

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燃料雾化特性 测试方法

Test method 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

(送审讨论稿)

— XX — XX 发布

XXXX — XX — XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 PDA 测试原理	3
5 测试设备	5
5.1 液体燃料雾化特性测试系统	5
5.2 测试环境	5
5.3 燃料喷射系统	6
5.4 PDA 系统	6
5.5 同步控制系统	6
6 测试条件	6
7 测试步骤	6
7.1 布置安装测试设备	7
7.2 PDA 系统调试	7
7.3 容器加压	7
7.4 调试喷射控制参数	7
7.5 PDA 系统精细化调节	7
7.6 喷油循环现象分析	7
7.7 正式测试	8
7.8 记录数据	8
8 数据处理	8
9 测试记录	8
附录 A	9
参考文献	10

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）提出并归口。

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。

基于相位多普勒技术的液体燃料雾化特性测试方法

1 范围

本文件规定了采用相位多普勒技术进行液体燃料雾化特性测试的测试设备、测试条件、测试步骤，明确了数据处理和测试记录的要求。

本文件适用于液体燃料雾化特性的测试。

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

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，包括液滴速度、液滴直径。

3.2

液滴直径 droplet diameter

液体破碎雾化后产生的液滴的直径。

3.3

液滴速度 droplet velocity

液体破碎雾化后产生的液滴的速度。

3.4

多普勒效应 Doppler effect

波源和观察者作相对运动时，观察者接收到的频率和波源发出的频率不同的现象。

3.5

相位多普勒 phase Doppler analyzer (PDA)

利用多普勒效应，同时测试液滴速度和液滴直径的一种方法。

3.6

测量体 probe volume

相位多普勒测试系统中，多束激光交汇处所形成的测试空间。

3.7

多普勒脉冲信号 Doppler burst signal

运动液滴经过测量体时，散射出高斯形态的周期性变化的光信号。

3.8

多普勒频率 Doppler frequency

运动液滴散射光的频率与原始入射激光频率之差。

3.9

测试位置 probe position

相位多普勒测试系统中，测量体的中心位于测试坐标系的坐标位置。

3.10

平均直径 (D_{10}) mean diameter

采集到的液滴直径之和除以液滴数量。 D_{10} 的计算公式为：

$$D_{10} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i$$

式中：

N ——采集到的液滴数量；

D ——采集到的液滴直径。

3.11

索特平均直径 (D_{32}) Sauter mean diameter

采集到的液滴直径的三次方之和与平方和之比。 D_{32} 的计算公式为：

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^2}$$

式中：

N ——采集到的液滴数量；

D ——采集到的液滴直径。

3.12

体积分数直径 ($D_{V0.1}$) fractional volume diameter ($D_{V0.1}$)

采集的液滴中，液滴直径小于 $D_{V0.1}$ 的液滴的体积之和占液滴总体积10%。 $D_{V0.1}$ 的计算公式为：

$$Q_3(D_{V0.1}) = 0.1$$

式中：

Q_3 ——体积分布的累积函数。

3.13

体积分数直径 ($D_{V0.5}$) fractional volume diameter ($D_{V0.5}$)

采集的液滴中，液滴直径小于 $D_{V0.5}$ 的液滴的体积之和占液滴总体积50%。 $D_{V0.5}$ 的计算公式为：

$$Q_3(D_{V0.5}) = 0.5$$

式中：

Q_3 ——体积分布的累积函数。

3.14

体积分数直径 ($D_{V0.9}$) fractional volume diameter ($D_{V0.9}$)

