

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.018

## 冰风洞过冷大水滴云雾水滴质量分布模拟

李 斯<sup>1,2,3</sup>, 束 珺<sup>4</sup>, 张志强<sup>1,2,3</sup>, 顾洪宇<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国航空工业空气动力研究院, 沈阳 110034; 2. 沈阳市飞机结冰与防除冰重点实验室, 沈阳 110034;  
3. 高速高雷诺数气动航空科技重点实验室, 沈阳 110034;  
4. 中国商用飞机有限责任公司上海飞机设计研究院, 上海 200120)

**摘要:** 准确模拟过冷大水滴 (Supercooled large droplet, SLD) 云雾水滴质量分布是最新的结冰适航条款要求, 也是当前冰风洞试验技术难点。以 14CFR 25 部附录 O 规定冻毛毛雨水滴累计质量分布曲线为目标, 在冰风洞中开展过冷大水滴结冰条件模拟研究。基于水滴质量分布要求进行大水滴云雾与小水滴云雾匹配性分析, 并在 FL-61 风洞喷雾系统现有条件下开展大水滴喷嘴喷雾性能测量, 将生成的具有不同液态水含量 (Liquid water content, LWC) 和体积中值直径 (Medium volume diameter, MVD) 特征的云雾参数组合, 在试验段中心位置生成了水滴质量分布曲线接近附录 O 规定的冻毛毛雨条件。研究表明, 采用分别模拟相应水滴质量分布的大水滴和小水滴云雾, 再进行组合喷雾能够较好地预测和指导在冰风洞中构造大水滴云雾, 同时验证了在冰风洞内能够采用两种喷嘴模拟水滴质量为双峰分布云雾条件的可行性。

**关键词:** 过冷大水滴; 水滴质量分布; 冰风洞试验

中图分类号: V211.74

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)01-0146-08

## Study on Simulation for Droplet Mass Distribution of Supercooled Large Droplet Cloud in Icing Wind Tunnel

LI Si<sup>1,2,3</sup>, SHU Jun<sup>4</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>1,2,3</sup>, GU Hongyu<sup>1,2,3</sup>

(1. AVIC Aerodynamics Research Institute, Shenyang 110034, China; 2. Shenyang Key Laboratory of Aircraft Icing and Ice Protection, Shenyang 110034, China; 3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aerodynamics of High Speed and High Reynolds Number, Shenyang 110034, China; 4. COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Accurately simulating the droplet mass distribution of supercooled large droplet (SLD) cloud is the latest requirement of airworthiness, and also the technical difficulty in current icing wind tunnel tests. Aiming at the drop cumulative mass distribution curve of freezing drizzle specified in 14CFR part 25, appendix O, the simulation study of SLD icing conditions is carried out in the icing wind tunnel. Based on the requirements of water droplet mass distribution, the matching analysis of the large-drop cloud and the small-drop cloud is carried out, and the large water droplet nozzle spray performance is measured under the existing spray conditions of the FL-61 wind tunnel. A freezing drizzle condition with drop mass distribution curves close to the conditions specified in Appendix O is successfully achieved at the center of the test section through the combination of two different liquid water content (LWC) and medium volume diameter (MVD) characteristics that generated separately with the small droplet nozzle and the large droplet nozzle. The results show that the method of separately simulating the large and small water droplet clouds with the

收稿日期: 2022-02-15; 修订日期: 2022-07-13

通信作者: 李斯, 男, 高级工程师, E-mail: ls\_ls@163.com。

引用格式: 李斯, 束珺, 张志强, 等. 冰风洞过冷大水滴云雾水滴质量分布模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 146-153. LI Si, SHU Jun, ZHANG Zhiqiang, et al. Study on simulation for droplet mass distribution of supercooled large droplet cloud in icing wind tunnel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 146-153.

corresponding water droplet mass distribution, and then combining spray can better predict and guide the construction of large water droplet clouds in the icing wind tunnel. At the same time, it verifies the feasibility of using two types of nozzles to simulate the cloud conditions with bimodal water droplet mass distribution in the icing wind tunnel.

**Key words:** supercooled large droplet; droplet mass distribution; icing wind tunnel test

随着国外对过冷大水滴(Supercooled large droplet, SLD)引发的 ATR72 飞机坠机等相关飞行事故的调查研究和多项针对 SLD 结冰气象条件探测项目的开展<sup>[1-2]</sup>,对 SLD 结冰导致的飞行安全问题已经形成普遍清晰的认识。2014 年美国联邦航空局 FAA 正式发布关于 SLD 的 140 修正案<sup>[3]</sup>,对 25 部运输类飞机和 33 部航空发动机中包括 SLD 结冰环境的若干条款进行了系统性修改,这标志着飞机结冰安全标准进一步提高,SLD 结冰成为民用飞机适航取证不可避免的问题。

