

**全国燃烧节能净化标准化技术委员会  
(SAC/TC441)**

**国家标准**

**《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》**

**(送审稿) 编制说明**

**标准编写工作组**

**2021 年07月**

## 一、工作简况

### 1、任务来源及意义

液体燃料燃烧装置广泛应用于工业、农业和交通运输等领域，通常使用喷嘴将高压液体燃料喷射入高温空气中进行雾化、混合和燃烧。液体燃料喷射的宏观特性如喷雾贯穿距离、喷雾锥角等，对液体燃料在燃烧装置中的分布和输运、混合气形成和燃烧排放具有重要影响，是评估喷嘴性能、标定仿真模型的重要参数。因此如何科学评价液体燃料的喷射特性，是燃烧系统开发的关键。

随着我国民族工业的崛起和智能制造的发展，行业内对液体燃料喷射特性测试的需求日益增加，但目前尚缺乏相关统一标准来进行规范，并评估数据可信度。不同的厂家和研究机构自行搭建试验平台，采用不同测试方法进行测试，这不仅导致时间和金钱成本的增加，而且测试结果缺乏重复性和溯源性，不利于不同单位的数据交换共享和评估。

背光成像法具有系统简单、操作方便等特点，并具有很好的测试精度，在喷雾测试领域得到广泛应用。因为目前国内外尚无同类标准，为满足行业对液体燃料喷射特性的标准测试方法的需求，由北京理工大学、合肥顺昌分布式能源综合应用技术有限公司、苏州安鸿泰新材料有限公司、安徽翰翔仪器设备有限公司、上海交通大学、安徽省凤形耐磨材料股份有限公司、安徽省质量和标准化研究院、安徽省特种设备检测院、浙江大学、华中科技大学、大连理工大学、中国科学技术大学、清华大学等单位提出编制《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》国家标准的建议，以期通过规范背光成像技术在喷射特性测试过程中的相关术语，明确表征喷射特性的关键参数，制定标准试验条件，测试流程和数据分析规范，提高测试精度，对液体燃

料喷射宏观特性进行科学、准确、有效的评价，为喷嘴性能评估、仿真模型标定和燃烧系统设计提供数据支持。同时通过规范喷射特性测试方法，可以提高数据的重复性和比较性，以此为基础，建设面向行业的标准数据库，为不同研究机构和制造厂家之间数据交换共享、装置性能评估、燃烧系统开发提供支持。

经国标委发【2019】40号文件“国家标准化管理委员会关于下达2019年第四批推荐性国家标准计划通知”批准，项目《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》（序号:331）正式立项，项目计划号：20194311-T-469。由全国燃烧节能净化标准化技术委员会（TC441）归口管理。

## 2、主要工作过程及所做的工作

（1）2018年5月，针对行业内对液体燃料喷射特性测试的需求日益增加，但目前尚缺乏相关统一标准的现状，由北京理工大学、中国科学技术大学等单位提议，筹备编写小组，准备编写制定相关标准。

（2）2018年10月，编写小组正式成立。通过国内外广泛调研，结合行业需求，经编写小组成员认真讨论，初步形成编写大纲和思路。

（3）2019年3月，在广泛征求行业专家意见的基础上，针对标准编写相关事项、围绕标准目录、大纲拟定、测试技术要求等进行详细讨论，确定了《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》的项目建议书和标准草案。

（4）2019年6月份，标准起草小组向全国燃烧节能净化标准化技术委员会（TC441）上报《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》国家标准项目草案。

（5）2019年8月份，全国燃烧节能净化标准化技术委员会（TC441）国标委系统按要求上报《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试

方法》项目提案并发起投票，征求全体委员意见。

(6) 2019年9月26日，《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》编写小组赴济南参加国标委组织的答辩会。

(7) 2019年12月31日，国标委[2019]40号文批准立项，项目计划编号为20194311-T-469。

(8) 2020年05月13日，成立《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》国家标准编写工作组，何旭副教授（北京理工大学）任组长，林其钊教授（中国科学技术大学）任副组长，工作组成员包括：程晓舫（中国科学技术大学）、伍岳（北京理工大学）、马骁（清华大学）、程乐鸣（浙江大学）、凌飞（合肥产品质量监督检验研究院）、靳世平（华中科技大学）、程文龙（中国科学技术大学）、李雁飞（清华大学）、俞瑜（宁波方太厨具有限公司）、张文秋（安徽省质量和标准化研究院）、张家顺（合肥顺昌分布式能源综合应用技术有限公司）、刘福水（北京理工大学）；秘书组成员：徐咏梅（全国燃烧节能净化标准化技术委员会）。

