

中华人民共和国国家标准

GB/T XXXX—XXXX

基于相位多普勒技术的液体雾化特性 测试方法

The rule of characteristics test for liquid fuel atomization using phase Doppler
technique

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(征求意见稿)

— XX — XX 发布

XXXX — XX — XX 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由全国燃烧节能净化标准化技术委员会（SAC/TC441）提出。

本文件由全国燃烧节能净化标准化技术委员会（SAC/TC441）归口。

本文件起草单位：北京理工大学等。

本文件主要起草人：何旭等。

本标准为首次发布。

基于相位多普勒技术的液体雾化特性测试方法

1 范围

本标准规定了在以液体为燃料的燃烧装置中，采用相位多普勒技术进行液体雾化特性测试的术语和定义、试验设备、试验条件、试验步骤、数据处理和试验报告的要求。

本标准适用于各种喷射液体燃料的燃烧装置，如活塞式发动机、燃气轮机、燃烧器等。其它液体雾化装置可参照执行。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

液体燃料 liquid fuel

可雾化蒸发并与氧化剂形成可燃混合气的液态可燃物质。

3.2

喷油器 injector

将高压的液体燃料喷射到较低压力的环境中，使其分散碎裂成小液滴颗粒的一种装置。

3.3

喷射 injection

液体燃料通过喷油器以较高的喷射压力进入较低压力的环境中的过程。

3.4

雾化特性 atomization characteristics

用来表征液体燃料喷射后形成液滴的微观特征参数，如液滴速度、液滴直径等。

3.5

喷孔 nozzle

在喷油器头部壁面上开设，可使液体燃料喷射到环境中的通道。注：此通道的流入端为喷孔入口，流出端为喷孔出口。

3.6

喷油器入口 injector inlet

喷油器与高压油管连接处。

3.7

脉冲喷射 pulse injection

喷油器阀门处于间断性可控快速开启和关闭状态的喷射。

3.8

连续喷射 continually injection

喷油器阀门始终处于开启状态的喷射。

3.9

喷射信号脉宽 injection signal pulse width

在喷油器进行脉冲喷射时，喷油器接收到的执行单次喷射动作的脉冲信号持续时间。

3.10

喷射周期 injection period

从一个电子喷射脉宽的初始时刻，到下一个电子喷射脉宽的初始时刻的时间间隔。

3.11

喷射次数 injection numbers

在一次脉冲喷射测试过程中，喷油器喷射燃料的次数。

3.12

喷射压力 injection pressure

指喷油器内部液体燃料未喷射时所维持的压力，喷射压力测试点位于喷油器入口上游不大于100 mm处。

3.13

液滴直径 droplet diameter

指液体破碎雾化后产生的液滴的直径。

3.14

液滴速度 droplet velocity

指液体破碎雾化后产生的液滴的速度。

3.15

多普勒效应 Doppler effect

物体散射的波的频率因为物体和接收器的相对运动而产生变化的一种现象。

3.16

相位多普勒 Phase Doppler Analyzer—PDA

利用多普勒效应，同时测量液滴速度和粒径的一种方法

3.17

测量体 Probe volume

指相位多普勒测试系统中，多束激光交汇处所构成的测量空间。

3.18

测试位置 Probe position

指相位多普勒测试系统中，测量体的中心位于测量坐标系的坐标位置。

3.19

平均直径 (D_{10})

液滴群中所有的液滴直径之和除以液滴数量。

3.20

索特平均直径 (D_{32})

