

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.04.015

叶片翼型结冰形态及其气动特性

郑玉巧, 潘永祥, 魏剑峰, 刘哲言

(兰州理工大学机电工程学院, 兰州, 730050)

摘要: 针对风力机叶片翼型形状对结冰过程的影响及其导致的气动特性变化问题, 采用欧拉法及热传质原理构建叶片结冰过程的数学模型并进行数值模拟分析。以 NH02 系列翼型族为例, 建立翼型曲率特征模型, 研究叶片关键参数如最大厚度对结冰量的影响机制, 预测了某翼型在不同工况下的冰形及位置, 探究了干净与结冰翼型的升、阻力特性变化规律。结果表明, 结冰量与叶片的相对厚度及最大相对厚度所在位置呈正相关性; 结冰导致升力系数变化范围为 5%~20%, 阻力系数为干净翼型的 1.4~2.45 倍; 结冰致使翼型失速迎角变小, 翼型提前进入失速状态。

关键词: 风力机; 翼型形状; 翼型结冰; 升、阻系数; 气动特性

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)04-0632-07

Icing Morphology and Aerodynamic Characteristics of Blade Airfoil

ZHENG Yuqiao, PAN Yongxiang, WEI Jianfeng, LIU Zheyuan

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China)

Abstract: To research the effects of wind turbine airfoil shape on icing progress and its resulting aerodynamic characteristics changes, Euler's method and heat and mass transfer principle are used to establish the blade icing process mathematical model and the icing process is numerically simulated. The NH02 series airfoil families are taken as an example, the airfoil curvature characteristic model is formed, the influence mechanism of the vital parameters, such as the maximum thickness, on icing quantity are researched. Ice shapes and positions are numerically predicted at different icing conditions, and the law of the lift and drag characteristics of clean and icing airfoils is investigated. The results show that the icing quantity is positively correlated with the blade thickness and the maximum thickness position. Significantly, the ice accretion results in a 5%—20% reduction in lift coefficient, and the drag coefficient is 1.4—2.45 times of a clean airfoil. Icing causes the airfoil stall attack angle to become smaller, and the airfoil enters a stall state earlier.

Key words: wind turbine; airfoil shape; airfoil icing; lift and drag coefficient; aerodynamic characteristics

近年来, 中国风电产业持续保持世界领先地位。为保证风电装机容量继续增长, 寒区成为风电产商风场选址的首选。寒区平均温度在 0℃以下, 服役在该区域风力机叶片极易发生结冰现象。叶片结冰致使翼型形状发生改变, 严重影响叶片的气动特性, 低风速段可使机组发电功率降低 60%; 另外叶片结冰导致风轮质量分布不平衡, 引起风力机

额外载荷与振动, 增加运维成本、降低使用寿命^[1-3]。

国内外研究人员对翼型结冰情况进行了大量的数值模拟和试验研究。Sagal 等^[4]改进经典 Messinger 模型提出防冰条件下的积冰预测方法。Etemadda 等^[5-6]通过对比数值模拟与实验结果研究结冰翼型的气动性能下降趋势。王超与朱程香^[7-8]

基金项目: 国家自然科学基金(51565028)资助项目; 兰州市人才创新创业项目(2018-RC-25)资助项目。

收稿日期: 2019-11-28; **修订日期:** 2020-02-28

通信作者: 郑玉巧, 女, 副研究员, E-mail: zhengyuqiaolut@163.com。

引用格式: 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 Yuqiao, PAN Yongxiang, WEI Jianfeng, et al. Icing morphology and aerodynamic characteristics of blade airfoil[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(4):632-638.

等基于经典 Messinger 模型对不同条件下过冷水滴的撞击结冰进行热质耦合计算,并计算分析结冰机翼的气动特性。梁健等^[9]结合人工实验室基于数值模型研究了结冰对风力机气动性能的影响。王绍龙等^[10]通过搭建结冰风洞试验系统以及旋转叶片试验台,结合回归正交实验获得结冰冰形曲线。付忠广等^[11]利用 Fluent 软件结合 $k-\omega$ SST 模型进行攻角对升阻系数与结冰对流场影响的数值分析。结冰类型与大气条件与运行工况有关,主要包括温度、压强、风速、液态水含量(Liquid water content, LWC)、液滴中值直径(Median volumetric diameter, MVD)、叶片曲率、热量、水滴收集系数和结冰时间^[12-13]。代表性的结冰类型有雨淞、雾淞。雨淞由高浓度的液态水在 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间形成透明、喇叭状的冰, MVD 范围为 $0\sim 500\text{ }\mu\text{m}$, 结冰密度超过 900 kg/m^3 。雾淞发生在温度低于 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时过冷却水滴与叶片碰撞立即冻结, LWC 范围为 $0\sim 5\text{ g/m}^3$, MVD 范围为 $0\sim 100\text{ }\mu\text{m}$, 结冰密度范围为 $100\sim 600\text{ kg/m}^3$, 参见文献^[14]。

