到离心力增加的潜能之和大于黏附功时, 水膜会发生脱离, 即

$$\rho_a V_a^2 H_w \cdot ds + \frac{1}{2} \rho_w \omega^2 r^2 \cdot H_w \cdot ds > 2\sigma_{lv} \cdot ds \tag{25}$$

式(25)变形得

$$\frac{\rho_a V_a^2 H_w}{\sigma_{lv}} + \frac{\rho_w (\omega r)^2 \left(\frac{1}{2} H_w \right)}{\sigma_{lv}} > 2 \quad (26)$$

其中令

$$We_a = \frac{\rho_a V_a^2 H_w}{\sigma_{lv}} \quad (27)$$

$$We_{cc} = \frac{\rho_w (\omega r)^2 \left(\frac{1}{2} H_w \right)}{\sigma_{lv}} \quad (28)$$

于是,水膜脱离的判据变为

$$We_a + We_{cc} > 2 \quad (29)$$

由式(25)得到临界水膜厚度

$$H_{w,cr} = \frac{2\sigma_{lv}}{\rho_a V_a^2 + \frac{1}{2}\rho_w \omega^2 r^2} \quad (30)$$

当水膜堆积高度大于临界水膜厚度的时候,超出部分将会脱离,即

当 $H_w > H_{w,cr}$ 时

$$H_w = H_{w,cr} \quad (31)$$

以上分析均基于旋转部件。对于静止部件,由于只受到气流曳力和表面张力的作用,因此以上公式中 ω 和 We_{cc} 均为 0。这样静止部件发生吹离主要取决于水膜厚度 H_w 和当地气流速度 V_a ,因此静止机翼冰层表面的水膜吹离一般发生在角状冰附近。因为角状冰附近气流易发生回流,从而造成水膜堆积,水膜厚度堆积到一定高度后发生吹离。本文只针对旋转部件的水膜脱离模型进行分析,静止部件不作赘述。

1.4 计算方法及步骤

本文是在自开发软件的基础上实现两相流场与积冰计算相耦合的。首先对计算模型进行三维建模、网格划分,然后利用 ANSYS-CFX 计算两相流场,再利用自开发的软件将两相流场的数据提取出来,输入到自开发的积冰程序去求解水膜流动方程及冰生长方程等,从而实现两者之间的耦合。积冰计算采用“步进-循环”准稳态的模拟方法,其中包括积冰模拟时间步 Δt_{i-c} 和冰形构建时间步 Δt_{b-c} 。积冰模拟时间步长较小,本文取 $\Delta t_{i-c} = 0.05 \text{ s}$;在每个积冰模拟时间步长中,水膜流动和冰层生长是稳态的。冰层构建时间步长较大,本文取 $\Delta t_{b-c} = 30 \text{ s}$;在每个冰层构建时间步中,空气-过冷水滴两相流场是稳态的。

本文的计算方法也是在文献[21]的基础上发展起来的。在式(9)、式(10)给出的边界条件下对水膜流动能量方程(8)进行积分求解,可得到水膜

的温度分布 T_w ,同理对方程(11)进行积分可得到冰层温度分布 T_i 。由于水膜和冰层的厚度都很小,因此可以把冰生长方程(14)离散为

$$\frac{\rho_i (H_i - H_i^{\text{old}})}{\Delta t} L_f = \lambda_i \frac{T_i|_{z=0} - T_i|_{z=-H_i}}{H_i} - \lambda_w \frac{T_w|_{z=H_w} - T_w|_{z=0}}{H_w} \quad (32)$$

式中 H_i^{old} 是上一积冰模拟时间步结束时的冰层厚度,把水膜和冰层上下表面的温度代入式(32)即可得到该时间步结束时控制体中的冰层厚度。

对水膜流动的动量方程式(2)~式(4)沿水膜厚度方向积分,并代入相应的边界条件式(5)~式(7),会得到水膜的速度和压力分布。由于水膜厚度很小,将水膜中的速度分布方程沿厚度方向积分然后取平均,会得到水膜流动的速度平均值 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$,代入水膜连续方程(10)可得

$$\frac{\partial H_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} dz) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} dz) = \frac{m_{\text{imp}}}{\rho_w} - \frac{\rho_i}{\rho_w} \cdot \frac{\partial H_i}{\partial t} \quad (33)$$

采用交错网格离散该方程,利用 QUICK 延迟修正法得到控制体边界上的水膜厚度 H_w ,三阶精度。

本文的计算流程如图 3 所示,虚线框部分是本文发展的内容,主要步骤如下:

- 1) 积冰从未积冰的光滑壁面开始, $t = 0$ 时, $H_w = 0, H_i = 0$ 。
- 2) 对模拟的几何体进行三维建模、网格划分、两相流场计算,并用自开发的软件把两相流场的结果提取出来。
- 3) 利用提取的两相流场的数据,在有水滴撞击或者水膜流动的区域,求解冰层生长方程式(14),得到冰层厚度 H_i 。
- 4) 求解水膜连续方程、动量方程式(1)~式(4),得到水膜厚度 H_w 和水膜速度 u, v 。
- 5) 根据式(27)、式(28)计算 We_a, We_{cc} 和式(30)计算 $H_{w,cr}$,判断是否满足水膜脱离判据;若满足,则按式(31)求出新的水膜厚度 H_w 。
- 6) 判断是否达到冰形构建时间,若达到,则构建冰形;若没有,则积冰模拟时间步推进,重复步骤 3)~步骤 5),继续下一时间步的求解。
- 7) 判断是否达到积冰总时间,若没有,则冰形构建时间步推进,根据得到的冰形更新整流罩,重新划分网格,计算空气-过冷水滴两相流场,重复步骤 2)~步骤 6);若达到,则计算结束。

