

甲醇/正辛醇/加氢催化生物柴油单液滴 蒸发与微爆特性研究

玄铁民¹, 孙中成^{1,2}, 李文豪^{1,2}, 王筱蓉³, 邵壮^{2,4}, 何志霞²

(1. 江苏大学能源与动力工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 江苏大学能源研究院, 212013, 江苏镇江;
3. 江苏科技大学机械学院, 212003, 江苏镇江; 4. 山东中科先进技术研究院, 250000, 济南)

摘要: 为了研究理化特性强烈互补的甲醇/加氢催化生物柴油(HCB)混合燃料的单液滴蒸发微爆特性,本文针对纯加氢催化生物柴油 M0 以及两种不同甲醇体积比的三元混合燃油 M15(15% 甲醇、17% 辛醇和 68% HCB)和 M25(25% 甲醇、17% 辛醇和 58% HCB)在不同环境温度下进行了详细的试验研究。首先,通过微观几何形态和热重试验对混合燃油的理化属性进行了分析。然后,在一个恒温加热炉中采用挂滴法结合高速显微成像技术,获得了液滴在蒸发过程中的形态、平方直径和气泡比等蒸发特性。研究得出:随着甲醇含量增加,混合燃油中分散相液滴粒径增大、数目增多,蒸发速率加快;随着甲醇比例的增加,混合燃油液滴内部出现更加剧烈的醇相气泡膨胀并发生微爆现象,且微爆后喷射出的子液滴粒径大大提高,显著缩短了母液滴的寿命;随着环境温度的增加,微爆频率增加,更显著地加快了液滴的蒸发速率。本文结果将对甲醇/HCB 混合燃料喷雾燃烧特性以及该混合燃料的发动机适用性研究提供理论参考。

关键词: 甲醇;加氢催化生物柴油;液滴;蒸发;微爆

中图分类号: TK421.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202201003 **文章编号:** 0253-987X(2022)01-0022-10



OSID 码

Experimental Study on Evaporation and Micro-Explosion Characteristics of Ternary Blended Droplets of Methanol, HCB and n-Octanol

XUAN Tiemin¹, SUN Zhongcheng^{1,2}, LI Wenhao^{1,2}, WANG Xiaorong³,
SHAO Zhuang^{2,4}, HE Zhixia²

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. Institute for Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China;

4. Shandong Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Jinan 250000, China)

Abstract: In order to investigate the evaporation and micro-explosion characteristics of methanol/HCB, which present strong complementary physicochemical properties, an experimental study on the evaporation process of pure hydrogenated catalytic biodiesel (HCB), denoted as M0, and two ternary blends, denoted as M15 (15% methanol, 17% n-octanol and 68% HCB) and M25 (25% methanol, 17% n-octanol and 58% HCB), was carried out at different temperatures. The measurement of microscopic morphology and the thermogravimetry on the blends was performed to analyze the physicochemical properties of the fuels. After that, the evaporation characteristics of droplet morphology, square diameter and bubble rate of all tested fuels were obtained in a

收稿日期: 2021-09-02。 作者简介: 玄铁民(1986—),男,副教授;何志霞(通信作者),女,教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1504004)。

网络出版时间: 2021-09-30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210929.1947.004.html>

constant-temperature chamber by means of high-speed microscopic imaging. It was found that the droplet size and the number of the dispersion phase increased with methanol percentage, and the evaporation rate also increased. In addition, higher percentage of methanol would result in more intense micro-explosion and bigger ejected sub-droplets. The frequency of micro-explosion phenomena increased with ambient temperature, which would consequently accelerate the evaporation rate of the droplets. This work provides a theoretical reference for the following study on spray and combustion characteristics of methanol/HCB blends in internal combustion engines, as well as their applicability.

Keywords: methanol; hydrogenated catalytic biodiesel; droplet; evaporation; micro-explosion

由于日益严格的排放法规和能源危机,近年来许多柴油发动机的替代燃料得到广泛研究和发 展^[1-2]。醇类与传统石化燃油混合燃料可以同时降低碳烟颗粒物和氮氧化物,近年来受到广泛关注。甲醇是一种清洁燃料被誉为液态阳光,可通过太阳能利用氢气和二氧化碳制备而成,将温室气体变成能源实现碳中和。甲醇可大规模生产,其独特的理化特性在燃烧过程中可有效降低颗粒物、氮氧化物、未燃碳氢化合物的生成,成为最具潜力的发动机清洁替代燃料之一。但是,甲醇因其较高的汽化潜热、较低的十六烷值和低热值,直接用于发动机容易在冷启动阶段出现着火困难和燃烧不稳定等问题,并且甲醇润滑性差,单独应用于发动机易造成部件磨损^[3-4]。在高效压燃式发动机中将甲醇与柴油、二甲醚、生物柴油等高活性燃料组合使用^[5-8]是实现可靠着火、清洁燃烧的一条有效技术途径。可替代清洁燃料加氢催化生物柴油(HCB)具有不含芳香烃、硫含量低、较高的十六烷值和腐蚀性小等优点^[9],与甲醇制备出的混合燃料可有效弥补上述甲醇燃料的缺点。此外,混合燃油中的甲醇组分在燃烧过程中易形成羟基自由基,可有效氧化碳烟降低排放;甲醇较高的蒸发潜热在汽化过程中还可以抑制局部绝热火焰温度,降低氮氧化物的生成^[10]。因此,甲醇-HCB混合燃油在压燃式发动机上具有一定的应用潜力。

由于发动机内是高温高压的复杂环境工况,燃油液滴的微爆现象可以有效促进燃油的二次雾化,直接影响缸内喷雾燃烧及排放,因此研究者们对混合燃料液滴的微爆特性及其主要影响因素进行了大量试验研究。Lasheras等指出,混合燃油的各组分挥发性的差异是影响其微爆特性的关键因素^[11],随后这个结论在Wu等^[12]对生物柴油/煤油混合燃油,以及Shinjo等^[13]针对正癸烷/乙醇混合燃料的液滴蒸发研究中进一步得到证实,他们还发现较高的环境温度将导致较大的斯波尔丁传质数,从而增

