

# 微乳化甲醇柴油液滴蒸发微爆特性试验研究

杨伟<sup>1</sup>, 邹润<sup>1</sup>, 马富康<sup>1</sup>, 李峰<sup>1</sup>, 刘锋<sup>1</sup>

(1. 中北大学 能源与动力工程学院, 太原 030051)

## Experimental Research on Evaporation and Micro-explosion Characteristics of Micro-emulsified Methanol-diesel Drops

YANG Wei<sup>1</sup>, ZUO Run<sup>1</sup>, MA Fukang<sup>1</sup>, LI Feng<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The micro-explosion of micro-emulsified methanol-diesel can promote fuel atomization and improve the mixing, however the evaporation and micro-explosion mechanism of microemulsified methanol-diesel needs to be further explored. Micro-emulsified methanol-diesel was prepared by phacoemulsification. This work studied the influence of methanol content to emulsifier ratio on the stability and dispersed phase quality of micro-emulsified methanol-diesel, finally to obtain the optimal methanol-emulsifier content ratio of 2:1. Through the droplet evaporation device, the influence of initial volume and methanol content of droplets on emulsion evaporation and micro-explosion characteristics was studied. The initial volume of droplets increased linearly with a growth rate of 2.13 s/ $\mu$ l, but basically did not affect the proportion of evaporation time and droplet evaporation rate at each stage. The increase of methanol content led to a linear decrease in droplet lifetime, with a reduction rate of 2.14 s/ $\mu$ l. Also, the increase of methanol content led to a significant increase in expansion and fluctuation times. The expansion time could be significantly increased by 2.9 times. The increase of methanol content accelerated the droplet evaporation rate, and for every 1% increase in methanol content, the evaporation rate increased by 0.27 s<sup>-1</sup>. The increase of the initial volume of the droplet and the methanol content will lead to an increase in the expansion ratio and the number of microbursts. Methanol content is the key to affect the micro-explosion. The expansion ratio increases exponentially after the methanol content exceeds 10%.

**摘要:** 微乳化甲醇柴油微爆能够促进燃油雾化改善油气混合状态, 然而微乳化甲醇柴油的蒸发微爆机理有待深入探究。采用超声乳化法制备了微乳化甲醇柴油, 研究了甲醇含量与乳化剂比例对微乳化甲醇柴油稳定性和分散相品质的影响规律, 获得了最佳甲醇与乳化剂含量比为 2:1。在挂滴式液滴蒸发试验装置上, 研究了液滴初始体积与甲醇含量对乳化液蒸发特性和微爆特性的影响规律。结果表明, 液滴初始体积增大促使液滴寿命线性增加, 其增长率为 2.13 s/ $\mu$ l, 但基本不影响各阶段蒸发时间占比和液滴蒸发速率。甲醇含量增大促使液滴寿命线性减小, 其减小率为 2.14 s/ $\mu$ l, 同时导致膨胀时间和波动时间显著增加, 膨胀时间可显著增加 2.9 倍。甲醇含量增加, 液滴蒸发速度加快, 每增加 1% 甲醇含量, 蒸发速率增加 0.27 s<sup>-1</sup>。液滴初始体积与甲醇含量的增加均会导致膨胀比和微爆次数增加, 甲醇含量是影响微爆发生和微爆强弱的关键, 甲醇含量超过 10% 后, 膨胀比呈指数级增加。

**关键词:** 甲醇柴油; 乳化液滴; 蒸发特性; 微爆;

**Key words:** Methanol-diesel; Emulsified droplets; Evaporation characteristics; Micro-explosion

中图分类号: TK428.9

文献标识码: A

收稿日期: 2023-06-29

基金项目: 山西省基础研究计划项目 (20210302123072);

作者简介: 杨伟 (1985), 男, 讲师, 主要研究方向为新能源燃料燃烧设计及理论, E-mail: yanwgei2184@126.com;

