跨音速风扇叶片高低转速下混合 相积冰的对比研究

任虎虎^{1,2}, 徐强仁^{2,3}, 王立志^{2,3}, 李广超¹, 赵巍^{2,3,4}, 赵庆军^{2,3,4,5}

 (1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院,沈阳 110136; 2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院轻型动力重点实验室,北京 100190; 4. 中国科学院大学 航空宇航学院,北京 100049; 5. 中国科学院工程热物理研究所 分布式冷热电联供系统北京市重点实验室,北京 100190)

摘要:目的 获得跨音速风扇转子叶片高、低转速下混合相积冰的影响规律。方法 使用 CFX 获取风扇叶片 空气流场数据,采用 FENSAP-ICE 获取积冰冰形,通过过冷水滴与冰晶温度、撞击叶片角度等进行混合相 积冰高、低转速冰形分析。结果 风扇叶片高、低转速运转时,过冷水滴与冰晶的运动状态变化相对明显。 高转速时,流场内的气流为跨音速流动,过冷水滴与冰晶撞击角度相差较大,撞击角度较大的叶根区域更 容易收集过冷水滴与冰晶;低转速时,过冷水滴和冰晶与叶片的撞击角度大部分区域低于 10°,使过冷水滴 与冰晶碰撞到叶片后的捕获难度提升。风扇叶片高、低转速运转时,叶身的温度差异使过冷水滴在低转速 下易直接凝结,未凝结的水膜量极少,而冰晶表面未形成水膜,不易被捕获,使得最终的积冰主要为过冷 水滴积冰。结论 风扇叶片混合相积冰在高转速时,流道内温度升高更快,水膜不易凝结,冰晶表面易融化, 促进了冰晶积冰。

关键词: 混合相; 积冰; 撞击角度; 冰晶温度; 高转速; 低转速; 风扇叶片 中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2023)07-0072-11 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2023.07.010

Comparative Research of Mixed-phase Icing at High and Low Velocities of Transonic Fan Blades

REN Hu-hu^{1,2}, XU Qiang-ren^{2,3}, WANG Li-zhi^{2,3}, LI Guang-chao¹, ZHAO Wei^{2,3,4}, ZHAO Qing-jun^{2,3,4,5}

(1. School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Key Laboratory of Light-duty Gas-turbine, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Beijing Key Laboratory of Distributed Combined Cooling Heating and Power System, Institute

收稿日期: 2023-03-21; 修订日期: 2023-05-09

Received: 2023-03-21; Revised: 2023-05-09

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-Ⅲ-0010-0054, J2019-Ⅱ-0014-0035)

Fund: National Science and Technology Major Project (J2019-Ⅲ-0010-0054, J2019-Ⅱ-0014-0035)

作者简介:任虎虎(1998-),男,硕士研究生。

Biography: REN Hu-hu (1998-), Male, Postgraduate.

通讯作者:赵庆军(1977-),男,博士。

Corresponding author: ZHAO Qing-jun (1977-), Male, Doctor.

引文格式: 任虎虎, 徐强仁, 王立志, 等. 跨音速风扇叶片高低转速下混合相积冰的对比研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 072-082. REN Hu-hu, XU Qiang-ren, WANG Li-zhi, et al. Comparative Research of Mixed-phase Icing at High and Low Velocities of Transonic Fan Blades[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 072-082.

of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the influence of icing on the mixed phase of transonic fan blades at high and low velocities. CFX was used to obtain the airflow field data of fan blades, and FENSAP-ICE was used to obtain ice shapes. The ice shape at high and low velocities of mixed phase icing was analyzed through the temperature of supercooled droplets and ice crystals and the angle of impact on blades. The results showed that when the fan blade worked at high and low velocities, the motion states of supercooled droplets and ice crystals varied significantly. At high velocities, the airflow in the flow field was transonic flow, and the impact angle between supercooled droplets and ice crystals was different. The root area with large impact angle was easier to collect supercooled water droplets and ice crystals; at low velocities, the impact angle of supercooled droplets, ice crystals and blades was less than 10° in most areas, which made it more difficult to capture supercooled droplets and ice crystals after they collided with the blades. The temperature difference of the blade when the fan blade ran at high and low velocities made the supercooled droplets easy to condense directly at low velocities, and the amount of uncondensed water films was very small. However, the ice crystal surface was not easy to be captured because the water film was not formed, so the final ice accretion was mainly the ice accretion formed by the supercooled droplets. When the fan blade mixes phase icing at high velocities, the temperature in the flow passage rises faster, the water film is not easy to condenses, and the ice crystal surface is easy to be molten, which promotes the ice accretion of ice crystals.

