

航空航天装备

基于多种测试平台喷雾粒径特性实验研究

陈舒越, 郭向东, 陈晨, 刘森云, 赖庆仁

(中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: **目的** 研究平台环境差异对喷雾液滴粒径造成的影响。**方法** 分别在喷嘴测试台、直流吸气式风洞、闭口回流式结冰风洞等3种测试平台上开展喷雾液滴粒径测量,并将测量结果进行对比分析。**结果** 各平台喷雾 d_{MVD} 随水气压变化的规律性都较好, d_{MVD} 随着水压的增大而增大,随着气压的增大而减小。对于 $d_{MVD} \leq 30 \mu\text{m}$ 的工况,3种测试平台的 d_{MVD} 测量结果接近,但粒径分布存在差异。对于 $d_{MVD} > 30 \mu\text{m}$ 的工况,直流吸气式风洞和闭口回流式结冰风洞喷雾的 d_{MVD} 都比喷嘴测试台大,粒径分布向大颗粒方向偏移。**结论** 气流温度、速度、环境湿度、湍流度以及平台构型等环境因素均对喷雾液滴粒径产生影响,多因素耦合作用使得闭口回流式结冰风洞液滴的蒸发、碰撞合并、破碎等行为都更强烈,从而造成了其与喷嘴测试台、直流吸气式风洞喷雾的粒径特性存在差异。

关键词: 喷雾; 粒径分布; 传热传质; 结冰风洞; 中值体积直径

中图分类号: V211.73

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)06-0059-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.009

Experimental Study on the Spray Droplet Size Characteristics of Various Test Platforms

CHEN Shu-yue, GUO Xiang-dong, CHEN Chen, LIU Sen-yun, LAI Qing-ren

(Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing, China Aerodynamics Research and Development Center, Sichuan Mianyang 621000, China)

ABSTRACT: Since the movement and heat and mass transfer of water droplets are affected by the environment easily, the spray droplet size characteristics of various test platforms are different. In this paper, the effects of the environmental differences on spray droplet size are studied in experiments. The droplet size measurements were carried out on three test platforms of the nozzle test bench, open-circuit wind tunnel, and closed-circuit icing wind tunnel. Then the measurement results were compared and analyzed. The results show that the variation regularity of the spray d_{MVD} with the pressure is obvious in each platform, that is, the d_{MVD} increase with the increase of water pressure, and decrease with the increase of air pressure. For the working condition of $d_{MVD} \leq 30 \mu\text{m}$, the d_{MVD} measurement results of three test platforms are close, while the size distributions are different. For the working condition of $d_{MVD} > 30 \mu\text{m}$, the d_{MVD} of spray in the open-circuit wind tunnel and closed-circuit icing wind tunnel are larger than those of the nozzle test bench, and the size distributions shift in the direction of large particles. Environmental

收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2021-10-30

Received: 2021-09-02; Revised: 2021-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(12002364)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (12002364)

作者简介: 陈舒越(1994—),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为结冰风洞试验技术。

Biography: CHEN Shu-yue (1994-), Female, Master, Assistant engineer, Research focus: test techniques of icing wind tunnel.

引文格式: 陈舒越,郭向东,陈晨,等.基于多种测试平台喷雾粒径特性实验研究[J].装备环境工程,2022,19(6):059-067.

CHEN Shu-yue, GUO Xiang-dong, CHEN Chen, et al. Experimental Study on the Spray Droplet Size Characteristics of Various Test Platforms[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 059-067.

factors such as airflow temperature, velocity, ambient humidity, turbulence and platform configuration all have a certain influence on the spray droplet size. Under multi-factor coupling action, the evaporation, breakup, collision and coalescence of droplets in the icing wind tunnel are more intense, which causes differences in spray droplet size characteristics among test platforms.

KEY WORDS: spray; size distribution; heat and mass transfer; icing wind tunnel; medium volume diameter

飞机穿越含有过冷水滴的云层时,云层中的过冷水滴会撞击在飞机表面上,并冻结成冰,进而严重威胁飞行安全^[1]。结冰风洞是研究飞机结冰。验证飞机防除冰系统性能的重要地面试验设备^[2]。喷雾系统是结冰风洞的核心组成部分,该系统利用喷嘴产生结冰云雾^[3]。根据适航标准 FAR 25 部附录 C 和附录 O,结冰风洞要模拟云雾结冰条件,则从喷嘴出发到达试验段的云雾粒子,其中值体积直径 d_{MVD} (Median Volume Diameter, MVD) 要与适航标准要求相同。若要模拟过冷大水滴结冰条件,不仅 d_{MVD} 要相同,而且试验段内液滴的粒径分布要与适航标准规定的曲线相吻合。因此,研制粒径特性满足适航指标的喷嘴对结冰风洞而言具有重大意义。由于结冰风洞本身运行成本高,因此主要利用喷嘴测试台、直流吸气式风洞开展结冰风洞喷嘴的研制工作^[4]。然而,由于水滴在结冰风洞内的运动及传热传质过程,在风洞试验段测得的喷雾粒径特性与喷嘴测试台、直流吸气式风洞存在差异^[5],即在喷嘴测试台或直流吸气式风洞研制成功的喷嘴,用于结冰风洞时可能无法满足技术指标要求。因此,有必要基于多种测试平台开展喷雾粒径测量的对比研究,分析测量结果的差异及其原因,从而为结冰风洞喷嘴研制工作提供支撑。