加了液滴的平均蒸发速率^[14]。另外,Jonghan等通过对不同体积分数的正癸烷/水混合燃料液滴的燃烧研究,认为较大的液滴体积会导致着火延迟期增加,微爆强度也随之增加^[15]。彭志军等通过研究不同比例ABE(丙酮、丁醇和乙醇混合溶液)与柴油单液滴的微爆与燃烧特性发现,液滴微爆现象的发生与组分沸点和浓度都非常相关,ABE在与柴油比例相当情况下最容易发生微爆^[16]。吴东垠等通过激光全息和高速摄影技术对柴油/甲醇/水三元混合燃料液滴的微爆特性进行了研究,他们指出液滴直径、组分质量分数、组分沸点差和环境工况等都对微爆现象产生重要影响^[17]。在通过丁醇/大豆油、戊醇/大豆油、丁醇/戊醇/大豆油等一系列混合燃油液滴的微爆特性研究后,Coughlin等发现含有多组分醇类的混合燃油液滴会表现出更加剧烈的微爆现象^[18]。

甲醇和新一代的HCB生物柴油在饱和蒸汽压、沸点、汽化潜热等方面理化属性具有显著差异,此混合燃油液滴在高温环境下的蒸发可能会产生鲜明的特点,加深对此混合燃油液滴蒸发过程的理解,将有助于对后续开展此混合燃油喷雾燃烧以及发动机适用性方面的研究提供帮助。因此,本文基于该混合燃油的理化特性围绕液滴蒸发过程开展了相关基础研究。首先,应用正辛醇作为助溶剂进行了甲醇-HCB混合燃油的制备,并对混合燃油的微尺度结构以及热重过程进行测试,分析其理化特性。随后,采用挂滴法结合高速显微成像技术开展混合燃油单液滴的蒸发特性试验,探究了不同甲醇含量和不同环境温度下液滴的瞬态变化特性、微爆特性及其影响因素。

1 混合燃油制备及试验方法

1.1 混合燃油制备

由于极性不同,甲醇与HCB不相溶,本文应用正辛醇作为两者的助溶剂。本研究中采用了两种不

同甲醇体积分数的混合燃油 M15(15% 甲醇、68% HCB 和 17% 正辛醇)和 M25(25% 甲醇、58% HCB 和 17% 正辛醇)进行试验,并以纯生物柴油 M0

(100% HCB)做对比验证。混合燃油的配置过程见参考文献[19-20],其中甲醇、正辛醇及 3 种试验燃油的物性参数如表 1 所示。

表 1 甲醇、正辛醇、M0、M15、M25 燃油特性
Table 1 Properties of methanol, n-octanol, M0, M15 and M25

参数	甲醇	正辛醇	M0	M15	M25
密度(20℃)/(kg·m ⁻³)	791.8	827.0	792.1	786.7	788.5
黏度(20℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	0.74	7.30	3.29	2.75	2.47
表面张力(20℃)/(mN·m ⁻¹)	22.70	27.50	27.41	26.74	26.55
沸点/℃	65	196			
T ₉₀ /℃			292		

1.2 单液滴蒸发试验装置及方案

本研究所使用的单液滴蒸发试验平台主要包括液滴输送系统、加热恒温系统和数据采集系统,试验装置如图 1 所示。其中:液滴输送系统主要包括步进电机及控制器、滚珠丝杠运动模块以及悬挂液滴的支撑杆和双交叉石英丝等,通过触发步进电机控制器产生的脉冲信号来驱动滚珠丝杠运动模块,将液滴传送到容弹内的指定位置;试验中液滴以 300 mm/s 保持匀速运动,总行程为 180 mm,液滴从顶盖表面到达试验指定位置所需时间约为 0.6 s。容弹加热系统包括带有两个水平对称布置的石英玻璃视窗的定容弹,顶部开有一个小孔使得液滴的支撑杆刚好进入容弹;容弹内部为双层陶瓷,可有效起到隔热保温的作用;由温度控制器控制的电加热丝均匀环绕于双层陶瓷之间,使容弹内部温度保持均匀,弹体内部四周装有若干温度传感器,用于实时监测容弹腔内的温度变化。当弹体内部温度达到预设试验温度的 95% 时,温度控制系统将加热丝功率由 100% 降为 60%,经多次温度反馈最终达到预设试验温度,从而获得容弹内近乎静止和稳定的热力学条件,温度误差为±1 K。数据采集系统主要包括装配有长工作距离显微镜头的高速数码摄像机和计算机。

本研究针对燃油液滴的蒸发特性采用挂滴法结合高速显微成像技术进行研究,具体试验过程为:首先用 2 μL 微量注射器吸取待测燃油,然后挂滴于粘有两根正交的 0.15 mm 石英玻璃丝交叉中心位置处的液滴悬挂装置上,通过步进电机调整液滴悬挂装置位置使其处于容弹顶部小孔正上方。待容弹内部温度均匀稳定并达到试验设定温度后,启动步进电机将液滴悬挂装置匀速送入容弹内部,同时触发装有长焦距显微镜头(QUESTAR,QM-1)的高速数

