

冰晶-过冷水滴混合条件下风力机翼型结冰特性

王正之¹, 刘一航¹, 汝翊尧¹, 张 东¹, 钱耀如^{1,2}, 兆环宇³

(1. 南京工程学院能源与动力工程学院, 南京 211167; 2. 南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 南京 210016;
3. 中航工业空气动力研究院辽宁省飞行器防除冰重点实验室, 沈阳 110034)

摘 要: 采用数值模拟方法对冰晶-过冷水滴混合条件下风力机翼型结冰问题展开研究, 建立粒子拉格朗日运动方程, 提出一种新的混合条件下结冰生成模型, 分析冰晶黏附和侵蚀的物理现象, 给出结冰增长模型的求解方法。通过与试验结果对比, 证明了结冰模型的准确性。研究不同模型参数和初始条件对风力机翼型结冰外形的影响。研究结果表明, 侵蚀率越大, 表面结冰越少, 而黏附系数和融化比越大会导致结冰量越多; 不同温度会影响翼型结冰冰形; 随着冰晶含量和直径的增加, 表面结冰范围和结冰量越大。

关键词: 风力机; 翼型; 风电叶片; 数值方法; 结冰; 混合条件; 冰晶

中图分类号: TK89

文献标志码: A

0 引 言

风力机是实现风力发电技术的主要设备, 其通过风力驱动叶片旋转, 再经一系列机械装置带动发电机发电, 最终将风能转化为电能。风力发电发展较为成熟的欧美国家经长期观察发现, 风力机叶片表面会发生结冰现象^[1]。现有的风力机结冰研究通常是针对过冷水滴结冰气象条件, 但云层中的冰晶也可能导致风力机叶片结冰。冰晶是强对流云层中常见的气象现象, 通常出现在云层上部。当暖湿空气在强对流云层中急剧上升时, 水蒸气会迅速冷却并凝结成微小冰晶。冰晶在云层中形成并不断扩散, 但由于其尺寸微小, 通常不易被肉眼观测。冰晶导致的结冰问题与过冷水滴导致的结冰有较大区别, 冰晶结冰过程与表面状态有关^[2]。因此, 不能单纯采用过冷水滴条件下的风力机结冰研究方法开展冰晶-过冷水滴混合条件下的风力机结冰特性研究。

近年来, 国内外学者针对风力机结冰数值模拟开展了一系列研究工作。文献[3-7]均开展了风力机翼型结冰数值模拟研究。其中, 空气-过冷水滴场计算方法通过求解不可压/可压 $N-S$ 方程获得流场数据, 在此基础上利用拉格朗日方法或欧拉方法求解水滴轨迹, 最后模拟风力机翼型结冰后的外形, 并分析其对气动特性的影响。与此同时, 国内外研究者在冰晶结冰相关领域开展了一些基础理论与应用研究工作。Baumert 等^[8]开展了冰晶-过冷水滴混合条件下的结冰试验,

试验采用了机翼模型和圆柱模型, 并获得不同混合条件下表面的结冰外形; Trontin 等^[9-10]建立冰晶侵蚀模型, 模型考虑了表面液态水以及表面曲率对侵蚀的影响; Nilamdeen 等^[11]对冰晶结冰机理进行了研究, 并建立相应的数学模型, 该模型认为冰晶撞击固体表面时会完全反弹, 而撞击水膜表面时会完全黏附; Malik 等^[12-13]通过结冰风洞试验研究了冰晶撞击加热表面情况下, 表面形成的冰层的液态水含量、冰晶的黏附系数和冰层的最大厚度。在国内, 卜雪琴等^[14-15]总结了冰晶和混合条件结冰的国内外研究现状, 采用欧拉方法计算了冰晶运动轨迹, 建立了混合相结冰模型并分析了结冰情况; 沈浩等^[16]对航空发动机内部冰晶结冰问题开展了调研, 并对未来发展方向进行了展望; 姜飞飞等^[17]研究了发动机内涵道中的冰晶运动轨迹, 在计算过程中考虑了冰晶与空气之间的传热传质现象, 获得了冰晶运动过程中各参数的变化规律; 谭燕^[18]基于欧拉模型研究了冰晶和过冷水滴的撞击特性, 模拟了不同状况下的结冰情况, 并与多种情况下的结冰试验结果进行了对比。

可看出, 近年来针对风力机结冰问题的研究多集中于过冷水滴导致的结冰方面, 而开展冰晶-过冷水滴混合条件下风力机结冰数值模拟方法的研究还较为鲜见。本文在上述研究的基础上针对混合气象条件下风力机翼型结冰特性开展研究, 提出一套风力机翼型混合条件下结冰数值模拟方法, 主要研究结冰过程中的冰晶运动特性, 建立一种新的混合条件下结冰增长模型, 并分析冰晶黏附、侵蚀等现象的数学模

收稿日期: 2025-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(51806105; 52006098); 航空科学基金(2023M066027001); 江苏省大学生创新创业训练计划项目(202411276080Y)

通信作者: 钱耀如(1990—), 女, 博士、副教授, 主要从事风力机空气动力学方面的研究。qianyaoru@njit.edu.cn

型及其对结冰的影响,以期开展冰晶-过冷水滴混合条件下风力机结冰及防除冰系统设计分析提供理论支持。

1 数值模拟方法

冰晶-过冷水滴混合条件下风力机翼型结冰过程是一个复杂的物理过程。本文选择 DU 97-W-300 翼型为研究对象,进行混合条件下结冰数值模拟研究,以获取风力机翼型表面结冰特性分布。

