

单液滴蒸发测试及数据处理方法研究进展

王方,武召阳,任杰,高涵,金捷
(北京航空航天大学能源与动力工程学院,北京100191)

摘要:在航空发动机燃烧室中的航空煤油雾化成液滴后蒸发燃烧,单液滴蒸发特性不但是燃烧室设计参数之一也是两相湍流燃烧模型的重要组成部分,对液体燃料液滴蒸发特性研究具有重要意义。对单液滴蒸发测试及数据处理方法进行总结,综述了国内外不同测试条件下的液滴蒸发试验装置设计、基本原理与操作步骤;对比了传统与新型液滴温度测量方法及液滴成像方法;分析了不同液滴图像处理方法的优缺点,最后总结了造成液滴蒸发试验误差的主要因素为仪器误差、液滴尺寸换算误差、挂丝方式生成的误差、挂丝带来的误差、图像测量误差。重力场、环境温度、环境压力及来流速度对液滴直径和液滴温度变化的影响分析,以及随着测试技术的发展所应用的多种先进测试方法和技术,为单液滴蒸发试验装置的设计、测试技术的研究提供参考,为液滴蒸发试验开辟了新的研究思路。

关键词:单液滴蒸发;测量装置;图像处理;航空煤油;燃烧室;航空发动机

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.06.010

Study Progress of Single Droplet Evaporation Measurement and Data Processing Method

WANG Fang, WU Zhao-yang, REN Jie, GAO Han, JIN Jie

(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In the combustor of an aeroengine, aviation kerosene vaporizes into droplets and then evaporates for combustion. Evaporation characteristics of single droplet is not only one of the important parameters in the design of the combustor, but also an important part of the two-phase turbulent combustion model group. The study of liquid fuel droplet evaporation characteristics has important significance. The single droplet evaporation experimental devices and data processing methods were summarized. Basic principles and operating procedures of droplet evaporation test apparatus designed for different environmental conditions at home and abroad were summarized. Traditional and new droplet temperature measurement methods and droplet imaging methods were compared. The advantages and disadvantages of different droplet image processing methods were analyzed. Finally, the main factors causing the error of droplet evaporation were summarized as instrumental error, droplet size conversion error, error generated by wire hanging mode, error caused by hanging wire, image measurement error. The influence of gravity field, ambient temperature, ambient pressure, incoming flow velocity on droplet diameter and droplet temperature change were analyzed. With the development of the test technology, various advanced test methods and technologies applied provide reference for the design of the single droplet evaporation experiment and the study of the test technology, and open up a new research idea for the droplet evaporation experiment at the same time.

Key words: single droplet evaporation; measuring device; image process; aviation kerosene; combustor; aeroengine

0 引言

航空发动机燃烧室中的液体燃料雾化成液滴后蒸发燃烧,蒸发过程直接受到温度、粒径等因素影响,而单液滴蒸发特性对燃烧室两相燃烧组织设计、燃烧效率、污染排放等具有重要意义。

国内外学者对液滴蒸发过程做了大量研究工作,主要针对不同的环境温度、环境压力及来流速度对液滴直径与液滴温度产生的影响。普遍采用高速摄影和图像处理技术对液滴蒸发过程的物理过程进行其随时间的研究,同时利用液滴悬挂装置配合热电偶或光

收稿日期:2020-08-29 基金项目:国家自然科学基金(91741125)、国家科技重大专项(2017-I-0001-0005,2017-I-0001-0001)资助

作者简介:王方(1972),女,博士,副教授,研究方向为两相湍流燃烧理论及其应用、航空发动机燃烧室数值模拟;E-mail:fwang@buaa.edu.cn.

引用格式:王方,武召阳,任杰,等.单液滴蒸发测试及数据处理方法研究进展[J].航空发动机,2020,46(6):53-61.WANG Fang, WU Zhaoyang, REN Jie, et al. Study progress of single droplet evaporation measurement and data processing method[J]. Aeroengine, 2020, 46(6): 53-61.

学装置对液滴温度进行测量。Javed 等^[1-3]研究得到了液滴蒸发与温度、压力之间的关系,同时发现煤油液滴蒸发时存在微爆现象。Ghata^[4]研究表面张力对液滴蒸发的影响,发现表面张力沿界面方向存在的梯度使液滴界面温度不均匀,即 Marangoni 效应。该效应下液滴内的对流换热增强,蒸发更快,液滴温度较高。同时悬挂丝直径越大,Marangoni 效应愈明显^[5-6]。李兴刚等^[7]经对癸烷、Jet-A、Jet-A1 的替代燃料液滴直径分布和速度的测量,迭代得到了蒸发常数 K 的 d^2 定律,为强迫对流条件下的液滴蒸发提供了一套有价值的数据库。胡鹏^[8]经试验发现液滴升温速率随对流强度增加而增加,液滴温度升高后扩散系数增加,液滴寿命显著减短。Dali Yang 等^[9]比较了不同环境温度下纯煤油液滴与煤油凝胶液滴的蒸发率。由于煤油成分极其复杂,超临界状态蒸发研究以试验为主^[10]。在研究液滴蒸发特性方面,王方等^[11]通过试验发现不同对流速度下普通煤油的蒸发速率均大于航空煤油的蒸发速率,这说明普通煤油的蒸发规律不能完全适用于航空煤油。Santosh G 等^[12]分别选用挥发性差异较大与相近的组分组成的液体燃料液滴,耦合存在较重组分与较轻组分的自由流,研究对双组分液滴蒸发特性的影响。龚景松等^[13]发现单液滴煤液化油的蒸发特性介于煤油和柴油之间,蒸发时间与着火延迟时间随环境温度的升高而缩短,而液滴直径增大会导致蒸发时间和着火延迟时间增长。

本文对较新的单液滴蒸发测试技术、数据处理方法、造成蒸发试验误差的因素进行总结,旨在为单液滴蒸发试验装置的设计和测试技术的研究提供参考,为液滴蒸发试验开辟新的研究思路。