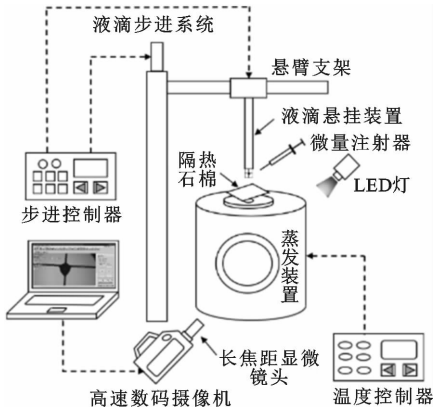


图 1 试验装置原理图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

码摄像机(Photron SA-Z)拍摄记录液滴的蒸发过程。试验过程中相机的拍摄信息为:拍摄速度2 000 帧/s;分辨率1 024×1 024 像素;像素比 94.65 像素/mm;曝光时间 0.49 ms。本研究中液滴初始直径约为 1.56 mm,环境压力为 0.1 MPa,设定环境温度分别为 427、477、527、577℃。为保证试验结果的可靠性,每个试验工况重复 3 次。

1.3 液滴蒸发试验数据处理方法

本研究中的高速显微成像技术主要采用高速数码摄像机加装长焦距显微镜头,对容弹内悬挂的燃油液滴的蒸发过程进行记录。经相机拍摄的图像数据经处理后可得到蒸发过程中液滴和液滴内部气泡的等效直径及变化情况,具体处理方法如图 2 所示。

首先,从原始拍摄图像(1 024×1 024 像素)中选取一个目标图像处理区间(470×450 像素),如图 2b 所示;然后,利用平均背景图像强度值,将图像 2b 中的环境噪声及其他影响因素剔除得到图像 2c,再进行二值化处理后得到液滴和玻璃丝轮廓明显的图像 2d;通过利用玻璃丝直径不变的特点计算出图

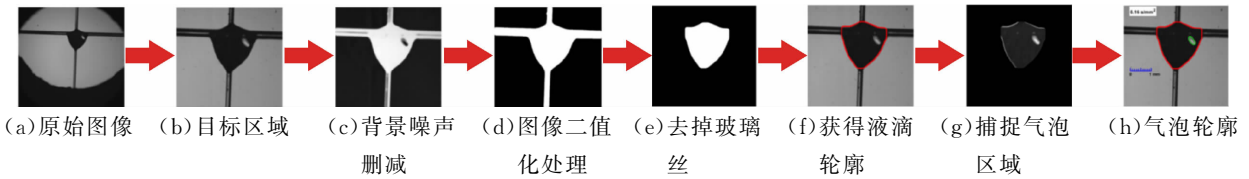


图 2 单液滴数据处理流程图
Fig. 2 Flow chart of image processing

像中玻璃丝直径的像素值,从而将液滴轮廓外的玻璃丝减去,即可得到液滴轮廓(图 2e)。

由于蒸发过程中液滴形状变化不规则,所以采用液滴减去对应时刻液滴内部的玻璃丝所占面积后得到的投影面积,来折算液滴的等效直径。因为大部分液滴的蒸发均遵循 D^2 定律,为了方便对液滴蒸发规律的研究,本研究以液滴初始平方直径 D_0^2 为基准对蒸发过程中液滴平方直径 D^2 和时间进行了归一化处理,并通过对液滴稳定蒸发阶段的液滴平方直径变化曲线与时间进行线性拟合,对应的斜率定义为蒸发速率。

此外,由于混合燃油中甲醇和正辛醇的沸点远低于 HCB,液滴内部的醇类分散相组分容易受热汽化形成气泡,醇类气泡的大小和存在时间会对液滴的蒸发和微喷微爆特性产生重要影响。为了研究液滴内部醇类分散相形成气泡的演变情况,本研究提出气泡比这一概念,即液滴内部醇类气泡归一化平方直径与同一时刻燃油液滴归一化平方直径的比值,可通过气泡与液滴的投影面积比值计算得出

$$\left(\frac{D_b}{D}\right)^2 = \frac{A_b}{A} \tag{1}$$

式中: D 和 D_b 分别表示液滴和液滴中气泡的等效直径; A 和 A_b 分别表示液滴和液滴中气泡的投影面积。气泡投影面积的处理方法为:通过图 2f 中的液滴轮廓可获取只包含液滴的图像 2g,选取合适的阈值 I_d 将气泡与液滴区分开,即可得到气泡的轮廓,如图 2h 所示,进而计算出气泡的投影面积。阈值的计算方法为

$$I_d = I_{\min} + \alpha(I_{\max} - I_{\min}) \tag{2}$$

式中: $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别表示图 2g 中图像强度的最大值和最小值; $\alpha=0.45$ 表示阈值系数。

2 混合燃油理化特性分析

2.1 混合燃油的分散特性

本研究所配制的混合燃油(M15 和 M25)放在密封玻璃瓶中静置 6 个月以上均未出现任何分层现象,表现了相对稳定的混合特性,如图 3 所示。

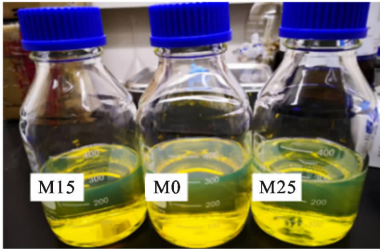


图 3 混合 6 个月后的 M15、M25 与 M0 对比
Fig. 3 M15 and M25 blended for 6 months versus M0

为了确定混合燃油的混合状况及甲醇在 HCB 生物柴油中的分散特性,采用显微镜进行微尺度观测来获取混合燃料中的分散相液滴粒径的大小分布情况及其索特平均粒径 $D_{32}^{[21]}$,进而对混合燃料中分散相的均匀性进行评估,其中 D_{32} 的计算方法如下

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \tag{3}$$

式中: i 表示混合燃料中分散相液滴的数目; d_i 表示第 i 个分散相液滴粒径。

图 4 为 3 种燃油在 200 倍显微镜下拍摄到的微观图像。M0 是纯 HCB 燃油,并不包含甲醇,但图中依然看到了里面有分散相的存在,分散相液滴很小,数目非常少且分布均匀,这主要是 HCB 燃油中或多或少自带的些许杂质粒子呈现的结果。M15 和 M25 混合燃油中分散相液滴数目明显增多,分散相液滴也增大很多,主要是包含了不同量的甲醇。