(9) 2020年7月28日，鉴于疫情安全考虑，不便于现场开会讨论，将《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》（工作组讨论稿）的草案及编制说明发送给编写组各位专家征求意见，截止8月15日，共收集意见49条，采纳修正43条；部分采纳修正3条；不采纳3条，对文件进行了修正，形成了征求意见稿。

(10) 2020年9月2日，将《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》（征求意见稿）及编制说明发给各位相关单位、团体、委员、专家，并在国标委系统上同步广泛征求意见。

(11) 2020年11月10日，对《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》（征求意见稿）的意见汇总表进行处理，其中，共收

集意见41条（采纳修正37条，未采纳3条，无意见1条）。

（12）2021年1月—5月，根据相关意见，进行了背光成像技术喷射特性测试试验，在此基础上，进一步确立了标准化的实验步骤和试验数据处理方法。

（13）2021年7月，根据试验结果，结合征求意见稿收集的意见，标准编写组对标准文本进行了整理、修正，形成了标准送审稿，进行了第二轮征求意见，现正处在征求意见中。

## **二、标准编制原则和主要内容**

### **1、标准编制原则**

本标准的编制遵循“系统性、科学性、统一性、协调性、适用性、规范性”的原则，注重标准的可操作性和利用方便性。

本标准依据GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编制》的规定要求，确定标准的结构和组成要素；坚持科学性原则，标准模式与理论基础及标准要求之间具有清晰的逻辑关系，即理论-模式-标准要求，逐层转化，作到结构合理、层次清晰、体现科学性原则；坚持先进性和实用性相结合的原则，既广泛吸收经典术语和词汇，又吸收和借鉴先进概念；坚持可操作性原则，即标准应在具有广泛的适用性的基础上，有较高的可操作性。

### **2、标准主要内容**

本标准规定了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。

主要技术内容包括：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。

### 三、主要试验（或验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效果；

基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法是目前一种非常实用的对液体燃料喷雾宏观特性进行光学测量的方法，其基本原理是当光束穿过液体颗粒或者液相介质时，由于散射使光线受到剧烈衰减，而气相介质对光线的影响很小，因此特别适合对于液体燃料喷雾的宏观特性测量。

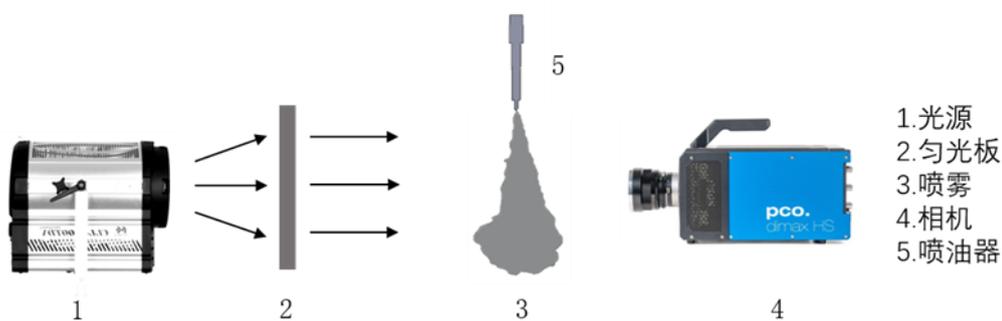


图1背光法试验装置示意图

典型试验装置示意图如图1所示。背景照明光源采用连续光源如镝灯和氙灯等，或者脉冲光源如频闪LED灯，提供足够的背景光强度，提高获取图像中喷射的液相区域与背景区域之间的明暗对比。光源发出的光线照射到匀光板上，发生漫反射形成更为均匀的入射光，使得喷雾图像中的背景亮度均匀一致。入射光通过测试区域后，被高速相机接收成像。由于被液体燃料遮挡的部分的光线发生衰减，形成暗区，和明亮的背景形成鲜明对比。