KEY WORDS: mixed-phase; icing; impact angle; ice crystal temperature; high speed; low speed; fan blades

飞机积冰分为地面积冰与飞行积冰,其中飞行积冰占比达到 90%以上。在飞行过程中,飞机迎风面会发生积冰,包括机翼、旋转帽罩、旋翼、风扇叶片等部件^[1-4]。目前,对机翼、旋转帽罩、旋翼等已开展了大量研究,对风扇叶片的研究还比较少,本文针对风扇叶片,展开积冰研究。相较于机翼等静止部件,风扇叶片积冰的形成及脱落均会受到离心力的作用。风扇叶片积冰的形成及脱落均会受到离心力的作用。风扇叶片积冰会改变叶片型面,破坏流场,甚至使压气机流道堵塞,造成压气机喘振,风扇叶片上形成的积冰在脱落后可能进入压气机,与压气机叶片产生碰撞,威胁飞行安全。积冰研究有工程估算、实验研究和数值模拟等方法,由于数值模拟有成本低、周期短、流场信息丰富等优势而快速发展。

目前,旋转部件积冰研究主要集中在旋转帽罩及 旋翼 2 部件。Blez 等^[5]通过一套观察发动机整流帽罩 与风扇叶片的视频成像系统,给出了不同时刻的积冰 图像。梁鹏^[6]对旋转锥体进行了过冷水滴积冰研究, 发现锥尖至底部局部水收集系数呈减小趋势,随着转 速的提高,水滴受到的离心力增大,惯性力减小,碰 撞到锥体的趋势减弱。Li 等^[2]对带有不同形状帽罩的 风扇叶片进行了积冰模拟,发现明冰条件的帽罩积冰 与几何形状有较大关联,风扇叶片上的积冰相对不受 其几何形状的影响。Dong 等^[7]对旋转帽罩的研究表 明,回流水对积冰有显著影响,转速对积冰的形状略 有影响,固定圆锥上的积冰厚度大于旋转圆锥上的积 冰厚度。Villedieu等^[8]对冰晶撞击过程中的粘附、破 碎反弹等建立了相应的数学模型。Trontin 等^[9-10]通过 加入冰晶侵蚀的影响,改进了冰晶粘附效率模型,并 对不同翼型进行了过冷大水滴、冰晶和混合相积冰仿 真。Aliaga 等^[11]以旋转的 NACA0015 作为研究对象,

将冰的增长与空气-液滴两相流耦合,使用动态缝合 网格提高了积冰的预测精度。Liu 等^[3]以某型无人机 螺旋桨为研究对象,对其表面结冰过程进行了试验研 究,发现在气动力和离心力的共同作用下,叶片表面 未冻结的水从根部流向叶片尖端,形成了十分复杂的 冰柱。陈宁立等^[12]以 NACA0015 作为研究对象,发 展了一种适用于预测旋转表面积冰的数学模型。研究 结果表明,离心力使流出控制体的水膜质量增加,导 致驻点附近的积冰厚度减小。Baumert 等^[13]使用 NACA0012 翼型及圆柱模型, 根据冰风洞实验数据完 善了冰晶积冰计算软件,补充了冰晶积冰的实验与模 拟数据。郭琪磊等^[14]以 NACA0012 翼型为对象,研 究了混合相态的积冰模拟,发现混合相态积冰达到最 大厚度,需要有充足的冰晶与液态水含量,增加飞行 速度会使前缘驻点的积冰速率与积冰量增加。卜雪琴 等^[15]使用 NACA0012 翼型计算了霜冰和明冰条件下 的积冰情况,结果表明,冰晶黏附效应对混合相结冰 量及冰形有很大影响。Farag 等^[16]通过研制螺旋桨液 滴撞击的 BETAPROP 程序,发现部件的几何形状对 水收集系数和撞击极限产生很大的影响。陈希等[17] 通过对直升机旋翼的研究,证明了离心力在结冰数值 模拟中的重要性。Chen 等^[18]建立了旋翼的积冰数学模 型,研究发现,转子积冰受到离心力和水膜运动的影响, 考虑到离心力与水膜运动后,叶片上的积冰会减少。 Chen 等^[19]通过对旋翼的研究,验证了其建立的积冰预 测模型。研究表明,转子转速增加,积冰厚度增加。