液滴粒径是评价喷嘴雾化质量及表示雾化特性的重要参数^[6]。国外已有学者对喷嘴测试台和结冰风洞喷雾的粒径分布特性进行了对比研究。Imperato 等^[7]分别在 CIRA 喷嘴测试台和结冰风洞开展了喷雾液滴粒径测量试验,将 d_{MVD} 测量值进行了对比,指出 2 种平台产生小水滴喷雾时,测得的 d_{MVD} 接近,大水滴喷雾时在 2 种平台测得的 d_{MVD} 存在较大差异,认为喷雾中较大颗粒液滴在风洞内的运动影响了粒径分布。国外其他学者的研究主要集中在喷雾系统的测试和校准^[8-11]、试验段结冰云雾分布特性的数值模拟^[12-13]等方面。在国内,易贤等^[5]通过喷嘴测试台得到喷嘴出口处粒子的分布特性,在此基础上,采用数值方法计算了水滴在风洞内的运动及传热传质过程,进而获得了试验段粒子的分布特性。此外,还有关于结冰风洞喷嘴性能测试^[4]、结冰风洞试验段云雾粒径测量及影响因素研究^[14-15]、液滴运动及传热传质仿真^[16-17]等方面的研究。目前国内还缺少不同测试平台上喷雾粒径特性的对比研究。

本文分别在喷嘴测试台、直流吸气式风洞、闭口回流式结冰风洞等 3 种测试平台上开展喷雾液滴粒

径测量试验,然后将测量结果进行对比,对造成差异的原因进行初步分析,从而为结冰风洞喷嘴研制工作提供指导。

1 试验平台及设备

1.1 喷嘴测试台

喷嘴测试台由试验台本体(见图 1)、供水供气系统及控制系统组成。试验台本体上部为喷嘴组件,下部用于放置测量设备,容积为 2 m^3 ,尺寸为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 2\text{ m}$ 。喷嘴组件包括喷嘴和喷嘴架,喷嘴架用于安装喷嘴,可在 x 、 y 和 z 方向自由移动。供水供气系统分别向喷嘴组件提供水流量和气流量。控制系统主要配合实现相应的功能,如水气压调控、喷雾开关等。该测试平台水压及气压调节范围为 $0.01\sim 1.0\text{ MPa}$,压力调节精度为 0.01 MPa 。

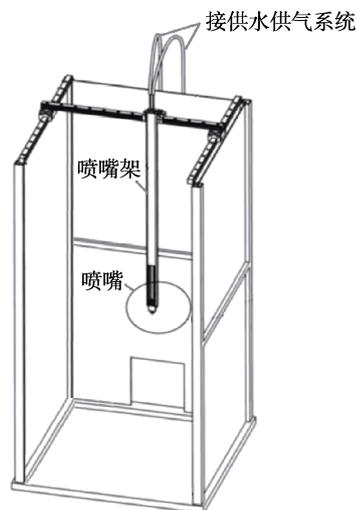


图 1 喷嘴测试台试验台本体
Fig.1 Test bench body of nozzle test bench

1.2 直流吸气式风洞

直流吸气式风洞如图 2 所示,包括进气口、稳定段、整流装置、收缩段、试验段、拐角段、扩散段、风扇段及排气段,呈 L 形布局,总高为 6.8 m 。该风洞试验段长度为 2.4 m ,截面尺寸为 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$,试验段垂直布置。试验段设计风速为 $1\sim 30\text{ m/s}$,采用一台轴流风机作为动力。试验段的 4 个侧壁均采用有机玻璃材料,透光率为 90% 以上。

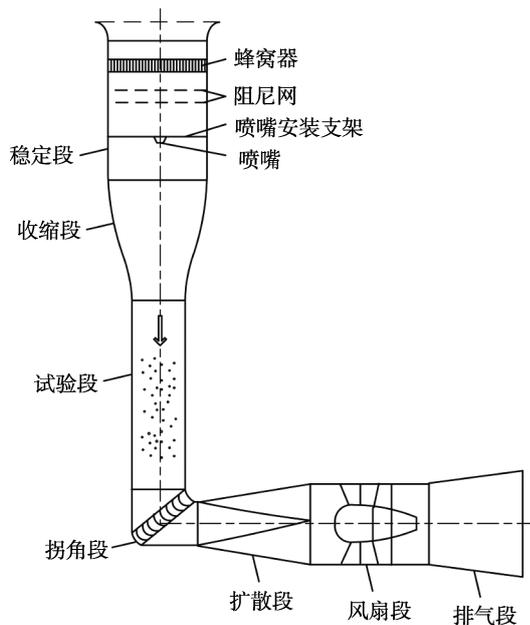


图 2 直流吸气式风洞
Fig.2 Open-circuit wind tunnel

1.3 闭口回流式结冰风洞

闭口回流式结冰风洞如图 3 所示, 是气动中心 3 m×2 m 结冰风洞, 主要包括喷雾系统、制冷系统、高度模拟系统和风机动力系统。喷雾系统通过喷嘴产生结冰云雾, 稳定段内共有 20 排喷雾靶, 每排安装 50 个喷嘴, 1 000 个喷嘴均匀分布于稳定段横截面上。试验段长度为 6.5 m, 截面尺寸为 3 m×2 m。

1.4 粒径测量设备

双通道机载式相位多普勒干涉仪 (Phase Doppler Interferometer Flight Probe Dual Range, PDI-FPDR), 是 Artium Technologies 公司为满足自然结冰云雾参数测量而研发的一款机载式测量设备。该设备由光学发射探头、光学接收探头、ASA 信号处理器和 AIMS 系统软件平台组成^[18], 基于相位多普勒方法能够同时实现液滴直径和速率的测量^[19-20]。PDI-FPDR 大、小通道粒径测量范围分别为 20~1 000 μm 和 0.5~100 μm, 测量精度为±0.5 μm。