液滴群中所有的液滴直径的三次方之和与平方和之比。

3.21

体积分数直径 $DV_{0.1}$

液滴群中，直径小于 $DV_{0.1}$ 的液滴的体积之和占液滴总体积10%。

3.22

体积分数直径 $DV_{0.5}$

液滴群中，直径小于 $DV_{0.5}$ 的液滴的体积之和占液滴总体积50%。

3.23

体积分数直径 $DV_{0.9}$

液滴群中，直径小于 $DV_{0.9}$ 的液滴的体积之和占液滴总体积90%。

3.24

目标环境温度 target ambient temperature

试验时预设的环境温度。

3.25

目标环境压力 target ambient pressure

试验时预设的环境压力。

3.26

测试环境温度 ambient temperature in measurement

试验过程中的环境温度。

3.27

测试环境压力 ambient pressure in measurement

试验过程中的环境压力。

3.28

气体流动速度 gas flow speed

测试区域环境气体沿喷油器轴向的平均流动速度。

3.29

喷射速度 injection speed

液体从喷孔处射出时沿喷油器轴线的速度分量。

3.30

平均速度 mean velocity

速度的数学平均值，参与统计的液滴速度瞬时值之和除以液滴数量。

3.31

RMS速度 root mean square velocity

速度均方根值，参与统计的液滴速度瞬时值之平方和除以液滴数量后，再开平方。

3.32

速度湍流度 velocity turbulence intensity

参与统计的液滴速度瞬时值之标准差除以平均速度。

3.33

数据率 data rate

信号处理器每秒获得的有效数据的数量。

3.34

有效率 validation

信号处理器每秒获的有效数据的数量和原始数据的数量之比。

4 试验设备

4.1 试验平台示意图。

利用 PDA 对液体燃料雾化特性进行研究，试验平台如图 1 所示。激光由发射探头 1 发出并在喷雾 2 中交汇于一点形成测量体 4。液滴经过测量体散射的光信号由接收探头 3 收集，并传输至信号处理器 5，得到液滴的粒径和速度信息。通过软件对整套 PDA 系统进行参数设置，数据采集以及数据后处理。当测量脉冲喷射时，由同步控制系统 9 发出的信号触发 PDA 系统与喷油进行同步。喷油器 8 的喷射压力由增压泵 7 提供，并由同步控制系统 9 驱动，计算机 10 为操作端与数据存储设备。

