

专题综述

文章编号:1001-2060(2023)09-0001-11

# 生物燃料液滴蒸发和燃烧试验研究进展

韦兰星<sup>1</sup>, 王继刚<sup>1</sup>, 沈钰焜<sup>1</sup>, 乔信起<sup>2</sup>

(1. 扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:**液体燃料液滴的蒸发和燃烧过程是发动机实现高效清洁燃烧的重要环节。本文通过对比飞滴法、悬浮法、依附法和悬挂法4种常用液滴蒸发和燃烧试验研究方法,阐述和分析了每种方法的优缺点。从液滴蒸发和燃烧特性两个方面展开综述,详细介绍了发动机替代燃料液滴的蒸发和燃烧研究进展及存在的主要问题。最后对液滴蒸发和燃烧试验研究的未来发展方向进行了展望,期望为发动机清洁高效燃烧的研究提供借鉴和参考。

**关键词:**液滴; 蒸发; 燃烧; 试验

中图分类号:TF054 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.09.001

[引用本文格式] 韦兰星,王继刚,沈钰焜,等.生物燃料液滴蒸发和燃烧试验研究进展[J].热能动力工程,2023,38(9):1-11. WEI Lan-xing, WANG Ji-gang, SHEN Yu-kun, et al. Research progress in biomass fuel droplet evaporation and combustion[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 1-11.

## Research Progress in Biomass Fuel Droplet Evaporation and Combustion

WEI Lan-xing<sup>1</sup>, WANG Ji-gang<sup>1</sup>, SHEN Yu-kun<sup>1</sup>, QIAO Xin-qi<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, China, Post Code: 225127;  
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

**Abstract:** The evaporation and combustion process of liquid fuel droplets is an important link for the engine to achieve efficient and clean combustion. This paper describes and analyzes the advantages and disadvantages of four commonly used droplet evaporation and combustion experimental methods, such as free falling method, suspension method, attachment method and fiber support method. The droplet evaporation and combustion characteristics are reviewed, and the research progress and main problems of droplet evaporation and combustion of engine alternative fuel are introduced in detail. Finally, the future development direction of droplet evaporation and combustion experiment research is prospected, which is expected to provide reference for the research of clean and efficient combustion of engine.

**Key words:** droplet, evaporation, combustion, experiment

## 引言

化石燃料枯竭和全球变暖加剧是全球面临的两大挑战性难题。化石燃料的大规模使用推动了全球

工业化和城市化进程,但同时排放出大量温室气体导致全球变暖。据统计,全球大约23%的温室气体排放来自化石燃料燃烧<sup>[1]</sup>。可再生能源利用是减少温室气体排放和确保全球气候稳定的解决方案之

收稿日期:2022-10-31; 修订日期:2022-12-19

基金项目:国家自然科学基金(52306167);江苏省自然科学基金(BK20220588)

Fund-supported Project: Natural Science Foundation of China (52306167); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20220588)

作者简介:韦兰星(2000-),女,扬州大学本科生。

通讯作者:王继刚(1991-),男,扬州大学讲师。

一<sup>[2]</sup>,近几十年来其开发和利用受到各国的高度关注。全球约 75% 的可再生能源来自于生物质,预计到 2050 年,全球能源供应的 30% 将来源于生物燃料<sup>[3-5]</sup>。小型燃气轮机、斯特林发动机、燃油锅炉、工业炉窑等动力装置每年消耗大量化石燃料,排放大量有害气体和温室气体,是全球温室气体的重要排放源之一。生物燃料在这些动力装置中的应用有利于减弱其对化石燃料的依赖并减少温室气体的排放<sup>[6-13]</sup>。

喷雾燃烧是液体燃料燃烧的主要方式,广泛应用于斯特林发动机、燃油锅炉和工业炉窑中。喷雾燃烧包括 4 个过程:喷雾形成、液滴蒸发、混合气形成及着火燃烧<sup>[14]</sup>,涉及多组分两相流动、传热传质、相变和化学反应。

为深入研究喷雾燃烧过程,需要从宏观喷雾燃烧层面和微观液滴层面来开展研究。宏观喷雾燃烧层面利用可视化测量技术或数值仿真,如 OpenFOAM, CONVERGE 和 FLUENT, 研究喷雾燃烧的整体行为,如喷雾贯穿距、喷雾锥角、喷雾组分浓度和密度场、火焰浮起高度及火焰温度场;而微观液滴层面关注喷雾形成和燃烧过程中单个或多个液滴的蒸发和着火燃烧。液滴的蒸发和燃烧与喷雾燃烧相似,都涉及移动边界效应、非稳态热传导、质量扩散、界面相平衡、辐射动力学及燃烧化学反应动力学<sup>[14]</sup>。喷雾燃烧实际上是大量液滴群的蒸发和燃烧,在喷雾与火焰交互界面必然存在液滴间的火焰传播。因此,研究液滴的蒸发、燃烧和火焰传播对于深入理解喷雾燃烧至关重要。

## 1 液滴蒸发研究

### 1.1 液滴蒸发试验方法

截至目前,在燃料液滴的蒸发试验研究中,液滴形成和进入测试环境的方法有 4 种,分别是飞滴法、悬浮法、依附法和悬挂法。

#### 1.1.1 飞滴法

飞滴法的测量过程是利用液滴生成器(一般是压电式)喷射出液滴串(初始液滴直径几乎相同)让其自由下落,通过改变高速相机的高度,拍摄不同时刻不同液滴的图像,然后按先后顺序排列,展现液滴的蒸发过程。北京理工大学韩恺课题组搭建了基于

飞滴法的液滴蒸发试验装置<sup>[15]</sup>,如图 1 所示。其优点是产生的液滴接近球形,直径较小,不受悬挂丝的影响,蒸发环境接近实际喷雾环境。缺点是拍摄的液滴序列图像并非同一液滴的变化过程,给蒸发过程中液滴的变形和破碎研究带来不便。此外,液滴蒸发的时间一般较长,低温下定容弹高度需要很高才能使液滴完全蒸发,因此该方法适合研究高温环境下液滴的蒸发。