上述研究虽进行了叶片翼型结冰预测及其气动性能分析,但对结冰翼型的形态与失速特性深入定量研究尚鲜。鉴于以上分析,本文对 NH02 系列翼型族在不同工况下的结冰形状、质量进行定量预测,同时对翼型失速特性进行模拟仿真研究,该研究可为服役于寒区的风力机叶片气动设计提供理论依据。

1 欧拉气液两相流结冰模拟

结冰过程的数值模拟求解包括流场计算、水滴计算和结冰计算。

1.1 空气流场计算

计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)用于数值求解流体与气体的动力学方程。本文借助三维 N-S 方程、质量守恒方程及能量守恒控制方程进行空气流场计算。在笛卡尔坐标系下,三维 N-S 方程可表示为

$$\frac{\partial \rho_a \mathbf{v}_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{v}_a \mathbf{v}_a) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_{ij} + \rho_a \cdot \mathbf{g} \quad (1)$$

式中: ρ_a 为空气密度; \mathbf{v}_a 为空气速度矢量; $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ 为应力张量,可表示为

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = -\delta_{ij} p_a + \mu_a \left(\delta_{jk} \nabla_k v_i + \delta_{ik} \nabla_k v_j - \frac{2}{3} \delta_{ij} \nabla_k v_k \right) = -\delta_{ij} p_a + \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (2)$$

式中: p_a 为空气静压; μ_a 为空气动力黏滞系数; $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ 为剪应力张量。能量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial \rho_a E_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{v}_a H_a) = \nabla \cdot [K_a (\nabla T_a) + \mathbf{v}_i \boldsymbol{\tau}_{ij}] + \rho_a \mathbf{g} \cdot \mathbf{v}_a \quad (3)$$

式中: E_a 表示流入流场内部的总能量; H_a 表示总焓; T_a 表示空气温度。

在高雷诺数下,叶片附近是典型的湍流。本文选用 Spalart Allmaras 湍流模型进行研究,该模型是求解运输方程得到湍流运动黏度的单方程湍流模型,主要分析自由剪切流和高雷诺数时近壁区流动情况,具有计算成本低、精度高的优点。基于能量方程式(3),选用 SIMPLE 算法,以二阶精度求解叶片壁面间的热通量。升、阻力系数可表示为

$$C_l = \frac{2L}{\rho_{a,\infty} v_{a,\infty}^2 A_{\infty}} \quad (4)$$

$$C_d = \frac{2D}{\rho_{a,\infty} v_{a,\infty}^2 A_{\infty}} \quad (5)$$

式中: L 与 D 分别为升力和阻力; A_{∞} 为参考面积,与弦长、叶展长度有关。

1.2 水滴收集系数计算

水滴收集系数是一个无量纲参量,表示水滴与叶片的有效撞击,目前水滴撞击特性的计算方法主要有 Lagrange 法和 Euler 法^[12]。因 Euler 法无须插值计算,且计算效率高,因此本文选用该方法建立过冷却水滴的运动方程。结冰问题中,空气视叶片为绕流壁面,水滴视叶片为吸收型边界^[15],水滴收集系数可表示为

$$\beta = -\frac{\alpha \mathbf{v}_d \cdot \mathbf{n}}{\text{LWC} \cdot v_{\infty}} \quad (6)$$

式中: α 为水体积分数; \mathbf{v}_d 为液滴速度; \mathbf{n} 为表面法向量。

1.3 结冰计算

采用质量与能量守恒方程求解表征叶片结冰过程中复杂的关键参数。基于水膜中的热传质模型^[7],撞击在叶片表面的水滴流经控制体,伴随着部分水滴蒸发、回流,部分凝固成冰附着于叶片表面。

质量守恒方程可表示为

$$\rho_f \left[\frac{\partial h_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}_f h_f) \right] = v_{\infty} \cdot \text{LWC} \cdot \beta - \dot{m}_{\text{evap}} - \dot{m}_{\text{ice}} \quad (7)$$

