

掺醇生物柴油混合燃料蒸发特性

危昊翔, 王筱蓉[✉], 姜根柱, 黄晨峻, 张溟睿
(江苏科技大学机械工程学院, 江苏镇江 212003)

摘要: [目的]在当前能源需求增大和提倡环保背景下, 需要寻找传统燃油发电机的替代能源。故通过研究蒸发特性找到特性更佳的燃料。[方法]采用液滴悬挂实验研究 673 K 和 773 K 环境温度时, 添加 0%、20%、30%、50% 乙醇含量的油酸甲酯混合燃料液滴的蒸发特性。[结果]结果表明, 环境温度从 673 K 升高至 773 K 时, 混合液滴的蒸发速率提高。并且随着乙醇含量的不断增加, 两个环境温度的液滴蒸发速率相差越大。在较低环境温度时, 液滴的蒸发过程较平稳, 液滴蒸发速率呈现逐渐减小的趋势, 乙醇的添加导致液滴平衡蒸发阶段延长, 增加了蒸发时间, 抑制蒸发过程。而在较高环境温度时, 蒸发过程波动较大, 液滴蒸发速率呈现逐渐增长的趋势, 并在 50% 乙醇含量时达到最大值。乙醇的添加导致微爆炸现象的发生, 缩短了蒸发时间, 促进蒸发过程。同时提高环境温度和乙醇含量, 有利于液滴微爆炸现象的发生以及强度和次数的增加。[结论]基于液滴悬挂实验的油酸甲酯和乙醇混合液滴蒸发特性的实验结果, 为相关燃料研究和应用提供了重要的数据支撑和参考。

关键词: 发电机; 蒸发特性; 油酸甲酯; 乙醇; 微爆炸

中图分类号: TM611; TE667

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

OA: <https://www.energychina.press/>

Evaporation Characteristics of Ethanol Blended Biodiesel Fuel for Generators

WEI Haoxiang, WANG Xiaorong[✉], JIANG Genzhu, HUANG Chenjun, ZHANG Mingrui

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China)

Abstract: [Introduction] In the current context of increasing energy demand and environmental conservation advocacy, it is necessary to seek alternative energy sources for traditional fuel generators. Therefore, a study on the evaporation characteristics was carried out to identify fuel with superior properties. [Method] The droplet suspension experiments were conducted to investigate the evaporation characteristics of droplets of methyl oleate fuel with ethanol contents of 0%, 20%, 30%, and 50% at the ambient temperature of 673 K and 773 K. [Results] The results indicate that as the ambient temperature increases from 673 K to 773 K, the evaporation rate of the blended droplets rises. Furthermore, with the continuous increase in ethanol contents, the difference in droplet evaporation rates between the two ambient temperatures becomes more pronounced. At lower ambient temperatures, the evaporation process of the droplets is relatively stable, with the droplet evaporation rate showing a gradual decrease trend. The addition of ethanol leads to an extension of the droplet's equilibrium evaporation stage, increasing the evaporation time and inhibiting the evaporation process. Conversely, at higher ambient temperatures, the evaporation process exhibits greater fluctuations, with the droplet evaporation rate showing a gradual increase trend and reaching its maximum at the ethanol content of 50%. The addition of ethanol induces micro-explosion events, reducing the evaporation time and enhancing the evaporation process. Moreover, increasing the ambient temperature and ethanol content promotes the occurrence, intensity, and frequency of micro-explosion events in droplets. [Conclusions] Based on the experimental results of droplet suspension experiments on the evaporation characteristics of methyl oleate and ethanol blended droplets, this study provides important data support and references for related fuel research and applications.

Key words: generator; evaporation characteristics; methyl oleate; ethanol; micro-explosion

收稿日期: 2024-05-08 修回日期: 2024-05-21

基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目“预热长碳链脂肪酸油高压蒸发特性及冷启动低温着火特性研究”(BK20180982)

0 引言

在当前能源需求增长以及日益提倡环境保护的大背景下,寻找替代传统石油燃料的可持续能源已成为重要研究课题^[1]。生物柴油作为一种可再生、环保的替代燃料备受关注,其生产过程中减少了对化石燃料的依赖,同时减少了温室气体的排放^[2-3]。生物柴油具有高效、低排放、易于储存和运输等优点,被广泛应用于交通运输、农业机械和发电等领域^[4-5]。

在发电领域,传统的燃油发电机使用汽油或柴油作为燃料,但其燃烧产生的废气中含有大量的有害物质,对环境和人体健康造成严重影响。因此,利用生物柴油替代传统燃油成为了一种可行的解决方案。生物柴油不仅具有较高的燃烧效率和清洁度,而且可以通过利用农作物、植物油或废弃油脂等原料生产,实现资源的再利用和循环利用^[6-7]。其中油酸甲酯是生物柴油的一种主要成分^[8]。