1.1 网格生成和流场计算

本文翼型网格采用 O 型拓扑结构的结构化网格进行划分,在易发生结冰的前缘部分进行局部网格加密。距离翼型第一层网格高度小于 10^{-5} m,使得 $y^+ < 1$ 。网格无关性以翼型气动特性为指标,选择网格数量分别为 4.9 万、7.0 万和 8.8 万,分别命名为粗网格、中网格和细网格。图 1 为不同网格情况下的升阻力计算结果,可看出当整体网格数量为 7.0 万时气动特性变化较小,满足网格无关性要求。图 2 为本文所用的翼型网格,其中翼型表面布置网格点 350 个。流场计算中设定为速度进口和压力出口,翼型表面为无滑移固壁边界条件,湍流模型选择 SST $k-\omega$ 模型,求解器采用 SIMPLEC 算法,计算过程中当主要残差和主要参数不再出现较大变化时,认为计算达到收敛。

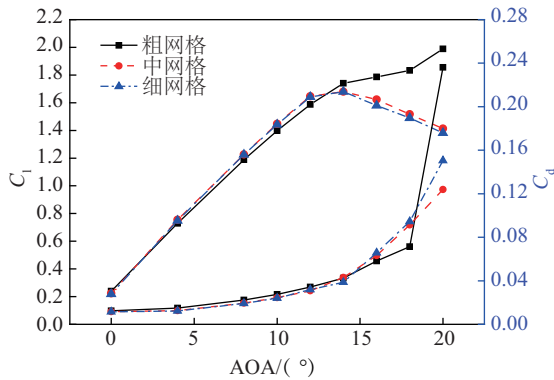


图1 翼型网格无关性验证

Fig. 1 Grid independent validation for airfoil

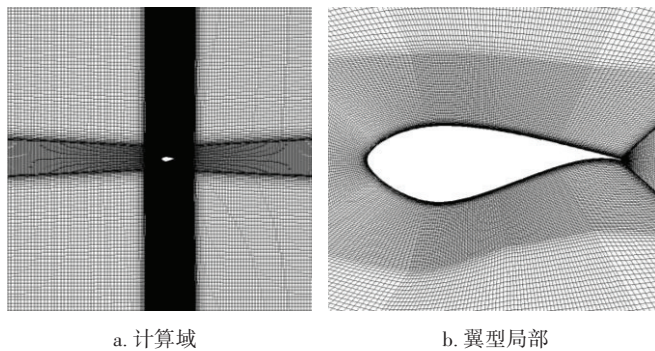


图2 翼型计算网格

Fig. 2 Calculation meshes for airfoil

1.2 粒子运动轨迹模型

本文主要采用拉格朗日方法求解粒子运动轨迹及其撞击特性。由于过冷水滴和冰晶在运动过程中遵循相同的物理定律,二者的运动轨迹方程和撞击特性计算采用相同的数学模型。作为水的两种相态,过冷水滴和冰晶的主要区别体现在物理属性上。因此,本文建立统一的过冷水滴和冰晶运动控制方程。

粒子运动情况取决于所受作用力,可推导出粒子运动控制方程为:

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{D} + \vec{G} \quad (1)$$

式中: m ——粒子质量, kg; $\vec{r}$ ——粒子在空间中的坐标, $\vec{r}=(x,y)$; $\vec{G}$ ——粒子所受重力, m/s^2 。

黏性阻力为:

$$D = C_d \times 0.5 \rho_a \cdot U^2 \cdot A \quad (2)$$

式中: C_d ——阻力系数; U ——当地粒子速度与当地空气速度的矢量差值, m/s ; A ——粒子的迎风面积, m^2 。

空气中的过冷水滴受表面张力作用通常保持球形,试验发现冰晶外形也几乎呈球形,因此计算粒子运动轨迹时可采用球形阻力系数公式,常用的球形阻力系数计算公式为:

$$C_d Re/24 = 1 + 0.197 Re^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re^{1.38} \quad (3)$$

相对雷诺数 Re 为:

$$Re = \rho_a |\vec{u}_a - \vec{u}| d / \mu_a \quad (4)$$

式中: ρ_a ——空气密度, kg/m^3 ; d ——粒子直径, m ; μ_a ——空气动力黏度, $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

根据收集系数的定义,可获得粒子收集系数的表达式为:

$$\beta = \frac{m_0}{m_i} = \frac{S_0 \cdot \cos \alpha}{S_i} \quad (5)$$

式中: S_0 ——相邻初始位置之间的间距, m ; S_i ——翼型表面相邻撞击位置之间的间距, m ; α ——攻角, $(^\circ)$ 。

1.3 冰晶-过冷水滴混合结冰模型

为准确对复杂混合条件下的结冰过程进行描述,需在翼型表面建立控制单元,通过在控制单元内建立数学模型来描述结冰过程。

1.3.1 质量守恒方程

在控制单元内根据不同形态水的总质量守恒,建立控制单元内的质量守恒方程,各项均以质量流量的形式表述,质量守恒方程为:

$$\dot{M}_{\text{ch,ic,w}} + \dot{M}_{\text{ch,ic,i}} + \dot{M}_{\text{ch,d}} + \dot{M}_{\text{in}} = \dot{M}_{\text{evp}} + \dot{M}_{\text{out}} + \dot{M}_{\text{ice}} \quad (6)$$

过冷水滴撞击物面的质量流量 $\dot{M}_{\text{ch,d}}$ 为:

$$\dot{M}_{\text{ch,d}} = C_{\text{LWC}} \cdot V_\infty \cdot \beta_d \quad (7)$$

式中: C_{LWC} ——液态水含量, g/m^3 ; V_∞ ——远场来流速度, m/s ; β_d ——水滴收集系数。

冰晶撞击壁面后融化部分 $\dot{M}_{\text{ch,ic,w}}$ 为:

$$\dot{M}_{\text{elt,ic,w}} = C_{\text{IWC}} \eta_{\text{ic}} V_{\infty} \beta_{\text{ic}} \quad (8)$$

撞击到壁面的冰晶未融化部分的质量流量 $\dot{M}_{\text{elt,ic,i}}$ 为:

$$\dot{M}_{\text{elt,ic,i}} = C_{\text{IWC}} (1 - \eta_{\text{ic}}) V_{\infty} \beta_{\text{ic}} \quad (9)$$

