

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.02.008

冻细雨分布匹配的量化评估方法

陈海^{1,2}, 郭向东^{1,2}, 赵荣¹, 易贤^{1,2}, 王丹³

(1. 中国空气动力研究与发展中心结冰与防除冰重点实验室, 绵阳 621000; 2. 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, 绵阳 621000; 3. 上海飞机设计研究院适航工程中心, 上海 201210)

摘要:为实现过冷大水滴(Supercooled large droplet, SLD)结冰条件下冻细雨结冰条件的精细化匹配, 本文通过分析美国联邦航空管理局颁布的 14CFR25 附录 O 中给出的冻细雨液滴尺寸分布, 提出了冻细雨分布匹配的量化评估方法。该评估方法引入标准化质量分数概念, 计算测量值与冻细雨液滴尺寸分布之间的匹配偏差因子, 采用 Rosin-Rammler 分布函数构建最优匹配累积分布函数, 以此作为匹配偏差最小阈值, 量化评估液滴尺寸匹配程度。基于新型喷雾测试平台和自研的空气辅助雾化喷嘴 Model 1 和 Model 2, 采用该方法对冻细雨条件开展匹配和评估研究。研究结果表明: 针对冻细雨(水滴中值体积直径(Median volumetric diameter, MVD) $<40\ \mu\text{m}$)条件, 液滴尺寸分布匹配偏差最小阈值 $F_c=11.82\%$, Model 1+Model 1 和 Model 1+Model 2 组合匹配偏差因子 F 分别为 24.08% 和 22.02%, 匹配程度均评价为“中等(Fair)”。针对冻细雨(MVD $>40\ \mu\text{m}$)条件, 液滴尺寸分布匹配偏差最小阈值 $F_c=3.76\%$, Model 1+Model 1 和 Model 1+Model 2 组合匹配偏差因子 F 分别为 22.78% 和 14.89%, 其中 Model 1+Model 1 组合匹配程度评价为“中等(Fair)”, 而 Model 1+Model 2 组合匹配程度评价为“良(Good)”。

关键词:飞机结冰; 过冷大水滴; 液滴尺寸分布; 空气辅助雾化喷嘴; 混合喷雾

中图分类号: V221.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)02-0233-08

Quantitative Evaluation Method of Freezing Drizzle Distribution Matching

CHEN Hai^{1,2}, GUO Xiangdong^{1,2}, ZHAO Rong¹, YI Xian^{1,2}, WANG Dan³

(1. Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 2. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 3. Center of Airworthiness Engineering, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: To accurately match the freezing drizzle conditions under the freezing conditions of supercooled large droplet (SLD), a quantization evaluation method for matching frozen drizzle distribution is developed by analyzing the freezing drizzle condition given in 14CFR25 Appendix O of Federal Aeronautics Administration. The evaluation method introduces the concept of standardized quality scores, and the matching deviation factor between the measured value and the size distribution of frozen drizzle droplets is calculated. The optimal matching cumulative distribution function is constructed by using Rosin-Rammler distribution function, which is used as the minimum matching deviation threshold to quantitatively evaluate the droplet size matching degree. Then, based on the new spray testing platform and two self-developed air-assisted atomizing nozzles Model 1 and Model 2, this method is used to study the matching and evaluation of freezing drizzle conditions. The results show that under the conditions of freezing drizzle (Median volumetric diameter (MVD) $<40\ \mu\text{m}$), the minimum threshold of matching deviation of droplet size distribution $F_c=11.82\%$, the matching deviation factors F of Model 1+Model 1 and Model 1+Model 2 are 24.08% and 22.02%, respectively, and the matching degree is evaluated as “Fair”. Under the conditions of freezing drizzle (MVD

收稿日期: 2022-04-22; 修订日期: 2022-07-07

通信作者: 易贤, 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: yixian@cardc.cn.

引用格式: 陈海, 郭向东, 赵荣, 等. 冻细雨分布匹配的量化评估方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(2): 233-240.
CHEN Hai, GUO Xiangdong, ZHAO Rong, et al. Quantitative evaluation method of freezing drizzle distribution matching [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(2): 233-240.

$>40\ \mu\text{m}$), the minimum threshold of matching deviation of droplet size distribution $F_c=3.76\%$, and the matching deviation factors F of Model 1+Model 1 and Model 1+Model 2 are 22.78% and 14.89%, respectively. Among them, the matching degree of Model 1+Model 1 is evaluated as “Fair”, while Model 1+Model 2 is evaluated as “Good”.