采集的液滴中，液滴直径小于 $D_{V0.9}$ 的液滴的体积之和占液滴总体积90%。 $D_{V0.9}$ 的计算公式为：

$$Q_3(D_{V0.9}) = 0.9$$

式中：

Q_3 ——体积分布的累积函数。

3.15

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。

3.16

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。

3.17

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。

3.18

数据率 data rate

信号处理器每秒获得的有效数据的数量。

3.19

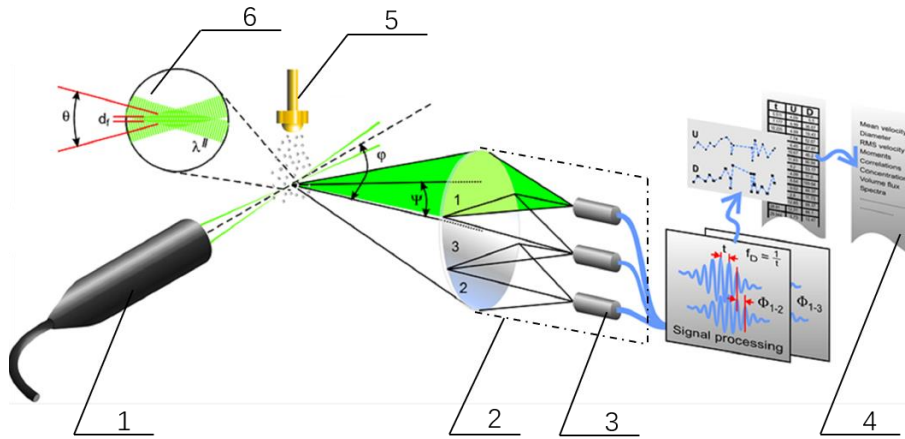
有效率 validation

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 PDA 测试原理

PDA是一种基于多普勒效应的、可用来同时测量液滴速度和直径的光学技术。PDA测试原理示意图如图1所示，激光发射探头发射两束激光，为了判断液滴速度的方向，两束激光的频率并不相同，频率较低的激光称为非频移激光，频率较高的激光称为频移激光，由于频差对波长的影响较小，波长的变化基本可以忽略。两束激光交汇于一点形成测量体，由于两束激光相干，在测量体处产生明暗相间的滚动干涉条纹。由于干涉条纹的存在，液滴经过测量体时，其散射光的光强发生周期性变化。光电探测器接收

到散射光信号后将其转换为多普勒脉冲信号，其频率与液滴速度相关，多个光电检测器接收到的多普勒脉冲信号之间的相位差与液滴直径相关。



标引序号说明：

- 1——激光发射探头；
- 2——信号接收探头；
- 3——光电检测器；
- 4——数据分析；
- 5——喷油器；
- 6——测量体。

图 1 PDA 测试原理示意图

定义两束入射激光所构成的平面为激光平面。通过入射激光相交的锐角平分线并与激光平面相垂直的平面为散射平面。液滴的速度U，其方向垂直于散射平面，正向由激光发射探头出口位置处非频移激光指向频移激光，液滴速度按式（1）计算：

$$U = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} f_D \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- U——液滴速度；
- λ——入射激光波长；
- θ——入射激光相交的锐角；
- f_D——多普勒频率。

处于不同空间位置的光电检测器接收的多普勒脉冲信号存在相位差，根据相位差就可以直接测出液滴直径。光电检测器接收到的多普勒脉冲信号的相位按式（2）计算：

$$\Phi_i = \frac{\pi}{\lambda} D \beta_i \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- Φ_i——多普勒脉冲信号的相位；
- λ——入射激光波长；
- D——液滴直径；
- β_i——几何因子。

几何因子 β_i 取决于散射模式、液滴和空气之间的相对折射率 n_{rel} 和三个角度，散射模式包括：液滴外表面的反射、通过液滴的折射（一阶折射）和一次内反射的折射（二阶折射）；三个角度 θ 、 φ 和 ψ 的定义如图1所示。激光发射探头与信号接收探头各自轴线布置在散射平面内，且均指向测量体中心，信号接收探头内光电检测器按照竖直方向排列。 φ 是信号接收探头轴线与激光发射探头轴线正向的夹角， ψ 是光电检测器与测量体中心连线的夹角。

