

结冰云雾参数对冰与固壁间剪切强度影响的初步研究

肖春华^{1,2}, 林伟², 杨升科², 郭奇灵²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;
2. 中国空气动力研究与发展中心 飞行器结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 基于结冰风洞实验段,建立了冰与固壁间黏附界面剪切强度测量实验装置,获得了合理的剪切强度范围。在 0.3 m×0.2 m 结冰风洞实验段内开展了冰与固壁间黏附界面剪切强度的测量实验。掌握了结冰环境温度、平均水滴直径等结冰云雾参数对冰与固壁间黏附剪切强度的影响规律。研究表明:结冰环境温度为-15~-10℃间出现了剪切强度极大值。来流速度越大,水滴的惯性力越大,水滴间的间隙越容易被填充,冰与固壁间剪切强度也就越大。平均水滴直径(MVD)为 35 μm 附近出现了剪切强度极小值,水滴直径越小,水滴之间的间隙就越小,结冰就越致密。水滴直径越大,水滴越容易发生平铺,水滴之间的间隙就容易被填充,反而造成剪切强度增大。

关 键 词: 结冰云雾参数; 剪切强度; 黏附界面; 结冰风洞; 切应力; 飞机除冰

中图分类号: V275+.1 **文献标志码:** A

Preliminary study on influence of icing cloud parameters on ice shear strength on solid wall

XIAO Chunhua^{1,2}, LIN Wei², YANG Shengke², GUO Qiling²

(1. State Key Laboratory of Aerodynamics,
China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;
2. Key Laboratory of Icing and Anti/de-icing,
China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: The ice shear strength test equipment was established in the test section of icing wind tunnel, and used to measure the shear strength between ice and solid wall of air-plane. The reasonable range of ice shear strength was obtained. The ice shear strength measurement was implemented in test section of 0.3 m×0.2 m icing wind tunnel. The influences of icing cloud parameters on the ice shear strength between ice and solid wall were obtained. Research showed that the maximum value of ice shear strength appeared when the icing environmental temperature was between -15℃ and -10℃. The higher airflow speed indicated the larger impact force of droplets on solid wall. The gap among droplets was easier to be filled in. Thus, the ice shear strength was increased. The minimum value of ice shear strength happened when the mean volume diameter (MVD) of droplets was near 35 μm. The ice became compact and the gap among droplets was smaller along with the decrease of

收稿日期:2019-05-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11572338); 国家重点基础研究计划(2015CB755804)

作者简介:肖春华(1976—),男,研究员,博士,主要从事飞机结冰机理和防除冰应用研究。E-mail:dragoner76@163.com

引用格式:肖春华,林伟,杨升科,等. 结冰云雾参数对冰与固壁间剪切强度影响的初步研究[J]. 航空动力学报,2019,34(12):2627-2634. XIAO Chunhua, LIN Wei, YANG Shengke, et al. Preliminary study on influence of icing cloud parameters on ice shear strength on solid wall[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2627-2634.

MVD. And the droplets easily spread out and were difficult to be frozen immediately. The ice shear strength increased due to the filling of gap among droplets.

Key words: icing cloud parameter; shear strength; adhesion interface; icing wind tunnel; shear stress; airplane de-icing

飞机结冰是航空飞行中普遍存在的物理现象。飞机飞过含有大量悬浮过冷水滴的云层时,容易在飞机部件的表面,特别是机翼、尾翼、发动机唇口等前缘部位发生结冰现象^[1]。结冰对飞行安全具有很大影响,不仅会导致机翼、尾翼、升降舵等飞机部件的空气动力性能下降^[2],还会使飞行的操作、稳定性能恶化,严重的结冰甚至会导致飞机发生机毁人亡的事故^[3]。

结冰气象条件下的适航规范要求:必须在容易结冰的关键部件安装可靠的防除冰系统^[4]。目前,飞机的防除冰系统通常是采用加热或施力的方法,通过热量的传递或者应力的传递将表面所结的冰融化、破坏、剥离、脱落。众所周知,冰与飞机表面的固壁之间存在一层黏附界面,飞机的除冰机理就是输入热能或机械能到黏附界面,将其融化或者破坏,以此来达到除冰的目的。热除冰方法是利用蒙皮内布置的电加热单元^[5]或发动机引出的热空气^[6]作为热源,通过输入热量将黏附界面融化;机械除冰方法是利用电脉冲振动单元、机械振动单元或者柔性的可充放高压空气的柔性气管作为机械动力源,通过输入机械能将黏附界面破裂和剥离。由此可见,除冰方法的最关键特征就是破坏黏附界面,只要输入能量产生的应力(包括热应力)大于冰的黏附强度,黏附界面就会被破坏^[7]。因此,冰与飞机蒙皮材料间的黏附强度是描述黏附界面的临界力学参数,将黏附界面的黏附应力与黏附强度进行比较,可以判断黏附界面是否失效,这是研究飞机除冰最为基础的内容。

