

发动机结冰雾化参数测试方法

Icing Fog Parameter Measurement Methods for Aero Engine

■ 赵飞 徐春雷 / 中国航发动动力所

航空发动机进气道结冰是危及飞行安全的严重问题，结冰试验是验证数值仿真得到的结冰特性以及防冰系统性能的主要手段，而结冰雾化参数测试则是结冰试验的基础，其重要性不言而喻。

在《航空发动机适航规定》(CCAR-33)、《运输类飞机适航标准》(CCAR-25)和《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》(GJB241A)中，对发动机的结冰条件、结冰试验内容及防冰系统的验证提出了明确的要求，因此需要进行发动机结冰试验，通过制冷、喷雾等系统模拟不同结冰类型和结冰程度，以验证所设计防除冰系统的有效性。发动机进气截面处的液态水含量、平均有效水滴直径是影响结冰类型和程度的主要雾化参数，也是评价结冰条件是否满足标准规范要求的重要指标^[1]。因此，准确有效地测量液态水含量、平均有效水滴直径，研究各种测试方法以及影响其测量准确度的因素，对确保结冰试验结果的可靠性至关重要。

液态水含量测试方法

液态水含量(LWC)是指单位体积的空气中所含有的液态水的质量，在结冰研究中的单位为 g/m^3 。液态水含量越大，单位时间内撞击在发动机表面的水量越多，则结冰越严重。液态水含量主要影响结冰类型和结冰形状。LWC的测量方法主要有冰刀法、热线法、超声波法等^[2]。其中，热线法和超声波法需要专门的测量系统，测量准确、快速，但

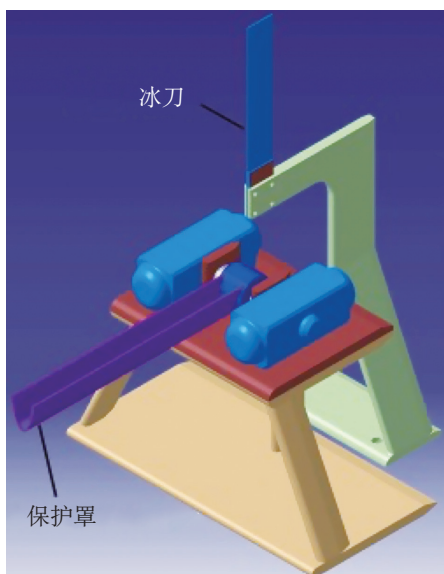


图1 冰刀装置示意

成本相对较高；冰刀法测量方法及装置简单，但总体效率较低，主要用于测量结果间的对比验证。

冰刀法

冰刀法常用的测量装置是冰刀，如图1^[3]所示，其原理是将冰刀置于发动机测量段中，一段时间后，工作面就会生长一定量的冰，通过分析冰刀上结冰厚度和结冰时间等参数计算LWC。冰刀法的优点是简单快捷、成本低，缺点是未考虑结冰过程中液态水蒸发的影响，因为冰刀法测量液态水含量是假设撞击在冰刀工作面的过冷水滴全部冻结，

即收集系数为1，而实际的水滴收集系数总是小于1，所以这种方法测得的液态水含量会有误差，而且温度越高，蒸发量越多，误差也越大。

热线法

热线法分为恒温式和恒压式。恒温式是水滴撞在热线上被加热蒸发带走热量，系统需消耗额外的功率来维持线圈在恒定的温度上，所消耗的额外功率与液态水含量成正比，通过实时测量系统功率的增加即可得到LWC。恒压式是水滴撞在热线上使热线温度降低，电阻值减小，电桥平衡被打破而产生的电压差，电压差与液态水含量成正比，通过实时测量电桥输出电压可以计算LWC^[4]。

热线法常用的测量设备主要有：美国DMT公司的LWC-300 Probe，如图2(a)所示，测量范围为 $0 \sim 3g/m^3$ ，测量精度为 $\pm 10\%$ ；加拿大天空物理技术(Sky PhysTech)公司的Nevzorov4 Probe，如图2(b)所示，液态水含量测量范围和精度与LWC-300相同，同时它还有LWC-300不具备的总水含量测量探头，总水含量(TWC)减去液态水含量即可实现冰晶含量(IWC)的测量，这对飞机防除冰技术的研究是非常重要的；美国SEA公司的WCM-2000 Probe，

