# 涡轴发动机适航吸雨试验器喷水特性研究

唐利军 1,朱明明 1,王 欢 2

(1.中国航发湖南动力机械研究所,湖南株洲 412002;2.中国飞行试验研究院,西安 710089)

摘要:为研制满足《航空发动机适航规定》(CCAR-33R2)的某涡轴发动机适航吸雨试验器,采用激光粒度仪对涡流喷嘴、离心 喷嘴及直射式喷嘴的喷水特性进行了试验。结果表明:激光粒度仪的测量结果具有良好的稳定性;离心喷嘴的雨滴平均直径为 500~1500 µm,直射式喷嘴喷水时没有雨滴产生,均与吸雨合格审定标准的雨滴平均直径2660 µm偏差较大;在满足某涡轴发动机 适航吸雨流量的前提下,涡流喷嘴的雨滴平均直径为2077~3365 µm,与吸雨合格审定标准的雨滴平均直径偏差较小,并且雨滴尺 寸随供水压力的提高和测量截面距离的增大而逐渐减小。研究结果可为旋翼航空器发动机适航吸雨试验器的研制提供基础数据 支撑,也可供其他航空器发动机适航吸雨试验器的研制提供参考。

关键词:涡轴发动机;适航吸雨;试验器;喷嘴;涡流喷嘴;喷水特性

中图分类号: V216.5 文献标识码: A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.01.023

## Test Study on Water Spraying Characteristics of Airworthiness Rain Ingestion Tester for A Turboshaft Engine

TANG Li-jun<sup>1</sup>, ZHU Ming-ming<sup>1</sup>, WANG Huan<sup>2</sup>

(1.AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou Hunan 412002, China;

2. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to develop an airworthiness rain ingestion tester that meet the requirements of the Airworthiness Regulations for Aeroengine (CCAR-33R2) for a turboshaft engine, water spraying characteristics of vortex nozzle, centrifugal nozzle and plain orifice was studied using laser particle size analyzer. The results show that the measurement results of laser particle size analyzer exhibit good stability; the median or average diameter of rain droplets of the centrifugal nozzle is 500~1500 µm, no raindrops generated when testing the direct jet nozzle, both of the water spraying characteristics show large deviation from the criteria of the airworthiness rain ingestion regulations, which is 2660 µm; while the average diameter of rain droplets of the vortex nozzle is 2077~3365 µm, which deviates little from the criteria of the airworthiness rain ingestion regulations, and the rain droplet size decreases with the increase of the water feed pressure and the distance of the measuring cross-section. The results provide basic data support for the development of the rotorcraft engine rain ingestion tester, and also provide reference for development of airworthiness rain ingestion tester for other types of aeroengine.

Key words: turboshaft engine; airworthiness rain ingestion; tester; nozzles; vortex nozzle; water spraying characteristics

0 引言

直升机在雨天飞行时,发动机可能吸入大量的雨水,使机匣受冷收缩,导致机匣与转子叶尖间隙变小, 易产生碰摩损害发动机;同时发动机吸入雨水后还会改变压气机的工作状态<sup>[1]</sup>,影响发动机输出功率<sup>[2-4]</sup>, 导致失速、喘振、熄火等异常现象发生<sup>[5-7]</sup>,严重影响 直升机的飞行安全,尤其在慢车状态下,发动机空气 流量较小,雨水占空气流量的百分比较大,更易引起 发动机熄火<sup>[8-9]</sup>。甚至造成空中停车<sup>[10]</sup>。为了保证发 动机在雨天可靠运行,欧美等民用航空发动机适航标 准均给出吸雨合格审定的相关要求<sup>[11]</sup>。中国民用航 空局适航规章《航空发动机适航规定》(CCAR-33R2) 附录B吸雨合格审定标准大气降雨浓度的水滴尺寸分 布要求<sup>[12]</sup>:粒径范围为0~7 mm,平均直径为2.66 mm, 并且主要集中于1.00~3.99 mm,约占总雨水质量分数

**收稿日期:**2020-12-02 **基金项目:**航空动力基础研究项目资助 作者简介: 唐利军(1989), 男, 硕士, 工程师, 从事航空发动机试验研究工作; E-mail: xinjinzean@163.com。

引用格式: 唐利军, 朱明明, 王欢. 涡轴发动机适航吸雨试验器喷水特性研究[J]. 航空发动机, 2023, 49(1): 158-162. TANG Lijun, ZHU Mingming, WANG Huan. Test study on water spraying characteristics of airworthiness rain ingestion tester for a turboshaft engine[J]. Aeroengine, 2023, 49(1): 158-162.