## 0 概述

2020 年中国提出力争 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和。然而当前我国主要的能源依然以煤、石油、天然气为主, 且需求不断攀升, 特别在石油资源方面, 供需缺口很大。2020 年我国石油净进口量 5.4 亿吨, 增长 7.26%。我国石油消费持续中低速增长, 2020 年国内原油对外依存度达到 73.5%<sup>[1]</sup>。环境保护和能源安全的形势异常严峻, 寻求清洁、高效的新型能源及其燃烧方式成为破解之道。甲醇是煤、石油、天然气等化工工业的副产品, 也可通过补集二氧化碳, 结合电解水制得的氢而合成, 其具有广泛的来源。同时甲醇的使用过程与传统汽柴油类似, 应用成较低。当前, 甲醇的主要应用方式是采用高能燃料引燃法和二元燃料双喷法的方式与柴油进行掺烧。该方法均需配备两套燃油喷射系统和两套燃油存储系统, 这必然带来更大使用维护和空间体积成本<sup>[2]</sup>。有学者提出微乳化燃料直燃法, 该方法无需额外增加其它系统, 随着温度的升高, 乳化燃料的热力学平衡被打破, 各自特性交叉浮现, 相互促进极易实现高效清洁燃烧<sup>[3]</sup>。微乳化燃料的微爆, 就是这种燃料的特殊之处。

液滴微爆最早可追溯到 1965 年 Ivanov 和 Nefedov 研究水和液态燃料乳化液滴蒸发燃烧试验中发现液滴剧烈破碎现象并命名为“微爆”<sup>[4]</sup>。微乳化燃料微爆产生的破碎小液滴, 形成多个微小射流促进混合气的形成, 同时也使混合气中形成多个火核, 促进燃油均匀快速燃烧<sup>[5]</sup>。这一优势促使乳化燃料微爆现象成为各国学者关注的热点。印度科学研究院研究发现, 乳化燃料受热后出现的内部核气泡喷

射过程, 会将次级液滴输送到火焰区, 从促进火焰快速传播<sup>[6]</sup>。目前乳化燃油液滴蒸发微爆的研究主要采用挂滴法<sup>[7]</sup>、飞滴法<sup>[8]</sup>和加热盘法<sup>[9]</sup>等试验手段。托木斯克理工大学<sup>[10]</sup>采用挂滴法研究了水-油(煤油、柴油、菜籽油)乳化液滴喷射、微爆的过程。结果表明首次微爆时间随着环境温度和初始液滴半径的增加而减小。华中科技大学<sup>[11]</sup>采用挂滴法研究了水-柴油乳化液滴不同背景温度下的转换机制。结果表明最大归一化平方直径随环境温度的升高先增大后减小, 在 773K 时最大值为 2.91。微爆频率先减小后增大, 与微爆强度一致。上海交通大学<sup>[12]</sup>研究了含水乙醇柴油乳化液的过热极限和微爆现象。结果表明, 过热极限与含水乙醇基本不相关, 30%和 40%的乳液含水乙醇表现出比其他乳液更高的气泡均匀成核概率。北京理工大学<sup>[13]</sup>采用飞滴法研究了甲醇-柴油乳化液滴的微爆过程, 结果表明随甲醇体积分数的增加, 乳化油液滴的破碎时刻先提前后推迟, 在甲醇体积分数为 30%时, 乳化油的微爆效果最优。

目前与柴油混合乳化的研究主要集中在水和乙醇, 对于甲醇-柴油乳化液滴微爆现象的研究相对较少。我国具有大量的甲醇资源, 微乳化甲醇柴油的研究有助于解决柴油高效清洁燃烧的问题。因此, 本文采用挂滴法, 研究了液滴初始体积和甲醇含量对微乳化甲醇柴油液滴的蒸发微爆特性, 试图探明微乳化甲醇柴油液滴微爆演化机制。

## 1 试验材料与试验装置

## 1.1 试验材料

本文选用 0#柴油作为为乳化液油相组分，市售甲醇为乳化液水相组分。乳化剂采用油酸和正丁醇混合配置而成的复合乳化剂，其中油酸和正丁醇体积比为 9:1。乳化液相关组分的物理性质如下表所示。

为了确保微乳甲醇柴油的稳定性及分散相的品质，本文采用机械搅拌加超声搅拌的方式制备微乳化液。首先机械搅拌采用 JJ-1B 型恒速电动搅拌器进行预乳化，然后采用 KH-2860J 型超声波搅拌乳化机进行最终乳化。乳化后通过静置观察法评定乳化液是否分层，通过光学显微镜观察分析分散相的分布情况。乳化剂含量决定着微乳化甲醇柴油的稳定性和分散相的品质，因此本文分别研究了甲醇与乳化剂含量之比对微乳化甲醇柴油特性的影响。结果表明，甲醇与乳化剂含量之比为 10: 3、2: 1、5: 4 时，其索特平均直径分别为 164.8  $\mu\text{m}$ 、92.2  $\mu\text{m}$  及 258.7  $\mu\text{m}$ 。可见甲醇与乳化剂含量之比为 2:1 时，微乳化甲醇柴油的分散相品质最佳，其稳定及分散相情况如图 1-图 3 所示。