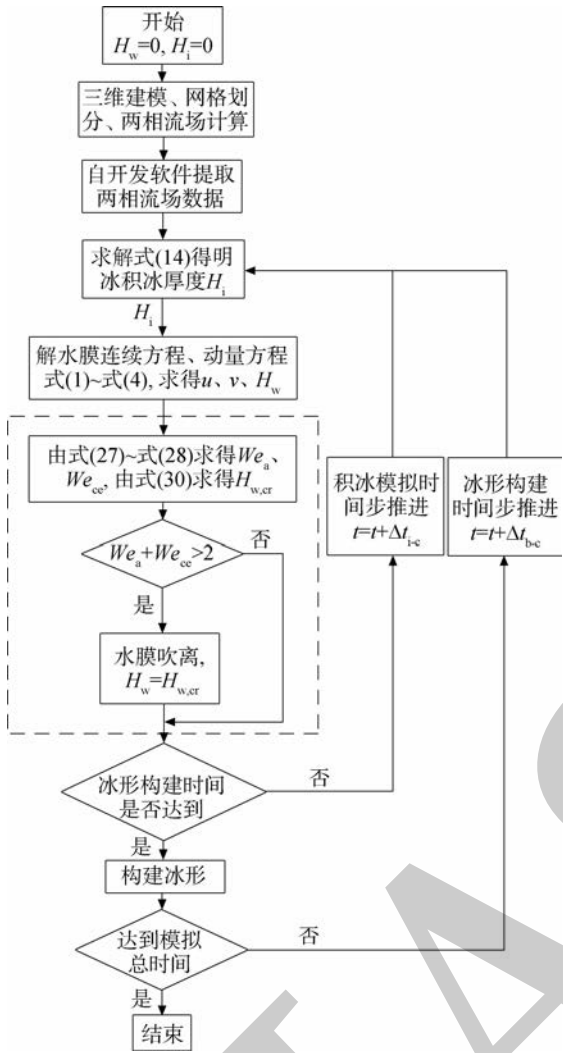


图 3 旋转整流罩积冰数值模拟的流程图

Fig. 3 Calculation progress of icing simulation for rotating spinner

2 数值模拟与结果分析

本文对旋转整流罩表面的积冰进行数值模拟,计算过程主要包括建模和网格划分、空气/过冷水滴两相流场计算、水滴撞击特性计算、冰层的生长和水膜流动模拟、冰形重构五个部分。

首先对积冰模型进行验证,采用本文积冰模型得到的冰形结果与实验对比来证明其合理性。然后分别模拟了不同转速(0、3 000、6 000 r/min)和不同来流速度(40、50、60 m/s)下的整流罩积冰,分析了转速及来流速度对水膜脱离与积冰过程的影响。

2.1 物理模型、网格划分及两相流场设置

对如图 4 所示的 40°锥角的旋转整流罩进行三维积冰数值模拟,采用的模型、计算条件都与文献[18]保持一致。锥底的直径为 $D=300$ mm,锥

顶为半径 5 mm 的球面。为了减小出口对整流罩的影响,将其向后分别延伸直径 D 的 0.8 倍、1.0 倍、1.2 倍,如图 5 所示,发现水收集系数在取 1.0 D 以上基本不发生变化,因此整流罩后面的圆柱长取 1.0 D 。计算域取了底面半径为 5.5 D ,高为 6.5 D 的圆柱体。如图 6 所示,圆柱体的顶部设为速度进口,底部为压力出口,圆周部分和整流罩都设为壁面。取整流罩任一截面, S 为母线上任一点到驻点的距离。为了方便后面描述,对坐标实现无量纲化,其中 S_c 为锥体母线的总长度。

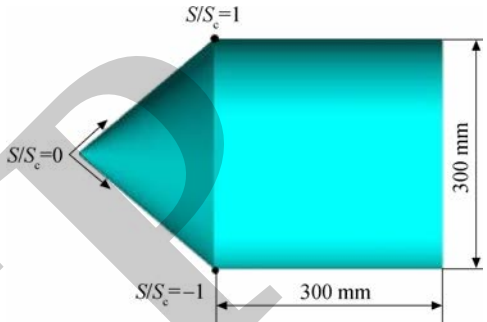


图 4 旋转整流罩物理模型

Fig. 4 Physical model of rotating spinner

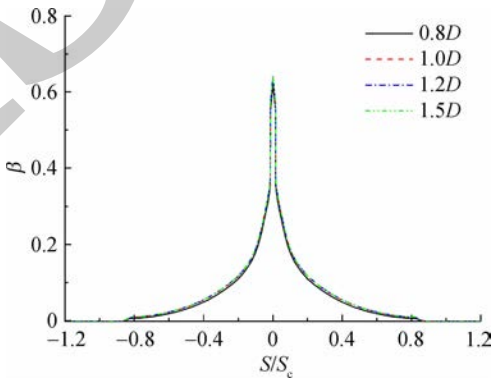


图 5 水收集系数随延伸柱体长度的变化

Fig. 5 Water collection coefficient with different lengths of cylinder

利用 ANSYS-ICEM 对整流罩生成六面体的结构化网格,由于积冰、水膜流动主要发生在第一层网格内,且冰层是沿着壁面的外法线增长,因此近壁区的网格不仅要密集,且与壁面的正交性要好。本文近壁区第一层网格的高度为 0.1 mm,网格高度增长因子为 1.2,总量约 151 万。整流罩前端的网格进行加密,其中顶部球面网格大小为 0.15 mm,下游沿母线呈指数分布,增长因子为 1.2,如图 7 所示。