燃料的蒸发过程直接影响了燃烧过程和发电机性能,随着生物柴油的大量应用,有必要对其蒸发特性进行深入研究。Wang 等^[9]研究了 773 K 温度下高挥发性差的生物柴油-DMF 混合燃料液滴的蒸发特性,结果表明由于整体热阻增加、气相内传热和传质的减少等原因导致混合液滴的蒸发速率小于纯生物柴油液滴。Cheng 等^[10]利用液滴悬挂实验研究了多个温度下柴油和脂肪酸甲酯乳化燃料液滴的蒸发特性,实验结果表明含水量和温度的升高促进液滴膨化/微爆炸的强度和次数,同时脂肪酸甲酯乳化燃料小于柴油乳化燃料的蒸发速率。Huang 等^[11]对 573 K、673 K 和 773 K 温度下的生物柴油-正丙醇混合液滴的蒸发特性进行了研究,结果表明,蒸发速率随着温度和正丙醇浓度的增长而增大,并在正丙醇浓度为 50% 时达到最大值。张璇等^[12]研究了质量分数为 10%、20% 和 50% 的麻风树生物柴油和柴油混合燃料的蒸发和微爆炸特性,实验结果表明麻风树生物柴油占 20% 时微爆炸和蒸发特性最佳。

但生物柴油燃料具有粘度高、雾化效果差等缺点,因此需要适宜的燃油混合方式在一定程度上改善生物柴油的特性。生物乙醇作为一种燃料添加剂,具有密度低、沸点低、能促进液滴蒸发、含氧量高等优点,容易使燃料在发电机上展现更佳的性能。并

且生物乙醇生产成本低,技术成熟,已经发展到第三代^[13-14]。综合考虑,乙醇作为添加剂是较好的选择。

乙醇作为混合物的相关研究已经开展。颜俊先等^[15]利用仿真研究了乙醇-生物柴油-柴油混合燃料的燃烧和排放特性,仿真结果表明添加乙醇可以改善雾化和燃烧特性,使燃烧更充分。耿莉敏等^[16]通过增压共轨柴油机研究了添加有 5%、10% 和 20% 体积比的乙醇的生物柴油和柴油混合燃料的燃烧和排放特性,实验结果发现乙醇掺混比的增大,显著降低了碳排放量、CO 排放量和 HC 排放量。孙文强等^[17]将 10%、20%、30% 和 40% 浓度的乙醇添加到棕榈酸甲酯中,研究混合燃料在 773 K、873 K 温度时的蒸发特性,结果表明乙醇添加可以显著缩短液滴寿命,其中 40% 的乙醇浓度时蒸发速率最高。Meng 等^[18]发现,增加乙醇的配比可以提高生物柴油-乙醇混合液滴的燃烧速率,并且当发生微爆炸且液滴混合等体积时,可以缩短点火延迟时间。

综上,研究利用生物柴油作为发电机燃料具有重要的现实意义和发展前景。通过对乙醇和油酸甲酯生物柴油混合液滴蒸发特性的研究,可以获得特性更佳的燃料,为推动生物柴油在发电领域的应用提供理论依据,促进清洁能源的发展和应用。通过对以往研究的整理发现目前尚未有相关的研究,故本研究利用液滴悬挂法,通过模拟发电机高温工作环境,分析了 673 K 和 773 K 温度下掺混不同乙醇浓度的油酸甲酯-乙醇混合燃料蒸发特性。

1 实验装置和方法

1.1 燃料制备

本实验所用燃料都需要专门制备,利用电子天平按照质量比称取油酸甲酯和乙醇并搅拌混合,同时将混合溶液放置在温度 50 °C、频率 40 kHz 的振荡器中超声震荡 1 h,最后将溶液静置冷却便可进行实验。图 1 为混合燃料静置冷却后的图片,未出现分层现象。文章以“MO”代表油酸甲酯,“E”代表乙醇,制备 MO+E0、MO+E20、MO+E30、MO+E50 四种燃料。例如,MO+E30 是由 70% 油酸甲酯和 30% 乙醇混合而成。表 1 为相关材料的物理性质。