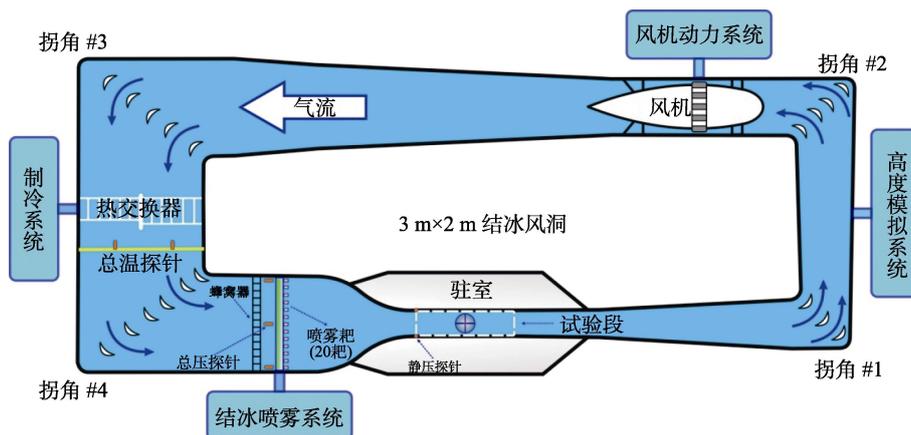


图 3 闭口回流式结冰风洞
Fig.3 Closed-circuit icing wind tunnel

Malvern 粒度分析仪, 由英国 Spraytec 公司研制。该设备由含准直激光源的发射器、接收器、光具座和 Spraytec 系统软件平台等组成。Malvern 基于大量运动粒子对单色平行光的 Fraunhofer 衍射, 能够实时、准确、可重复地测量喷雾粒径分布^[21-22]。Malvern 粒径测量范围为 0.1~2 000 μm, 采集频率最高为 10 kHz。

2 试验内容与方法

在喷嘴测试台、直流吸气式风洞、闭口回流式结冰风洞分别进行喷雾, 使用 PDI-FPDR 和 Malvern 测量喷雾粒径特征参数, 将测量结果进行对比。使用的喷嘴为 98818 型喷嘴, 属于气液内混式雾化喷嘴。该型喷嘴通过在混合腔内引入高压空气和水流, 利用气液间的剧烈相互作用, 在喷嘴出口处产生实心锥状喷

雾。喷嘴水气压条件设定见表 1, 本次试验水压 (P_w) 和气压 (P_a) 范围为 0.05~0.6 MPa。由于喷嘴 $P_w < P_a$ 时无法正常工作, 因此设定的条件 $P_w \geq P_a$, 共计 36 组工况。

2.1 喷嘴测试台

在喷嘴测试台上开展的试验如图 4 所示。调节喷嘴架的位置, 使得喷嘴出口至 Malvern 测点的距离为 400 mm (此后雾化颗粒随距离的变化已不再明显), 同时喷雾整体能位于 Malvern 和 PDI-FPDR 光学采样区域的中心。试验开始后, 调节水压和气压至指定值, 开始喷雾, 待稳定后, 使用 PDI-FPDR 和 Malvern 的采集系统同时对喷雾进行采集测量。在试验中发现, 喷雾水滴会直接撞击并覆盖在 PDI-FPDR 的探头上, 从而造成测量误差, 因此仅对 Malvern 采集的数据进行对比分析。

表 1 喷嘴水气压条件
Tab.1 Air pressure and water pressure of nozzle

序号	水压/MPa	气压/MPa	序号	水压/MPa	气压/MPa	序号	水压/MPa	气压/MPa
1	0.05	0.05	13	0.4	0.1	25	0.5	0.2
2	0.1	0.05	14	0.5	0.1	26	0.6	0.2
3	0.15	0.05	15	0.6	0.1	27	0.3	0.3
4	0.2	0.05	16	0.15	0.15	28	0.4	0.3
5	0.3	0.05	17	0.2	0.15	29	0.5	0.3
6	0.4	0.05	18	0.3	0.15	30	0.6	0.3
7	0.5	0.05	19	0.4	0.15	31	0.4	0.4
8	0.6	0.05	20	0.5	0.15	32	0.5	0.4
9	0.1	0.1	21	0.6	0.15	33	0.6	0.4
10	0.15	0.1	22	0.2	0.2	34	0.5	0.5
11	0.2	0.1	23	0.3	0.2	35	0.6	0.5
12	0.3	0.1	24	0.4	0.2	36	0.6	0.6

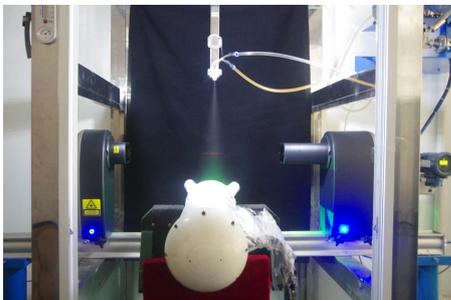


图 4 喷嘴测试台喷雾测量
Fig.4 Spray on the nozzle test bench was measured

2.2 直流吸气式风洞

在直流吸气式风洞开展的试验如图 5 所示。将 Malvern 粒度分析仪安装在透明试验段两侧，使发射的光束恰好穿过 2 个侧壁的开孔。由于 PDI-FPDR 无法在试验段进行安装，因此仅采用 Malvern 进行测量。开启风机，设定风速为 10 m/s，调节水压和气压至指定值，开始喷雾，待稳定后，使用 Malvern 的采集系统对喷雾进行采集测量。

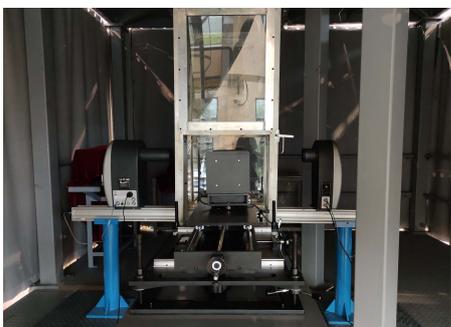


图 5 直流吸气式风洞喷雾测量
Fig.5 Spray on the open-circuit wind tunnel was measured

2.3 闭口回流式结冰风洞

在气动中心 3 m×2 m 结冰风洞开展的试验如图 6

所示。由于 Malvern 粒度分析仪无法在结冰风洞中直接安装使用，因此仅采用 PDI-FPDR 进行测量。PDI-FPDR 无法用于喷嘴测试台，而能在结冰风洞中使用的原因是：风洞内水滴的运动方向与探头方向平行，水滴撞击的几率更小；在风洞内使用时需开启 PDI-FPDR 电加热系统，覆盖在探头上的水滴会受热蒸发；撞击在探头上的水滴会在风洞气流的作用下被吹走，因此风洞内水滴不会覆盖在探头上，从而造成测量误差。试验前，将 PDI-FPDR 安装于试验段转盘中心处，此时仪器光学采样区位于距喷雾系统约 15 m 的试验段中心线上。试验时，设置风速为 80 m/s、总温为 -2 °C，模拟高度为当地高度。待气流参数稳定后，设置喷雾系统水压、气压，开始喷雾。待云雾场完全建立并稳定后，使用 PDI-FPDR 进行参数采集。



