环境试验与评价

小水滴在风洞气流中的跟随性

孔绍康, 杜丽杰

(北京易盛泰和科技有限公司,北京 100000)

摘要:目的 获得风挡加温除雨系统试验台翼型上喷雾喷头排列方式和风洞实验风速的最优组合,同时获得 不同风速下小水滴在风洞沿程的跟随性和风洞出口截面上质量分数及均匀性等理论数据。方法 采用数值模 拟方法,对风挡加温除雨系统试验台的风洞和喷头部分进行建模仿真,模拟7个翼型上共60个均布喷头在 4 类不同进口风速、2 类喷头喷速下的 8 种实验过程。结果 得到小水滴在风洞不同实验条件下沿程跟随性 的变化规律,同时得到风洞出口处小水滴的分布结果。结论 风洞风速越小,喷头喷射发散性越好,而小水 滴跟随性越差;反之,风洞风速越大,喷头喷射发散性越差,而小水滴跟随性越好。风洞出口小水滴质量 分数随风速增大呈现先高后低的规律,而均匀性随风速增大而变好。

关键词:风洞;跟随性;粒径 DOI:10.7643/issn.1672-9242.2020.02.016 中图分类号:V211.753 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2020)02-0091-06

Follow Features of Water Droplets in Wind Tunnel

KONG Shao-kang, DU Li-jie (Beijing Yishengtaihe Technology Co., Ltd, Beijing 100000, China)

ABSTRACT: The paper aims to obtain the optimal combination of spray nozzle arrangement on the airfoil and wind tunnel test speed of the windshield heating and dewatering system test platform and obtain the following characteristics of the small water droplets along the wind tunnel, the mass fraction and the uniformity at the outlet of the wind the wind tunnel. The wind tunnel and nozzle parts of the windshield heating and dewatering system test platform were modeled and simulated through numerical simulation. There were 8 experimental processes of sixty uniformly spray nozzles on seven airfoils and four different inlet wind speeds and two nozzle test parameters were simulated. The regularity of small water droplet follow feature along the wind tunnel under different experimental conditions and the distribution result of small water droplets at the exit of the wind tunnel were obtained. The results showed that the smaller the wind tunnel speed, the better the divergence of nozzle and the worse the follow feature of small water droplets. With the increased of wind speed, the mass fraction of small water droplets at the outlet of wind tunnel first rises and then decreases, and the uniformity becomes better with the increase of wind speed.

KEY WORDS: wind tunnel; follow features; particle size

风挡加温除雨系统试验台,是为测试飞机挡风玻 璃上雨刷效率而专门设计研发的,主要包括直流风 洞、降雨模拟系统和风挡试验台。其中直流风洞为该 试验台核心,主要是为风挡试验台上的试验件提供不

Biography: KONG Shao-kang (1985-), Male, from Beijing, Master, Research focus: hvac refrigeration.

收稿日期: 2019-08-17; 修订日期: 2019-09-29

Received: 2019-08-17; Revised: 2019-09-29

作者简介:孔绍康(1985-),男,北京人,硕士研究生,主要研究方向为暖通制冷。

同的吹风条件、含水量、雨滴尺寸等参数,以模拟飞 机升降时空气的不同速度、含水量和雨滴谱等参数。 由于试验中需要风洞提供均匀的风速、含水量和相应 的雨滴谱,文中着重对直流风洞中稳定段、收缩段和 实验段三个部分进行研究,因为该部分设计决定了风 洞出口的风速、含水量和雨滴谱等核心参数。其中风 速的获得主要由风洞整流及流道截面渐变实现,含水 量和雨滴谱的获得主要由风洞整流段内处按一定规 律排列的喷头喷水实现,喷头安装在间距相等的7个 翼型上,在不同实验风速和喷头喷射参数条件下,需 要对以下两个方面进行分析:不同风速条件下,水滴 沿程的跟随性规律;不同风速和喷射参数下,风洞出 口截面处水滴的均匀性分布规律。