利用 ANSYS-CFX 进行两相流场计算,采用基于欧拉-欧拉两相流法,空气和水滴的含量之和

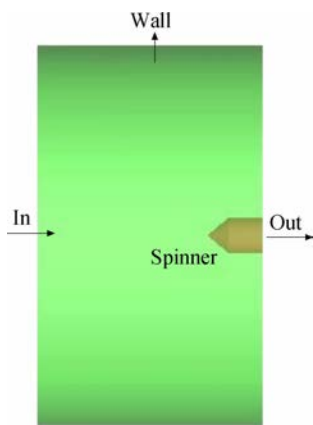


图 6 计算模型
Fig. 6 Computational model

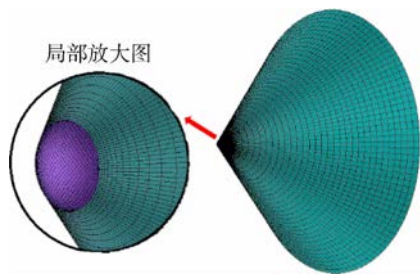


图 7 旋转整流罩的计算网格
Fig. 7 Computational grid of rotating spinner

为 1,满足连续性。其中空气相是连续流体相,采用 SST 湍流模型,需要在近壁面划分足够细密的网格,使第一层网格节点处于黏性底层内。本文近壁面第一层网格 $y^+=3$,处于黏性底层内^[23-24]。水滴相是离散流体相,采用 Dispersed Phase Zero Equation 湍流模型。

2.2 验证算例

由于文献[18]同时进行了数值模拟和实验研究,本文计算相同工况下的整流罩积冰,条件如表 1 所示。

表 1 验证算例的计算条件

Table 1 Computational conditions of validation case

参数	数值
来流温度 T_{∞}/K	268.15
来流速度 $V_{\infty}/(\text{m/s})$	40
水滴平均有效直径 $d/\mu\text{m}$	20
液态水含量 $C_{lw}/(\text{g/m}^3)$	2
积冰时间 t/s	600
转速 $\omega/(\text{r/min})$	1400

图 8 和图 9 分别旋转整流罩外部的空气流线图与水滴轨迹示意图,同时还显示出了压力云图与水滴体积分数云图。由于整流罩结构是轴对称的,下图为方便只显示一半。可以看出,压力在锥尖及附近区域较大,在锥体与柱体的拐点下游较小。由于空气黏性,水滴会与空气一起运动,但当接近旋转整流罩壁面时,由于受到固体壁面的影响,空气流线会发生偏转,发生空气绕流现象;而水滴的惯性大于空气,水滴会尽量保持原来的方向运动,其运动轨迹发生偏转的程度较小,因此水滴会撞击在旋转整流罩的表面。其中在锥体的前缘部分会形成撞击区,而再往下游的柱体部分,形成了明显的遮蔽区。

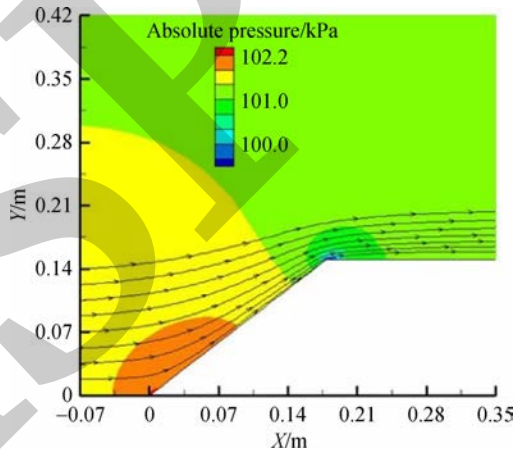


图 8 空气流线图
Fig. 8 Sketch of air streamline

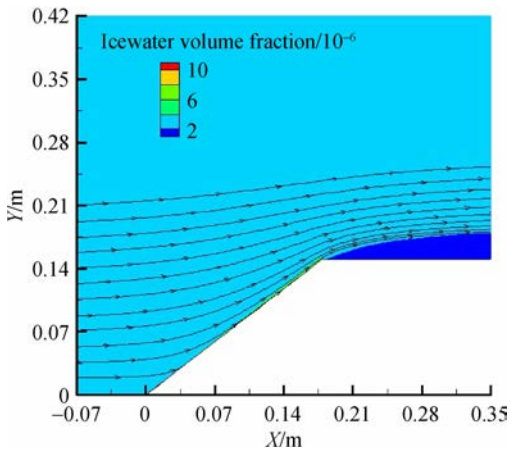


图 9 水滴轨迹示意图
Fig. 9 Sketch of water droplet trajectory

将本文的计算结果、文献[21]未考虑水膜脱离得到的冰形结果与文献[18]的实验结果、模拟结果进行对比,如图 10 所示,图 11 为三维冰形

图。由于本文与文献[21]的区别仅在于是否考虑水膜脱离现象, 结冰计算的水撞击特性与两相流场计算均是一致的, 因此若本文的冰形结果更接近实验, 则可以证明本文模型的合理性。

