

锥角对旋转整流罩积冰影响的模拟实验

胡娅萍¹, 吉洪湖¹, 王 健¹, 陈宁立¹,
曹广州¹, 童 辉², 庞黎刚²

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 中国航空工业集团公司 商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108)

摘 要: 采用缩比模型对 4 种不同锥角的旋转整流罩进行了冰风洞积冰模拟实验, 推导出旋转表面积冰相似参数, 并根据重要参数的匹配确定缩比整流罩模型的积冰实验参数。在实验中采用高速摄像系统记录冰生长过程及最终冰形。结果表明: 4 种锥角的整流罩表面积冰均由初期生成、分布连续的明冰和后期增长迅速的白色霜冰构成; 锥角小于等于 74° 的整流罩表面霜冰为针状或粒状, 积冰厚度较小; 锥角大于 80° 的整流罩表面霜冰为羽毛状, 积冰厚度较大, 并伴随冰脱落现象, 锥角较大的整流罩冰脱落位置向下游移动。

关 键 词: 旋转整流罩; 锥角; 缩比模型; 积冰模拟; 积冰脱落

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on effect of cone angle on ice accretion of rotating spinner

HU Ya-ping¹, JI Hong-hu¹, WANG Jian¹, CHEN Ning-li¹,
CAO Guang-zhou¹, TONG Hui², PANG Li-gang²

- (1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Commercial Aircraft Engine Company Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Shanghai 201108, China)

Abstract: Simulated ice accretion tests on four sub-scale rotating spinner models with different cone angles were conducted in icing wind tunnel. The similarity parameters of ice accretion were derived for rotating surface. And the ice accretion test parameters for sub-scale spinner models were determined according to the matching of important similarity parameters. The ice accretion and final ice shapes were recorded by a high speed video system in the test. The test results show that the ice accreted on these four models is composed of early formed glaze ice which entirely covers the clean surface and subsequent white rime ice which grows rapidly. For the spinner model with cone angle is no larger than 74° , the rime ice appears in the form of needle or grain, which is relatively thinner. For the spinner model with cone angle larger than 80° , the rime ice is feather shaped which is thicker and could be partly shed from the icing surface. The position of shedding for the spinner model with larger cone angle moves downstream.

Key words: rotating spinner; cone angle; sub-scale model;
ice accretion simulation; ice accretion shedding

在一定的气象条件下,航空发动机进口的旋转整流罩会遭受积冰的危害。积冰除了会导致气动性能的恶化和空气流量的降低,还容易从旋转表面甩落,并被吸入发动机内部,造成部件损坏。因此,必须对整流罩采取防冰措施。为了合理地设计防冰系统,需要采用实验手段对旋转整流罩表面的积冰现象进行细致的观察和深入的了解,揭示其积冰类型、形貌和冰生长特征,从而进一步发展并验证积冰的数值模拟技术,并为防冰系统的设计提供基础。若直接采用真实发动机开展旋转整流罩等部件的积冰实验,运行成本很高,而且研究周期长,而在地面冰风洞中进行部件模型的积冰模拟实验则经济得多,而且周期短,因此它已成为积冰实验研究的主要手段。

在冰风洞中开展积冰模拟实验时,有时受实验段尺寸或积冰参数的限制,需要采用缩比实验模型与缩比实验参数,这就涉及到积冰相似理论的发展和应用。国外已经对固定表面积冰的相似理论进行了比较系统的研究^[1-6]。最简单的积冰相似准则是在模型尺寸、温度、速度和水滴尺寸都与真实条件一致时根据水滴撞击质量相似推出的液态水含量(LWC,量符号为 C_{lw})与积冰时间 t 乘积为常值的准则^[6],即 $C_{lw} \cdot t = \text{const}$,该准则没有考虑积冰的热力学过程相似,仅对霜冰适用,而且要求苛刻。前苏联和瑞典的研究组提出 Ingelman-Sundberg 准则^[6],考虑了水滴运动、撞击和积冰热力学过程的相似,要求实验和真实条件下的液态水含量、水滴修正惯性系数、聚集因子和温度相等,可实现实验模型和水滴尺寸的缩比。但由于温度匹配不能完全体现积冰热力学过程的相似,故该准则也不能得到相似的明冰积冰。Charpin 等^[7]提出 ONERA (office national d'études et de recherché aeospatiales) 的准则,采用冻结系数和相对热因子的匹配取代温度的匹配来实现积冰热力学过程的相似,不仅适用于霜冰,在合适的压力范围内,也可得到相似的明冰与混合冰。Ruff 等^[4]在此基础上提出 AEDC (arnold engineering development center) 的准则,比 ONERA 的准则增加一个相似参数即水滴或空气的能量传递参数的匹配进一步完善积冰热力学的相似,是当前应用于固定表面积冰最严格和最完整的相似准则,已通过冰风洞积冰实验证实其具有相对较高的有效性^[6]。但对于旋转表面的积冰模拟实验目前还没有形成单独的方法^[7],到目前鲜见关于旋转整流罩等表面的积冰相似理论的研究报道,而且针