Key words: aircraft icing; supercooled large droplet; droplet size distribution; air assisted atomizing nozzle; mixed spraying

过冷大水滴(Supercooled large droplet, SLD)泛指液滴直径超过 $100\ \mu\text{m}$ 的过冷水滴^[1]。长久以来,飞机结冰研究和航空适航审定普遍关注直径小于 $100\ \mu\text{m}$ 的小尺寸液滴形成的结冰气象条件^[2],并未意识到SLD对飞机结冰的重要影响。但是对1994年ATR-72飞机飞行事故^[3]以及之后发生的多起飞行事故^[4]的调查表明,液滴直径超过 $100\ \mu\text{m}$ 的SLD普遍存在于大气结冰环境中,SLD的结冰危害相较于小尺寸液滴的更加严重。鉴于此,美国联邦航空管理局于2014年发布了联邦航空规章25部(14CFR25)附录O,明确给出了过冷大水滴结冰气象条件,要求飞机制造商表明飞机在该结冰环境下的适航符合性^[5]。根据水滴中值体积直径(Median volumetric diameter, MVD)的不同,过冷大水滴结冰气象条件包括冻细雨(MVD $<40\ \mu\text{m}$)、冻细雨(MVD $>40\ \mu\text{m}$)、冻雨(MVD $<40\ \mu\text{m}$)和冻雨(MVD $>40\ \mu\text{m}$)4种典型结冰条件,其液滴尺寸分布表现出显著的双峰特性,以及粒径范围跨度大的特点。不同于模拟普通云雾结冰条件只需满足MVD相同即可,在结冰风洞中模拟过冷大水滴结冰条件需要在很宽的范围内,使试验段内的液滴尺寸分布与过冷大水滴结冰条件的4条滴谱曲线相吻合。以上均对结冰风洞的喷雾系统提出了特殊要求^[6]。

针对过冷大水滴结冰条件的试验模拟,美国NASA Glenn中心、加拿大国家研究院NRC和奥地利国家铁道研究院RTA等结冰研究机构均开展了相关试验研究^[7-10]。其中,NASA Glenn中心King-Steen等^[7]采用两型空气雾化喷嘴,在NASA Glenn IRT结冰风洞内模拟了冻细雨(MVD $<40\ \mu\text{m}$)结冰条件。在该研究中,他们基于液滴累积体积分布曲线,通过设置平均液滴直径相对偏差、最大液滴直径相对偏差和最大液滴直径偏差对应液滴直径3个特征参数,量化评估液滴尺寸匹配程度。但是该评估方法仅能反映该累积体积分数对应的液滴直径覆盖范围的差异,难以直接反映偏差形成背后的真实物理本质,不利于液滴尺寸分布的优化匹配。Orchard等^[8]在NRC AIWT结冰风洞内开展了过冷大水滴结冰条件模拟研究,通过独立控制两套喷嘴喷雾系统,匹配了4种结冰条件下的液滴尺寸双峰分布。在该研究中,他们采用2个具有Langmuir D分布特征的假设液滴喷雾,匹

配了附录O液滴尺寸分布,为实验匹配提供了喷雾参数设置和数据支撑,但是他们并未给出量化的分布匹配评估方法,仍采用定性的目视方法判断匹配优劣。Ferschitz等^[9-10]在RTA气候风洞内开展了过冷大水滴云雾模拟研究,采用空气雾化喷嘴和单流体喷嘴,通过控制两套独立的喷嘴供水供气系统,匹配冻细雨(MVD $>40\ \mu\text{m}$)条件和冻雨(MVD $>40\ \mu\text{m}$)条件下的液滴尺寸分布。但是,他们也未给出量化的分布匹配评估方法,仍采用定性的目视方法判断匹配优劣。

国内相关机构和高校对过冷大水滴结冰开展了一些初步研究^[11-14],其中文献[14]基于Rosin-Rammler分布函数,匹配了过冷大水滴结冰条件液滴尺寸分布,匹配误差小于10%,进而采用数值模拟手段,考察了结冰风洞内云雾液滴尺寸分布的演化特征^[14]。但是,他们也采用NASA Glenn中心的分布匹配程度评估方法,同样面临该方法存在的问题。

本文通过引入标准化质量分数,计算喷雾实验测量值与冻细雨结冰条件液滴尺寸分布之间的匹配偏差因子,采用Rosin-Rammler分布函数构建适用于冻细雨结冰条件分布的最优匹配累积分布函数,以此作为匹配偏差最小阈值,量化评估液滴尺寸匹配程度,并使用喷雾测试平台进行条件匹配和量化评估,为结冰风洞过冷大水滴结冰条件试验模拟能力发展提供方法和数据支撑。

1 量化评估方法

为量化评估实验测量的液滴分布对冻细雨结冰条件的匹配程度,本文基于AC 25-28给出的冻细雨结冰条件10通道液滴尺寸分布数据(包括液滴尺寸通道直径范围、通道内液滴质量分数和累积质量分数)^[15],提出了冻细雨分布匹配的量化评估方法。该方法包括以下5个方面。

1.1 对测量的液滴尺寸分布进行液滴特征直径点插值

实验测量的液滴尺寸分布,通常以累积质量分数曲线表示,曲线由 N 个离散测量点组成(对应 N 个液滴尺寸通道),各测量点的横坐标对应各液滴尺寸通道最大液滴直径 D_i ,纵坐标则为累积质量分数 CMF_i 。根据冻细雨结冰条件10通道液滴尺寸分布数据,以各液滴尺寸通道右边界直径 D_R 为