的85%;另外,只要所使用的替代方法没有降低试验 的严格程度,通常通过喷洒液态水模拟降雨,并且允 许使用不同于附录B规定的水滴尺寸和尺寸分布。

吸雨试验是发动机研制过程中的一项重要试 验<sup>[13]</sup>。目前,国外已有多款民用航空发动机获得了适 航取证,吸雨适航符合性验证试验技术已较为成 熟<sup>[14]</sup>。而中国民用航空发动机适航吸雨符合性验证 技术成熟度不高,公开资料较少。满足适航要求的吸 雨试验器的研制是民用旋翼航空器发动机适航吸雨 符合性验证工作的前提和关键。而喷嘴作为吸雨试 验器的关键部件,其喷水特性的研究具有重要意义。

本文针对如何形成吸雨合格审定标准中大气降 雨浓度的水滴尺寸分布,利用激光粒度仪对涡流喷 嘴、离心喷嘴以及直射式喷嘴的喷水特性进行了试验 研究。

1 试验设备与原理

喷水特性试验布局如图1所示。



#### 图1 喷水特性试验布局

从图中可见,主要试验设备包括储水池、水泵、调 节阀、流量计、压力表、激光粒度仪、试验喷嘴以及其 他必要的管路连接设备、喷嘴安装支架等。在试验 中,由水泵将储水池内的水输送至试验喷嘴,由喷嘴 喷出的水经激光粒度仪的测试区域将测量结果传至 计算机采集与处理软件。通过调节供水阀改变进水 压力和流量。

## 1.1 激光粒度仪

试验使用德国产激光粒度仪,测量范围为0.5~ 8750 μm,系统测量精度为±1.5%。该激光粒度仪通 过采用激光衍射法分析颗粒的粒度分布,其工作原理 如图2所示。当激光源发出的光束照射测量区的颗 粒时,产生光的衍射,衍射光的强度分布符合 Fraunhofer 衍射理论,通过放置在 Fourier 变换透镜聚焦平 面上的探测器得到的衍射光的强度计算颗粒的大小 和分布,具有测量精度高、分辨率高、范围广、结果稳 定性好等优点。



图2 激光粒度仪工作原理

## 1.2 喷嘴

试验使用的喷嘴包括 1个离心喷嘴、2个涡流喷 嘴和1个直射式喷嘴,其 特性参数见表1。

直射式喷嘴利用高 压液体经小孔高速射出而 <u>2</u> 雾化<sup>[15]</sup>,流动原理如图3所示。

本试验采用的离心 喷嘴为实心锥喷嘴,利用 高压液体流过内部旋流 叶片产生的离心力形成 液膜,在空气作用下破碎 而雾化<sup>[16]</sup>,内部流动原理<sup>进口</sup> 如图4所示。

涡流喷嘴内部流动 原理如图5所示。从图中 可见,从喷嘴进口流入的 液体进入涡流室的同时, 受涡流器的影响,在涡流 室内产生的旋转流动流 向下游,经过带有锥角的 喷口后呈圆形截面均匀 喷出。

表1 试验	表1 试验喷嘴特性参数			
喷嘴	特性参数			
直射式喷嘴	喷孔为2.5 mm			
离心喷嘴	60°雾化锥角			
1#涡流喷嘴	60°雾化锥角			
2#涡流喷嘴	90°雾化锥角			





## 2 试验结果与分析

《航空发动机适航规定》33.78(b)条要求:旋翼航 空器发动机在起飞状态时的功率和最小慢车吸雨流 量与空气流量的总质量分数比至少为4%。根据某 涡轴发动机的进气流量确定了喷水特性研究流量为 6~13 L/min。测量布局如图6所示。