1 不同液滴蒸发装置

一般情况下,试验控制系统分为计算机、液滴生成、温控、液滴推进及工控机 5 个模块。计算机模块主要负责温度、图像数据流的采集及图像处理;液滴生成模块负责液滴的生成及悬挂;温控模块负责试验容腔的加热和温度维持;液滴推进模块负责将生成的液滴送至高温试验区域;工控机模块负责控制液滴推进过程中步进电机的运作。

1.1 液滴生成方法及挂滴技术

通常由微量进样器提供液滴,液滴聚集在针头末端毛细纤维的尖端,并将液滴附着在挂丝上,如图 1

所示^[14];文献[15]提到液滴发生器通过调节输出矩形波电压信号的电压幅值和高电平持续时间来调节发生器喷射液滴的稳定性,产生的液滴最大直径误差不超过 1%,液滴自由下落并最终到达石英挂丝焦点位置时间小于 0.05 s;文献[16]中液滴供给是由 5 ml 微型注射器通过软管与毛细金属管相连,液滴最终悬停在金属管管口处,如图 2 所示,该方式一般用于挂滴法。

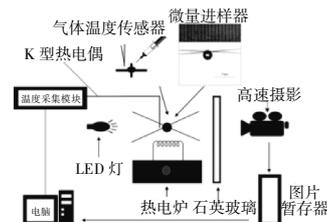


图 1 液滴供给^[14]



图 2 液滴悬停^[16]

国内外实现空间中固定液滴主要方法有飞滴法、悬滴法、挂滴法等^[17]。飞滴法^[18-20]的原理是液滴生成后做自由落体运动,优点是完全排除了挂丝影响,缺点是液滴运动会引起周围流场干扰,测量过程不连续^[18];悬浮法^[21-23]的原理是通过气悬、声悬或磁悬浮等方法克服液滴自身的重力,从而达到液滴悬浮蒸发的效果,优点是消除了挂丝的影响,缺点是液滴会上下浮动,液滴图像测量不方便,文献[21]即用声悬法进行单液滴蒸发研究;挂滴法的原理是通过微量进样器提供液滴,用纤维丝或热电偶(细石英纤维丝^[24-25]、交叉叉丝^[26-27]、K 型热电偶^[28]、R 型热电偶丝^[29])悬挂液滴,优点是悬挂的液滴可达到稳定蒸发的效果,且便于试验测量,缺点是液滴尺寸稍大,测量结果受到挂丝的影响。

1.2 挂滴式蒸发试验装置

在 3 种挂滴方法中,由于挂滴法不考虑辐射换热对液滴蒸发的影响,易试验测量,挂滴时主要采用单根石英丝,端头设计成椭球形进行挂滴,被广泛应用于研究中,然而由于重力的影响,液滴在蒸发过程中非球形的程度较大。

为减小上述问题的影响,铃木真人等^[30-31]设计的液滴蒸发装置中首次采用交叉丝方式来悬挂液滴,使得液滴形状更接近球形,如图 3 所示。

加拿大 Verwey 等^[32]搭

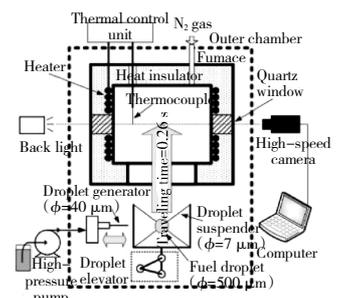


图 3 铃木真人等搭建的高温高压高端流单液滴蒸发试验装置^[30-31]

滴蒸发装置采用垂直叉丝方式来悬挂液滴,可生成直径约为 0.1mm 的液滴,是目前文献中可见的最小直径液滴,如图 4 所示。

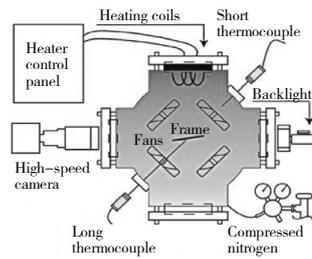


图 4 Verwey 等搭建的蒸发试验装置^[32]

现将不同试验环境下的蒸发试验装置做如下总结。

1.2.1 高温蒸发试验装置

华中科技大学张郁等^[33-35]设计的高温单液滴挂滴式蒸发试验装置,可用于 1200 K 的高温环境,如图 5 所示。

冯立岩等^[36]搭建的单液滴挂滴式蒸发试验装置,原理与张郁等^[33-35]的相似,可用于 923K 的温度环境,如图 6 所示。

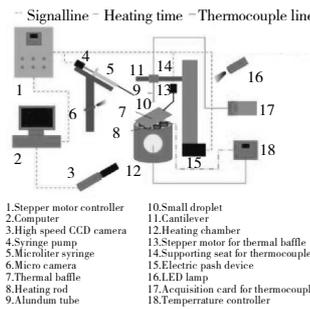


图 5 张郁等搭建的试验装置^[33-35]

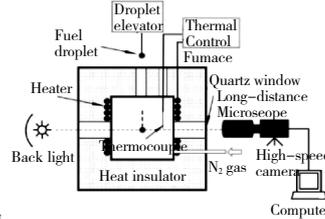


图 6 冯立岩等搭建的试验装置^[36]

Watanabe 等^[37-38]设计的液滴蒸发试验装置可用于 1073 K 的温度环境。

由此可见高温蒸发试验装置的设计原理相似。在试验过程中应用一些辅助技术将提升试验装置的精准性,例如 Gan 等^[39]的试验装置(如图 7 所示)采用同步触发技术,即在液滴蒸发开始时刻,同时触发液滴温度记录器和高速摄影进行记录。

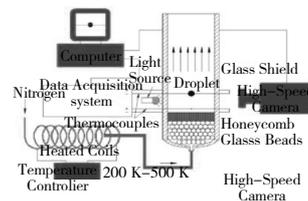


图 7 Gan 等搭建的试验装置^[39]