风扇叶片的混合相积冰研究主要为冰晶轨迹的 研究。吴涛^[4]以 Rotor-67 跨音速转子为研究对象,研 究其设计转速积冰,发现过冷水滴的撞击区域主要为 叶片吸力面,随着过冷水滴粒径的增大,过冷水滴受 到的惯性变大,运动方向不易改变,易沿着原始速度 方向进行直线运动。Das 等^[20]对高旁通涡扇发动机的 压气机转子进行了数值模拟,研究表明,在较低的转 子转速下,积冰从叶根到叶尖厚度逐渐减小,转子的 转速增加, 叶根到叶尖积冰的厚度变化减小, 同一截 面吸力面积冰逐渐消失,压力面积冰向前缘移动。 Norde 等^[21]针对涡扇发动机的冰晶结冰,考虑冰晶传 热和相变对轨迹及撞击结冰表面的影响,开发了一种 积冰方法,使用 NACA0012 翼型进行了验证,结果 表明,该方法能较准确地预测冰厚与冰形。姜飞飞等[22] 对冰晶相变传热传质方程进行了离散化,计算了冰晶 在涡扇发动机内涵通道内运动过程中的粒子半径、冰 晶温度与速度、冰水混合粒子中的液态水质量分数 等,获得了冰晶在低压压气机内涵道的运动轨迹和叶 片碰撞特性。Zhang 等^[23]采用拉格朗日法测定了冰晶 和液滴的运动轨迹,考虑了冰晶的破碎和反弹,以及 薄膜的飞溅,建立了冰晶撞击模型,提出了混合相积 冰热力学模型。通过不同混合相条件下 NACA0012 翼型的积冰模拟,验证了混合相结冰方法的有效性和 合理性。综上所述,积冰时考虑离心力得到的积冰厚 度减小,冰晶的相变换热及侵蚀影响积冰冰形,考虑 冰晶的粘附效应将使积冰厚度减小,但在风扇叶片混 合相积冰中,转速对风扇叶片过冷水滴与冰晶积冰的 变化规律考虑较少。

本文对风扇叶片进行混合相积冰,分析过冷水滴 与冰晶在流道内的变化规律,对比风扇叶片不同转速 时过冷水滴与冰晶对叶片的撞击角度,获得风扇叶片 高低转速时积冰差异的形成原因,为预测风扇叶片在 高低转速工作状态下的积冰提供理论支持。

1 研究方法与验证

积冰的数值模拟一般主要由 3 部分组成。第一部 分是对部件周围的空气-粒子(过冷水滴与冰晶)流 场进行模拟,此部分为部件表面的积冰模拟提供空气 剪切力。第二部分是计算过冷水滴与冰晶的撞击特 性,获得粒子在流场中的速度、蒸汽与过冷水滴和冰 晶之间的质量和能量传输、局部水收集系数和局部冰 晶收集系数。第三部分是对已获得的变量采用合适的模 型计算积冰,通过迭代得到对应时间部件表面的积冰 量。本文采用文献[24]所发展基于牛顿剪切定律描述水 膜流动的 SWIM(Shallow Water Icing Model)积冰模 型,该模型对叶轮机械的研究中,增加了离心力与科氏 力对积冰的影响,积冰求解时的交互关系如图 1 所示。

依据文献[25]可知, Flow Solver ALE(FENSAP) 模块用于计算气流流场,可求解定常和非定常可压缩 三维 Navier-Stokes 方程。流体可以是无黏性的,也 可以是黏性的,流动可以是层流或湍流,湍流由单方 程或双方程模型模拟。通过对固体表面上能量方程再 求解,可以以二阶精度直接计算出对明冰结冰至关重



Fig.1 Interactive module of FENSAP-ICE

要的壁面热通量。由文献[25]可知, 气流流场计算也 可使用 Fluent、CFX 等软件进行计算。DROP3D 是 FENSAP-ICE 系统过冷水滴或冰晶三维欧拉单次撞 击模块。DROP3D 可以接受 FENSAP、Fluent 和 CFX 流动求解数据,它可以求解粒子速度和液态水浓度的 偏微分方程,处理外部和内部流的冲击。因此, DROP3D 可以在一次粒子注入中提供整个区域的液 态水浓度、液滴速度矢量、液态水捕获效率分布、撞 击方式和撞击极限,而无需在注入点上进行复杂的迭 代过程。进入流道的过冷水滴与冰晶逐渐升温,其升 温速度与气流升温速度不同,通过粒子热平衡方程, 可以计算不同位置处过冷水滴与冰晶的温度,过冷水 滴和冰晶与气流之间的能量转移(包括气流对流、辐 射能的吸收与发射、质量耦合效应引起的蒸发、凝结、 冻结以及融化的增加与损失)。SWIM 是 ICE3D 模块 使用的积冰模型,是基于积冰形成的复杂热力学偏微 分方程, 它可以在复杂三维表面上求解冰形、水膜厚 度和表面温度。在计算中,使用 NTI 弹跳模型判断晶 体粘附。该模型中,冰晶的粘附数量由冰晶撞击速度、 晶体尺寸和薄膜高度确定。

