

机翼混合相冰晶结冰现象的数值研究

钟富豪¹, 刘森云², 刘秀芳^{1,3}, 代欣波², 陈佳军¹, 苗庆硕¹, 易贤², 侯予^{1,3}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国空气动力研究与发展中心

结冰与防除冰重点实验室, 621000, 四川绵阳; 3. 西安交通大学深低温技术与

装备教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为探究冰晶与过冷水滴共存时的混合相结冰特性, 基于 FENSAP-ICE 结冰计算平台, 以 NACA0012 翼型为研究对象, 采用阻力系数对非球形冰晶的运动过程进行修正, 考虑了冰晶黏附效应和侵蚀效应的影响, 建立了欧拉框架下冰晶运动、碰撞、黏附、结冰和侵蚀全物理过程的混合相结冰数值计算方法。分析了冰晶质量浓度(ice water content, IWC)、液态水质量浓度(liquid water content, LWC)以及冰晶黏附和侵蚀效应对结冰形态和结冰厚度的影响规律, 对比了 NTI 和 NRC 两种冰晶黏附模型的适用条件。研究表明: 当总水含量(total water content, TWC)一定时, 随着冰水含量比 IWC 与 LWC 之比的增加, 结冰覆盖面积逐渐减小, 最大结冰厚度先增大后减小, 冰形由冠状逐渐变为尖角状, 当 IWC 与 LWC 分别为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 驻点处的结冰厚度达到最大值; 对于高 IWC 工况, NRC 黏附模型的驻点结冰厚度更接近实验结果, 误差为 7.2%; 对于低 IWC 工况, NTI 模型与 NRC 模型的驻点结冰厚度接近; 侵蚀作用主要影响翼型驻点附近的区域, IWC 或 LWC 的增大均会加剧侵蚀效应。研究可为飞行器高效防除冰系统的设计提供理论依据。

关键词: 混合相; 冰晶结冰; 黏附; 侵蚀; 数值模拟

中图分类号: V211.41 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202410015 **文章编号:** 0253-987X(2024)10-0168-10

Numerical Study on Mixed-Phase Ice Crystal Icing on Airfoils

ZHONG Fuhao¹, LIU Senyun², LIU Xiufang^{1,3}, DAI Xinbo²,

CHEN Jiajun¹, MIAO Qingshuo¹, YI Xian², HOU Yu^{1,3}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing of China Aerodynamics Research and Development Center

(CARD), Mianyang, Sichuan 621000, China; 3. MOE Key Laboratory of Cryogenic Technology and

Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To explore the characteristics of mixed-phase icing when ice crystals and supercooled water droplets coexist, a numerical study is conducted utilizing the FENSAP-ICE simulation platform. The NACA0012 airfoil is selected as the subject of the study. The motion of non-spherical ice crystals is adjusted by modifying the drag coefficient, and both ice crystal adhesion and erosion effects are taken into consideration. Within the Euler framework, a comprehensive numerical calculation method is developed to simulate the complete physical process of ice crystal

收稿日期: 2024-03-14。 作者简介: 钟富豪(2000—), 男, 硕士生; 刘秀芳(通信作者), 女, 副教授, 博士生导师。 基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52076164); 国家科技重大专项资助项目(J2019-III-0010-0054); 结冰与防除冰重点实验室开放课题资助项目(IADL20220107)。

网络出版时间: 2024-06-02

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20240531.1109.002>

motion, collision, adhesion, accretion, and erosion. The influence of ice water content (IWC), liquid water content (LWC), as well as ice crystal adhesion and erosion effects on the shape and thickness of icing is analyzed. The applicability conditions of two ice crystal adhesion models, namely NTI and NRC, are compared. The research findings suggest that, when maintaining a constant total water content (TWC), an increase in the ratio of IWC to LWC leads to a gradual reduction in the ice coverage area. Additionally, the maximum ice thickness initially increases and then decreases, accompanied by a transition in ice shape from crown to angular. The maximum ice thickness at the stagnation point is achieved when IWC and LWC are $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $1.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. Under high IWC conditions, the NRC adhesion model demonstrates a stagnation point ice thickness that closely aligns with experimental results, with an error of 7.2%. Conversely, under low IWC conditions, both the NTI and NRC models yield similar stagnation point ice thicknesses. The erosion effect primarily affects the region near the airfoil's stagnation point, and an increase in IWC or LWC intensifies this erosion effect. This study provides a theoretical foundation for the design of an efficient anti-icing system for aircrafts.

Keywords: mixed phase; ice crystal icing; adhesion; erosion; numerical simulation

当飞机穿越含有过冷水滴或冰晶的云层时,可能面临严重的结冰现象。早期的研究认为飞行器结冰起因于过冷水滴结冰,过冷水滴结冰是低空云层中的过冷水滴撞击至飞行器迎风表面凝结产生的结冰现象^[1]。然而,自 20 世纪 90 年代以来,海拔 7 km 以上,在过冷水滴难以存在的高空,依然发生了多起不明原因的发动机功率损失事件,这引起了航空科研人员的广泛关注。对多起发动机推力损失事件的调查结果表明:发动机吸入冰晶所产生的黏附结冰是导致该类故障的主要原因^[2]。后续深入研究发现,纯冰晶以固相的形式撞击冷表面会发生反弹,不会发生黏附结冰现象,液态水的存在是冰晶黏附结冰的必要条件^[3]。由于液态水润湿了构件表面,来流中的冰晶在撞击表面过程中才可能发生黏附结冰现象。冰水混合相的形成可分为以下两种情况:一是对流云层中存在既有冰晶又有水滴的混合相冰晶结冰气象条件,会引起机翼、尾翼等冷表面结冰;二是当冰晶被吸入发动机内流道后,在热气流作用下部分融化,形成冰水混合相,可能导致发动机核心部件结冰。机翼结冰会导致飞机气动性能恶化,发动机核心部件结冰则会引发喘振、失速、燃烧室熄火等严重后果,二者均会对飞行安全构成重大威胁^[4-5]。

混合相冰晶结冰的实验研究需要在结冰风洞中进行,由于结冰气象条件的地面模拟和冰晶制备难度较大,制约了混合相冰晶结冰地面模拟实验平台的建设^[6]。数值模拟是目前开展混合相冰晶结冰研究的重要手段^[7-10]。根据混合相冰晶结冰发生的物理过程,其数值研究可分为冰晶运动过程数值模拟、