1.2.2 高温高压蒸发试验装置

对于高温高压环境下的液滴蒸发研究,国外 Hrioyasu 等^[40]在高温高压下对丁烷和乙醇进行了试验;Ghassemi 等^[41]搭建的高温高压煤油液滴蒸发试验台可实现高温 873K、高压 0.1 ~ 2.5 MPa 的要求,液滴直径约为 1mm,如图 8 所示。以上试验得到了较为系

统的试验数据。

国内目前主要倾向于理论模型优化,且多局限于低压环境,如苏凌宇等^[42]对低压环境及压力震荡环境下液滴的蒸发特性进行分析。而对高温高压环境下液滴蒸发特性缺乏细致研究。

刘松等^[43]搭建了高温高压煤油液滴挂滴式蒸发试验装置,最高压力可达到 10 MPa,温度可实现 300 ~ 900 K 的调控,原理如图 9 所示;靳乐等^[44]搭建的试验台可实现 4 MPa 压力的要求。

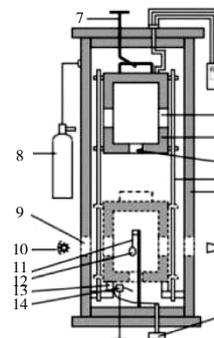


图 8 Ghassemi 等搭建的试验装置^[41]

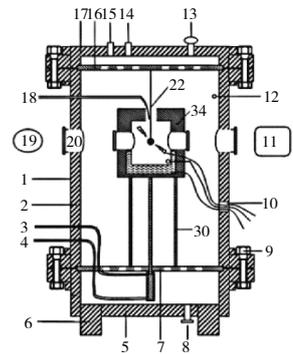


图 9 刘松等搭建的高压试验装置^[43]

二者均为目前国内能实现高压环境的试验装置,但试验原理有所不同。刘松等搭建平台的试验原理是在同一高压环境下设置高、低温 2 个试验空间,在低温区生成的液滴通过机械结构迅速移入高温环境,研究高温高压的液滴蒸发特性;而靳乐等^[44]的超临界环境是由压力和温度可调控的柱形容腔提供,不设置高、低温分离空间,直接采用壁面电热对容腔上方悬停器上的液滴进行加热,选用高压氮气对容腔进行加压,完成试验。原理如图 10 所示。

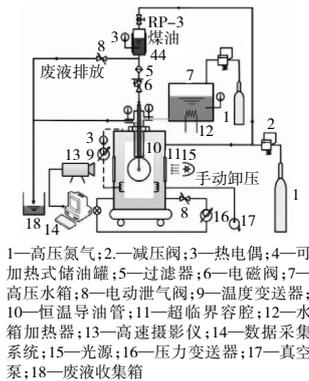


图 10 靳乐等超临界蒸发试验原理^[44]

1.3 不同试验容腔设计

试验容腔设有观察窗口,用于投放高速摄影镜头与背景光源。有对流要求时,试验通道贯穿整个容腔。

研究液滴超临界蒸发特性时,超临界环境由温度和压力可调的柱形容腔提供,容腔外包裹硅酸铝纤维进行保温,压力控制由压力变送器、传感器、调节阀和控制仪共同完成^[45]。研究液滴高温高压下的蒸发试验

时,设计的试验容腔为高温高压容腔^[46];研究高温常压环境下的液滴蒸发特性时,试验容腔的形状一般为圆柱体^[47-48]或长方体^[49],腔内固定有加热模块,腔外置有温控装置,试验容腔内部四周和底部均附有保温材料,以减少传热损失。对于有对流要求的试验,试验容腔设计成圆柱型或矩形通道,一侧与气流连通,另一侧用于液滴供给装置的进出^[18,49]。而在常压及低温环境下,试验容腔一般不用保温材料^[16],如图11所示。

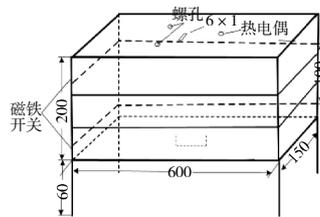


图11 加热箱体设计^[16]

1.4 液滴推进模块

液滴生成后,有些试验系统的液滴生成位置即为液滴图像测量位置(图3~5),消除液滴推进过程中的干扰因素;有些则需要液滴挂好后通过滑轨^[47](图6)或3自由度位移台^[45]或步进电机-滚珠丝杠模块^[50]将其迅速推入高速摄影焦点位置。上述方法中3自由度位移台的调节精度可达到0.005mm,如图12所示;步进电机-滚珠丝杠模块运送液滴时间短的优点突出,同时运动精度高,如图13所示。

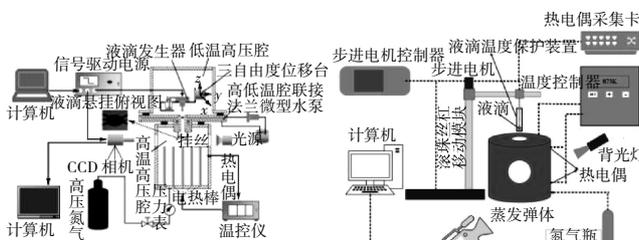


图12 3自由度位移台^[45]

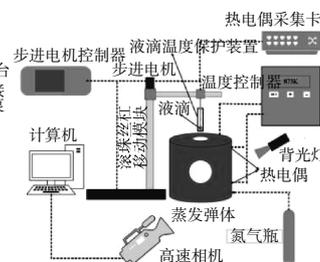


图13 步进电机-滚珠丝杠模块^[50]

2 温度测量方法介绍

从试验角度看,研究主要集中在高温下液滴的蒸发特性,在辐射加热条件下液滴蒸发的试验研究^[51]在国内外开展均较少。在测量多组液滴的温度等热化学量方面是一个挑战,有拉曼光谱、形态依赖共振(MDR、彩虹折射法和激光诱导荧光(LIF)等方法^[52]。上述方法都有其各自的优点和局限性,而这取决于其基本原理。例如,对温度敏感的荧光团发出的荧光信号除了对温度有一定的依赖性外,一般还对其组成有一定的依赖性。在液滴温度的测量方法中,红外、双色激光荧光法等测量方法比传统研究方法有明显优势。