特征点(共 10 个),对测量的液滴尺寸分布进行线性插值,则各特征点对应的测量累积质量分数 CMF*表示为

$$CMF_j^* = \begin{cases} \frac{CMF_1}{D_1} \times D_{R,j} & D_{R,j} < D_1 \\ (CMF_{k+1} - CMF_k) \times \frac{D_{R,j} - D_k}{D_{k+1} - D_k} + CMF_k & D_k \leq D_{R,j} \leq D_{k+1} \\ 1 & D_N < D_{R,j} \end{cases} \quad (1)$$

式中: j 为特征点编号,取值范围为 1~10; $D_{R,j}$ 为第 j 个特征点对应的液滴直径; k 为特征点所在的液滴通道序号,取值范围为 1~($N-1$)。 D_N 为测量的最大液滴所在的液滴通道的最大直径,该直径应小于或等于仪器最大液滴直径测量值 D_M (本文取为 2 000 μm)。

1.2 测量的液滴尺寸分布特征液滴尺寸通道划分及通道内测量液滴质量分数计算

当测量液滴尺寸分布最大液滴直径 D_N 大于液滴特征点最大直径 $D_{R,10}$ 时,将测量的液滴尺寸分布划分为 11 个特征液滴尺寸通道,则液滴尺寸通道和通道内液滴质量分数分别表示为

$$\begin{cases} \text{Bin}_i^* = \begin{cases} [1, D_{R,i}] & 1 \leq i \leq 10 \\ [D_{R,10}, D_N] & i = 11 \end{cases} \\ \text{MF}_i^* = \begin{cases} CMF_1^* & i = 1 \\ CMF_i^* - CMF_{i-1}^* & 2 \leq i \leq 10 \\ 1 - CMF_{10}^* & i = 11 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $D_{R,0}$ 取为 1 μm 。

当 $D_N \leq D_{R,10}$ 时,将测量的液滴尺寸分布划分为 10 个特征液滴尺寸通道,则液滴尺寸通道和通道内液滴质量分数分别表示为

$$\begin{cases} \text{Bin}_i^* = [1, D_{R,i}] & 1 \leq i \leq 10 \\ \text{MF}_i^* = \begin{cases} CMF_1^* & i = 1 \\ CMF_i^* - CMF_{i-1}^* & 2 \leq i \leq 10 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

1.3 匹配偏差因子定义与计算

匹配偏差因子 F 定义为所有特征液滴尺寸通道内测量的液滴质量分数与冻细雨条件给出的液滴质量分数的相对偏差绝对值的加权和,计算式为

$$F = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{i=1}^{10} f_i} \times \sum_{i=1}^{10} \left(f_i \times \frac{|\text{MF}_i^* - \text{MF}_i|}{\text{MF}_i} \right) & D_N \leq D_{R,10} \\ \frac{1}{\sum_{i=1}^{11} f_i} \times \left(\sum_{i=1}^{10} \left(f_i \times \frac{|\text{MF}_i^* - \text{MF}_i|}{\text{MF}_i} \right) + f_{11} \times \frac{\text{MF}_{11}^*}{\text{MF}^*} \right) & D_N > D_{R,10} \end{cases} \quad (4)$$

式中: MF_i 为冻细雨条件给出的第 i 个液滴通道对

应的液滴质量分数; MF^* 为最大液滴直径限制质量分数,定义为液滴直径范围位于液滴特征点最大直径 $D_{R,10}$ 与测量液滴尺寸分布最大液滴直径 D_N 之间的特征液滴质量分数,该参数用于限制测量液滴尺寸分布中直径超过 $D_{R,10}$ 的液滴质量,本文将 MF^* 设置为 0.025。 f_i 为第 i 个特征液滴尺寸通道内液滴质量分数相对偏差加权系数,本文将 11 个相对偏差加权系数数值设置为

$$f = \begin{cases} 0.1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.1, 0.05, \\ 0.05, 0.05, 0.025, 0.025, 0.025 \end{cases} \quad (5)$$

1.4 匹配偏差最小阈值定义与计算

根据匹配偏差因子 F 的定义,可见当匹配偏差因子 F 越大,测量液滴分布与冻细雨结冰条件液滴尺寸分布的匹配效果越差,而 F 越小匹配效果则越好,但是实际匹配过程中,测量结果与冻细雨结冰条件液滴尺寸分布总存在一定偏差,因此将这个最小偏差对应的匹配偏差因子 F_c 定义为匹配偏差最小阈值,进而衡量匹配效果的优劣。