目前风洞的研究主要集中在风速结冰的模拟 上^[1-2],也有一些文献对冰风洞含水量、液滴运动及 传热传质等方面进行了一定的研究^[3-6],有的对雾滴 漂移的研究集中在航空喷雾作业上^[7-8],并形成相应 的行业标准^[9],但是研究风洞翼型上喷头分布对水滴 跟随性和出口分布规律的却很少见。要获得上述规 律,首先要确定风洞进口翼型上的喷头分布,然后获 得风洞出口水滴的分布结果和沿程变化轨迹。由于直 接利用风洞测试存在测量误差、一致性差、任务量大 等困难,因此文中主要通过流体仿真软件—— FLUENT软件^[10]进行理论模拟,首先设定均匀的喷头 分布方式,然后进行不同风速和不同喷射条件的模 拟,最后得到风洞内的液滴轨迹和出口的分布。

1 结构

1.1 风洞参数

风洞由稳定段、渐缩段、试验段三段组成。稳定 段上接风洞整流段,稳定段进口为整流后空气流速均 匀性达到指定要求的层流气流。为防止在稳定段直接 安装影响气流均匀性,因此在稳定段内均匀安装7个 对气流均匀性影响很小的 NACA0012 翼型,然后将 所有喷头安装翼型后缘内,如图1所示。



风洞稳定段长 1.5 m, 收缩段长 L=3.65 m, 进口

截面宽 $b_1=3.3 \text{ m}$ 、高 $h_1=2.7 \text{ m}$,出口截面宽 $b_0=1.1 \text{ m}$ 、高 $h_0=0.9 \text{ m}$,收缩比 $\eta=9$ 。收缩段结构设计采用 5 次 幂收缩曲线^[11],其中进口截面中心为坐标原点,纵轴 为 x 轴,横轴为 y 轴,喷头安装在翼型后缘内,喷头 距离收缩段入口 1 m。

1.2 模拟参数

该方案采用 FLUENT 流体模拟软件模拟风洞内 液滴跟随性和出口的分布规律,所建模型有以下四个 特征。

1)利用 FLENT 流体模拟软件按实际尺寸建立风 洞三维模型。

2)采用 60 个美国 spray 不锈钢空气雾化喷头, 型号为 SU22,均布在风洞进口 7 个翼型上,喷头在 进口截面(宽 b₁=3.3 m、高 h₁=2.7 m)上的分布情况 如图 2 所示,喷头交叉分布,喷头间距为 0.38 m。



图 2 喷头分布 Fig.2 Nozzle distribution

3)软件仿真采用 VOF 模型, 压力基求解器, *k-ε* 流动模型,风洞进口条件为 velocity-inlet,出口条件 为 outflow,喷头喷雾模型采用 FLUENT 自带的离散 相模型(DPM—air-blast-atomizer),每个喷头的设 置参数如图 3 所示。设定 Number of Particle Streams 为 12,流量为 0.006 389 g/s,喷头喷射角度为 70°,

COOLLING	Injection Type	Number of Pa	rticle Streams
ection-53	air-blast-atomizer	• 12	
tide Type		Laws	
Massless 💿 Inert	Oroplet Combust	ing 🔘 Multicomponent 📃	Custom
erial	Diameter Distribution	Oxidizing Species	Discrete Phase Domain
ter-liquid 🔹	linear v		~ none
porating Species	Devolatilizing Species	Product Species	
•			-
Variable Value X-Position (m) 0.5 Y-Position (m) -0.7	8	H	
	3		
Z-Position (m)			
Z-Position (m) 1.1 X-Axis 1			
Z-Position (m) 1.1' X-Axis 1 Y-Axis 0		-	

图 3 喷头设置参数 Fig.3 Parameters of nozzle setting

温度为 300 K, 喷头的喷射内外径分别为 0.0003 m 和 0.0004 m, 喷头出口处雾滴颗粒初始直径为 50 μm。

4)设定喷头的不同模拟参数,获得喷头在不同喷射速度和进口风速下的水滴跟随性和风洞出口分布规律。根据喷射速度和风速的不同,将模拟分为8 种类型,见表1,

Tab.1	Nozzle spray speed and wind speed		
模型	进口风速/(m·s ⁻¹)	喷速/(m·s ⁻¹)	
模型 1	2.22	4	
模型 2	4.44	4	
模型 3	6.66	4	
模型 4	8.89	4	
模型 5	2.22	25	
模型 6	4.44	25	
模型 7	6.66	25	
模型 8	8.89	25	