冰晶黏附结冰特性数值模拟和冰晶侵蚀效应数值模拟 3 个方面。

冰晶运动计算是黏附结冰特性数值模拟的基础。冰晶在气流中的运动属于离散两相流动的研究范畴,通常采用拉格朗日方法或欧拉方法进行模拟。拉格朗日方法通过追踪单个冰晶粒子的运动,能够精确获取冰晶在任意时刻的空间位置和运动状态。Villedieu 等^[10]采用拉格朗日方法对翼型外部流动中的冰晶运动过程进行了数值模拟。与之相对,欧拉法将冰晶视为连续介质,通过求解相应的输运方程来获得冰晶的体积分数和动量分布,此方法在处理冰晶与复杂几何体相互作用时具有较低的计算成本。Norde 等^[11]和 Nilamdeen 等^[12]利用欧拉法建立了冰晶在气流中的运动模型,分别针对翼型外部流动和发动机内部流动进行了数值模拟。

冰晶黏附结冰与液态水含量、冰晶粒径、撞击速度等多个参数有关,黏附机理异常复杂^[6]。目前,研究中主要采用两种类型的冰晶黏附模型。Trontin 等^[13]基于冰晶粒子的平均融化率、水滴和冰晶的质量分数建立了冰晶黏附半经验模型,并通过加拿大 National Research Council(NRC)的实验数据对模型中的参数进行了拟合,从而发展了 NRC 冰晶黏附模型。Nilamdeen 等^[14]基于欧拉法建立了 Newmerical Technologies International(NTI)冰晶黏附模型,该模型与冰晶粒径、撞击速度以及液膜厚度等参数密切相关。

侵蚀效应是冰晶结冰区别于过冷水滴结冰的独有现象,即来流中的冰晶对已形成的冰层具有侵蚀

作用。Struk 等^[15-16]以及 Currie 等^[17]在研究冰晶结冰现象时观察到了侵蚀效应,并发现侵蚀程度与冰晶的融化率和粒径密切相关。在此基础上,Trontin 等^[13]基于实验数据提出了冰晶侵蚀半经验模型,该模型根据冰晶含量、粒径等参数来预测冰晶侵蚀效果。

近年来,随着我国航空事业的飞速发展,混合相冰晶结冰现象受到越来越多的国内学者关注。西北工业大学的张丽芬等^[18]、中国空气动力研究与发展中心的马乙捷等^[19]基于拉格朗日法确定了冰晶和液滴的运动轨迹,建立了机翼混合相结冰模型。上海交通大学的姜飞飞等^[20]、西安交通大学的陈佳军等^[21-22]基于拉格朗日方法描述了冰晶在二维压气机内的运动、碰撞及换热过程,并分析了冰晶液态水含量、温度、速度等参数的沿程变化规律。北京航空航天大学常士楠团队^[23]、卜雪琴等^[24]采用欧拉法分别针对航发进气系统和翼型建立了冰晶混合相结冰计算模型,探究了气流条件和冰晶初始参数对冰晶运动换热及黏附结冰过程的影响。西北工业大学的郭琪磊等^[25]利用 FENSAP-ICE 结冰计算软件研究了马赫数和气流温度等参数对混合相冰晶结冰特性的影响规律。

综上可知,在冰晶与过冷水滴同时存在的混合相气象条件下,结冰过程属于空气-冰晶-水滴三相混合流动的热动力学过程,其机理异常复杂。液态水含量以及黏附和侵蚀效应对结冰特性的影响机理尚不明确,亟需对混合相结冰现象开展更加深入和全面的研究。本文针对过混合相结冰过程,基于 FENSAP-ICE 结冰计算平台,考虑了非球形冰晶粒子的运动特性,通过改进的 Messinger 模型实现了冰晶黏附结冰的计算,并考虑了冰晶侵蚀效应对冰形的影响,建立了欧拉框架下涉及冰晶运动、黏附、结冰和冰晶侵蚀的全物理过程混合相冰晶结冰计算方法。以 NACA0012 翼型为研究对象,通过与风洞实验结果比较,验证了该计算方法的准确性,并在此基础上分析了混合相中冰水含量比对结冰过程的影响,比较了两种黏附模型及其适用条件,并研究了侵蚀效应对冰层生长的影响。

1 混合相冰晶结冰数值方法

1.1 冰晶运动计算方法

本文采用欧拉双流体模型计算水滴和冰晶的运动换热和撞击特性,遵循连续性方程、动量方程和能量方程^[9,26]。

球形与非球形粒子在气流中运动过程的求解主要区别在阻力系数的计算。阻力系数和雷诺数分别用 C_j 和 Re_j 表示, $j=d$ 表示液滴, $j=D$ 表示冰晶。考虑到液滴的粒径较小,因此假设液滴在表面张力的作用下保持为球体。液滴阻力系数 C_d 的计算公式^[12]如下

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_d}(1 + 0.15Re_d^{0.687}), & Re_d \leq 1\,300 \\ 0.4, & Re_d > 1\,300 \end{cases} \quad (1)$$

液滴或冰晶的雷诺数 Re_j 表达式为

$$Re_j = \frac{\rho_a |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_j| d}{\mu_a} \quad (2)$$

式中: ρ_a 表示空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\mathbf{u}_a$ 表示气流速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\mathbf{u}_j$ 表示液滴或冰晶速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $j=d$ 表示液滴, $j=D$ 表示冰晶; μ_a 表示空气动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$; d 表示液滴或冰晶直径, m , 对于非球形冰晶粒子表示当量直径,即与冰晶粒子具有相同体积的球体直径。

冰晶为非球形,在冰晶结冰计算过程中,通过引入冰晶长径比 E (颗粒内部的最长径和与它相垂直的最长径之比)来计算非球形冰晶阻力系数 C_D ^[12]。当冰晶的雷诺数 $Re_D \leq 0.01$ 时

$$C_D = \frac{8m}{3Re_D} \left[1 + \frac{mRe_D}{48} + \frac{m^2}{1\,440} Re_D \ln \left(\frac{Re_D}{2} \right) \right] \quad (3)$$

$$m = 12(1 - E^2)^{1.5} \left\{ E(1 - E^2)^{0.5} + (1 - 2E^2) \tan^{-1} [(1 - E^2)^{0.5} / E] \right\}^{-1} \quad (4)$$