为计算匹配偏差最优阈值 F_c ,本文选取 Rosin-Rammler 分布函数代表典型人造喷雾经验累积分布函数,表示为

$$CMF_{RR} = 1 - \exp\left[-\ln 2 \times (D/MVD)^q\right] \quad (6)$$

式中: D 、 MVD 和 q 分别为液滴直径、中值直径和液滴分布宽度控制因子,其中 q 值越大,分布则越窄。考虑到冻细雨结冰条件液滴尺寸分布具有单峰和双峰分布特征,需要两种不同液滴分布形态的人造喷雾去匹配,因此基于选取的经验分布函数,设置两个理想液滴分布,通过分别调节两个液滴分布的特征参数 MVD 和 q ,匹配冻细雨结冰条件液滴尺寸分布,进而通过最小二乘法,可以实现最优匹配,最优匹配累积分布函数 CMF_{opt} 表示为

$$CMF_{opt} = \frac{\beta}{\beta + 1} CMF_{RR}(MVD_1, q_1) + \frac{1}{\beta + 1} CMF_{RR}(MVD_2, q_2) \quad (7)$$

式中: β 为喷雾 1 与喷雾 2 最优总液态水含量之比; MVD_1 和 q_1 分别为喷雾 1 的最优中值直径和最优液滴分布宽度控制因子; MVD_2 和 q_2 分别为喷雾 2 的最优中值直径和最优液滴分布宽度控制因子。基于最优匹配累积分布函数,利用匹配偏差因子计算式,即可得到匹配偏差最小阈值 F_c 。

1.5 匹配程度指标定义

根据匹配偏差因子,可以将测量的液滴分布与冻细雨结冰条件液滴分布之间的匹配程度划分为优(Excellent)、良(Good)、中等(Fair)、差(Poor)4

种评价指标,各指标对应的匹配偏差因子 F 范围,表示为

$$\begin{cases} \text{Excellent: } 0 \leq F \leq F_c \\ \text{Good: } F_c < F \leq 20\% \\ \text{Fair: } 20\% < F \leq 40\% \\ \text{Poor: } 40\% < F \end{cases} \quad (8)$$

2 冻细雨条件匹配及量化评估

2.1 冻细雨结冰条件

冻细雨结冰气象条件(Freezing drizzle, FZDZ)包括冻细雨(MVD $<40 \mu\text{m}$)条件和冻细雨(MVD $>40 \mu\text{m}$)条件,其液滴直径 d 分布如图1所示。

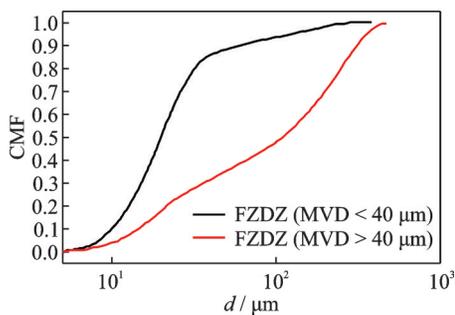


图1 冻细雨条件下液滴尺寸分布^[15]

Fig.1 Droplet size distribution in FZDZ conditions^[15]

为清晰刻画冻细雨结冰条件的液滴分布特征,基于AC 25-28给出的冻细雨结冰条件10通道液滴尺寸分布数据,引入标准化质量分数概念,绘制标准化液滴尺寸分布。标准化质量分数(Normalized mass fraction, NMF)定义为

$$\text{NMF} = \frac{\text{MF}}{\lg D_R - \lg D_L} \quad (9)$$

式中MF表示液滴尺寸通道内液滴的质量分数。图2给出了冻细雨结冰条件标准化液滴尺寸分布。图中红色空心点对应于各液滴尺寸通道内特征点,该特征点横坐标为各通道质量加权中间点直径 D_M ,阴影区则给出了各通道的覆盖范围,其中各通道阴影区面积对应该通道质量分数。从图2中可以看出:在FZDZ(MVD $<40 \mu\text{m}$)条件下,液滴尺寸分布以单峰分布为主(峰值点对应的液滴直径约为 $20 \mu\text{m}$),同时形成了较长的低水含量分布尾端(覆盖范围约为 $100 \sim 388 \mu\text{m}$);在FZDZ(MVD $>40 \mu\text{m}$)条件下,形成了显著的双峰分布,两峰值点对应的液滴直径分别约为 $22 \mu\text{m}$ 和 $261 \mu\text{m}$ 。

2.2 冻细雨匹配实验

本文基于新型喷雾测试平台,采用两种自研的空气辅助雾化喷嘴,即Model 1型和Model 2型喷嘴,通过分别喷射两种MVD的喷雾形成混合喷雾场,采用Spraytec粒径测量仪^[16]对混合喷雾场的液

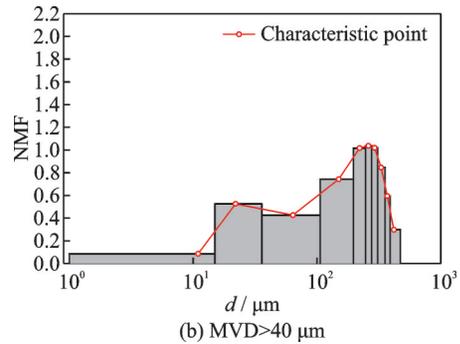
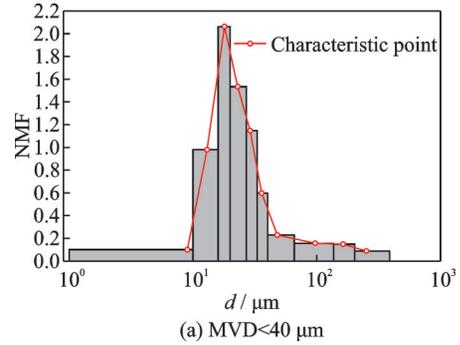
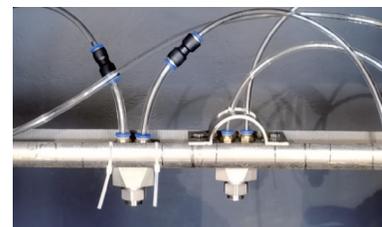