式中: h_f 代表水膜高度; β 代表吸收效率; \mathbf{v}_f 代表溢流水速度; \dot{m}_{evap} 代表蒸发水质量; \dot{m}_{ice} 代表结冰质量。能量守恒方程可表示为

$$\rho_f \left[\frac{\partial h_f c_f \tilde{T}_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}_f h_f c_f \tilde{T}_f) \right] =$$

$$\left[c_f(\tilde{T}_\infty - \tilde{T}_f) + \frac{\|\mathbf{v}_d\|^2}{2} \right] v_\infty \cdot \text{LWC} \cdot \beta - L_{\text{evap}} \dot{m}_{\text{evap}} + (L_{\text{fus}} - c_s \tilde{T}) \dot{m}_{\text{ice}} + \sigma \epsilon (T_\infty^4 - T_f^4) - c_h (\tilde{T}_f - \tilde{T}_{\text{re}}) + Q \quad (8)$$

式中： ρ_f 为流体密度； c_f 为溢流水换热系数； c_s 为固体换热系数； c_h 表示高为 h 的水膜的换热系数； ϵ 表示固体辐射传热率； σ 表示斯蒂芬-玻尔兹曼常数（ $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ）； L_{evap} 为单位质量液态水转换为水蒸气相变过程的能量系数； L_{fus} 为单位质量液态水转换为冰相变过程的能量系数； \tilde{T} 为控制体温度； \tilde{T}_{re} 为回流至控制体的流体温度； T_∞ 表示参考温度； v_∞ 表示参考速度； Q 表示冻结水的能量。

本研究采用单时间求解步估算各翼型结冰质量，多时间求解步精确预测结冰形状及位置，用于气动性能的研究^[14]。

1.4 网格划分

选取NH02系列翼型族进行模拟仿真实验，翼型弦长均为1 m。为保证网格分辨率及计算精度，翼型表面区域采用小尺寸网格划分，离翼型远的计算区域采用大尺寸网格划分，以此要求借助ICEM为每个翼型划分结构网格。对于该系列翼型，创建直径为20 m的圆形流场，沿叶片展向拉伸0.25 m。第一层网格厚度为 $6.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ ，沿叶片弦长方向以几何级数格式进行 360° 离散，节点增长率为1.05，共拉伸80层。因结冰主要发生在叶片前缘，为获取精确冰形及质量，将前缘以0.001 m为准均等离散，每个离散单元尺寸沿着翼型表面逐渐改变。对于NH02_21翼型，三维结构网格数量为147 600，最小角度为 40.5° ，网格整体最小质量为0.65。翼型的计算网格见图1。

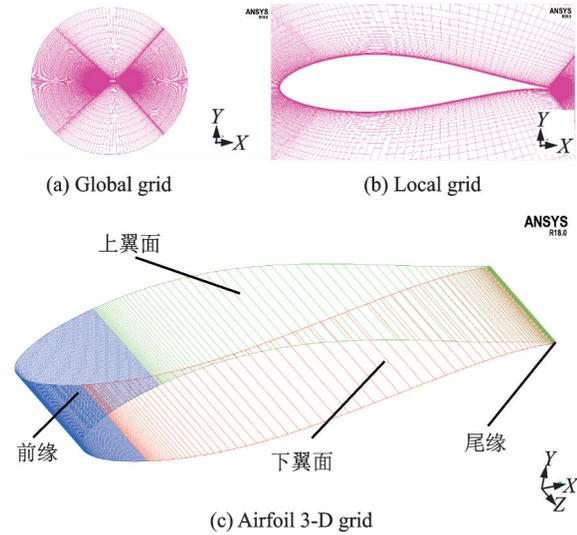


图1 翼型计算网格

Fig.1 Computing grid of airfoil

2 翼型形状对结冰的影响

本文通过数值模拟方法与文献[9]的结冰风洞试验结果进行对比分析以验证数值模拟结冰形态的正确性。文献中风力机结冰试验在人工气候室内进行，选取NE-100叶片进行实验，结束后获得各截面处的结冰形态。考虑到叶尖积冰现象愈加明显且具代表性，本文通过仿真求解翼型NA-CA4409翼型在叶尖位置的结冰形态，并与试验结果进行对比。文献[9]的风洞结冰测试条件为：温度为 -2 ， -6 和 -10°C ；风速为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，转速为 494 r/min ，MVD为 $20 \mu\text{m}$ ，LWC为 0.71 g/m^3 。

2.1 验证分析

本文在求解结冰形态时，近壁面雷诺数 $Re=4.65 \times 10^6$ ，在迎角 0° 进行温度分别为 -2 ， -6 和 -10°C 的结冰形态求解。文献[9]试验获得的结冰形态如图2(a)所示，仿真得到的结冰分布情况与文献试验结果对比如图2(b)所示。