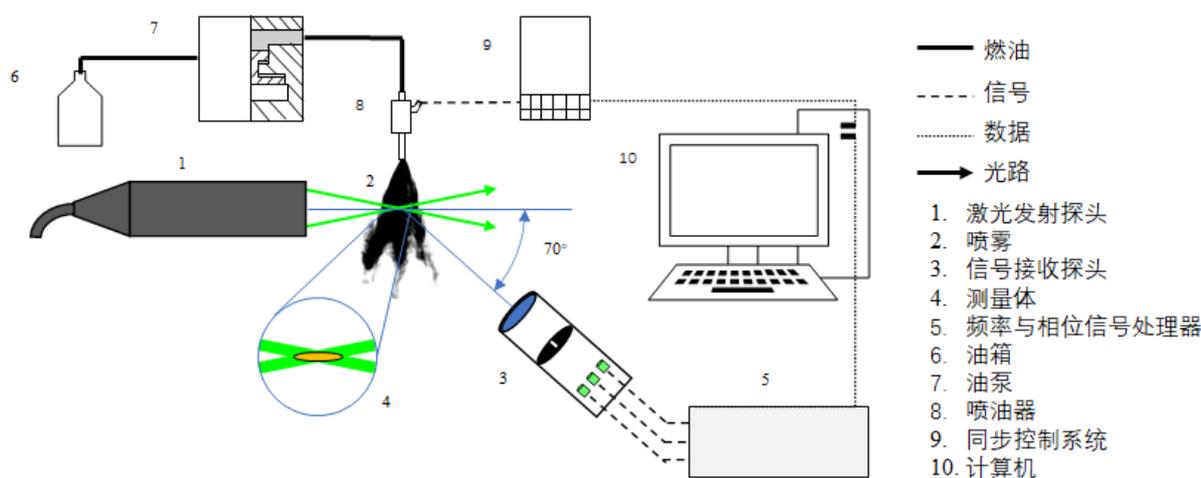


图 1 液体燃料雾化特性试验平台示意图

4.2 测试环境

当目标环境压力为常压时，可在开放环境平台上进行试验。否则应使用压力容器作为试验台。

4.2.1 开放环境平台，应在喷雾轴向方向安装导气装置，使得喷油器附近存在扫气流，如图 2 示意图所示。

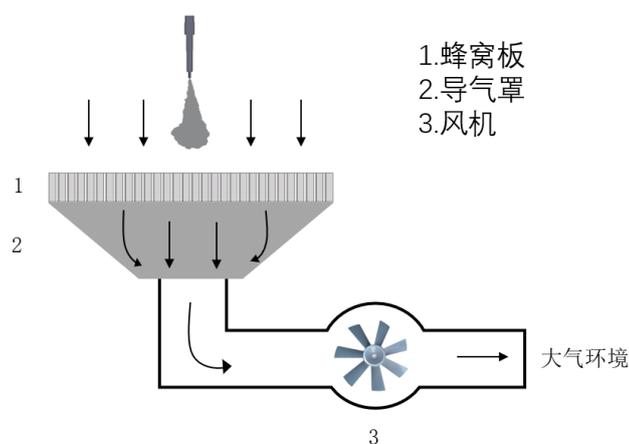


图2 开放环境平台示意图

图中，风机为测试提供持续的扫气流，蜂窝板和导气罩使得扫气流流速尽可能均匀分布。

4.2.2 压力容器内部环境压力可以根据试验要求进行调节，环境压力应小于压力容器允许的最高许用压力，许用压力由压力容器生产方提供。其四周至少需要安装如图3所示的两块光学观察视窗，相互之间呈 110° ，用于布置发射器和接收器。