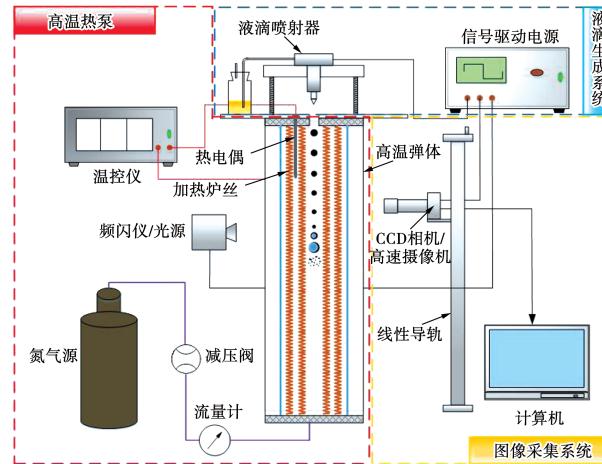


图 1 基于飞滴法的液滴蒸发试验装置<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Droplet vaporization testing apparatus<sup>[15]</sup>  
based on free falling method

#### 1.1.2 悬浮法

悬浮法利用超声悬浮法和 Leidenfrost 悬浮法将液滴悬浮于空中进行蒸发。超声悬浮法将液滴悬浮于空气中不与任何物体接触,解决了飞滴法中液滴无法在空中悬停的问题,但超声悬浮法对温度特别敏感,无法研究高温环境下液滴的蒸发特性。Tuckermann 等人<sup>[16]</sup>利用超声悬浮法研究了乙醇、正己醇、正己烷和二氯甲烷液滴的常温蒸发特性。Zaitone 等人<sup>[17]</sup>通过试验研究发现,超声悬浮法对液滴的蒸发会产生抑制作用,这是因为外部声流降低了液滴的传热和传质。但是,Saha 等人<sup>[18]</sup>采用该方法研究菜籽油甲酯的蒸发特性时发现,超声悬浮法对液滴蒸发产生的影响在一定温度范围内可忽略。

另一种悬浮法是利用 Leidenfrost 现象悬浮液滴。Khan 等人<sup>[19]</sup>搭建了基于 Leidenfrost 现象的液滴蒸发试验装置,研究了石化柴油 - 水乳化油液滴

的蒸发特性。Espinosa 等人<sup>[20]</sup>利用该方法研究了菜籽油-水乳化油液滴的蒸发特性。该方法保证了蒸发过程中液滴不与其他物体接触,液滴为标准球形,但 Leidenfrost 悬浮中液滴距离地板的高度非常小,因此液滴所处环境的温度梯度较大。尽管任何液体都有 1 个 Leidenfrost 温度(例如水的沸点 100 °C,Leidenfrost 温度点为 193 °C),但是不同液体的 Leidenfrost 温度点非常高(远高于沸点),而且相差非常大,因此该方法只能研究超高温下液滴的蒸发。

### 1.1.3 依附法

依附法将 1 个液滴放置于高温的金属或金属氧化物表面,通过测量液滴接触角和液滴等效直径来研究液滴蒸发特性。Lu 等人<sup>[21]</sup>利用依附法研究低温下液滴的蒸发特性发现,马兰戈尼对流和自然对流同时促进了液滴的蒸发。孙潮等人<sup>[22]</sup>利用该方法研究了纳米流体燃料液滴的蒸发特性。该方法适用于研究喷雾碰壁液滴的蒸发,不适用于研究空气中液滴的蒸发。

### 1.1.4 悬挂法

悬挂法是将液滴悬挂于超细热电偶、石英丝、SiC 丝或陶瓷丝上进行蒸发试验。该方法的缺点在于微细悬挂丝会改变液滴的形状,会对液滴的蒸发产生影响;优点在于可观察到液滴完整的蒸发、变形和破碎过程,还可以利用热电偶测量液滴的温度。

美国普渡大学 Gan 等人<sup>[23]</sup>搭建了基于悬挂法的液滴蒸发试验装置,如图 2 所示。该装置可同时研究环境温度和气流速度对液滴蒸发的影响,其不足在于气流的温度一般较低,只能研究低温环境下液滴的蒸发。首先将液滴悬挂于定容弹内的悬挂丝上,将加热后的氮气以一定的速度通入定容弹,形成高温对流环境。Subbarayan 等人<sup>[24]</sup>和 Manjunath 等人<sup>[25]</sup>搭建的试验装置与该装置相似。加拿大曼尼托巴大学 Birouk 教授课题组搭建了湍流环境下液滴的蒸发试验装置<sup>[26]</sup>,如图 3 所示。该装置利用 8 个两两正对风扇来产生均匀各向同性湍流,可同时研究环境温度、环境压力和湍流对液滴蒸发的影响,不足在于环境温度太低(低于 200 °C)。此外,Patel

等人<sup>[27]</sup>利用 6 个两两正对的音响来产生均匀各向同性湍流,也建立了湍流环境下液滴的蒸发试验装置。

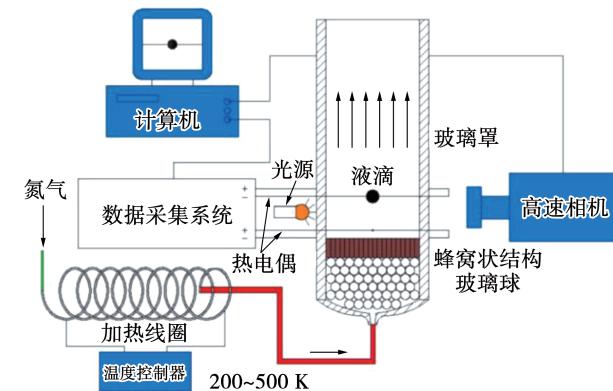


图 2 美国普渡大学液滴蒸发试验装置<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Droplet vaporization testing apparatus of Purdue University<sup>[23]</sup>

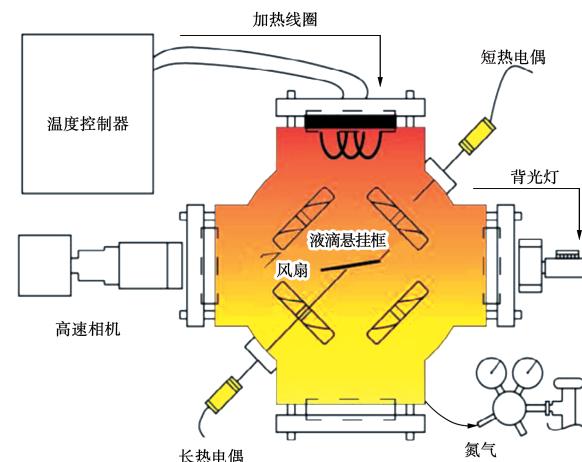
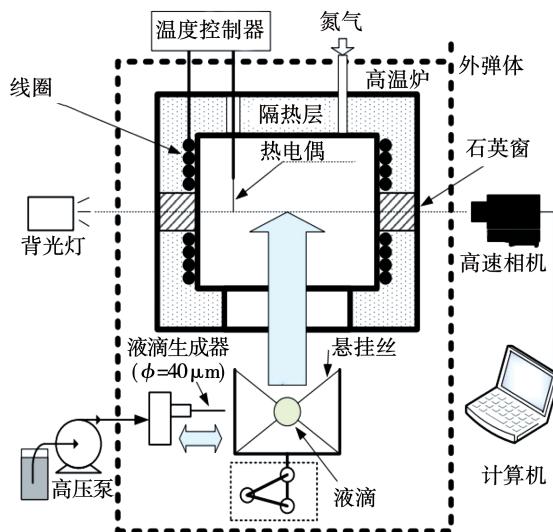