1.2 实验装置和实验步骤

图 2 为单液滴蒸发实验装置。实验步骤如下:(1)利用高速摄像机对交叉石英丝对焦,确保实验过



图 1 混合燃料图片

Fig. 1 Picture of blended fuel

表 1 油酸甲酯和乙醇部分物性参数

Tab. 1 Some physical parameters of methyl oleate and ethanol

物质名称	化学式	颜色	熔点/°C	沸点/°C	闪点/°C
乙醇	C ₂ H ₆ O	无色透明	-114	78	12
油酸甲酯	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	无色或微黄	-19.9	218.520	>110

程被清晰记录; (2)使用温度控制器设定实验温度,将加热炉加热到预设温度,同时使氮气充满加热炉,防止因高温引起液滴燃烧。加热炉为内径 80 mm,高度 250 mm 的不锈钢圆柱体; (3)当加热炉温度稳定后,使用 1 μL 的微量注射器将液滴悬挂在交叉石英丝上,通过移动速度为 100 ~ 300 m/s 的步进电机将交叉石英丝运输到聚焦位置,高速摄像机通过直径 28 mm 的圆形石英玻璃窗开始拍摄,拍摄频率设置为 1000 fps; (4)当液滴蒸发完全,拍摄停止,利用步进电机控制交叉石英丝返回初始位置,进行下一组实验,实验数据保存在计算机中。为保证实验结果的准确,每组实验需重复进行三次。

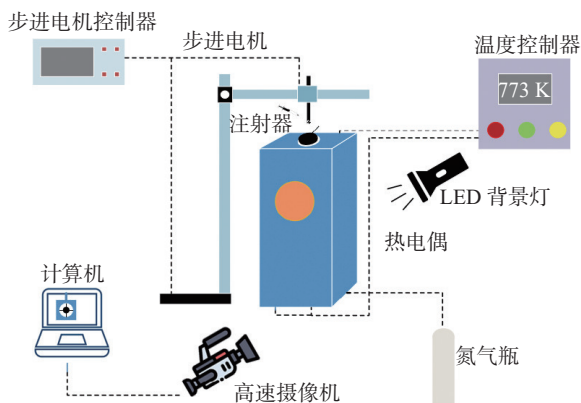


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental installation

1.3 图像处理办法

图 3 为图像处理程序的原理图。首先,设置

ROI 区域,以减少计算时间。提取液滴周围的矩形区域(ROI, 200×200 像素)进行特定分析。然后,检测液滴和石英丝的边缘,利用图像二值化去除周围的无用背景。过程需保证液滴的形状和大小不变。通过 Otsu 方法获得各部分的最优阈值。该方法通过自适应阈值实现背景与目标的分离。接着,采用形态学图像处理方法对石英纤维进行去除。最后,计算液滴图像的像素数,从而获得实际投影面积。由已知液滴投影面积求出等效圆直径。同时考虑到不同实验产生的液滴初始直径不同,为减小误差,采用直径平方归一化方法。

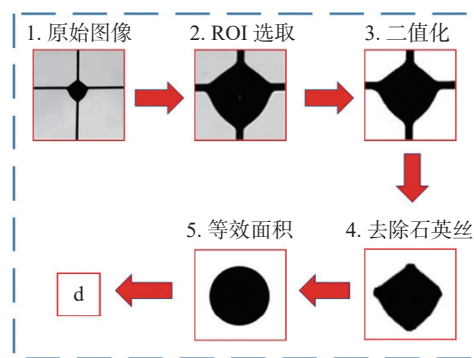


图 3 图像处理图

Fig. 3 Image processing

2 结果与讨论

油酸甲酯和乙醇的混合液滴通过传输系统进入加热炉后,在连续均匀地加热下,液滴内的低沸点组分乙醇首先蒸发汽化产生不同数量且大小不一的气泡。气泡在液滴内部运动、聚合、膨胀,当气泡内部的压力大于液滴表面张力时,气泡爆炸引起液滴破碎,出现微爆炸现象。利用微爆炸前后液滴直径变化定量分析微爆炸强度,公式如下^[19-20]:

$$I = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_2^2} \quad (1)$$

强微爆炸时 $I > 2$, 弱微爆炸时 $I < 2$ 。

式中:

d_1 ——液滴微爆炸前直径(mm);

d_2 ——液滴微爆炸后直径(mm);

I ——微爆炸强度。

对于一次液滴蒸发过程出现多次微爆炸,利用 SI 表示数次微爆炸强度之和,公式如下:

$$SI = \sum_{i=0}^n \frac{d_{i1}^2 - d_{i2}^2}{d_i^2} \quad (2)$$

式中:

SI ——数次微爆炸强度之和;

n ——微爆炸的出现次数。

图 4 为 673 K 和 773 K 温度时不同乙醇含量混合液滴蒸发归一化直径平方曲线。在 673 K 温度下(图 4(a)), 4 种混合液滴的蒸发趋势均先增大后减小, 并未出现任何程度的微爆炸。液滴进入加热炉, 当热膨胀效应产生的液滴膨胀速度大于蒸发速度时, 液滴直径会一直增加。在两者数值相同时, 液滴直径达到最大值。继续蒸发, 热膨胀效应不断减弱, 液滴直径开始减小, 直到 $d^2/d_0^2 = 0.05$ 时便蒸发结束, 这是考虑到 $d^2/d_0^2 < 0.05$ 时液滴体积太小无法得到蒸发完全的准确时间。以蒸发过程中液滴直径等于初始直径($d^2/d_0^2 = 1$)和 $d^2/d_0^2 = 0.05$ 时的对应时刻, 将蒸发过程分为膨胀阶段(t_1)和平衡蒸发阶段(t_3), 液滴寿

命为 $t_1 + t_3$ 。

773 K 温度下(图 4(b)), MO+E0 液滴与 673 K 温度时液滴的蒸发趋势一致, 故采取相同的阶段划分方式。在 MO+E20、MO+E30 和 MO+E50 液滴的蒸发过程中出现了微爆炸现象, 液滴直径发生剧烈变化。以第一次微爆炸开始时刻和最后一次微爆炸结束时刻将蒸发过程分为微爆炸准备阶段(t_1)、微爆炸发生阶段(t_2)和平衡蒸发阶段(t_3), 液滴寿命为 $t_1 + t_2 + t_3$ 。MO+E20 液滴发生了 1 次弱微爆炸, MO+E30 液滴发生了 1 次弱微爆炸和 2 次强微爆炸, MO+E50 液滴发生了 6 次微爆炸, 其中 5 次为弱微爆炸。

图 5 为 673 K 和 773 K 温度时混合液滴各蒸发阶段的时间占比。观察到液滴的平衡蒸发阶段时间占比随着油酸甲酯中乙醇含量的增加而增大。在 673 K 温度时, 与 MO+E0 液滴相比, MO+E20、MO+E30 和 MO+E50 液滴的平衡蒸发阶段时间占比分别增加了 1.54%、9.13% 和 17.49%。在 773 K 温度时, MO+E0、MO+E20、MO+E30 和 MO+E50 液滴的平衡蒸发阶段时间占比分别为 28.68%、31.10%、31.24% 和 63.56%。观察到的趋势可能是由于低沸点乙醇含量的增加, 加速了膨胀阶段或微爆炸准备阶段和微爆炸发生阶段的进行, 更早进入平衡蒸发阶段。

图 6 为不同温度和乙醇含量下混合液滴的微爆炸强度和微爆炸发生时间(MOT)占寿命的比值和强度。由图 6(a)可知, 673 K 温度下未发生微爆炸, 773 K 温度下微爆炸强度随着乙醇含量的增加而增大。温度的提升使得油酸甲酯在表面形成的油膜表面张力减小, 导致在相同乙醇含量下, 液滴在 773 K 温度下比 673 K 温度下更容易发生微爆炸。在相同的 773 K 温度下, 乙醇含量增大导致液滴内所形成的气泡大小和数量增大, 即乙醇相变增大, 形成气泡的蒸气压变大, 微爆炸也就越强。由图 6(b)可知, MO+E30 液滴 MOT 所占寿命比值在 0.65 ~ 0.69 之间, MO+E50 液滴在 0.25 ~ 0.37 之间, 微爆炸发生时间均相对集中, 该现象出现是由于微爆炸导致油膜发生破裂出现薄弱区域, 液滴表面张力减小, 导致容易在较短时间内再次发生微爆炸。同时可以观察到三种混合液滴第一次微爆炸发生时间即微爆炸延迟