表 1 微乳化液各组分物理性质

项目	柴油	甲醇	正丁醇	油酸
分子式	$\text{C}_{12-25}$	$\text{CH}_3\text{OH}$	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OH}$	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}$
沸点/ $^{\circ}\text{C}$	282 ~ 338	337.7	117.25	350 ~ 360
汽化潜热/( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	270	1109	-	-
表面张力系数(300 ~ 600 K)/( $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	-	0.003 ~ 0.040	-	-

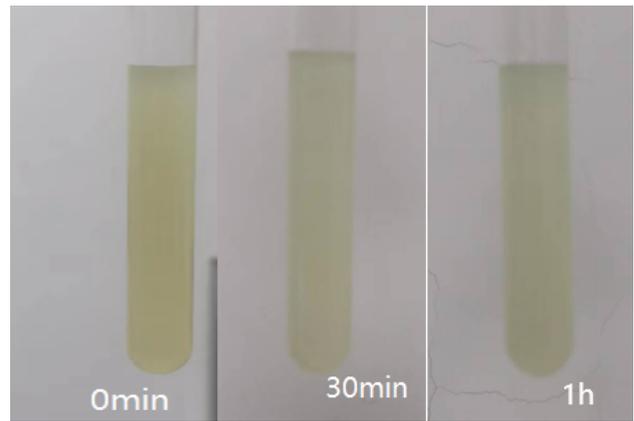


图 1 甲醇乳化剂比 2: 1 下的微乳化液稳定性

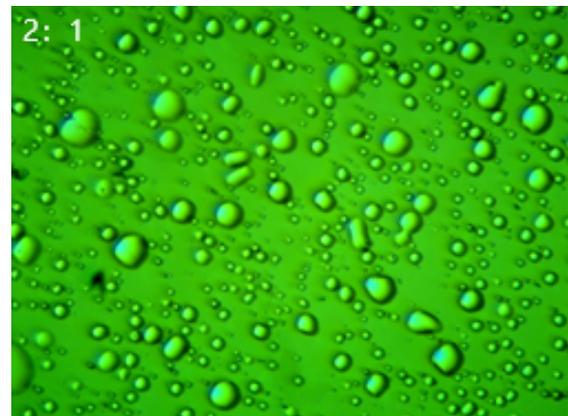


图 2 甲醇乳化剂比 2: 1 下的微乳化液分散相分布

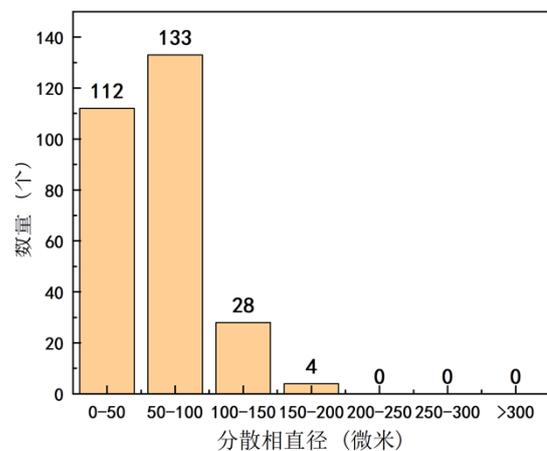


图 3 甲醇乳化剂比 2: 1 下的微乳化液索特平均直径

## 1.2 试验装置

本文建立了挂滴式液滴蒸发试验装置如图 4 所示，该系统主要包括高温蒸发弹体及加热系统、液滴制备传送系统、以及图像采集系统。高温蒸发弹体及加热系统由加热丝、温度传感器、温控仪和保温箱体等多个组件构成，其主要功能给液滴提供稳定的高温蒸发环境。液滴制备采用微量进样器通过

控制微乳化液的体积控制液滴的大小。液滴悬挂装置采用耐高温的热电偶丝，为了确保热电偶丝不受外部环境的影响，热电偶丝外部增加了耐高温陶瓷管。液滴传输系统才电控线性模组，能够将液滴准确、快速地传送到容弹内的指定位置。图像采集系统主要包括高速摄影机、微距镜头、冷光源和计算机采集软件等部分。高速摄像机型号为千眼狼 5KF10，最大分辨率 1280 pixel×860 pixel 下，帧频为 3600 fps。微距镜头焦距为 105 mm。