研究冰与固壁间黏附强度的设备主要有两种:一是冰箱或冷库;二是结冰风洞。由于结冰风洞的稀缺性和昂贵性,冰箱或冷库等低温环境成为了早期研究冰与固壁间黏附强度的主要设备。研究人员主要利用这种低温设备对纯水结冰的黏附强度进行了实验和测量^[8]。

后来,结冰风洞逐渐变成了一种研究冰与固壁间黏附强度的流行设备,这种设备可以模拟高空的低温环境、飞行的来流条件和云雾条件,可以模拟可控的结冰气象环境,是飞行器防除冰系统最有力的实验验证工具。为此,研究人员利用结冰风洞对不同结冰环境温度、液态水含量条件下

的冰黏附强度进行了实验研究^[9-11],但是,如果将冰与固壁间黏附强度的测量仪器直接放置在结冰风洞实验内,将会严重的影响实验段的来流条件和云雾条件。因此,目前冰与固壁间黏附强度测量不在结冰风洞实验段内进行,而是将结冰后的实验模型移至冰箱或冷库中测量。为此,研究人员通过这种结冰风洞实验方法测量了冰与固壁间的剪切黏附强度,结果在 0.27~0.54 MPa 之间。进一步,研究人员又对冰与不同材料的固壁间黏附强度进行了测量^[12-13],发现冰与金属材料间的黏附强度,与冰与聚四氟乙烯材料间的黏附强度相当。进一步,研究人员利用结冰风洞实验研究了明冰和霜冰条件下冰与真实飞机的 7075 航空铝材间的黏附强度^[14]。

除了黏附强度之外,冰的其他物性参数也是飞机除冰机理的重要研究内容。比如,冰本身的弹性模量研究^[15],冰与疏水材料之间的低黏附力实验研究^[16]。

图 1 是本文和以前研究的分析图。和精确模拟结冰云雾环境的结冰风洞相比,冰箱或冷库在上述研究存在的问题是:在冰箱或冷库的低温环境中无法得到真实的结冰实验条件,尤其是无法产生来流条件,包括空气的速度和过冷水滴的速度。虽然结冰风洞可以精确模拟结冰的云雾参数,但是目前的研究要将前缘结冰的实验模型从结冰风洞实验段取出,并将其移至冰箱或冷库的

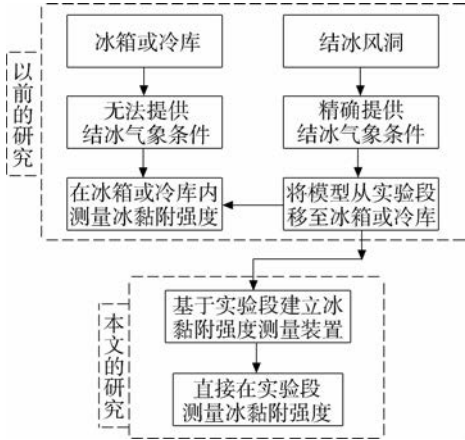


图 1 本文和以前研究的分析图

Fig. 1 Sketch of analysis on present and early researches

低温环境中,在黏附力测量装置上进行测量。因此,在移动实验模型的过程中,很容易发生破坏冰黏附界面的问题,同时,在移动实验模型的过程中,环境温度也会发生变化,温度变化产生的热应力也可能会造成冰黏附界面的破坏,这两个原因是目前测量冰黏附强度的误差来源。

基于此,建立基于结冰风洞实验段的黏附强度测量实验装置,可以直接在结冰风洞实验段内开展研究,这不仅将缩短实验的流程,还会降低实验模型移动过程对冰黏附界面的破坏,最大可能降低黏附强度测量的误差源。所以,本文仍然采用结冰风洞的实验方法,建立了结冰过程的冰黏附强度测量实验装置,直接在结冰风洞实验段开展了冰与固壁间黏附强度的测量研究,研究了不同结冰云雾参数对冰黏附强度的影响。