为了满足飞机对包含 SLD 相关条款的适航取证试验需求,各研究机构都在积极通过改进升级现有试验设施或建立新型结冰试验设施等方法,探索提升 SLD 试验能力。但是因为大粒径水滴本身物理特性导致的沉降、难过冷、不同粒径水滴分层等问题,目前在冰风洞内仅能够生成有限冻毛毛雨结冰条件,无法有效满足 SLD 试验需求。与附录 C<sup>[4]</sup>的常规结冰条件相比,附录 O<sup>[5]</sup>额外规定了 SLD 的水滴质量分布,且进一步的结冰试验研究也表明 SLD 的水滴分布中任何一部分的存在或缺失都会导致最终冰形的显著差异:大水滴部分决定结冰范围和积冰的总体尺寸与形态;小水滴通过促进表面粗糙度增长改变积冰表面特征,还可能通过改变表面上游区域结构影响结冰范围,削弱大水滴在测试件表面偏后部区域的积累。所以模拟 SLD 条件的水滴质量分布非常重要,各研究机构普遍将此作为冰风洞试验条件建设研究的重点,尤其在当前行业内对如何匹配 SLD 条件水滴累计质量分布曲线的关键点还没有明确结论的条件下,努力使水滴质量分布与附录 O<sup>[5]</sup>规定相符合,对工程试验具有重要的现实意义。

美国国家航空航天局 NASA 在结冰研究风洞 IRT 中相对较早地进行了大水滴云雾生成和测量研究,在 1999 年对换热器完成改造后开展结冰云雾校测时就尝试生成了部分大水滴条件,后续又通过对喷雾系统进行升级改造和开展一系列云雾校测,具备了最大体积中值直径(Medium volume diameter, MVD)达到 230  $\mu\text{m}$  的 SLD 结冰条件模拟能力<sup>[6-9]</sup>。虽然目前在 IRT 中是仅采用 Mod1 一种喷嘴生成大水滴云雾,导致不能准确模拟附录

O<sup>[5]</sup>规定的水滴质量分布,仅能满足 MVD 与最大水滴直径模拟要求,但在 2005 年曾采用该型喷嘴分别设置 20  $\mu\text{m}$  小水滴和 130  $\mu\text{m}$  大水滴喷雾条件进行循环交替喷雾,成功模拟出典型的水滴质量分布为双峰特征的云雾,并通过改变大、小水滴喷雾时间比例,验证了复合型喷雾方法在模拟 SLD 结冰条件时具有良好的效果<sup>[10]</sup>。IRT 在对 SLD 条件后续校测研究中,也明确提出模拟具有双峰水滴质量分布特征的云雾,需要两套喷嘴才能实现<sup>[11]</sup>,但是因喷雾系统限制,在喷雾过程中只能使用同一气压,可能无法同时生成具有最佳匹配性的大水滴和小水滴云雾,导致能够生成的 SLD 条件水滴质量分布与附录 O<sup>[5]</sup>目标曲线存在明显偏差。

2011 年意大利航天研究中心 CIRA 与斯普瑞公司合作在冰风洞中测试了多种改进型喷嘴的性能,并采用大水滴喷嘴和小水滴喷嘴进行组合喷雾,通过调节喷嘴数量和喷雾状态改变云雾中大、小水滴比例,模拟出水滴质量为“双峰”分布的云雾,证明了采用组合喷雾方法生成 SLD 结冰条件的可行性<sup>[12]</sup>。但是由于采用的喷嘴在产生大粒径水滴时提供过大的水流量,与模拟大 MVD 与小 LWC 的需求不符合,试验结果和附录 O<sup>[5]</sup>规定的条件有较大差异。

2015 年加拿大国家研究委员会 NRC 在模拟高度冰风洞 AIWT 中进一步研究了采用两种不同粒径分布的云雾组合模拟 SLD 结冰条件的方法。该风洞的优势是具备对小水滴喷嘴和大水滴喷嘴分别独立设置喷雾水、气压力的能力,从而可以提供模拟云雾水滴质量分布需要的各种 MVD 和 LWC 条件。在进行风洞试验前首先采用计算方法模拟出与附录 O<sup>[5]</sup>规定质量分布曲线非常接近的喷雾状态,然后再进行组合喷雾,通过把测量结果与目标曲线进行对比,不断调节各喷嘴的喷雾参数,生成了与附录 O<sup>[5]</sup>规定的冻毛毛雨水滴质量分布曲线非常符合的 SLD 结冰条件<sup>[13]</sup>。该风洞的主要限制则是因总体尺寸较小,没有足够的距离使大水滴有效过冷,且水滴沉降导致云雾覆盖区域较小,可能无法满足工程试验需求。

各种研究结果显示,在冰风洞中生成水滴质量分布具有双峰特征的云雾,行之有效的方法就是采

用两个水滴质量是单峰集中分布特性的云雾进行组合,然后通过调节两个云雾水滴分布和水含量比例,使混合云雾的水滴质量分布符合附录O的规定<sup>[5,14]</sup>。为了研究建立SLD试验条件,中国航空工业空气动力研究院在FL-61风洞开展了一系列测试,尝试通过采用大、小水滴喷嘴组合喷雾产生水滴质量具有双峰分布特征的云雾。该研究以实现附录O<sup>[5]</sup>规定的冻毛毛雨水滴累计质量分布曲线为目标,首先对两条水滴累计质量分布曲线进行“拆分”分析,即基于现有喷雾系统小水滴喷嘴喷雾特性,把水滴累计质量分布曲线分成一个在风洞里可实现的小水滴条件和一个需要实现的大水滴条件;然后根据对大水滴条件的分析需求,开展大水滴喷嘴喷雾性能测量,掌握大水滴喷雾基本控制规律;最后进行组合喷雾,通过改变大、小水滴状态参数调节云雾的水滴累计质量分布曲线。本文描述了上述工作,并展示了与附录O<sup>[5]</sup>规定的冻毛毛雨条件的对比结果。