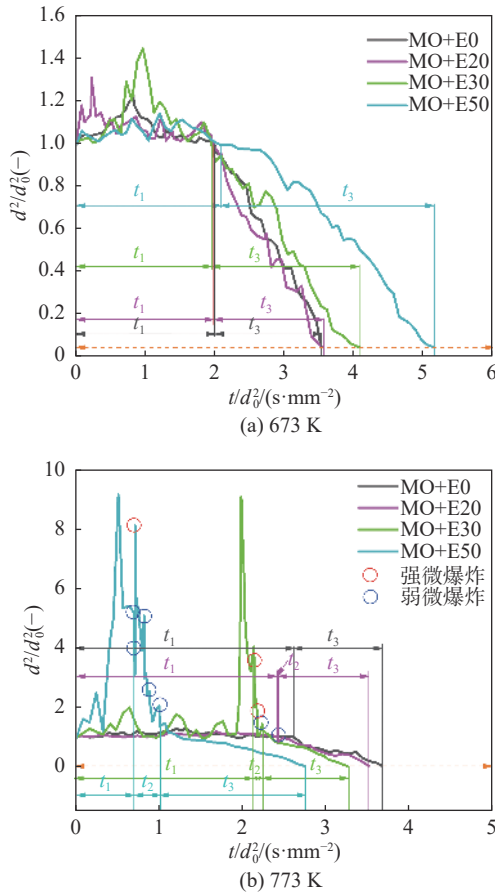


图 4 液滴归一化曲线

Fig. 4 Normalized curves of droplets

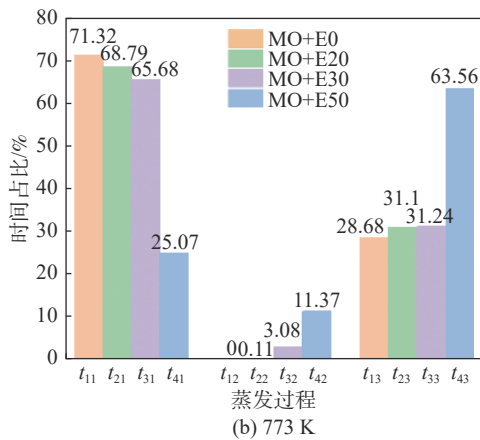
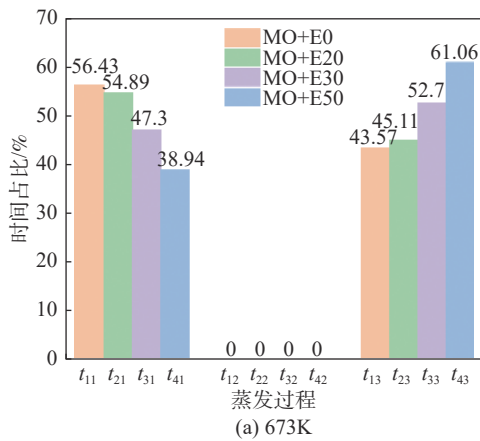


图 5 液滴各蒸发阶段时间占比

Fig. 5 Time proportions of droplets at different evaporation stages

时间随着乙醇含量的增加逐渐提前,这同样也是乙醇相变增大的结果。

为评估液滴蒸发过程的波动程度,结合液滴直径 d 和初始直径 d_0 ,引入不稳定性公式^[21]:

$$\text{Instability} = \left(\frac{d_{i+1}}{d_0}\right)^2 - \left(\frac{d_i}{d_0}\right)^2 \quad (3)$$

图 7 为 673 K 和 773 K 温度时混合液滴的不稳定性。773 K 温度时 MO+E30 和 MO+E50 液滴发生较大程度的波动,蒸发过程不稳定。这是由于液滴内部较强的气泡运动、气泡聚合以及微爆炸导致的,造成了液滴形状和大小的变化。另外可以看出 673 K 温度时的不稳定曲线也出现了较小的波动,这是由于液滴内部有气泡产生,但并未达到微爆炸发生条件,该温度下液滴蒸发过程整体是相对稳定的。

图 8 为不同温度下混合液滴关于乙醇含量变化的蒸发时间和蒸发速率。从图 8(a)、图 8(b)可以发现 673 K 和 773 K 的蒸发时间和蒸发速率呈现两种

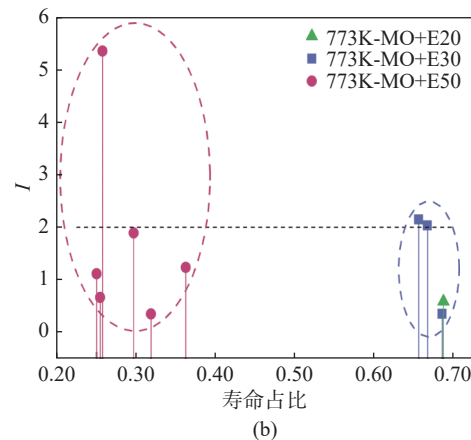
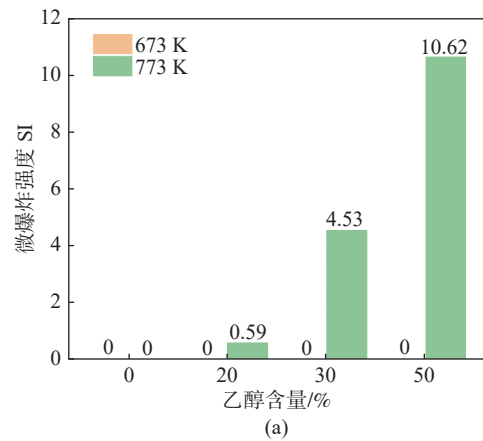