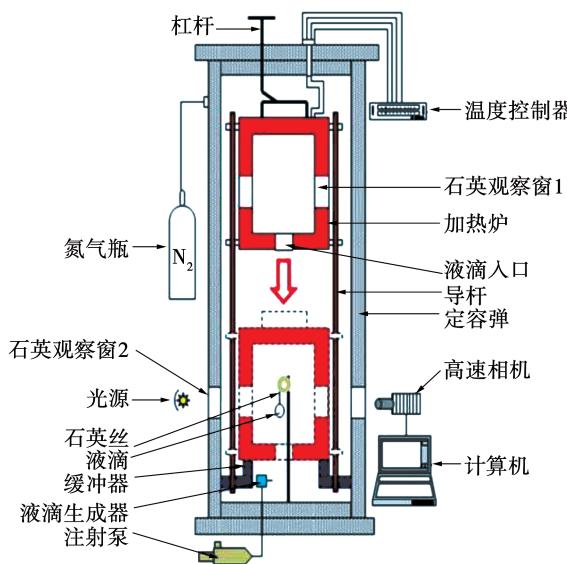
图 3 加拿大曼尼托巴大学液滴蒸发试验装置<sup>[26]</sup>

Fig. 3 Droplet vaporization testing apparatus of University of Manitoba<sup>[26]</sup>

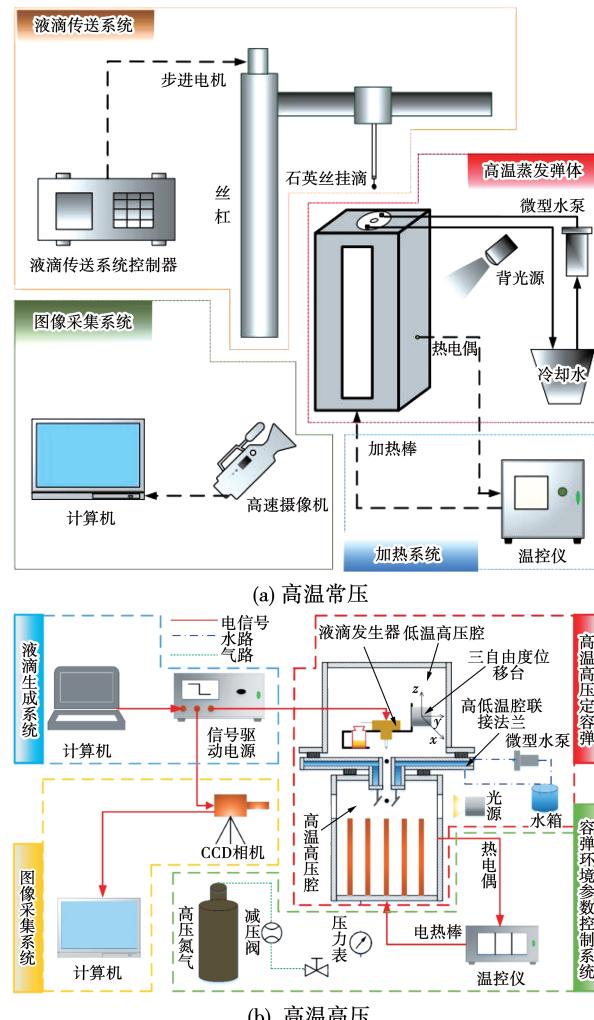
日本大学野村浩司教授课题组搭建了基于悬挂法的高温高压液滴蒸发试验装置<sup>[28]</sup>,如图 4 所示。该装置可实现环境温度 400 ~ 900 K,环境压力 0.1 ~ 5 MPa。将 1 个高温炉置于高压定容弹内,在高压定容弹低温区域产生液滴,通过驱动模块将液滴送入高温炉内,在高温炉内实现高温高压环境,设置两对正对的石英玻璃窗口用于拍摄液滴图像。其不足在于液滴悬挂困难,重复性较差。

图 4 日本大学液滴蒸发试验装置<sup>[28]</sup>Fig. 4 Droplet vaporization testing apparatus of Nihon University<sup>[28]</sup>

韩国科学技术院白承旭教授课题组也搭建了基于悬挂法的高温高压蒸发试验装置<sup>[29]</sup>,如图 5 所示。该装置也采用在高压定容弹内放置高温炉的方法实现高温高压环境。与日本大学的装置不同之处在于液滴静止不动,通过移动高温炉使液滴处于高温环境,避免了移动液滴造成的振动。

图 5 韩国科学技术院液滴蒸发试验装置<sup>[29]</sup>Fig. 5 Droplet vaporization testing apparatus of Korea Advanced Institute of Science and Technology<sup>[29]</sup>

法的高温常压和高温高压液滴蒸发试验装置<sup>[30]</sup>,如图 6 所示。在高温常压试验装置中,利用 5 根加热棒来加热高温炉,通过步进电机 - 丝杠装置将液滴移动至目标位置进而用高速相机拍摄液滴图像。在高温高压试验装置中,将悬挂丝置于高压定容弹的高温区域,在高压定容弹的低温区域产生自由下落的液滴,通过调节三自由度位移平台使下落的液滴正好滴落在悬挂丝交叉点处。该方法的优点是解决了高压试验中液滴悬挂困难的问题,缺点是悬挂丝太粗太多(3 根交叉石英丝),会加热液滴产生气泡,改变液滴的蒸发规律。而且悬挂丝在高压定容弹的高温区域,瞬间滴落液滴于悬挂丝上会产生由 Leidenfrost 效应引起的气泡。