传统测量液滴温度方法一般选用热电偶,文献[18]中直径为200 μm的液滴直接挂到热电偶节点上,该热电偶可测量液滴温度,同时在液滴附近放置另一个热电偶测量气相环境温度,如图14所示。

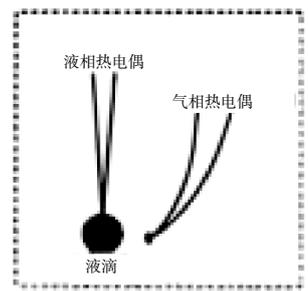


图14 传统液滴温度测量^[18]

红外热像仪或红外摄像机的温度测量原理是基于辐射。红外摄像机捕捉1个表面的红外发射信号,并预先校正,以转换为成像平面的每个像素的辐照强度为1个温标。红外测温的优点是可连续测量液滴在整个蒸发过程中的温度变化,无接触测量,对液滴传热无影响,测量过程简单;但不同于普通红外测温对象的是,球形半透明的液滴的表面曲率和工质辐射物性等参数在液滴不同状态、不同位置下存在差异,故液滴表面曲率会影响表观发射率,需要对测量温度进行修正。目前对液滴表面红外测温的研究大多未考虑上述提到的差异影响,仅根据工质设置发射率,文献[53]中使用的红外摄像机(FLIR SILVER 校准范围为-5~200℃,精度为±1℃)捕获,可同时获得液滴温度和大小信息。红外摄像机耦合显微镜变焦镜头(FLIR G3-F/2)专门用于传输中程红外波长,该镜头放大倍数为3,工作距离约为40mm。在液滴红外热成像上画1条直径线,将线上的平均温度作为瞬态温度,但该方法未考虑液滴边缘效应。红外装置如图15所示。

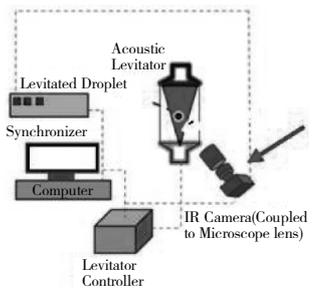


图15 红外摄像机(耦合显微镜镜头)^[53]

文献[54]中用红外摄像机(FLIR SC 5600)配备三脚架和G3 F/3.0微距镜头来获取水滴团以及水滴团下水层的图像。分析红外热成像发现,水面悬浮液滴群的液滴顶部温度最低。该装置如图16所示。同时使

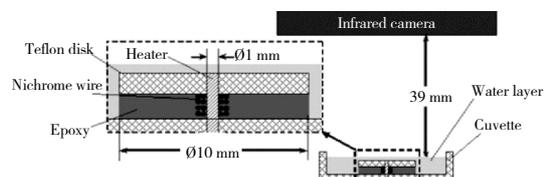


图16 红外测量试验装置^[54]

用绝对误差约为 0.02 K 的接触探测器配置的小试管来直接测量水温。2 种测量方法的结合使得对水的红外测量的绝对试验误差仅为 0.16 K。

文献[47]中研究了红外激光加热下液滴的蒸发特性,选用的红外摄像机型号为 Flir-SC620。红外热像仪获取液滴温度的测量精度为 $\pm 2\%$ 。由于液滴表面表观发射率从中心到边缘逐渐下降,会产生边缘模糊效应。试验装置如图 17 所示。

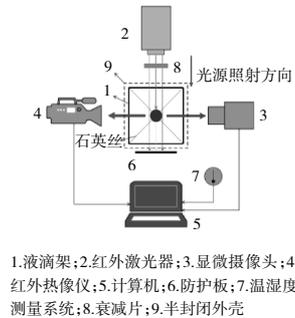


图 17 试验装置^[45]

由 Lavielle 等^[60]发起的双色激光诱导荧光(2CLIF)被用来表征液滴温度。文献[57-58]采用双色激光诱导荧光法测量温度,装置如图 18 所示。目前基于 LIF 的温度测量的可行性已经深入地研究了几种烷烃混合物(异己烷、正庚烷、正癸烷、正十二烷和正十六烷)。为了表征液滴蒸发速率和速度,将温度测量与基于定量阴影成像的有效方法相结合。

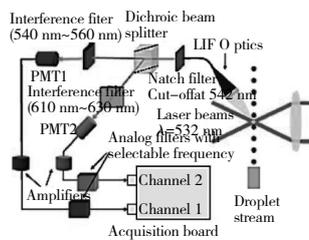


图 18 双色激光诱导荧光法^[57-58]

上述传统与新兴方法均存在优缺点,例如激光彩虹测量方法目前实现了对水及无水乙醇进行液滴蒸发的测量,其余燃料如煤油、航空煤油因物性参数较为复杂,未开展相应研究。另外,传统测量方法试验炉温度可达 1200 K,而新型方法对试验炉的要求较高,温度可设范围较低,需对试验炉改进设计。

3 液滴成像方法

高速摄影相机(图 1、3~7、12)和 CCD 相机作为传统的液滴成像工具应用广泛,成像系统易搭建且测量简单。相机成像条件需配备背景光源,并在加热容腔的前后两侧开设相机及光源投放窗口,窗口处安装石英玻璃以隔绝外界环境。对于高速成像,乙醇的帧率为 1000 帧/s,煤油和柴油的帧率为 3000 帧/s。空间分辨率在每个像素被增强到 2 μm 时使用显微透镜为高速和红外相机,进一步的细节在文献[59]中说明。

但在高温环境下该方法的图像采集精度不能达到试验高精度的要求,在低温环境液滴蒸发量小时,不能得到液滴直径精确的微小变化,同时由于高速摄影数据采集量较大,人为筛选图像会产生一定的误差。Perrin^[60]采用同步摄像方法得到了液滴的尺寸及速度。

