



中华人民共和国国家标准

GB/TXXXXX—XXXX

基于背光成像技术的液体燃料喷射特性 测试方法

The test method for liquid fuel injection using back-lit imaging

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(送审稿)

(本草案完成时间：202107)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-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

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：

本文件主要起草人：

基于背光成像技术的液体燃料喷射特性 测试方法

1 范围

本文件规定了在以液体为燃料的燃烧装置中,采用背光成像技术进行液体燃料喷射特性测试的术语和定义、试验设备、试验条件、试验步骤、试验结果和试验报告的要求。

本文件适用于各种喷射液体燃料的燃烧装置的设计和试验,如活塞式发动机、燃气轮机和燃烧器。

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

可雾化蒸发并与空气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气体介质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气体介质中的过程。

3.4

喷射特性 spray characteristics

用来表征液体燃料喷射后形成雾束的宏观特征参数,如喷雾贯穿距离和喷雾锥角。

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气体介质中的通道。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 pulsed 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100mm处。

3.13

雾束 spray plume

液体燃料从喷油器射出后，形成的由液柱、液滴、蒸汽和环境气体组成的多相混合物。

3.14

雾束外包络线 spray contour

在获取的二维雾束图像上，用于将雾束与环境气体区分的曲线。

3.15

喷雾贯穿距离 spraypenetration

喷射过程中某一时刻，喷油器参考点（如喷孔出口端面中心点）和雾束外包络线各点之间的连线，在喷油器轴线上投影的最大值。

3.16

喷雾锥角 spray angle

喷射过程中某一时刻，过喷油器轴线上的参考点（如喷雾贯穿距离1/2处）做垂线，和雾束外包络线在雾束两侧的交点与喷油器参考点（如喷孔出口端面中心）形成的夹角。

3.17

背光成像 back-lit imaging

被测物体在光源和相机之间，被测物体遮挡光源发射的光线进行成像的一种方法。

3.18

目标环境温度 target ambient temperature

试验时预设的环境气体温度。

3.19

目标环境压力 target ambient pressure

试验时预设的环境气体压力。

3.20

气体流动速度 gas flow speed

测试区域环境气体沿喷油器轴向上的平均流动速度。

3.21

喷射速度 injection speed

液体燃料从喷孔处射出时沿喷油器轴线的速度分量。

3.22

阈值 threshold

一个用来将图像进行二值化处理的像素强度值。将像素强度大于阈值的像素强度设置为1，小于阈值的像素强度设置为0。

4 试验设备

4.1 液体燃料喷射特性试验平台

液体燃料喷射特性试验平台示意图如图1所示。

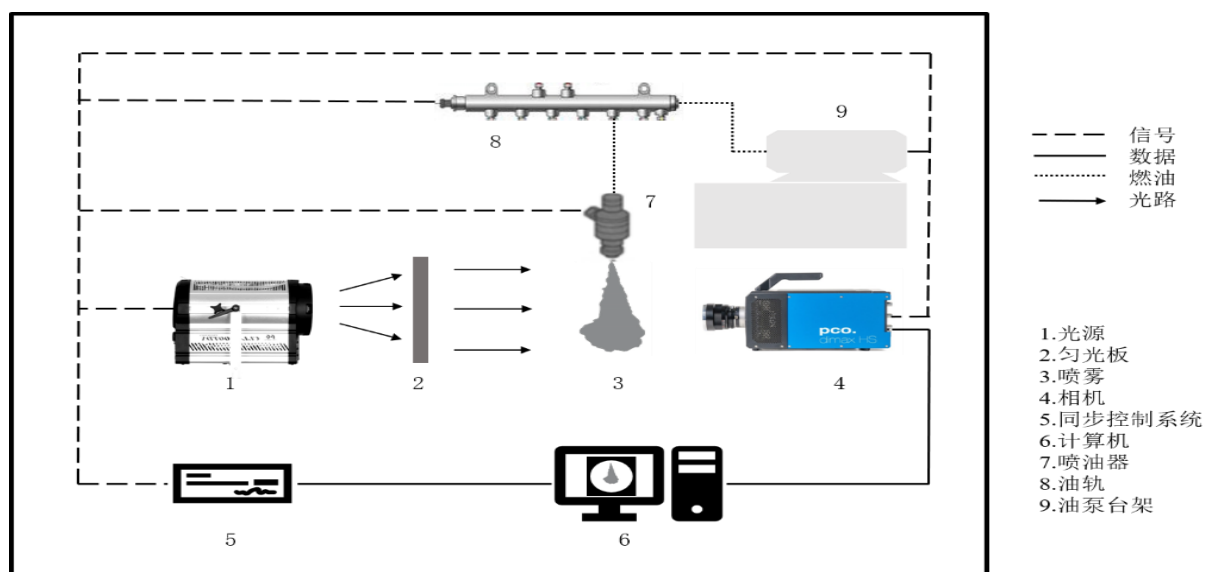


图1 液体燃料喷射特性试验平台示意图

^a 图中，光源和匀光板为测试提供了均匀的背景光，相机作为喷雾图像采集设备；油泵台架和油轨为喷雾器喷射提供稳定的喷射压力；各设备间可通过同步控制系统进行时序，计算机作为操作端和数据存储设备。