图 6 (a) 混合液滴微爆炸强度和(b)各微爆炸发生时间 (MOT) 占寿命的比值和强度

Fig. 6 (a) Micro-explosion intensity of blended droplets (b) Ratio of MOT to life span and its intensity

不同的变化趋势。在温度为 673 K 时,乙醇含量的增加导致蒸发时间不断增大,蒸发速率不断减小。这是由于乙醇含量的增大会促进液滴膨胀阶段的结束,使得液滴平衡阶段的时间占比增加,在该阶段混合液滴沸点增加,蒸发速率降低。该趋势也说明在较低温度下,纯油酸甲酯液滴的蒸发效果反而要优于混合液滴。

而在温度为 773 K 时,蒸发时间不断减小,蒸发速率不断增大,在乙醇含量为 50% 时最大。这是由于低沸点乙醇含量增加,内部轻组分相变程度加大,导致气泡破裂和微爆炸强度增加,进而导致液滴蒸发速率增加。但同时通过图 4(b)发现该温度下平衡阶段时间也是逐渐增大的,在一定程度上对蒸发有抑制作用,但微爆炸的促进作用要明显大于前者的抑制作用。微爆炸强度和次数的增加有利于燃料的蒸发和油气混合,进而改善燃料燃烧特性。

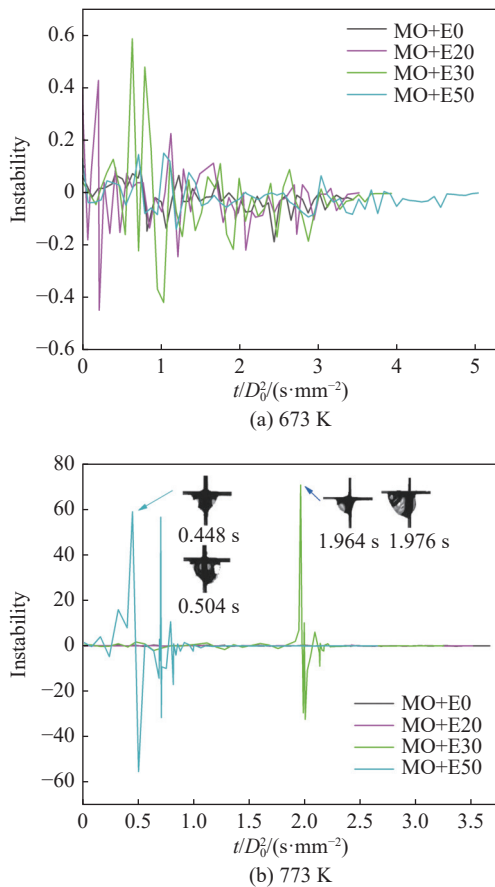


图7 不稳定性
Fig.7 Instability

3 结论

采用液滴蒸发实验研究了在 673 K 和 773 K 温度下 MO+E0、MO+E20、MO+E30、MO+E50 液滴的蒸发和微爆炸特性。研究结论如下：

1) 无微爆炸出现的蒸发过程分成膨胀阶段和平衡蒸发阶段，有微爆炸出现的蒸发过程分成微爆炸准备阶段、微爆炸发生阶段和平衡蒸发阶段。

2) 673 K 温度下未产生微爆炸现象，蒸发过程较平稳。773 K 温度时 MO+E20、MO+E30、MO+E50 液滴均产生微爆炸，且微爆炸强度和次数依次增加，蒸发过程波动较大。

3) 环境温度从 673 K 升高至 773 K 会导致蒸发速率上升。同时在较低环境温度时，增加乙醇含量会抑制油酸甲酯蒸发，而在较高环境温度时，随着乙醇含量的增加，蒸发速率越快，并在乙醇含量为 50% 时达到最大值。