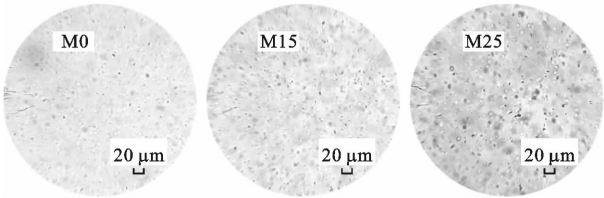
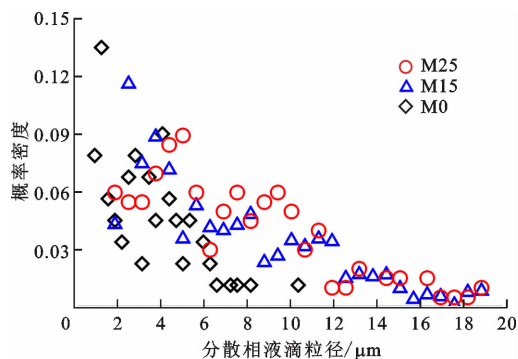


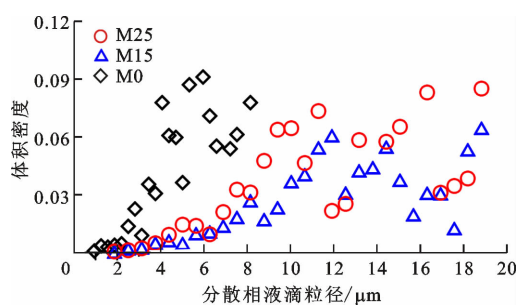
图 4 3 种燃料的分散相液滴在 200 倍显微镜下的分布情况
Fig. 4 Droplet distributions of three tested fuels

图 5 给出了用来表征分散相液滴大小分布情况的概率密度(对应分散相粒径下液滴数与总应分散

液滴数之比)和体积密度(对应分散相粒径下液滴体积与总分散液滴体积之比)分布。通过3种燃油中分散相液滴大小的概率密度分布情况可以看出:M0中分散相液滴粒径尺度主要集中在 $0.3\sim 8.2\ \mu\text{m}$,分布较均匀;M15和M25分布情况类似,分散相液滴平均粒径明显高于M0,对应的粒径分布尺度约为 $1.86\sim 18.89\ \mu\text{m}$ 。3种燃油中分散相液滴出现概率密度最大对应的分散相液滴粒径分别约为 1.3 、 2.5 和 $5.1\ \mu\text{m}$,且3种燃油分散相液滴出现的概率密度累加之和首次超过90%对应的分散相液滴粒径分别为 5.96 、 12.56 、 $13.81\ \mu\text{m}$ 。此外,为了分析混合燃料中数量较少、体积较大的分散相液滴对混合燃料均匀性的影响,引入了分散相液滴体积概率密度。由图5可以看出,M15和M25相较于M0,对应的较大粒径的分散相液滴体积占比明显增加,且随着甲醇含量的增加,较大分散相液滴粒径对应的分散相液滴体积占比逐渐增加。



(a) 概率密度



(b) 体积密度

图5 3种燃油分散相液滴分布的概率密度和体积密度

Fig. 5 Probability density and volumetric density of three tested fuels' dispersion phase droplets distribution

由于混合燃油中分散相液滴的粒径大小会对燃油的喷雾蒸发起到重要作用,这里通过上述3种燃油中分散相液滴粒径分布的概率密度对3种燃油中分散相液滴的平均粒径进行计算,M0、M15和M25的 D_{32} 分别为 (8.01 ± 0.74) 、 (11.49 ± 1.43) 和

(13.03 ± 1.39) mm。随着甲醇含量的增加,燃油的 D_{32} 逐渐增大。其中,M15的 D_{32} 相较于M0增加了43.49%,M25的 D_{32} 相较于M0增加了61.74%。较大的分散相液滴粒径意味着燃油的不稳定性增加,在蒸发过程中有助于产生微爆现象。

2.2 混合燃油挥发特性

本研究通过采用热重分析仪(耐驰 STA-449-F3)对3种燃油分别开展了氩气(纯度99.9%)氛围下的挥发特性研究。测试油样质量均取10 mg,进气流量为20 mL/min,吹扫气流量为60 mL/min。初始温度为室温,升温速率为 $20\ ^\circ\text{C}/\text{min}$,结束时温度为 $550\ ^\circ\text{C}$ 。

3种燃油在氩气环境中只进行蒸发和热解,图6给出了3种燃油的蒸发特性曲线,并依据质量损失随温度的变化速率将蒸发曲线分成3段。在第I阶段($25\sim 174\ ^\circ\text{C}$),主要是燃油中轻沸点组物质进行蒸发,由于甲醇沸点较低,含甲醇较多的M25最早开始出现质量损失现象。相较于M0,M25和M15含有较多的甲醇和正辛醇,所以蒸发速率明显高于M0。此外,在第I蒸发阶段结束时,M25、M15、M0的质量损失分别为37.8%(A点)、32.9%(B点)、22%(C点),两种混合燃油的质量损失均小于混合燃油中醇类物质的初始质量损失,表明M25和M15两种燃油中此时仍含有醇类物质。第II阶段为燃油热解阶段($174\sim 252\ ^\circ\text{C}$),在该阶段初始位置处,3种燃油的挥发速率基本一致,此时3种燃油剩余组分以高沸点物质为主,3种燃油的TG曲线均随着温度的升高而急剧下降,由于M25和M15燃油中仍含有部分醇类物质,较高的蒸发潜热使这两种混合燃油的蒸发速率在第II阶段前期略小于M0。3种燃油在 $250\ ^\circ\text{C}$ 时质量损失基本结束,到此阶段质量损失率达到98%。第III阶段为碳化阶段,3种燃油基本消失殆尽。