相对于上述传统方法,新兴的激光彩虹方法具有高灵敏、高分辨率的优点,可用来测量液滴(柱)粒径分布、温度、浓度以及折射率等参数,测量的液滴直径达到微米量级,测量的直径变化可到纳米量级。彩虹信号采集的原理是采用高速线阵 CCD,与面阵相机相比具有成本低及采集频率高的优点^[16]。彩虹测量技术自提出以来,很多研究学者采用该方法来测量液滴直径微小变化,韩香娥^[61]在彩虹测量理论利用 Airy 的基础上,结合彩虹的 ripple 结构完成了对直径及折射率微小变化的研究;Saengkaew 等^[62]用该测量方法对液滴直径随温度变化情况进行了分析验证;Promvongsa J 等^[63]应用彩虹的 Airy 理论,通过彩虹测量方法研究了水和乙醇混合液滴的蒸发情况。然而,彩虹测量方法作为精密测量方法,对试验环境要求较高,搭建试验台相对高速摄影而言较困难。

4 图像处理技术

为了获得液滴蒸发曲线,赵鹏等^[14]分别采用基于 Image Pro 软件测量技术和 Matlab 形态学原理对液滴图片进行处理,发现基于 Image Pro 软件得到的液滴归一化直径偏大,而 Matlab 图像处理结果更为准确。

在提取液滴直径过程中,悬挂于热电偶或者石英丝上的液滴并非规则球形,同时挂丝也影响液滴数据的提取,这是数据处理中的难题。此时多采用将挂丝与液滴接触的地方直接剪去,误差较大。目前获取液滴直径数据的方法有如下几种。

4.1 利用液滴投影面积计算

张郁等^[33-35]在处理热电偶丝悬挂液滴图片时,先利用 Matlab 程序直接剪去热电偶丝,然后提取感兴趣区域,对图像进行二值化获取液滴投影部分的像素值,进而求出半径,数据处理原理如图 19 所示。

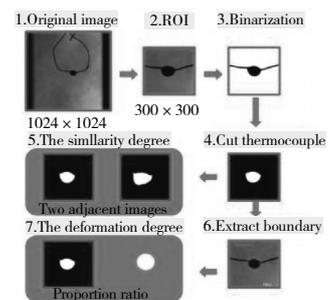


图 19 张郁等处理液滴图像^[33-35]

4.2 利用液滴面积积分求出液滴表面积来折算

Manjunath 等^[64]没有剪去石英丝,直接从图像获取参数,利用公式计算液滴表面积,之后用式(1)、(2)计算液滴直径。该方法如图 20 所示。

$$A = \int_{\phi-\phi_0}^{\pi} \int_{\theta=0}^{2\pi} \sin\phi \cdot \sqrt{(b\sin\phi)^2 + (b\cos\theta)^2 + (a\sin\phi\theta)^2 + (ab\cos\theta)^2} d\theta d\phi \quad (1)$$

其中, $\phi_0 = \cos^{-1}\left(\frac{z_0}{a}\right)$, $d\phi = \frac{\pi - \phi_0}{n}$,

$$d\theta = \frac{2\pi}{n}, d = \sqrt{A/\pi} \quad (2)$$

4.3 利用液滴面积积分求出液滴体积来折算

采用 Matlab 程序剪掉热电偶丝,利用积分法计算液滴体积,从而求得液滴直径^[36,43,65],该方法计算精度较高,可达到 $\pm 2.7\%$,原理如图 21 所示。

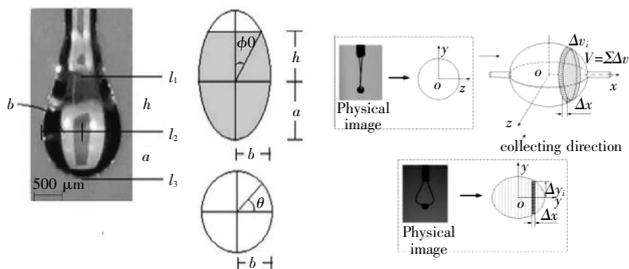


图 20 Manjunath 等计算液滴直径方法^[64]

图 21 付耿等计算液滴直径方法^[36,43,65]

4.4 统计像素点面积大小而求

文献[50]中先通过形态学图像处理方法剪掉热电偶丝,建立圆形结构元,通过统计像素点面积大小,从而求得液滴直径,原理如图 22 所示。

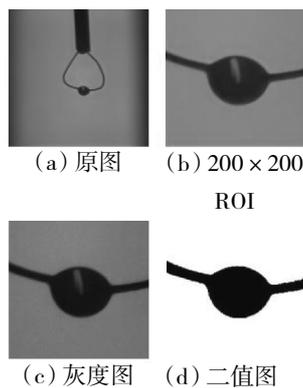


图 22 液滴图像处理过程^[50]

4.5 取相同截面面积下圆形直径折算

文献[44]通过 Matlab 软件提取液滴部分像素点,计算液滴部分的面积,折算该面积下液滴直径作为需要研究的液滴尺寸,原理如图 23 所示。

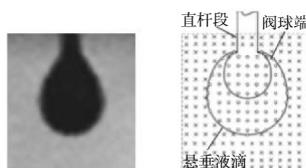


图 23 液滴直径计算原理^[44]

4.6 采用光学方法计算

采用激光彩虹测量方法^[16],通过 1 阶彩虹 ripple

结构来测量液滴直径和 ripple 结构平移时对应的相位差,以此实现液滴直径微小变化的测量。均匀球 1 阶彩虹 f_{ripple} 与直径 d 之间的线性关系如图 24 所示。计算条件 $m=1.332$;角

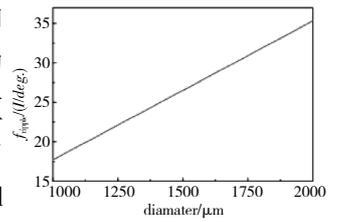


图 24 均匀球 1 阶彩虹 f_{ripple} 与直径 d 关系^[16]