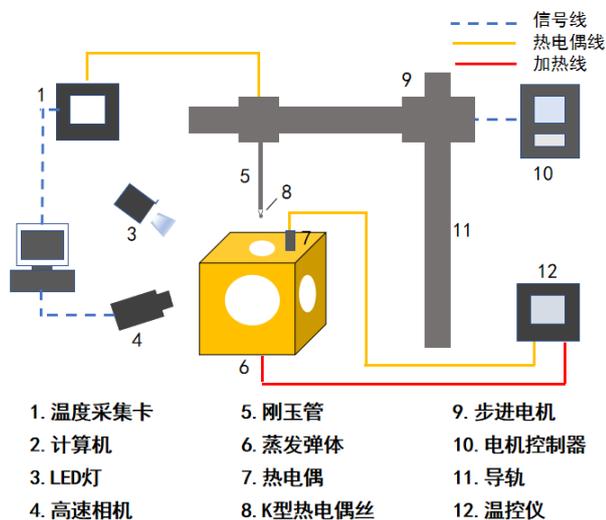


图 4 挂滴式蒸发试验台示意图

### 1.3 试验工况

本文主要研究甲醇含量和液滴初始体积对液滴蒸发特性的影响。常用的甲醇含量一般在 20% 以内，该含量的甲醇能够确保内燃机具有较好的经济性和排放性，且对动力性影响较小，因此本文选用的甲醇含量分别为 5%、10%、15% 和 20%，分别记为 M05、M10、M15 和 M20。液滴初始体积分别为 0.8  $\mu\text{l}$ 、1.2  $\mu\text{l}$  和 1.6  $\mu\text{l}$ ，该体积下对应的理想液滴直径范围为 0.54 mm-1.46 mm。

## 2 数据处理及误差分析

### 2.1 评价参数

蒸发过程是微乳化甲醇柴油液滴发生微爆的先导现象。为了评价了液滴的蒸发特性，本文定义了归一化液滴直径平方、蒸发速率、蒸发寿命三个蒸发特性参数，定义如下：

归一化液滴直径：归一化是一种简化计算的方式，即将有量纲的表达式，经过变换，化为无量纲的表达式，成为标量。归一化液滴直径平方即将液滴初始直径平方与理想直径平方相比，得到值在 (0,1] 内的无量纲量。计算公式为：

$$L = \frac{D^2}{D_0^2} \quad (1)$$

式中,  $L$  为归一化液滴直径  $D$  为液滴初始直径, mm;  $D_0$  为理想液滴直径, mm。

蒸发速率：单位时间内单位面积上蒸发出来的水汽的质量称为蒸发速率，通过常规测试手段难以准确测量。单位时间内液滴蒸发出的水汽质量与液滴直径呈正相关，因此本文采用单位时间内归一化液滴直径平方的变化率来间接表征。

$$u = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (2)$$

式中,  $u$  为液滴蒸发速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ 。

液滴寿命  $t$ ：液滴寿命即液滴存在的时间长短。

主要由处理高速相机拍摄的图像获取液滴寿命。

微爆过程是微乳化甲醇柴油液滴典型特征。为了评价了液滴的微爆特性，本文定义了微爆次数和膨胀比两个微爆特性参数，详细定义如下：

微爆次数：液滴在蒸发过程中液滴发生破碎的次数称为微爆次数，记为  $N$ 。

膨胀比：膨胀比为液滴投影面积与理想液滴初始投影面积之比，其计算公式为：

$$\gamma = \frac{S}{S_0} \quad (3)$$

式中,  $\gamma$  为膨胀比;  $S$  为液滴投影面积,  $\text{mm}^2$ ;  $S_0$  理想液滴初始投影面积,  $\text{mm}^2$ 。

## 2.2 误差分析

乳化甲醇柴油中甲醇的体积分数是本次试验研究中的关键变量，在制备微乳化甲醇柴油时，应先按照式(4)确定甲醇与柴油的体积比，再分别提取定量体积的甲醇及柴油进行试验。

$$\omega_n = \frac{V_m}{V_m + V_d} \times 100\% \quad (4)$$

式中， $V_m$ 表示甲醇体积， $\mu\text{l}$ ， $V_d$ 表示柴油体积， $\mu\text{l}$ 。

在制备微乳化甲醇柴油时，使用滴管来量取甲醇及柴油，这一过程的不确定度主要来源于滴管，根据相关资料滴管的不确定度为0.5%，代入式(5)中即可计算出甲醇体积分数的不确定度为0.87%。

$$\frac{\Delta\omega_n}{\omega_n} = \left[ \left( \frac{\Delta V_m}{V_m} \right)^2 + \left( \frac{\Delta(V_m + V_d)}{V_m + V_d} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