### 1 SLD 结冰条件与模拟方法分析

FAA CFR 25 和欧洲航空安全局 EASA CS-25 都在其新增的附录 O<sup>[5]</sup>中对 SLD 条件做出明确规定。以云雾中最大水滴直径 500 μm 为界线,把 SLD 结冰条件分为冻毛毛雨(Freezing drizzle, FZDZ)状态和冻雨(Freezing rain, FZRA)状态,这两种条件又进一步分成 MVD 大于和小于 40 μm 的两种状态,最终 SLD 结冰条件形成 4 种主要的水滴质量分布<sup>[15]</sup>: (1)FZDZ MVD<40 μm, (2)FZDZ MVD>40 μm, (3)FZRA MVD<40 μm, (4)FZRA MVD>40 μm, 具体云雾参数见表 1<sup>[15]</sup>, (累计)质量分布-粒径曲线见图 1~4<sup>[3,5]</sup>。

表 1 附录 O 定义的 SLD 结冰条件<sup>[15]</sup>

Table 1 Definition of SLD icing condition in Appengdix O<sup>[15]</sup>

状态	MVD 范围	MVD	$D_{max}$	$LWC_{max}$
FZDZ	<40	20	389	0.44
FZDZ	>40	110	474	0.27
FZRA	<40	19	1 553	0.31
FZRA	>40	526	2 229	0.26

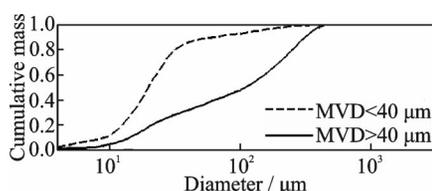


图 1 冻毛毛雨条件水滴累计质量分布<sup>[3,5]</sup>

Fig.1 Drop cumulative mass distribution for freezing drizzle<sup>[3,5]</sup>

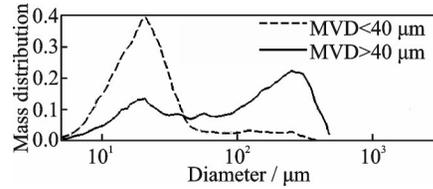


图 2 冻毛毛雨条件水滴质量分布<sup>[3,5]</sup>

Fig.2 Drop mass distribution for freezing drizzle<sup>[3,5]</sup>

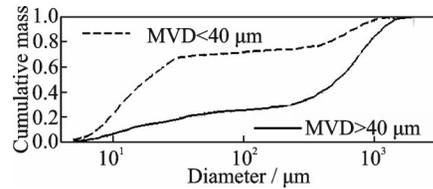


图 3 冻雨条件水滴累计质量分布<sup>[3,5]</sup>

Fig.3 Drop cumulative mass distribution for freezing rain<sup>[3,5]</sup>

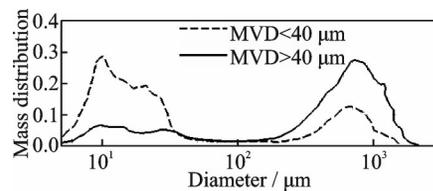


图 4 冻雨条件水滴质量分布<sup>[3,5]</sup>

Fig.4 Drop mass distribution for freezing rain<sup>[3,5]</sup>

FZDZ MVD<40 μm 条件下的水滴质量呈现在 20 μm 左右大量集中,占整个云雾水滴总质量 80% 以上,在大于 60 μm 的大水滴区域几乎平均分布的特点。FZDZ MVD>40 μm 条件的水滴质量呈现显著的双峰分布,小水滴部分的峰值也是 20 μm 左右,大水滴部分 200~300 μm 的水滴占据更大的比例。FZRA MVD<40 μm 和 MVD>40 μm 条件的水滴质量都呈现双峰分布,且集中位置基本一致,小水滴部分峰值为 10 μm 左右,大水滴部分在 700~800 μm 之间。

两种冻毛毛雨条件的小水滴部分水滴质量都在 20 μm 左右集中,在 FL-61 风洞采用小水滴喷嘴生成云雾的 MVD 为 15~60 μm,最大水滴直径达到 150 μm 的性能范围内。FL-61 风洞大水滴喷嘴生成云雾的 MVD 范围为 50~350 μm,其中最大水滴直径可达到 600 μm 以上,也能够满足冻毛毛雨条件的大水滴部分水滴尺寸模拟要求。如果能够匹配合适的水滴质量分布,则具有生成 SLD 结冰条件中冻毛毛雨条件的可行性。