两个光电检测器*i*和*j*接收的多普勒脉冲信号的相位差 Φ_{ij} 按式（3）计算：

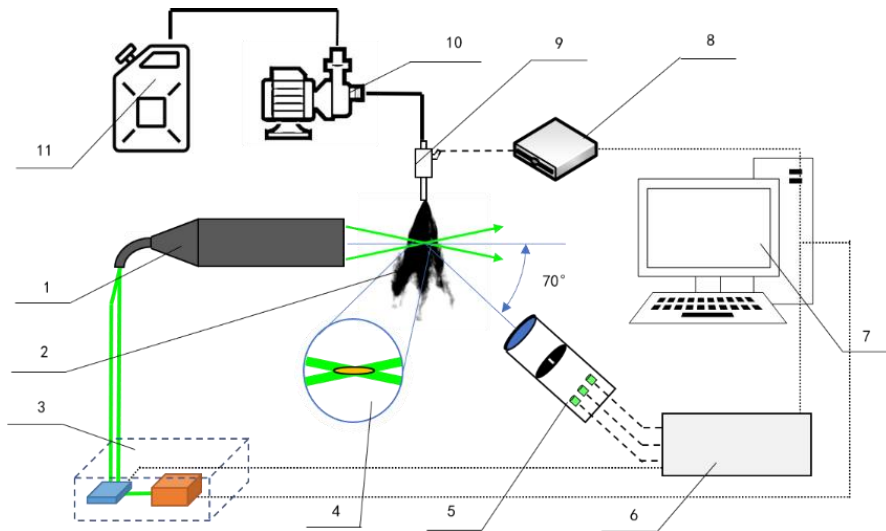
$$\Phi_{ij} = \Phi_j - \Phi_i = \frac{\pi}{\lambda} D \times (\beta_j - \beta_i) \dots\dots\dots (3)$$

由式（3）可知，液滴直径和相位差之间存在线性关系，因此根据相位差即可计算液滴直径。

5 测试设备

5.1 液体燃料雾化特性测试系统

利用PDA对液体燃料雾化特性进行研究，测试平台如图2所示。激光由发射探头发射并在雾束中交汇于一点形成测量体。液滴经过测量体散射的光信号由信号接收探头收集，并传输至信号处理器，得到液滴直径和液滴速度信息。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。当测试间断喷射时，由同步控制系统发出的信号触发PDA系统与喷油进行同步。喷油器的喷射压力由加压装置提供，并由同步控制系统驱动，计算机为操作端与数据存储设备。



标引序号说明：

- | | | | |
|-----------|----------|-------------|-----------|
| 1—激光发射探头； | 2—喷雾； | 3—激光器及分光光路； | 4—测量体； |
| 5—信号接收探头； | 6—信号处理器； | 7—计算机； | 8—同步控制系统； |
| 9—喷油器； | 10—加压装置； | 11—油箱。 | |

图 2 液体燃料雾化特性测试系统示意图

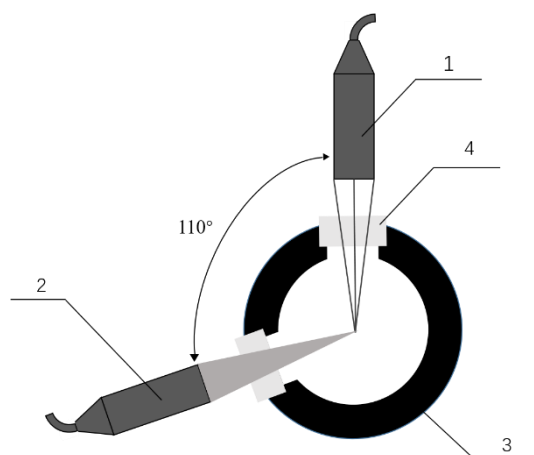
5.2 测试环境

5.2.1 开放环境

可参考《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》中4.2.1规定的内容。

5.2.2 受限环境

受限环境如图3所示，容器内部环境压力和环境温度可以根据测试要求进行调节，环境压力应小于容器最高允许工作压力。其四周需要至少安装两块光学观察视窗，相互之间呈 110° ，用于布置发射器和接收器。