本文结果驻点及附近区域的积冰位置、形状比文献[18]的模拟结果更接近实验值, 只是质量略偏小。驻点附近下游 $0\text{ m} \leq X \leq 0.036\text{ m}$ 区域的积冰形状、厚度都与实验结果很吻合, 再往下游的积冰厚度小于实验值, 偏差略大。

由图 10 可看出, 本文与文献[21]未考虑水膜脱离得到的冰形结果的区别主要在锥体的驻点附近下游 $0.016\text{ m} \leq X \leq 0.036\text{ m}$ 区域, 此区域文献[21]未考虑水膜脱离的积冰量略大于实验值, 而本文的冰形与实验更吻合。

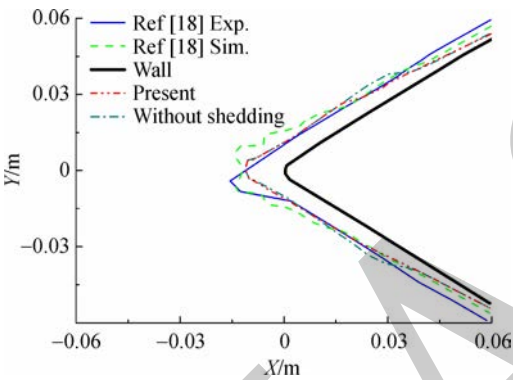


图 10 冰形对比
Fig. 10 Comparison of ice shape

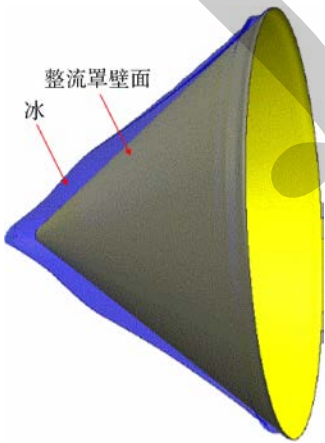


图 11 三维冰形图
Fig. 11 Three-dimensional diagram of ice shape

图 12 为气流曳力和离心力对应的韦伯数 We_a 和离心力对应的韦伯数 We_{ce} 的示意图。图 13 为本文水膜脱离模型与利用文献[21]未考虑水膜脱离得到的冰层厚度与水膜厚度对比。在驻点及附近区

域, 气流曳力和离心力都很小, We_a 、 We_{ce} 之和也很小, 还不足以使水膜发生脱离,。驻点附近的下游, 随着半径增大, 离心力增大, 且此处的气流曳力也较大, We_a 、 We_{ce} 之和在 $0.3 \leq S/S_c \leq 0.33$ 超过了 2, 因此水膜发生脱离; 由于水膜是流动的, 该处的水膜脱离会对周围的水膜流动造成一定的影响, 因此水膜厚度发生变化的区域为 $0.18 \leq S/S_c \leq 0.37$, 比水膜发生脱离的区域稍大, 从而冰形由于受到水膜流动的影响变化的区域主要在 $0.27 \leq S/S_c \leq 0.58$ 区域。再往下游, 如图 13 所示, 由于水膜厚度变为 0 mm, We_a 、 We_{ce} 也为 0, 不存在水膜脱离。

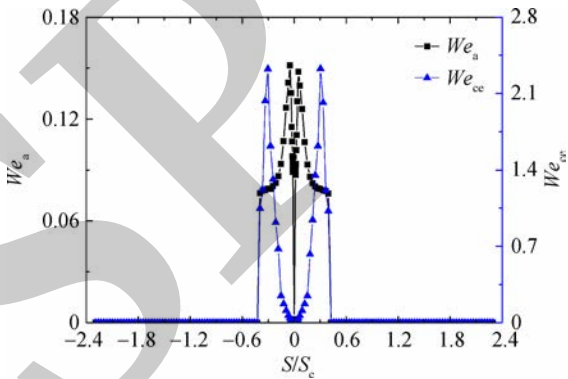


图 12 600 s 时韦伯数分布示意图
Fig. 12 Sketch of Weber number at 600 s

图 13 划分了三个区域: I 区 ($0.18 \leq S/S_c \leq 0.37$), II 区 ($0.27 \leq S/S_c \leq 0.37$), III 区 ($0.37 \leq S/S_c \leq 0.58$)。对于 I 区, 水膜厚度虽然变化, 但变化较小, 因此冰层厚度并未发生明显的变化。对于 II 区, 冰层厚度随着水膜厚度的减小而减小。