为了确保喷嘴喷出的雨滴能够完全覆盖发动机

第49卷



进气道,测量截面距喷嘴出口的距离为

$$L \ge R \cos \frac{\theta}{2} \tag{1}$$

式中:R为发动机进气道半径: $\theta$ 为喷嘴的喷雾锥角。 当θ=60°时,*L*≥200 mm<sub>☉</sub>

## 2.1 直射式喷嘴的喷水特性

直射式喷嘴特性测量试验场景如图7所示。从

图中可见,液体离开喷孔 后仍聚集,在实心的液柱 与周围空气作用下,没有 水滴产生,与吸雨合格审定 图7 直射式喷嘴特性测量



试验场景

标准雨滴分布相差较大。

## 2.2 离心喷嘴的喷水特性

在离心喷嘴测量截面L=200 mm时,分别在4组供 水压力和相应流量下的雨滴粒径及分布如图8所示。





从图中可见,随着供水压力的提高,流量增大,雨 滴粒径逐渐减小。因此压力越高,离心力越大,离开喷 嘴后的液滴速度越快,液滴与空气间的作用力也越大。

相应试验条件下测得的雨滴粒径及其分布见表2。

表中离心喷嘴的雨滴粒径与吸雨合格审定标准 的平均粒径(2660 μm)偏差较大。

表2	离心喷嘴雨滴粒径及分布(I=200 mm)	
12 -		

压力/MPa	流量/(L/min)	$X_{50}/\mu m$	$D_{ m VM}/\mu{ m m}$
0.05	5.21	1413.84	1472.56
0.1	7.69	963.86	1087.91
0.2	11.08	742.68	825.73
0.4	14.83	494.98	574.93

注:X50为液滴粒径体积分数由小到大累积达50%时的雨滴直径; D<sub>VM</sub>为平均体积直径。在理想情况下,当粒径完全符合正态分布时, 二者相等。

#### 2.3 涡流喷嘴的喷水特性

2.3.1 1#涡流喷嘴

1# 涡 流 喷 嘴 (90° 锥 角)喷水特性测量试验场 景如图9所示。

从图中可见,由于锥 角过大,当供水压力较低 时,喷出的雨滴出现泄漏



图 9 1#涡流喷嘴特性测量 试验场景

与飞溅现象。由于发动机进气道截面较小,若喷嘴锥 角过大,不利于雨滴均匀地进入进气道截面及实际吸 雨流量的准确测量。

1#涡流喷嘴在测量截面位置L=200 mm时,分别 在3组供水压力与相应流量下的雨滴粒径及其分布 如图10所示。



从图中可见,随着供水压力的提高,流量增大,雨 滴粒径逐渐减小。此外,在接近目标流量范围内,雨 滴尺寸分布与吸雨合格审定标准的偏差较小,集中在 1.00~3.99 mm 各区间的雨水质量分数与吸雨合格审 定标准最大偏差约为9.42%。

在各试验条件下测得的1#涡流喷嘴雨滴粒径及 分布见表3。

为研究1#涡流喷嘴在不同截面位置上的喷水特 性变化情况,分别对L=200、300 mm 处的雨滴粒径及 其分布进行了比较如图11所示,结果见表4。

表3	1#涡流喷嘴雨滴粒径及分布(L=200 mm)		
压力/MPa	流量/(L/min)	X <sub>50</sub> /μm	$D_{ m VM}/\mu{ m m}$
0.03	9.04	2804.46	2803.39
0.04	10.61	2501.57	2561.51
0.05	12.21	1906.41	1876.57



图 11 不同测量截面 1#涡流喷嘴雨滴粒径和分布

表4 不同测量截面1#涡流喷嘴雨滴粒径及其分布

压力/MPa	截面/mm	流量/(L/min)	$D_{ m VM}/\mu{ m m}$
0.04	200	10.61	2561.51
0.04	300	10.68	2431.01
0.05	200	12.21	1876.57
0.05	300	12.46	1825.32

从图表中可见,在相同供水压力的情况下,雨滴 粒径随测量截面距离的增大略有减小。

## 2.3.2 2#涡流喷嘴

2#涡流喷嘴(60°锥角) 喷嘴特性测量试验场景如 图12所示。

2#涡流喷嘴在测量截面 L=200 mm时,在4组供水压 力与相应流量下的雨滴粒径 及其分布如图13所示。





从图中可见,2#涡流喷嘴的雨滴粒径分布特性与 1#涡流喷嘴的相似,集中在1.00~3.99 mm,各区间的雨 水质量分数与吸雨合格审定标准最大偏差约为8.42%。

各试验条件下测得的2#涡流喷嘴雨滴粒径及其 分布见表5。

表5 2#涡流喷嘴雨滴粒径及其分布(L=200 mm)

压力/MPa	流量/(L/min)	$X_{50}/\mu m$	$D_{ m VM}/\mu{ m m}$
0.02	7.24	3435.15	3365.09
0.03	9.59	2854.36	2851.69
0.04	11.48	2691.67	2688.44
0.05	13.24	2103.94	2077.31

从表中可见,随着压力变化2#涡流喷嘴的雨滴 D<sub>vm</sub>=2077~3365 μm,与吸雨合格审定标准的平均粒 径(2660 μm)偏差不大。

为说明测量结果的稳定性,选择2#涡流喷嘴在供水压力 P=0.02 MPa条件下的3次喷水特性测量结果进行比较,如图14所示。



图 14 2#涡流喷嘴 3次喷水特性测量结果比较

因前2次测量为同一次试验过程中的取样(图 14),故前2次测量结果更加接近;第3次测量与前2 次的实际流动状态及测量位置都有偏差,故其测试 结果与前2次的稍有偏差,但偏差不大。