图 5 为 FL-61 风洞生成 MVD=18.5 μm 条件的水滴质量分布,接近于正态分布,最大水滴直径 60 μm 左右,代表了在此 MVD 值附近典型的云雾特征。由于附录 O<sup>[5]</sup>定义的 FZDZ MVD<40 μm 条件的 MVD 为 20 μm,如果不考虑计算云

雾中大于 60  $\mu\text{m}$  的大水滴,小水滴部分的 MVD 必然小于 20  $\mu\text{m}$ 。那么不妨将 MVD=18.5  $\mu\text{m}$  条件的水滴质量分布作为附录 O<sup>[5]</sup> 中的两个冻毛毛雨质量分布曲线中小水滴部分的参照依据,把给定的水滴累计质量分布曲线初步拆分成代表大、小水滴部分的两条曲线,见图 6、7。其中小水滴部分累计质量分布曲线和风洞生成 MVD=18.5  $\mu\text{m}$  的水滴累计质量分布曲线在小于 Dv0.8 (累计质量为 0.8 对应的水滴特征直径) 范围内基本一致,仅在大于 Dv0.8 以后存在一定偏差,但该部分是拆分曲线时大、小水滴的重合区,属于可纠正偏差,见图 8。MVD<40  $\mu\text{m}$  条件的大水滴部分累计质量分布曲线基本呈线性增长,说明云雾中各个直径对应的水滴质量基本一致,无类似正态分布的集中区,与分析给出的在大于 60  $\mu\text{m}$  的大水滴部分水滴质量几乎平均分布的结论对应;MVD>40  $\mu\text{m}$  条件的大水滴部分累计质量分布曲线两端平缓,中间部分斜率较大,水滴质量可能呈现为在一些中间的粒径处集中分布的特征。所以采用与 MVD=18.5  $\mu\text{m}$  相似质量分布的小水滴条件,再匹配相应水滴分布的大水滴条件,按照确定 LWC 比例进行组合,理论上能够模拟出符合附录 O<sup>[5]</sup> 规定的冻毛毛雨结冰条件。结合大水滴喷嘴生成的水滴也表现部分水滴集中分布的特点,预期对 MVD<40  $\mu\text{m}$  条件模拟的符合性会相对较差,尤其是对大水滴部分可能无法实现相似的质量分布,模拟 MVD>40  $\mu\text{m}$  条件则更容易符合。

在 FL-61 风洞已经能够模拟比较适合组成冻毛毛雨条件的小水滴云雾的基础上,根据对匹配大水滴云雾的分析要求,开展大水滴喷嘴喷雾规律测量,再将独立测量得到的大、小水滴云雾参数组合,便得到确定水滴质量分布的云雾。假如在冰风洞内进行混合喷雾时水滴发生碰撞合并对最终云雾参数的影响误差较小,那么对组合喷雾的分析结果就能指导在风洞内构造 SLD 云雾条件。基本分析方法是:首先将大、小水滴条件的 LWC 按照水滴质量分布曲线分配,得到全部尺寸的水滴对应的绝

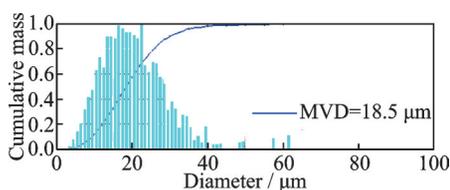


图 5 FL-61 风洞 MVD=18.5  $\mu\text{m}$  条件的水滴质量分布  
Fig.5 Drop mass distribution of MVD=18.5  $\mu\text{m}$  condition in icing wind tunnel FL-61

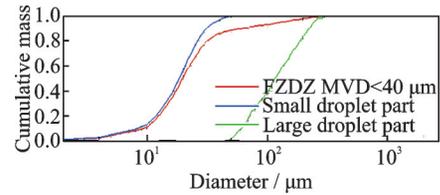


图 6 冻毛毛雨条件水滴累计质量分布拆分曲线  
Fig.6 Splitting curves of drop cumulative mass distribution for freezing drizzle

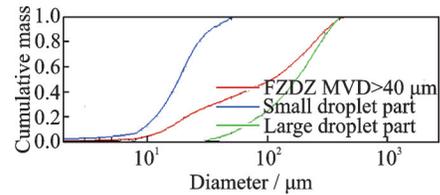


图 7 冻毛毛雨条件水滴累计质量分布拆分曲线  
Fig.7 Splitting curves of drop cumulative mass distribution for freezing drizzle

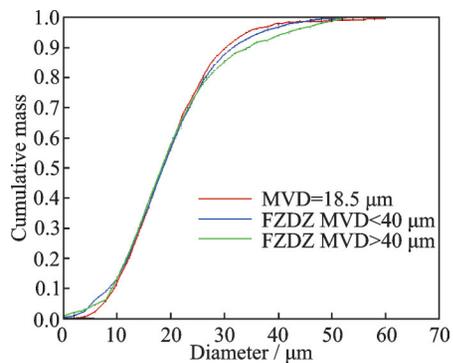


图 8 SLD 条件中小水滴部分水滴累计质量分布  
Fig.8 Drop cumulative mass distribution of small droplet for SLD conditions