液体燃料喷射在过程中，初始压力所具有的势能转化为喷雾的动能，在气动力、惯性力、粘性力和表面张力等各种给力的作用下，连续的雾注发生分裂破碎，并在高温环境中蒸发混合。其中喷雾贯穿距离和喷雾锥角是描述液体燃料喷射特性的重要宏观参数，在研究液体燃料雾化的过程中起到重要作用，通常作为直接影响燃烧系统设计的特征参数，为人们所重视。

图2是传统的液体燃料自由射流喷雾结构示意图。传统自由射流喷雾结构基本可以分为三层三段：中心部位是液核区，中间层是浓混区，外围是稀混区；离喷孔最近的一段成为无损液核段，其它液核区称为完全破碎段，超出最大液相贯穿距离的是气相喷雾段。宏观上讲，液核区燃料基本保持液态，还未来得及破碎并与空气混合，此部分密度和浓度最高，速度最大；浓混区液体燃料完全雾化成小液滴，燃料的液相、气相以及环境气体三者共存，混合气浓度较高；稀混合区以燃料蒸汽和环境气体混合气为主，混合气浓度较低。

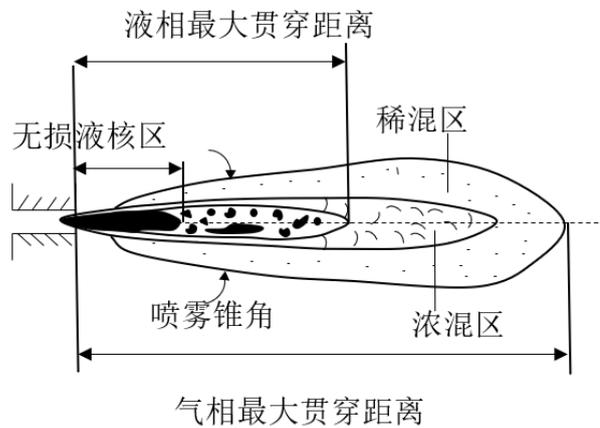


图2传统自由射流喷雾结构示意图

合理的贯穿距离对于提高燃烧室中的空气利用率和燃料混合气的形成速率有着决定性作用，对提高燃料经济性，改善排放至关重要。一方面要避免液体燃料喷雾贯穿距离过长，防止燃料撞击到温度较低的燃烧室壁面上，形成燃烧室上的“湿壁”现象，减少不完全燃烧和HC、CO的生成；另一方面避免燃料喷雾贯穿距离过短。如果喷射贯穿不足，会降低燃烧室内空气的有效利用率。喷雾锥角是另一个喷雾的主要特性参数。喷雾锥角过小，则燃料雾化程度会变差，并且不能有效地在燃烧室空间中分布；喷雾锥角过大，则贯穿距离会减小，火焰会变得短而粗，形成高温缺氧区，导致颗粒物产生量增多。

液体燃料的喷射特性十分重要，学者们已经进行了大量的研究，

但是由于测试方法的不同，造成试验结果不易进行对比，因此需要制定统一的基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法。

《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》的建立有利于测试流程的标准化发展，便于研究人员之间的相互交流和对比验证，节约了人工与时间成本，具有重要的社会和经济效益。