图2 冻细雨结冰条件标准化液滴尺寸分布

Fig.2 Normalized droplet size distribution in FZDZ conditions

滴尺寸分布进行测试,并采用冻细雨分布匹配的量化评估方法对实验结果进行冻细雨结冰条件匹配和量化评估。图3给出了双Model 1型喷嘴组合方式(Model 1+Model 1)和Model 1型喷嘴与Model 2型喷嘴组合方式(Model 1+Model 2)的安装示意图,两喷嘴位于测试台中心线两侧,喷嘴间距为 100 mm 。



(a) Model 1+Model 1



(b) Model 1+Model 2

图3 自研喷嘴组合

Fig.3 Self-developed nozzle combinations

表1给出了喷嘴实验工况,表中分别给出了两型喷嘴的控制水压 P_w 和控制气压 P_a 的测试范围。实验过程中,首先基于前期测量的喷嘴喷雾性能包线^[17],根据冻细雨结冰条件液滴分布曲线(图2),初步确定喷嘴控制水气压范围,然后对水气压参数进行精细

表 1 喷嘴实验工况

Table 1 Nozzle experimental conditions

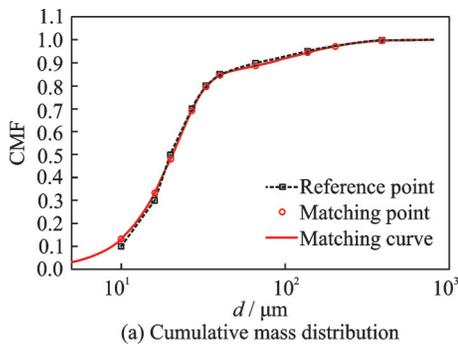
Nozzle type	Water pressure P_w / MPa	Air pressure P_a / MPa
Model 1	0.05~1.3	0.05~0.9
Model 2	0.05~1.3	0.05~1.3

化调节,实现冻细雨液滴分布的最优化匹配。

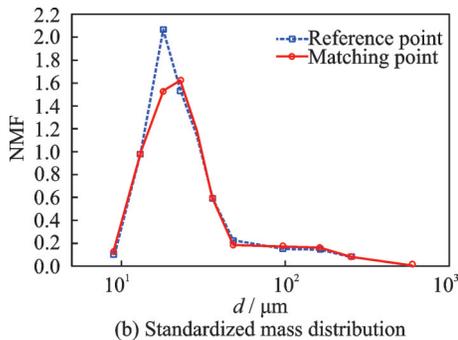
2.3 冻细雨(MVD<40 μm)条件实验结果

2.3.1 Rosin-Rammler分布最优匹配结果

图 4 给出了基于 Rosin-Rammler 分布函数的冻细雨(MVD<40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配结果。图 4(a)和图 4(b)分别为累积质量分布和标准化质量分布。该最优分布由 2 个 Rosin-Rammler 分布组合而成,其中小尺寸液滴区间 Rosin-Rammler 分布特征参数分别为 $MVD_1=18.5 \mu\text{m}$ 和 $q_1=2.38$,大尺寸液滴区间的分别为 $MVD_2=79 \mu\text{m}$ 和 $q_2=1.1$,小尺寸液滴 Rosin-Rammler 分布水含量与大尺寸液滴的之比 $\beta=4$ 。从图 4 中可以看出:针对冻细雨(MVD<40 μm)条件,液滴尺寸分布匹配偏差最小阈值 $F_c=11.82\%$;匹配偏差主要存在于小尺寸液滴区间,组合分布在小尺寸液滴区间内的峰值低于 FZDZ(MVD<40 μm)分布。由此可见,FZDZ(MVD<40 μm)条件下,小尺寸液滴区间分布具有宽度窄、水含量高的特征,是最优化匹配的难点。



(a) Cumulative mass distribution



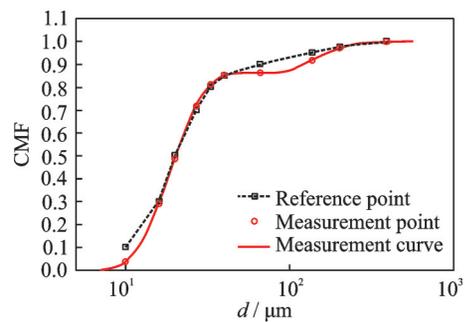
(b) Standardized mass distribution

图 4 基于 Rosin-Rammler 分布函数的冻细雨(MVD<40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配结果