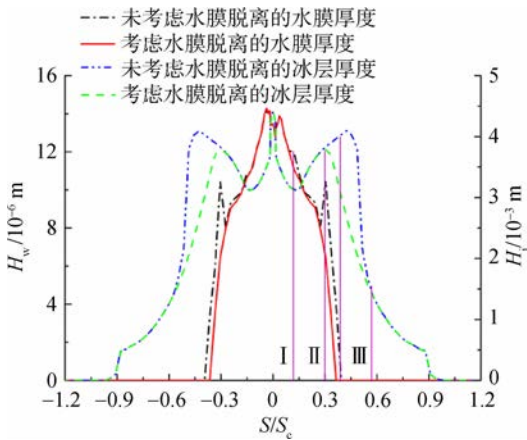


图 13 600 s 时水膜厚度与冰层厚度分布图
Fig. 13 Sketch of water film thickness and ice layer thickness at 600 s

对于Ⅲ区,600 s 时刻的水膜厚度为 0 mm,说明 600 s 时该区域水滴撞击在壁面上立刻积冰形成了霜冰,而冰层厚度减小了。由图 14 和图 15 水膜厚度在 3、30 s 时的分布图可知,Ⅲ区在积冰前期是有水膜覆盖的,即该区域前期的积冰是明冰形态,而且满足了本文水膜脱离的条件,发生了脱离,水膜厚度变小,因此Ⅲ区的冰层厚度也随之减小。

综上,本文积冰模型得到的冰形比文献[21]不考虑水膜脱离更接近实验结果,从而验证了本文积冰模型的合理性。

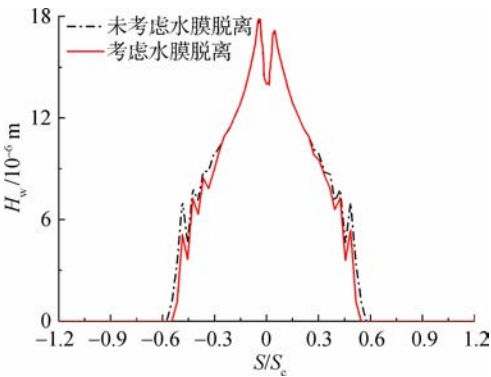


图 14 3 s 时的水膜厚度分布

Fig. 14 Sketch of water film thickness at 3 s

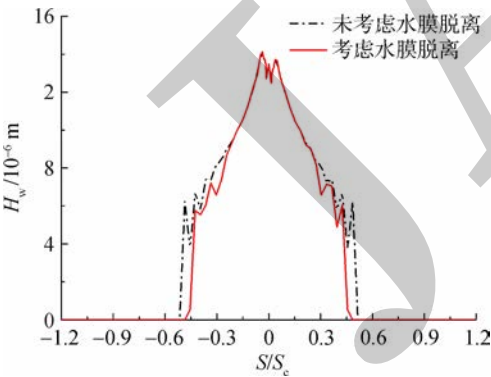


图 15 30 s 时的水膜厚度分布

Fig. 15 Sketch of water film thickness at 30 s

2.3 转速对整流罩表面水膜脱离和积冰的影响

为了分析转速对整流罩冰层表面水膜脱离和积冰的影响,对表 2 所示的工况下的整流罩进行积冰模拟。

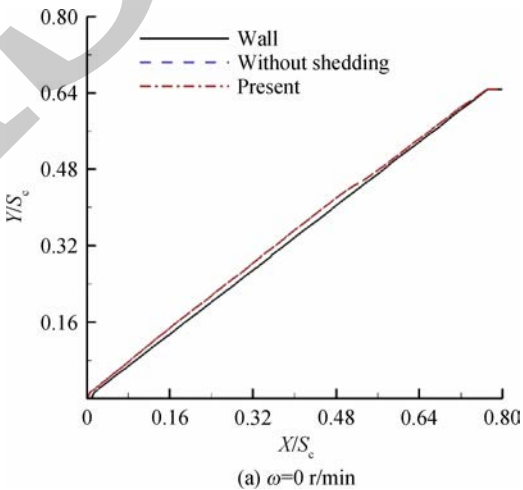
图 16 为三种转速下本文和利用文献[21]未考虑水膜脱离计算得到的整流罩表面的冰形对比。在转速为 0 r/min 时,两种冰形结果是一致的。这是由于此时水膜脱离判据条件式(25)、式(29)中的 ω 、 We_{ce} 为 0,只有气流曳力单独存在还

表 2 不同转速下的计算条件

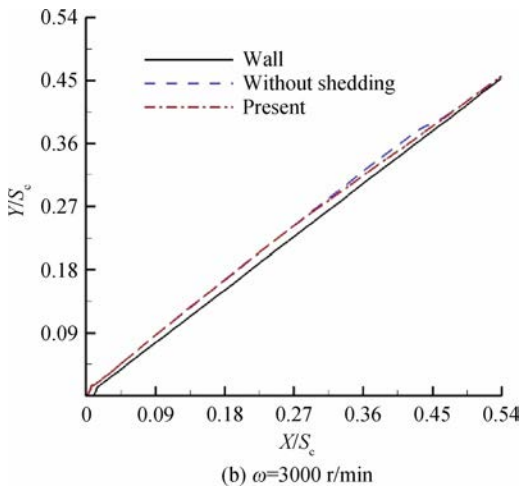
Table 2 Computational conditions at different rotating speed

参数	数值
来流温度 T_{∞}/K	268.15
来流速度 $V_{\infty}/(m/s)$	50
水滴平均有效直径 $d/\mu m$	20
液态水含量 $C_{lw}/(g/m^3)$	2
积冰时间 t/s	300
转速 $\omega/(r/min)$	0,3000,6000