在本次试验中微乳化甲醇柴油中甲醇的体积分数分别为5%、10%、15%及20%，试验所设定的参数间最小差比为25%，远远大于制备时甲醇体积分数的不确定度0.87%，因此试验中甲醇体积分数所产生的误差对试验精度影响很小。

液滴初始直径也是一个至关重要的因素。在试验过程中，液滴是由操作人员使用微量进样器进行生成，试验时使用的微量进样器的最小刻度为0.04  $\mu\text{l}$ ，在制备液滴的过程中，无法保证每次所生成的液滴完全一致，会导致出现正负半个最小刻度的偏差，即0.02  $\mu\text{L}$ ，代入式(6)中即可计算出液滴初始直径的不确定度。

$$\frac{\Delta d^2}{d^2} = \sqrt{\left( \frac{2 \Delta v}{3 v} \right)^2} \quad (6)$$

由此获得液滴初始体积0.8  $\mu\text{L}$ 、1.2  $\mu\text{L}$ 、1.6  $\mu\text{L}$ 的液滴初始直径平方不确定度分别为1.67%、1.11%、0.83%。试验中所设定的液滴初始直径为0.58 mm、0.66 mm、0.73 mm，与之对应的液滴初始直径平方为0.3364  $\text{mm}^2$ 、0.4356  $\text{mm}^2$ 、0.5329  $\text{mm}^2$ ，液滴初始直径平方的最小差比为18.3%，远大于制备液滴时产生的误差，因此试验中液滴直径所产生的误差对试验精度影响很小。

## 3 结果与讨论

### 3.1 液滴初始体积对液滴蒸发特性的影响

图5为不同液滴初始体积下的蒸发过程。其环境温度为500 $^{\circ}\text{C}$ 、液甲醇含量为15%，甲醇与乳化剂含量之比为2:1。

三种液滴初始体积下，微乳化甲醇柴油液滴均发生微爆。随着液滴初始体积的增大，液滴波动幅度显著增大，波动次数显著增多。当液滴初始体积增大时，液滴在波动蒸发阶段会产生大气泡，其原因是随着初始体积的增大，液滴内部的甲醇分散相数量也在增加，并随着温度升高气化成核所形成的小气泡不断聚合成大气泡。图6为不同初始体积下的液滴归一化平方直径。由图可知，随着液滴初始体积的增加，液滴微爆强度也在增加，其原因是初始体积的增加使液滴内含有更多的甲醇分散相，随温度升高有更多的小气泡聚合，进而增加微爆强度。此外，随着液滴初始体积增加，液滴寿命也随之增大。当液滴未进入高温弹体时，液滴温度保持在环境温度；液滴进入高温弹体后，液滴内部温度急速上升，此时液滴处于膨胀阶段；波动蒸发阶段，液滴内部温度继续快速上升，但上升速率低于膨胀阶段，在此阶段液滴体积变化幅度较大；稳定蒸发阶段，温度平稳上升，并且液滴体积较少发生波动。