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，使得喷雾器附近存在扫气流，如图 2 示意图所示。

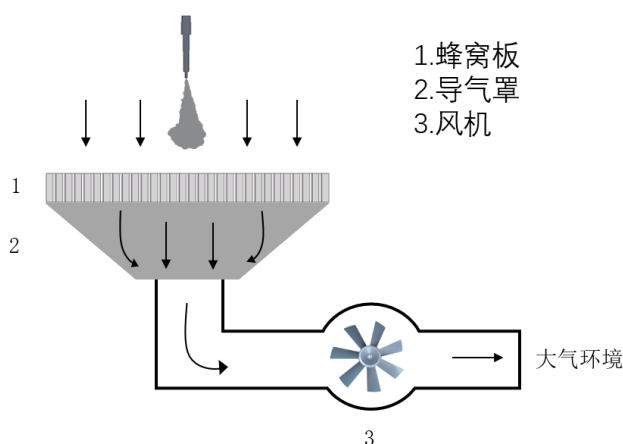


图2 开放环境平台示意图

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。其四周至少需要对置安装两块光学观察视窗，用于布置光源和相机，如图 3 示意图所示。

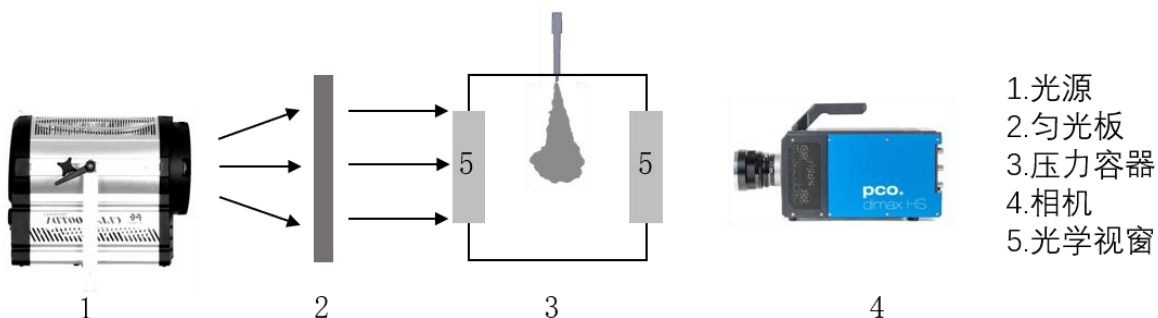


图3 压力容器平台示意图

图中，光源发射的光线经过匀光板后形成均匀的背景光，透过压力容器侧面的光学视窗后被喷雾遮挡，继而相机捕获喷雾图像。

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 图像采集系统

液体燃料喷射特性测试方法基于背光成像技术，背光成像技术原理示意图如图 4 所示。背光成像系统主要由照明光源、匀光板和相机构成。

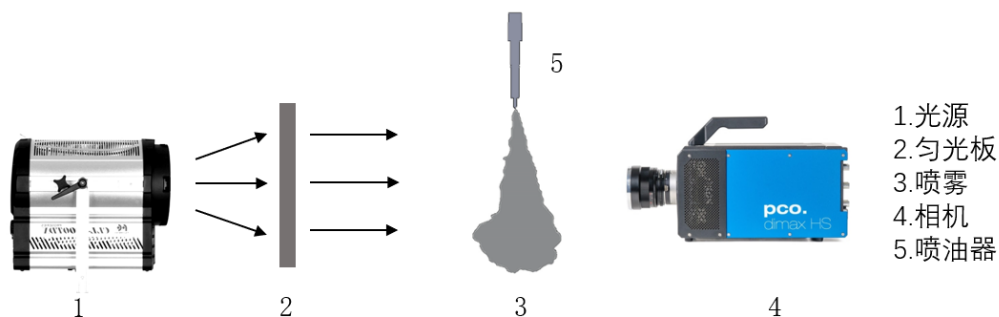


图4 背光成像技术原理示意图

4.4.1 背光成像法使用的照明光源为连续光源如镝灯、氙灯等，或者脉冲光源如频闪 LED 灯，经过匀光板形成亮度均匀的背景光。

4.4.2 图像采集设备为单色或者彩色相机，在喷射特性试验时，应采用高速相机，得到雾束随时间的发展变化图像。在喷油器轴线方向上，相机分辨率不小于 512 像素，在与喷油器轴线垂直方向上，分辨率不小于 256 像素，相机动态范围不小于 8 bit。