无法使水膜发生脱离。转速为 3 000 r/min 时,水膜脱离发生的范围为 $0.29 \leq X/S_c \leq 0.47$,总积冰质量减少率为 13.4%。此时由于转速产生的离心力使水膜的潜能增大,再加上气流曳力的作用,水膜达到了脱离判据,发生了脱离。转速为 6 000 r/min 时,水膜脱离发生的范围为 $0.18 \leq X/S_c \leq 0.35$,总积冰质量减少率为 15.8%。可以看出,随着转速的增加,水膜发生脱离的比例增加。这是因为相同的来流速度下,随着转速的增加,水膜



(a) $\omega=0$ r/min



(b) $\omega=3000$ r/min

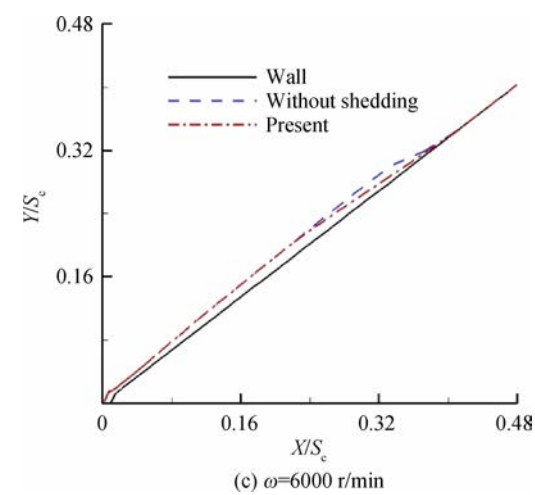


图 16 不同转速下的冰形对比
Fig. 16 Ice shape of different rotating speed

受到的离心力增加,势能增加,冰层表面的水膜更容易发生脱离。

图 17 为水撞击极限与结冰极限随转速的变化示意图,表 3 为不同转速下的水撞击极限与结冰极限。水撞击极限为水滴撞击到壁面后水膜覆盖的最大长度范围,此长度范围之外,没有水。结冰极限为水结成冰覆盖的最大长度范围。可以看出转速越大,水撞击极限越小。这是由于转速越大,这是由于转速越大,气流带动水滴相对于锥

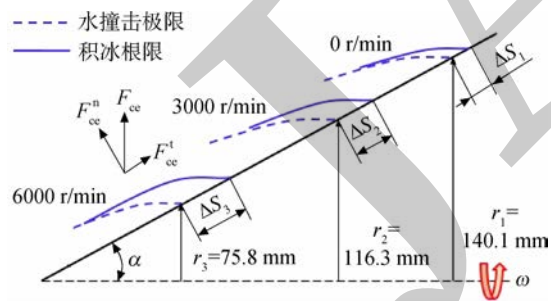


图 17 水撞击极限与结冰极限随转速的变化示意图
Fig. 17 Sketch of water impingement range and ice range with different rotating speed

表 3 水撞击极限与结冰极限随转速的变化
Table 3 Water impingement range and ice range with different rotating speed

转速 ω / (r/min)	水撞击极限 S_1 /mm	结冰极限 S_2 /mm	水膜向下 流动距离 ΔS /mm
0	218	224.6	3.4
3000	181	188	7
6000	117.9	150.1	32.2

体表面的偏转程度就越大,水滴撞击到锥体表面的趋势就会减弱,因此水撞击极限越小。结冰极限也随着转速的增加而逐渐较小,可见结冰极限随着转速变化的规律受到水收集特性的影响较大。而且水膜向下流动的距离 ΔS 随着转速的增加而增大,这是由于随着转速的增大,水膜受到的离心力在切向方向上的分量 $\omega^2 r \sin \alpha$ 也增大,因此水膜往下流动的距离也增大。

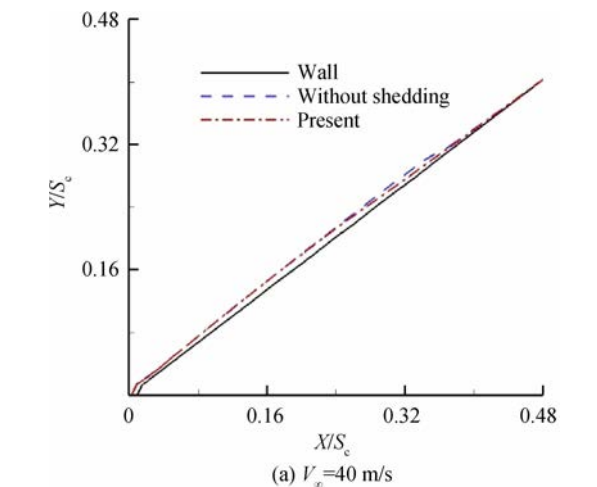
2.4 来流速度对整流罩表面水膜脱离和结冰的影响

为了分析来流速度对整流罩冰层表面水膜脱离和结冰的影响,对表 4 所示的工况下的整流罩进行结冰模拟。

表 4 不同来流速度下的计算条件
Table 4 Computational conditions at different air speed

参数	数值
来流温度 T_∞ /K	268.15
转速 ω /(r/min)	3000
水滴平均有效直径 $d/\mu\text{m}$	20
液态水含量 C_{w0} /(g/m ³)	2
结冰时间 t /s	300
来流速度 V_∞ /(m/s)	40,50,60