标引序号说明：

1——PDA 发射器； 2——PDA 接收器； 3——容器； 4——光学视窗。

图 3 受限环境示意图

5.3 燃料喷射系统

可参考《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》中4.2.1规定的内容。

5.4 PDA 系统

PDA系统参考图2所示，来自激光器发出的激光，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信号接收探头收集，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液滴速度和液滴直径，并回传至计算机。

5.5 同步控制系统

同步控制系统用于控制喷油器、PDA等测试设备的工作时序。

6 测试条件

可参考《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》中第5章确立的测试条件。

7 测试步骤

7.1 布置安装测试设备

布置安装燃料喷射系统、PDA系统，同时标记喷嘴周向安装位置并记录其坐标位置。

7.2 PDA 系统调试

7.2.1 光学系统配置

设置发射探头、接收探头的口径、工作距离等。对于发动机等具有较高液滴数量浓度的喷射，宜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试效果。

7.2.2 激光功率调节

展开测试前，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。

7.2.3 PDA 仪器参数设置

在软件中输入待测液体燃料的折射率，根据接收探头的接收角在软件中设置相应的散射角度及散射光模式。

7.2.4 初步调节

在喷雾场中放置加湿器，在软件中设置速度范围使其覆盖实际待测对象的速度范围，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。

7.3 容器加压

若需要测试高压环境中液体燃料雾化特性，则需要在受限环境中加压测试。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。

7.4 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。

7.5 PDA 系统精细化调节

将测量体放置于喷油嘴孔轴线下游（40mm~80mm处），在软件中设置速度范围使其覆盖实际待测对象的速度范围，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。对于间断喷射测试，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，以确认可以获得有效数据为优化依据；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（2ms~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。

7.6 喷油循环现象分析

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各组平均速度及平均直径变化曲线。

7.7 正式测试

将测量体移至测试点，测试点应离喷油嘴孔出口处一定距离，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。

7.8 记录数据

记录测试相关参数，确定数据完整无损，保存数据，然后进行下一个测试位置的测试。

8 数据处理

对获取的原始数据进行进一步处理，获得液滴速度及液滴直径的统计结果，包括平均速度、RMS速度、速度湍流度、 D_{10} 、 D_{32} 、 $D_{V0.1}$ 、 $D_{V0.5}$ 、 $D_{V0.9}$ 等。

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，还可以输出空间图谱，包括速度矢量图、液滴直径统计结果分布图等。

9 测试记录

所需记录内容如下：

- a) 通用部分，包括测试项目名称、时间、人员、地点。
- b) 喷油器厂商、型号、喷油嘴孔直径。
- c) PDA系统各部件信号、参数
- d) 测试条件
- e) 测试原始数据文件

测试记录格式参见附录A。

附录 A
(资料性)
测试记录格式

表A.1 测试记录

液体燃料喷射特性测试记录			
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		喷油嘴孔直径/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	
光电倍增管电压		发射器和接收器夹角/ $^{\circ}$	
测试点坐标			
第四部分：测试条件			
液体燃料种类		环境气体种类	
液体燃料折射率		环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	
环境压力/MPa		喷油器工作压力/MPa	
油箱燃料温度/ $^{\circ}\text{C}$		喷油器燃料温度/ $^{\circ}\text{C}$	
脉冲信号宽度/ms		喷射周期/ms	
通风流量/供气流量/ m^3/h		蜂窝板孔总截面面积/ m^2	
气流运动方向的容器横截面面积/ m^2		液体燃料密度/ kg/m^3	
第五部分：测试原始数据文件			
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：			

参 考 文 献

- [1] 《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》