当 $0.01 < Re_D \leq 1.5$ 时

$$C_D = \frac{A}{Re_D} (1 + 10^X) \quad (5)$$

$$X = -0.883 + 0.906\omega - 0.025\omega^2 \quad (6)$$

$$\omega = \lg Re_D \quad (7)$$

当 $1.5 < Re_D \leq 100$ 时

$$C_D = \frac{A}{Re_D} (1 + 0.138Re_D^{0.792}) \quad (8)$$

当 $100 < Re_D \leq 300$ 时

$$C_D = \frac{A}{Re_D} (1 + 0.007\,81Re_D^{1.393}) \quad (9)$$

当 $Re_D > 300$ 时

$$C_D = 1.17 \quad (10)$$

冰晶阻力系数式(5)、(8)、(9)中的 A 定义为

$$A = \frac{32f}{a[\varphi - (\varphi^2 - 1)\tan^{-1}(1/\varphi)]} \quad (11)$$

$$f = (b^2 - a^2)^{0.5} \quad (12)$$

$$\varphi = \frac{b}{d_{\text{eq}}} \quad (13)$$

$$d_{\text{eq}} = 2aE^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

式中: a 为冰晶半短轴长度, m ; b 为冰晶半长轴长度, m ; d_{eq} 为冰晶体积等效直径, m 。

1.2 冰晶碰撞黏附模型

冰晶粒子撞击到翼型表面时,会发生破碎、黏附、反弹、二次撞击等行为。为实现冰晶结冰的模拟,需要使用合适的模型判断冰晶撞击黏附过程。目前主要有两种冰晶碰撞黏附模型,NRC 冰晶碰撞黏附模型和 NTI 冰晶黏附模型。

NRC 冰晶碰撞黏附模型^[10,15]为

$$\psi = \frac{\pi \rho_d d^3 u_n^2 / 12}{\pi e_s d^2} = \frac{\rho_d d u_n^2}{12 e_s} \quad (15)$$

式中: ψ 是无量纲参数,表示冰晶法向动能与表面能的比值; ρ_d 表示冰晶密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; u_n 表示撞击速度的法向分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; e_s 表示冰晶表面能, $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。表面能与温度有关,表达式为

$$e_s = e_{s0} \exp\left(\frac{Q_s}{RT} - \frac{Q_s}{RT_0}\right) \quad (16)$$

式中: e_{s0} 表示温度为 253 K 时的表面能, $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$; Q_s 表示冰晶裂纹产生相关的活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; R 为气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 表示冰晶温度, K 。

将无量纲参数用两个临界值将冰晶碰撞行为分为完全弹性碰撞、非弹性碰撞和碰撞破碎 3 种情况,并定义恢复系数 ξ

$$\begin{cases} \xi = 1, & \psi \leq \psi_{c1} \\ \xi < 1, & \psi_{c1} < \psi < \psi_{c2} \\ \xi \ll 1, & \psi \geq \psi_{c2} \end{cases} \quad (17)$$

$$\psi_{c1} = 0.5; \psi_{c2} = 90 \quad (18)$$

黏附率模型为

$$\epsilon = \max[\epsilon_i, \epsilon_d] \quad (19)$$

$$\epsilon_i = (K_i - 2)\eta_i^3 + (3 - 2K_i)\eta_i^2 + K_i\eta_i \quad (20)$$

$$\epsilon_d = K_d(\varphi_d + \eta_i\varphi_i) \quad (21)$$

式中: ϵ 表示冰晶黏附率; η_i 表示混合相中冰晶部分的融化率; φ_d 表示撞击时液滴的质量分数; φ_i 表示撞击时冰晶的质量分数。 η_i 、 φ_i 、 φ_d 、 K_i 、 K_d 表达式为

$$\eta_i = \frac{\beta_w}{\beta_{\text{IWC}}} \quad (22)$$

$$\varphi_i = \frac{\dot{m}_{\text{imp},i}}{\dot{m}_{\text{imp},i} + \dot{m}_{\text{imp},d}} \quad (23)$$

$$\varphi_d = \frac{\dot{m}_{\text{imp},d}}{\dot{m}_{\text{imp},i} + \dot{m}_{\text{imp},d}} \quad (24)$$

$$K_i = 2.5 \quad (25)$$

$$K_d = \begin{cases} 0.6, & T \geq T_m \\ 0, & T < T_m \end{cases} \quad (26)$$

式中: β_{IWC} 表示气流中冰晶质量浓度 (ice water content, IWC), $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; β_w 表示气流中冰晶融化部分的液态水质量浓度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\dot{m}_{\text{imp},i}$ 表示撞击冰晶的质量流率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{\text{imp},d}$ 表示撞击液滴的质量流率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; T_m 表示冰晶开始结冰的壁面温度; K_i 和 K_d 通过风洞结冰实验拟合得到。

二次碰撞特性为

$$\xi_{\text{nn}} = \begin{cases} 1, & \psi \leq \psi_{c1} \\ \left(\frac{\psi_{c1}}{\psi}\right)^{\frac{1}{3}}, & \psi > \psi_{c1} \end{cases} \quad (27)$$

$$\xi_{\text{nt}} = 0.4 \left(1 - \sqrt{\frac{\psi_{c2}}{\psi}}\right) \quad (28)$$

$$d_{\text{max}} = \phi_{c2}^{\frac{2}{3}} / \psi \quad (29)$$

式中: ξ_{nn} 表示碰撞粒子的法向动量转化为二次粒子法向动量的分数; ξ_{nt} 表示碰撞粒子的法向动量转化为二次粒子切向动量的分数; d_{max} 表示二次碰撞粒子碎片最大直径, m 。

NTI 冰晶黏附模型^[13]认为:冰晶撞击于液膜超过一定厚度的区域会全部黏附,撞击于霜冰区域会完全反弹;在明冰区域内,当冰晶撞击法向速度分量大于临界速度时,冰晶全部反弹,当小于临界速度时,冰晶部分黏附。

明冰区域的冰晶黏附率模型为

$$\epsilon = \frac{h_f}{\max(h_f)} \frac{1}{\exp(\gamma u_n^2)} \quad (30)$$

$$u_c = \sqrt{\frac{2}{d}} \quad (31)$$

式中: h_f 表示液膜厚度, m ; u_c 表示临界速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; γ 是控制参数,当 $u_n > u_c$ 时,使黏附率为 0, γ 计算式为

$$\gamma = \frac{1}{u_c^2} \ln\left(\frac{1}{\theta_+}\right) \quad (32)$$

其中, θ_+ 是使分母不为 0、对数函数有意义的极小正值。

1.3 结冰模型和侵蚀模型

冰晶混合相结冰模型需要对经典 Messinger 模型进行扩展,忽略冰层内部、冰层与壁面之间的热传导,本文基于控制体积法^[24]建立了质量和能量平衡方程。

冰晶侵蚀将导致结冰冰形产生角状或羽毛状的粗糙突起,通过侵蚀效率给出冰晶侵蚀模型^[13]

$$\Phi_{\text{er}} = B \left(\frac{u_{\text{i,i}}}{u_0} \right)^2 \left(\frac{\beta_{\text{iwc}}}{\beta_{\text{iwc0}}} \right)^{-A_1} \left(\frac{1 - \eta_i}{1 - \eta_{i,0}} \right)^{-A_2} \left(\frac{D_i}{D_0} \right)^{A_3} \cdot \exp \left[-A_4 \frac{Q_s}{R} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_m} \right) \right] \cdot \exp \left[-A_5 \frac{Q_s}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_m} \right) \right] (1 + (l_0 \kappa)^2) \quad (33)$$