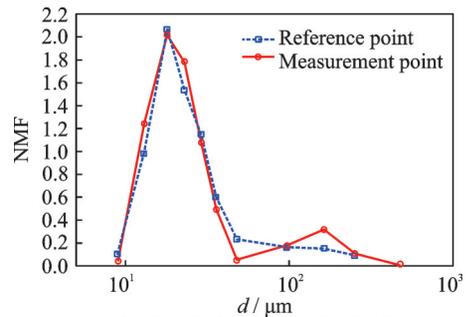
Fig.4 The optimal matching result of droplet size distribution in FZDZ (MVD<40 μm) condition based on Rosin-Rammler distribution function

2.3.2 Model 1+Model 1组合最优匹配实验结果

图 5 给出了基于 Model 1+Model 1 喷嘴组合的冻细雨(MVD<40 μm)条件下液滴尺寸分布最优匹配实验结果。该实验分布的 MVD_{mea} 为 $20.35 \mu\text{m}$,用于产生小粒径喷雾的 Model 1 喷嘴水压为 1 MPa,气压为 0.45 MPa;用于产生大粒径喷雾的 Model 1 喷嘴水压为 0.05 MPa,气压为 0.013 MPa。从图 5 中可以看出:实验分布匹配偏差因子 $F=24.08\%$,匹配程度评价为“中等(Fair)”。产生匹配误差的主要原因是大粒径喷雾的整体粒径偏大,使尺寸为 $50\sim 100 \mu\text{m}$ 的液滴体积占比较小,尺寸为 $100\sim 200 \mu\text{m}$ 的液滴体积占比较大。



(a) Cumulative mass distribution



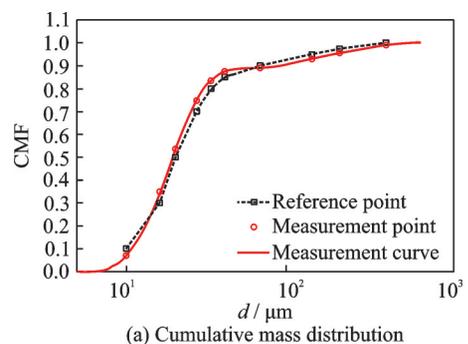
(b) Standardized mass distribution

图 5 基于 Model 1+Model 1 喷嘴组合的冻细雨(MVD<40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配实验结果

Fig.5 The optimal matching experimental result of droplet size distribution in FZDZ (MVD<40 μm) condition based on Model 1+Model 1 nozzle combination

2.3.3 Model 1+Model 2组合最优匹配实验结果

图 6 给出了基于 Model 1+Model 2 喷嘴组合的冻细雨(MVD<40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配实验结果。该实验分布的 MVD_{mea} 为



(a) Cumulative mass distribution

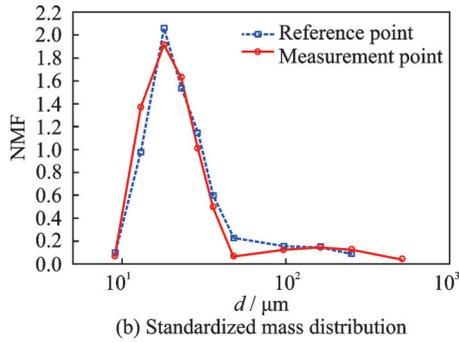


图6 基于 Model 1+Model 2 喷嘴组合的冻细雨(MVD<40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配实验结果

Fig. 6 The optimal matching experimental result of droplet size distribution in FZDZ (MVD<40 μm) condition based on Model 1+Model 2 nozzle combination

19.24 μm,用于产生小粒径喷雾的 Model 1 喷嘴水压为 1 MPa,气压为 0.39 MPa;用于产生大粒径喷雾的 Model 2 喷嘴水压为 0.05 MPa,气压为 0.88 MPa。从图 6 中可以看出:实验分布匹配偏差因子 $F=22.02\%$,匹配程度评价为“中等(Fair)”。

2.4 冻细雨(MVD>40 μm)条件实验结果

2.4.1 Rosin-Rammler 分布最优匹配结果

图 7 给出了基于 Rosin-Rammler 分布函数的冻细雨(MVD>40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配结果。从图中可以看出:小尺寸液滴区间 Rosin-Rammler 分布特征参数分别为 $MVD_1=24 \mu\text{m}$