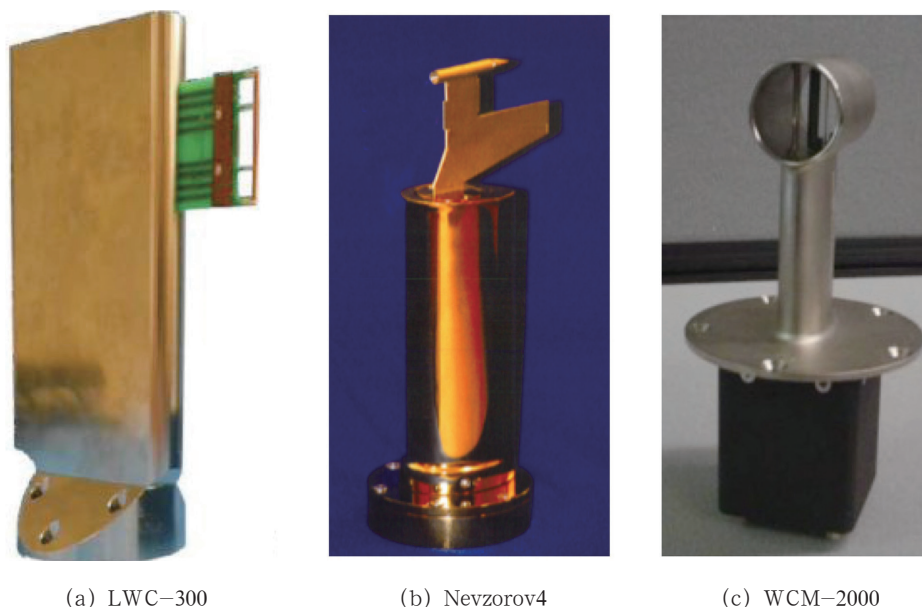


图2 3种常用的恒温式热线仪探头

如图2(c)所示,也可以实现总水含量的测量,在风速低于150m/s时,液态水含量测量范围可达 $10\text{g}/\text{m}^3$,当风速小于230m/s时测量范围为 $0 \sim 6\text{g}/\text{m}^3$ 。以上几种测量设备都是恒温式装置。

热线法原理简单,装置小巧,安装方便,能够测量直径在 $5\mu\text{m}$ 以上的水滴。在热线装置固定的情况下,电流的增加值与热线散热量相关,散热量除了跟撞击在热线上的水滴蒸发带走的热量有关外,还受环境温度、气流速度影响,所以为了测量结果的准确性,热线法适用于环境温度和风速都相对固定的气流中。

超声波法

超声波法是将超声波发射器和接收感应器垂直于气流安置。当超声波通过含有水滴的气流时,波的强度会因水滴的散射和吸收而减弱,通过分析接收感应器接收到的波振幅和频率特性,可以计算出LWC^[5]。由于超声波法和气流速度有关,所

以也不适合风速比较不稳定的场合,而且该方法目前还处于研究阶段,暂时没有货架商品供使用。

液态水含量测试方法存在的问题

发动机结冰雾化参数测试中,液态水含量的测量多采用冰刀法和热线法。冰刀法一般为非标定制或自研,测量方法简单、成本低廉,但测量效率低,且测量范围受限,无法测量高液态水含量;热线法是采用成熟的LWC/TWC测量系统,装置简单、响应速度快,但成本较高且易受环境影响,下一步的研究方向应是如何消除环境温度和气流速度带来的误差。

平均有效水滴直径测试方法

平均有效水滴直径(MVD)是指大于该直径的水滴总体积等于小于该直径的水滴总体积。MVD直接影响结冰区域:粒径过大,在运动过程中冷却不充分,不能形成过冷水滴,且相互碰撞的概率增大;粒径过小,在运动过程中可能产生蒸发现象,

在高风速时可能会绕流,不能与发动机发生碰撞。MVD的测量方法主要有前向散射分光测量仪、光学阵列测量仪、相位多普勒粒子分析仪及光纤光学测量系统^[6-7]。这4种方法均为光学测量法,其中前两种为接触性光学测量,可直接放置于发动机测量段气流中;后两种为非接触光学测量,通过测量段的观察窗进行测量。

前向散射分光测量仪

前向散射分光测量仪(FSSP)是美国粒子度量(Particle Metrics)公司研制的一种光学粒径测量仪,其原理为当粒子通过FSSP激光束时会发生散射,通过测量散射光的强度可以计算出粒子的直径,测量范围为直径 $1 \sim 45\mu\text{m}$ 或 $1 \sim 95\mu\text{m}$ 。

影响FSSP测量精度的因素主要有水滴数量密度和速度,数量密度的上限取决于探头体积和仪器的电子电路速度,极限是500个/ cm^3 。速度的上限取决于仪器本身电子电路的极限,水滴速度超过极限也会产生粒径测量误差。其他影响因素还有校准误差、激光束激发误差等。FSSP特点是响应快、分辨率高,但测量范围有一定局限且物理尺寸较大,测量精度易受系统误差影响,如仪器状态、结冰或雾的影响等。

光学阵列测量仪

光学阵列测量仪(OAP)也是由美国粒子度量公司制造,其测量范围广且型号多,能够测量小到 $10\mu\text{m}$ 大到几毫米的水滴。该测量仪的原理是当水滴通过OAP的激光束时,光学阵列探测器中的光电二极管能探测到水滴穿过阵列的阴影。OAP有一维和二维两种类型:一维OAP探测到的阴影长度对应的就是