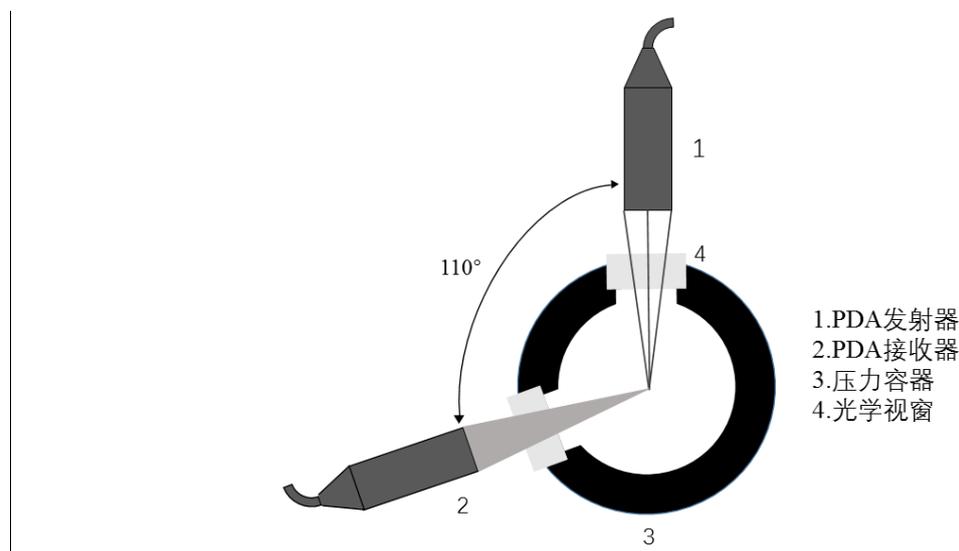


图3 压力容器平台示意图

4.2.3 压力容器应安装安全阀，当压力超出最高许用压力范围5%，安全阀自动开启泄压（恢复许用压力时间不大于30 s）。

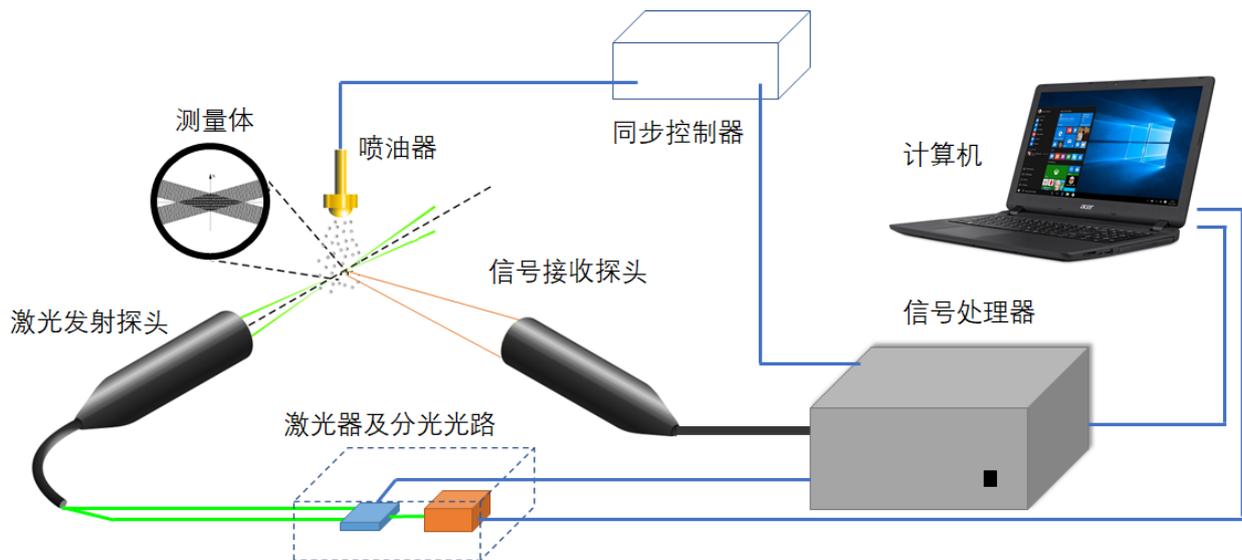
4.2.4 压力容器应具有紧急终止按钮，当操作人员触发紧急终止按钮，压力容器电磁阀开启进行泄压（压力降为常压时间不大于120 s），同时喷射系统停止工作。试验系统具有手动泄压开关，当紧急终止按钮失效时，可以手动执行上述泄压操作。

4.3 燃料喷射系统

燃料喷射时，可以采用油泵或者高压氮气来建立液体燃料喷射压力。高压氮气和液体燃料要分隔开，推荐使用皮囊式或者活塞式蓄能器，防止高压气体溶解到液体燃料中引起的试验误差。对于脉冲式喷射，在喷油器入口上游设置蓄压腔，其体积不小于500倍喷油器最大单次喷射体积，减少由于喷射引起的喷射压力波动。

4.4 PDA系统

PDA系统由激光器、激光发射探头、信号接收探头、光电转换器及信号处理器、软件和坐标架组成。激光器发出激光后，经过分光光路将每个波长的激光分为两束，通过光纤或反射镜进入激光发射探头，经过前置透镜交汇于一点形成测量体。液滴经过测量体散射的光信号由接收探头收集，在光电转换器内将光信号转变为电信号，进入信号处理器后，根据相位多普勒原理识别每个液滴的速度及粒径，并回传至计算机。



4.5 同步控制系统

可以通过同步控制系统驱动喷油器工作，控制喷射压力、喷射周期、喷射脉宽和喷射次数。同步控制系统除驱动喷油器工作之外，宜另设三路以上TTL信号，用于PDA等测试设备的同步和校验，且各信号相对于喷油器驱动信号的时间间隔和信号宽度可调。