1 研究方法

1.1 实验设备

利用 $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞^[17]作为本研究的实验平台,该结冰风洞在回流式低速风洞基础上增加了喷雾、制冷等特殊系统,位于四川省绵阳市的中国空气动力研究与发展中心。本实验在 0.3 m 宽、 0.2 m 高、 0.65 m 长的实验段内开展,最大来流速度可达 200 m/s 。该结冰风洞的轴流风扇位于第二拐角段下游,用于驱动风洞内的空气以产生流动。蒸发器安装在风扇段后面,用于将风洞内的空气制冷,以提供低温的环境,实验段的最低温度可以达到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。喷雾耙安装在结冰风洞的稳定段内,可以在实验段入口制造需要的结冰云雾参数,液态水含量从 $0.2\sim 3\text{ g/m}^3$,平均水滴直径从 $10\sim 300\text{ }\mu\text{m}$,满足正态分布。实验段内的云雾参数均匀区可达 60% 实验段横截面面积,图 2 是 $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞的示意图。

1.2 实验方法

基于 $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞实验段,建立了冰与固壁间黏附界面的剪切强度测量实验装置,图 3 是实验装置示意图,其中,包括了内、外圆柱模型、拉力传感器、施力机构等。固定外圆柱模型,拉伸内圆柱模型,使内、外圆柱之间产生轴向的分离,以此来模拟冰与固壁之间的剥离过程。

图 4 给出了实验模型示意图。其中,灰白色区域是收集窗口,开在外圆柱模型的前缘,用于收集跟随空气流运的过冷水滴。虚线是内圆柱模型的轮廓线,灰色区域代表外圆柱模型,这是空心圆柱模型,内圆柱与外空心圆柱是间隙配合,设计间隙小于 0.1 mm 。将内、外圆柱模型安装于 $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞的实验段内。

图 5 是基于结冰风洞实验段的黏附强度测量装置。将单分量拉力传感器下端固定连接在内圆柱顶部的接合位置,将单分量拉力传感器上端与施力机构的钢丝绳固定连接。拉力传感器是适合低温高湿环境的测力传感器,使用前进行了低温环境的标定。施力机构是旋转螺杆式的手动加力机构,可以逐级手动加力以增加剪切拉伸过程的剥离力。采用高精度数据采集器对实验数据进行采集和记录。

在测量冰与固壁之间的黏附力之前,必须基于结冰风洞实验段,在不喷雾状态的低温环境下对内、外圆柱模型之间的摩擦力进行测量。正式实验测量的剥离力减去摩擦力才是冰与固壁之间的黏附力。

为了确保真实的结冰气象条件,剪切拉伸实验均在结冰风洞的实验段内进行。首先,观察内、外圆柱模型前缘的收集窗口,同时,达到实验所需的结冰时间后,马上停止喷雾、停止轴流风扇转动,保持制冷系统运转,以保证实验段内的环境温

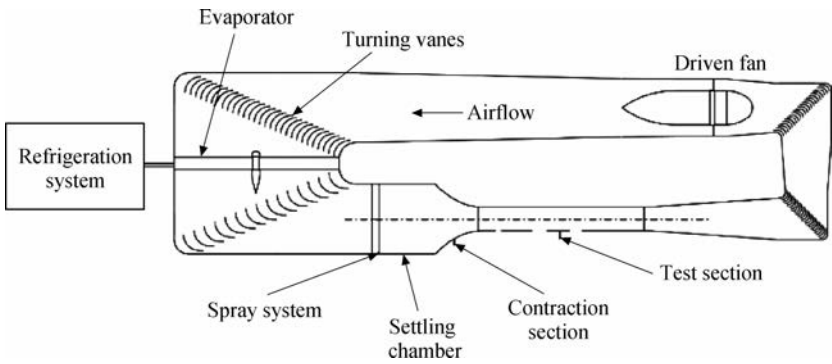


图 2 $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞的示意图

Fig. 2 Sketch of $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ icing wind tunnel

度不变化。其次,利用旋转螺杆式施力机构逐渐增大剪切拉伸的剥离力,直至剥离力达到峰值并迅速将为零。通过剪切拉伸实验测量冰与固壁之间的黏附强度。

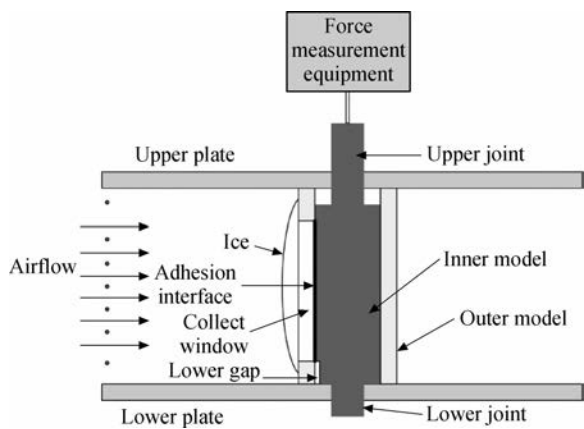


图 3 实验装置示意图
Fig. 3 Sketch map of test device

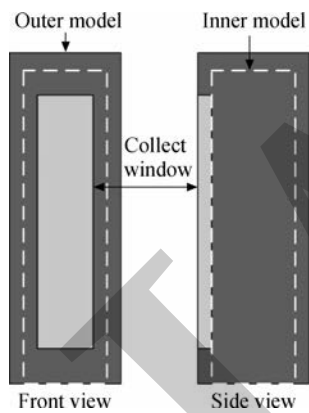


图 4 实验模型示意图
Fig. 4 Sketch of test model



图 5 基于结冰风洞实验段的黏附强度测量装置
Fig. 5 Adhesion strength measurement device based on icing wind tunnel test section