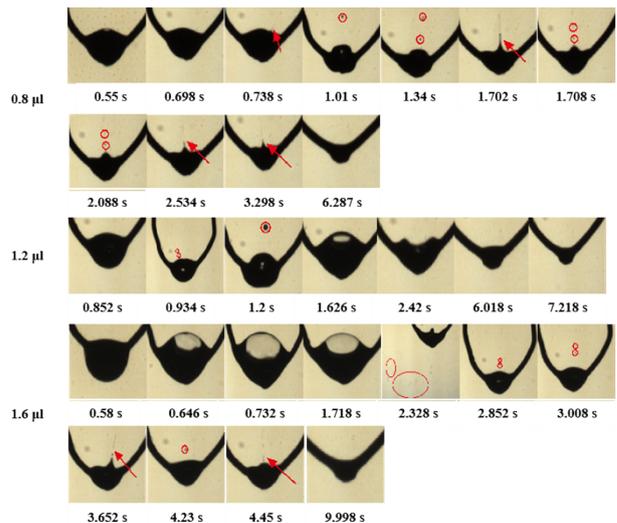


图5 不同液滴初始体积下液滴蒸发过程

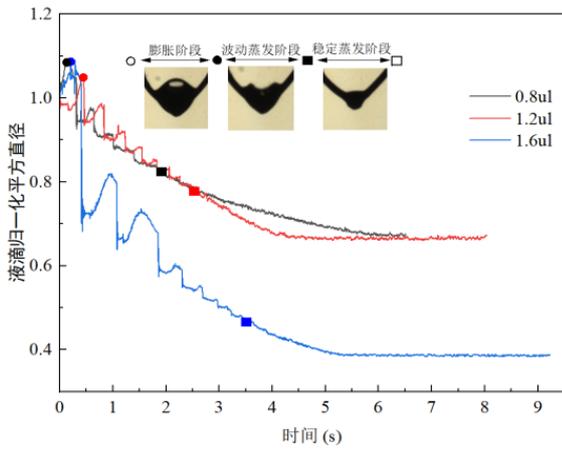


图 6 不同液滴初始体积下的归一化液滴平方直径

图 7 为不同液滴大小下各阶段占比情况。由图可知，三种液滴大小下各阶段占比基本相同，最大相差不超过 2%。这说明相同甲醇含量下液滴蒸发三阶段时间占比与液滴大小基本无关。液滴初始体积的变化对液滴蒸发特性的最大影响表现在微爆现象及液滴寿命两方面，如图 8 所示。由图可知，液滴初始体积的增加对液滴蒸发速率影响较小，蒸发速率仅与液滴组分和环境温度相关，但液滴寿命随着液滴初始体积的增呈线性增加趋势，其增长率为  $2.13 \text{ s}/\mu\text{l}$ 。图 9 为不同液滴初始体积下膨胀比和微爆次数对比图。由图可知，膨胀比与微爆次数均随着液滴初始体积的增加而增加，这是由于随着液滴体积的增加，液滴内部含有的甲醇分散相也增加。良好甲醇分散相有助于液滴微爆现象的诱发。