式中: C_{IWC} ——冰晶含量, g/m^3 ; β_{ic} ——冰晶收集系数; η_{ic} ——冰晶融化比, 融化比表示冰晶在运动过程中遇到高温环境发生融化的冰晶质量占总冰晶质量的比值, 本文整个计算中温度均处于 0°C 以下, 可认为冰晶不发生融化。

蒸发水质量 $\dot{M}_{\text{evp}}$ 可通过传热传质类比得到:

$$\dot{M}_{\text{evp}} = \frac{h_{\text{ic}}}{c_{\text{pa}} \rho_{\text{a}} R_{\text{v}} L_{\text{ew}}^{2/3}} \left[\frac{e_{\text{s}}(T_{\text{w}})}{T_{\text{w}}} - \frac{e_{\text{s}}(T_{\infty})}{T_{\infty}} \right] \quad (10)$$

式中: h_{ic} ——对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; c_{pa} ——空气定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; R_{v} ——水蒸气气体常数, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; L_{ew} ——传热传质类比准则数 Lewis 数; $e_{\text{s}}(T_{\text{w}})$ ——表面温度 T_{w} 的水蒸气饱和压力, Pa ; $e_{\text{s}}(T_{\infty})$ ——来流温度 T_{∞} 的水蒸气饱和压力, Pa 。

将质量守恒方程进行变换, 可得到流入下游单元的水量 $\dot{M}_{\text{out}}$ 为:

$$\dot{M}_{\text{out}} = \dot{M}_{\text{elt,ic,w}} + \dot{M}_{\text{elt,ic,i}} + \dot{M}_{\text{elt,d}} + \dot{M}_{\text{in}} - \dot{M}_{\text{evp}} - \dot{M}_{\text{ice}} \quad (11)$$

在结冰生成模型中, 可认为流入某一控制单元的水量 $\dot{M}_{\text{in}}$ 等同于上游单元流出的水量 $\dot{M}_{\text{out}}$ 。

1.3.2 能量守恒方程

建立控制单元内的能量守恒方程, 各项均以热流密度的形式表述, 方程为:

$$\dot{Q}_{\text{elt,ic,w}} + \dot{Q}_{\text{elt,ic,i}} + \dot{Q}_{\text{elt,d}} + \dot{Q}_{\text{in}} + \dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{Q}_{\text{evp}} + \dot{Q}_{\text{out}} + \dot{Q}_{\text{ice}} + \dot{Q}_{\text{hfc}} \quad (12)$$

由于水在相变过程中温度不发生变化, 因此能量守恒方程各项以焓值表示。

控制单元内收集到的水滴能量 $\dot{Q}_{\text{elt,d}}$ 包括了其内能和动能:

$$\dot{Q}_{\text{elt,d}} = \dot{M}_{\text{elt,d}} \left[c_{\text{pi}} \cdot T_{\text{m}} + L_{\text{f}} + c_{\text{pw}} (T_0 - T_{\text{m}}) + \frac{1}{2} V_{\text{d}}^2 \right] \quad (13)$$

控制单元内收集到的冰晶能量包括其内能和动能, 将其分为融化部分和未融化部分, 可表示为:

$$\dot{Q}_{\text{elt,ic,w}} = \dot{M}_{\text{elt,ic,w}} \left[c_{\text{pi}} \cdot T_{\text{m}} + L_{\text{f}} + c_{\text{pw}} (T_0 - T_{\text{m}}) + \frac{1}{2} V_{\text{d}}^2 \right] \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{\text{elt,ic,i}} = \dot{M}_{\text{elt,ic,i}} \left(c_{\text{pi}} \cdot T_0 + \frac{1}{2} V_{\text{d}}^2 \right) \quad (15)$$

式中: c_{pi} ——冰的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; L_{f} ——冰的融解潜热, kJ/kg ; c_{pw} ——水的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_{m} ——水的相变平衡温度, K ; T_0 ——远场温度, K ; V_{d} ——粒子撞击物面时的速度, m/s 。

蒸发带走的能量 $\dot{Q}_{\text{evp}}$ 为:

$$\dot{Q}_{\text{evp}} = \dot{M}_{\text{evp}} \left[c_{\text{pi}} \cdot T_{\text{m}} + L_{\text{f}} + c_{\text{pw}} (T_{\text{w}} - T_{\text{m}}) + L_{\text{e}} \right] \quad (16)$$

式中: L_{e} ——水的蒸发潜热, kJ/kg 。

由上游控制单元流入水的能量 $\dot{Q}_{\text{in}}$ 为:

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \dot{M}_{\text{in}} [c_{\text{pi}} \cdot T_{\text{m}} + L_{\text{f}} + c_{\text{pw}} (T_{\text{w}} - T_{\text{m}})] \quad (17)$$

由控制单元流入到下游控制水的能量 $\dot{Q}_{\text{out}}$ 为:

$$\dot{Q}_{\text{out}} = \dot{M}_{\text{out}} [c_{\text{pi}} \cdot T_{\text{m}} + L_{\text{f}} + c_{\text{pw}} (T_{\text{w}} - T_{\text{m}})] \quad (18)$$

在结冰计算中认为蒙皮绝热, 蒙皮传导的能量 $\dot{Q}_{\text{cond}}$ 取为 0。

对流换热热量 $\dot{Q}_{\text{hfc}}$ 为:

$$\dot{Q}_{\text{hfc}} = h_{\text{ic}} (T_{\text{w}} - T_0) \quad (19)$$

液态水冻结成冰吸收的能量 $\dot{Q}_{\text{ice}}$ 为:

$$\dot{Q}_{\text{ice}} = \dot{M}_{\text{ice}} c_{\text{pi}} T_{\text{w}} \quad (20)$$