对旋翼、风涡轮叶片等开展的积冰模拟实验仍然沿用固定表面的积冰相似理论^[7-12],但旋转对积冰的影响是显著的^[13],故应在积冰相似理论中考虑旋转产生的效应。

国外对旋翼、风扇叶片等旋转部件表面的积冰现象已经进行了比较深入的研究^[14-18],包括大量的冰风洞模拟实验以及近年来开展的三维数值模拟,但对于旋转整流罩积冰、防冰的研究,公开的文献报道很少。GE(通用电气公司)的 McVey 等在典型积冰条件下进行的旋转整流罩积冰实验发现其表面会产生类似“针”状冰。Colin^[19]采用软件 LEWICE3D 对高涵道比涡扇发动机 E³ 的过冷水滴撞击和积冰进行了数值模拟,发现其进口风扇与旋转整流罩组合表面的水滴撞击率最大为 0.6,该组合可除去超过进入进气道的水滴总质量的 36% 的积冰,本身就是一种有效的除冰结构。

在国内,对积冰的研究主要集中在数值模拟方面^[20-23],计算的模型通常是翼型。在积冰相似理论方面,常世楠等^[24]采用数值计算方法研究了 AEDC 准则对积冰的影响,为缩比模型的积冰试验方法提供了参考。易贤等^[25]基于 AEDC 和 ONERA 准则,提出了一种将动压作为相似参数的改进的积冰实验相似方法。上述研究都是针对固定表面积冰。近几年对旋转整流罩的积冰开展了初步的数值研究。胡娅萍^[26]采用 Messinger 模型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冰生长和冰形的影响。赵秋月等^[27]采用拉格朗日法计算了旋转整流罩的二维水滴撞击特性,计算结果表明随锥角和转速的增大,水收集系数降低且撞击区域变小。

综上所述,目前国内外对于旋转表面积冰相似理论研究的公开文献几乎空白,而且国内对于旋转部件的积冰研究也仅处于二维数值模拟阶段。为了揭示旋转整流罩的积冰特征,本文在固定表面积冰相似理论的基础上推导出适用于旋转表面积冰的相似参数,并通过重要参数的匹配来确定积冰实验参数,据此开展旋转整流罩的冰风洞积冰模拟实验研究,对 4 种不同锥角整流罩模型在相近积冰条件下的积冰类型、形貌和积冰厚度进行了对比分析。本文的旋转整流罩积冰模拟实验可为旋转表面积冰模拟实验技术以及整流罩的积冰、结构防冰等研究提供有益的参考。

1 实验冰风洞及其条件

本文采用武汉航空仪表厂的冰风洞^[28]进行

旋转整流罩的积冰实验。该冰风洞建于20世纪90年代后期,是一个封闭回流式循环冷冻风洞,主要包括制冷系统、喷雾系统、风扇叶片和实验段等部分。其中制冷系统利用氨制冷使实验段的静温处于要求的积冰温度;喷雾系统通过调节水压、水量和空气流量为实验段提供所需液态水含量和水滴直径的空气-过冷水滴两相来流;风扇叶片用以提供风速;实验段横截面尺寸为180 mm×280 mm,长度为860 mm。

该冰风洞可提供的积冰参数范围为:积冰温度为273.15~253.15 K,来流速度为0~180 m/s,液态水含量为0.3~3 g/m³,水滴平均直径为20~25 μm,实验段总压约为92 448 Pa。该冰风洞的积冰参数范围基本涵盖了防冰设计标准的积冰条件。

由于该冰风洞实验段尺寸很小,无法进行全尺寸整流罩的积冰实验,故本文采用缩比模型来开展研究,这就需要运用积冰相似理论将全尺寸整流罩的积冰条件转化为缩比整流罩模型的积冰模拟实验参数。

2 积冰模拟实验参数的确定

2.1 全尺寸整流罩及实际条件

本文研究的民用涡扇发动机风扇整流罩为圆锥体,其锥底直径 D_r (下标 r 表示全尺寸整流罩的参数,下文同)约为400 mm,研究的锥角有4种,分别为60°,74°,82°和86°。飞行马赫数 Ma 选定为0.2,此时整流罩的转速 ω_r 约为3700 r/min。

全尺寸整流罩的积冰气象条件为间断最大条件^[29],积冰温度 $T_{\infty,r}=263$ K,液态水含量 $C_{1w,r}=0.3$ g/m³,水滴平均直径 $d_r=50$ μm。积冰云层水平范围为19 km,根据 $Ma=0.2$,可得积冰时间 t_r 约为293 s。

2.2 旋转表面积冰相似参数分析

过冷水滴积冰包含4个物理过程:绕流空气流动、过冷水滴的运动、积冰表面水滴的撞击以及积冰的热力学过程。本文基于固定表面积冰相似理论^[6],针对旋转整流罩表面的积冰推导了以上4个过程的控制方程,并将这些方程无量纲化获得如下积冰相似参数:

- 1) 雷诺数 $Re=\rho_a u_\infty D/\mu$;
- 2) 罗斯比数 $Ro=u_\infty/(\omega_r r)$;
- 3) 修正水滴惯性系数

$$K_0 = \left[\frac{\rho_w R_a^\kappa}{18 k_1 (1-\kappa) \mu^{1-\kappa}} \right] \frac{d^{2-\kappa} u_\infty^{1-\kappa} T_\infty^\kappa}{D p^\kappa}$$

4) 聚集因子 $A_c=C_{1w} \cdot u_\infty t/(\rho_i D)$,表征积冰表面撞击水质量的相似;

5) 冻结系数 $n=c_{p,w}(\varphi+\theta/b)/L_f$,表征凝固成冰的水量占撞击水量的比例;

6) 相对热因子 $b=C_{1w} \cdot u_\infty \beta c_{p,w}/h_c$,表征撞击水的总比热容与表面对流散热能力之比;

7) 空气的能量传递参数 $\theta=T_s-T_\infty-r_c u_\infty^2/(2c_{p,a})+\dot{m}_e L_v/h_c$;

8) 水滴的能量传递参数 $\varphi=T_0-T_\infty-\frac{u_\infty^2}{2c_{p,w}}$ 。

以上表达式中 ρ_a, ρ_w, ρ_i 分别为空气、水和冰的密度, u_∞ 为来流速度, D 为特征尺寸即整流罩的锥底直径, μ 为空气的动力黏度, ω_r 为整流罩转速, r 为整流罩外表面的半径, R_a 为空气的气体常数, k_1 和 κ 为常数, β 为水收集系数, h_c 为积冰表面传热系数, T_s, T_0 分别为积冰表面温度和冰点温度, $\dot{m}_e$ 为单位面积上蒸发水速率, r_c 为恢复因子, L_f, L_v 分别为水的凝固潜热和蒸发潜热, $c_{p,a}, c_{p,w}, c_{p,i}$ 分别为空气、水和冰的比定压热容。

这8个相似参数中, θ 和 φ 具有温度的量纲,其余的均为无量纲参数。 θ, φ 和 b 包含在冻结系数 n 中。 Ro 是考虑空气-过冷水滴两相流中旋转效应的参数。除去新增的参数 Ro ,其他7个参数均与固定表面积冰相似理论^[6]中的定义一致。

若在模型几何相似的前提下满足以上相似参数在缩比模型和全尺寸模型的积冰中保持一致,则可实现积冰包含的4个物理过程的相似,故积冰类型相同,积冰量和冰形也是相似的。

2.3 积冰模拟实验参数的计算

要使上节推导出的所有相似参数在全尺寸整流罩和缩比模型的积冰中都保持相等是不可能的。本文依据固定表面积冰的AEDC相似准则^[6],保留对积冰生长和冰形影响显著的相似参数,并加入表征旋转效应的 Ro ,故应用以下相似参数的匹配来实现全尺寸与缩比整流罩积冰的相似:

$$n_s = n_r \quad A_{c,s} = A_{c,r} \quad Ro_s = Ro_r \\ \varphi_s = \varphi_r \quad \theta_s = \theta_r \quad K_{0,s} = K_{0,r}$$

式中下标 s 表示缩比实验模型参数,下文同。

根据冰风洞实验段横截面的堵塞比不大于15%的要求,确定缩比整流罩模型的锥底直径均为 $D_s=100$ mm, D_s 与 D_r 之比即为几何缩比因子。

设来流速度为自由选择参数,并令 $u_{\infty,s} = u_{\infty,r}$;再根据 $Ro_s = Ro_r$ 以及几何缩比因子计算缩比整流罩的实验转速;然后由 $\varphi_s = \varphi_r$ 确定积冰温度;实验的水滴直径根据 $K_{0,s} = K_{0,r}$ 进行迭代计算获得;接下来通过 $n_s = n_r$ 的匹配确定实验的液态水含量(同时也保证了 $\theta_s = \theta_r$);最后由 $A_{c,s} = A_{c,r}$ 计算实验的积冰时间. 由以上方法获得的缩比整流罩模型积冰实验参数如表 1 所示.

表 1 全尺寸与缩比整流罩积冰参数

Table 1 Ice accretion parameters for full-sized and sub-scaled spinner

参数	全尺寸整流罩	缩比整流罩
锥角/(°)	60, 74, 82, 86	
$\omega/(r/min)$	3 700	15 200
$u_{\infty}/(m/s)$	65	65
T_{∞}/K	263	263
$C_{lw}/(g/m^3)$	0.3	0.61
$d/\mu m$	50	21
t/s	293	35

3 实验模型与实验装置

根据缩比整流罩模型的参数进行实验模型以及旋转实验装置的设计与加工.

缩比整流罩实验模型是与全尺寸整流罩几何相似的锥体,采用树脂基芳纶纤维复合材料制作. 加工完成的 4 种锥角的实验模型如图 1 所示,整流罩与金属连接件采用强力胶黏合.