2 结果和分析

冰与固壁间黏附界面的剪切强度由如下公式

计算:

$$\tau_w = \frac{F_\tau - F_0}{A}$$

(1)

其中 F_τ 是剪切拉伸过程测量的最大剥离力, F_0 是内、外圆柱模型之间的摩擦力, A 是冰与固壁之间黏附界面的面积, 本实验中也即收集窗口的表面积, 下标 w 表示固壁。

图 6 是内、外圆柱模型表面结冰照片。可以看出迎风面的结冰覆盖了收集窗口, 结冰量和范围足够用于冰与固壁间的拉伸剪切实验。其中, 图 6 中的 V 、 D_{mv} 、 C_{lw} 、 t 分别为来流速度(velocity)、平均水滴直径(mean volume diameter, MVD)、液态水含量(liquid water content, LWC)和结冰环境温度(temperature), k 是结冰时间(time)。

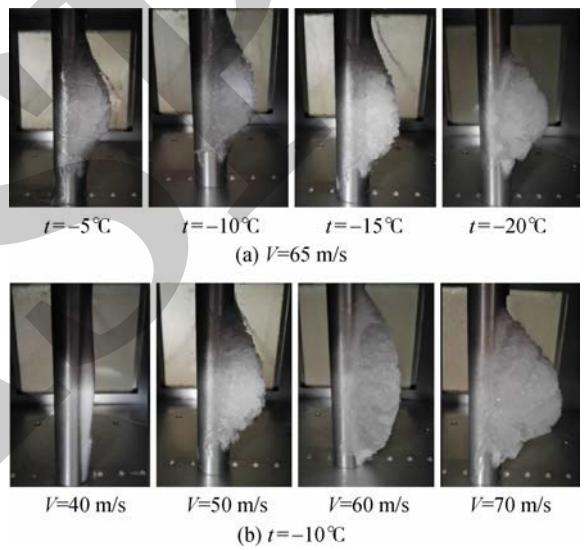


图 6 内、外圆柱模型表面的结冰
($D_{mv}=39.5\mu\text{m}$, $C_{lw}=0.97\text{g}/\text{m}^3$, $k=120\text{s}$)
Fig. 6 Ice accretion on surface of internal and external cylinder ($D_{mv}=39.5\mu\text{m}$, $C_{lw}=0.97\text{g}/\text{m}^3$, $k=120\text{s}$)

图 7 是剪切拉伸过程的剥离力时间历程。总的说来,剥离力时间历程曲线比较平滑,说明剪切拉伸过程比较干脆,只是在剥离力曲线上出现了局部的锯齿状,这是冰层发生局部破裂所造成的,此时,冰与固壁间的黏附界面并未发生完全的剥离。随着剪切拉伸力的逐渐增大,剥离力也逐渐的增大,当达到最大值后又迅速降为零,说明这时黏附界面已完全发生剥离,因此,此时获得的剪切力即是冰黏附界面发生完全剥离的最大剥离力。其中,图 7 中的 F 为剪切拉伸过程的剥离力,其他变量符号同图 6。