1.3.3 冰晶的黏附效应及侵蚀效应

一般认为水滴撞击表面后全面附着在表面并参与结冰相变过程, 但冰晶撞击后的物理过程与过冷水滴区别较大。当表面无液态水时, 冰晶撞击表面后发生反弹, 无冰晶黏附在表面; 而当冰晶撞击水膜表面时则会发生黏附现象。为表征冰晶撞击后的黏附效应, 可采用黏附系数进行计算。引入考虑冰晶融化且无过冷水滴的黏附系数 $\varepsilon_{\text{s,ic}}$ 与考虑过冷水滴和冰晶共同影响的黏附系数 $\varepsilon_{\text{s,d}}$, 最终采用的黏附系数 ε 取两者中的较大值:

$$\varepsilon = \max(\varepsilon_{\text{s,ic}}, \varepsilon_{\text{s,d}}) \quad (21)$$

$$\varepsilon_{\text{s,ic}} = (K_{\text{ic}} - 2) \eta_{\text{ic}}^3 + (3 - 2K_{\text{ic}}) \eta_{\text{ic}}^2 + K_{\text{ic}} \eta_{\text{ic}} \quad (22)$$

$$\varepsilon_{\text{s,d}} = K_{\text{d}} (Y_{\text{d}} + \eta_{\text{ic}} Y_{\text{ic}}) \quad (23)$$

式中: Y_{d} ——表面撞击粒子中过冷水滴的质量比; Y_{ic} ——表面撞击粒子中冰晶的质量比, Y_{d} 和 Y_{ic} 两者之和为 1; K_{ic} 和 K_{d} ——常数, K_{ic} 取为 2.5, 当表面温度小于水的相变温度时 K_{d} 取为 0, 当表面温度大于等于相变温度时 K_{d} 取为 0.6。

当计算混合条件下冰晶和过冷水滴撞击翼型表面时, 由于环境温度较低, 冰晶在运动过程中不融化, 黏附系数则简化为 $\varepsilon = K_{\text{d}} Y_{\text{d}}$ 。考虑冰晶黏附效应后, 参与结冰过程的冰晶量为:

$$\dot{M}_{\text{elt,ic,i}} = \varepsilon V_{\infty} C_{\text{IWC}} (1 - \eta_{\text{ic}}) \beta_{\text{ic}} \quad (24)$$

冰晶撞击表面过程与过冷水滴撞击表面过程的另一个较大区别在于冰晶撞击冰层表面时会发生侵蚀现象。由于冰晶是脆性粒子, 当表面有冰层时, 冰晶撞击会使一部分冰层飞溅出去, 导致结冰质量减少。对于冰晶侵蚀现象的研究通常采用侵蚀率 ε_{er} 表征侵蚀对结冰量的影响程度, 侵蚀率与冰晶撞击的速度、角度、质量等多个影响因素有关, 可根据试验数据建立相关经验关系式为:

$$\varepsilon_{\text{er}} = E' \left(\frac{V_{\text{ic}}}{V_0} \right)^2 \frac{y_{10}}{y_{10} - \min(y_1, y_{10})} [1 + (l_0 k)^2] \quad (25)$$

式中: y_1 ——滞留在冰层中的液态水占冰层的质量分数; $E' = 0.3$, $y_{10} = 0.6$, $l_0 = 0.015c$, $V_0 = 84.5$ 。

侵蚀的质量流量由侵蚀效率和冰晶撞击质量共同决定:

$$\dot{M}_{er} = \min(\dot{M}_{ice}, \min(1, \varepsilon_{er})\dot{M}_{elt,ic,i}) \quad (26)$$

1.3.4 结冰模型求解方法

混合条件结冰数学模型的具体求解方法为:首先求解驻点控制单元内的质量方程,得到驻点单元向上下表面流动的液态水质量;随后将翼型表面沿表面气流方向划分为上下表面,按照气流方向依次求解各控制单元内的控制方程,直至完成所有控制单元的求解。在每个控制单元中可根据式(27)进行求解。

$$\begin{aligned} \dot{M}_{ice} = & \{(\dot{Q}_{elt,ic,w} + \dot{Q}_{elt,ic,i} + \dot{Q}_{elt,d} + \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{evp} - \dot{Q}_{hte}) \\ & [(\dot{M}_{elt,ic,w} + \dot{M}_{elt,ic,i} + \dot{M}_{elt,d} + \dot{M}_{in} - \dot{M}_{evp})c_{pw}(T_w - T_m)]\} / \\ & [c_{pi}(T_w - T_m) - L_f - c_{pw}(T_w - T_m)] \end{aligned} \quad (27)$$

可假设表面温度 T_w 为融化温度 T_m , 计算得到 $\dot{M}_{ice}$, 此时有 3 种情况:

1) 若 $\dot{M}_{ice} > \dot{M}_{elt,ic,w} + \dot{M}_{elt,ic,i} + \dot{M}_{elt,d} + \dot{M}_{in}$ 则说明 $T_w = T_m$ 的假设不成立, 控制单元内的液态水全部冻结成冰, 此时 $T_w < T_m$, 设 $\dot{M}_{ice} = \dot{M}_{elt,ic,w} + \dot{M}_{elt,ic,i} + \dot{M}_{elt,d} + \dot{M}_{in}$, 迭代计算能量守恒方程可得到 T_w 。

2) 若 $0 < \dot{M}_{ice} < \dot{M}_{elt,ic,w} + \dot{M}_{elt,ic,i} + \dot{M}_{elt,d} + \dot{M}_{in}$ 则说明 $T_w = T_m$ 的假设成立, 计算结果合理。

3) 若 $\dot{M}_{ice} < 0$ 则说明 $T_w = T_m$ 的假设不成立, 控制单元内未发生结冰, 此时 $T_w > T_m$, 可设 $\dot{M}_{ice} = 0$, 计算能量守恒方程可得到 T_w 。

通过上述 3 种情况求解结冰热力学模型, 得到结冰表面每个控制单元的结冰量 $\dot{M}_{ice}$, 再减去侵蚀导致的质量损失便可获得单位时间内的结冰增长速率。结冰增长速率乘以结冰时间便可获得结冰质量。结冰厚度与结冰质量的关系为:

$$H = \frac{(\dot{M}_{ice} - \dot{M}_{er})t}{\rho_{ice}} \quad (28)$$

式中: t ——结冰时间, s; ρ_{ice} ——冰的密度, kg/m^3 。

2 方法验证

为验证本文算法的正确性, 采用多个试验算例进行计算, 并与试验结果和文献[15]结果进行对比。试验中采用相同的计算模型和气流条件, 模型为 NACA0012, 弦长为 0.9144 m, 来流马赫数为 0.163, 攻角为 0° 。本文计算中采用相同的网格和流场计算不同条件下的结冰外形。