图 6 闭口回流式结冰风洞喷雾测量
Fig.6 Spray on the closed-circuit icing wind tunnel was measured

3 结果与分析

3.1 d_{MVD} 对比

喷嘴测试台、直流吸气式风洞、闭口回流式结冰风洞的喷雾 d_{MVD} 测量结果如图 7 所示。 d_{MVD} 定义为小于该直径的所有液滴体积与大于该直径的所有液

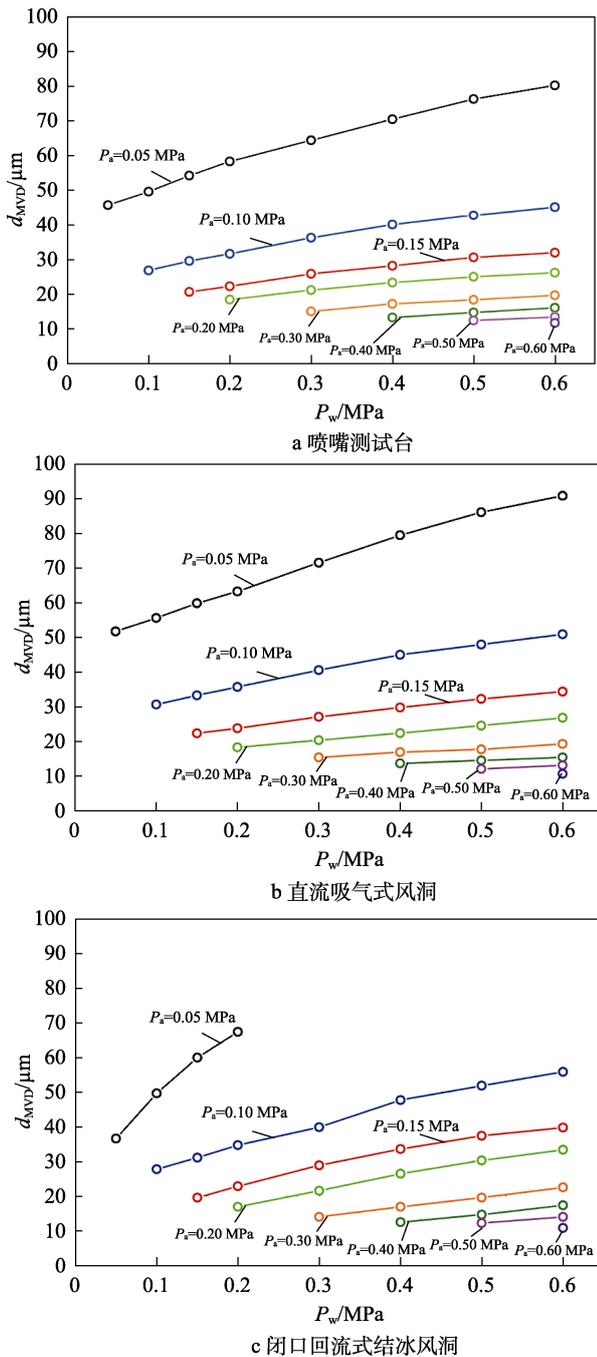


图 7 d_{MVD} 测量结果

Fig.7 Measurement results of d_{MVD} : a) nozzle test bench; b) open-circuit wind tunnel; c) closed-circuit icing wind tunnel

滴体积相等^[23]。从图 7 中可以看出, d_{MVD} 随喷嘴水、气压变化的规律性都较好, 随着喷嘴水压的增大, d_{MVD} 增大; 随着喷嘴气压的增大, d_{MVD} 减小。水压或气压变化所引起的 d_{MVD} 变化, 其本质是气液质量比变化引起的。气液质量比越大时, 作用在单位体积液体的气体量越多, 气体对液体的作用越强烈, 液体就会破碎成更细小的液滴。同时, 气液质量比越大时, 液滴的初始速度越大, 与外界空间的相对速度差越大, 受到的气动力作用越强, 更有利于液滴的破碎。此外, 当气液质量比增加时, 喷嘴出口处气体的流速

增加, 其对液滴的作用更加强烈, 导致液束的扩散更加明显, 液相之间的碰撞合并更不容易发生。喷嘴测试台喷雾 d_{MVD} 的分布范围为 11.58~80.13 μm , 直流吸气式风洞为 10.67~90.62 μm , 闭口回流式结冰风洞为 10.8~67.2 μm 。已有研究表明, PDI-FPDR 不适合测量 d_{MVD} 大于 75 μm 的喷雾^[24], 因此 $P_a=0.05$ MPa 条件下只给出了几个水压下 d_{MVD} 的测量值。

将 3 种测试平台的测量结果进行对比, 如图 8 所示。结果表明, 对于 $d_{MVD}>30$ μm 的工况, 直流吸气式风洞和闭口回流式结冰风洞喷雾的 d_{MVD} 都比喷嘴测试台大, 并且随着气压的减小, 喷雾 d_{MVD} 增大, 2 个平台测量结果的差值也越大; 对于 $d_{MVD}\leq 30$ μm 的工况, 3 种测试平台测量结果接近。虽然此时 3 个平台的喷雾 d_{MVD} 接近, 但是喷雾粒径分布不一定相同。在所有气压条件下, 在较小水压时, 直流吸气式风洞的喷雾 d_{MVD} 大于闭口回流式结冰风洞的喷雾 d_{MVD} 。随着水压的增大, 闭口回流式结冰风洞 d_{MVD} 大于直流吸气式风洞, 且两者差值也逐渐增大。随着气压的增大, 两平台测量结果的差异逐渐减小。