5 试验条件

5.1 试验环境

5.1.1 当喷射特性试验在压力容器内进行时，使用氮气作为试验环境气体。在试验环境压力较高时，可使用高密度气体六氟化硫代替氮气来降低试验环境压力。

5.1.2 试验区域需要使用试验时的环境气体进行扫气，扫气时环境气体的流动速度为 v_g ，按式(1)计算

$$v_g = \frac{q}{3600A} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

v_g ——环境气体流动速度，单位为米每秒（m/s）；

q ——供气流量，单位为立方米每小时（m³/h）；

A ——试验区域面积，单位为平方米（m²）。

液体燃料喷射时喷射最大速度 v_m ，按式(2)计算

$$v_m = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- v_m ——液体燃料最大速度，单位为米每秒（m/s）；
- ΔP ——喷射压力与环境压力之差，单位为帕斯卡（Pa）；
- ρ ——液体燃料的密度，单位为千克每立方米（kg/m³）。

环境气体的流动速度 v_g 应不超过液体燃料喷射最大速度 v_m 的1%。

5.1.3 试验时环境温度应维持在目标环境温度±2.5%以内。

5.1.4 试验时环境压力应维持在目标环境压力±2.5%以内。

5.2 喷油器

喷油器正式试验前应进行清洗，喷油器以 50 ms 的喷射周期进行燃料喷射，喷射不小于 2000 次。

5.3 喷射控制参数

5.3.1 脉冲喷射时，电子喷射脉宽不小于 1.5 ms，且误差范围为±1%。

5.3.2 脉冲喷射时，喷射周期不小于 1000 ms，且误差范围为±1%。在此时间内，前一次喷射产生的液滴应全部运动到测试区域之外，不会对下一个喷射周期内喷射产生干扰。

5.3.3 试验时喷射压力应维持在目标值附近，且波动范围为不大于 5%。

6 试验步骤

6.1 布置安装喷射系统，标记喷嘴周向安装位置并记录其坐标位置。

6.2 PDA 系统调试

6.2.1 光学系统配置

设置发射探头、接收探头的口径、工作距离等。对于发动机这种具有较高液滴数量浓度的喷射，应尽可能选择更大口径和更短工作距离的激光发射探头，以及更高激光功率以确保测量效果；

6.2.2 激光功率调节

展开试验前，应确保激光功率进行合理优化，如逐步提高激光输出功率，检查并优化光纤耦合效率等。激光功率的选择应能满足对液滴群的穿透，穿透效果通过多个周期叠加的“喷油时刻-速度变化”曲线是否连贯进行评估；

6.2.3 PDA 仪器参数设置

根据 PDA 仪器自身特点及工作状态对仪器各参数进行合理设置,包括但不限于液体折射率、光电倍增管电压、以及不同待测位置的中心速度/频率或速度/频率范围等;

6.2.4 初步调节

在喷雾场中放置加湿器,通过连续稳定的产生液滴群对 PDA 系统信号接收探头的俯仰/旋转接收角度及聚焦效果进行优化,以获得最优的数据率及不低于 80%的有效率;

6.2.5 压力容器加压(如果需要)

加压后由于环境密度发生改变,需要通过喷油器进行液体燃料喷射,来进一步优化信号接收探头的俯仰/旋转接收角度及聚焦效果;

6.2.6 调试喷射控制参数

调试喷油器各项喷射控制参数,检查同步控制信号,确定液体燃料喷射系统和 PDA 系统间同步工作;

6.2.7 PDA 系统精细化调节

将测量体放置于喷孔轴线下游 40-80mm 处,使用之前设置的针对该位置的仪器参数进行实际数据采集。对于脉冲喷射测量,首先应通过改变发送至 PDA 系统的同步信号延时及脉宽,设置采集时刻仅覆盖整个喷油时刻中速度最高的部分,基于此触发信号检查此时采集到的多普勒信号波形,并通过改变信号接收探头的空间分辨狭缝/针孔,优化 PDA 系统的数据率、有效率、相位图有效性,确认可以获得有效的数据;继续改变发送至 PDA 系统的同步信号延时及脉宽,设置采集时刻覆盖整个喷油时刻,并适当延长 2-4ms,确保可以接收完整的喷油液滴通过测量体时的信号变化,采集约 50-100 次喷油循环,通过软件采集到的数据,确认可以获得高浓度液滴团通过时的液滴信息。