表 1 喷头喷速和风速

2 结果

2.1 小水滴跟随性

由于 60 个喷头模拟结果给显示带来很大的不可 视性,因此选择风洞上、下贴壁处和中心共三个喷头 模拟结果作为风洞模拟的代表喷头,用于查看水滴粒 径在风洞流程中的变化情况,如图 4 所示(横轴为风 洞长度模型,颜色代表喷头喷射小水滴直径变化,单 位为 m)。

由于小水滴数量众多,无法通过单个液滴的动力 学参数来代替整体的运动变化过程,因此本部分通过 小水滴在不同模型中粒子束的扩散程度、粒径变化两 方面参数研究液滴的跟随性。由图4可知,风洞流程 内水滴的变化规律有以下几个特征。

1)不同进口参数状态下,喷头出口粒径大小均 在 50 μm 左右,喷射角为 70°,可知喷头出口粒径与 风速和喷速无关,只与喷头的自身参数有关。

2)小水滴在风洞沿程流动过程中,在不同进口 条件下,粒径均呈现越来越小的趋势。在收缩段粒径 缩小的程度更为剧烈,同时在靠近风洞壁面处的粒子 束粒径变化要明显大于风洞中心处。这主要是水滴在 运动过程中与壁面发生碰撞破碎的原因造成的,越靠 近风洞壁面,现象越明显。

3)喷头在相同喷速下,风洞进口风速越小,粒 子束在风洞轴向流程中的发散程度越大,可以认为风 速对雾滴沿径向运动的干扰越来越小,即雾滴与风速 的跟随性越差,风速越高雾滴跟随性越好,粒子束扩 散程度越小。

4)风洞中心轴向粒子束变化过程可完整体现风

洞在非壁面附近粒子的运动规律,即粒子束的径向扩 散性与风洞轴向物理形状的变化相同。在稳定段先径 向发散,在收缩段亦开始收缩,至试验段后,由于惯 性仍呈收缩状态,但收缩量很小。

5)风洞壁面处的粒子束受到风洞壁面影响很大, 存在小水滴的粘附损失,在经过收缩段后,该处粒子 束惯性较大,在实验段呈现发散状态。

2.2 出口处液滴质量分数

风洞出口处液滴的质量分数分布不仅能直接反应风洞出口的含水量大小,也可以间接反应风洞不同进口参数下小水滴的出口的均匀性,如图 5 所示(风洞出口截面宽 $b_0=1.1$ m,高 $h_0=0.9$ m)。其中,出口不均匀性 δ 的定义为:

$$\delta = \sum_{0}^{n} \frac{C_i - a}{a \cdot n}$$

式中: *C*_{*i*}为出口处网格内水的质量分数模拟值; *a*为出口测量值的计算平均值; *n* 为网格数量。

根据模拟结果,可以得出以下结论。

1)风洞进口风速越小,风洞出口处液滴的质量 分数越低,但均匀性越高。这与粒子束发散程度有关, 越发散,均匀性越好。

2)随着进口风速的升高,风洞出口中心处出现 液滴质量分数不同的环形区域,中心区域浓度低,外 围浓度高。这主要受到贴壁处粒子束在试验段的惯性 发展有关,风速越高,惯性越大,导致出口处液滴存 在环形的浓度差异。

3)高风速和低风速工况下,出口处含水质量分数要低于中等风速的工况。在8种模型中,当风速为 4.44 m/s 时,出口处水的浓度最高。这是由于高风速 和低风速都会加大雾滴碰壁和破裂过程中的损耗,从 而造成出口雾滴质量的减少。

3 结论

根据上述模拟结果,可得到以下几点结论。

1)通过在风洞稳定段安装均匀排布的气水混合 喷头,在风洞实验段出口不一定能得到均匀性的气水 参数。这与喷头参数设定、风洞进口风速、风洞结构 参数等因素有关,喷头的安装排布效果可通过仿真计 算进行辅助验证,并需要通过实际实验验证。

2)均匀安装的喷头喷雾结果主要受进口风速影响,风洞进口风速越低,粒子束发散程度越好,雾滴跟随性越差,风洞出口的质量分数越均匀但浓度较低。反之,粒子束发散程度较差,雾滴跟随性越好,风洞出口的质量分数出现中间低四周高的环状分布,风洞出口质量分数呈现先高后低的发展规律。