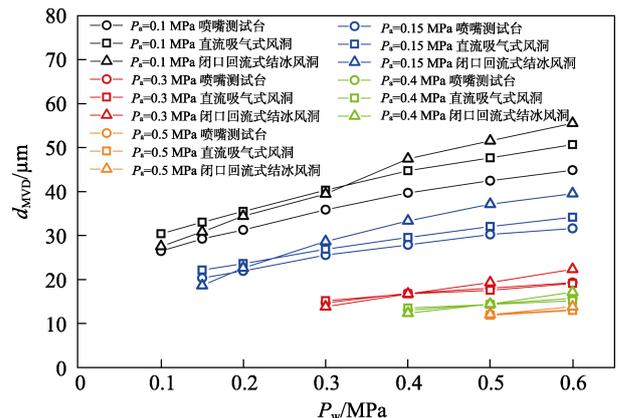


图 8 3 种测试平台的测量结果对比

Fig.8 Results of the comparison with three test platforms

喷嘴的雾化特性决定了喷嘴出口处液滴的粒径分布, 环境 (气流的温度、湿度和速度等) 是影响喷雾粒径特性的外部因素。3 种测试平台的环境差异及各因素对液滴粒径的影响分析如下。

1) 气流温度。结冰风洞作为能模拟低温云雾环境的特种风洞, 配备了大型的制冷装置和大量的保温措施, 以确保试验段的总温能达到目标温度, 本次试验设定的总温为 -2 $^{\circ}C$ 。同时, 为了防止液体冻结堵塞喷嘴, 喷嘴水源采用的是 60 $^{\circ}C$ 去离子水。因此, 喷嘴产生的热液滴在运动至试验段过程中, 会与低温流场间产生强烈的传热传质过程。喷嘴测试台和直流吸气式风洞直接与大气环境相通, 并且水源温度为常温, 周围空气与水滴的温度差异小, 于是传热传质就较弱。

2) 气流速度。本次试验结冰风洞试验段的气流速度为 80 m/s, 直流吸气式风洞试验段的气流速度为

10 m/s, 喷嘴测试台无外部气流作用。气液相对速度较高时, 会有空气动力作用在液滴上, 在表面非均匀分布的压力扰动下, 液滴将发生变形。当这个作用力大到足以克服液滴表面张力的恢复力时, 液滴就会碎裂成更小的液滴。同时, 气流速度还会影响液滴的蒸发速度, 气流越强, 蒸发越快。液滴自喷嘴喷出后, 气流速度越大, 喷雾扩散越开, 液滴碰撞合并的概率越低。

3) 环境湿度。湿度也是影响液滴蒸发的因素之一, 若环境湿度饱和, 则液滴表面传热传质均达到平衡, 蒸发停止。若环境湿度欠饱和, 则液滴进一步缓慢蒸发, 直至完全蒸发或者传热传质均达到平衡状态。

4) 湍流度。对于结冰风洞, 风洞自身湍流、热交换器尾流、喷雾系统产生的射流涡干扰等, 都会提高稳定段内的湍流强度。湍流会使液滴轨迹发散, 造成液滴碰撞合并的概率更高。

5) 平台构型。结冰风洞和直流吸气式风洞都具有收缩段, 收缩段有加速气流的作用, 液滴经收缩段运动至试验段, 液滴浓度会增大, 液相之间的碰撞合并更加频繁。同时, 在收缩段空气流线偏折, 大水滴由于惯性大, 容易撞在壁面。收缩段构型也会造成粒子沉降现象, 结冰风洞采用水平布局, 粒子的运动轨迹会因重力作用而发生偏转, 尤其是大颗粒液滴在试验段内的沉降现象更加明显。直流吸气式风洞采用垂直布局, 喷嘴测试台水滴也是垂直下落, 粒子的运动轨迹不会因重力而发生偏转, 也不存在大颗粒液滴的沉降现象。结冰风洞布置了 1 000 个喷嘴, 本次试验中使用 500 个喷嘴进行喷雾, 会存在多个喷嘴相互干扰的情况。总地来看, 液滴在闭口回流式结冰风洞蒸发、碰撞合并、破碎等行为都更强烈, 大颗粒液滴特有的动力学特征也表现得更加明显。

除了 3 个测试平台本身环境的差异, 还应该考虑试验中所使用测量装置的不同。PDI-FPDR 和 Malvern 在测量原理、测量空间、测量结果处理等方面均存在差异。PDI-FPDR 是当粒子通过 2 束激光的交汇点时, 基于多普勒效应对单颗粒子的直径进行测量, 然后对测量的所有粒子进行统计。Malvern 是当粒子通过发射器与接收器之间的光束时, 基于 Fraunhofer 衍射技术测量得到所有穿过光束的粒子直径的统计平均结果, 通过一套曲线拟合程序反演得到液滴尺寸的信息。笔者认为这种由测量装置不同带来的误差可以忽略, 原因如下。

1) Malvern 被认为测试可靠、精度高、重复性好、快速实时, 因而成为粒径测量的首选仪器, 在众多的仪器中应用最为广泛^[6]。此外, 3 m×2 m 结冰风洞前期采用玻璃粒子悬浮液对 Malvern 进行过标定, 因此认为用该设备测量喷雾具有一定的可靠性。PDI 设备也广泛应用于云雾粒径测量^[25]。