图 8 给出了剪切拉伸过程造成的冰层破裂照片。可以看出,冰层的破碎位置通常是在内圆柱

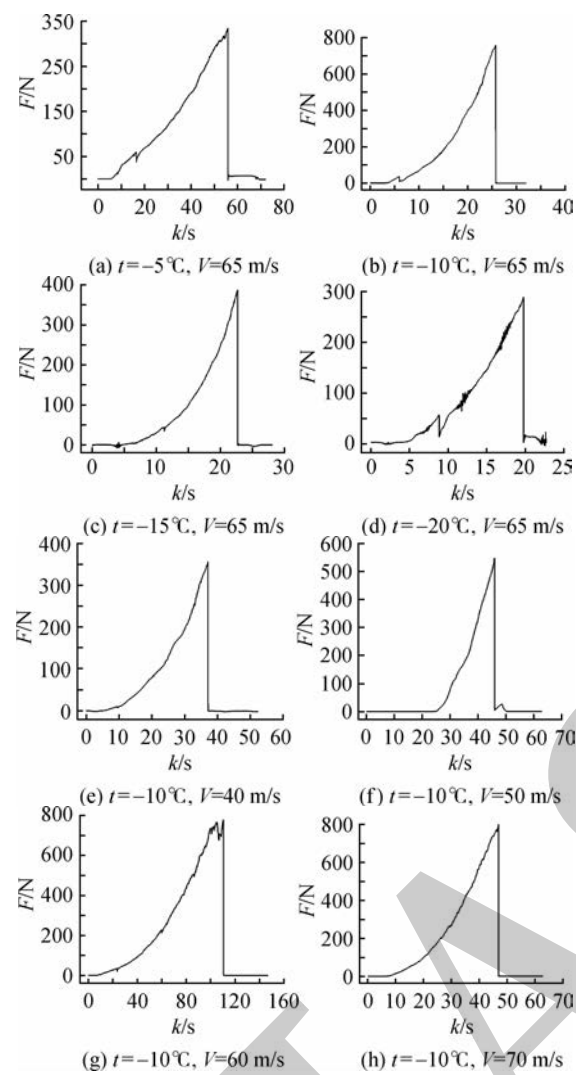


图 7 剪切拉伸过程的剥离力时间历程
($D_{mv}=39.5\text{ }\mu\text{m}$, $C_{lw}=0.97\text{ g/m}^3$, $k=120\text{ s}$)
Fig. 7 Time history of peeling force during shear tensile process ($D_{mv}=39.5\text{ }\mu\text{m}$, $C_{lw}=0.97\text{ g/m}^3$, $k=120\text{ s}$)



图 8 剪切拉伸造成的冰层破裂
Fig. 8 Ice fracture resulting from shear tensile
和外圆柱接触的上端或者下端区域。主要是在剪切拉伸过程中,冰在这两个区域很容易发生应力集中现象,所以出现了局部的破裂,相应的,这种物理现象在图 7 中的剥离力时间历程曲线中出现

了局部锯齿形。

通常,冰与固壁间的黏附强度分为法向的拉伸强度和切向的剪切强度。法向的拉伸强度通常大于 1.0 MPa,远远大于切向的剪切强度。对于飞机除冰而言,黏附界面切向的剪切强度更容易被克服,剪切作用可以实现冰与固壁之间的剥离。因此,本实验采用最大切应力准则来判断冰与固壁之间是否发生剥离。

$$\tau \geq \tau_{\max} \tag{2}$$

式中 τ 代表切应力,下标 max 表示最大值。

2.1 结冰环境温度的影响

结冰环境温度不仅会影响过冷水滴与周围气流之间的热交换,而且会影响水滴在固壁表面发生冻结的热力学过程,这就会相应的影响冰与固壁间黏附界面及其黏附力。

图 9 给出了不同结冰环境温度下冰与固壁间黏附界面的剪切强度 τ_w ,实验状态为: $V=65\text{ m/s}$, $D_{mv}=39.5\text{ }\mu\text{m}$, $C_{lw}=0.97\text{ g/m}^3$, $k=120\text{ s}$ 。可以发现,结冰环境温度在 $-12\text{ }^\circ\text{C}$ 附近时出现剪切强度极大值,当结冰环境温度靠近 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 附近,剪切强度出现急剧下降。结冰环境温度低于 $-12\text{ }^\circ\text{C}$,剪切强度反而出现了下降。

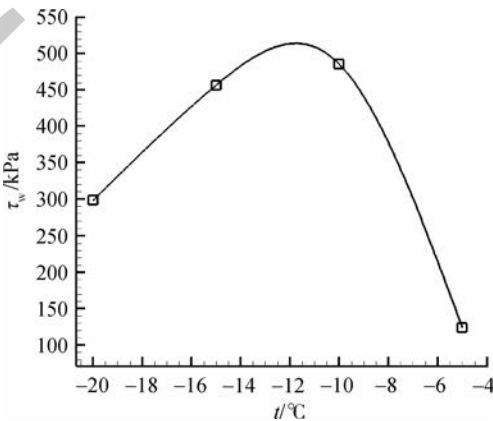


图 9 不同结冰环境温度下冰与固壁间黏附界面的剪切强度
Fig. 9 Shear strength of adhesion interface between ice and solid wall under different icing environmental temperatures

图 10 给出了不同结冰环境温度下黏附界面的剪切强度比较。由图可知,本实验获得的不同结冰环境温度下的黏附强度变化趋势与文献[10]的实验结果非常相似,出现剪切强度极大值的结冰环境温度均在 $-15\sim-10\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。当结冰环境温度靠近 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,剪切强度均出现急剧下降的