针对高温高压下的液相贯穿距离进行测量，典型的测试试验平台如图3所示。

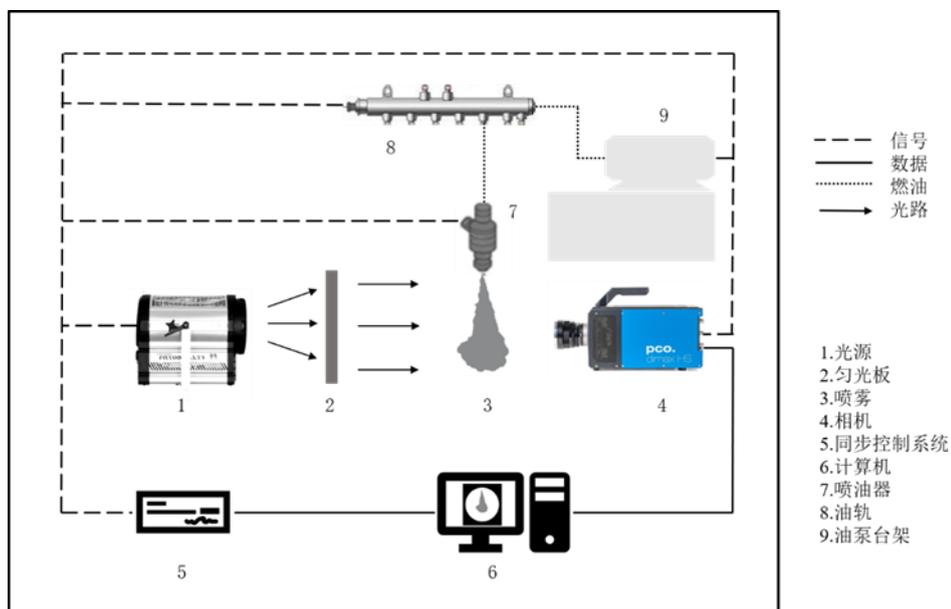


图3测试试验平台示意图

以喷油器喷孔直径0.16mm、喷油压力为80MPa条件下的柴油（-50#）自由射流喷雾为例，其喷射过程如图4所示。图中0msASOI时刻为背景图片，此时尚未喷射。喷射开始后，图像中仅能观测到喷雾液相区域，气相区域基本与容弹背景一致，液相区域明显变暗，这是因为液相区域对于光线有极强的消光能力。

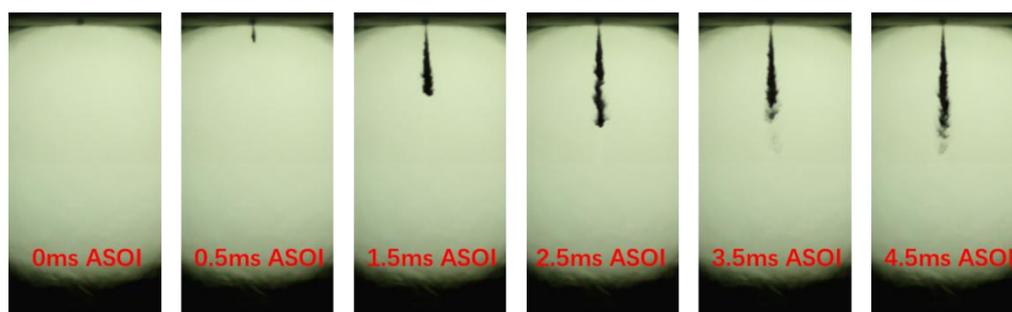
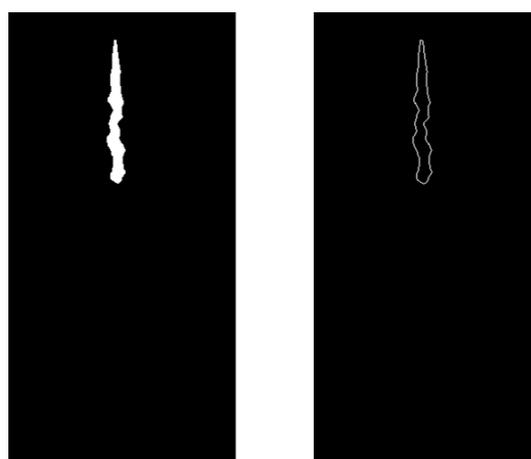


图 4背光法原始图像

由于液相油束的强消光能力，使得原始图像中的液相区域与背景区域的明暗程度对比清晰，可以采用背景差分法对油束液相区域进行提取。以喷油前一张图像作为背景，喷油后的图像与背景图像逐一进行差分，并使用用阈值对图像进行二值化处理，如图5（a）所示，阈值采用OTSU方法计算。对二值化后的图像进行雾束外包络线提取，获得如图5（b）所示的雾束外包络线。



a) 二值化图像

b) 喷雾轮廓

图5 喷雾图像处理

基于检测到的雾束外包络线，进行液体燃料喷射特性分析。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6a所示）；对于喷雾未超出视窗范围（如图6a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 $\theta$ 为喷雾锥角。对于喷雾超出视窗范