对水含量;然后对两部分所有尺寸水滴对应的水含量求和,形成组合后的水含量-粒径分布;最后将每个尺寸水滴的水含量累计值除以大、小水滴条件的 LWC 之和,即得到组合后的云雾水滴质量分布曲线

$$F(x) = \frac{LWC_s \times F_s(x) + LWC_L \times F_L(x)}{LWC_s + LWC_L}$$

式中: $x$  为水滴直径; $F(x)$  为组合后水滴质量分布函数; $F_s(x)$  为小水滴云雾的水滴质量分布函数; $F_L(x)$  为大水滴云雾的水滴质量分布函数; $LWC_s$  为小水滴云雾液态水含量; $LWC_L$  为大水滴云雾液态水含量。

## 2 大水滴云雾测量

### 2.1 喷雾方案

在 FL-61 风洞中模拟 SLD 结冰条件,喷雾系统对全部喷嘴提供一致的气压,对每一排喷雾靶进

行独立水压控制。进行小水滴喷雾时,全部喷嘴的水、气压力条件都相同,可通过调节喷嘴开闭形成均匀云雾。根据已经掌握的校测结果,MVD在 $20\ \mu\text{m}$ 以下,可实现LWC的范围是 $0.2\sim 2\ \text{g}/\text{m}^3$ ,为了与LWC较大的大水滴云雾部分匹配,选择大密度喷嘴构型喷雾。

当确定小水滴云雾参数后,也就确定了大水滴喷嘴对应的喷雾气压,可通过调节大水滴喷嘴的喷雾水压产生不同MVD和LWC的大水滴条件。此外由于大粒径水滴在风洞内运动过程中会出现沉降和水滴分层,即使在确定喷雾条件下,喷嘴位置和气流速度变化都会导致试验区水滴粒径分布改变,所以在要求的云雾覆盖区内如何实现粒径分布一致也是模拟SLD结冰条件的重要问题,本研究仅针对试验段中心位置进行云雾参数测量。为了在该位置测量到大水滴,并在不同试验条件下能够模拟生成需要的大水滴分布特性,开启喷雾系统中央偏上位置的喷嘴喷雾,测量大水滴喷嘴的喷雾性能,见图9。

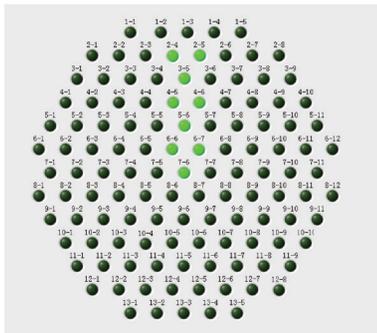


图9 大水滴喷嘴位置

Fig.9 Large water droplet nozzle positions

2.2 试验设备

本文研究是在中国航空工业空气动力研究院的FL-61风洞中,基于现有喷雾系统能力开展的。该风洞为回流式冰风洞,由动力系统、制冷系统、喷雾系统、真空系统、试验段、测控系统、视频监控系统和辅助设备等组成,图10为风洞轮廓图。风洞结冰试验段设计风速为 $210\ \text{m}/\text{s}$ ,试验段总温范围 $-40\sim 60\ ^\circ\text{C}$ ,试验段截面尺寸 $0.6\ \text{m}\times 0.6\ \text{m}$ ,试

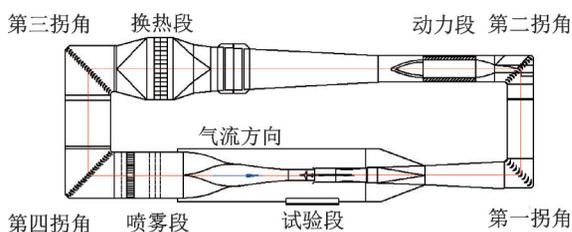


图10 FL-61冰风洞

Fig.10 Icing wind tunnel FL-61

验段全长 $2.7\ \text{m}$ 。喷雾靶系统由安装在稳定段的13排喷雾靶和121个喷嘴组成,采用两套喷嘴分别实现MVD为 $50\ \mu\text{m}$ 以内小水滴和 $100\ \mu\text{m}$ 以上大水滴喷雾。

云雾MVD的测量采用相位多普勒干涉仪PDI,其粒径测量范围 $0.7\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$ ,同时可输出参数还包括水滴质量分布、水滴数量分布等。测量时将PDI安装在试验段中心,待喷雾稳定后每采集 $30\ \text{s}$ 输出一次数据,得到对试验区确定位置的云雾参数。LWC测量采用液态水含量测量仪LWC-301,量程为 $0\sim 3\ \text{g}/\text{m}^3$ ,安装在试验段里与PDI相同的测量区域。

2.3 大水滴喷嘴性能测量结果

在风速 $95\ \text{m}/\text{s}$ 时,开启第2排喷雾靶的喷嘴2~5,固定喷雾气压为 $180\ \text{kPa}$ ,改变喷雾水压 $p_{\text{water}}$ 进行喷雾测量。图11为MVD测量结果,在已测量的喷雾条件范围内,随着水压增加,MVD基本呈现线性增长,增长率约为 $10\ \mu\text{m}/70\ \text{kPa}$ 。图12为LWC的测量结果,随着水压增加,LWC也呈现线性增长,增长率约为 $0.1(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})/60\ \text{kPa}$ 。所以针对SLD条件的大粒径、小水含量特点,MVD随喷雾条件变化相对较小,LWC对喷雾条件变化更敏感,通过改变喷雾压力设置条件的方法适合调节云雾中大水滴部分比例。