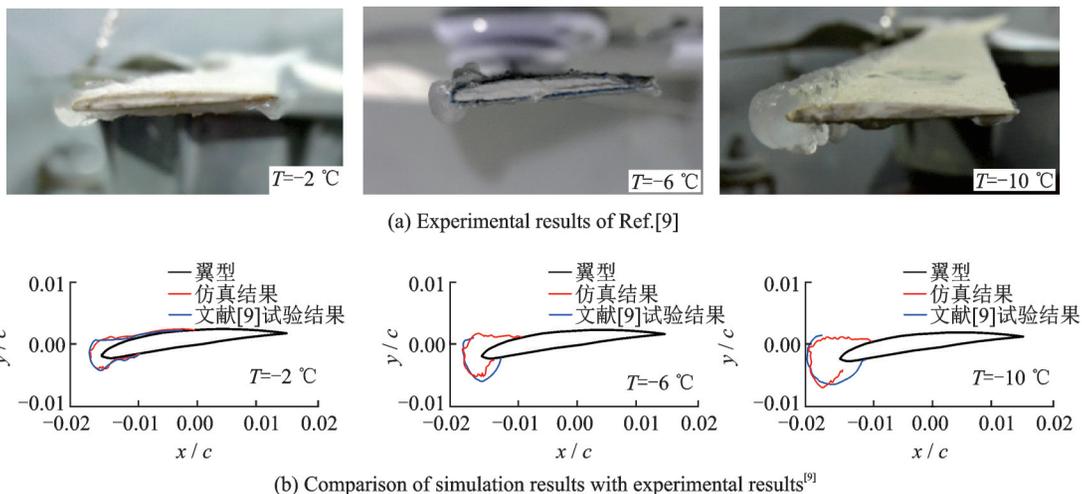


图2 人工结冰试验^[9]与仿真结果对比

Fig.2 Comparison of artificial icing experiments^[9] and simulation results

由仿真结果与文献[9]的结冰试验结果对比分析可知,仿真结冰形状与结冰位置与试验结果在一定程度上吻合性较好,进而开展后续翼型形状参数对结冰的影响及结冰翼型的失速特性影响研究。

2.2 翼型曲率特征模型

研究叶片翼型形状对冰形影响,将翼型轮廓曲线进行特征点分割建立翼型的曲率特征模型。翼型的曲率特征图如图 3 所示。

翼型前缘曲率大小直接影响翼型与过冷却水滴的碰撞面积,又因曲率大小由上翼面最高点 $U(X_u, Y_u)$ 点,下翼面最低点 $B(X_b, Y_b)$ 点决定,故使用该两点将翼型轮廓线进行分段划分,其中 X_u, X_b 与 Y_u, Y_b 分别为 U 点和 B 点的横、纵坐标。以翼型前缘 $(0, 0)$ 点为基准,建立 X, Y 轴; U 点与 B 点

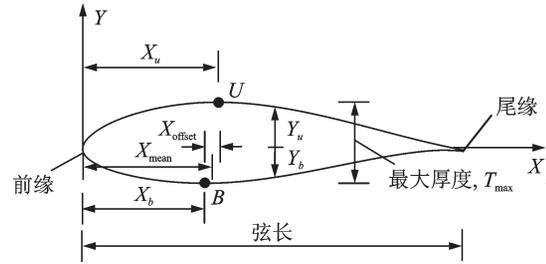


图 3 翼型的曲率特征图

Fig.3 Curvature characteristic of airfoil

的横坐标之差为 X_{offset} ,纵坐标之差为 Y_{offset} ,上翼面与下翼面的距离最大值为 T_{max} , T_{max} 所在位置在 X 轴上投影的平均值为 X_{mean} , T_{max} 所在位置在 Y 轴上投影的平均值为 Y_{mean} 。翼型曲率参数测试条件见表 1。

表 1 翼型曲率参数测试条件

Table 1 Tested conditions of airfoil curvature parameters

曲率参数	T_{max}	X_{offset}	X_{mean}	X_b	X_u
取值范围	0.149 91~0.349 92	0.003 20~0.056 82	0.296 58~0.341 38	0.294 15~0.301 65	0.300 00~0.358 47