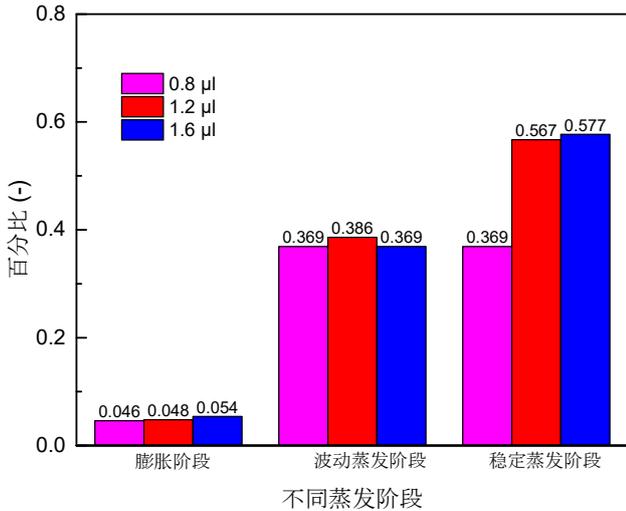


图 7 不同液滴大小下各阶段占比

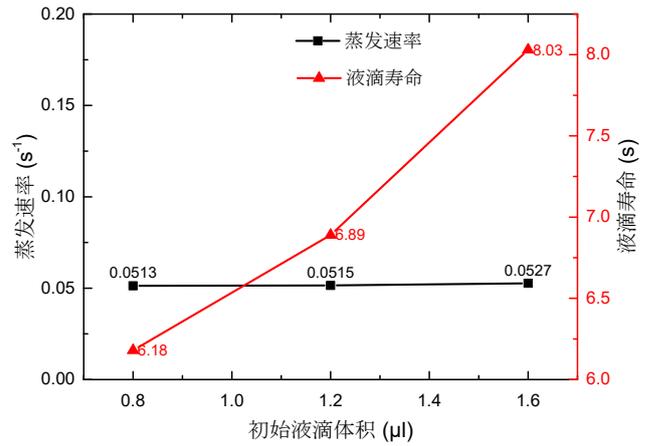


图 8 不同液滴初始体积下液滴蒸发速率及寿命

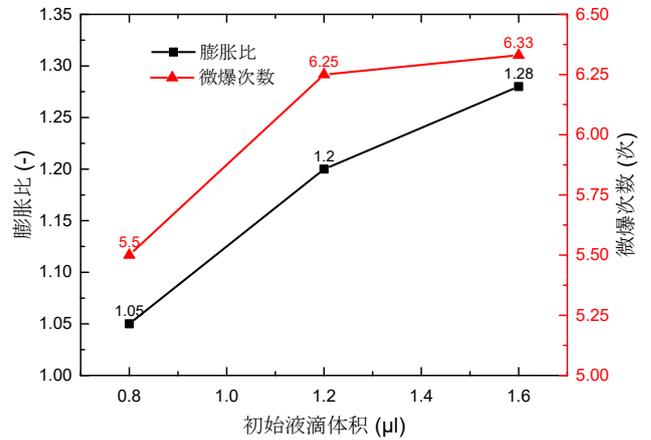


图 9 不同液滴初始体积下液滴膨胀比及微爆次数

### 3.2 甲醇含量对液滴蒸发特性的影响

甲醇是微乳化甲醇柴油的分散相，其相变传热过程直接影响微乳化甲醇柴油的蒸发特性，如图 10

所示。图 11 为不同甲醇含量下归一化液滴直径平方。

其环境温度  $500^\circ\text{C}$ 、液滴初始体积为  $1.2 \mu\text{l}$ 、甲醇与

乳化剂含量之比为 2: 1。由图可知，液滴进入高温

弹体后，液滴体积逐渐受热膨胀，直至达到最大体积（即归一化液滴直径平方达到最大值）为止，该过程为膨胀阶段。液滴达到最大体积后，微乳化甲醇柴油内部低沸点的甲醇分散相随着温度升高气化

成核、聚合膨胀、甲醇分散相发生破裂而发生喷射或微爆现象，导致液滴体积剧烈波动，该过程为波动蒸发过程<sup>[8]</sup>。当微乳化甲醇柴油液滴内的甲醇

化成核速度小于液滴蒸发速度时，液滴归一化直径

平方与时间呈线性变化，基本不发生显著的喷射和微爆现象，直至液滴全部蒸发完成，该过程为稳定蒸发阶段。

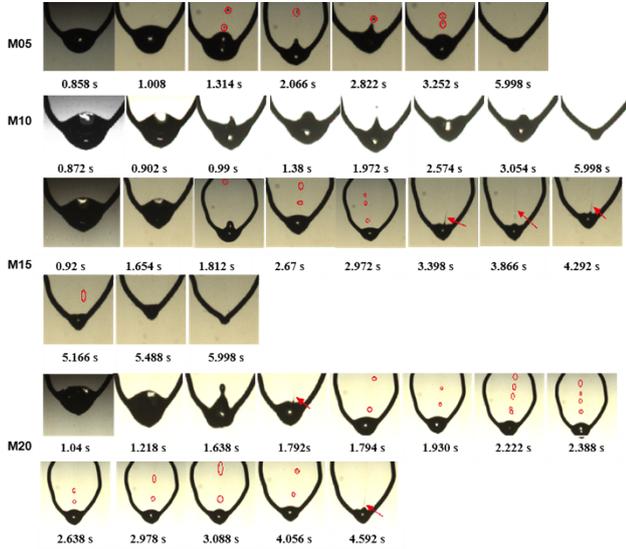


图 10 不同甲醇含量下液滴蒸发过程

随着甲醇含量的增加，归一化液滴直径平方值会出现多次较大的突增突减，这是由于甲醇含量的增加促使微乳化甲醇柴油液滴内更容易产生较多较大的气泡。气泡生成，液滴直径平方突增；气泡溃灭，液滴直径平方突减。液滴进入容弹前，液滴内部温度基本保持室温状态；液滴开始进入容弹后，液滴内部温度急剧升高，微乳化甲醇柴油开始受热蒸发，由于低沸点的甲醇分散相随着温度升高气化形成小气泡核，不断膨胀并与其它小气泡聚合，使得液滴的直径逐渐增大。随着温度的升高气泡不断膨胀，当气泡内的压力大于表面张力时气泡将发生破裂，出现燃油子液滴飞溅的微爆现象。随着液滴内气体的喷出，液滴直径急剧收缩。而此时液滴内仍有部分甲醇分散相不断吸热气化、聚合气泡，再随着温度上升气泡膨胀发生再次微爆现象。随后液滴将不断重复甲醇分散相气化成核、膨胀聚合、微爆发生、液滴收缩这一过程，直至液滴内部甲醇含量无法维持微爆现象发生。液滴进入稳定蒸发阶段后，液滴内部温度持续增加，直至液滴完全蒸发。