旋转实验装置由主体部分和驱动部分构成,如图 2 所示,主体部分包括整流罩、主轴、轴套、被



图 1 缩比整流罩实验模型

Fig. 1 Test model of sub-scaled spinner

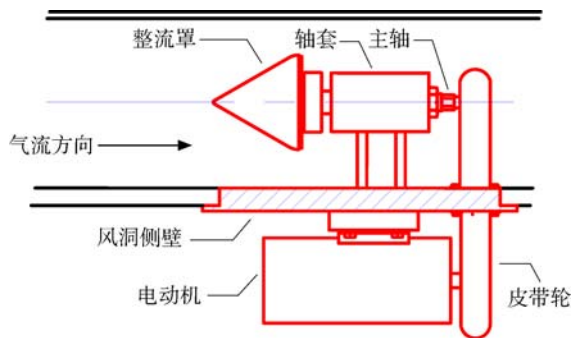


图 2 旋转实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of rotating test equipment

动皮带轮等,位于冰风洞实验段内;驱动部分包括电动机、主动皮带轮等,位于冰风洞实验段外,两部分通过穿过冰风洞侧壁皮带传动.

4 积冰记录设备与实验步骤

4.1 积冰记录设备

实验采用 Hot Shot MegaSC 高速摄像机记录冰生长过程,其拍摄速度为每秒 100 帧,曝光时间为 0.0001 s,这对于冰形的生长捕捉已经足够及时. 拍摄的图像像素根据摄像机与实验段的距离、积冰拍摄时间的长短等进行设置. 积冰过程中冰形细节与最终冰形采用 Canon 5D Mark 2 高清照相机拍摄,其连拍速度为每秒 3.9 张.

4.2 实验步骤

每个整流罩模型的积冰实验按以下步骤进行:①安装实验模型与实验装置;②冰风洞制冷降温;③实验段静温接近要求的积冰温度时开启电动机调节转速至设定值,同时对摄像机进行消除噪声处理;④冰风洞开始喷射水雾,5 s 后开启摄像照相设备记录;⑤到达积冰时间停止喷射水雾,15 s 后关闭摄像照相设备;⑥关闭电动机,实验模型停转;⑦最终冰形拍摄.

5 实验结果分析

本文先以 86° 锥角实验模型为例,分析旋转整流罩表面的积冰特征,再通过对比,分析锥角对积冰的影响.

5.1 典型锥角整流罩的积冰特征

图 3 为高清照相机拍摄的 86° 锥角旋转整流罩在 10, 20, 30, 35 s 时的积冰照片. 当积冰时间为 10 s 时,如图 3(a) 示,整流罩表面基本是透明的,说明从开始到 10 s 时,表面为明冰生长,由图可见其冰形平整,只在靠近锥底的后部有局部小突起.

积冰时间为 20 s 时,如图 3(b)示,除了前端,其他部分出现白色的冰,表明从 10 s 到 20 s 该区域的冰生长由明冰转变为霜冰,图中显示沿着流向霜冰是一层一层的,其分布并不连续.在前端锥顶附近,仍然为明冰.图 3(c)为 30 s 时的冰形,此时锥顶附近仍旧为明冰,厚度增加不多;但下游白色霜冰的增长很显著,在整流罩前部可见其片状形态.图 3(d)为 35 s 时的冰形,此时表面霜冰已经出现部分脱落,脱落位置主要在整流罩的中部和后部.

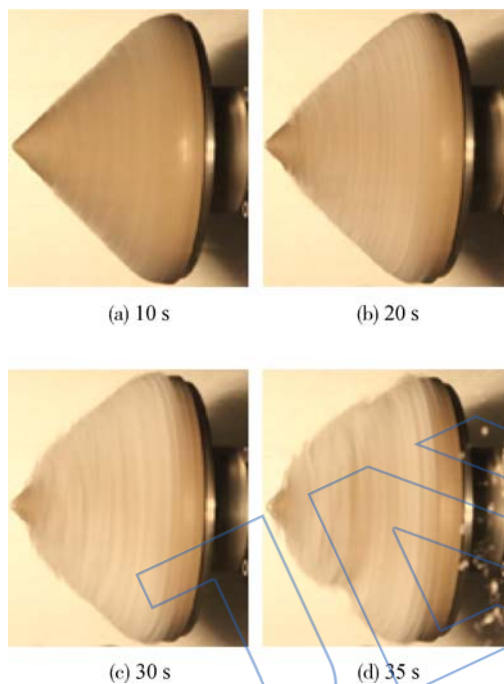


图 3 86°锥角整流罩表面在不同时刻积冰照片
Fig. 3 Icing accretion pictures at different times on spinner's surface with cone angle of 86°

由图 3 可知,在实验的积冰过程中大约前 1/3 时段内,整流罩表面为明冰生长,而且冰形贴合表面,这是因为光滑表面初始收集到的过冷水会“铺展”在表面上,在此过程中部分水凝固,因而形成了冰形平整的明冰;靠近锥底处出现冰形局部小突起是由于此处水膜受到的离心力较大,在离心力、气流剪切力以及表面张力的共同作用下,“溪流”态的水膜向外运动并凝固.之后,整流罩前部也出现冰层突起,突起处的对流散热很剧烈,故收集的水全部凝固形成霜冰,使得“突起”继续增长,进一步加剧对流散热,霜冰的生长也更迅速,到 30 s 左右时,突起的霜冰呈现出片状形态.此后,由于片状霜冰向外伸展得更长,所受离心力越来越大,故部分霜冰从表面甩落.