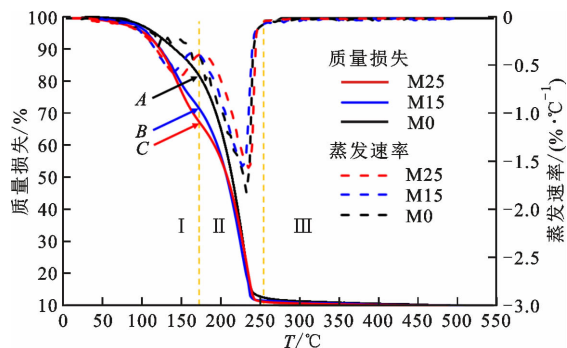


图6 3种燃油的挥发特性曲线

Fig. 6 Volatilization curves of three tested fuels

3 混合燃油的蒸发特性研究

3.1 混合燃油液滴的瞬态蒸发过程

图 7 所示为 427 °C 环境温度下 M0、M15 和 M25 三种燃油的瞬态蒸发过程,图 8 则给出了此温度下 M15 和 M25 两种燃油液滴的归一化平方直径 $(D/D_0)^2$ 和气泡比 $(D_b/D_0)^2$ 随归一化时间 (t/D_0^2) 的变化曲线。通过液滴的归一化平方直径的变化,整体可以看出,在液滴蒸发初始阶段,燃油液滴由于内部醇类分散相液滴汽化成核、聚合膨胀、醇类分散相气泡破裂而发生的微爆现象,会引起液滴归一化平方直径的剧烈波动,因此将此阶段定义为液滴的波动蒸发阶段,并利用 2.3 节中介绍的气泡比方法

来直观反映由液滴内部醇类分散相所形成气泡的变化情况,进而表征液滴在波动蒸发阶段时的微爆强度。继波动蒸发阶段之后,燃油液滴进入稳定蒸发阶段,其归一化平方直径与归一化时间呈线性关系,符合 D^2 定律,将此阶段定义为液滴的稳定蒸发阶段^[16]。

由图 7a 可以看出,M0 液滴在蒸发前期形态并未发生明显变化。这是因为纯 HCB 液滴内不含醇类等沸点较低的物质,在蒸发初始阶段,液滴表面受热蒸发与液滴吸热膨胀同时进行,处于动态平衡状态,所以液滴的平方直径不会发生明显变化。由图 7b 中 M15 燃油液滴瞬态蒸发图像可以看出,在蒸发阶段初期 0~0.03 s/mm² 之间的燃油液滴表现为