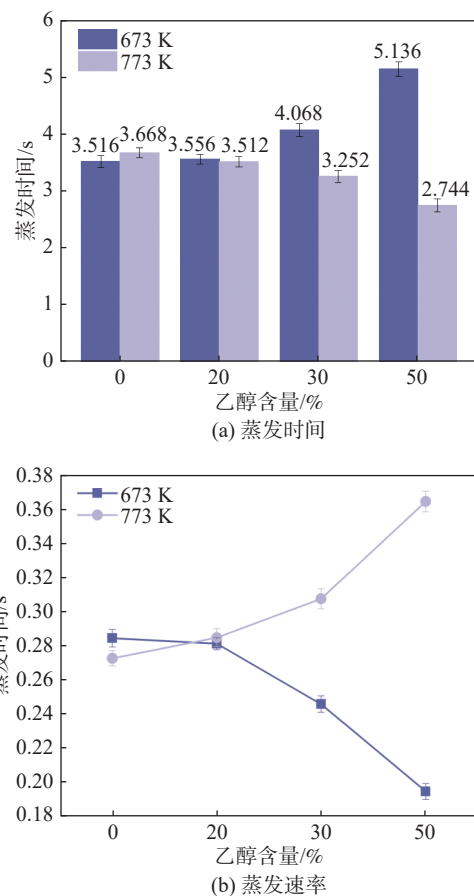


图8 混合液滴蒸发时间和蒸发速率

Fig.8 Evaporation time and rate of blended droplets

参考文献:

- [1] 秦欣妍, 温佳丽, 徐嘉乐, 等. 双金属 Ni-Co 基析氧反应催化剂研究进展 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 135-142. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.017.
QIN X Y, WEN J L, XU J L, et al. Research progress of bimetallic NiCo-based electrocatalysts for oxygen evolution reaction [J]. Southern energy construction, 2022, 9(4): 135-142. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.017.
- [2] 闫丰哲, 张帅. 双碳背景下生物质能源转化技术的研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(2): 112-114. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2024.02.032.
YAN F Z, ZHANG S. Research progress on biomass energy conversion technology under the background of dual carbon [J]. China resources comprehensive utilization, 2024, 42(2): 112-114. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2024.02.032.
- [3] 李强. 新型生物燃料替代传统燃料的可行性 [J]. 中国科技信息, 2024(7): 116-118.
LI Q. The feasibility of new biofuels to replace traditional fuels [J]. China science and technology information, 2024(7): 116-118.
- [4] 武国庆, 薛晓舟, 闵剑, 等. 全球能源低碳转型下生物液体燃料