旋转整流罩的锥顶区域在整个积冰过程中一

直为明冰生长,冰层比较平整.原因是此处收集的撞击水量虽然最多,但仅有部分水在此凝固,其余的都流向下流.另外,锥顶处水膜所受的离心力很小,因此冰层不会出现明显的突起.

为了定量地分析整流罩表面的冰形、冰厚随时间变化的特征,本文提取并合成了高速摄像机拍摄的不同时刻的积冰照片中的冰形轮廓.为了反映不同大小模型表面冰形的几何相似性,本文还采用锥底直径 D 将冰形尺寸无量纲化,形成无量纲的冰形轮廓增长图,如图 4 给出的就是 86°锥角整流罩的无量纲冰形增长图.由图可见,在积冰过程的前 10 s (约前 1/3 时段)内,明冰冰厚的增长很缓慢,在除整流罩锥顶附近的其他范围内,其冰厚几乎仅为 20 s 时冰厚的 1/4,冰形比较平整地贴合表面.从 10 s 到 30 s (约后 2/3 时段)的过程中,整流罩锥顶下游霜冰的增长就迅速得多,而且冰形变得极为凹凸不平.20 s 时可见整流罩前部冰形轮廓呈现出短“羽毛”的形态,30 s 时表面大部分区域积冰的“羽毛”状特征比较明显.在整流罩的锥顶区域,整个过程中明冰的增长都比较缓慢,冰层很薄,往下游,积冰突然变厚,直到接近锥底处,厚度开始降低至接近于零.由图可见,30 s 时锥顶下游的无量纲冰厚基本处于 0.1~0.2 范围内.

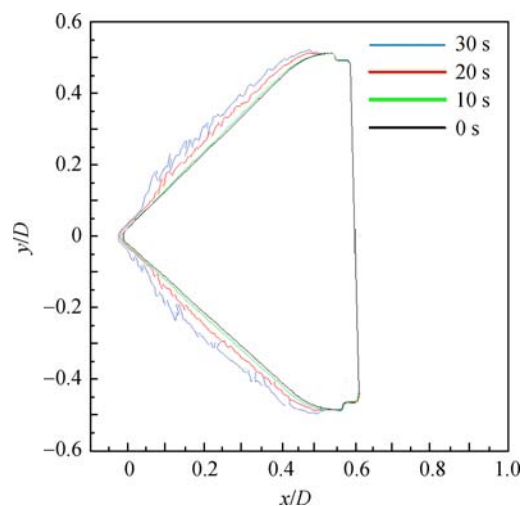


图 4 86°锥角整流罩无量纲冰形增长图
Fig. 4 Growth graph of dimensionless ice shape profile of spinner with cone angle of 86°

图 5 显示的是锥角为 86°的旋转整流罩在积冰过程结束后的冰形照片.从图中可以很直观地看出白色霜冰呈现出“羽毛”形态,每片“羽毛”冰沿着向后倾斜的方向从表面往外伸展,这与

McVey 等拍摄的旋转整流罩表面的积冰形貌很类似. 在整流罩表面上沿着流向以及周向, 一片片“羽毛”冰的分布很密集, 但“羽毛”冰之间的空隙仍然清晰可见. 由图还可见在整流罩中后部的某个区域, “羽毛”状霜冰已经从表面脱落, 脱落区域面积大约占整流罩表面的 $1/4$, 脱落处可明显看到底层透明的明冰. 实验结束后在除去整流罩模型表面积冰的操作中发现, 外部的“羽毛”状霜冰由于在表面的附着面积小, 很容易除去, 稍用力触碰就会脱落, 但霜冰内的底层明冰与表面结合得比较牢固, 不容易除去.



图 5 86° 锥角整流罩最终冰形照片

Fig. 5 Photo of final ice shape on spinner with cone angle of 86°

5.2 锥角对旋转整流罩积冰的影响

图 6 给出了 82° 锥角的整流罩在积冰过程中不同时刻的无量纲冰形图. 可见, 冰形随时间变化的情况与 86° 锥角整流罩的类似, 30 s 时表面的无量纲冰厚也大致相当. 不同之处主要表现在以下两个方面: 第一, 10 s 时的积冰比 86° 锥角整流罩的略厚, 而且已经出现毛糙不平; 第二, 外层霜冰的冰形轮廓更加毛糙.