图 6 北京理工大学液滴蒸发试验装置<sup>[30]</sup>Fig. 6 Droplet vaporization testing apparatus of Beijing Institute of Technology<sup>[30]</sup>

北京理工大学韩恺课题组先后搭建了基于悬挂

除上述单位外,华中科技大学张郁等人<sup>[31]</sup>、西北工业大学靳乐等人<sup>[32]</sup>、台湾成功大学 Hsieh 等人<sup>[33]</sup>、日本东北大学 Watanabe 等人<sup>[34]</sup>、解放军装备学院刘松等人<sup>[35]</sup>、合肥工业大学钱叶剑等人<sup>[36]</sup>、大连理工大学冯立岩等人<sup>[37]</sup>、北京航空航天大学王方等人<sup>[38]</sup>和天津大学王天佑等人<sup>[39]</sup>均搭建了基于悬挂法的液滴蒸发试验装置,其原理与北京理工大学的相似。

## 1.2 液滴蒸发特性

液滴蒸发是液滴燃烧过程的重要组成部分,是深入理解喷雾燃烧的基础。目前,对液滴蒸发特性的研究主要集中于烷烃、石化柴油、生物柴油、乳化油、纳米流体燃料和混合燃料,且主要针对单液滴。

### 1.2.1 烷烃

对于标准球形液滴,在经历短暂的初始膨胀后,液滴直径只取决于液滴的表面蒸发速率,液滴归一化直径平方( $d/d_0$ )<sup>2</sup>随标准化时间  $t/d_0^2$  线性递减,这就是著名的  $d^2$  定律<sup>[40]</sup>:

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)^2 = 1 - K \frac{t}{d_0^2}$$

式中: $d$ —液滴直径; $t$ —时间; $d_0$ —初始液滴直径; $K$ —蒸发速率常数。

液滴蒸发研究最早关注的是单组分的烷烃,如正庚烷、壬烷、正十二烷、正十四烷和正十六烷等,这是因为单组分烷烃蒸发不存在组分间的相互影响。Law 等人<sup>[40]</sup>研究了单组分烷烃单液滴的蒸发特性,结果表明,液滴的归一化直径平方与标准化时间成线性关系( $d^2$  定律)。野村浩司<sup>[28]</sup>试验研究正庚烷液滴的蒸发特性发现,正庚烷液滴蒸发初期会出现短暂的膨胀阶段,之后归一化液滴直径平方才服从  $d^2$  定律。这是由液滴进入高温环境后膨胀引起的,该结论与 Daif 等人<sup>[41]</sup>的研究完全相符。

单组分烷烃单液滴的蒸发特性主要有:随环境温度的升高液滴蒸发速率显著增加;当环境压力低于燃料的临界压力时,液滴的蒸发速率随环境压力的增加而增大;当环境压力高于燃料的临界压力时,液滴蒸发速率随环境压力的升高而降低,在临界压力时达到最大<sup>[42]</sup>。Birouk 等人<sup>[43]</sup>的研究表明,只有在低温和低压环境下湍流强度越大液滴蒸发越

快;在湍流环境下,液滴的蒸发速率随着初始液滴直径的增大而增大,但是在无湍流环境,初始液滴直径对液滴的蒸发速率影响很小<sup>[44]</sup>。

### 1.2.2 石化柴油与生物柴油

石化柴油和生物柴油液滴的蒸发特性与单组分烷烃相似,因为石化柴油和生物柴油中组分之间的沸点差异较小,蒸发过程液滴的归一化直径平方与标准化时间近似服从  $d^2$  定律。生物柴油液滴在蒸发初期的膨胀幅度要比烷烃大,这是由脂肪酸甲酯分子间的间距决定的<sup>[18,45]</sup>。

### 1.2.3 乳化油

乳化油液滴蒸发过程中会发生强烈的微爆<sup>[33~34, 46]</sup>,其蒸发与烷烃、石化柴油和生物柴油完全不同,不再服从  $d^2$  定律,蒸发过程很复杂,存在气泡的成核、聚合和破碎。目前对乳化油单液滴蒸发特性的研究还存在较多空白:(1) 微气泡的成核机理。乳化油液滴蒸发过程中水会过热产生微气泡,但是对于微气泡成核的位置尚不清楚;(2) 气泡的振动。液滴内部出现气泡后,在内部环流和马兰戈尼对流的影响下气泡会在液滴内部运动,导致液滴产生振动,但是对振动的频率和幅值研究很少;(3) 液滴内气泡的破碎机理。当气泡内部压力足够高时便会冲破液滴表面张力发生破裂,对于破裂的形式、强度及子液滴的直径和速度分布研究较少,微爆参数服从的概率分布不清楚。

### 1.2.4 纳米流体燃料

纳米流体燃料是将金属或非金属纳米粒子(1~100 nm)均匀分散到液体燃料中,形成均匀、稳定的高导热率和高能量密度燃料。Gan 等人<sup>[23]</sup>研究发现,纳米流体燃料液滴的蒸发仍然遵从  $d^2$  定律,纳米粒子能促进液滴的蒸发。Javed 等人<sup>[47]</sup>研究发现,纳米流体燃料在低温下会抑制液滴的蒸发,但在高温下会加快液滴的蒸发。因为在低温下纳米粒子会在液滴表面形成 1 个包裹球壳,抑制了燃料向外扩散;但在高温下,液滴内部纳米粒子会成为非均相成核位点,并形成气泡,最终使得液滴发生微爆。王继刚<sup>[48]</sup>发现,在高温下液滴微爆强度随纳米粒子浓度的增加而增大,蒸发加快;在低温下蒸发随纳米粒子浓度的增加而减缓,同时也发现纳米粒子可以导致液滴发生微爆。

### 1.2.5 混合燃料

混合燃料的种类非常多,主要是由不同物性的燃料混合而成,如石化柴油-生物柴油、石化柴油-乙醇、生物柴油-丁醇、润滑油-汽油及石化柴油-ABE(Acetone-butanol-ethanol)等。与乳化油类似,沸点差异性较大的混合燃料液滴在蒸发过程中存在明显的微爆。一般燃料的沸点均高于水,因此混合燃料液滴的微爆强度低于乳化油,其蒸发过程较复杂,一般包括3个阶段:初始膨胀、微爆蒸发和平衡蒸发阶段,在平衡蒸发阶段近似服从 $d^2$ 定律<sup>[31]</sup>。