图 18 为三种来流速度下本文与文献[21]未考虑水膜脱离得到的整流罩表面的冰形对比,可以看出三种来流速度下本文水膜脱离发生的范围分别在 $0.24 \leq X/S_c \leq 0.38$ 、 $0.29 \leq X/S_c \leq 0.47$ 、 $0.34 \leq X/S_c \leq 0.59$,总结冰质量减少率分别为 12.2%、13.4%、14.2%。说明来流速度越大,水膜发生脱离的比例越大。因为相同转速下,来流速度越大,气流曳力相对较大, V_a 与 We_a 就越大,



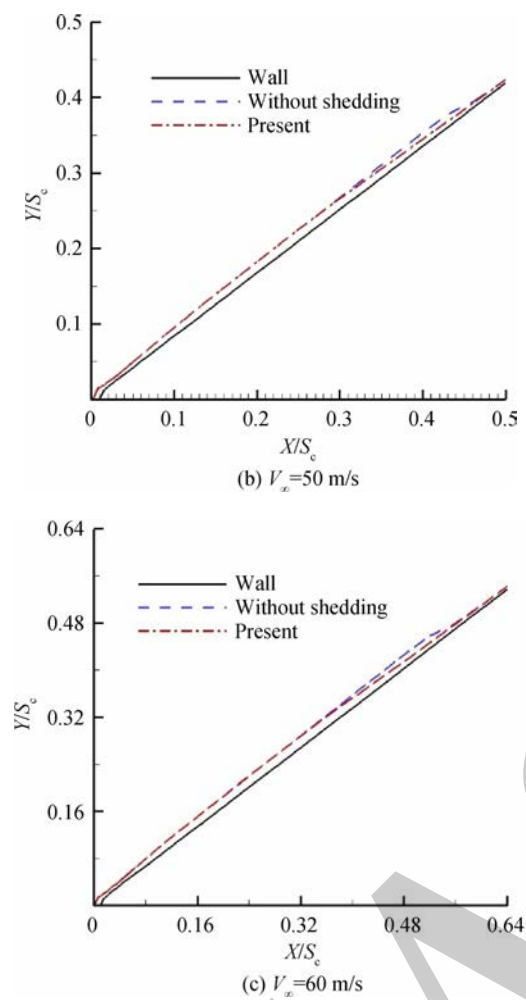


图 18 不同来流速度下的冰形对比
Fig. 18 Ice shape of different air speed

越容易满足脱离判据,因此水膜越容易脱离。

图 19 为水撞击极限与积冰极限随来流速度的变化的示意图,表 5 为不同来流速度下的水撞击极限与积冰极限随来流速度变化的具体值。可以看出来流速度越大,水撞击极限越大。这是由于来流速度越大,动量越大,水滴受到的惯性力相对于离心力越大,越不容易偏离原始的撞击轨迹,即

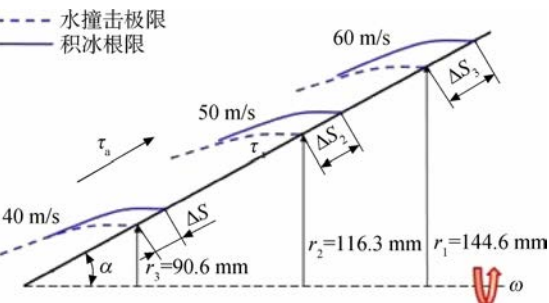


图 19 水撞击极限与积冰极限随来流速度的变化示意图
Fig. 19 Sketch of water impingement range and ice range with different air speed

水滴越容易撞到锥体表面,因此水滴的撞击极限随着来流速度的增大而增大。由于受到水收集特性的影响,积冰极限也随着来流速度的增大而增大。而且水膜向下流动的距离 ΔS 随着来流速度的增加而增大,这是由于来流速度越大,水膜受到的气流曳力也增大,因此水膜往下流动的距离也增大。

表 5 水撞击极限与积冰极限随来流速度的变化
Table 5 Water impingement range and ice range with different air speed

来流速度 $V_{\infty}/(\text{m/s})$	水撞击极限 S_1/mm	积冰极限 S_2/mm	水膜向下 流动距离 $\Delta S/\text{mm}$
40	140.9	146.2	5.3
50	181	188	7
60	225	235	10

3 结 论

本文在文献[21]旋转部件三维积冰与水膜流动耦合模型的基础上,在水膜流动模型中引入了旋转部件表面水膜脱离的模型,该模型基于对水膜流动的功平衡分析,进一步发展了积冰与水膜流动耦合的计算方法。通过对旋转整流罩的数值模拟得到以下结论:

- 1) 本文加入水膜脱离后的积冰模型计算得出的冰形结果在积冰形状、位置与实验值吻合良好,从而验证了该积冰模型的合理性。
- 2) 转速越大,旋转整流罩冰层表面的水膜发生脱离的比例越大,而水撞击极限和积冰极限随转速的增大而减小。在本文研究范围内,整流罩静止时水膜不发生脱离,当转速由 3 000 r/min 提高至 6 000 r/min 时,因水膜脱离导致的积冰总质量减少率分别为 13.4% 和 15.8%。
- 3) 来流速度越大,旋转整流罩冰层表面的水膜发生脱离的比例越大,水撞击极限和积冰极限也越大。在本文研究范围内,当来流速度为 40 m/s、50 m/s 和 60 m/s 时,因水膜脱离导致积冰总质量减少率分别为 12.2%、13.4%、14.2%。