82° 锥角整流罩在 10 s 时的积冰冰形显示出凹凸不平表明其表面上冰增长的突起比 86° 锥角整流罩在时间上提前了, 这是由于两者的锥底直径 D_s 相同, 故在与锥底面相同距离处, 82° 锥角整流罩锥面的半径较大, 于是锥面上水膜所受的离心力较大, 因此较早地出现了冰层的局部突起, 10 s 时冰厚也略大. 20 s 和 30 s 时刻 82° 锥角整流罩表面的积冰外形比 86° 锥角整流罩的更毛糙应该也是由于表面水膜受到的离心力较大, 导致霜冰向表面外的增长更加显著.

图 7 是 82° 锥角整流罩的最终冰形照片. 从图

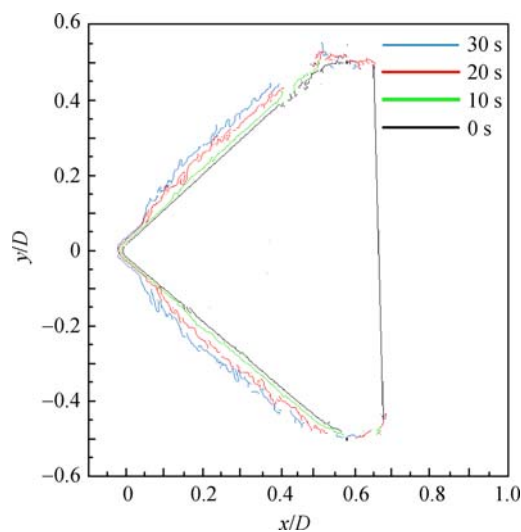


图 6 82° 锥角整流罩无量纲冰形增长图

Fig. 6 Growth graph of dimensionless ice shape profile of spinner with cone angle of 82°



图 7 82° 锥角整流罩最终冰形照片

Fig. 7 Photo of final ice shape on spinner with cone angle of 82°

中可见, 表面霜冰的“羽毛”特征不如 86° 锥角整流罩的明显, 或者说每片霜冰显得略小和细长, 但分布很密集, 所以在图 6 中其外形轮廓比 86° 锥角整流罩的更毛糙. 图 7 显示表面的霜冰也有部分已经脱落, 在整流罩的前部和中部分别有一大一小两片脱落区域. 将图 7 与图 5 对比可发现, 在本文的实验研究中, 锥角较大的整流罩表面霜冰的脱落位置向下游偏移.

图 8 给出的是 74° 锥角的整流罩在积冰过程中不同时刻的无量纲冰形图. 由图可见, 10 s 时冰层也很薄, 而且平整地贴合表面, 但其他时刻的积冰形态与 86° 锥角整流罩的存在较大差异: 在 20 s 时, 冰厚比 10 s 时有明显的增长, 但冰形的凹凸不平特征比 86° 锥角整流罩的微弱得多, 相对表面

只出现一些小突起;到30 s时,冰厚比20 s时增长不多,而且冰形仍然比较规则,突起不显著.总的来说,在30 s的积冰过程中,74°锥角的整流罩表面的积冰厚度明显减小,无量纲冰厚在0.1以下,而且整体冰形一直比较贴合表面,没有出现“羽毛”态.锥顶的冰层仍然较薄,但与其下游冰层的厚度差别不大.

锥角为74°的旋转整流罩表面的积冰之所以呈现出上述特征是因为与86°锥角的整流罩相比,尽管锥底不变、锥角减小使得与锥底距离相同位置处的锥面半径增大,水膜所受的离心力有所增大,但锥角减小也导致水膜所受的气流剪切力与离心力的夹角增大,于是水膜受到的合力在轴向的分量增大,这在一定程度上削弱了水膜向表面外运动的趋势,因此冰形的突起明显减弱,表面对流散热不如86°锥角整流罩的那样强烈,冰层突起处的增长也减弱,冰形不会出现“羽毛”态.

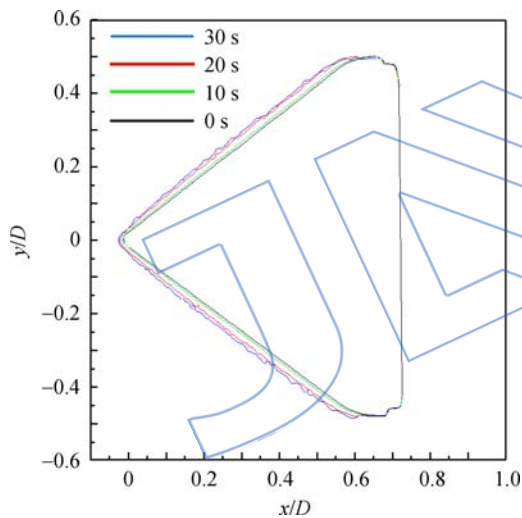


图8 74°锥角整流罩无量纲冰形增长图

Fig. 8 Growth graph of dimensionless ice shape profile of spinner with cone angle of 74°

图9给出了74°锥角整流罩的最终冰形照片.从图中可以看出,外层的积冰仍然是白色的霜冰,分布也不连续,但其形态接近于粒状,相对于表面的突起并不明显,因此在图8中冰形轮廓比较贴合表面.由于粒状的霜冰与表面的结合比较牢,故并没有从表面脱落.在实验结束后的除冰过程中发现霜冰底仍然存在一个薄层平整覆盖整流罩表面的明冰,说明74°锥角整流罩的积冰随时间变化的特征与86°和82°锥角整流罩的基本一致.