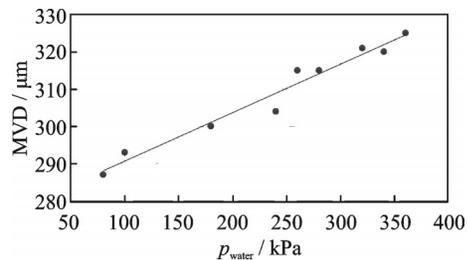


图11 大水滴MVD随水压的变化

Fig.11 MVD of large water droplets with different water pressures

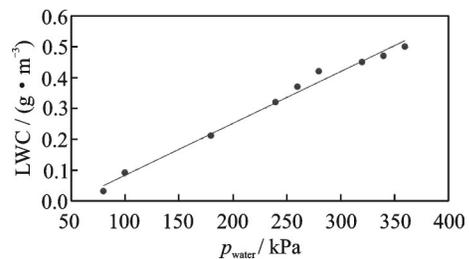


图12 大水滴LWC随水压的变化

Fig.12 LWC of large water droplets with different water pressures

图13为第6排喷雾靶的喷嘴6~7与第2排喷雾靶的喷嘴2~5在风速为 $95\ \text{m}/\text{s}$ 时,相同喷雾条

件下 MVD 的测量结果。曲线显示喷嘴位置越低, MVD 值越小, 相同条件喷嘴 6~7 比 2~5 喷雾可测量的 MVD 值小 155  $\mu\text{m}$  左右, 喷嘴位置对测量点的 MVD 影响明显, 其主要原因大水滴出现沉降。对喷嘴 6~7, 达到试验段测量点的大部分是沉降后剩余的粒径较小的水滴, 大水滴已经降落到测量点以下位置或撞击到风洞底部; 对喷嘴 2~5, 在试验段测量到的主要是云雾中沉降下来的大水滴, 小水滴部分还在测量点以上位置。所以在本次构造 SLD 云雾试验中, 可以通过改变喷嘴位置更有效地调节大水滴部分质量分布。

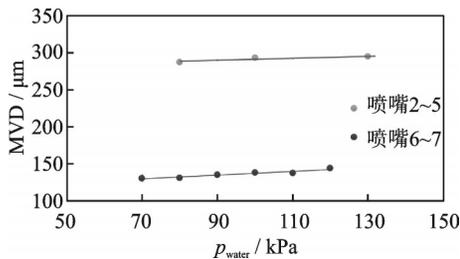


图 13 不同位置喷嘴的大水滴 MVD 结果

Fig.13 MVD of large water droplets with different nozzle positions

图 14 为第 2 排喷雾靶的喷嘴 2~5 在确定喷雾条件下, MVD 随风速  $v$  变化的曲线。在风速 60~100 m/s 范围内, 随着速度增加, MVD 也基本呈现线性增长, 速度每增加 10 m/s, MVD 增大 20  $\mu\text{m}$  左右。该结果也反映出云雾中的大水滴确实出现显著沉降, 且粒径越大, 沉降位置越靠前, 通过增大大气流速能够带动更大粒径水滴到达试验段测量位置。

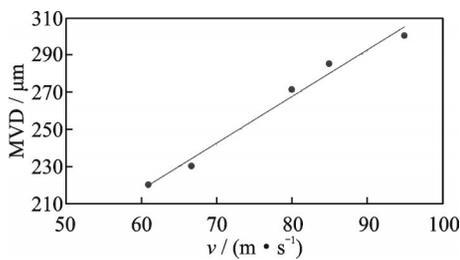


图 14 风速对大水滴 MVD 影响

Fig.14 Effect of air speed on MVD of large water droplets

以上测量结果为如何控制改变大水滴云雾参数提供了初步的参考依据。由于 FL-61 风洞喷雾系统目前仅能对全部喷嘴提供统一气压条件, 根据雾化喷嘴的喷雾性能, 在保持喷雾气压而只改变水压时, 喷嘴产生的粒径与水量仅存在唯一的对应关系, 所以对一个确定的小水滴喷雾状态, 与之最匹配的大水滴分布对应的水含量不一定同时满足匹配需求, 极大地限制了组合喷雾时对大水滴云雾参数的调节能力。本文研究中主要通过改变喷嘴位置调节大水滴云雾的粒径分布, 通过改变喷雾压

力设置条件调节云雾的 LWC, 待系统升级后能够实现大、小水滴喷嘴喷雾水、气压力的独立控制, 将更有利于模拟 SLD 结冰条件。

此外, 基于当前在风洞内对大水滴喷嘴性能的测量结果, 尤其是喷嘴 2~5 可以推断出, 在风速为 95 m/s 时, FL-61 风洞仅能够提供满足 MVD 为 300  $\mu\text{m}$  左右的大水滴到达试验段测量位置的沉降距离, 即使该喷嘴生成更大水滴, 也可能无法达到试验段。如果气流速度减小或者喷嘴位置降低, 生成大水滴云雾的 MVD 会进一步减小, 导致风洞在低速条件很难模拟 SLD 结冰条件。如果增大大气流速或者开启更高位置的喷嘴, 生成大水滴云雾的 MVD 会增加, 但 FL-61 风洞最终是否具备生成冻雨条件的潜力需要进一步研究。