5 试验误差分析

对于红外热像仪来说,液滴温度方面产生的误差主要为仪器误差^[54],根据分析的发射率来修正。

液滴尺寸测量中的误差主要由以下因素引起:(1)液滴尺寸换算误差;(2)挂丝方式带来的误差;(3)挂丝带来的误差;(4)图像测量误差。其液滴生成误差主要为微量移液器原有误差,试验液滴体积为 2.0 和 1.0 时误差分别为 1.5% 和 2.7%。赵鹏等^[14]发现,采用 K 型热电偶挂滴法拟合得到的液滴直径大于采用十字叉丝挂滴法得到的,如图 25 所示;同时指出 K 型热电偶对液滴直径测量影响较大。文献[18]中介绍液滴生成器生成的液滴直径误差不超过 1%;而采用挂滴法,挂丝经过液滴内部会导致液滴体积相对扩大,挂丝穿过液滴中心位置时会产生最大的体积相对误差,可达到 7.26%;图像测量时的直径由像素确定,由像素引起的相对误差为 1.03%~3.75%,文献[50]中采用形态学图像处理技术剪掉热电偶丝误差为 4.35%,低于文献[66]中剪掉热电偶丝的误差 6.69%,而文献[18]中的液滴直径误差范围控制在 $\pm 4\%$ 以内。因此在尺寸测量方面产生的误差可制定出试验中可行的规则,以保证试验的准确性及精度。

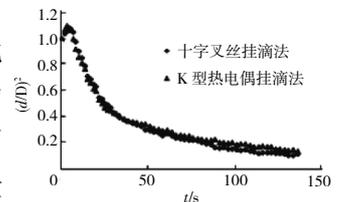


图 25 采用不同挂滴法液滴归一化直径平方随时间变化^[14]

6 总结与展望

本文针对液体燃料蒸发特性试验及数据处理技术,总结综述了国内外最新研究成果。随着测试技术的发展,对测试精度提出了更高的要求。

在各类液滴蒸发试验装置中,高温高压对流等与实际应用相符的复杂环境的测试越来越成为主流。除

了液滴直径变化,液滴温度等参数的测量研究逐渐增加。在液滴温度的测量方法中,红外、双色激光荧光法等测量方法较传统研究方法而言有明显优势。

随着测试技术及数据处理方法的发展,实验误差分析越来越重要。传统误差中,测量仪器误差、液滴尺寸换算误差、挂丝方式带来的误差、图像测量误差等需要规范控制。新的测量方式对误差控制带来了新的研究需求。对航空煤油蒸发特性试验研究的结果及其误差仍然需要进一步分析

新兴测试技术存在广阔的发展空间,在燃料种类、高温高压对流环境的构建等方面需要进行深入的拓展研究。蒸发特性和燃料物性相结合,发展高精度宽适用范围的我国航空燃料蒸发模型,可以为航空发动机燃烧室数值模拟模型研究提供基础。

参考文献:

- Javed I, Baek S W, Waheed K. Evaporation characteristics of heptane droplets with the addition of aluminum nanoparticles at elevated temperatures [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(1): 170-183.
- Javed I, Baek S W, Waheed K. Effects of dense concentrations of aluminum nanoparticles on the evaporation behavior of kerosene droplet at elevated temperatures: the phenomenon of microexplosion [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 56(5): 33-44.
- Javed I, Baek S W, Waheed K. Autoignition and combustion characteristics of kerosene droplets with dilute concentrations of aluminum nanoparticles at elevated temperatures [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(3): 774-787.
- Ghata N, Shaw B D. Computational modeling of the effects of support fibers on evaporation of fiber-supported droplets in reduced gravity [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 77(4): 22-36.
- Yang V, Hsieh K C, Shuen J S. Supercritical droplet combustion and related transport phenomena [R]. AIAA-1993-0812.
- Givler S R, Abraham J. Supercritical droplet vaporization and combustion studies [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 22(1): 1-28.
- LI Xinggang, Leon Heisterüber, Lydia Achelis, et al. Multiscale descriptions of particle-droplet interactions in multiphase spray processing [J]. *Multiphase Flow*, 2016, 80: 15-28.
- 胡鹏.基于乙醇柴油单液滴蒸发和湍流扩散燃烧模型的喷雾和燃烧过程研究[D].江苏:江苏大学, 2014.
HU Peng. Study on spray and combustion process based on single droplet evaporation and turbulent diffusion combustion model of ethanol and diesel [D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
- Dali YANG, Zhixun Xia, Liya Huang, et al. Experimental study on the evaporation characteristics of the kerosene gel droplet [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 93: 171-177.
- 张蒙正,徐胜利.单液滴燃料超临界特性实验研究的新方法[J].火箭推进, 2011, 37(1): 7-16.
ZHANG Mengzheng, XU Shengli. A new method for experimental study of supercritical characteristics of single droplet fuel [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2011, 37(1): 7-16. (in Chinese)
- 王方,刘睿,张学智,等.煤油单滴在相对静止和强迫对流环境下的蒸发规律[J].燃烧科学与技术, 2017, 23(6): 485-491.
WANG Fang, LIU Rui, ZHANG Xuezhi, et al. Evaporation law of kerosene single drop in a relatively static and forced convection environment [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2017, 23(6): 485-491. (in Chinese)
- Santosh G, Sukumar P, Som S K. Evaporation of multicomponent liquid fuel droplets: influences of component composition in droplet and vapor concentration in free stream ambience [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 105: 83-95.
- 龚景松,陆奇志,何裕坤,等.煤液化油的蒸发与着火特性[J].燃烧科学与技术, 2014, 20(2): 10-14.
GONG Jingsong, LU Qizhi, HE Yukun, et al. Evaporation and ignition characteristics of coal liquefaction oil [J]. *Combustion Science and Technology*, 2014, 20(2): 10-14. (in Chinese)
- 赵鹏,钱剑剑,陶常法,等.单液滴蒸发实验装置设计及测试技术研究[J].合肥工业大学学报, 2019, 42(9): 1164-1168.
ZHAO Peng, QIAN Yejian, TAO Changfa, et al. Experimental study on design and measurement technology of single droplet evaporation device [J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2019, 42(9): 1164-1168. (in Chinese)
- Kai H, Hao C, Bo Y, et al. Experimental investigation on droplet burning characteristics of diesel-benzyl azides blend [J]. *Fuel*, 2017, 190(10): 32-40.
- 马坤林.基于激光彩虹法的液滴蒸发率温度特性测量[D].西安:西安电子科技大学, 2019.
MA Kunlin. Temperature characteristic measurement of droplet evaporation rate using rainbow refractometry [D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- 马世博.单液滴生成试验、仿真研究与高温蒸发装置设计[D].北京:北京理工大学, 2013.
MA Shibao. Experiment and simulation of single droplet generation and design of high temperature evaporator [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- 韩凯,陈浩,马小康,等.苯基叠氮对复合柴油液滴燃烧特性的影响[J].内燃机学报, 2017, 35(5): 429-435.
HAN Kai, CHEN Hao, MA Xiaokang, et al. Effects of benzyl azides on burning characteristics of diesel-benzyl azides blend droplets [J]. *Transactions of CSICE*, 2017, 35(5): 429-435. (in Chinese)
- Maqua C, Castanet G, Grisch F, et al. Monodisperse droplet heating and evaporation: experimental study and modelling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51: 3932-3945.