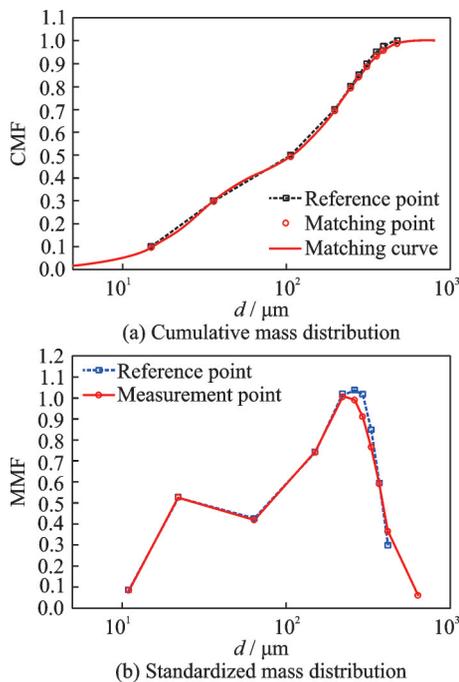


图7 基于 Rosin-Rammler 分布函数的冻细雨(MVD>40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配结果

Fig.7 The optimal matching result of droplet size distribution in FZDZ (MVD>40 μm) condition based on Rosin-Rammler distribution function

和 $q_1=1.8$;大尺寸液滴区间的分别为 $MVD_2=192 \mu\text{m}$ 和 $q_2=1.9$,水含量比 $\beta=0.58$ 。液滴尺寸分布匹配偏差最小阈值 $F_c=3.76\%$,匹配程度较高。

2.4.2 Model 1+Model 1 组合最优匹配实验结果

图 8 给出了基于 Model 1+Model 1 喷嘴组合的冻细雨(MVD>40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配实验结果。该实验分布的 MVD_{mea} 为 $119.13 \mu\text{m}$,用于产生小粒径喷雾的 Model 1 喷嘴水压为 0.2 MPa,气压为 0.175 MPa;用于产生大粒径喷雾的 Model 1 喷嘴水压为 0.05 MPa,气压为 0.013 MPa。从图 8 中可以看出:实验分布匹配偏差因子 $F=22.78\%$,匹配程度评价为“中等(Fair)”,匹配误差主要存在于液滴尺寸为 20~60 μm 的区域。

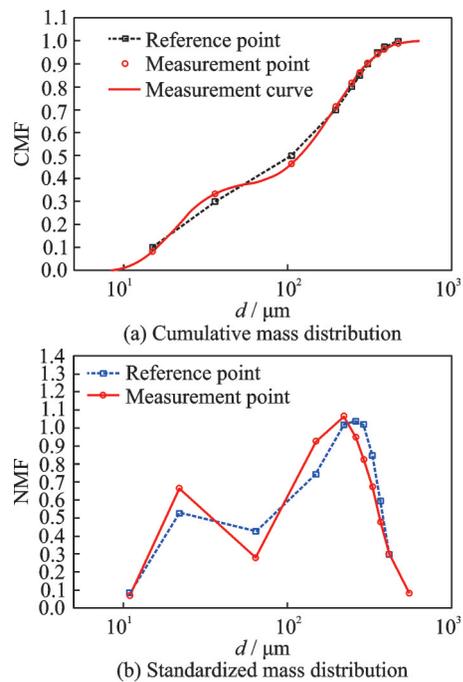


图8 基于 Model 1+Model 1 喷嘴组合的冻细雨(MVD>40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配实验结果

Fig.8 The optimal matching experimental result of droplet size distribution in FZDZ (MVD>40 μm) condition based on Model 1+Model 1 nozzle combination

2.4.3 Model 1+Model 2 组合最优匹配实验结果

图 9 给出了基于 Model 1+Model 2 喷嘴组合的冻细雨(MVD>40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配实验结果。该实验分布的 MVD_{mea} 为 $107.89 \mu\text{m}$,用于产生小粒径喷雾的 Model 1 喷嘴水压为 0.3 MPa,气压为 0.22 MPa;用于产生大粒径喷雾的 Model 2 喷嘴水压为 0.2 MPa,气压为 0.8 MPa。从图中可以看出:实验分布匹配偏差因子 $F=14.89\%$,匹配程度评价为“良(Good)”,匹配误差主要存在于大尺寸液滴区域。

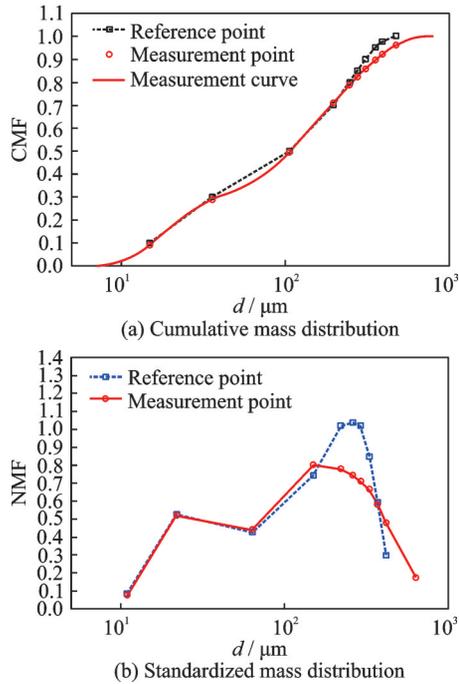


图 9 基于 Model 1+Model 2 喷嘴组合的冻细雨(MVD>40 μm)条件液滴尺寸分布最优匹配实验结果

Fig.9 The optimal matching experimental result of droplet size distribution in FZDZ (MVD>40 μm) condition based on Model 1+Model 2 nozzle combination