## 2 液滴燃烧研究

### 2.1 液滴燃烧试验方法

液滴燃烧的试验中,液滴形成和进入测试环境的方法主要有3种:多孔球法、飞滴法和悬挂法,其中飞滴法和悬挂法与液滴蒸发试验中的情况相似。

#### 2.1.1 多孔球法

多孔球法是将液体燃料连续注入1个带有多个小孔的金属球内部,让金属球表面一直保持润湿状态然后点燃,用金属球的大小来近似代替液滴大小的方法。优点在于结构简单,易于控制,缺点在于金属球加工难度较大。该方法中,液滴直径较大(一般大于3 mm),只适合研究液滴的稳态燃烧特性。Senthil等人<sup>[49]</sup>利用该装置研究了甲醇液滴(液滴直径10~12 mm)的稳态燃烧特性,试验装置如图7所示。该方法的局限性太大,因此很少使用。

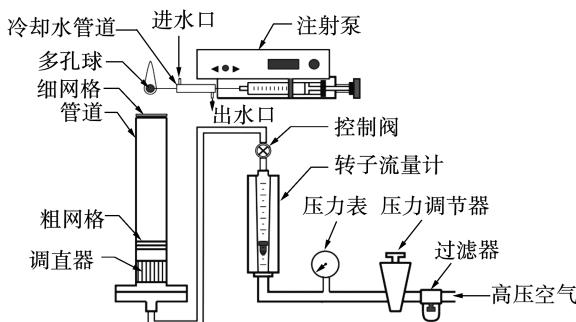


图 7 基于多孔球法的液滴燃烧试验装置<sup>[49]</sup>

Fig. 7 Droplet combustion testing apparatus based

on porous ball method<sup>[49]</sup>

#### 2.1.2 飞滴法

在液滴燃烧试验研究中,飞滴法使用很广泛,由于高压下试验技术不成熟,目前大多数试验均在常

压下进行。西班牙萨拉戈萨大学 Ballester 教授课题组搭建了基于飞滴法的液滴燃烧试验装置<sup>[50]</sup>。设计了可以连续生成直径相同液滴的压电式液滴生成器,液滴从喷嘴喷出后迅速被平面火焰燃烧器点燃,并在下落过程中燃烧,利用高速相机分别拍摄液滴和火焰形貌。北京理工大学韩恺课题组也搭建了基于飞滴法的液滴燃烧试验装置<sup>[51]</sup>,该装置与西班牙萨拉戈萨大学的原理基本相同,试验装置更加简洁,操作方便。此外,美国肯塔基大学 Li 等人<sup>[52]</sup>、美国马里兰大学 Guerieri 等人<sup>[53]</sup>和美国新泽西州立大学 Xiong 等人<sup>[54]</sup>均搭建了基于飞滴法的液滴燃烧试验装置。

#### 2.1.3 悬挂法

基于悬挂法的液滴燃烧试验装置有两种:一种是悬挂液滴在高温环境中自燃,其试验装置与液滴蒸发试验的相似,只需将环境气体变为空气;另一种是悬挂液滴被点火器点燃,其试验装置液滴与蒸发装置不同,因为点燃液滴不需要高温环境,因此只需要将液滴悬挂于定容弹内,然后利用电极、热丝、激光或火焰点燃,试验装置比较简单。该方法的优点在于可研究高温高压和微重力环境液滴的燃烧,而且方便研究多液滴的燃烧。美国爱荷华大学 Ghamari 等人<sup>[55]</sup>搭建了基于悬挂法的常压液滴燃烧试验装置,如图8所示。该装置将液滴悬挂于3根SiC纤维丝交叉点上,利用一对电极点燃液滴,用高速相机拍摄液滴和火焰的图像。美国康奈尔大学 Avedisian 教授课题组搭建了基于悬挂法的常压液滴燃烧试验装置<sup>[56]</sup>;该装置利用两根 SiC 纤维丝悬挂液滴,并用两对电极来点燃液滴。

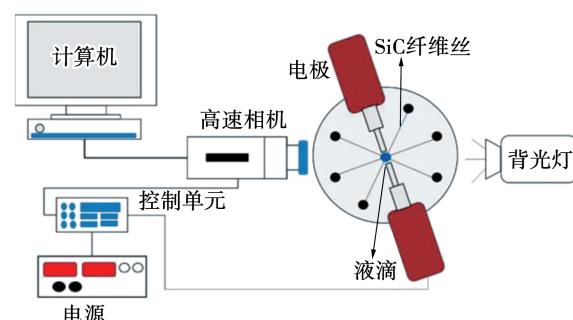


图 8 基于悬挂法的液滴燃烧试验装置<sup>[55]</sup>

Fig. 8 Droplet combustion testing apparatus based

on fiber support method<sup>[55]</sup>

除上述单位外,中国科学院大学崔彦玲等人<sup>[57]</sup>、中国科学技术大学孟柯生等人<sup>[58]</sup>、天津大学王登峰等人<sup>[59]</sup>、浙江大学 Liu 等人<sup>[60]</sup>、英国谢菲尔德大学 Faik 等人<sup>[61]</sup>、印度理工学院 Rao 等人<sup>[62]</sup>和印度科学院 Pandey 等人<sup>[63]</sup>均搭建了基于悬挂法的液滴燃烧试验装置。

## 2.2 液滴燃烧特性

液滴的燃烧涉及两相流动、传热传质、相变和化学反应,对于多组分燃料液滴,其蒸发过程有可能还涉及气泡的成核、聚合、增长和破碎。液滴的燃烧分为稳态燃烧和微爆燃烧。

### 2.2.1 稳态燃烧

稳态燃烧过程液滴液相和火焰比较稳定,不发生明显的变形,例如烷烃、醇类、石化柴油、煤油和生物柴油液滴的燃烧过程。稳态燃烧一般包括两个阶段:初始膨胀和平衡燃烧阶段。这些燃料液滴的燃烧过程比较平稳,在平衡燃烧阶段,液滴的归一化直径平方( $d/d_0$ )<sup>2</sup>与标准化时间  $t/d_0$ <sup>2</sup>成线性关系( $d^2$ 定律)<sup>[40]</sup>。