2) 3 m×2 m 结冰风洞已对 PDI-FPDR 和 Malvern

进行过对比研究, 发现对于 $d_{MVD} < 75 \mu\text{m}$ 的喷雾, 两仪器测量结果接近^[24]。

3) 结冰风洞试验段云雾均匀分布, 因此 PDI-FPDR 点测量和 Malvern 线测量方式对结果的影响可以忽略。

3.2 粒径分布对比

将 3 种测试平台喷雾粒径分布特性进行对比, 以 $P_w=0.3 \text{ MPa}$ 、 $P_a=0.3 \text{ MPa}$, $P_w=0.2 \text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15 \text{ MPa}$, $P_w=0.6 \text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15 \text{ MPa}$ 和 $P_w=0.5 \text{ MPa}$ 、 $P_a=0.1 \text{ MPa}$ 这 4 个工况为例。对于 $P_w=0.3 \text{ MPa}$ 、 $P_a=0.3 \text{ MPa}$ 和 $P_w=0.2 \text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15 \text{ MPa}$ 这类 $d_{MVD} \leq 30 \mu\text{m}$ 的工况, 此时 3 种测试平台测量结果接近, 但是粒径分布特性却不同。从图 9 中可以看出, 闭口回流式结冰风洞的累积体积分布曲线较喷嘴测试台陡升, 较直流吸气式风洞向小颗粒方向偏移。以图 9b 为例进行说明, 此时 3 种平台喷雾液滴粒径都主要聚集在 20~30 μm , 喷嘴测试台 0~20 μm 液滴的体积分数约为 42.7%, 高于其他 2 种平台(直流吸气式风洞 0~10 μm 液滴的体积分数为 0, 10~20 μm 液滴的体积分数为 30.4%, 结冰风洞 0~5 μm 液滴的体积分数为 0, 5~20 μm 液滴的体积分数为 41%)。喷嘴测试台、直流吸气式风洞、闭口回流式结冰风洞 20~30 μm 液滴的体积分数分别

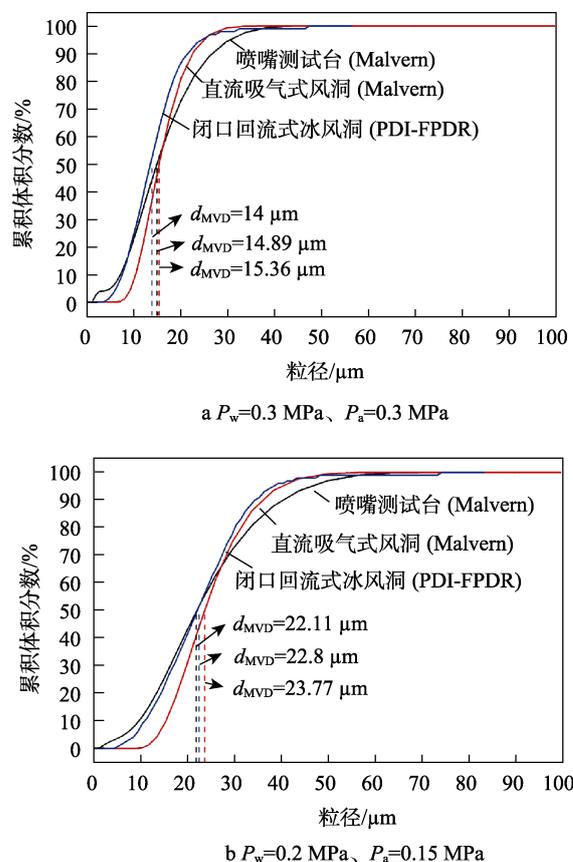
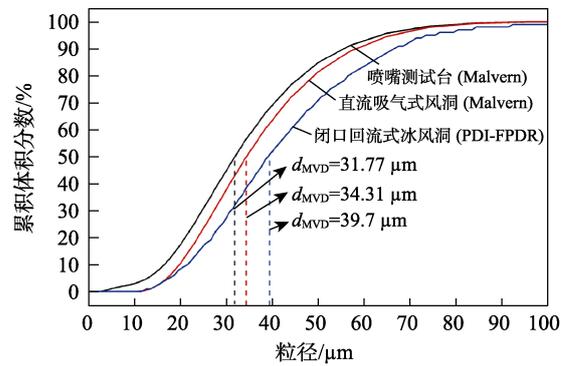


图 9 累积体积分布 ($d_{MVD} \leq 30 \mu\text{m}$)
Fig.9 Cumulative volume fraction for the working condition of $d_{MVD} \leq 30 \mu\text{m}$

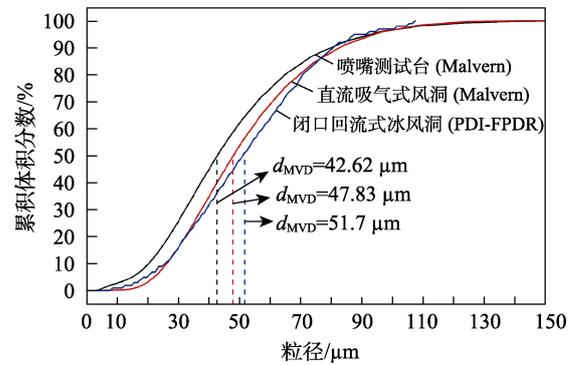
为 30%、45.3%、38%; 30~50 μm 液滴的体积分数分别为 24.29%、23.76%、20.1%; 50 μm 以上的大颗粒液滴的体积分数分别为 3%、0.5%、1%。 $P_w=0.2\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15\text{ MPa}$ 条件下的体积分布曲线如图 10 所示。可以看出, 体积分布曲线都具有显著的单峰特征, 喷嘴测试台粒径分布范围宽, 增长和下降较平缓, 峰值更小。直流吸气式风洞粒径分布范围较窄, 增长和下降快, 峰值大。闭口回流式结冰风洞粒径分布范围、增长和下降幅度、峰值大小均居于其他 2 种平台之间。分析认为, 在这些工况下, 液滴蒸发是影响粒径分布的主要因素。直流吸气式风洞液滴蒸发比喷嘴测试台严重, 蒸发使雾化的大颗粒液滴变小, 小颗粒液滴变为气体, 因此直流吸气式风洞喷雾中小颗粒和大颗粒液滴含量均比喷嘴测试台少。结冰风洞虽然蒸发更为严重, 但是风洞环境造成液滴的碰撞合并也更强烈, 因此在一定程度上削弱了蒸发对 d_{MVD} 及粒径分布的影响。