6.3 在软件中设置将每次喷油起始时刻对齐进行数据整理,将每次喷油过程细分为 100-200 个数据组,获得随喷油时刻时间历程的组平均速度及粒径变化曲线。

6.4 将测量体移至测量点,测量点应离喷孔出口处一定距离,避免液滴过于浓密而影响测试结果,对于密集型喷雾,此距离一般应 $\geq 40\text{mm}$;为确保测试数据具有统计意义及较高可信度,应能获得连续变化的速度-喷油时刻时间历程曲线。典型数据采集应不少于 100 次喷油循环。对于极高浓度喷雾工况,可以提高至 1000 次喷油循环。

6.5 记录试验相关参数,确定数据有效性,进行下一个测量位置的测试。

7 数据处理

7.1 对获取的原始数据进行进一步处理,获得液滴速度及粒径的统计结果,例如平均速度, RMS 速度,湍流度; D_{10} 、 D_{32} 、 $DV_{0.1}$ 、 $DV_{0.5}$ 、 $DV_{0.9}$ 等。

7.2 输出液滴速度、直径、直径分布图谱、平均速度和平均直径等信息。如使用坐标架进行全场扫描式采集时,还可以输出速度矢量图,各种粒径统计结果分布图等空间图谱。

8 试验报告

试验报告所需内容如下:

- a) 通用部分
 - 测试项目名称;
 - 测试时间;
 - 测试人员;
 - 测试地点;
 - b) 喷油器
 - 喷油器厂商、型号;
 - 喷孔直径;
 - c) PDA系统
 - 激光器厂商、型号、序列号;
 - PDA系统厂商、型号;
 - 激光发射探头型号、焦距;
 - 信号接收探头型号、焦距;
 - 激光器输出功率;
 - 空间滤波狭缝大小;
 - 各通道光电倍增管电压;
 - 测量点坐标位置;
 - d) 试验条件
 - 液体燃料名称及其折射率;
 - 气体介质;
 - 环境温度;
 - 环境压力;
 - 液体燃料喷射压力;
 - 液体燃料温度;
 - 喷油器温度;
 - 喷射脉宽;
 - 喷射周期;
 - 喷射次数;
 - e) 试验结果
 - 液滴尺寸分析;
 - 液滴速度分析;
- 试验报告格式参见附录A。

附录 A
(资料性)
试验报告格式

表A.1 试验报告

液体燃料喷射特性测试报告			
第一部分：通用部分			
测试项目名称		测试时间	
测试人员		测试地点	
第二部分：喷油器			
喷油器厂商、型号		喷孔直径 (mm)	
第三部分：PDA 系统			
激光器厂商、型号、序列号		PDA 系统厂商、型号	
激光发射探头型号、焦距		信号接收探头型号、焦距	
激光器输出功率 (kW)		空间滤波狭缝 (μm)	
光电倍增管电源		发射器和接收器夹角 ($^{\circ}$)	
测量点坐标			
第四部分：试验条件			
液体燃料名称		气体介质	
液体燃料折射率		环境温度 ($^{\circ}\text{C}$)	
环境压力 (MPa)		液体燃料喷射压力 (MPa)	
液体燃料温度 ($^{\circ}\text{C}$)		喷油器温度 ($^{\circ}\text{C}$)	
喷射脉宽 (ms)		喷射周期 (ms)	
喷射次数		喷油器轴线方向	
第五部分：试验结果			
序号	测试点坐标位置	保存文件名	
1			
2			
3			
4			
5			
6			
.....			
第六部分：签字			
记录人签字		日期	
审核人签字		日期	
备注：			