水滴的直径，每隔一定区间记录一次阴影数目，根据水滴尺寸分布即可计算出MVD；二维OAP还能提供水滴图像，可用于区分水滴和冰晶。

影响OAP测量精度的因素主要有：计数误差、焦外小水滴造成的小水滴尺寸谱变宽、高数量密度导致的重合误差、速度误差和统计不确定度等。OAP常用于测量直径大于100 μm的小水滴。其特点是测量过程简单，响应快、分辨率高，但物理尺寸较大，安装复杂，且测量结果易受系统误差和结冰的影响。

相位多普勒粒子分析仪

相位多普勒粒子分析仪(PDPA)是根据运动粒子的光散射效应，实现粒子直径和速度的同时测量。其原理是粒子穿过两束激光的相交处产生散射光，因散射光到接收平面所经过的光路长短不同，符合相干条件，形成干涉条纹，经光电转换器和信号处理器处理后输出的信号频率正比于流体的速度，而不同信号间的相位差正比于粒子的直径。结冰试验时的发动机进气为两相流介质，根据所测得的粒子大小与速度的对应关系可以获得两相速度。

PDPA安装在发动机测量段外，通过观察窗进行测量，优点是测量精度高，动态响应快、测速范围广，配合位移坐标架可实现空间三维方向测量，适用于两相流介质，较适合发动机结冰试验粒径的测量。不足之处在于对观察窗玻璃的光学特性要求较高，且低温状态下长时间工作会导致玻璃结霜，影响测量结果的准确性。此外，因PDPA测粒径假设小水滴是圆形的，所以小水滴的圆度将直接影响PDPA测量精度。

光纤光学测量系统

光纤光学测量系统(FOS)是近些年的研究热点，目前实际应用到结冰试验的还不多，光纤测量法的特点是测量装置体积小、结构紧凑、防水性好、测量精度高，且非常适合复杂条件下的结冰试验。

平均有效水滴直径测试方法存在的问题

在平均有效水滴直径的测试中，PDPA应用最为广泛，它可以精确、快速测量两相流介质中小尺寸球形粒子的直径和速度，但对于大尺寸的非球形粒子存在显著测量误差。此外，非接触法测粒径的光学窗口设计的问题也有待解决。发动机结冰试验通过吸气方式实现水雾的吸入，从而模拟结冰的效果。吸入式的方式要求测量窗口必须安装玻璃。由于测量段是圆筒形状，两面如果都是平面玻璃会导致测量段内部严重积水甚至结冰，因此测量窗口应至少有一面为弧形玻璃。石英光学玻璃透光率好但抗振性差且无法弯曲，有机玻璃可做到较大尺寸且在一定厚度下可以弯曲，但透光性不如石英光学玻璃。所以，发动机结冰试验中测量段的开窗方案以及窗口玻璃的选择仍需进一步研究。

结束语

在液态水含量测量方面，SEA公司的WCM-2000是基于多热线的总水含量测量系统，其对高水含量云雾条件以及过冷大水滴结冰条件下的液态水含量测量具有极大潜力，因此针对该设备的测量方法研究将会是发动机结冰试验液态水含量测量的重点。在平均有效水滴直径

测试方面，基于影像技术的粒径测试技术以及光纤粒径测试技术将是MVD测试技术的主要发展方向。深入研究航空发动机结冰雾化参数测试方法，针对航空发动机结冰特殊环境，积极研制物理尺寸小、测量精度高、测量范围大、对流场干扰小的测量装置，特别是利用光学或声学原理的测量方法，对结冰试验研究和防除冰系统设计水平提升具有重要意义。

航空动力

(赵飞，中国航发动力所，工程师，主要从事航空发动机测试工作)

参考文献

- [1] SAE. Calibration and acceptance of icing wind tunnels: SAE ARP-5905[S]. SAE, 2015.
- [2] 战培国. 结冰风洞研究综述[J]. 实验流体力学, 2007, 21(3): 92-95.
- [3] 赖庆仁, 郭龙, 李明, 等. 结冰风洞液态水含量测量装置设计与实现[J]. 空气动力学报, 2016, 34(6): 750-755.
- [4] Lilie L, Emery E, Strapp J, et al. A multiwire hot-wire device for measurement of icing severity, total water content, liquid water content, and droplet diameter[R]. AIAA 2005-859, 2005.
- [5] 孟繁鑫. 机翼结冰模拟中关键问题的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [6] SAE. Droplet sizing instrumentation used in icing facilities[S]. SAE, 2007.
- [7] Zante J V, Ide R F, Steen L E, et al. NASA Glenn icing research tunnel: 2014 cloud calibration procedure and results[R]. NASA/TM 2014-218392, 2014.