本文通过对风扇叶片进行冰风洞试验验证积冰 位置的准确性。冰风洞试验在东北农业大学冰风洞展 开,该冰风洞出口截面为1m×1m,最大来流速度为 19 m/s,液滴粒径为 15~50 µm,液态水质量浓度为 0.3~3 g/m³,来流温度不可调节,需依靠来流温度进 行调整。试验总温为 268.15 K,液滴粒径为 20 µm, 液态水质量浓度为 0.45 g/m³,积冰时间为 1 350 s, 详细试验条件见表 1。

试验积冰位置结果如图 2a 所示,FENSAP-ICE 计算积冰位置如 2b 所示。依据积冰在弦向与沿叶高 方向的积冰位置变化进行初步验证。积冰位置主要在 叶片前缘及叶身中部与叶根处,在叶尖部位积冰生成 较少,甚至无积冰生成,在叶片尾缘中部附近生成较 薄的积冰。试验积冰与模拟积冰位置基本一致,验证 了本文模拟方法计算积冰位置的可靠性。

使用文献[26]的 NACA0012 机翼的计算条件, 对 本文积冰厚度的准确性进行检验。计算条件: 过冷水 滴质量浓度为 0.48 g/m³, 液滴粒径为 27.97 µm, 来 表 1 积冰试验条件 Tab.1 Icing test conditions

流速度 74.97 m/s, 具体验证条件见表 2。本文计算方 法得出的局部水收集系数和冰形与文献[26]中的局部 水收集系数和冰形的对比如图 3 所示。由图 3 可知, 采用本文计算方法得出的积冰极限位置与厚度结果 与文献[26]的结果基本一致,从而验证了本文模拟计 算方法的可靠性。

转速/(r·min ⁻¹)	速度/(m·s ⁻¹)	压力/Pa	液滴粒径/μm	液态水质量浓度/(g·m ⁻³)	空气温度/K
1 200	13	101 200	20	0.45	268.15
				Lce thickness /mm 3.0 2.7 2.4 2.1 1.8 1.5 1.2 0.9 0.6 0.3 0	S

a 试验积冰位置

图 2 积冰位置验证

b 模拟积冰位置

Fig.2 Verification of icing position: a) test icing position; b) simulated icing position





Fig.3 Verification of collection efficiency and ice shape: a) collection efficiency; b) ice shape

2 结果和分析

2.1 研究对象与边界条件

本文的研究对象是叶片数为27的跨音速风扇转子, 该风扇转子进口轮毂比为0.6,外径为0.2062m,为增 加计算效率,在模拟中使用加周期边界的单通道模型。 本文对飞行器处于高度为4600m时,过冷水滴 与冰晶混合相在风扇转子叶片积冰进行数值模拟,计 算域的进口条件设置为总压进口边界,进口总压为 65kPa,进口总温为264.15K,出口条件设置为平均 静压出口,壁面为无滑移绝热边界。积冰采用间断最 大结冰条件计算,该高度下水的总质量浓度为 2.826 g/m³,液态水的质量浓度选择为0.5 g/m³,液滴 与冰晶粒径均为 20 μm, 液滴与冰晶的初始温度为 264.15 K。积冰计算条件见表 3。

2.2 网格划分

本文使用商业软件 Numeca 对该模型进行计算域 网格划分,使用网格为六面体网格,网格如图 4 所示。 为保证计算结果的可靠性,对网格无关性的验证依据 文献[12],使用叶片壁面上收集系数β作为判断变量。 分别采用了 37 万、141 万、336 万和 553 万等 4 套网 格进行计算,通过水收集系数与冰晶收集系数共同判 断网格对计算结果的影响。经过计算,发现网格数大 于 141 万后,随着网格数增加,水收集系数与冰晶收 集系数变化较小(如图 5 所示),所以本文最终采用 141万网格进行计算。