验证算例 1 条件为: 水滴直径为 $20 \mu\text{m}$, 液态水含量 (liquid water content, LWC) 为 0.7 g/m^3 , 无冰晶, 温度为 266 K。验证算例 2 条件为: 水滴直径为 $20 \mu\text{m}$, LWC 为 0.7 g/m^3 , 冰晶直径为 $200 \mu\text{m}$, 冰晶水含量 (ice water content, IWC) 为 0.7 g/m^3 , 温度为 266 K。验证算例 3 条件为: 水滴直径为 $20 \mu\text{m}$, LWC 为 0.3 g/m^3 , 冰晶直径为 $150 \mu\text{m}$, IWC 为 0.7 g/m^3 , 温度为 260 K。结冰时间均为 600 s, 结冰外形与文献[15]、试验对比如图 3 所示。

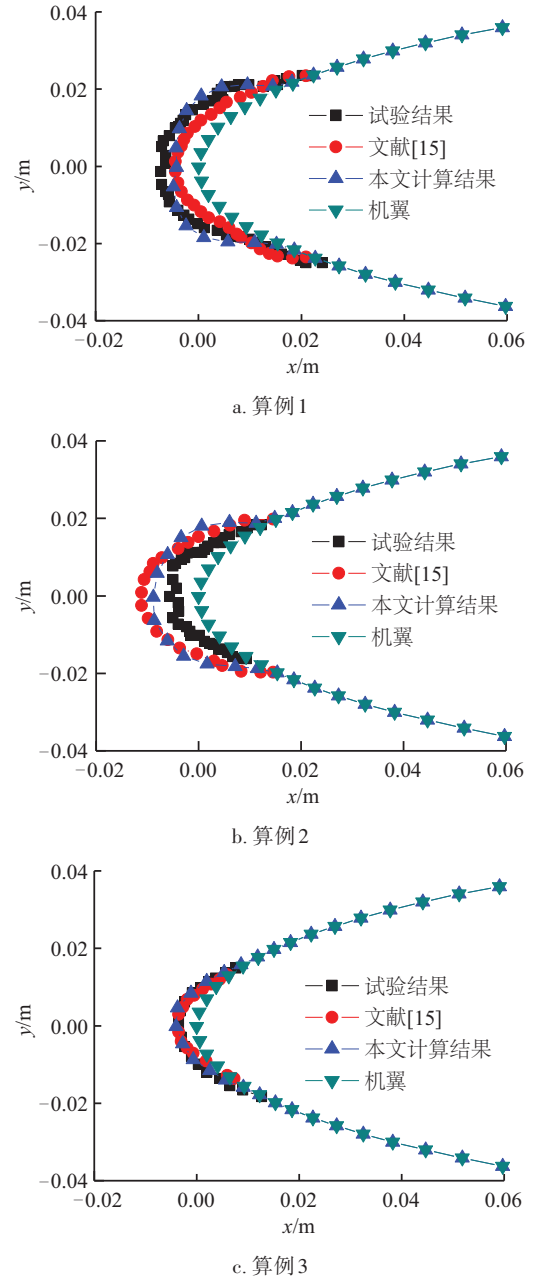


图3 验证算例结冰外形对比

Fig. 3 Comparison of icing shapes for validation examples

以上 3 个算例对比了不同条件下本文计算结果与试验结果, 算例 1 和算例 2 为明冰情况, 算例 3 为霜冰情况。可看出本文模拟结果与试验结果吻合较好。相较于文献中的计算结果, 纯水滴状态下本文的数值模拟结果更贴近试验值, 算例 2 中本文计算结果与试验也更加吻合。因此, 相较于文献中现有的计算模型, 本文提出的混合条件结冰模型计算结果更接近试验, 具有更优的精度。同时, 本文模型可模拟不同条件下的结冰外形, 并可适应过冷水滴结冰条件。

3 不同条件下结冰特性分析

采用本文混合条件下结冰生成方法开展风力机翼型表

面结冰特性计算,计算模型选择 DU 97-W-300 风力机翼型,弦长为 1.0 m,计算条件选择典型的风力机翼型结冰气象条件,来流风速为 50 m/s,攻角为 4° ,水滴直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$,LWC 为 0.5 g/m^3 ,冰晶直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$,IWC 为 0.5 g/m^3 ,温度为 266 K。计算得到的风力机翼型表面结冰外形如图 4 所示,结冰总时间为 1800 s,将其划分为 3 次,可得到每隔 600 s 的结冰外形。

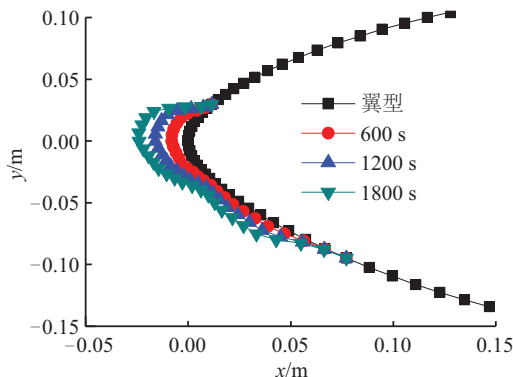


图 4 结冰外形随时间的变化

Fig. 4 Icing shapes change over time

从图 4 可看出,结冰主要发生在风力机翼型前缘位置,且随着时间的增加,表面结冰的外形逐渐增厚。结冰外形大致呈现上下较厚、中间较薄的趋势,类似羊角的形状,在这种情况下生成的是典型的明冰外形。这是由于过冷水滴和冰晶撞击时,一部分会立刻冻结,剩下的过冷水滴和冰晶则在表面形成液态水。液态水在气流作用下开始向两侧流动并逐渐冻结,最终形成如图所示的结冰外形。