4 展 望

本文的积冰模型中假设薄水膜是连续的,有必要对薄水膜的流动演化过程进行研究,揭示薄水膜前锋破碎形成溪流的物理机制,发展溪流水膜及积冰的数值模拟方法。

本文的水膜脱离模型目前只是经过冰形的结果间接验证,有必要对薄水膜发生脱离的现象进行实验观测,对水膜流动规律进行总结,直接验证或修正本文的水膜脱离模型。

参考文献:

[1] CHAPUT M. Use of water vapor for engine deicing applications[R]. Seville, Spain; 2007 SAE Aircraft & Engine Icing Conference and Exhibition, 2007.

[2] GRAVERSEN P. Grand based measuring and warning of weather conditions in which engine icing may occur[R]. Seville, Spain; 2007 SAE Aircraft & Engine Icing Conference and Exhibition, 2007.

[3] SHAW R J, PAUL R G. The UH-1H helicopter icing flight test program; an overview[R]. AIAA-85-0338, 1985.

[4] BRITTON R K. A review of icing accretion data from a model rotor icing test and comparison with theory[R]. AIAA-91-0661, 1991.

[5] BARUZZI G, TRAN P, HABASHI W G, et al. Actuator disk implementation in FENSAP-ICE, a 3-D Navier-Stokes in-flight icing simulation system progress[R]. AIAA-2003-619, 2003.

[6] BELZ R A, BRASIER C W, MURPHY P J, et al. A turbine engine inlet viewing system [R]. AIAA-86-1647, 1986.

[7] MCVEY O, PULLEN R. Inclement weather & aircraft engine icing[R]. Seville, Spain; SAE Aircraft & Engine Icing Conference and Exhibition, 2007.

[8] LI Linkai, HU Hui. An experimental study of dynamics ice accretion process on aero-engine spinners[R]. AIAA-2017-0551, 2017.

[9] 赵秋月. 航空发动机进口支板及整流罩水滴撞击特性的计算分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

ZHAO Qiuyue. Computational analysis of water droplet impingement property for the inlet struct and the cone [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)

[10] 胡娅萍. 航空发动机进口部件积冰的数值模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

HU Yaping. Numerical simulation of ice accretion on aero-engine entry components[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

[11] 王健. 旋转整流罩积冰模拟实验与冰脱落轨迹数值计算研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

WANG Jian. Experimental study of ice accretion on rotating spinner and numerical simulation of shed ice's trajectory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

[12] 王健, 胡娅萍, 吉洪湖, 等. 旋转整流罩积冰生长与脱落过程的实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1352-1357.

WANG Jian, HU Yaping, JI Honghu, et al. Experimental

of ice accretion and shedding on rotating spinner[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1352-1357. (in Chinese)

[13] 胡娅萍, 吉洪湖, 王健, 等. 锥角对旋转整流罩积冰影响的模拟实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 495-503.

HU Yaping, JI Honghu, WANG Jian, et al. Experiment on effect of cone angle on ice accretion of rotating spinner[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 495-503. (in Chinese)

[14] CHEN Ningli, JI Honghu, HU Yaping, et al. Experimental study of icing accretion on a rotating conical spinner[J]. Heat and Mass Transfer, 2015, 51(12): 1717-1729.

[15] DONG W, ZHU J J, ZHENG M, et al. Numerical study of ice accretion on rotating aero-engine cone[R]. Stockholm: 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2014.

[16] MU Zuodong, SHEN Xiaobin, LIN Guiping, et al. Numerical simulation for ice accretion on rotating cowling considering water film shedding[R]. AIAA-2016-2187, 2016.

[17] ZHANG Lifan, ZHANG Meihua, ZHANG Xiaoxue, et al. Model of ice accretion on rotating cone in aero-engine[R]. AIAA-2016-5059, 2016.

[18] 李静. 发动机进口静止/旋转部件结冰及结冰实验的相似性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.

LI Jing. Numerical simulation of ice accretion and study for icing scaling law on aero-engine entry components[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)

[19] CHEN Xi, ZHAO Qijun. Numerical simulation for ice accretion on rotors using new three-dimensional icing model [J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(4): 1428-1442.

[20] 曹广州. 迎风表面三维积冰的数学模型与计算方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

CAO Guangzhou. Investigation of mathematic model and calculational methodology for 3D ice accretion on the up-wind surfaces[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

[21] 陈宁立. 旋转部件表面薄水膜流动与积冰的模拟方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

CHEN Ningli. Research on the prediction of movement and solidification of thin water film on a rotating surface and its features[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)

[22] MIRABEDINI S M, RAHIMI H, HAMEDIFAR S, et al. Microwave irradiation of polypropylene surface: a study on wettability and adhesion[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004, 24(2): 163-170.

[23] MURPHY A D. Computational fluid dynamics: theory, analysis, applications[M]. New York: Nova Science Publishers, 2011.

[24] 胡坤, 李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 210-215.