4.4.3 相机光轴方向与匀光板通光方向平行。

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。此外，同步控制系统应具有使得相机、光源等测试设备同步工作的功能，用于记录喷射图像。

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%）。

5.1.4 试验时环境压力应维持在目标环境压力（±2.5%）

5.2 燃料

5.2.1 试验时燃料温度应维持稳定，并低于试验环境压力下的沸点。

5.3 喷油器

5.3.1 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。

5.4 喷射控制参数

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

5.4.2 脉冲喷射时，喷射周期不小于 1000 ms，且误差范围为 $\pm 1\%$ 。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。

5.4.3 试验时喷射压力应维持在目标值，且误差范围为 $\pm 5\%$ 。

5.4.4 脉冲喷射时，喷射次数不小于 5 次。

6 试验步骤

6.1 布置安装燃料喷射系统、图像采集系统和同步控制系统，确保各系统能够正常工作。

6.2 调整拍摄区域，使获取的拍摄区域能够包含喷射特征区域。

6.3 调整光源镜头和相机参数。在满足分辨率和景深的前提下，应尽可能使用大光圈增加通光量，提高拍摄速度和减少曝光时间，来获得液体燃料颗粒清晰的运动图像，且背景亮度强度值不大于相机最大亮度的 75%。

6.4 拍摄一张比例尺图像，确定图像和实物的比例放大关系。

6.5 按要求调试各喷射控制参数，检查同步控制信号，确定液体燃料喷射系统和图像采集系统间可以同步工作。

6.6 若在开放环境中进行试验，当液体燃料的温度、压力和扫气流速且满足要求时，可进行燃料喷射，同时相机对雾束进行记录；若在压力容器中进行试验，待金属容器内环境气体的温度、压力都稳定在目标值，液体燃料的温度、压力和扫气流速均满足要求时，液体燃料喷射，相机对喷射雾束进行记录。