图10给出了锥角为60°的整流罩在积冰过程中不同时刻的无量纲冰形图.由图可见,在10 s



图9 74°锥角整流罩最终冰形照片

Fig. 9 Photo of final ice shape on spinner with cone angle of 74°

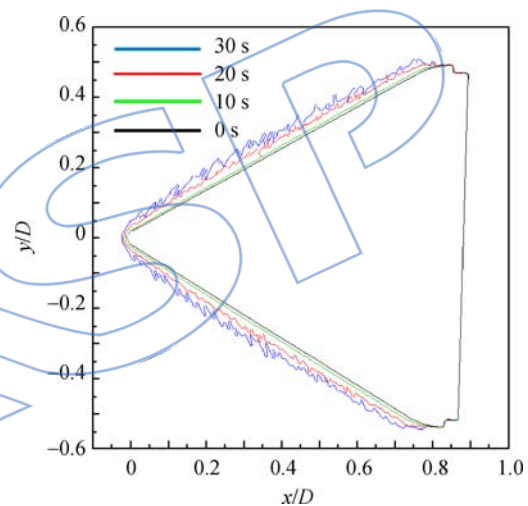


图10 60°锥角整流罩无量纲冰形增长图

Fig. 10 Growth graph of dimensionless ice shape profile of spinner with cone angle of 60°

时,冰层很薄而且冰形很平整;从10 s到20 s的时段内,冰厚的增长明显,20 s时冰形表现出毛糙不平;从20 s到30 s的时段内,冰厚又有所增大,冰层的突起也明显增长,30 s时冰形的凹凸不平特征很显著.总的来说,60°锥角的整流罩表面的无量纲冰厚基本不超过0.15,小于86°和82°锥角整流罩的冰厚,但比74°锥角整流罩的稍大;冰形轮廓比74°锥角整流罩的毛糙得多,但也没有出现明显的“羽毛”特征,冰形的突起比86°和82°锥角整流罩表面的细小、沿流向的分布更密集.锥顶的冰层仍然很薄,但与其下游冰层的厚度差别不太大.

图11给出了60°锥角的整流罩的最终冰形照片.由图可见,最外层仍然为分布不连续的白色霜冰,但其形态类似于针状,与表面的附着面积比



图 11 60°锥角整流罩最终冰形照片

Fig. 11 Photo of final ice shape on spinner with cone angle of 60°

86°和82°锥角整流罩表面的“羽毛”状霜冰小,从表面向外的延伸长度也小于“羽毛”状霜冰,但比74°锥角整流罩表面的粒状霜冰的长度大.通过观察发现此针状的外层霜冰在积冰过程中也没有发生脱落,在霜冰底同样存在分布连续、规则的薄层明冰.

6 结 论

本文在旋转表面积冰相似理论分析的基础上开展了旋转整流罩的冰风洞积冰模拟实验研究,对60°,74°,80°和86°锥角缩比整流罩模型在转速为15200 r/min、来流速度为65 m/s、温度为263 K、液态水含量为0.61 g/m³、水滴直径为21 μm、时间为35 s条件下的积冰类型、形态和积冰厚度进行了分析.主要结论如下:

1) 本文研究的4种锥角的旋转整流罩在积冰过程的大约前1/3时段内为明冰生长,其分布连续且增长缓慢;之后在余下的约2/3时段内在锥顶后部产生白色霜冰,冰厚增长较迅速.

2) 锥角对霜冰的形态有明显影响,锥角小于等于74°时霜冰为针状或粒状,积冰的无量纲厚度在0.15以下,锥角大于80°时霜冰为羽毛状,其无量纲冰厚为0.1~0.2.

3) 在实验范围内,锥角小于等于74°的整流罩表面积冰没有出现脱落;锥角大于80°的整流罩表面在积冰过程末期出现部分霜冰脱落现象,锥角大的整流罩冰脱落的位置向下游移动.

本文的缩比整流罩模型积冰实验模拟了转速为3700 r/min的原型整流罩在以 $Ma=0.2$ 穿过水平分布范围为19 km的间断最大条件云层时的积冰过程,根据积冰相似理论,两种模型的积冰类型相同,积冰量和冰形相似,因此,以上由缩比模

型实验获得的结论1)和结论2)同样适用于原型整流罩在所模拟的飞行条件下的积冰过程.但结论3)涉及积冰脱落现象,与冰层之间的附着力相关,而积冰相似理论并没有考虑这个物理过程,故结论3)不可应用于原型整流罩在所模拟条件下的积冰.