为研究结冰模型中各参数对混合条件下风力机翼型表面结冰特性计算结果的影响,分别计算不同模型参数和初始条件下的结冰外形,分析参数影响的规律。计算过程中,各参数的选择均处于结冰气象条件包线范围内。

3.1 冰晶侵蚀效果对结冰特性的影响

不同侵蚀率下的结冰外形如图 5 所示,随着侵蚀率逐渐增加,整体结冰量逐渐减少。这是由于侵蚀作用增强,侵蚀

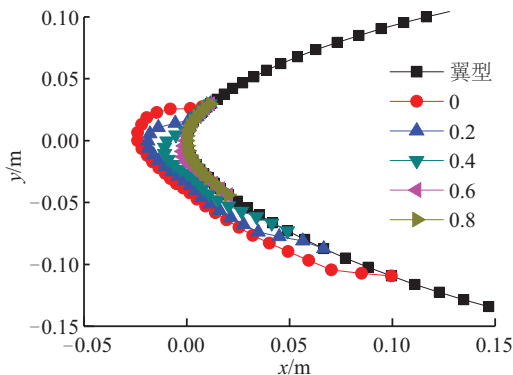


图 5 不同侵蚀率下结冰外形对比

Fig. 5 Comparison of icing shapes under different erosion rates

效应会在冰晶撞击过程中带走部分冰层,导致表面结冰量受侵蚀影响逐渐减小。侵蚀效应越强,结冰量越少。从本文计算结果可看出,当侵蚀率达到 0.8 时,表面将不再生成结冰,原有的结冰受侵蚀影响全部飞溅出去。翼型前缘的侵蚀率较小,而两侧较大。根据侵蚀量计算公式,侵蚀与撞击的切向速度有关,驻点附近切向速度较小,因此侵蚀量相对较小。

3.2 冰晶融化比对结冰特性的影响

不同融化率下的混合相结冰外形如图 6 所示,随着融化比逐渐增加,整体结冰量逐渐增加,且结冰范围逐渐扩大。这是由于随着融化比的增加,冰晶中液态水的占比逐渐提高,从而有更多的冰晶撞击表面并参与表面传热传质过程,这相当于表面收集的总水量增加,表面液态水在环境影响下向两侧流动并逐渐冻结,因此结冰量和结冰范围随融化比的增加而增加。

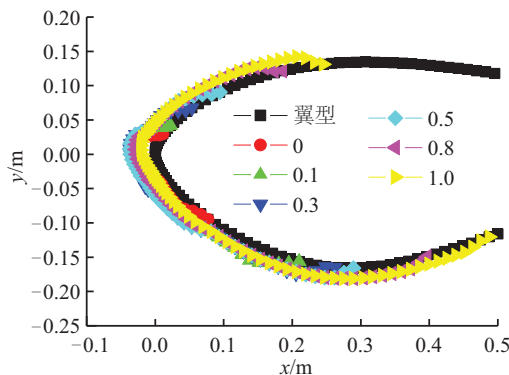


图 6 不同融化比下结冰外形对比

Fig. 6 Comparison of icing shapes under different melting ratios

值得注意的是,当融化比超过 0.5 时,结冰范围和结冰量会显著增加。这是由于冰晶撞击范围大于水滴撞击范围。当融化比较大时,大部分冰晶参与了结冰过程,未融化的冰晶侵蚀效应相应减少。更多融化冰晶参与到混合相结冰相变中,补充了液态水质量,增加了液态水质量和流动范围,从而使得冰晶的结冰质量和结冰范围大大增加。

3.3 冰晶黏附系数对结冰特性的影响

不同黏附系数下的混合相结冰外形如图 7 所示,随着黏附系数逐渐增加,整体结冰量逐渐增加,但结冰范围并未明显扩大。这是由于随着黏附系数的增加,撞击湿表面的冰晶更多地黏附在表面而非飞溅出去。表面黏附的冰晶逐渐增加导致输入冰晶的质量增加,更多冰晶参与表面传热传质过程,在外界环境作用下与水滴共同冻结,从而使表面结冰量增加。但在水滴撞击区域之外,由于无液态水,冰晶撞击干表面后发生飞溅,无冰晶参与结冰过程,因此黏附系数增加不会使水滴冻结区域之外产生结冰。

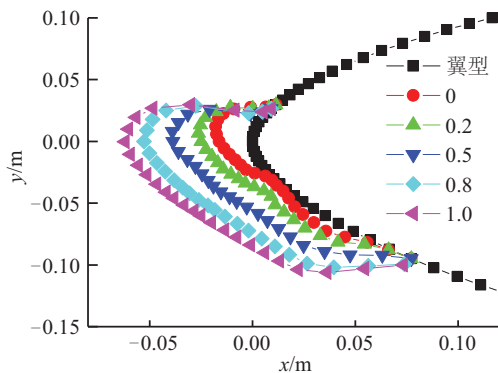


图7 不同黏附系数下结冰外形对比

Fig. 7 Comparison of icing shapes under different adhesion coefficients

3.4 温度对结冰特性的影响

不同温度(269、267、265、261、257、253 K)下的混合相结冰外形如图8所示。随着温度的降低,结冰范围逐渐减小,厚度逐渐增加。而当结冰温度接近相变温度时,结冰量和结冰范围均迅速扩大。这是因为结冰温度较低时翼型表面产生的是霜冰,撞击表面的液态水立刻冻结,因此结冰范围较小,结冰外形变化不大。而当结冰温度较高时产生的是明冰,过冷水滴和冰晶撞击翼型表面后形成液态水,液态水在表面气流吹袭作用下向翼型上下两侧流动,液态水流动使得表面液态水分布范围扩大。液态水下的流动使得冰晶撞击到表面液态水,更多冰晶参与到混合条件下的结冰相变中,冰晶撞击又补充了液态水质量,增加了液态水的质量和流动范围,进而促使更多冰晶进一步形成结冰。因此,当温度较高时,混合条件下的结冰与过冷水滴结冰存在较大差异,混合条件下的结冰量和结冰范围远大于过冷水滴结冰条件,在风力机除冰系统设计中需特别关注。