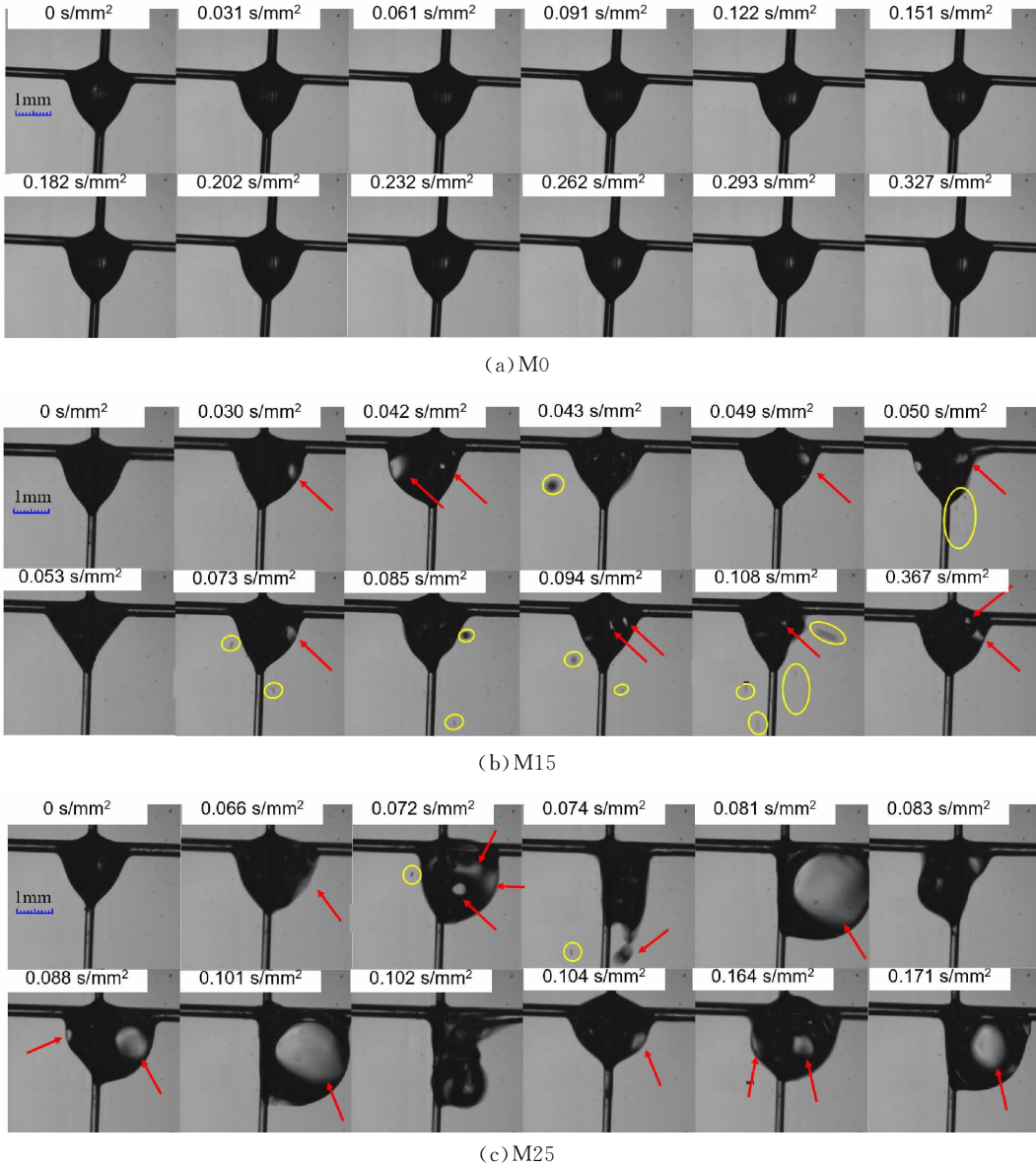


图 7 427 °C 环境温度下 3 种燃油的液滴蒸发瞬态过程

Fig. 7 A series of transient droplet photographs for three tested fuels at 427 °C

短暂的吸热稳定蒸发,在 0.03 s/mm^2 之后,液滴开始进入波动蒸发阶段,在图 8a 中也可以看出该燃油液滴的气泡比在这一阶段处于波动起伏状态,从另一个角度反映了液滴蒸发时形态变化的波动情况。波动蒸发阶段的液滴蒸发分为液滴内部和液滴表面两部分,这两部分同时进行。在液滴表面,由于醇类分散相的沸点较低会在短时间内快速蒸发,醇类分散相朝向液滴表面的质量扩散速率小于表面收缩的速率^[22]。因此,沸点较高的加氢催化生物柴油会在液滴表面形成一层油膜。在油膜包裹的液滴内部边缘由于温度较高引起醇类分散相受热汽化,开始出现较小的气泡,随后燃油液滴内由醇类蒸发形成的小气泡不断产生,逐渐膨胀并与周围的小气泡进行聚合,使燃油液滴直径逐渐增大,并在 0.043 s/mm^2 时气泡直径达到最大,与图 8a 中第一个气泡比峰值位置相对应。在液滴内部醇类气泡膨胀过程中,气泡与液滴表面会形成扰动波,当扰动波的振幅超过油膜的厚度时,剧烈膨胀使得气泡会冲破燃油液滴表面油膜的束缚发生破碎^[23],出现燃油液滴喷射出来的微爆现象,随后燃油液滴急剧收缩,醇类气泡直径突然变小,而此时液滴内仍存有部分醇类分散相以及不断新出现的小气泡继续开始聚合、膨胀;在 0.05 s/mm^2 时又出现了较大的醇类气泡以及随后的第二次微爆现象,并伴随着大量微米级的子液滴不断向外喷射,在 0.053 s/mm^2 时液滴再次收缩,表明液滴的第二次微爆过程结束。随后,燃油液滴继续进行由醇类分散相所形成气泡的膨胀聚合、破裂喷射、液滴收缩这一循环过程,直至液滴内部的醇类含量较低,无法形成较大的气泡使油膜破裂,即进入液滴的稳定蒸发阶段。

当甲醇含量较多时,燃油液滴在蒸发过程中的微爆现象则会发生巨大的变化,如图 7c 所示的 M25 燃油液滴的瞬态蒸发图像,在 $0 \sim 0.066 \text{ s/mm}^2$ 为液滴的吸热稳定蒸发阶段,可见 M25 这一阶段的时间明显大于 M15。在 0.066 s/mm^2 时可以看到靠近燃油液滴表面内侧处已形成醇类分散相的气泡,并且气泡外有一层薄薄的油膜。随着蒸发的进行,在 0.072 s/mm^2 时已明显看到液滴内充满了多个醇类分散相气泡,由于受热在液滴内四处游动,并伴随着粒径微小的子液滴向外喷射。在 0.074 s/mm^2 时由于醇类分散相的气泡剧烈膨胀冲破液滴表面油膜的束缚发生破裂,致使燃油液滴发生明显变形,并出现子液滴系带分裂现象,随后液滴急剧收缩并恢复球状,在接下来的波动蒸发过程中,液滴分别在

$0.081, 0.101, 0.171 \text{ s/mm}^2$ 处形成了明显的气泡,与图 8b 中气泡比的峰值相对应,再次验证气泡比可用来表征微爆强度。

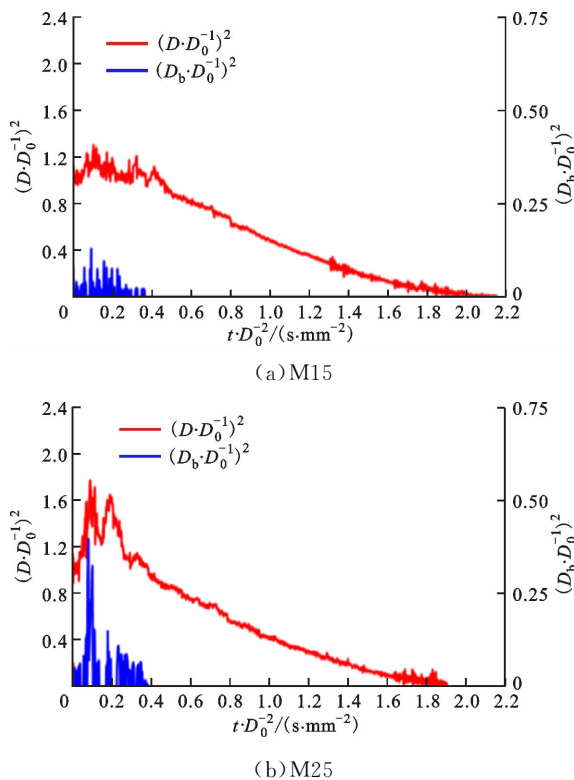


图 8 427 °C 环境温度下 M15 和 M25 液滴的归一化平方直径与气泡比

Fig. 8 Normalized squared diameter curve and bubble ratio of M15 and M25 at 427 °C