式中: Φ_{er} 表示冰晶侵蚀效率; $u_{\text{i,i}}$ 表示冰晶撞击切向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; D_i 表示冰晶的平均质量直径, m ; T_i 表示冰晶温度, K ; κ 表示冰层的局部曲率; c 表示翼型弦长, m ; T_i 表示冰的相变温度, K ; $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 表示理想气体常数。 B 、 u_0 、 β_{iwc0} 、 $\eta_{i,0}$ 、 D_0 、 l_0 、 $A_1 \sim A_5$ 均是由实验获得的模型经验常数,具体取值见表 1。

表 1 冰晶侵蚀模型经验常数^[13]
Table 1 Experimental constants of ice crystal erosion model^[13]

参数	数值	系数	数值
B	0.58	A_1	0.8
$u_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	84.5	A_2	3.0
$\beta_{\text{iwc0}} / (\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	6	A_3	0.4
$\eta_{i,0}$	0.166	A_4	3.0
$D_0 / \mu\text{m}$	52.7	A_5	0.1
l_0	0.015 c		

通过冰晶侵蚀效率得到冰晶侵蚀质量流率

$$\dot{m}_{\text{er}} = \min[\dot{m}_i + \dot{m}_{\text{out}}, \dot{m}_{\text{imp,i}} \min(1, \Phi_{\text{er}})] \quad (34)$$

式中: $\dot{m}_{\text{er}}$ 表示冰晶侵蚀的质量流率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; $\dot{m}_i$ 表示控制体内冻结的质量流率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{\text{out}}$ 表示溢流水流出控制体的质量流率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{\text{imp,i}}$ 表示撞击冰晶的质量流率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

假设冰晶侵蚀造成的质量损失与结冰速率和溢流水的积累速率成正比,得到控制体内结冰的质量流率与溢流水流出控制体的质量流率的修正公式

$$\dot{m}_i^* = \dot{m}_i - \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_i + \dot{m}_{\text{out}}} \dot{m}_{\text{er}} = \dot{m}_i \left(1 - \frac{\dot{m}_{\text{er}}}{\dot{m}_i + \dot{m}_{\text{out}}} \right) \quad (35)$$

$$\dot{m}_{\text{out}}^* = \dot{m}_{\text{out}} - \frac{\dot{m}_{\text{out}}}{\dot{m}_i + \dot{m}_{\text{out}}} \dot{m}_{\text{er}} = \dot{m}_{\text{out}} \left(1 - \frac{\dot{m}_{\text{er}}}{\dot{m}_i + \dot{m}_{\text{out}}} \right) \quad (36)$$

表 2 数值模型验证工况参数
Table 2 Parameters for validation of numerical models

工况	气流速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	环境压力/ kPa	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\beta_{\text{LWC}} /$ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	液滴当量直径/ μm	$\beta_{\text{iwc}} /$ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	冰晶当量直径/ μm
001	53.64	98	-12.54	0.4	20	1.0	150
002	53.64	98	-6.98	0.7	20	0	
003	53.64	98	-12.54	0.3	20	0.7	150
004	53.64	98	-6.98	0.7	20	0.7	200
005	53.64	98	-12.54	0.7	20	0.3	150

注: β_{LWC} 表示气流中液态水的质量浓度(liquid water content,LWC)。

式中: $\dot{m}_i^*$ 表示控制体内冻结的质量流率修正值, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; $\dot{m}_{\text{out}}^*$ 表示溢流水流出控制体的质量流率修正值, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 数值模型验证

本文采用 FENSAP-ICE 结冰数值计算软件,湍流模型选择 Spalart-Allmaras 单方程模型,考虑了非球形冰晶粒子的运动差异,基于欧拉双流体模型计算了液滴和冰晶运动过程。本文还对比了 NRC 冰晶黏附模型和 NIT 冰晶黏附模型,通过改进的 Messinger 结冰热力学模型,采用单步法对积冰增长及结冰表面水膜流动进行求解。

2.1 网格无关性验证

由于目前只有美国 COX 结冰风洞公开了关于翼型混合相冰晶结冰的实验结果^[27],为与实验进行对比,本文选择弦长为 0.914 4 m、翼展为 1.219 2 m 的 NACA0012 翼型作为研究对象,对翼型与周围流场使用 ICEM 划分 C 型结构化网格。由于本文使用 Spalart-Allmaras 湍流模型,为满足条件在翼型表面添加附面层,加密翼型的表面网格,满足 $y^+ \approx 1$ 原则,划分网格如图 1 所示。

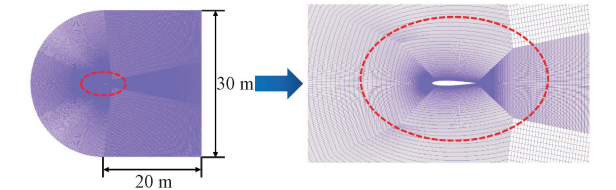


图 1 数值模拟网格示意图
Fig. 1 Schematic of the numerical simulation grid

用于网格无关性验证和模型验证的模拟工况参数详见表 2。表中:模拟工况 001 用于网格无关性验证;模拟工况 002~005 与美国 COX 结冰风洞^[27]公开的 4 种实验工况相同,用于数值模型实验验证。

图 2(a)展示了 001 模拟工况下,使用不同网格数计算的驻点结冰厚度。图 2(b)展示了网格数为 157 万时,不同时间的结冰冰形。可以看出,当网格数大于 157 万时,驻点结冰厚度不再随网格数发生变化,冰形也趋于稳定,表现出由于水膜溢流形成的瘤状凸起。因此,在满足计算精度的前提下,选取 157 万网格计算最为合适。