Xu 等人<sup>[64]</sup>研究了异辛烷单液滴的稳态燃烧特性,结果表明,随液滴初始直径的增加其燃烧速率也会增加,火焰平衡比随液滴初始直径的增加而减小。Dzik 等人<sup>[65]</sup>研究微重力下正庚烷单液滴在二氧化碳氛围下的燃烧特性发现,在微重力条件下,二氧化碳浓度的增加会导致液滴燃烧速率增大,这与常规重力下的结论相反。Singh 等人<sup>[66]</sup>研究了乙炔炭黑对生物柴油和石化柴油单液滴燃烧特性的影响,结果表明,加入乙炔炭黑后,生物柴油和石化柴油液滴的着火延迟分别增加了 10% 和 8%,燃烧速率分别下降了 13% 和 1.5%。崔彦玲等人<sup>[57]</sup>研究激光和热丝两种点火方式对石化柴油、乙醇和丁醇单液滴燃烧特性的影响发现,热丝点火对液滴燃烧的扰动比较剧烈,激光点火的响应速度较快,因此对液滴燃烧的影响较小。MIKAMI 等人<sup>[67]</sup>研究火焰在水平排列正葵烷多液滴(液滴阵列)间的传播特性发现,火焰在液滴阵列间呈现 3 种传播模式,在液滴间距较小时平均火焰传播速度存在 1 个峰值,之后逐渐减小。野村浩司等人<sup>[68]</sup>研究了水平排列正葵烷多液滴(液滴阵列)的燃烧和火焰传播特性,结果表

明,液滴的着火延迟随环境可燃气体当量比的增大略有减小;当无量纲液滴间距  $S/d_0$  达到 12.75 时着火延迟是影响火焰诱导时间的关键因素。

### 2.2.2 微爆燃烧

微爆燃烧不遵循经典  $d^2$  定律,一般认为燃烧过程划分为 3 个阶段:初始膨胀、微爆燃烧和平衡燃烧阶段。初始膨胀和平衡燃烧阶段的特性与稳态燃烧相似,微爆燃烧阶段由于发生持续的吹吸、喷气和微爆现象,液滴发生较大的振动,而且微爆会产生较多子液滴。

Pandey 等人<sup>[69]</sup>研究了纳米流体燃料单液滴的微爆特性,分析了液滴振动的原因,同时对液滴内部气泡破裂的机理进行了分析,结果表明,液滴内部的气泡形成后会在液滴内部旋转和移动,当气泡内部压力足够大时会冲破液膜形成凹坑将液滴吹出去。天津大学王登峰<sup>[59]</sup>研究了石化柴油-ABE 混合燃料单液滴的微爆燃烧特性,对液滴的着火延迟和火焰特性进行分析发现,微爆的发生使得火焰高度和宽度大幅增加,并出现不稳定,但是没有研究液滴的液相特性。北京理工大学韩恺等人<sup>[70]</sup>利用飞滴法研究石化柴油-ABE 混合燃料液滴的微爆燃烧特性发现,在一定范围内,随 ABE 含量的增加,液滴微爆强度明显增大,证明了微小液滴在燃烧过程中同样会发生微爆。华中科技大学张郁等人<sup>[31]</sup>研究生物柴油-丁醇混合燃料单液滴的燃烧特性发现,混合燃料液滴在燃烧过程中主要以吹吸为主,定义了相似度和变形度的概念,研究了液滴燃烧过程中的变形,并对着火延迟和液滴温度进行了分析。Yang 等人<sup>[71]</sup>研究发现,生物油-煤油混合燃料单液滴在燃烧过程中同样会发生微爆,但微爆发生在液滴燃烧末期。通过分析认为,液滴微爆是由生物油裂解产生的低沸点组分和煤油中的低沸点组分引起的。Rao 等人<sup>[62]</sup>研究了正十四烷和乙醇混合燃料单液滴的微爆燃烧特性,结果表明,液滴燃烧过程会出现树冠状形态,从而使整个液滴破碎,树冠的形成有效促进了液滴的燃烧,通过高速摄影发现微爆中火焰的面积随着子液滴的喷射大幅度增加。此外,Rao 等人<sup>[72]</sup>还研究了航空煤油-乙醇混合燃料单液滴的微爆动力学特性,包括气泡成核、气泡增长、微爆

以及子液滴的直径和速度。

### 3 结论与展望

本文综述了当前世界范围内液滴蒸发燃烧的试验研究最新进展,从液滴蒸发燃烧试验方法和蒸发燃烧特性两个角度展开综述,分析了研究进展、研究热点和存在的不足,并提出展望。液滴蒸发研究中,悬挂法是目前最常用的方法;高温高压下液滴蒸发试验装置的技术不成熟,重复性难以保证,因此试验研究中主要以常压为主。液滴燃烧研究中,飞滴法和悬挂法是液滴燃烧试验研究中最常用的方法,且研究主要以常压为主。目前存在的不足主要有:

(1) 目前液滴蒸发研究以单组分和多组分燃料液滴的稳态蒸发研究为主,微爆蒸发研究较少。液滴蒸发过程中出现的微爆十分复杂,微爆蒸发与稳态蒸发具有完全不同的特性,其蒸发规律尚无统一的结论,而且对于液滴内部微气泡的成核、增长和破碎研究很少。此外,环境属性和燃料属性对液滴的蒸发有复杂的耦合作用,但对液滴蒸发的影响规律未被揭示,尤其是微爆蒸发方面。

(2) 微爆燃烧是从燃料方面提高燃烧效率的有效手段,是近年的研究热点。但是环境属性和燃料属性对液滴微爆燃烧的影响规律仍未被揭示,针对微爆燃烧过程中的火焰特性、燃烧特性、微爆特性以及微爆参数服从的概率分布研究很少。此外,液滴的燃烧研究主要以常压单液滴为主,针对多液滴的火焰传播、燃烧及相互影响缺乏研究。