对于 $P_w=0.6\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15\text{ MPa}$ 和 $P_w=0.5\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.1\text{ MPa}$ 这类 $d_{MVD}>30\text{ }\mu\text{m}$ 的工况, 此时直流吸气式风洞和闭口回流式结冰风洞的喷雾 d_{MVD} 都比喷嘴测试台大。从图 11 中可以看出, 闭口回流式结冰风洞和直流吸气式风洞的累积体积分布曲线向大颗粒方向偏移, 闭口回流式结冰风洞的偏移程度更大。以图 11a 为例进行说明, 此时 3 种平台喷雾液滴粒径都主要聚集在 30~40 μm , 喷嘴测试台 0~10 μm 液滴的体积分数约为 2.9%, 闭口回流式结冰风洞和直流吸气式风洞 0~10 μm 液滴的体积分数约为 0; 喷嘴测试台 10~30 μm 液滴的体积分数约为 42.1%, 高于其他 2 种平台 (直流吸气式风洞为 37.8%, 结冰风洞为 27.5%)。喷嘴测试台、直流吸气式风洞、闭口回流式结冰风洞 30~40 μm 液滴的体积分数分别为 24.1%、25.8%、24.5%; 40~50 μm 液滴的体积分数分别为 15.7%、17.7%、18.9%; 闭口回流式结冰风洞 50 μm 以上的大颗粒液滴的体积分数约为 29.1%, 高于其他 2 种平台 (喷嘴测试台为 15.2%, 直流吸气式风洞为 18.6%)。 $P_w=0.6\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15\text{ MPa}$ 条件下的体积分布曲线如图 12 所示。可以看出, 这些曲线都具有显

著的单峰特征, 闭口回流式结冰风洞和直流吸气式风洞的液滴粒径分布向大颗粒方向偏移, 喷嘴测试台约 30 μm 以下液滴的体积分数高于其他平台, 30 μm 以上液滴的体积分数低于其他平台。推测的可能原因是, 在这些工况下, 虽然蒸发作用使闭口回流式结冰风洞和直流吸气式风洞小液滴含量减小, 0~10 μm 液滴的体积分数几乎为 0, 但是在这些工况下液滴之间的碰撞合并才是影响 d_{MVD} 及粒径分布的主要因素, 液滴间碰撞合并形成了更大颗粒的液滴, 致使粒径分布向大颗粒方向偏移。闭口回流式结冰风洞液滴碰撞合并最强烈, 因此偏移程度更大。



a $P_w=0.6\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15\text{ MPa}$



b $P_w=0.5\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.1\text{ MPa}$

图 11 累积体积分布 ($d_{MVD}>30\text{ }\mu\text{m}$)
Fig.11 Cumulative volume fraction for the working condition of $d_{MVD}>30\text{ }\mu\text{m}$

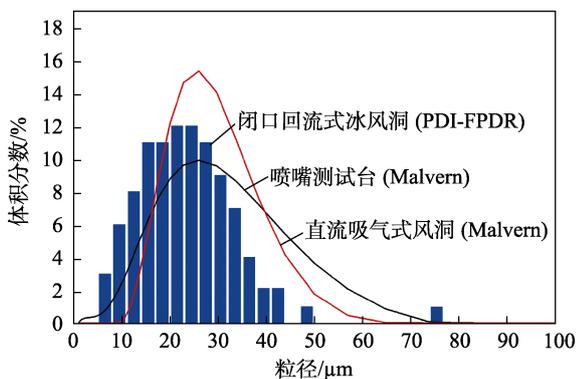


图 10 $P_w=0.2\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15\text{ MPa}$ 条件下的体积分布
Fig.10 Volume fraction at $P_w=0.2\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15\text{ MPa}$

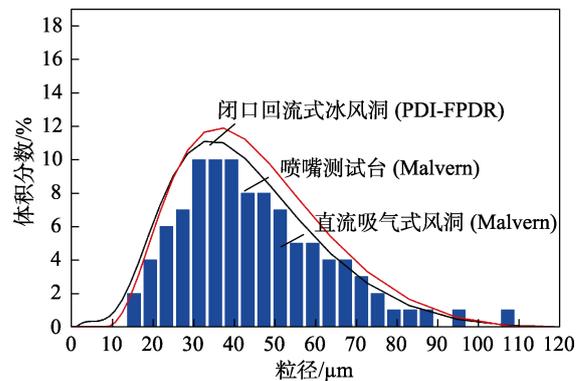


图 12 $P_w=0.6\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15\text{ MPa}$ 条件下的体积分布
Fig.12 Volume fraction at $P_w=0.6\text{ MPa}$ 、 $P_a=0.15\text{ MPa}$

4 结论

在喷嘴测试台、直流吸气式风洞、闭口回流式结冰风洞等3种测试平台上,开展了喷雾液滴粒径测量试验,探究了平台环境差异对喷雾粒径特性的影响,得到以下结论:

1) 在各测试平台上, d_{MVD} 随喷嘴水、气压变化的规律性都较好。随着喷嘴水压的增大, d_{MVD} 增大;随着喷嘴气压的增大, d_{MVD} 减小。

2) 对于 $d_{MVD} \leq 30 \mu\text{m}$ 的工况, 3种测试平台的 d_{MVD} 测量结果接近, 但粒径分布存在差异; 对于 $d_{MVD} > 30 \mu\text{m}$ 的工况, 直流吸气式风洞和闭口回流式结冰风洞的喷雾 d_{MVD} 都比喷嘴测试台大, 粒径分布向大颗粒方向偏移。

3) 气流温度、速度、环境湿度、湍流度以及平台构型等多因素耦合作用, 使得闭口回流式结冰风洞液滴的蒸发、碰撞合并、破碎等行为都更强烈, 从而造成了其与喷嘴测试台、直流吸气式风洞喷雾粒径特性的差异。

4) 喷雾及水滴运动过程, 涉及空气动力学、传热传质学、两相流等多种物理现象的耦合, 其过程复杂。通过数值模拟方法研究环境差异对液滴分布特性的影响是一种有效途径。此外, 本文研究的喷雾 $d_{MVD} < 100 \mu\text{m}$, 当 $d_{MVD} \geq 100 \mu\text{m}$ 时, 由于喷雾中的大水滴在风洞内沉降、变形和破碎等现象, 在各测试平台上喷雾的液滴分布特性又有不同, 需要进一步研究。