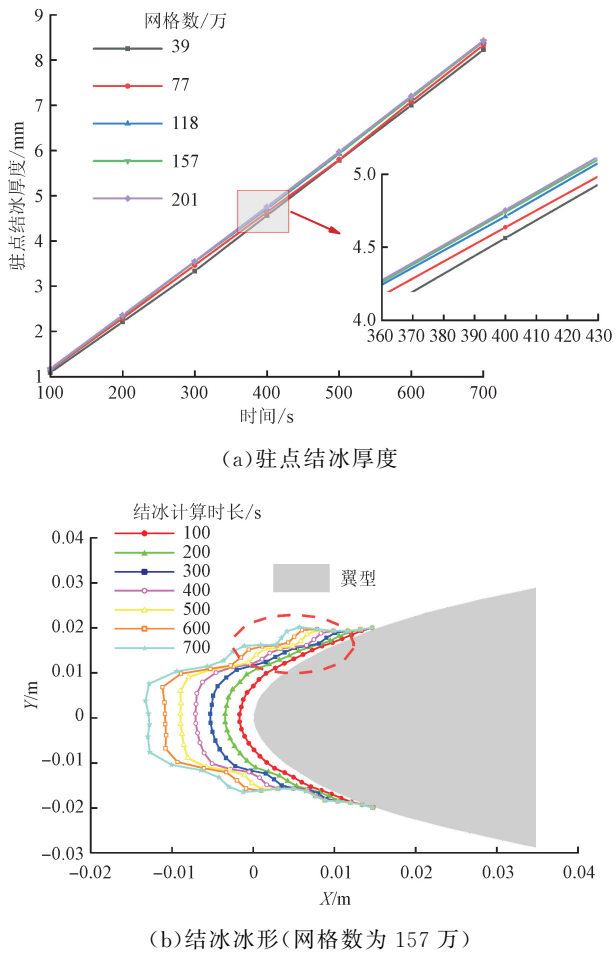


图 2 网格无关性验证($\beta_{LWC}=0.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\beta_{IWC}=1.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Fig. 2 Grid independence validation ($\beta_{LWC}=0.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,
 $\beta_{IWC}=1.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)

2.2 模型验证

取本文数值模型计算的冰形与文献[27]中实验结果、Norde^[28]的模拟结果进行对比,结果如图 3 所示。可以看出,无论是工况 002 中过冷液滴结冰条件还是工况 003 中混合相冰晶结冰条件,本文的模拟结果与实验结果在冰形形态上相近,且相较于 Norde 的模拟更为准确。本文模拟结果与实验结果的结冰厚度、结冰范围接近,可以证明本文数值方法的准确性。

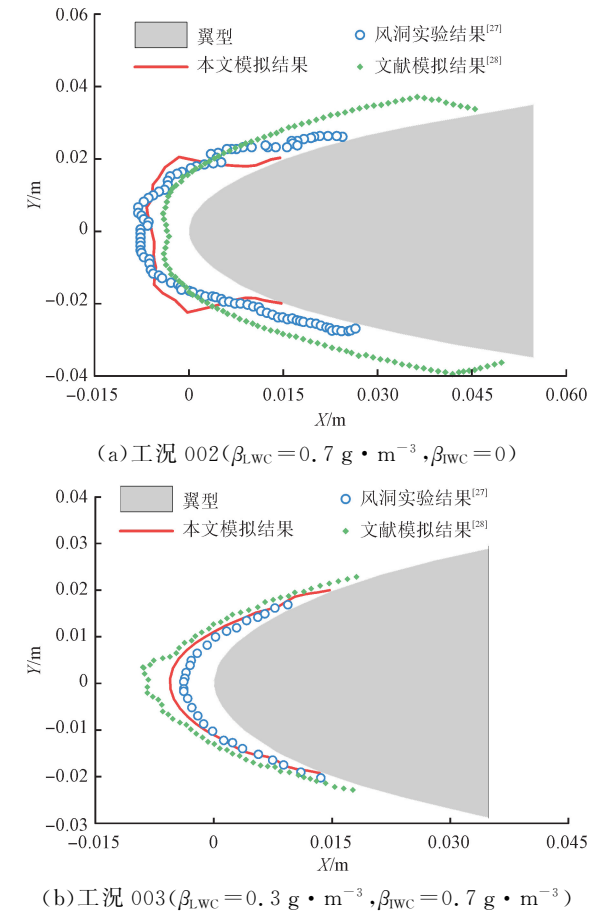


图 3 计算结果与实验结冰冰形对比

Fig. 3 Comparison of computational results and experimental ice shape

3 计算结果与讨论

3.1 液态水含量与冰晶含量之比对冰晶结冰特性的影响

β_{LWC} 和 β_{IWC} 是影响冰晶结冰冰形的重要因素,其主要影响在于冰晶的黏附作用、侵蚀作用以及水膜溢流。为研究 β_{IWC}/β_{LWC} 对冰晶结冰的影响,定义总水含量(total water content, TWC, 用符号 β_{TWC} 表示)为 LWC 与 IWC 之和,选择 $\beta_{IWC}=1.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的模拟工况 021~027 进行计算,模拟工况如表 3 所示。

表 3 β_{IWC}/β_{LWC} 对冰晶结冰影响的模拟工况

Table 3 Simulated operating conditions of β_{IWC}/β_{LWC} on ice accumulation of ice crystals

参数	数值						
	021	022	023	024	025	026	027
$\beta_{LWC}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	1.4	1.2	1.0	0.7	0.4	0.2	0
$\beta_{IWC}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	0	0.2	0.4	0.7	1.0	1.2	1.4
$\beta_{TWC}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4

图 4 为不同 β_{IWC}/β_{LWC} 下 NACA0012 翼型的混合相结冰冰形。可以看出: 当 TWC 一定时, 随着 IWC 的增大, 积结冰覆盖面积逐渐减小; 由于冰晶的黏附、侵蚀以及水膜的流动, 冰层的形状逐渐从冠状变向尖角状; 当 IWC 较低时, 水膜流动起主要作用, 当 IWC 较高时, 冰晶的黏附和侵蚀起主要作用。当 IWC 为 0、LWC 为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 为水滴结冰, 此时壁面所收集的液滴会汇聚形成液膜, 液膜在气流剪切作用下向后溢流并逐渐冻结形成冠状冰形。随着 LWC 减小, 液膜溢流范围逐渐减少, 所以结冰区域也随之缩减。液膜溢流量的减少使得冰晶的黏附和侵蚀作用变得更加显著, 由此导致的冠状冰特征逐渐减弱, 而冰形开始展现出与翼型表面几何轮廓相一致的特征。当 IWC 为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、LWC 为 0 时, 不发生冰晶结冰现象, 这一结果强调了液态水在冰晶结冰过程中的必要性。