- [20] Holyst R, Litniewski M, Jakubczyk D, et al. Evaporation of freely suspended single droplets: experimental, theoretical and computational simulations[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2013, 76(3): 1–19.
- [21] Shitanishi K, Hasegawa K, Kaneko A, et al. Study on heat transfer and flow characteristic under phase change process of an acoustically levitated droplet [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2014, 26(5): 305–312.
- [22] Walton D E. The evaporation of water droplets: a single droplet drying experiment[J]. *Drying Technology*, 2004, 22(3): 431–456.
- [23] Belal A A Z, Cameron T. Evaporation of pure liquid droplets: comparison of droplet evaporation in an acoustic field versus glass-filament [J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(17): 3914–3921.
- [24] Ranz W, Marshall W. Evaporation from drops [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1952, 48(3): 141–146.
- [25] Ghassemi H, Beak S W, Khan Q S. Experimental study on binary droplet evaporation at elevated pressures and temperatures [J]. *Combustion Science and Technology*, 2006, 178(6): 1031–1053.
- [26] Chauveau C, Birouk M, Kalp G I. An analysis of the d2-law departure during droplet evaporation in microgravity [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(3): 252–259.
- [27] Nozomu H, Hiroshi N, Masato S, et al. Evaporation characteristics of a palm methyl ester droplet at high ambient temperatures [J]. *Fuel*, 2015, 143: 202–210.
- [28] 王方, 杨少锋, 张学智, 等. 考虑自然对流的厚交换层液滴蒸发模型及其检验[J]. *推进技术*, 2017, 38(3): 620–629.
WANG Fang, YANG Shaofeng, ZHANG Xuezhi, et al. Natural convection thick exchange layer droplet evaporation model and its verification[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(3): 620–629. (in Chinese)
- [29] Watanabe H, Suzuki Y, Harada T, et al. An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet[J]. *Energy*, 2010, 35(2): 806–813.
- [30] 鈴木真人, 野村浩司, 橋本望, 等. バイオマス燃料液滴の蒸発・燃焼と微小重力実験装置の開発[J]. *微粒化*, 2008, 17(58): 38–44.
Masato S, Hiroshi N, Nozomu H, et al. Experimental study on biomass fuel droplet evaporation/combustion and development of microgravity experimental apparatus [J]. *Micronization*, 2008, 17(58): 38–44. (in Japanese)
- [31] 金子堅太郎, 野村浩司, 橋本望, 等. 高温・高圧力環境で蒸発するバームメチルエステル液滴の温度および直径履歴の計測[J]. *微粒化*, 2014, 23(80): 19–26.
Kentaro K, Hiroshi N, Nozomu H. Measurement of temporal variations of temperature and diameter of a palm methyl ester droplet evaporating at high temperatures and high pressures [J]. *Micronization*, 2014, 23(80): 19–26. (in Japanese)
- [32] Cameron V, Madjid B. Experimental investigation of the effect of natural convection on the evaporation characteristics of small fuel droplets at moderately elevated temperature and pressure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 1046–1055.
- [33] Yu Zhang, Ronghua Huang, Shijie Xu, et al. The effect of different n-butanol-fatty acid methylesters (FAME) blends on puffing characteristics [J]. *Fuel*, 2017, 208: 30–40.
- [34] Yu Zhang, Ronghua Huang, Zhaowen Wang, et al. Experimental study on puffing characteristics of biodiesel-butanol droplet [J]. *Fuel*, 2017, 191: 454–462.
- [35] Yu Zhang, Ronghua Huang, Yuhan Huang, et al. Effect of ambient temperature on the puffing characteristics of single butanol-hexadecane droplet [J]. *Energy*, 2018, 145: 430–441.
- [36] Liyan Feng, Ximing Di, Wuqiang Long, et al. The evaporation characteristics of cylinder oil of low-speed 2-stroke marine engines [R]. SAE-2017-01-0886.
- [37] Hirotsu W, Takuji H, Yohsuke M, et al. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(15): 3676–3684.
- [38] Hirotsu W, Yoshiyuki S, Takuji H, et al. An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet [J]. *Energy*, 2010, 35(2): 806–813.
- [39] Gan Y N, Qiao L. Evaporation characteristics of fuel droplets with the addition of nanoparticles under natural and forced convections [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(23–24): 4913–4922.
- [40] Hiroyasu H, Kadota T, Senda T, et al. Evaporation of a single droplet at elevated pressures and temperatures: part 1. experimental study [J]. *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers*, 1974, 339(40): 3147–3154.
- [41] Hojat G, Seung W B, Qasim S K. Experimental study on binary droplet evaporation at elevated pressures and temperatures [J]. *Combustion Science and Technology*, 2006, 178: 1031–1053.
- [42] 苏凌宇. 负压环境下燃料液滴蒸发过程的试验和理论研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
SU Lingyu. Experimental and theoretical study of fuel droplet evaporation under negative pressure [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [43] 刘松, 聂万胜, 苏凌宇, 等. 高温高压环境下煤油液滴蒸发过程试验研究 [J]. *火箭推进*, 2017, 43(2): 25–39.
LIU Song, NIE Wansheng, SU Lingyu, et al. Experimental investigation on evaporation process of kerosene droplets at high pressure and high temperature [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2017, 43(2): 25–39. (in Chinese)
- [44] 靳乐, 范玮, 周舟, 等. 液滴初始温度对 RP-3 航空煤油超临界蒸发特性的影响 [J]. *燃烧科学与技术*, 2016, 22(3): 269–276.
JIN Le, FAN Wei, ZHOU Zhou, et al. Influence of initial temperature of droplet on supercritical evaporation characteristics of RP-3 aviation kerosene [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016, 22(3): 269–276. (in Chinese)