6.7 记录试验相关参数，确定数据有效性，保存试验数据，并检查视窗、镜头等光学元器件是否需要清洁。

6.8 根据试验要求重复试验或者进行下一工况点的试验。

7 实验结果

7.1 对获取图像进行数字图像处理，包括去背景、去噪声、二值化和边界识别，根据定义获取喷雾的贯穿距离和喷雾锥角信息。

7.1.1 喷雾贯穿距离和喷雾锥角

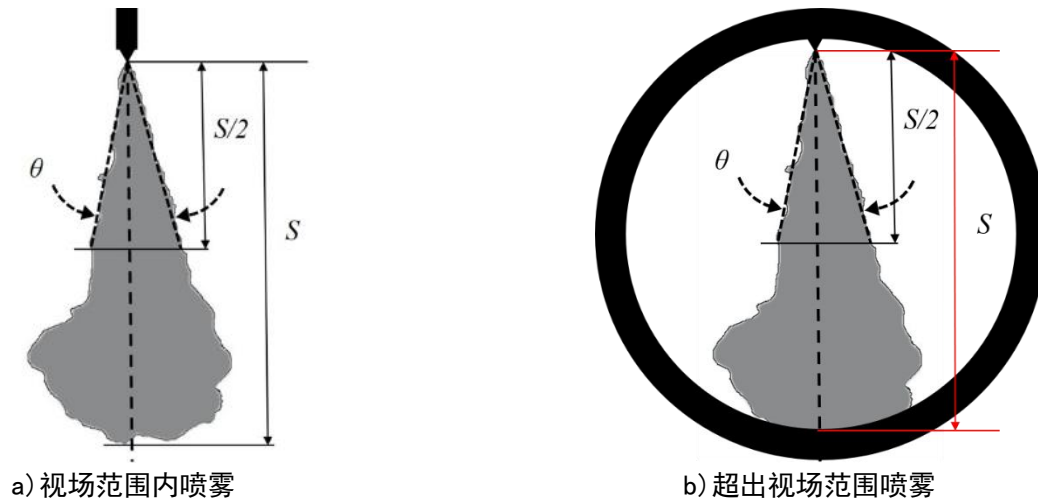


图5 喷雾贯穿距离和喷雾锥角示意图

喷雾贯穿距离 S 为喷油器参考点（如喷孔出口端面中心）和雾束外包络线各点之间的连线，在喷油器轴线上投影的最大值（如图 5a 所示）；对于喷雾未超出视窗范围（如图 5a 所示），采用喷油器轴线上过喷雾贯穿距离 $1/2$ 处的垂线与雾束外包络线的两个交点，与喷油器参考点（如喷孔出口端面中心点）形成的夹角 θ 为喷雾锥角。对于喷雾超出视窗范围（如图 5b 所示），采用喷油器轴线上过可见雾束的喷雾贯穿距离 $1/2$ 处的垂线与雾束外包络线的两个交点，与喷油器参考点（如喷孔出口端面中心点）形成的夹角 θ 为喷雾锥角。

7.1.2 在获取的喷雾图像序列中，将首次出现喷雾信号的前一张图像作为背景图像（如图 6a 所示）。

7.1.3 用喷雾图像（如图 6b 所示）减去背景图像（如图 6a 所示），可以获取到去背景后图像（如图 6c 所示）。

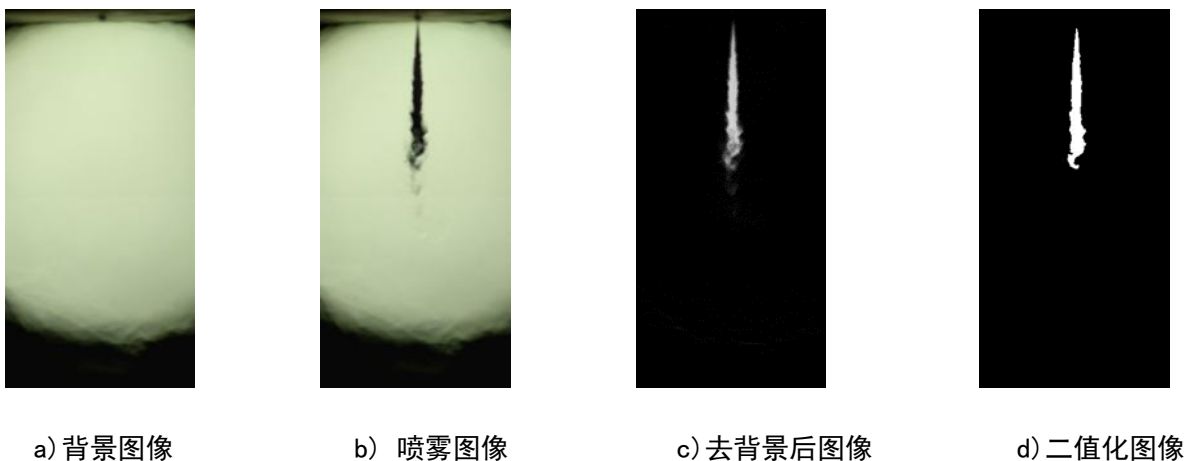


图6 喷雾图像处理

7.1.4 对去背景后的图像序列使用 otsu 方法计算阈值，otsu 方法原理如下。

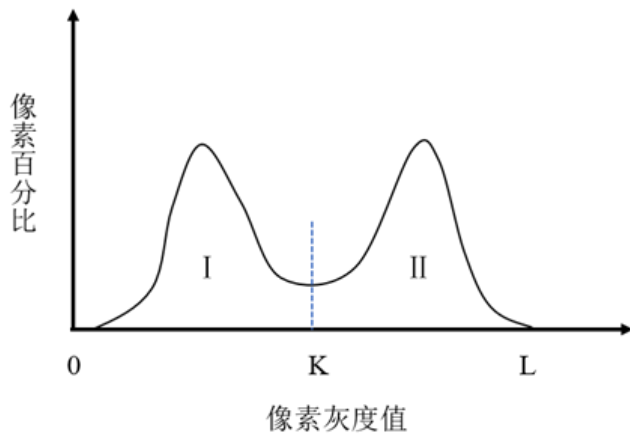


图7 像素灰度直方图示意图

如图7所示，在图像的灰度直方图中，阈值 k 将图像灰度分为了两个区域（前景区域和背景区域），图像灰度分别是 $(1, 2, \dots, K)$ 和 $(K + 1, K + 2, \dots, L)$ ，相应的百分比分别是 (p_1, p_2, \dots, p_K) 和 $(p_{K+1}, p_{K+2}, \dots, p_L)$ 。