2.3 数值模拟及结果分析

依据表 2 的测试条件,对该叶片翼型族进行结冰仿真研究,得到 $T_{max}, X_{mean}, Y_{mean}, X_{offset}$ 和 Y_{offset} 五个关键参量的归一化参量与结冰量之间的量化关系,并采用线性拟合得到各参数对应的一次趋势线与不加权调整后的相关系数 R^2 。 $T_{max}, X_{mean}, Y_{mean}, X_{offset}$ 和 Y_{offset} 与结冰质量之间的关系如图 4 所示。图 4 为翼型形状参数对结冰的影响曲线,横轴代表翼型的形状参量,纵轴代表结冰质量。其中, T_{max} 与 Y_{offset} 两参数的趋势线斜率皆为 0.15,表明两函数增长速度相同,且结冰量与该两参数呈正相关性;相关系数分别为 0.871 2 与 0.872 7,表明 T_{max} 与 Y_{offset} 对结冰量影响显著(相关系数大于 0.74 呈强相关性); X_{mean} 趋势线斜率为 -0.6,表明结冰量与该参数呈负相关性,即最大厚度距原点越远,前缘曲率越小,结冰量越小; X_{mean} 与 Y_{mean} 相关系数分别为 0.721 2 与 0.799 7,表

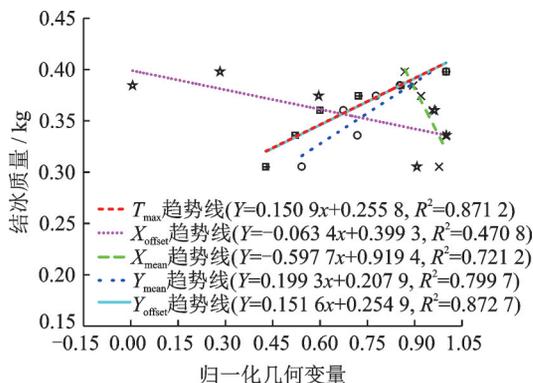


图 4 翼型形状参数对结冰的影响

Fig.4 Effect of airfoil shape parameters on icing

明两参数对结冰量影响较明显; X_{offset} 的趋势线斜率为 -0.06,结冰量与该参数呈负相关性,即 up 点与 bottom 点偏移距离越大,前缘曲率越小,结冰量越少; X_{offset} 趋势线相关系数为 0.470 8,表明该参数对结冰量影响很小。

由于 T_{max} 对结冰量影响显著,选用 T_{max}/X_{mean} 表征翼型最大厚度所在位置探究其位置对结冰质量的影响,求解结果如图 5 所示。图 5 显示, T_{max}/X_{mean} 越大,表示翼型最大厚度越接近于翼型前缘,翼型与过冷却水滴碰撞面积越大,导致更多的过冷却水吸附于翼型表面,形成更大程度的结冰。由趋势线的斜率、相关度(斜率为 0.11, $R^2=0.871 6$)可知, T_{max}/X_{mean} 对结冰质量呈正相关性且影响显著。

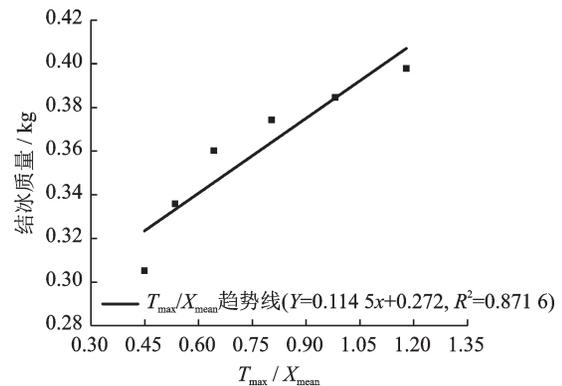


图 5 T_{max}/X_{mean} 对结冰质量的影响

Fig.5 Effect of T_{max}/X_{mean} on icing mass

3 翼型的气动特性

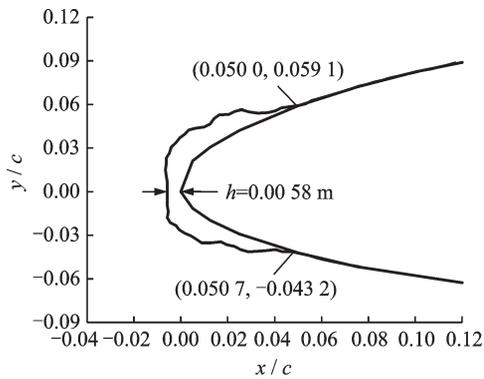
风力机叶片结冰过程中,翼型的形状随着结冰

时间发生变化。借助 Fluent 对不同结冰工况下的结冰翼型进行升、阻特性仿真模拟分析,并与干净翼型升、阻系数变化规律进行比较进而预测翼型的气动特性。

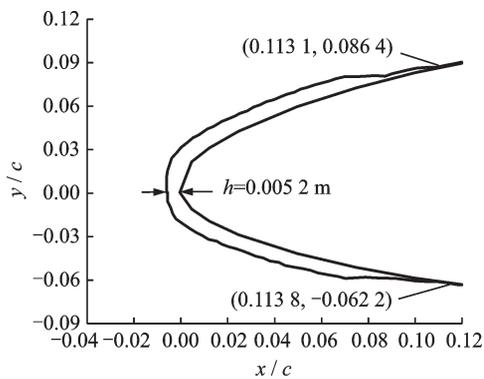
3.1 翼型结冰形态仿真结果

结冰现象发生在叶片表面,气动参数改变直接影响流场、热通量和水滴的撞击特性。采用多时间求解步法,分别在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、液态水含量为 0.5 g/m^3 与 1 g/m^3 工况下该系列翼型进行 30 min 结冰过程模拟仿真,求得其冰形截面曲线如图 6 所示。