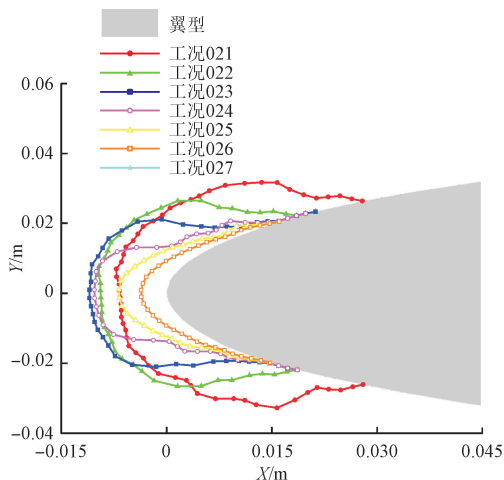


图 4 不同 β_{IWC}/β_{LWC} 下的模拟冰形

Fig. 4 Simulated ice shape for different β_{IWC}/β_{LWC}

图 5 为 β_{IWC}/β_{LWC} 对冰晶结冰厚度的影响。可以看出, 在 TWC 保持恒定的情况下, NACA0012 型翼型的驻点结冰厚度和最大结冰厚度均随 IWC 的增加呈现出先增后减的趋势。在较高 IWC 条件下, 翼型驻点与最大结冰厚度处的结冰厚度差逐渐减小, 趋向于 0, 表明最大结冰区域逐步移至驻点附近。

此现象可以通过水膜溢流与收集系数解释: 翼型驻点位置的冰晶收集系数最高, 当 LWC 较高时, 翼型表面收集的液滴并不能迅速冻结, 水膜在气流剪切作用下向后溢流导致驻点结冰厚度小于最大结冰厚度; 当 IWC 较高时, 只有很少的水膜向后溢流, 此时最大结冰处位于驻点。

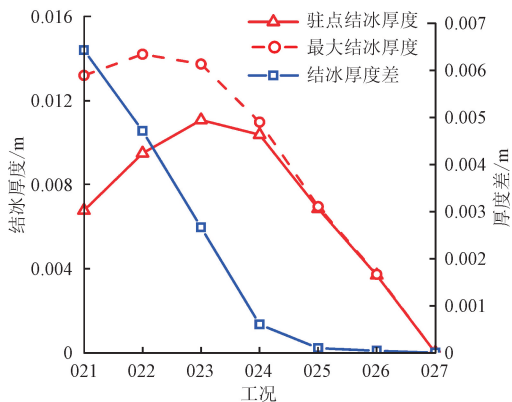


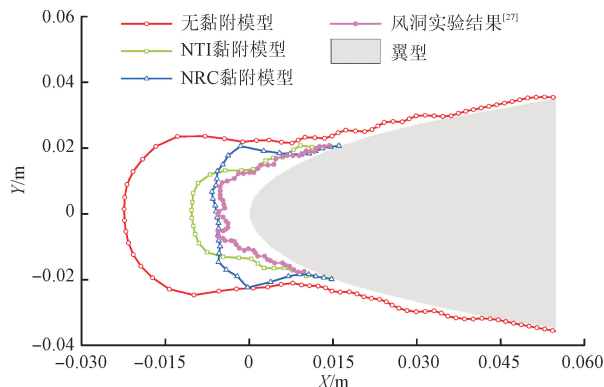
图 5 β_{IWC}/β_{LWC} 对结冰厚度的影响

Fig. 5 Impact of β_{IWC}/β_{LWC} on ice thickness

3.2 黏附模型对冰晶结冰的影响

为探究黏附模型对冰晶结冰过程的影响, 本文对表 2 中的 004 和 005 工况进行模拟计算。在本研究中, 无黏附模型是假设所有冰晶在碰撞到翼型表面后均不发生反弹或破碎, 完全黏附于表面。

图 6 展示了采用不同黏附模型计算得到的结冰冰形与实验观测结果的比较。在无黏附模型时, 由于未考虑到冰晶的反弹和破碎, 模拟得到的结冰冰形与实验数据存在显著偏差。这一发现表明, 在结冰模拟过程中必须考虑冰晶的反弹和破碎效应, 因此引入精确的黏附模型以评估冰晶碰撞和黏附过程是至关重要的。在高 IWC 条件下, NTI 黏附模型能更准确的预测冰形, 其模拟结果中因水膜溢流引起的冠状凸起特征与实验结果相符。相比之下, NRC 模型的预测结果与实验数据存在较大偏差, 模拟出的冰形呈现出真实的双角状凸起。然而, 在低 IWC 工况, NTI 与 NRC 两种黏附模型均能较好地模拟出冰形, 其结果均与翼型前缘的实际结冰轮廓相吻合。



(a) 工况 004 ($\beta_{LWC} = 0.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\beta_{IWC} = 0.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)

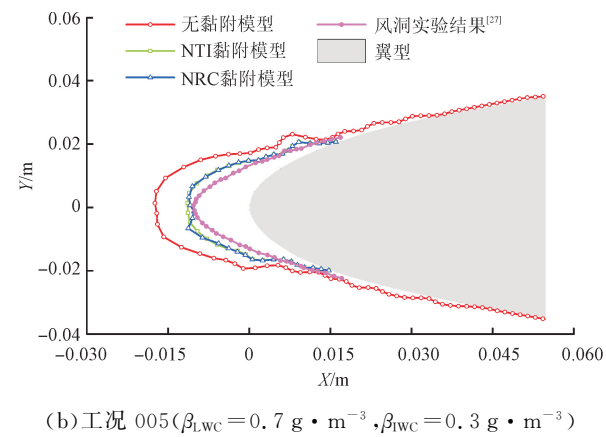


图 6 不同黏附模型模拟冰形与实验的对比

Fig. 6 Comparison of simulated ice shape with experiments under different adhesion models

图 7 是不同黏附模型结冰厚度分布。可以看出:当无冰晶黏附模型时,翼型结冰厚度远大于实验结果;对于高 IWC 工况,NRC 黏附模型的驻点结冰厚度更接近实验结果,误差为 7.2%;对于低 IWC 工况,NTI 模型与 NRC 模型的驻点结冰厚度接近,误差分别为 11.6%和 6.8%。