2.3 数值模拟结果分析

2.3.1 转速对风扇叶片表面收集系数的影响

风扇叶片在 18 000 r/min 时,不同截面的马赫数 云图如图 6 所示。由图 6 可知,在 90%叶高入口处存 在"λ"激波,在 50%叶高入口处存在斜激波,在 10% 叶高入口处为高亚音速流场。这说明该风扇叶片扭转 较大,跨音速流影响过冷水滴与冰晶的速度,改变撞 击角度,进而影响积冰。

低转速与高转速下叶片表面的水收集系数如图7 所示。低转速时,过冷水滴的高收集区域在叶根中部, 随着转速的增加,高收集区域向叶尖尾缘方向发展;

Tab.3 Icing computational condition													
I.	转速/	进口压	进口总	液态水质量	冰晶质量浓	液滴粒	冰晶粒	初始液滴	初始冰晶	积冰时			
况	$(r \cdot min^{-1})$	力/kPa	温/K	浓度/(g·m ⁻³)	度/(g·m ⁻³)	径/µm	径/μm	温度/K	温度/K	间/s			
1	18 000	65	264.15	0.5	2.326	20	20	264.15	264.15	120			
2	17 450	65	264.15	0.5	2.326	20	20	264.15	264.15	120			
3	16 900	65	264.15	0.5	2.326	20	20	264.15	264.15	120			
4	2 300	65	264.15	0.5	2.326	20	20	264.15	264.15	120			
5	1 750	65	264.15	0.5	2.326	20	20	264.15	264.15	120			
6	1 200	65	264.15	0.5	2.326	20	20	264.15	264.15	120			

表 3 积冰计算条件





图 4 计算域网格 Fig.4 Mesh used for calculation





Fig.5 Verification of mesh independency: a) water collection efficiency; b) ice crystal collection efficiency



图 6 不同截面马赫数云图

Fig.6 Mach number contours at different spans: a) 90% span from hub; b) mid-span; c) 10% span from hub

低收集区域主要存在于叶尖,随着转速的增加,叶尖 的低收集区域减小,在叶根尾缘处开始出现低收集区 并扩大。高转速时,过冷水滴的高收集区域为叶根中 部与距轮毂 3/5 尾缘线性连接区域,随着转速的增加, 高收集区域无明显变化;低收集区域为叶尖中部与叶 根尾缘,转速增加,低收集区域变化不明显。低转速 时高收集区域的变化是由于随转速增加,气流曳力改 变过冷水滴运动状态的能力减弱,过冷水滴撞击到叶 片表面的数量增加导致的。叶根叶型弯角较大(如图 6c 所示), 增大了过冷水滴和冰晶的撞击角度, 提高 了风扇叶片对应位置的收集系数,这也同时导致了叶 根尾缘过冷水滴与冰晶含量减少,出现低收集区域。 高转速高收集区域无明显变化是由于过冷水滴在流 道中速度较大,运动状态不易被气流改变,在惯性下 运动造成的。叶尖叶型弯角较小 (如图 6a 所示), 过 冷水滴和冰晶的撞击角度减小,叶尖的收集系数减 小。叶尖低收集区域低转速时,收集系数随转速增加 而减小,高转速时无明显变化。这是因为过冷水滴低 转速时容易受到气流影响,转速增加使撞击到叶尖的 过冷水滴数量增加,高转速时气流对过冷水滴的影响 较小,收集数量变化较小。

低转速与高转速下叶片表面的冰晶收集系数如 图 8 所示。冰晶低收集区域占据叶身较大区域,随着 转速的增加,低收集区域减小。高转速时,冰晶高收 集区域主要在叶根中部,低收集区域主要集中在叶 尖。随着转速的增加,叶片表面的收集系数变化较小, 变化主要集中在尾缘。低转速时,冰晶收集系数的变 化主要是由于过冷水滴的收集变化引起的,过冷水 滴收集增加,叶片表面未凝结的液态水增加,表面 未融化的冰晶捕获增加;高转速时,冰晶收集系数变 化较小是由于对应转速时叶片表面的液态水充足, 撞击到水膜上的冰晶未捕获的极少,尾缘处的变化 则是冰晶融化,表面形成水膜后撞击到叶片表面被 捕获的。

通过粒子撞击在叶片上的角度云图(图9)可知, 低转速与高转速时,粒子在叶尖的撞击角度在 5°以 下,叶根的撞击角度最大,低转速时为 19°,高转速 时不小于 30°。随着转速的增加,低转速时叶身尾缘 的粒子撞击角度变大,高转速时粒子撞击叶片的角度 基本不变。由此可见,叶型弯角影响粒子撞击角度, 进而影响收集系数。由叶片压力面撞击角度的变化规 律可知,相较于高转速,低转速时粒子易受到气流的 影响而改变运动状态,影响收集系数。