现象。由于本实验的剪切拉伸过程是直接 在结冰风洞的实验段内进行,从而避免了实验模型移动的温度变化和对黏附界面的人为破坏本实验获得的剪切强度极大值比参考文献的更大,增量大约为 0.1 MPa,相应的结冰环境温度相差了 2℃左右。

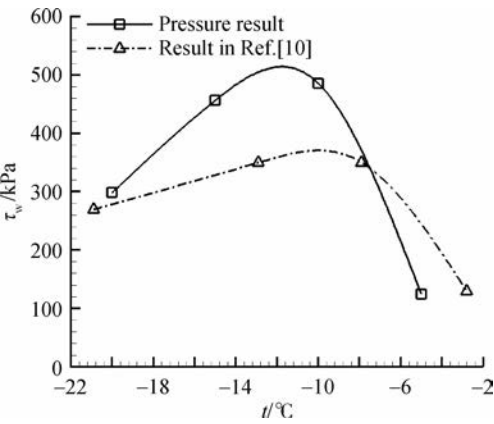


图 10 不同结冰环境温度下黏附界面的剪切强度比较
Fig. 10 Comparison of shear strength of adhesion interface under different icing environmental temperatures

图 11 给出了结冰环境温度对剪切强度影响规律分析示意图。由于水滴存在相变等热力学特征,在低温环境中水滴转变成冰存在一定的冻结速率,同时,水滴还具有流体的变形等动力学特征,水滴的变形可以填充水滴之间的间隙,具有一定的变形速率。冻结速率和变形速率的平衡,代表着热力学和动力学的平衡,这是影响冰与固壁间黏附强度的最关键因素。因此,对于较低的结冰环境温度(比如低于-20℃),平均直径小于 40 μm 的水滴,在撞击到固壁表面时,由于来不及和其他水滴发生合并就迅速发生了冻结,具有很大的冻结速率,这就造成了水滴与水滴之间存在一些间隙,而这些间隙是影响冰与固壁间黏附强度等物性参数的重要因素^[18]。这些间隙的存在,使得冰与固壁间的剪切强度反而下降。

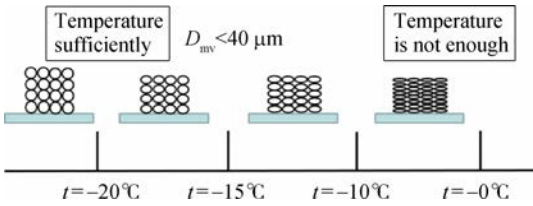


图 11 结冰环境温度对剪切强度影响规律分析示意图
Fig. 11 Sketch of analysis on influence law of icing environmental temperature on shear strength

2.2 来流速度的影响

来流速度可以影响过冷水滴跟随气流运动过程中的变形、破碎、合并等动力学特征,也将影响水滴撞击到固壁表面的飞溅、破碎等动力学过程,从而影响冰与固壁间形成的黏附界面。

图 12 给出了不同来流速度下冰与固壁间的黏附强度,实验条件为: $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $D_{mv} = 39.5\text{ }\mu\text{m}$, $C_{lw} = 0.97\text{ g/m}^3$, $k = 120\text{ s}$ 。可以发现,来流速度越大,冰与固壁间的剪切强度越大。

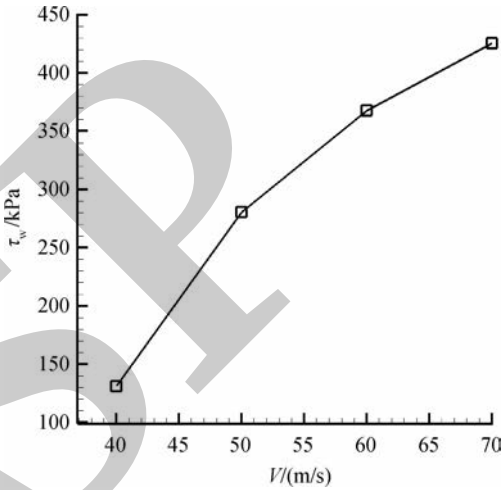


图 12 不同来流速度下冰与固壁间黏附界面的剪切强度
Fig. 12 Shear strength of adhesion interface between ice and solid wall under different airflow speeds

图 13 是来流速度对剪切强度影响规律分析示意图。来流速度越大,则水滴撞击到固壁的惯性力就越大,水滴就越容易发生平铺、合并等动力学行为,这样就更容易填充水滴之间的间隙,来流速度与填充速率成正比关系,因此,来流速度的增加,使得冰与固壁间的黏附强度呈现出单调的增