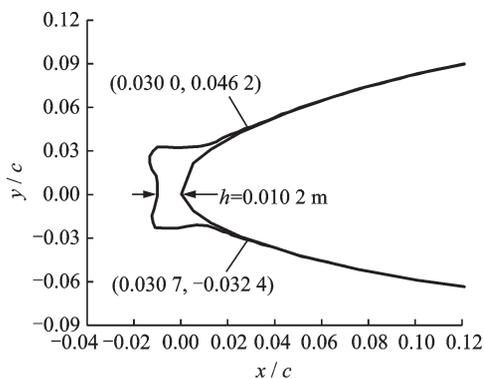
图 6(a)与图 6(b)为典型的雾凇,图 6(c)与图 6(d)为典型的雨凇。在图 6 中,横、纵轴分别代表翼型前缘 x, y 坐标相对于 1 m 弦长的无量纲坐标, h 为驻点处的结冰厚度。对比图 6(a)与图 6(c),在固定 LWC 和 MVD 情况下,温度越低,结冰厚度越厚,



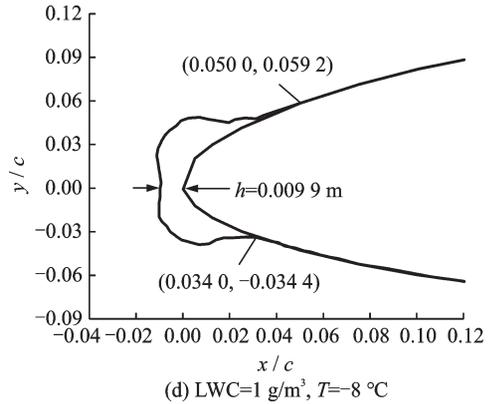
(a) LWC=0.5 g/m³, T=-4 °C



(b) LWC=1 g/m³, T=-4 °C



(c) LWC=0.5 g/m³, T=-8 °C



(d) LWC=1 g/m³, T=-8 °C

图 6 不同工况下冰形的数值预测结果

Fig.6 Numerical prediction results of ice shape under different working conditions

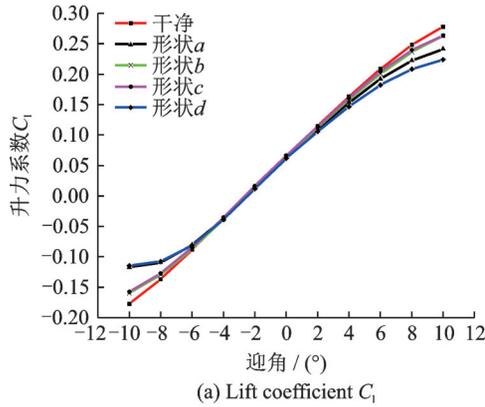
结冰范围越小。 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, LWC 浓度显著影响结冰累积。对比图 6(a)与图 6(b)可知, LWC 浓度越大,单位时间碰撞叶片表面的水滴越多,叶片表面吸收的液态水越多,结冰质量越大,考虑到飞溅和回流效应,结冰覆盖的面积越大。 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,出现明显的角状冰形,结冰的厚度受 LWC 浓度影响。对比图 6(c)与图 6(d)可知, LWC 浓度越大,结冰质量越大,结冰覆盖面积越大。