考虑过冷水滴与冰晶的结冰机理,尤其是冰晶被 捕获时其表面融化的液态水质量分数需达到一定值。 在混合相积冰中,过冷水滴的捕获将在叶片表面生成



图 7 叶片表面水收集系数 Fig.7 Water collection efficiency on the blade surface: a) low velocity; b) high velocity







图 9 松丁裡面叫万用及 Fig.9 Angle at which the particle hit the blade: a) low velocity; b) high velocity

水膜,有利于冰晶捕获。因此,为确定过冷水滴与冰 晶的捕获原因,对叶片表面收集的过冷水滴温度与冰 晶温度进行进一步分析。

低转速与高转速叶片表面收集到的过冷水滴温 度如图 10 所示。低转速时,撞击到叶片表面的过冷 水滴温度低于冰点,且整个叶片表面过冷水滴温度无 明显变化,过冷水滴撞击到叶片表面后易凝结形成积 冰。高转速时,撞击到叶片表面的过冷水滴温度也低 于冰点,但从前缘到尾缘的温度升高,且变化明显, 这使得前缘未凝结的液态水向尾缘移动,并逐渐凝结,影响最终的积冰。

低转速与高转速叶片表面收集到的冰晶的温度 如图 11 所示。低转速时,收集到的冰晶温度低于冰 点,依据冰晶结冰机理,此时冰晶不易被捕获,但由 于捕获的过冷水滴在叶片表面生成水膜,使表面未融 化的冰晶可被捕获。高转速时,被捕获的冰晶从前缘 至尾缘温度升高,并在尾缘处高于冰点,这使得除了 表面未融化的冰晶被叶片表面过冷水滴形成的水膜



Fig.10 Temperature of supercooled droplets on the blade surface: a) low velocity; b) high velocity



图 11 叶片表面冰晶温度

Fig.11 Temperature of ice crystals on the blade surface: a) low velocity; b) high velocity

捕获外,在不存在水膜的位置(如叶根尾缘)或水膜 较少的区域,冰晶可以通过其自身表面融化形成的水 膜被叶片捕获。

2.3.2 转速对截面冰形的影响

第20卷 第7期

为进一步明确低转速与高转速积冰的异同及原 因,依据不同转速叶片表面的积冰情况,选择距轮毂 10%的截面进行具体分析。风扇叶片距轮毂 10%截面 处在不同转速下的积冰冰形如图 12 所示。低转速时, 叶片表面积冰厚度除前缘外,基本无明显变化,且积 冰整体表面光滑。随着转速的增加,风扇叶片压力面 及前缘积冰厚度增加。这是因为低转速时,过冷水滴 与冰晶易受到气流的影响发生偏转,转速增加,气流 偏转减小,撞击至风扇叶片表面的过冷水滴与冰晶增 加,即对应位置处的过冷水滴与冰晶含量增加,增加 了收集系数。 另外, 低转速时过冷水滴与冰晶的温度 不易超过冰点,过冷水滴撞击后易凝结,水膜流动较 少,故积冰厚度增加且表面光滑。高转速时,叶片表 面积冰厚度变化较大,自前缘至中后部先增加、后减 小,积冰表面粗糙,前缘生成明显的角状冰(如图 13 所示),尾缘处几乎无积冰生成。随着转速的增加, 前缘积冰厚度减小,积冰末端厚度增加。这是因为高





Fig.13 Ice shape on the leading edge of the blade

转速时,转速增加,叶片表面未凝结的水膜受到的气 流剪切力增加,水膜运动程度加剧,在前缘积冰量减 少,前缘积冰厚度减小,水膜在流动中的冻结量减小, 积冰极限位置向尾缘移动。

由图 14 可知,水膜的径向流动主要在前缘驻点 及压力面叶身上半区,风扇转子前缘驻点附近水膜径 向速度较大。在水膜流动过程中,该部分生成的积冰 相较于其两侧较少,积冰在前缘位置生成角状冰。随 着转速降低,驻点附近的水膜径向速度减小,积冰增 多,前缘角状冰特征减弱。

通过水收集系数与冰晶收集系数对积冰冰形进 行分析。风扇叶片在不同转速下的水收集系数和冰晶 收集系数如图 15 所示。前缘过冷水滴与冰晶收集系 数差距较小,这是由于在进口处粒子的速度含量差别 较小,流道中粒子收集系数差别较大是由于粒子在流 道中的含量及速度差异较大。高转速时,叶身水收集 系数在最大值点前后变化均比较明显。在最大值点 前,水收集系数自前缘向尾缘方向增加;过最大值点 后,水收集系数减少,至尾缘附近后水收集系数基本 为0,最大值点后的变化比最大值点前的变化更加显 著。低转速时,叶身水收集系数最大值点到前缘方向