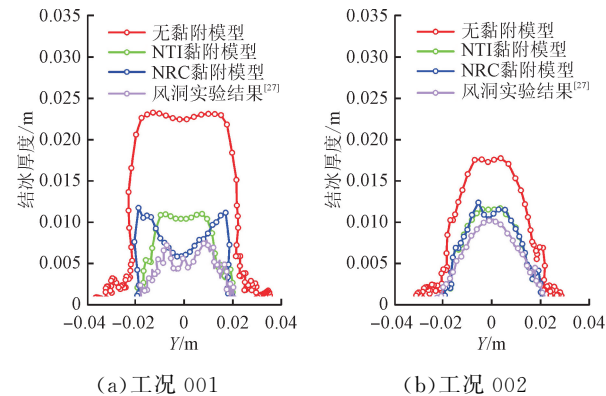


图 7 不同黏附模型的结冰厚度分布

Fig. 7 Ice thickness distribution of different adhesion models

3.3 侵蚀模型对冰晶结冰的影响

冰晶侵蚀对翼型上结冰形态和厚度具有显著影响。在所采用的冰晶侵蚀模型中,冰晶粒径和速度均与侵蚀程度呈正相关。为直观体现侵蚀作用对冰晶结冰的影响,对表 2 中 002~005 的 4 种工况分别采用冰晶侵蚀模型进行模拟。

鉴于工况 002 中的 IWC 为 0,在此条件下不会发生冰晶侵蚀,因此以下分析主要集中在其他 3 组工况下。图 8 展示了侵蚀模型对结冰形态的具体影响。

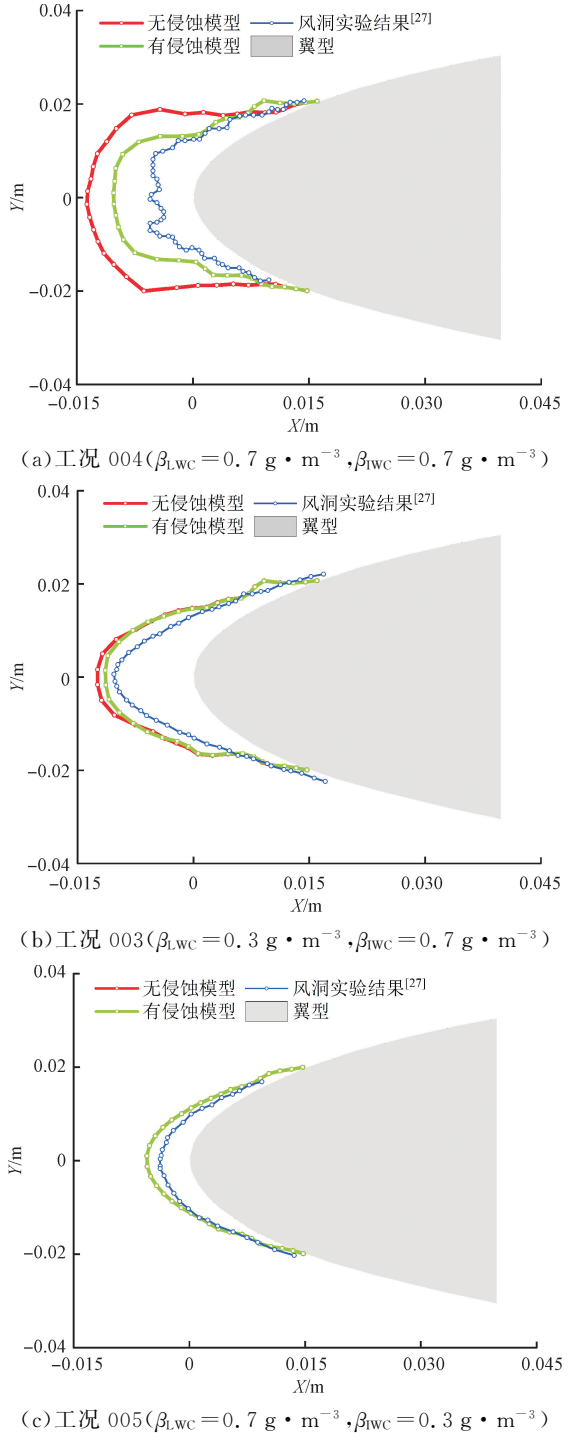


图 8 侵蚀模型对冰晶结冰冰形的影响

Fig. 8 Effect of erosion model on ice shape of ice crystals

通过对比图 8(a)和图 8(b)可知,在 IWC 相同的条件下,当 LWC 较高时,侵蚀作用对结冰形态的影响更为显著。如图 8(b)所示,当 LWC 为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,由于 LWC 处于较低水平,结冰量相对较小,有无侵蚀模型对结冰模拟的影响不甚明显。相反,在图 8(a)中,LWC 较高,侵蚀作用对结冰形态的影响更为显著。同时,不同模型的计算结果在翼型驻点

附近显示出明显的差异,这表明冰晶侵蚀作用的主要影响区域集中在翼型驻点附近。

进一步地,对比图 8(a)和图 8(c)可以看出:在 LWC 相同的条件下,较高的 IWC 同样会加剧侵蚀效应对结冰形态的影响,即 LWC 和 IWC 的增大均会加剧侵蚀效应对结冰形态的影响。这是因为冰晶侵蚀造成的损失与冰晶含量、结冰速率和溢流水的积累速率成正比。当 LWC 较高时,结冰速率较大,导致侵蚀现象更显著;当 IWC 较高时,冰晶冲击会进一步增加质量损失,从而导致结冰形态发生显著变化。

4 结 论

本文结合混合相态冰晶结冰的热力学原理,基于 FENSAP-ICE 平台对混合相态冰晶现象进行数值计算,通过与美国 COX 结冰风洞的 NACA0012 翼型结冰实验结果对比,验证了本文数值模型的正确性,并在此基础上研究了混合相中液态水含量对冰晶结冰特性的影响规律,分析了两种黏附模型的差异,讨论了侵蚀效应对结冰的影响,具体结论如下。

(1)当 TWC 一定时,随着 IWC 的增加,结冰覆盖面积逐渐减小,且冰层的形状逐渐从冠状变向尖角状。在 IWC 较小的情况下,水膜流动是影响结冰形态的主要因素;在 IWC 较大的情况下,冰晶的黏附和侵蚀是影响结冰形态的主要因素。当 TWC 相同时,翼型的驻点结冰厚度与最大结冰厚度随 IWC 的增大均呈现出先增后减的趋势。当 IWC 较大时,翼型驻点处的结冰厚度与最大结冰厚度之间的差异逐渐减小,趋近于 0,表明最大结冰区域逐步移至驻点附近。