## 3 结论

(1)激光粒度仪的测量结果具有较好的稳定性;

(2)直射式喷嘴和离心喷嘴的雨滴粒径与吸雨 合格审定标准偏离较大;

(3)在满足某涡轴发动机适航吸雨流量的前提 下,涡流喷嘴的雨滴尺寸和分布与吸雨合格审定标 准的偏差较小,并且雨滴尺寸随供水压力的提高和 测量截面距离的增大而逐渐减小; (4)当锥角较大时,涡流喷嘴出口发生液滴泄漏 与飞溅现象,不利于雨滴均匀进入进气道截面与实际 吸雨流量的准确测量,若要确定合适的锥角范围,需 对不同锥角的喷嘴喷水特性做进一步研究。

本文研究结果为涡轴发动机适航吸雨试验器的 研制提供了基础数据支撑,同时也可为其他航空发动 机适航吸雨试验器研制提供参考。

## 参考文献:

- Pruppacher H R, Rasmussen R. Wind tunnel investigation of the rate of evaporation of large water drops falling at the terminal velocity in air [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1979, 36 (7):1255–1260.
- [2] Horlock J H. Compressor performance with water injection[R]. ASME 2001–GT–0343.
- [3] Day I, Williams J, Freeman C. Rain ingestion in flow compressors at part speed[R]. ASME 2005–GT–68582.
- [4] Williams J, Young J B. Movement of deposited water on turbomachinery rotor blade surfaces[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(2): 394–403.
- [5] Mathioudakis K, Roumeliotis I. Evaluation of interstage water injection effect on compressor and engine performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(4):849–856.
- [6] Roumeliotis I, Mathioudakis K. Water injection effects on compressor stage operation[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(3):778–784.
- [7] 刘波,曹志鹏,高嵩,等.来流含水对航空发动机风扇/压气机特性的影响[J].航空动力学报,2005,20(6):1041-1047.
  LIU Bo, CAO Zhipeng, Gao Song, et al. Influence of inlet water ingestion on aero-engine fan-compressor performance[J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(6):1041-1047.(in Chinese)
- [8] 旷桂兰,王道波,单晓明,等.某型航空涡轴发动机整机吞水性能试验[J]. 航空动力学报,2009,24(11):2415-2420.

KUANG Guilan, WANG Daobo, SHAN Xiaoming, et al. Swallowing water capability experiment of one turbine-shaft overall aviation engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(11): 2415-2420. (in Chinese)

[9] 李卫东. CFM56发动机吞水能力的改进[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1999,12(3):21-24.

LI Weidong. The improvement of water ingestion ability of CFM56 engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1999, 12(3): 21–24. (in Chinese)

[10] 陈光. 雨水对飞机发动机的影响[J]. 航空发动机,2013,39(4):1-2.
 CHEN Guang .Influence of rain on aeroengine[J]. Aeroengine, 2013, 39(4):1-2.(in Chinese)

[11] FAA. Airworthiness standards: aircraft engines FAR-33 [S]. U.S: FAA, 2009:34-37.

[12] 中国民用航空局. 航空发动机适航规定 CCAR-33R2[S]. 北京:中国民用航空局, 2012:54-57.

Civil Aviation Administration of China. Airworthiness regulations for aircraft engines CCAR-33R2[S]. Beijing:Civil Aviation Administration of China, 2012:54-57.(in Chinese)

- [13] Ostachowicz W M, Krawczuk M. Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 150(2):191-201.
- [14] 代晓晴, 张翔, 李森, 等. 某民用涡扇发动机飞行包线内吸雨量计 算分析[J]. 航空学报, 2017, 38(7):121076.

DAI Xiaoqing, ZHANG Xiang, LI Sen, et al. Calculation and analysis of fan inlet rain ingestion of a civil turbofan engine throughout the flight envelope[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38 (7): 121076. (in Chinese)

[15] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006:30-31.

GAN Xiaohua. Aerogas turbine engine fuel nozzle technology[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2006:30–31.(in Chinese)

[16] 侯凌云,侯晓春.喷嘴技术手册[M].北京:中国石化出版社,2002: 93-105.

HOU Lingyun, HOU Xiaochun. Technical manual of nozzle[M]. Beijing:China Petrochemical Press, 2002:93-105.(in Chinese)

(编辑:贺红井)