### 参考文献:

- [1] JHANG S R, LIN Y C, CHEN K S, et al. Evaluation of fuel consumption, pollutant emissions and well-to-wheel GHGs assessment from a vehicle operation fueled with bioethanol, gasoline and hydrogen [J]. Energy, 2020, 209: 118436.
- [2] DOCAN E, SEKER F. The influence of real output, renewable and non-renewable energy, trade and financial development on carbon emissions in the top renewable energy countries [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 1074 – 1085.
- [3] HOSSAIN A K, DAVIES P A. Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines – a review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 21: 165 – 189.
- [4] GUO M, SONG W, BUHAIN J. Bioenergy and biofuels: history sta-
- tus and perspective [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 712 – 725.
- [5] British Petroleum. Statistical review of world energy – 69th edition [EB/OL]. [2021 – 01 – 29]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/oil.html>.
- [6] BARSALI S, DE MARCO A, GIGLIOLI R, et al. Dynamic modelling of biomass power plant using micro gas turbine [J]. Renewable Energy, 2015, 80: 806 – 818.
- [7] HOXIE A, ANDERSON M. Evaluating high volume blends of vegetable oil in micro-gas turbine engines [J]. Renewable Energy, 2017, 101: 886 – 893.
- [8] THAPA S, INDRAWAN N, BHOI P R. An overview on fuel properties and prospects of Jatropha biodiesel as fuel for engines [J]. Environmental Technology & Innovation, 2018, 9: 210 – 219.
- [9] SUBRAMANIAM Y, MASRON T A, AZMAN N H N. Biofuels, environmental sustainability, and food security: a review of 51 countries [J]. Energy Research & Social Science, 2020, 68: 101549.
- [10] DWIVEDIN G, SHARMA M P. Potential and limitation of straight vegetable oils as engine fuel – an Indian perspective [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33: 316 – 322.
- [11] MISRA R D, MURTHY M S. Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine – a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 3005 – 3013.
- [12] AKINYEMIA O S, JIANG L. Development and combustion characterization of a novel twin-fluid fuel injector in a swirl-stabilized gas turbine burner operating on straight vegetable oil [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 102: 279 – 290.
- [13] MAT S C, IDROASA M Y, HAMID M F, et al. Performance and emissions of straight vegetable oils and its blends as a fuel in diesel engine: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 808 – 823.
- [14] WARNATZ J, MAAS U, DIBBLE R W. Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation [M]. Berlin: Springer, 2006.
- [15] 庞博. 多组分燃油液滴微爆特性及影响规律研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2019.
- PANG Bo. Study on micro-explosion characteristics and its influence for multi-component fuel droplets [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019.
- [16] TUCKERMANN R, BAUERECKER S, CAMMENGA H K. IR-thermography of evaporating acoustically levitated drops [J]. International Journal of Thermophysics, 2005, 26(5): 1583 – 1594.
- [17] ZAITONE B A A, TROPEA C. Evaporation of pure liquid droplets: comparison of droplet evaporation in an acoustic field versus

- glass-filament [ J ]. Chemical Engineering Science, 2011, 66: 3914 – 3921.
- [18] SAHA A, KUMAR R, BASU S. Infrared thermography and numerical study of vaporization characteristics of pure and blended biofuel droplets [ J ]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53: 3862 – 3873.
- [19] KHAN M Y, KARIM Z A A, AZIZ A R A, et al. Experimental investigation of microexplosion occurrence in water in diesel emulsion droplets during the Leidenfrost effect [ J ]. Energy and Fuels, 2014, 28: 7079 – 7084.
- [20] MELO-ESPINOSA E A, BELLETTRE J, TARLET D, et al. Experimental investigation on puffing and micro-explosion occurrence of water in rapeseed oil emulsions droplets: effect of the surfactant concentration [ C ]// Valencia, Spain: 28th European Conference on Liquid Atomization and Spray System, 2017.
- [21] LU G, DUAN Y Y, WANG X D. Internal flow in evaporating droplet on heated solid surface [ J ]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54: 4437 – 4444.
- [22] 孙潮, 梅德清, 徐行, 等. 水平板上固着碳纳米管燃油液滴的蒸发特性 [ J ]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(2): 234 – 240.  
SUN Chao, MEI De-qing, XU Xing, et al. Evaporation characteristics of sessile droplet for fuel with CNT on a heated substrate [ J ]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(2): 234 – 240.
- [23] GAN Y, 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: 4913 – 4922.
- [24] SUBBARAYAN M R, SENTHIL KUMAAR J S, ANANTHA PADMANABAN M R. Experimental investigation of evaporation rate and exhaust emissions of diesel engine fuelled with cotton seed methyl ester and its blend with petro-diesel [ J ]. Transportation Research, Part D: Transport and Environment, 2016, 48: 369 – 377.
- [25] MANJUNATH M, PRAKASH P, RAGHAVAN V, et al. Composition effects on thermo-physical properties and evaporation of suspended droplets of biodiesel fuels [ J ]. SAE International, 2014, 7(3): 833 – 841.
- [26] VERWEY C, BIROUK M. 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.
- [27] PATEL U, SAHU S. Effect of air turbulence and fuel composition on bi-component droplet evaporation [ J ]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 757 – 768.
- [28] NOMURA H. Evaporation of fuel droplets in subcritical and supercritical atmospheres [ D ]. Tokyo: The University of Tokyo, 1996.
- [29] HWANG C H, BAEK S W, CHO S J. Experimental investigation of decomposition and evaporation characteristics of HAN-based monopropellants [ J ]. Combustion and Flame, 2014, 161: 1109 – 1116.
- [30] HAN K, PANG B, ZHAO C, et al. An experimental study of the puffing and evaporation characteristics of acetone-butanol-ethanol (ABE) and diesel blend droplets [ J ]. Energy, 2019, 183: 331 – 340.
- [31] ZHANG Y, HUANG R, HUANG Y, et al. Effect of ambient temperature on the puffing characteristics of single butanol-hexadecane droplet [ J ]. Energy, 2018, 145: 430 – 441.
- [32] 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 – 275.  
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 – 275.
- [33] HSIEH W D, CHEN R H, CHENA C W, et al. Micro-explosion of a water-in-hexadecane compound drop [ J ]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2012, 35(5): 579 – 587.
- [34] WATANABE H, HARADA T, MATSUSHITA Y, et al. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel [ J ]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52: 3676 – 3684.
- [35] 刘松, 聂万胜, 苏凌宇, 等. 高温高压环境下煤油液滴蒸发过程实验研究 [ J ]. 火箭推进, 2017, 43(2): 25 – 31, 39.  
LIU Song, NIE Wan-sheng, SU Ling-yu, 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 – 31, 39.
- [36] QIAN Y, ZHAO P, TAO C, et al. Experimental study on evaporation characteristics of lubricating oil/gasoline blended droplet [ J ]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 103: 99 – 107.
- [37] 冯立岩, 刘超, 吴瑶, 等. 船用主机气缸润滑油蒸发特性研究 [ J ]. 哈尔滨工程大学学报, 2018(1): 1 – 6.  
FENG Li-yan, LIU Chao, WU Yao, et al. The evaporation behavior of cylinder lube oil of marine engines [ J ]. Journal of Harbin Engineering University, 2018(1): 1 – 6.
- [38] 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 Xue-zhi, et al. Evaporation law of kerosene single droplet in relative stationary and convection environment [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017, 23(6): 485–491.
- [39] SHEN S, SUN K, CHE Z, et al. An experimental investigation of the heating behaviors of droplets of emulsified fuels at high temperature [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 161: 114059.
- [40] LAW C K. Recent advances in droplet vaporization and combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1982, 8: 171–201.
- [41] DAIF A, BOUAZIZ M, CHESNEAU X, et al. Comparison of multicomponent fuel droplet vaporization experiments in forced convection with the Sirignano model [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1999, 18: 282–290.
- [42] NOMURA H, MURAKOSHI T, SUGANUMA Y, et al. Microgravity experiments of fuel droplet evaporation in sub and supercritical environments [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36: 2425–2432.
- [43] BIROUK M, FABBRO S C. Droplet evaporation in a turbulent atmosphere at elevated pressure – experimental data [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34: 1577–1584.
- [44] VERWEY C, BIROUK M. Experimental investigation of the effect of droplet size on the vaporization process in ambient turbulence [J]. Combustion and Flame, 2017, 182: 288–297.
- [45] MANJUNATH M, RAGHAVAN V, MEHTA P S. 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.
- [46] MOROZUMI Y, SAITO Y. Effect of physical properties on micro-explosion occurrence in water-in-oil emulsion droplets [J]. Energy and Fuels, 2010, 24: 1854–1859.
- [47] JAVED I, BAEK S W, WAHEED K, et al. Evaporation characteristics of kerosene droplets with dilute concentrations of ligand-protected aluminum nanoparticles at elevated temperatures [J]. Combustion and Flame, 2013, 160: 2955–2963.
- [48] 王继刚. 纳米流体燃油液滴蒸发特性及微爆机理研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- WANG Ji-gang. Research on evaporation characteristics and micro-explosion mechanism of nanofluid fuel droplets [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018.
- [49] SENTHIL KUMAR P, RAGHAVAN V, SUNDARARAJAN T. Experimental study of burning of methanol fed porous spheres in grid generated turbulent field [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114: 354–362.
- [50] MUELAS Á, CALLÉN M S, MURILLO R, et al. Production and droplet combustion characteristics of waste tire pyrolysis oil [J]. Fuel Processing Technology, 2019, 196: 106149.
- [51] 杨波. 苄基叠氮复合柴油单液滴燃烧特性试验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- YANG Bo. Experimental study on the combustion characteristics of benzyl azides-diesel blend droplet [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [52] LI T X, ZHU D L, AKAFUAH N K, et al. Synthesis, droplet combustion, and sooting characteristics of biodiesel produced from waste vegetable oils [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 2039–2046.
- [53] GUERIERI P M, JACOB R J, DELISIO J B, et al. Stabilized nanoparticle aggregates of oxygen-containing nanoparticles in kerosene for enhanced droplet combustion [J]. Combustion and Flame, 2018, 187: 77–86.
- [54] XIONG G, GANDHI R, ZHONG X, et al. Binary collision of a burning droplet and a non-burning droplet of xylene: outcome regimes and flame dynamics [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3): 3345–3352.
- [55] GHAMARI M. An experimental examination of combustion of isolated liquid fuel droplets with polymeric and nanoparticle additives [D]. Iowa: The University of Iowa, 2016.
- [56] LIU Y C. Droplet combustion of surrogate and fuel systems in a low convection condition: ground-based and spacing based experiments [D]. Cornell: Cornell University, 2013.
- [57] 崔彦玲. 单液滴和金属铝颗粒的燃烧特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- CUI Yan-ling. Study on the combustion characteristics of single droplet and aluminum particles [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [58] 孟柯生. 生物柴油及其混合燃料的微爆特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- MENG Ke-sheng. Study on micro-explosion characteristics of biodiesel and its blended fuel [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [59] 王登峰. 基于单滴油燃烧平台对 ABE 柴油燃烧特性的实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- WANG Deng-feng. Investigation on characteristics of combustion of acetone-butanol-ethanol and diesel based on single droplet combustion rig [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [60] LIU J Z, CHEN B H, WU T T, et al. Ignition and combustion characteristics and agglomerate evolution mechanism of aluminum in nAl/JP-10 nanofluid fuel [J]. Journal of Thermal Analysis and