3 结 论

本文提出了冻细雨结冰条件液滴尺寸分布匹配的量化评估方法,进而采用实验手段,开展了冻细雨结冰条件液滴尺寸分布匹配研究,主要结论如下所示:

(1)针对冻细雨(MVD<40 μm)条件,小尺寸区间液滴分布具有宽度窄、水含量高的特征,是最优化匹配的难点,匹配偏差最小阈值 $F_c=11.82\%$ 。Model 1+Model 1 和 Model 1+Model 2 组合匹配偏差因子 F 分别为 24.08% 和 22.02%,匹配程度均评价为“中等(Fair)”。

(2)针对冻细雨(MVD>40 μm)条件,匹配偏差最小阈值 $F_c=3.76\%$,匹配程度较高。Model 1+Model 1 和 Model 1+Model 2 组合匹配偏差因子 F 分别为 22.78% 和 14.89,其中 Model 1+Model 1 组合匹配程度评价为“中等(Fair)”,而 Model 1+Model 2 组合匹配程度评价为“良(Good)”。

(3)采用本文提出的冻细雨分布匹配的量化评估方法可量化评估液滴尺寸匹配程度,为结冰风洞过冷大水滴结冰条件试验模拟能力发展提供方法和数据支撑。

参考文献:

[1] COBER S, BERNSTEIN B, JECK R, et al. Data

and analysis for the development of an engineering standard for supercooled large drop conditions: DOT/FAA/AR-09/10[R]. Washington D C: DOT/FAA/AR, 2009.

[2] 中国民用航空局. 中国民用航空规章: 第 25 部运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. [S.1.]: 中国民用航空局, 2011.

Civil Aviation Administration of China. Chinese Civil Aviation Regulations: Part 25 Airworthiness Standards for Transport Aircraft: CCAR-25-R4 [S]. [S. 1.]: Civil Aviation Administration of China, 2011.

[3] National Transportation Safety Board. Aircraft accident report, ATR Model 72-212: NTSB/AAR-96/01 [R]. Roselawn, Indiana: [s.n.], 1996.

[4] National Transportation Safety Board. Aircraft accident report, In-flight icing encounter and uncontrolled collision with terrain: NTSB/AAR-98/04 [R]. Washington D C: [s.n.], 1998.

[5] Federal Aviation Administration. Airplane and engine certification requirements in supercooled large drop, mixed phase, and ice crystal icing conditions: FAA-2010-0636[S]. Washington, D C: FAA, 2010.

[6] 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, 31(4): 1-7.

FU Cheng, SONG Wenpin, 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, 31(4): 1-7.

[7] KING-STEEN L C, IDE R F. Creating a bimodal drop-size distribution in the nasa glenn icing research tunnel[C]//Proceedings of the 9th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. [S. 1.]: AIAA, 2017.

[8] ORCHARD D M, CLARK C, OLESKIW M. Development of a supercooled large droplet environment within the NRC altitude icing wind tunnel[C]// Proceedings of the SAE 2015 International Conference on Icing of Aircraft, Engines, and Structures. [S. 1.]: SAE, 2015.

[9] FERSCHITZ H, WANNEMACHER M, BUCEK O, et al. Development of SLD Capabilities in the RTA icing wind tunnel[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2017, 10(1): 12-21.

[10] BREITFUß W, WANNEMACHER M, KNÖBL F, et al. Aerodynamic comparison of freezing rain and freezing drizzle conditions at the RTA icing wind tunnel[C]//Proceedings of the International Conference on Icing of Aircraft, Engines, and Structures.[S.1.]: [s.n.], 2019.

- [11] 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.
- [12] 张辰. 大型飞机过冷大水滴结冰理论及适航安全研究[D]. 上海:上海交通大学, 2016.
ZHANG Chen. Supercooled large drop icing mechanism and airworthiness safety for transport category airplanes[D]. Shanghai; Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [13] 郭向东, 柳庆林, 刘森云, 等. 结冰风洞中过冷大水滴云雾演化特性数值研究[J]. 航空学报, 2020, 41(8): 123655-123655.
GUO Xiangdong, LIU Qinglin, LIU Senyun, et al. Numerical study of supercooled large droplet cloud evolution characteristics in icing wind tunnel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(8): 123655.
- [14] 符澄, 徐兵兵, 彭强, 等. 结冰风洞中SLD模拟方法及其实验验证研究[C]//中国力学大会论文集(CC-TAM 2019). 杭州, 中国:中国力学学会, 2019.
- [15] FAA. Compliance of transport category airplanes with certification requirements for flight in icing conditions: AC 25-28[S]. U S:FAA, 2014.
- [16] British Plastics & Rubber. Malvern instruments[M]. UK:Malvern Instruments Ltd., 2006
- [17] 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 Haiyang, et al. The atomization characteristics research for spray nozzle of icing wind tunne[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(2): 32-36.

(编辑:孙静)