3)风洞在不同的风速进口参数下,粒子束的发 散和收聚与风洞的结构形状相吻合,因此在风洞满足



Fig.4 Follow features of droplets: a) model 1; b) model 2; c) model 3; d) model 4; e) model 5; f) model 6; g) model 7; h) model 8





Fig.5 Mass fraction of droplet distribution at the wind tunnel exit: a) model 1, δ =8%; b) model 2, δ =16%; c) model 3, δ =22%; d) model 4, δ =31%; e) model 5, δ =6%; f) model 6, δ =13%; g) model 7, δ =21%; h) model 8, δ =35%

其他设计条件的基础上,可通过增大风洞收缩段长度,并选择使用高次曲线式结构优化渐缩段,以降低 收缩段对雾滴微粒的惯性影响,消减粒子束在运动惯 性影响下向风洞中心收聚的趋势,改善风洞出口气水 参数。

4)由于喷头在不同水气压力条件下有不同的喷 头喷射参数(喷射角度、粒径、流量),因此在进行 风速相同、出口水气参数不同的实验时,尽可能通过 更换不同规格喷头的方式调节,确保各类喷头在指定 的水气压力下工作,从而维持喷头喷射参数的单一性 和一致性。这是由于目前喷头厂家极少有对单一喷头 的全参数测试数据,喷头的选型参数是在类似标准测 试工况下的单一数据。

参考文献:

- 于涛,范洁川,贾元胜.现代航空声学风洞技术现状与 发展[J]. 实验流体力学,2007,21(3):86-91.
 YU Tao, FAN Jie-chuan, JIA Yuan-sheng. The Present Situation and Development of Modern Aeroacoustic Wind Tunnel Technique[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007, 21(3):86-91.
- [2] 我国已具备建造世界一流结冰风洞能力[J]. 中国科技产业, 2007(5): 65.
 Our Country Already Have the Ability to Build a World-class Icing Wind Tunnel[J].Science & Technology

Industry of China, 2007(5): 65.

- [3] 易贤,桂伟业,杜雁霞,等.结冰风洞水滴直径标定方法研究[J].实验流体力学,2010,24(5):36-42.
 YI Xian, GUI Wei-ye, DU Yan-xia, et al. Study on the Method of Droplet Diameter Calibration in Icing Wind Tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(5): 36-42.
- [4] 赵克良,陆志良,丁力,等.用于结冰风洞试验的混合 翼设计[J]. 空气动力学学报,2013,31(6):718-722.
 ZHAO Ke-liang, LU Zhi-liang, DING Li, et al. A Design Method of Hybrid Airfoil Applied in Icing Wind Tunnel

Test[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2013, 31(6): 718-722.

- [5] 易贤,朱国林,王开春,等.结冰风洞试验水滴直径选 取方法[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 877-882.
 YI Xian, ZHU Guo-lin, WANG Kai-chun, et al. Selection of Water Droplet Diameter in Icing Wind Tunnel Test[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(5): 877-882.
- [6] 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.
- [7] 茹煜,朱传银,包瑞.风洞条件下雾滴飘移模型与其影响因素分析[J].农业机械学报,2014,45(10):66-71.
 RU Yu, ZHU Chuan-yin, BAO Rui. Spray Drift Model of Droplets and Analysis of Influencing Factors Based on Wind Tunnel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 66-71.
- [8] 傅泽田, 祁力钧. 风洞实验室喷雾漂移实验[J]. 农业工 程学报, 1999, 15(1): 109-112.
 FU Ze-tian, QI Li-jun. Spray Drift Wind Tunnel Laboratory Experiments[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(1): 109-112.
- [9] MH/T 1051—2012, 喷雾漂移的风洞实验室测量方法
 [S].
 MH/T 1051—2012, Spray Drift in the Wind Tunnel Laboratory Measurement Method[S].
- [10] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工 大学出版社, 2008.
 YU Yong. FLUENT Introductory and Advanced Tutorial[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008.
- [11] 伍荣林, 王振宇. 风洞设计原理[M]. 北京: 北京航空 学院出版社, 1985.
 WU Rong-lin, WANG Zhen-yu. Wind Tunnel Design Principle[M]. Beijing: Beihang University Press, 1985.