另外, M25 相较于 M15 表现出的液滴微爆强度也有所不同, M25 的醇类分散相吸热形成气泡和微爆现象发生时刻较晚,但由于液滴内醇类含量较高导致微爆发生前的气泡体积明显增大,气泡破碎后引发液滴更加剧烈的变形,并且微爆喷射出来的子液滴粒径较大,比 M15 高出一个数量级,但喷射出来的液滴数目较少,较高的甲醇含量会引起更加剧烈的微爆现象;此外,在图 7 中通过燃油液滴中气泡比的变化也可以看出, M25 的最大气泡比约为 M15 的 2.9 倍,且随着蒸发的进行, M25 和 M15 中醇类分散相形成气泡的能力逐渐减弱,并在 0.4 s/mm^2 之后由于液滴内醇类物质含量较低,无法形成明显的气泡,此刻即认为液滴进入稳定蒸发阶段,与液滴内气泡比的变化基本一致。

3.2 不同环境温度下混合燃油液滴蒸发特性

为了研究不同环境温度下不同混合燃油液滴蒸发过程特性,除了前述 427 °C 环境温度下的试验结果外,图 9 还给出了 477、527、577 °C 三个环境温度

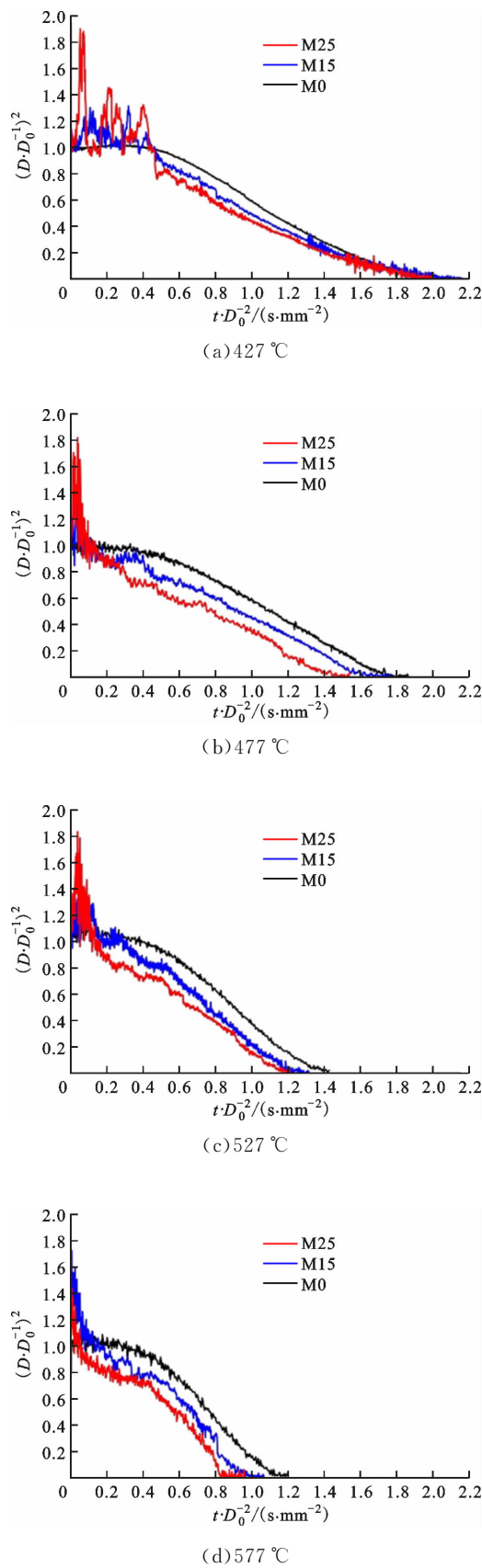


图 9 3 种燃油在不同环境温度下的归一化平方直径
Fig. 9 Normalized squared diameter curves of three tested fuels at different temperatures

下混合燃油液滴平方直径随时间的变化趋势。整体可以看出,3 种燃油液滴的寿命随着环境温度的升高而明显缩短,并且随着环境温度的增加,对应的波动蒸发阶段的时间明显减少。这主要是由于液滴表面甲醇的快速蒸发,以及液滴内部醇类分散相气泡膨胀破碎引起连续不断的微爆作用所致。

为进一步分析 3 种燃油的稳定蒸发速率,对燃油液滴在此阶段的平方直径曲线与时间进行线性拟合,所得到的拟合斜率取平均值即表示为燃油的稳定蒸发速率,如图 10 所示,可以看出 3 种燃油的蒸发速率随着环境温度的升高均增大。这主要是因为温度升高,分子平均动能增加,加快了燃油液滴的蒸发速率,并且 M15 和 M25 的蒸发速率随环境温度的升高幅度远大于 M0,相较于 427 °C 时的蒸发速率,M0、M15、M25 在 577 °C 时的蒸发速率分别增长了 79%、103%、121%。这主要是由于环境温度升高加速了液滴内部醇类分散相的汽化,含醇类的混合燃油液滴在波动蒸发阶段的微爆出现频率和微爆强度均增加,向外喷射出更多含醇类的子液滴导致燃油液滴内部的醇类分散相降低,同时混合燃油液滴在波动蒸发阶段结束后由于微爆作用也导致燃油液滴体积更小,也能进一步加快燃油液滴在稳定蒸发阶段的蒸发速率。