- [45] 倪兆静,韩凯,庞博,等.高温高压环境下燃油液滴蒸发的特性试验[J].内燃机学报,2019,37(6):536-540.
NI Zhaojing,HAN Kai, PANG Bo, et al. Experiment on evaporation characteristics of fuel droplet in high temperature and high pressure environment [J]. Transactions of CSICE, 2019, 37 (6):536-540. (in Chinese)
- [46] Nozomu H, Hiroshi N, Masato S, et al. Evaporation characteristics of a palm methyl ester droplet at high ambient temperatures [J]. Fuel, 2015, 143:202-210.
- [47] 李金达.多组分燃料单液滴蒸发过程的实验及模拟研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
LI Jinda. Experimental and numerical study on the single multicomponent droplet evaporation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [48] 韩凯,赵长禄,付耿,等. 苯基叠氮复合柴油液滴蒸发特性及影响因素的试验[J].内燃机学报,2014,32(1):32-37.
HAN Kai,ZHAO Changlu,FU Geng ,et al. Experiment on vaporization characteristics of diesel-benzyl azides blend droplets and influence factors [J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(1):32-37. (in Chinese)
- [49] Fang Wang, Xiang Gao, Yangchun Xiao, et al. Thick exchange layer evaporation model with natural convection effect and evaporation experimental study for multicomponent droplet [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(7):1903-1918.
- [50] 王继刚.纳米流体燃油液滴蒸发特性及微爆机理研究[D].江苏:江苏科技大学,2018.
WANG Jigang. Research on evaporation characteristics and micro-explosion mechanism of nanofluid fuel droplets [D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [51] Nan Fu, Meng Wai Woo, Xiao Dong Chen. Single droplet drying technique to study drying kinetics measurement and particle functionality: a review [J]. Drying Technology, 2012, 30(15): 1771-1785.
- [52] Lemoine F, Castanet G. Temperature and chemical composition of droplets by optical measurement techniques: a state of the art review [J]. Exp Fluids, 2013, 54(7): 1-34.
- [53] Abhishek S, Ranganathan K, Saptarshi B. Infrared thermography and numerical study of vaporization characteristics of pure and blended bio-fuel droplets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53:3862-3873.
- [54] Alexander A F, Leonida F, Andrey M S. The use of infrared self-emission measurements to retrieve surface temperature of levitating water droplets [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 69:238-243.
- [55] 贾卓杭.红外激光加热下球形液滴蒸发特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
JIA Zhuohang. Research on evaporation characteristics of spherical droplet under infrared laser heating [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [56] Lavieille P, Lemoine F, Lavergne G, et al. Evaporating and combusting droplet temperature measurements using two-color laser-induced fluorescence [J]. Exp Fluids 2001, 31(1):45-55.
- [57] Maqua C, Castanet G, Grisch F, et al. Monodisperse droplet heating and evaporation: experimental study and modelling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(15-16):3932-3945.
- [58] Lionel P, Guillaume C, Fabrice L. Characterization of the evaporation of interacting droplets using combined optical techniques [J]. Experiments of Fluids, 2015, 56(2):29.
- [59] Basu S, Saha A, Kumar R. Criteria for thermally induced atomization and catastrophic breakup of acoustically levitated droplet [J]. Heat Mass Transf, 2013, 59:316-327.
- [60] Perrin L, Castanet G, Lemoine F. Characterization of the evaporation of interacting droplets using combined optical techniques [J]. Experiments in Fluids, 2015, 56(2):1-16.
- [61] Han X. Study of refractometry of rainbow and applications to the measurement of instability and temperature gradient of a liquid jet [D]. Rouen: Rouen University, 2000.
- [62] Seangkeaw S, Charinpanikul T, Laurent C, et al. Processing of individual rainbow signals [J]. Express Fluids, 2010, 48(1):111-119.
- [63] Promvongsa J, Fungtammasan B, Grehan G, et al. A study on the evaporation of water-ethanol mixture using rainbow refractometry [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2017, 139(6):17-23.
- [64] Manjunath M, Vasudevan R, Pramod S M. Vaporization characteristics of suspended droplets of biodiesel fuels of Indian origin and their diesel blends an experimental study [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 88:28-41.
- [65] 付耿. 叠氮复合柴油液滴蒸发特性及影响机理研究[D].北京:北京理工大学,2015.
FU Geng. Research on the evaporation characteristics of diesel-azides blend droplets and influence mechanism [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [66] 史建伟. 苯基叠氮-正十六烷复合燃油蒸发特性试验研究 [D].北京:北京理工大学,2015.
SHI Jianwei. An experimental study on the vaporization characteristics of benzyl azides-hexadecane blend [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

(编辑:程海)