变化相对平缓,到尾缘方向变化相对明显。于冰晶而 言,压力面的收集系数均比较平缓,只有高转速时前 缘与尾缘有较为明显的波动。由撞击角度与冰晶温度 可知,前缘收集系数较低是因为冰晶碰撞角度小,冰 晶易弹跳而使收集系数减小,尾缘处冰晶表面融化, 增加了收集系数。因此,水收集系数与冰晶收集系数 较为完整地体现了积冰冰形的变化。

收集系数与对应部件位置的粒子含量相关,通过 流道中的液态水含量与冰晶含量(如图 16 所示)可知, 过冷水滴与冰晶在流道中聚集。随着转速的增加,流 道中过冷水滴与冰晶的聚集位置在低转速时向前缘移 动,高转速时变化较小。此外,过冷水滴与冰晶在低 转速时的聚集位置比在高转速时偏向出口,这与水收 集系数和冰晶收集系数在叶身上的峰值和分布一致。

过冷水滴与冰晶的聚集边界在低转速时呈现明 显的弧形,高转速时过冷水滴边界近乎直线。通过过 冷水滴与冰晶在流道中轴向速度(如图 17 所示)可 知,低转速时,过冷水滴与冰晶的轴向速度小,受到 的惯性小,过冷水滴与冰晶随气流穿过流道。随着转 速的增加,流道中过冷水滴与冰晶速度增加,运动状 态不易被改变,故聚集位置向前缘移动。高转速时, 过冷水滴与冰晶的轴向速度较高,过冷水滴与冰晶不 易受到气流曳力的影响,因此聚集边界无明显变化。

流道中的冰晶温度如图 18 所示。低转速时,流 道中的冰晶表面温度未超过冰点,且无明显变化。高 转速时,前缘附近冰晶表面温度低于冰点,自前缘向 尾缘,冰晶表面温度升高,在尾缘附近,冰晶表面温 度高于冰点,这是由于高转速时流道中的气流温度较







Fig.16 Liquid water content and ice crystal content in the flow field: a) liquid water content; b) ice crystal content



图 17 流场中过冷水滴与冰晶轴向速度

Fig.17 Axial velocity of supercooled droplets and ice crystals in the flow field: a) supercooled droplets; b) ice crystals



图 18 孤幼中不问我迷的你丽温度 Fig.18 Temperature of ice crystals at different velocities in the flow field

高所造成的。此外,流道中的冰晶表面温度与叶片表 面对应截面收集到的冰晶表面温度一致。

3 结论

通过对风扇叶片高转速与低转速积冰的研究,得 出以下结论:

1)低转速撞击到叶片表面的粒子的运动方向与 叶片的夹角小于高转速时形成的夹角,使得低转速时 冰晶容易弹跳再次进入流道,叶表捕获量相对减少。

2)低转速时风扇叶片表面的温度均低于冰点, 且整个叶身温度差较小,过冷水滴被捕获后未冻结的 水膜极少,表面生成的积冰较为光滑。高转速时叶表 温度的变化大,且存在高于冰点的位置,水膜流动较 多,积冰表面粗糙。

3)低转速时流道内气流温度未升高至冰点以上, 而高转速时气流温度在尾缘附近超过冰点,使得高转 速时冰晶在不存在水膜的情况下可以被捕获,而低转 速时的冰晶捕获只能依靠过冷水滴形成的水膜。

参考文献:

2017.