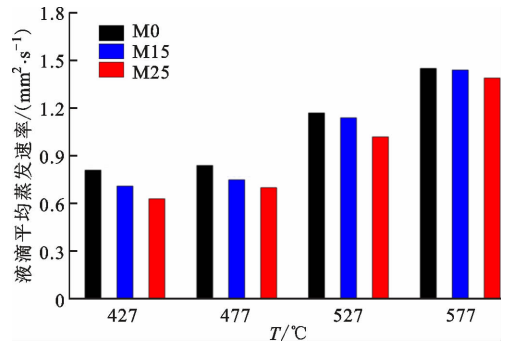


图 10 3 种燃油在不同环境温度下的蒸发速率
Fig. 10 Evaporation rate of three tested fuels at different temperatures

4 结 论

本研究对两种不同甲醇比例的混合燃油 M15 和 M25 以及纯 HCB 生物柴油的理化特性、燃油分散相及热重特性进行了分析,并采用挂滴法结合高速显微成像技术对 3 种燃油液滴的蒸发特性进行了研究,主要研究结论如下。

(1)正辛醇作为助溶剂可使甲醇与加氢催化生物柴油均匀稳定混合,长达 6 个月不分层。甲醇含

量越高,混合燃油中分散相液滴越多、体积越大,导致燃油不稳定增加,蒸发速率越快。

(2)相较于纯加氢催化生物柴油,混合燃油在蒸发过程中由于醇类分散相沸点较低易汽化形成气泡,当醇类气泡剧烈膨胀冲破外围油膜束缚后,会发生微爆现象向外喷射出子液滴,增大液滴与空气的接触面积。

(3)在液滴的波动蒸发阶段,由于混合燃油中醇类沸点远低于 HCB 生物柴油,混合燃油液滴不断进行着醇类分散相吸热汽化成核,醇类气泡聚合膨胀,膨胀破裂引发液滴微爆,液滴收缩恢复等循环过程。随着甲醇比例的增加,混合燃油液滴内部出现更加剧烈的醇相气泡膨胀,并发生喷射微爆现象,使 M25 微爆后喷射出的子液滴粒径比 M15 高出一个数量级,缩短了液滴蒸发时间。

(4)混合燃油中由于微爆现象的存在,能进一步加快燃油液滴的蒸发时间。环境温度的升高对液滴蒸发速率的影响显著,尤其是混合燃油在较高的环境温度下微爆频率的增加加快了液滴的蒸发速率。相较于纯 HCB 生物柴油,混合燃油蒸发速率变化量随环境温度的升高明显提高。

参考文献:

- [1] KARAVALAKIS G, HAJBABAEI M, JIANG Yu, et al. Regulated, greenhouse gas, and particulate emissions from lean-burn and stoichiometric natural gas heavy-duty vehicles on different fuel compositions [J]. Fuel, 2016, 175: 146-156.
- [2] ZHEN Xudong, LI Xiaoyan, WANG Yang, et al. Comparative study on combustion and emission characteristics of methanol/hydrogen, ethanol/hydrogen and methane/hydrogen blends in high compression ratio SI engine [J]. Fuel, 2020, 267: 117193.
- [3] VERHELST S, TURNER J W G, SILEGHEML, et al. Methanol as a fuel for internal combustion engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 70: 43-88.
- [4] SEKO T, KURODA E. Combustion improvement of a premixed charge compression ignition methanol engine using flash boiling fuel injection [C]//SAE International Fall Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2001: 3611-3623.
- [5] GONG Changming, PENG Legao, CHEN Yulin, et al. Computational study of intake temperature effects on mixture formation, combustion and unregulated emissions of a DISI methanol engine during cold start [J]. Fuel, 2018, 234: 1269-1277.
- [6] YAO Chunde, PAN Wang, YAO Anren. Methanol fumigation in compression-ignition engines: a critical review of recent academic and technological developments [J]. Fuel, 2017, 209: 713-732.
- [7] WANG Bin, YAO Anren, CHEN Chao, et al. Strategy of improving fuel consumption and reducing emission at low load in a diesel methanol dual fuel engine [J]. Fuel, 2019, 254: 115660.
- [8] MA Baodong, YAO Anren, YAO Chunde, et al. Exergy loss analysis on diesel methanol dual fuel engine under different operating parameters [J]. Applied Energy, 2020, 261: 114483.
- [9] ZHONG Wenjun, XUAN Tiemin, HE Zhixia, et al. Experimental study of combustion and emission characteristics of diesel engine with diesel/second-generation biodiesel blending fuels [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 121: 241-250.
- [10] YILMAZ N, SANCHEZ T M. Analysis of operating a diesel engine on biodiesel-ethanol and biodiesel-methanol blends [J]. Energy, 2012, 46(1): 126-129.
- [11] LASHERAS J C, FERNANDEZ-PELLO A C, DRYER F L. Experimental observations on the disruptive combustion of free droplets of multicomponent fuels [J]. Combustion Science and Technology, 1980, 22 (5/6): 195-209.
- [12] WU M S, YANG S I. Combustion characteristics of multi-component cedar bio-oil/kerosene droplet [J]. Energy, 2016, 113: 788-795.
- [13] SHINJO J, XIA J, GANIPPA L C, et al. Puffing-enhanced fuel/air mixing of an evaporating n-decane/ethanol emulsion droplet and a droplet group under convective heating [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 793: 444-476.
- [14] HASHIMOTO N, NOMURA H, SUZUKI M, et al. Evaporation characteristics of a palm methyl ester droplet at high ambient temperatures [J]. Fuel, 2015, 143: 202-210.
- [15] WON J, BAEK S W, KIM H. Autoignition and combustion behavior of emulsion droplet under elevated temperature and pressure conditions [J]. Energy, 2018, 163: 800-810.
- [16] 彭志军, 白龙, 白富强, 等. ABE/柴油单液滴燃烧微爆现象的试验 [J]. 内燃机学报, 2019, 37(3): 273-279.

(下转第 119 页)