参考文献:

- [1] CEBECI T, KAFYEKE F. Aircraft Icing[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35: 11-21.
- [2] 林贵平, 卜雪琴, 申晓斌. 飞机结冰与防冰技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
LIN Gui-ping, BU Xue-qin, SHEN Xiao-bin. Aircraft Icing and Anti/De-Icing Technology[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2016.
- [3] LEONE G, VECCHIONE L, DE MATTEIS P, et al. The New CIRA Icing Wind Tunnel Spray Bar System Development[C]//38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 2000.
- [4] 符澄, 彭强, 张海洋, 等. 结冰风洞喷嘴雾化特性研究[J]. 实验流体力学, 2015, 29(2): 32-36.
FU Cheng, PENG Qiang, ZHANG Hai-yang, et al. The Atomization Characteristics Research for Spray Nozzle of Icing Wind Tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(2): 32-36.
- [5] 易贤, 郭龙, 符澄, 等. 结冰风洞试验段水滴分布特性分析[J]. 实验流体力学, 2016, 30(3): 2-7.
YI Xian, GUO Long, FU Cheng, et al. Analysis of Water Droplets Distribution in the Test Section of an Icing Wind Tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(3): 2-7.
- [6] 曹建明. 液体喷雾学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.
CAO Jian-ming. Liquid sprays[M]. Beijing: Peking University Press, 2013.
- [7] IMPERATO L, LEONE G, VECCHIONE L. Spray Nozzles Experiment Comparison in Laboratory and Icing Wind Tunnel Testing[C]//38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 2000.
- [8] VAN ZANTE J, IDE R, STEEN L C. NASA Glenn Icing Research Tunnel: 2012 Cloud Calibration Procedure and Results[C]//4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Virginia: AIAA, 2012.
- [9] BELLUCCI M, ESPOSITO B, MARRAZZO M, et al. Calibration of the CIRA IWT in the Low Speed Configuration[C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 2007.
- [10] IRANI E, AL-KHALIL K. Calibration and Recent Upgrades to the Cox Icing Wind Tunnel[C]//46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 2008.
- [11] OLESKIW M, HYDE F, PENNA P. In-Flight Icing Simulation Capabilities of NRC'S Altitude Icing Wind Tunnel[C]// 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 2001.
- [12] BHARGAVA C, LOTH E, POTAPCZUK M. Numerical Simulation of Icing Clouds in the NASA Glenn Icing Research Tunnel[J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(6): 1442-1451.
- [13] POTAPCZUK M, MILLER D, IDE R, et al. Simulation of a Bi-Modal Large Droplet Icing Cloud in the NASA Icing Research Tunnel[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 2005.
- [14] 郭向东, 张平涛, 赵照, 等. 大型结冰风洞云雾场适航应用符合性验证[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 123879.
GUO Xiang-dong, ZHANG Ping-tao, ZHAO Zhao, et al. Airworthiness Application Compliance Verification of Cloud Flowfield in Large Icing Wind Tunnel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 123879.
- [15] 符澄, 彭强, 张海洋, 等. 结冰风洞环境对喷嘴雾化特性的影响初步研究[J]. 实验流体力学, 2015, 29(3): 30-34.
FU Cheng, PENG Qiang, ZHANG Hai-yang, et al. Preliminary Research on Spray Nozzle Atomization Characteristics in Icing Wind Tunnel Environment[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(3): 30-34.
- [16] 易贤, 马洪林, 王开春, 等. 结冰风洞液滴运动及传质传热特性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(S2): 132-135.
YI Xian, MA Hong-lin, WANG Kai-chun, et al. Analysis of Water Droplet Movement and Heat/Mass Transfer in an Icing Wind Tunnel[J]. Journal of Sichuan University

- (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 132-135.
- [17] 蔡英磊, 董威. 冰风洞试验中水滴的传热传质计算研究[J]. 航空发动机, 2013, 39(3): 36-40.
CAI Ying-lei, DONG Wei. Calculation and Analysis of Heat and Mass Transfer for Water Droplet in Icing Tunnel Test[J]. Aeroengine, 2013, 39(3): 36-40.
- [18] Artium Technologies Inc. PDI Flight Probe Dual Range(FPDR) User Manual[K]. California: Artium Technologies Inc, 2013.
- [19] DURST F, MELLING A, WHITELAW J H, et al. Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry[J]. Journal of Applied Mechanics, 1977, 44(3): 518.
- [20] BACHALO W D. Measurement Techniques for Turbulent Two-phase Flow Research[C]//Proc International Symposium on Multiphase Fluid, Non-Newtonian Fluid and Physicochemical Fluid Flows. Beijing: [s. n.], 1997.
- [21] Malvern Instruments Ltd. Spraytec User Manual[K]. MaxCard: Malvern Instruments Ltd, 2006.
- [22] 李承凯, 张德远. 离心旋流式喷嘴雾化特性实验研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(6): 47-51.
LI Cheng-ji, ZHANG De-yuan. Research on Atomizing Properties of Centrifugal Swirl Nozzle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(6): 47-51.
- [23] 唐虎, 成竹, 蒋军亮, 等. 空气助力雾化喷嘴雾化特性实验研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 38-41.
TANG Hu, CHENG Zhu, JIANG Jun-liang, et al. Experimental Investigation of Spray Characteristic of Air-Blast Atomizer[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 38-41.
- [24] 陈舒越, 郭向东, 王梓旭, 等. 结冰风洞过冷大水滴粒径测量初步研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(3): 22-29.
CHEN Shu-yue, GUO Xiang-dong, WANG Zi-xu, et al. Preliminary Research on Size Measurement of Supercooled Large Droplet in Icing Wind Tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(3): 22-29.
- [25] SAE ARP-4906, Droplet Sizing Instrumentation Used in Icing Facilities[S].

责任编辑: 刘世忠