- CAO Yi-hua, MA Chao, ZHANG Qiang, et al. Numerical Simulation of Ice Accretions on an Aircraft Wing[J]. Aerospace Science and Technology, 2012, 23(1): 296-304.
- [2] LI Lin-kai, HU Hui. An Experimental Study of Dynamic Ice Accretion Process on Aero-Engine Spinners[C]// Proceedings of the 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Grapevine: AIAA, 2017.
- [3] LIU Yang, LI Lin-kai, NING Zhe, et al. Experimental Investigation on the Dynamic Icing Process over a Rotating Propeller Model[J]. Journal of Propulsion and Power, 2018, 34(4): 933-946.
- [4] 吴涛. 大涵道涡扇发动机风扇叶片通道水滴运动特性 及表面结冰预测[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
 WU Tao. Investigation on Water Droplet Movement Characteristic and Icing Region Prediction for High Bypass Ratio Turbofan Rotating Fan[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [5] BELZ R, BRASIER C, MURPHY P, et al. A Turbine Engine Inlet Viewing System[C]// Proceedings of the 22nd Joint Propulsion Conference. Huntsville: AIAA, 1986.
- [6] 梁鹏. 旋转锥体表面积冰机理研究[D]. 北京: 北京交 通大学, 2017.
 LIANG Peng. Study of Icing Mechanism on the Rotating Cone Surface[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,
- [7] DONG W, ZHU J J, ZHENG M, et al. Numerical Study of Ice Accretion on Rotating Aero-Engine Cone[C]// 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. St Petersburg: International Council of the Aeronautical Sciences, 2014.
- [8] VILLEDIEU P, TRONTIN P, CHAUVIN R. Glaciated and Mixed Phase Ice Accretion Modeling Using ONERA 2D Icing Suite[C]// Proceedings of the 6th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Atlanta:

AIAA, 2014.

- [9] TRONTIN P, BLANCHARD G, VILLEDIEU P. A Comprehensive Numerical Model for Mixed-Phase and Glaciated Icing Conditions[C]// Proceedings of the 8th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Washington D C: AIAA, 2016.
- [10] TRONTIN P, BLANCHARD G, KONTOGIANNIS A, et al. Description and Assessment of the New ONERA 2D Icing Suite IGLOO2D[C]// Proceedings of the 9th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Denver: AIAA, 2017.
- [11] ALIAGA C N, AUBÉ M S, BARUZZI G S, et al. FENSAP-ICE-Unsteady: Unified In-Flight Icing Simulation Methodology for Aircraft, Rotorcraft, and Jet Engines[J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(1): 119-126.
- [12] 陈宁立,杜健民,吉洪湖,等.离心力对于旋转叶片表面积冰影响的数值模拟研究[J]. 推进技术, 2020, 41(6): 1314-1323.
 CHEN Ning-li, DU Jian-min, JI Hong-hu, et al. Numerical Study of Effects of Centrifugal Force on Ice Accretion on a Rotor Blade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(6): 1314-1323.
- [13] 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.
- [14] 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 Qi-lei, NIU Jun-jie, AN Bo, et al. Numerical Simulation of Ice Crystal Icing under Mixed-Phase Conditions[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(2): 168-175.
- [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): 124085.
 BU Xue-qin, 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): 124085.
- [16] FARAG K, BRAGG M. Three Dimensional Droplet Trajectory Code for Propellers of Arbitrary Geometry[C]// Proceedings of the 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1998.
- [17] 陈希,招启军,赵国庆. 计入离心力影响的直升机旋翼

翼型结冰数值模拟[J]. 航空动力学报, 2014, 29(9): 2157-2165.

CHEN Xi, ZHAO Qi-jun, ZHAO Guo-qing. Numerical Simulation of Ice Accretion on Rotor Airfoil of Helicopter Considering Effects of Centrifugal Force[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(9): 2157-2165.

- [18] CHEN Xi, ZHAO Qi-jun. Numerical Simulations for Ice Accretion on Rotors Using New Three-Dimensional Icing Model[J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(4): 1428-1442.
- [19] CHEN Ning-li, JI Hong-hu, CAO Guang-zhou, et al. A Three-Dimensional Mathematical Model for Simulating Ice Accretion on Helicopter Rotors[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(8): 083602.
- [20] DAS K, HAMED A, BASU D. Ice Shape Prediction for Turbofan Rotating Blades[C]// Proceedings of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2006.
- [21] NORDE E, VAN DER WEIDE E T A, HOEIJMAKERS H W M. Eulerian Method for Ice Crystal Icing[J]. AIAA Journal, 2018, 56(1): 222-234.
- [22] 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 Fei-fei, 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.
- [23] ZHANG Li-fen, LIU Zhen-xia, ZHANG Mei-hua. 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.
- [24] BOURGAULT Y, BEAUGENDRE H, HABASHI W G. Development of a Shallow-Water Icing Model in FENSAP-ICE[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(4): 640- 646.
- [25] ANSYS Incorporated. ANSYS FENSAP-ICE User Manual[M]. Canonsburg: ANSYS Incorporated, 2021.
- [26] 易贤. 飞机积冰的数值计算与积冰试验相似准则研究
 [D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2007.
 YI Xian. Numerical Computation of Aircraft Icing and Study on Icing Test Scaling Law[D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2007.
 责任编辑: 刘世忠