图像平均灰度 μ_T 由式（3）确定

$$\mu_T = \mu(L) = \sum_{i=1}^L (i * p_i) \dots\dots\dots (3)$$

区域 I 的平均灰度 μ_I 由式（4）确定

$$\mu_I = \sum_{i=1}^L (i * p_i / \omega_I) \dots\dots\dots (4)$$

式（4）中， ω_I 为区域 I 的像素百分比之和，由式（5）确定

$$\omega_I = \sum_{i=1}^K p_i \dots\dots\dots (5)$$

区域 II 的平均灰度 μ_{II} 由式（6）确定

$$\mu_{II} = \sum_{i=K+1}^L (i * p_i / \omega_{II}) \dots\dots\dots (6)$$

式(6)中, ω_{II} 为区域II的像素百分比之和, 由式(7)确定

$$\omega_{II} = \sum_{i=K+1}^L p_i \quad \dots\dots\dots(7)$$

当类间方差 σ_B^2 最大时, 有最佳阈值 K , σ_B^2 由式(8)确定

$$\sigma_B^2 = \omega_I * (\mu_I - \mu_T)^2 + \omega_{II} * (\mu_{II} - \mu_T)^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

基于 matlab 的喷雾图像二值化代码参见附录 B。

7.1.5 使用阈值进行图像二值化, 图像强度值高于阈值的像素强度设置为 1, 低于阈值的像素强度设置为 0, 根据得到的二值化图像(如图 6d 所示)确定喷雾的外包络线。

7.1.6 在二值化图像上计算喷雾贯穿距离和喷雾锥角。脉冲喷射时, 喷雾贯穿距离和喷雾锥角按照图 5(a) 计算即可。连续喷射时, 可以采用长脉冲喷射中的喷射稳定期来模拟。这种情况下, 当喷雾图像未超出视场范围, 则喷雾贯穿距离和喷雾锥角仍按照图 5(a) 计算; 若喷雾超出视场范围, 则喷雾贯穿距离和喷雾锥角按照图 5(b) 计算。

7.2 获取此工况下的喷雾贯穿距离和喷雾锥角随时间变化的平均值、标准方差、最大值、最小值等信息, 并绘制喷雾贯穿距离和喷雾锥角随时间变化的曲线。

8 试验报告

8.1 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) 相机和照明光源
 - 相机厂商、型号;
 - 镜头厂商、型号;
 - 拍摄速度;
 - 拍摄分辨率;
 - 曝光时间;
 - 光圈值;
 - 放大倍率;

- 照明光源厂商、型号；
 - 照明功率；
 - d) 试验条件
 - 液体燃料；
 - 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
 - 喷雾贯穿距离随时间变化的曲线；
 - 喷雾锥角随时间变化的曲线；
- 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：相机和照明光源			
相机厂商、型号		镜头厂商、型号	
拍摄速度 (fps)		拍摄分辨率 (pixel×pixel)	
曝光时间 (μ s)		光圈值	
放大倍率 (μ m/pixel)		照明光源厂商型号	
照明功率 (W)			
第四部分：试验条件			
液体燃料		气体介质	
环境温度 (°C)		环境压力 (MPa)	
液体燃料喷射压力 (MPa)		液体燃料温度 (°C)	
喷油器温度 (°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			
脉冲喷射			
喷雾贯穿距离随时间变化的曲线		喷雾锥角随时间变化的曲线	

连续喷射			
喷雾锥角随时间变化曲线			
记录人签字		日期	
审核人签字		日期	
<p>注：</p> <p>(1) 用实际喷射后的时间 (After start of injection) 来表示不同时刻，记作 ASOI，单位 ms 或者 s。</p> <p>(2) 曲线图中的喷雾贯穿距离和喷雾锥角应是多次试验的平均值，且应同时标注方差值表示误差。</p>			

附 录 B
(资料性)
喷雾图像处理代码

基于 matlab 的喷雾图像二值化代码如下：

```
image_a=imread(path1); %读取需要处理的喷雾图像，“path1”为图像路径
image_b=imread(path2); %读取背景图像，“path2”为图像路径
image_a=rgb2gray(image_a); %将图像转化为灰度图
image_b=rgb2gray(image_b); %将图像转化为灰度图
image_c=image_a-image_b; %喷雾图像减去背景图像
image_c=medfilt2(image_c,[3,3]); %中值滤波，去除噪声
level=graythresh(image_c); %使用 otsu 方法计算图像阈值
image_d=imbinarize(image_c,level); %图像二值化
image_contour=edge(image_d,'sobel'); %获取喷雾轮廓
```