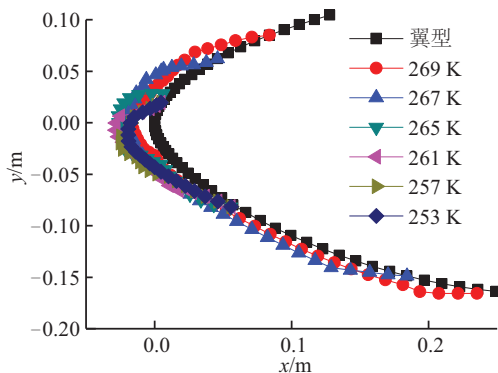


图8 不同温度下结冰外形对比

Fig. 8 Comparison of icing shapes under different temperatures

3.5 冰晶含量对结冰特性的影响

不同 IWC(0.1、0.3、0.5、0.8、1.0、1.2 g/m³)下的混合相结

冰外形如图9所示。随着 IWC 的增加,结冰量逐渐增加,但增幅不明显。这是由于混合条件下的结冰过程主要是由于水滴撞击引起,液态水含量不变的情况下水滴撞击导致的结冰量基本不发生改变,而冰晶含量的增加会使撞击在前缘部分的冰晶质量增加,但从冰晶黏附系数计算公式可看出,冰晶黏附系数与冰晶含量占比呈反比,结合考虑撞击质量和黏附系数,可发现混合相结冰的冰晶质量增加有限。冰晶的增加会引起更强的侵蚀效应,抵消冰晶增加带来的结冰增加。因此,随着 IWC 的增加,结冰厚度虽有所增加,但增幅有限。

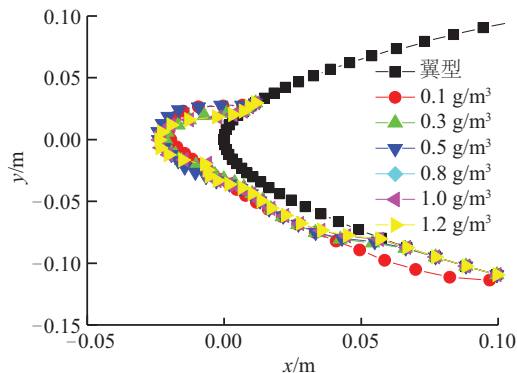


图9 不同IWC下结冰外形对比

Fig. 9 Comparison of icing shapes under different IWCs

3.6 冰晶直径对结冰特性的影响

不同冰晶直径(20、50、100、200 μm)下的混合相结冰外形如图10所示。从图10可看出,随着冰晶直径的增加,结冰量和结冰范围几乎不变。这是由于混合相中冰晶结冰过程主要由冰晶撞击表面液态水引起,冰晶直径的改变主要引起收集系数的变化,而在水滴条件不变的情况下表面液态水分布变化不大。因此,不同直径下冰晶收集系数虽有一定变化,但考虑到冰晶收集质量和黏附系数后,收集系数的增加对最终混合条件下结冰量的增加并不明显。因此,冰晶直径的增加对混合条件下的结冰外形影响较弱。

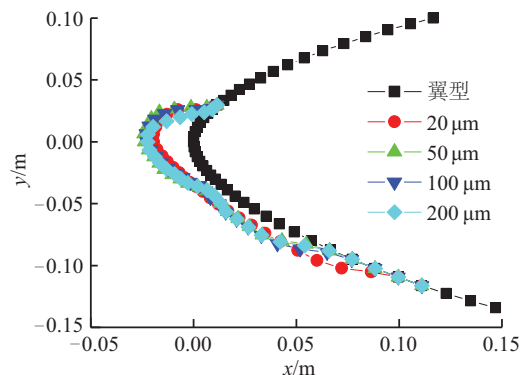


图10 不同冰晶直径下结冰外形对比

Fig. 10 Comparison of icing shapes under different ice crystal diameters

4 结 论

本文研究了冰晶-过冷水滴混合条件下风力机翼型的结冰特性,基于控制单元建立过冷水滴和冰晶撞击表面后的质量守恒和能量守恒方程,研究了冰晶撞击过程中的侵蚀和黏附现象,并给出控制方程的求解方法。为验证本文数值模型,对多种混合状态的结冰外形进行计算,验证了模型的准确性。基于本文数值模型,研究了不同参数条件下冰晶-水滴混合结冰外形以及环境温度、IWC、冰晶直径等结冰条件对翼型结冰外形的影响。得到主要研究结论如下:

1)提出的冰晶-过冷水滴混合条件结冰模型可模拟不同状态下的翼型结冰特性,性能优于现有模型。

2)冰晶-过冷水滴混合条件下,侵蚀率对结冰外形有一定影响,侵蚀率越大,结冰外形越小。冰晶运动过程中的融化比对结冰外形影响较大,融化比越高,表面液态水质量越大,结冰量和结冰范围也越大。冰晶黏附系数对结冰有一定影响,黏附系数越大,结冰量越多,但结冰范围几乎不变。

3)当混合相结冰温度较低时,结冰类型为霜冰,结冰外形变化较小。当结冰温度较高时,结冰类型为明冰,其结冰量和结冰范围相较于过冷水滴结冰条件有所增加,需引起重视。冰晶含量和冰晶直径的增加会使混合条件下表面结冰量增加,但增幅较小。

[参考文献]