Calorimetry,2019,137(4):1369–1379.

- [61] FAIK A M D,ZHANG Y. Multicomponent fuel droplet combustion investigation using magnified high speed backlighting and shadowgraph imaging [J]. Fuel,2018,221:89–109.
- [62] RAO D C K,KARMAKAR S. Crown formation and atomization in burning multi-component fuel droplets [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2018,98:303–308.
- [63] PANDEY K,BASU S. How boiling happens in nanofuel droplets [J]. Physics of Fluids,2018,30:107103.
- [64] XU Y H,HICKS M C,AVEDISIAN C T. The combustion of iso-octane droplets with initial diameters from 0.5 to 5 mm; effects on burning rate and flame extinction [J]. Proceedings of the Combustion Institute,2017,36:2541–2548.
- [65] DZIK J,NAYAGAM V,WILLIAMS F A. Ignition and combustion of n-heptane droplets in carbon dioxide enriched environments [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2010,37:221–225.
- [66] SINGH G,ESMAEILPOURB M,RATNER A. The effect of acetylene black on droplet combustion and flame regime of petro-diesel and soy biodiesel [J]. Fuel,2019,246:108–116.
- [67] MIKAMI M,OYAGI H,KOJIMA N,et al. Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays at high tempera-

tures[J]. Combustion and Flame,2006,146:391–406.

- [68] NOMURA H,TAKAHASHI H,SUGANUMA Y,et al. Droplet ignition behavior in the vicinity of the leading edge of a flame spreading along a fuel droplet array in fuel-vapor/air mixture [J]. Proceedings of the Combustion Institute,2013,34:1593–1600.
- [69] PANDEY K,CHATTOPADHYAY K,BASU S. Combustion dynamics of low vapour pressure nanofuel droplets [J]. Physics of Fluids,2017,29:074102.
- [70] HAN K,PANG B,MA X,et al. An experimental study of the burning characteristics of acetone-butanol-ethanol and diesel blend droplets [J]. Energy,2017,139:853–861.
- [71] YANG S I,WU M S. The droplet combustion and thermal characteristics of pinewood bio-oil from slow pyrolysis [J]. Energy,2017,141:2377–2386.
- [72] RAO D C K,SYAM S,KARMAKAR S,et al. Experimental investigations on nucleation, bubble growth, and microexplosion characteristics during the combustion of ethanol/Jet A-1 fuel droplets [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2017,89:284–294.

(刘颖 编辑)