(2)考虑冰晶黏附效应时,翼型结冰形状和驻点结冰厚度与实验结果的符合性较好。对于高 IWC 工况,NTI 模型能更准确地模拟冰形,其预测的由于水膜溢流形成的冠状凸起特征与实验观测相似。NRC 模型在驻点结冰厚度的计算上与实验数据更为接近,其误差仅为 7.2%。在低 IWC 工况下,NTI 模型与 NRC 模型在计算冰形与驻点结冰厚度方面均显示出较高的准确性。两种模型的计算结果均与翼型前缘轮廓接近,且驻点结冰厚度计算误差分别控制在 11.6%和 6.8%以内。

(3) LWC 或 IWC 增大,均会加剧侵蚀效应对结冰形态的影响。侵蚀作用的影响主要集中于翼型驻点附近,这是因为该区域的收集系数较高、结冰速率较快,所以侵蚀现象更为明显。

参考文献:

- [1] LYNCH F T, KHODADOUST A. Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37(8): 669-767.
- [2] MASON J G, STRAPP J W, CHOW P. The ice particle threat to engines in flight [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA; AIAA, 2006: AIAA 2006-206.
- [3] 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 Hao, HAN Bingbing, ZHANG Lifen. Research progress of the ice crystal icing in aero-engine [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2020, 34(6): 1-7.
- [4] TETTEH E, LOTH E, NEUTEBOOM M O, et al. In-flight gas turbine engine icing: review [J]. *AIAA Journal*, 2022, 60(10): 5610-5632.
- [5] 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 Ping, BU Xueqin, LIU Yiming, et al. Mixed phase/glaciated ice accretion: review [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(5): 112-130.
- [6] 袁庆浩, 樊江, 白广忱. 航空发动机内部冰晶结冰研究综述 [J]. *推进技术*, 2018, 39(12): 2641-2650.
YUAN Qinghao, FAN Jiang, BAI Guangchen. Review of ice crystal icing in aero-engines [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(12): 2641-2650.
- [7] VILLEDIEU P, TRONTIN P, GUFFOND D, et al. SLD Lagrangian modeling and capability assessment in the frame of ONERA 3D icing suite [C]//4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Reston, VA, USA; AIAA, 2012: AIAA 2012-3132.
- [8] WRIGHT W B. Further refinement of the LEWICE SLD model [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA; AIAA, 2006: AIAA 2006-464.
- [9] HONSEK R, HABASHI W G. FENSAP-ICE: Eulerian modeling of droplet impingement in the SLD regime of aircraft icing [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA; AIAA, 2006: AIAA 2006-465.
- [10] VILLEDIEU P, TRONTIN P, CHAUVIN R. Glaciated and mixed phase ice accretion modeling using ONERA 2D icing suite [C]//6th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Reston, VA, USA; AIAA, 2014: AIAA 2014-2199.
- [11] NORDE E, SENONER J M, VAN DER WEIDE E T

- A, et al. Eulerian and Lagrangian ice-crystal trajectory simulations in a generic turbofan compressor [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2019, 35 (1): 26-40.
- [12] NILAMDEEN S, HABASHI W G, AUBÉ M S, et al. FENSAP-ICE: modeling of water droplets and ice crystals [C]//1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2009: AIAA 2009-4128.
- [13] 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. Reston, VA, USA: AIAA, 2016: AIAA 2016-3742.
- [14] NILAMDEEN S, HABASHI W G. Multiphase approach toward simulating ice crystal ingestion in jet engines [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(5): 959-969.
- [15] CURRIE T C, STRUK P M, TSAO J C, et al. Fundamental study of mixed-phase icing with application to ice crystal accretion in aircraft jet engines [C]//4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2012: AIAA 2012-3035.
- [16] STRUK P M, RATVASKY T P, BENCIC T J, et al. An initial study of the fundamentals of ice crystal icing physics in the NASA propulsion systems laboratory [C]//9th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2017: AIAA 2017-4242.
- [17] CURRIE T C, FULEKI D, MAHALLATI A. Experimental studies of mixed-phase sticking efficiency for ice crystal accretion in jet engines [C]//6th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2014: AIAA 2014-3049.
- [18] ZHANG Lifen, LIU Zhenxia, ZHANG Meihua. Numerical simulation of ice accretion under mixed-phase conditions [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part G Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(13): 2473-2483.
- [19] 马乙隼, 柴得林, 王强, 等. 翼面结冰过程中的冰晶运动相变与黏附特性 [J]. *航空学报*, 2023, 44(1): 35-46.
- MA Yijian, CHAI Delin, WANG Qiang, et al. Phase change and adhesion characteristics of ice crystal movements in wing icing [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(1): 35-46.
- [20] 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 Feifei, DONG Wei, ZHENG Mei, et al. Phase change heat transfer characteristic of ice crystal ingested into turbofan engine [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(3): 567-575.
- [21] CHEN Jiajun, LIU Xiufang, ZHONG Fuhao, et al. Melting and accumulation characteristics of ice crystals in aero-engines [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 40(6): 653-662.
- [22] ZHONG Fuhao, WEI Zhen, CHEN Jiajun, et al. Dynamic behavior and heat transfer characteristics of non-spherical ice crystals in high-temperature air flow [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 40(2): 205-215.
- [23] QI Haifeng, CHANG Shinan, YANG Yinglin. Numerical study of mixed phase ice accumulation in aero-engine inlet system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 231: 120909.
- [24] 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 Xueqin, LI Hao, HUANG Ping, et al. Numerical simulation of mixed phase icing on two-dimensional airfoil [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(12): 195-205.
- [25] 郭琪磊, 牛俊杰, 安博, 等. 混合相态冰晶积冰的数值研究 [J]. *空气动力学学报*, 2021, 39(2): 168-175.
- GUO Qilei, NIU Junjie, AN Bo, et al. Numerical simulation of ice crystal icing under mixed-phase conditions [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2021, 39(2): 168-175.
- [26] 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 Yan. Numerical calculation of 2D airfoil ice crystal icing based on Euler method [J]. *Aeroengine*, 2020, 46(4): 30-35.
- [27] AL-KHALIL K, IRANI E, MILLER D. Mixed phase icing simulation and testing at the cox icing wind tunnel [C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2003: AIAA 2003-903.
- [28] NORDE E. Eulerian method for ice crystal icing in turbofan engines [D]. Enschede: University of Twente, 2017: 99-112.

(编辑 陶晴)