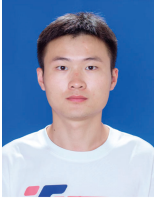
- 产业现状与展望 [J]. *中国生物工程杂志*, 2024, 44(1): 88-97. DOI: 10.13523/j.cb.2312101.
- WU G Q, XUE X Z, MIN J, et al. Status and prospects of liquid biofuel industry under the background of global low-carbon energy transition [J]. *China biotechnology*, 2024, 44(1): 88-97. DOI: 10.13523/j.cb.2312101.
- [5] 张国平, 王永豪. 我国生物质转化技术应用现状及展望 [J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(17): 1-5,10. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.17.001.
- ZHANG G P, WANG Y H. Application status and prospect of biomass conversion technology in China [J]. *Journal of Anhui agricultural sciences*, 2023, 51(17): 1-5,10. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.17.001.
- [6] 李禾. 生物质液体燃料: 迈向规模化应用 [N]. *科技日报*, 2024-04-19(05). DOI: 10.28502/n.cnki.nkjrb.2024.002313.
- LI H. Biomass liquid fuels: towards large-scale applications [N]. *Science and Technology Daily*, 2024-04-19(05). DOI: 10.28502/n.cnki.nkjrb.2024.002313.
- [7] 敬加强, 丁庆薇, 罗双子依, 等. 我国餐厨废弃油脂回收利用现状及产业化分析 [EB/OL]. (2024-03-05) [2024-05-08]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230600>.
- JING J Q, DING Q W, LUO S Z Y, et al. Analysis of the current situation and industrialization of the recycling and utilization of waste cooked oil in China [EB/OL]. (2024-03-05) 1-8 [2024-05-08]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230600>.
- [8] NAIK C V, WESTBROOK C K, HERBINET O, et al. Detailed chemical kinetic reaction mechanism for biodiesel components methyl stearate and methyl oleate [J]. *Proceedings of the combustion institute*, 2011, 33(1): 383-389. DOI: 10.1016/j.proci.2010.05.007.
- [9] WANG J G, LI J Q, SHEN Y K, et al. Experimental investigation on evaporation, puffing and vapor jetting of multi-component fuel droplets with high-volatility difference [J]. *Applied thermal engineering*, 2024, 239: 122151. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122151.
- [10] CHENG C, HU Y, JIANG Y. Investigation of evaporation and combustion characteristics of diesel and fatty acid methyl esters emulsified fuel droplets [J]. *Fuel*, 2024, 360: 130609. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130609.
- [11] HUANG X Y, WANG J G, WANG Y X, et al. Experimental study on evaporation and micro-explosion characteristics of biodiesel/n-propanol blended droplet [J]. *Energy*, 2020, 205: 118031. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118031.
- [12] 张璇, 姜根柱. 柴油-麻风树生物柴油混合燃料的微爆特性研究 [J]. *生物质化学工程*, 2024, 58(1): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5854.2024.01.005.
- ZHANG X, JIANG G Z. Simulation investigation of turbulent flow characteristics in constant volume combustion bomb [J]. *Biomass chemical engineering*, 2024, 58(1): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5854.2024.01.005.
- [13] 徐雪雯, 李鹏辉, 童国林. 第二代生物乙醇制备研究进展 [J]. *中国造纸*, 2023, 42(2): 94-101.
- XU X W, LI P H, TONG G L. Research progress of the preparation of second-generation bioethanol [J]. *China pulp & paper*, 2023, 42(2): 94-101.
- [14] 贾意久, 石雅丽. 生物质能源利用研究进展 [J]. *科技导报*, 2023, 41(16): 55-75. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.16.005.
- JIA Y J, SHI Y L. The research progress of biomass energy utilization [J]. *Science & technology review*, 2023, 41(16): 55-75. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.16.005.
- [15] 颜俊先, 潘江如, 郑毅, 等. 乙醇/生物柴油/柴油混合燃料的燃烧与排放特性 [J]. *成都工业学院学报*, 2024, 27(1): 5-12. DOI: 10.13542/j.cnki.51-1747/tn.2024.01.002.
- YAN J X, PAN J R, ZHENG Y, et al. Combustion and emission characteristics of ethanol/biodiesel/diesel blends [J]. *Journal of Chengdu Technological University*, 2024, 27(1): 5-12. DOI: 10.13542/j.cnki.51-1747/tn.2024.01.002.
- [16] 耿莉敏, 程清波, 陈阳, 等. 生物柴油-柴油-乙醇混合燃料的燃烧与排放特性 [J]. *中国公路学报*, 2018, 31(11): 236-243. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.11.025.
- GENG L M, CHENG Q B, CHEN Y, et al. Combustion and emission characteristics of biodiesel-diesel-ethanol fuel blends [J]. *China journal of highway and transport*, 2018, 31(11): 236-243. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.11.025.
- [17] 孙文强, 姜根柱, 薛文华, 等. 乙醇对棕榈酸甲酯滴蒸发特性的影响研究 [J]. *新能源进展*, 2022, 10(4): 370-374. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2022.04.010.
- SUN W Q, JIANG G Z, XUE W H, et al. Effect of ethanol on the evaporation characteristics of methyl palmitate droplets [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2022, 10(4): 370-374. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2022.04.010.
- [18] MENG K S, WU Y K, LIN Q Z, et al. Microexplosion and ignition of biodiesel/ethanol blends droplets in oxygenated hot co-flow [J]. *Journal of the energy institute*, 2019, 92(5): 1527-1536. DOI: 10.1016/j.joei.2018.07.021.
- [19] XUE W H, WANG X R, SUN W Q, et al. Experimental study on the evaporation characteristics of Jatropha curcas oil methyl ester (JME)-Ethanol blended droplets [J]. *Fuel*, 2023, 333: 126081. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126081.
- [20] WANG X R, XUE W H, SUN W Q, et al. Investigation of single drop evaporation characteristics of two-component fatty acid methyl esters at high temperature [J]. *Fuel*, 2023, 334: 126566. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126566.
- [21] 高建伟, 姜根柱, 任贵龙. 掺丁醇麻风树生物柴油单液滴蒸发特性实验研究 [J]. *纤维素科学与技术*, 2023, 31(3): 48-53. DOI: 10.16561/j.cnki.xws.2023.03.06.
- GAO J W, JIANG G Z, REN G L. Experimental study of single

droplet evaporation characteristics of butanol-doped Jatropha biodiesel [J]. *Journal of cellulose science and technology*, 2023, 31(3): 48-53. DOI: [10.16561/j.cnki.xws.2023.03.06](https://doi.org/10.16561/j.cnki.xws.2023.03.06).

王筱蓉(通信作者)

1982-, 女, 江苏科技大学教授, 南京理工大学博士, 硕士生导师, 主要从事燃料燃烧及蒸发特性研究工作(e-mail) wangxiaorong@just.edu.cn。

作者简介:



危昊翔

危昊翔(第一作者)

1999-, 男, 江苏科技大学机械硕士在读, 主要从事内燃机缸内燃料液滴蒸发研究工作(e-mail) 1587101441@qq.com。

(编辑 徐嘉铨)