### 3 模拟 SLD 结冰条件结果

对 FL-61 风洞的云雾参数测量结果按照大、小水滴云雾参数组合分析方法, 处理相同喷雾气压条件的大水滴和小水滴云雾, 能够得到大量 SLD 结冰条件。图 15 为在风速 95 m/s, 共同喷雾气压 160 kPa, 固定小水滴云雾条件  $MVD=18 \mu\text{m}$ ,  $LWC=0.37 \text{ g/m}^3$ , 通过改变大水滴 6~7 喷雾水压  $p$  调节大水滴分布和 LWC, 组合得到 SLD 条件的水滴累计质量分布曲线。图 15 清晰地显示出喷雾条件改变对云雾质量分布的影响, 据此可进一步进行云雾参数组合, 从而得到最符合附录 O<sup>[5]</sup> 规定的 SLD 结冰条件。

通过大量数据组合分析和试验测量, 筛选出与附录 O<sup>[5]</sup> 规定最符合 SLD 结冰条件。图 16 给出了

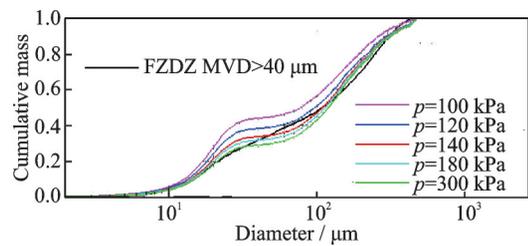


图 15 不同喷雾压力条件下水滴累计质量分布

Fig.15 Drop cumulative mass distribution with different spray pressures

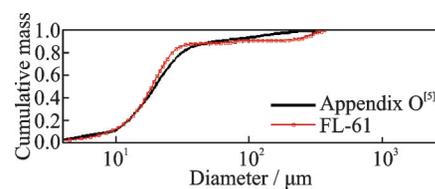


图 16 FL-61 冰风洞冻毛毛雨 MVD < 40  $\mu\text{m}$  条件的水滴累计质量分布

Fig.16 Drop cumulative mass distribution of freezing drizzle MVD < 40  $\mu\text{m}$  in icing wind tunnel FL-61

FL-61风洞模拟FZDZ MVD $<40\ \mu\text{m}$ 条件的水滴累计质量分布曲线与附录O<sup>[5]</sup>规定的曲线对比,结果显示在水滴直径小于 $100\ \mu\text{m}$ 的范围内符合性良好。图17为两条曲线在各个水滴累积质量值对应水滴直径的相对偏差,除因为采用的大水滴不能在整个粒径范围实现分析要求的平均分布,而是在接近 $300\ \mu\text{m}$ 附近非常集中,导致Dv0.9与附录O<sup>[5]</sup>规定的偏差很大外,其他直径的偏差均在 $\pm 20\%$ 以内,大部分不超过 $\pm 10\%$ 。

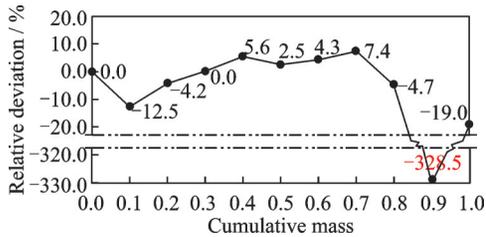


图17 冻毛毛雨 MVD $<40\ \mu\text{m}$ 条件的不同水滴累计质量对应直径的相对偏差

Fig.17 Relative deviation of diameter of different cumulative mass of freezing drizzle MVD $<40\ \mu\text{m}$

图18为FL-61风洞模拟FZDZ MVD $>40\ \mu\text{m}$ 条件的水滴累计质量分布曲线与附录O规定曲线对比图。结果显示在整个水滴直径范围内都实现了非常好的一致性。图19为两条曲线在各个水滴累积质量值对应水滴直径的相对偏差,除Dv0.3与附录O规定的偏差最大达到 $25\%$ ,其他直径的偏差均在 $\pm 20\%$ 以内,MVD与规定几乎完全一致,关键直径如Dv0.1, Dv0.9偏差也较小。

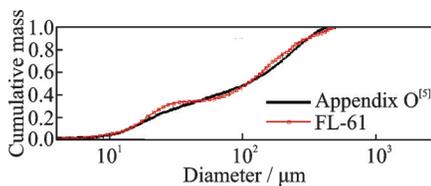


图18 FL-61冰风洞冻毛毛雨 MVD $>40\ \mu\text{m}$ 条件的水滴累计质量分布

Fig.18 Drop cumulative mass distribution of freezing drizzle MVD $>40\ \mu\text{m}$  in in icing wind tunnel FL-61