参考文献:

- [1] Anderson D N. Methods for scaling icing test conditions [R]. AIAA 95-0540, 1995.
- [2] Anderson D N. Further evaluation of traditional icing scaling methods [R]. AIAA 96-0633, 1996.
- [3] Saeed F, Selig S M, Bragg M B. A hybrid airfoil design method to simulate full-scale ice accretion throughout a given Cl-range [R]. AIAA 97-0054, 1997.
- [4] Ruff G A, Anderson D N. Quantification of ice accretions for icing scaling evaluations [R]. AIAA 98-0195, 1998.
- [5] Saeed F, Selig S M, Bragg M B. Experimental validation of the hybrid airfoil design procedure for full-scale ice accretion simulation [R]. AIAA 98-0199, 1998.
- [6] Anderson D N. Manual of scaling methods [R]. NASA CR-2004-212875, 2004.
- [7] Charpin, F., Fasso, G. Icing testing in the large Modane wind tunnel on full scale and reduced scale models [R]. NASA/TM-75373, 1979.
- [8] Jen-Ching T, Richard E K. Evaluation of scaling methods for rotorcraft icing [R]. NASA/TM-2010-215801, 2010.
- [9] Jen-Ching T, Richard E K. Further evaluation of scaling methods for rotorcraft icing [R]. NASA/TM-2012-217418, 2012.
- [10] Han Y Q, Palacios J, Schmitz S. Scaled ice accretion experiments on a rotating wind turbine blade [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 109: 55-67.
- [11] Guffond D P. Icing and de-icing test on a 1/4 scale rotor in the ONERA SIMA Wind Tunnel [R]. AIAA 86-0480, 1986.
- [12] Robert J F, Randall K. B. Results of a sub-scale model rotor icing test [R]. AIAA 91-0660, 1991.
- [13] Randall K B, Thomas H B, Robert J F. An overview of a model rotor icing test in the NASA Lewis Icing Research Tunnel [R]. AIAA 94-0716, 1994.
- [14] Randall K B, Thomas H B. A review of ice accretion data from a model rotor icing test and comparison with theory [R]. AIAA 91-0661, 1991.
- [15] Baruzzi G, Tran P, Habashi W G, et al. FENSAP-ICE: progress towards a rotorcraft full 3-D icing simulation system [R]. AIAA-2003-0024, 2003.
- [16] Das K, Hamed A, Basu D. Ice shape prediction for turbofan rotating blades [R]. AIAA-2006-0209, 2006.
- [17] Fortin G, Perron J. Wind turbine icing and de-icing [R]. AIAA-2009-0274, 2009.

- [18] Fortin G, Perron J. Spinning rotor blade tests in icing wind tunnel[R]. AIAA-2009-4260, 2009.
- [19] Colin S B. Particle trajectory and icing analysis of the E³ turbofan engine using LEWICE3D version 3[R]. NASA TM 2012-217696, 2012.
- [20] 陈维健, 张大林. 瘤状冰结冰过程的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 472-476.
CHEN Weijian, ZHANG Dalin. Numerical simulation of glaze ice accretion process[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 472-476. (in Chinese)
- [21] 张强, 曹义华, 钟国. 飞机机翼表面霜冰的三维数值模拟[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1303-1309.
ZHANG Qiang, CAO Yihua, ZHONG Guo. Three-dimensional numerical simulation of rime ice accretions on an aircraft wing[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1303-1309. (in Chinese)
- [22] 易贤, 桂业伟, 朱国林. 飞机三维积冰模型及其数值求解方法[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2152-2158.
YI Xian, GUI Yewei, ZHU Guolin. Numerical method of a three-dimensional ice accretion model of aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2152-2158. (in Chinese)
- [23] 曹广州, 吉洪湖, 胡娅萍, 等. 模拟飞机迎风面三维积冰的数学模型[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 1953-1963.
CAO Guangzhou, JI Honghu, HU Yaping, et al. An icing model for simulation three dimensional ice accretion on the upwind surfaces of a plane[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 1953-1963. (in Chinese)
- [24] 常士楠, 洪海华, 张玉珠. 结冰模拟与 AEDC 方法有效性的验证[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(6): 692-696.
CHANG Shinan, HONG Haihua, ZHANG Yuzhu. Icing simulation and evaluation of AEDC method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(6): 692-696. (in Chinese)
- [25] 易贤, 朱国林, 桂业伟. 一种改进的积冰试验相似准则及其评估[J]. 实验流体力学, 2008, 22(2): 84-87.
YI Xian, ZHU Guolin, GUI Yewei. Modification and evaluation of an icing scaling law[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(2): 84-87. (in Chinese)
- [26] 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, 2008. (in Chinese)
- [27] 赵秋月, 董威, 朱剑鋈. 发动机旋转整流罩帽罩的水滴撞击特性分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2011, 24(4): 32-35.
ZHAO Qiuyue, DONG Wei, ZHU Jianjun. Droplets impinging characteristic analysis of the rotating fairing of aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24(4): 32-35. (in Chinese)
- [28] 王宗衍. 冰风洞与结冰动力学[J]. 制冷学报, 1999(4): 15-17.
WANG Zongyan. Icing wind tunnel and icing aerodynamics[J]. Journal of Refrigeration, 1999(4): 15-17. (in Chinese)
- [29] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第16册 空气系统及传热分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.