3.2 结冰翼型的气动特性

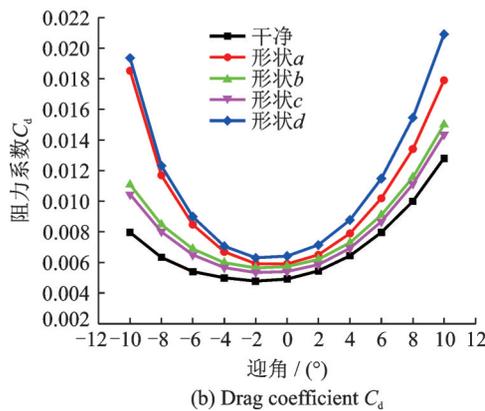
干净翼型的失速迎角约为 16° ,故依据图 6 所示获取的 4 种冰形,在 Fluent 环境下进行 4 种冰形与干净翼面的升、阻特性对比研究,分析多迎角下 ($-16^{\circ}\sim 16^{\circ}$) 的升、阻力系数变化规律。当迎角增大到 12° 时,4 种结冰翼型升、阻系数计算发散,表明此时在迎角变化一个步长内,空气不再附着翼型表面流过,翼型前缘后方产生大量的涡并产生反向流动,致使升阻比急剧减小,进入失速状态。迎角 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之间对应的升、阻系数变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,结冰可降低翼型升力系数,同时增加其阻力系数。冰形变化引起周围流场的变化,包括驻点的位置变化和边界层分离现象。数值模拟的升力系数变化范围为 $5\%\sim 20\%$,结冰翼型的阻力系数为干净翼型的 $1.4\sim 2.45$ 倍,且呈现雨凇结冰时,升力系数减小和阻力系数增大的趋势变化显著。

由于结冰类型不同,失速情况随之不同,为深入研究翼型失速特性,求解不同类型结冰翼型的失速攻角,因此在 Fluent 环境下,在迎角 16° 附近分别求解 4 种结冰翼型的速度云图,研究气流在结冰翼型表面的流动情况,以此来确定翼型的失速情况,进而大致确定结冰翼型的失速攻角。4 种结冰翼型的速度云图如图 8 所示。



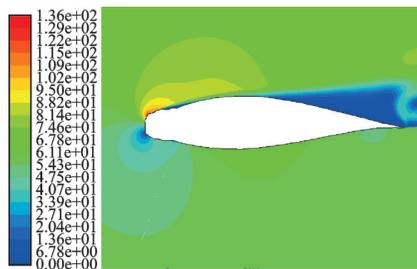
(a) Lift coefficient C_l



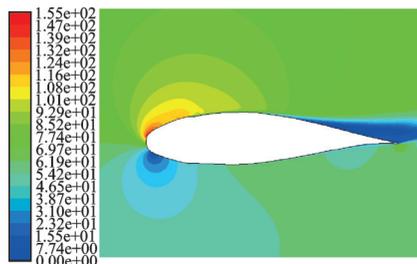
(b) Drag coefficient C_d

图 7 干净与结冰翼型的升、阻力特性对比

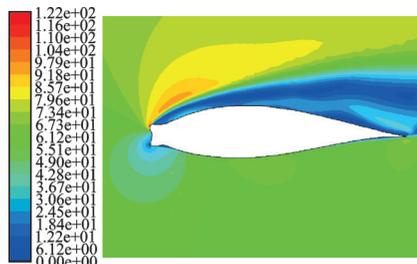
Fig.7 Lift and drag characteristics comparison of clean and icing airfoils



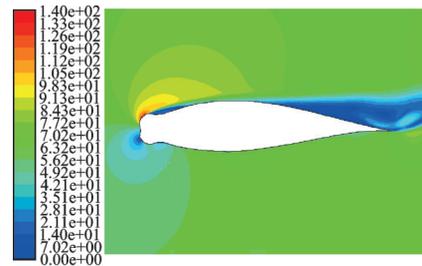
(a) Icing condition of Fig.6(a)



(b) Icing condition of Fig.6(b)



(c) Icing condition of Fig.6(c)



(d) Icing condition of Fig.6(d)

图 8 结冰翼型外部速度流场分布图

Fig.8 The external velocity flow field distributions of icing airfoils

图 8 为上述 4 种冰形分别对应迎角 $12^\circ, 14^\circ, 12^\circ$ 与 10° 时的速度云图,可明显看出各结冰翼型迎风面驻点处流场速度分布不同,尾缘处的流场分布也不同。雾凝结冰时,翼型形状改变不甚明显,翼型上表面离尾缘 $1/2$ 处气流与翼型表面开始分离,见图 8(a)与图 8(b),翼型处于失速状态,特别是结冰翼型图 6(a)前缘形状改变较大,尾缘处已生成明显的涡,导致其失速攻角更小;雨凝结冰时,翼型上表面气流呈现完全分离状态,出现明显的二次涡,翼型处于深度失速状态,见图 8(c);对比图 8(a)与图 8(c),虽然两种结冰翼型都在 12° 时发生失速,但雨凝结冰导致翼型失速更深,故雨凝相较于雾凝使翼型失速攻角更小;对比图 8(c)与图 8(d),雨凝情况下当冰角更加明显时,结冰翼型的失速攻角更小,二次涡出现得更早,见图 8(d)。