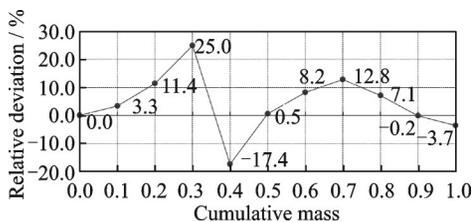


图19 冻毛毛雨 MVD $>40\ \mu\text{m}$ 条件的不同水滴累计质量对应直径的相对偏差

Fig.19 Relative deviation of diameter of different cumulative mass of freezing drizzle MVD $>40\ \mu\text{m}$

## 4 结 论

结合FL-61风洞现有喷雾系统喷雾性能,本文对附录O<sup>[5]</sup>规定的水滴质量分布进行大、小水滴云雾匹配性分析,提出在风洞内构造SLD结冰条件的方法,并开展试验验证。在FL-61风洞的部分典型工况模拟实现了与附录O<sup>[5]</sup>规定的水滴质量分布具有一定符合性的冻毛毛雨条件。研究表明采用分别模拟相应水滴质量分布的大水滴和小水滴云雾,再进行组合喷雾的方法能够较好地预测和指导在冰风洞构造SLD结冰条件。同时也可以初步推断,在大粒径、小水含量的SLD结冰条件中水滴碰撞合并的概率较小,大、小水滴喷嘴的喷雾性能能够保持相对独立性。

此外,本文对大水滴喷嘴在风洞内喷雾规律的研究结果对于在风洞内进行大水滴云雾生成与控制也具有一定的参考价值。但是由于研究中仅针对试验段中心位置进行大水滴云雾参数测量,所以采用调节显著影响大水滴云雾参数的喷嘴位置的方法匹配大水滴部分质量分布,这是本文现阶段工作的局限。在研究构造更大覆盖范围的均匀SLD云雾时,应该根据大水滴的整体沉降规律控制云雾中的水滴质量分布。

### 参考文献:

- [1] COBER S G, ISAAC G A, STRAPP J W. Characterizations of air-craft icing environments that include supercooled large drops[J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40: 1984-2002.
- [2] ISAAC G A, COBER S, BERNSTEIN B, et al. Data and analysis for the development of an engineering standard for supercooled large drop conditions: DOT/FAA/AR-09/10[R]. [S.1]: Federal Aviation Administration, 2009.
- [3] Department of Transportation, FAA. Airplane and engine certification requirements in supercooled large drop, mixed phase, and ice crystal icing condition: FAA-2010-0636[S]. [S.1]: FAA, 2014.
- [4] Department of Transportation, FAA. 14 CFR Appendix C to Part 25—Atmospheric icing conditions[S]. [S.1]: FAA, 2014.
- [5] Department of Transportation, FAA. 14 CFR Appendix O to Part 25—Supercooled large drop icing conditions[S]. [S.1]: FAA, 2014.
- [6] IDE R F, OLDENBURG J R. Icing cloud calibration of the NASA Glenn icing research tunnel: AIAA-2001-0234[R]. [S.1]: AIAA, 2001.
- [7] IDE R F, SHELDON D W. 2006 icing cloud calibration of the NASA Glenn icing research tunnel:

- NASA/TM-2008-215177[R]. [S.l.]: NASA, 2008.
- [8] VAN ZANTE J F, IDE R F, STEEN L E, et al. NASA Glenn icing research tunnel: 2014 cloud calibration procedure and results: NASA/TM-2014-218392[R]. [S.l.]: NASA, 2014.
- [9] VAN ZANTE J F, IDE R F, STEEN L E, et al. NASA Glenn icing research tunnel: 2014 and 2015 cloud calibration procedure and results: NASA/TM-2015-218758[R]. [S.l.]: NASA, 2015.
- [10] POTAPCZUK M, MILLER D, IDE R, et al. Simulation of a bi-modal large droplet icing cloud in the NASA icing research tunnel[C]//Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, Nevada: AIAA, 2005.
- [11] VANZANTE J F, IDE R F, STEEN L E. NASA Glenn icing research tunnel: 2012 cloud calibration procedure and results[C]//Proceedings of the 4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. New Orleans, Louisiana: AIAA, 2012.
- [12] ESPOSITO B M, BROWN K J, BACHALO W D. Application of optical methods for icing wind tunnel cloud simulation extension to supercooled large droplets [C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. [S.l.]: [s.n.], 2010.
- [13] ORCHARD D M, CLARK C, OLESKIW M. Development of a supercooled large droplet environment within the NRC altitude icing wind tunnel[C]//Proceedings of SAE International Conference on Icing of Aircraft. [S.l.]: SAE, 2015.
- [14] 符澄, 宋文萍, 彭强, 等. 结冰风洞过冷大水滴结冰条件模拟能力综述[J]. 实验流体力学, 2017, 37(4): 1-7.
- FU Cheng, SONG Wenping, PENG Qiang, et al. An overview of supercooled large droplets icing condition simulation capability in icing wind tunnels [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 37(4): 1-7.
- [15] 丁媛媛. 运输类飞机结冰适航审定方法及SLD关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- DING Yuanyuan. Research on icing airworthiness certification methods and SLD key technology for transport category airplanes[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

(编辑: 孙静)