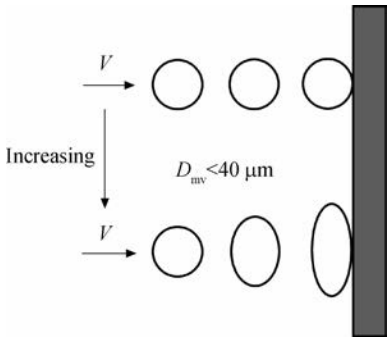


图 13 来流速度对黏附界面的剪切强度影响规律分析示意图
Fig. 13 Sketch of analysis on influence law of airflow speed on shear strength of adhesion interface

大趋势。

2.3 平均水滴直径的影响

平均水滴直径反映了过冷水滴的大小,这个参数不仅会影响过冷水滴在跟随气流运动过程中的动力学特征,也会影响水滴在固壁表面冻结时的热力学过程,从而影响冰与固壁间的黏附力。

图 14 是不同平均水滴直径下冰与固壁间黏附界面的剪切强度,实验条件为: $t=-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V=65\text{ m/s}$, $C_{lw}=0.97\text{ g/m}^3$, $k=120\text{ s}$ 。由图可知,在水滴平均直径 $35\text{ }\mu\text{m}$ 附近,曲线出现了剪切强度极小值。

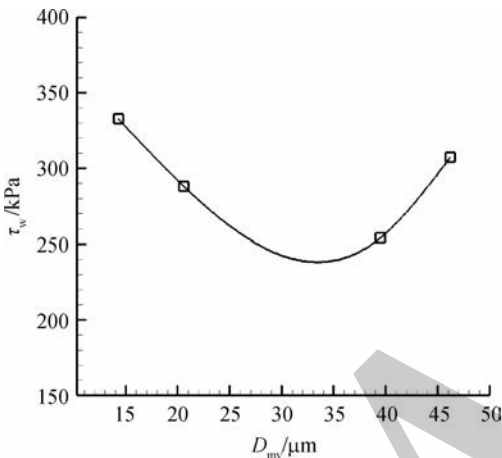


图 14 不同平均水滴直径下冰与固壁间黏附界面的剪切强度

Fig. 14 Shear strength of adhesion interface between ice and solid wall under different MVDs

图 15 是平均水滴直径对剪切强度影响规律分析示意图。由于小于 $35\text{ }\mu\text{m}$ 的水滴属于小水滴(有的参考文献将小于 $35\text{ }\mu\text{m}$ 的水滴称为小水滴),小水滴的平均直径越小,水滴间的间隙越小,冰冻结得就越致密,使得冰剪切强度增大。而大于 $35\text{ }\mu\text{m}$ 的水滴具有大水滴的动力学特征,水滴平均直径越大,就越容易发生平铺现象,不容易马上冻结,水滴间的间隙容易被填充,也相应的造成

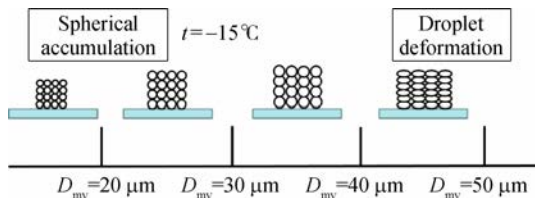


图 15 平均水滴直径对剪切强度影响规律分析示意图

Fig. 15 Sketch of analysis on influence law of MVD on shear strength

了剪切强度的增大。

图 16 是实验模型表面冰内部微观结构,可以明显看到冰内部存在很多微小的空隙,这些空隙是由于水滴迅速撞击导致空气无法马上逸出,从而导致部分空气滞留在水滴与水滴之间,形成了空隙或空气泡。这种现象随着结冰环境温度越低就越加明显,当结冰环境温度逐渐升高,在 $-15\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间时,部分过冷水滴会发生合并等现象,将水滴与水滴之间的间隙进行填充,使得水滴与水滴之间的间隙减小了很多,从而增加了冰与固壁间的黏附强度。而结冰环境温度靠近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,虽然水滴之间的空隙更容易被填充,但水滴发生冻结的速率太缓慢^[19],导致冻结得不够充分^[20],从而极大的降低了黏附强度。

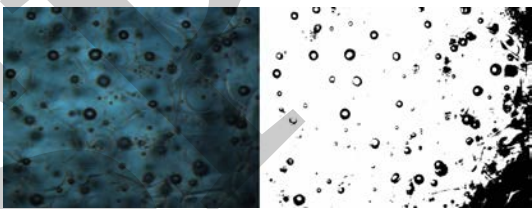


图 16 实验模型表面冰内部微观结构

Fig. 16 Micro structure of ice on the surface of test model

3 结 论

本文采用结冰风洞实验方法,测量和研究了飞机表面冰与固壁间黏附界面的剪切强度,获得了不同结冰云雾参数下冰与固壁间黏附界面的剪切强度变化规律,得出如下结论:

- 1) 当结冰环境温度在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近时,冰与固壁间剪切强度出现极大值;当结冰环境温度靠近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,剪切强度出现急剧下降的趋势。
- 2) 当平均水滴直径在 $35\text{ }\mu\text{m}$ 附近时,冰与固壁间剪切强度出现极小值,更小或更大的平均水滴直径,相应的剪切强度都将更大。
- 3) 不同来流速度条件下冰与固壁间的剪切强度随着来流速度的增大呈现出类似线性增加的变化趋势。

下一步将结合冰层内部微观特征对影响机理进行更深入的分析。

致谢:

感谢中国空气动力研究与发展中心结冰研究团队的支持。

参考文献:

[1] KIND R J,POTAPCZUK M G,FEO A,et al. Experimen-

tal and computational simulation of in-flight icing phenomena[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1998, 34(5/6): 275-345.

[2] LYNCH F T, KHODADOUST A. Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37(8): 669-767.

[3] KEVIN R P, CAROL D J. A statistical review of aviation airframe icing accidents in the U. S. [R]. Washington DC: National Transportation Safety Board, 2004.

[4] BRAGG M B, BROEREN A P, BLUMENTHAL L A. Iced-airfoil aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(5): 323-362.

[5] 常士楠, 艾素霄, 霍西恒, 等. 改进的电热除冰系统仿真[J]. 航空动力学报, 2008, 23(10): 1753-1758.

CHANG Shinan, AI Suxiao, HUO Xiheng, et al. Improved simulation of electrothermal de-icing system[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(10): 1753-1758. (in Chinese)

[6] 卜雪琴, 林贵平, 郁嘉. 三维内外热耦合计算热气防冰系统表面温度[J]. 航空动力学报, 2009, 24(11): 2495-2500.

BU Xueqin, LIN Guiping, YU Jia. Three-dimensional conjugate heat transfer simulation for the surface temperature of wing hot-air anti-icing system[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(11): 2495-2500. (in Chinese)

[7] 李清英, 朱春玲, 白天. 电脉冲除冰系统的除冰实验与数值模拟[J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 350-356.

LI Qingying, ZHU Chunling, BAI Tian. De-icing experiment and numerical simulation of the electro-impulse de-icing system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2): 350-356. (in Chinese)

[8] JELLINEK H G. The influence of imperfections on the strength of ice[J]. Journal of Applied Physics, 1958, 27(10): 1198-1209.

[9] REICH A D, SCAVUZZO R J, CHU M L. Survey of mechanical properties of impact ice[R]. AIAA 94-0712, 1994.

[10] SCAVUZZO R J, CHU M L. Structural properties of impact ices accreted on aircraft structures[R]. NASA Contractor Report 179580, 1987.

[11] SCAVUZZO R J, CHU M L, Ananthaswamy V. Influence of aerodynamic forces in ice shedding[J]. Journal of Aircraft, 1994, 31(3): 526-530.

[12] STALLABRASS J R, PRICE R D. On the adhesion of ice to various materials[R]. National Research Council, NRC No. 6980, 1963.

[13] PHAN C L, MCCOMBER P, MANSIANX A. Adhesion of rime and glaze on conductors protected by various materials[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering (CSME), 1976, 4(4): 204-208.

[14] DRUEZ J, PHAN C L, LAFORTE J L, et al. The adhesion of glaze and rime on aluminum electric conductors[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering (CSME), 1979, 5(4): 215-220.

[15] REICH A D. Comparison of rime and glaze deformation and failure properties[R]. AIAA 91-0446, 1991.

[16] ANDERSON D N, REICH A D. Tests of the performance of coating for low ice adhesion[R]. AIAA 97-0303, 1997.

[17] 肖春华, 程尧, 乔宝英, 等. 并列双方柱的疏水涂层防冰效果结冰风洞实验评估[J]. 航空动力学报, 2018, 33(3): 540-548.

XIAO Chunhua, CHENG Yao, QIAO Baoying, et al. Icing wind tunnel test evaluation on anti-icing effects of hydrophobic coating on two parallelized square cylinders[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 540-548. (in Chinese)

[18] VARGAS M, BROUGHTON H, SIMS J J, et al. Local and total density measurements in ice shapes[R]. AIAA-2005-657, 2005.

[19] LIBBRECHT K G. The physics of snow crystals[J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68(4): 855-895.

[20] HOBBS P V. Ice physics[M]. Oxford: Oxford University Press, 1974.

(编辑:王碧珺)