4 结 论

(1)叶片的厚度与最大厚度距离翼型前缘的位置对结冰量的影响最大,叶片越厚,翼型与水滴的碰撞面积越大,促使更多的液态水吸附于叶片表面,导致更大程度的结冰。

(2)积冰出现位置在驻点附近,主要受来流速度与攻角控制;温度变化影响叶片表面的结冰形状,结冰区和结冰厚度,在相同 LWC 和定 MVD 下,温度越低,对流换热过程加强,角状冰形越明显,结冰区域减小,叶片结冰厚度增加趋势明显。

(3)结冰类型与温度有关,随着温度降低,出现明显的雾凝特征,升力系数变化范围为 $5\% \sim 20\%$,阻力系数为干净翼型的 $1.4 \sim 2.45$ 倍,当出现雨凝冰形时,升力系数急剧减小,阻力系数随之显著增加,结冰导致失速迎角变小,进而加速边界层分离现象。

参考文献:

[1] FAKOREDE O, FEGER Z, IBRAHIM H, et al. Ice protection systems for wind turbines in cold climate:

- Characteristics, comparisons and analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 662-675.
- [2] ZHENG Yuqiao, ZHAO Rongzhen. Characteristics for wind energy and wind turbines by considering vertical wind shear[J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(6): 2393-2398.
- [3] 胡良权, 陈进格, 沈昕, 等. 结冰对风力机载荷的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(8): 904-909.
HU Liangquan, CHEN Jingge, SHEN Xin, et al. Load of wind turbine affected by icing[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, 52(8): 904-909.
- [4] SAGOL E. Three-dimensional numerical prediction of icing related power and energy losses on a wind turbine[D]. Montreal: University of Montreal, 2014.
- [5] ETEMADDA R M, HANSEN M O L, MOAN T. Wind turbine aerodynamic response under atmospheric icing conditions[J]. *Wind Energy*, 2014, 17(2): 241-265.
- [6] HOMOLA M C, WALLENIUS T, MAKKONEN L, et al. The relationship between chord length and rime icing on wind turbines[J]. *Wind Energy*, 2010, 13(7): 627-632.
- [7] 王超, 常士楠, 杨波, 等. 机翼防冰过程中冰脊问题的数值分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(6): 776-781.
WANG Chao, CHANG Shinan, YANG Bo, et al. Investigation of runback ice during aircraft anti-icing process[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(6): 776-781.
- [8] 朱程香, 孙志国, 付斌, 等. 水滴多尺寸分布对水滴撞击特性和结冰增长的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(5): 620-624.
ZHU Chengxiang, SUN Zhiguo, FU Bin, et al. Effects of multi-dispersed droplet distribution on droplet impingement and ice accretion[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 42(5): 620-624.
- [9] 梁健, 舒立春, 胡琴, 等. 风力机叶片雨淞覆冰的三维数值模拟及试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(15): 4430-4436.
LIANG Jian, SHU Lichun, HU Qin, et al. 3-D numerical simulations and experiments on glaze ice accretion of wind turbine blades[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(15): 4430-4436.
- [10] 王绍龙, 李岩, 田川公太郎, 等. 旋转叶片结冰风洞试验研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(6): 1229-1236.
WANG Shaolong, LI Yan, TAGAWA Kotaro, et al. A wind tunnel experimental study on icing distribution of rotating blade[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(6): 1229-1236.
- [11] 付忠广, 石黎. 覆冰条件下风力机翼型气动性能的研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(3): 609-616.
FU Zhongguang, SHI Li. Aerodynamic performance of wind turbine airfoil under icing condition[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(3): 609-616.
- [12] 张威, 林永峰, 陈剑平. 基于欧拉方法的旋翼翼型结冰数值模拟及参数影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(3): 375-380.
ZHANG Wei, LIN Yongfeng, CHEN Jianping. Numerical simulation of ice accretion and parameter effects based on eulerian droplet model[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(3): 375-380.
- [13] BATTISTI L. Wind turbines in cold climates: Icing impacts and mitigation systems[M]. Switzerland: Springer, 2015.
- [14] IBRAHIM G M, POPE K, MUZYCHKA Y S. Effects of blade design on ice accretion for horizontal axis wind turbines[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2018, 173: 39-52.
- [15] 杨胜华, 林贵平, 申晓斌. 三维复杂表面水滴撞击特性计算[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(2): 284-290.
YANG Shenghua, LIN Guiping, SHEN Xiaobin. Water droplet impingement prediction for three-dimensional complex surfaces[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(2): 284-290.

(编辑:孙静)