- [1] MARTINI F, CONTRERAS MONTOYA L T, ILINCA A. Review of wind turbine icing modelling approaches [J]. *Energies*, 2021, 14(16): 5207.
- [2] BRAVIN M, STRAPP J W, MASON J. An investigation into location and convective lifecycle trends in an ice crystal icing engine event database [J]. *SAE technical paper series*, 2015, 1: 2015-1-2130.
- [3] LI Y, WANG S L, SUN C, et al. Icing distribution of rotating blade of horizontal axis wind turbine based on Quasi-3D numerical simulation [J]. *Thermal science*, 2018, 22(S2): 681-691.
- [4] 郑玉巧, 潘永祥, 魏剑峰, 等. 叶片翼型结冰形态及其气动特性[J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(4): 632-638.
ZHENG Y Q, PAN Y X, WEI J F, et al. Icing morphology and aerodynamic characteristics of blade airfoil [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(4): 632-638.
- [5] 杜静宇, 胡良权, 任鑫, 等. NREL 5 MW 风力机叶片外部翼型结冰模拟[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(12): 298-305.
DU J Y, HU L Q, REN X, et al. Icing simulation of airfoil of NREL 5 MW wind turbine blade [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(12): 298-305.
- [6] SHU L C, LIANG J, HU Q, et al. Study on small wind turbine icing and its performance [J]. *Cold regions science and technology*, 2017, 134: 11-19.
- [7] 易贤, 王开春, 马洪林, 等. 水平轴风力机结冰及其影响计算分析[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(6): 1052-1058.
YI X, WANG K C, MA H L, et al. Computation of icing and its effect of horizontal axis wind turbine [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2014, 35(6): 1052-1058.
- [8] BAUMERT A, BANSMER S, TRONTIN P, et al. Experimental and numerical investigations on aircraft icing at mixed phase conditions [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2018, 123: 957-978.
- [9] TRONTIN P, BLANCHARD G, VILLEDIEU P. A comprehensive numerical model for mixed-phase and glaciated icing conditions [C]//8th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Washington, D.C., USA, 2016: AIAA2016-3742.
- [10] TRONTIN P, VILLEDIEU P. A comprehensive accretion model for glaciated icing conditions [J]. *International journal of multiphase flow*, 2018, 108: 105-123.
- [11] HABASHI W, NILAMDEEN S. Multiphase approach toward simulating ice crystal ingestion in jet engines [J]. *Journal of propulsion and power*, 2011, 27(5): 959-969.
- [12] MALIK Y A, KÖBSCHALL K, BANSMER S, et al. Ice accretion compositions in ice crystal icing [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2024, 220: 124910.
- [13] MALIK Y A, BENNANI L, BANSMER S, et al. Experimental and numerical investigation of accretion inception and heat transfer physics in ice crystal icing [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2023, 214: 124364.
- [14] 黄平, 卜雪琴, 刘一鸣, 等. 混合相/冰晶条件下的结冰研究综述[J]. *航空学报*, 2022, 43(5): 112-130.
HUANG P, BU X Q, LIU Y M, et al. Mixed phase/glaciated ice accretion: review [J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2022, 43(5): 112-130.
- [15] 卜雪琴, 李皓, 黄平, 等. 二维机翼混合相结冰数值模拟[J]. *航空学报*, 2020, 41(12): 195-205.
BU X Q, LI H, HUANG P, et al. Numerical simulation of mixed phase icing on two-dimensional airfoil [J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2020, 41(12): 195-205.
- [16] 沈浩, 韩冰冰, 张丽芬. 航空发动机中冰晶结冰的研究进展[J]. *实验流体力学*, 2020, 34(6): 1-7.
SHEN H, HAN B B, ZHANG L F. Research progress of the ice crystal icing in aero-engine [J]. *Journal of*

- experiments in fluid mechanics, 2020, 34(6): 1-7.
- [17] 姜飞飞, 董威, 郑梅, 等. 冰晶在涡扇发动机内相变换热特性[J]. 航空动力学报, 2019, 34(3): 567-575.
- JIANG F F, DONG W, ZHENG M, et al. Phase change heat transfer characteristic of ice crystal ingested into turbofan engine[J]. Journal of aerospace power, 2019, 34(3): 567-575.
- [18] 谭燕. 基于欧拉方法的2维翼型冰晶结冰数值计算[J]. 航空发动机, 2020, 46(4): 30-35.
- TAN Y. Numerical calculation of 2D airfoil ice crystal icing based on Euler method [J]. Aeroengine, 2020, 46(4): 30-35.

ICING CHARACTERISTICS OF WIND TURBINE AIRFOIL UNDER ICE CRYSTAL-SUPERCOOLED DROPLET MIXED CONDITIONS

Wang Zhengzhi¹, Liu Yihang¹, Ru Yiyao¹, Zhang Dong¹, Qian Yaoru^{1,2}, Zhao Huanyu³

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

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

Abstract: The issue of wind turbine icing under the mixed-phase of ice crystals and supercooled water droplets is studied. The mechanism of wind turbine mixed-phase icing is analyzed, and the numerical simulation of airfoil icing on wind turbines is carried out. A particle motion trajectory equation is established using the Lagrangian method. The solution method for the control equation and the relevant definition of the collection coefficient are provided. A new mathematical model for icing under mixed-phase conditions is proposed, and the mass and energy conservation equations for liquid water on the surface of a wind turbine airfoil under mixed-phase conditions are established. The mathematical expressions for each equation are provided, and the physical phenomena of ice crystal adhesion and erosion are analyzed. The solution method for the icing growth model is provided. The accuracy of the icing model method proposed in this paper is demonstrated through comparison with experimental results. The icing characteristics of wind turbine airfoil surfaces under mixed-phase conditions are studied, and the impact of various initial parameters on icing characteristics is investigated. The research results indicate that erosion phenomena can affect surface icing. As the erosion rate increases, the surface icing decreases. The higher the adhesion coefficient and melting ratio, the greater the amount of icing. Different temperatures can lead to the formation of various ice forms on the airfoil. Rime ice forms at higher temperatures, while glaze ice forms at lower temperatures. However, with the increase in ice crystal content and diameter, the range and amount of icing change less. The research work provides a foundation for further research on wind turbine icing under mixed-phase icing conditions and the design of anti-icing and de-icing systems.

Keywords: wind turbines; airfoils; wind turbine blades; numerical methods; icing; mixing-condition; ice crystal