围（如图6b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 $\theta$ 为喷雾锥角。

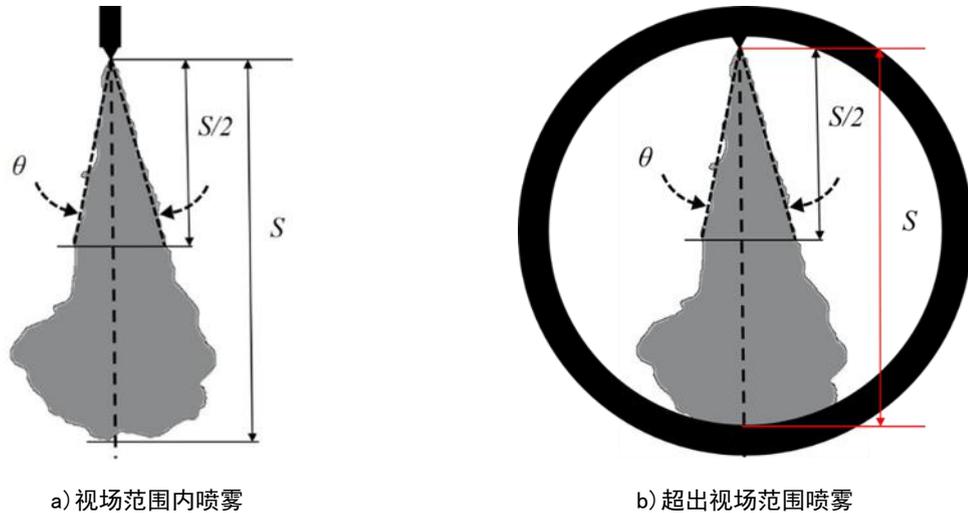


图 6 喷雾贯穿距离和锥角示意图

在我国能源消费体系中，以石油为代表的液体燃料占用重要地位。由于液体燃料便于运输、存储安全，广泛应用于交通运输、工业窑炉、用热设备等。将液体燃料雾化成小液滴是进行燃烧的必要步骤，因此液体燃料的喷射雾化特性很大程度决定了燃烧的品质和排放性能。

开展液体燃料喷射特性测试有助于了解喷射过程机理，评价燃油雾化效果，为燃烧系统设计提供支持。但由于目前尚无液体燃料喷射特性测试标准，不同单位之间的测试装置、试验方法和数据误差都不相同，试验特征参量需要明确，试验操作规范需要统一，试验数据精度需要提高。可见科学评价液体燃料的喷射特性，是燃烧系统开发的关键，对燃烧装置的节能减排具有重要意义，因此急需制定液体燃料喷射特性测试标准。

本标准针对以液体为燃料的发动机、工业窑炉、燃烧器等用热设备，充分考虑研发、生产、检测过程中喷嘴喷射特性评估需求，通过定义专用术语，提高喷射特性测试通用性；规范测试流程，提高喷射

特性测试重复性；确定关键参数，提高喷射特性测试精确性。该标准可以广泛用于汽车、轮船和航空发动机、工业窑炉、燃烧器等用热设备的燃烧系统设计和制造领域，并进一步引领行业发展，提升产品品质，增强竞争力，对节能减排国家战略的实施具有重要的社会和经济效益。

#### **四、采用国际标准和国外先进标准的程度以及与国际、国外同类标准水平的对比情况，或与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况；**

基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法在燃烧装置的液体燃料喷射特性测试领域使用广泛，目前国内外尚无同类标准。

本标准的编制将基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法的标准处于世界领先水平。

#### **五、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系**

本标准与现行法律、法规和强制性国家标准不存在任何冲突、矛盾或重复；

本标准可对液体燃料喷射宏观特性进行科学、准确、有效的评价，为喷嘴性能评估、仿真模型标定和燃烧系统设计提供数据支持。

#### **六、重大分歧意见的处理经过和依据**

本标准在制定过程中未出现过重大分歧意见。

#### **七、标准性质的建议说明**

建议将《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》作为推荐性国家标准发布实施。

#### **八、贯彻本标准的实施要求和措施建议**

本标准发布后，应组织相关教育、科技、文化、设计、制造和用

户 对标准进行宣贯，统一基本概念的表述，消除或减少歧义，规范液体燃料喷射技术的发展及衍生产品的叙述表达，更好的构建低碳型和谐社会，支持节能减排国家战略的实施。

#### 九、废止现行有关标准的建议

未发现需要废止的现行有关标准。

#### 十、其他应予说明的事项。

无

《基于背光成像技术的液体燃料喷射特性测试方法》  
国家标准编写工作组  
2021年07月13日