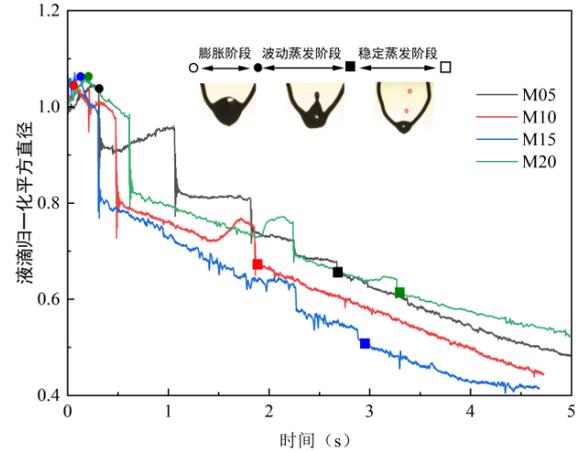


图 11 不同甲醇含量下归一化液滴直径平方

图 12 为不同甲醇含量下液滴蒸发各阶段占比。由图可知，随着甲醇含量的增加液滴膨胀阶段及波动蒸发阶段逐渐延长。甲醇含量大于 10% 的工况其膨胀阶段时间最大可增加 2.9 倍，波动蒸发阶段时间最大可增加 21.4%。这是因为甲醇含量增加使液滴内部甲醇分散相增多，从而甲醇分散相受热气化成核的几率增加，气泡增多。而稳定蒸发阶段最大降幅为 18.8%。

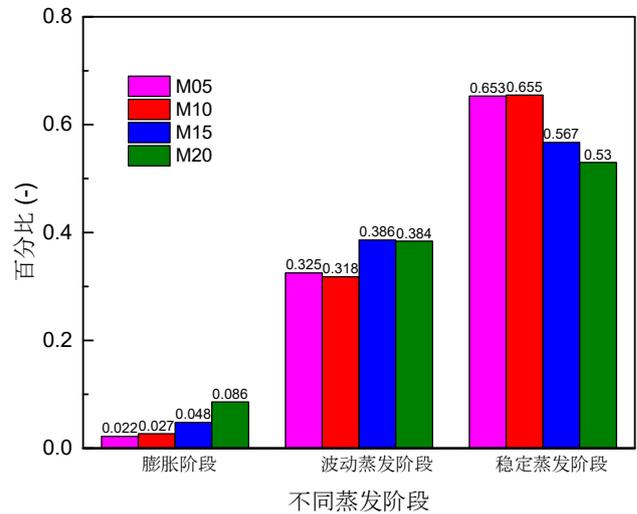


图 12 不同甲醇含量下各蒸发阶段占比

图 13 为不同甲醇含量下的液滴蒸发速率和液滴寿命对比图。由图可知，随着甲醇含量的增加，液滴蒸发速率基本呈线性增大趋势，每增加 1% 甲醇含量，蒸发速率增加  $0.27 \text{ s}^{-1}$ 。这是因为微爆的发生增

加了液滴与高温环境的接触面积，从而加快了液滴蒸发速率。甲醇含量增加促使液滴内甲醇分散相的数量增多且分布更加均匀，有利于液滴微爆的多次发生，加快液滴蒸发。液滴蒸发速率与液滴寿命呈负相关，随着甲醇含量的增加液滴蒸发速率逐渐加快，而液滴寿命逐渐缩短。

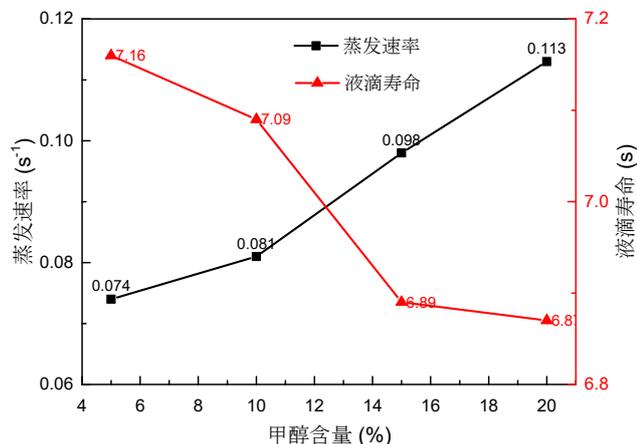


图 13 不同甲醇含量下液滴蒸发速率及寿命

图 14 为不同甲醇含量下膨胀比与微爆次数的对比图。由图可知，膨胀比随着甲醇含量的增加而增加，甲醇含量低于 10% 时，膨胀比缓慢增加；当甲醇含量高于 10% 时，膨胀比呈指数规律急速增加，M20 比 M05 的膨胀比增加了 45.9%。同时随着甲醇含量的增加，微爆次数液逐渐增加。这表明甲醇含量的增加有助于增强液滴微爆强度，从而加速燃油雾化。

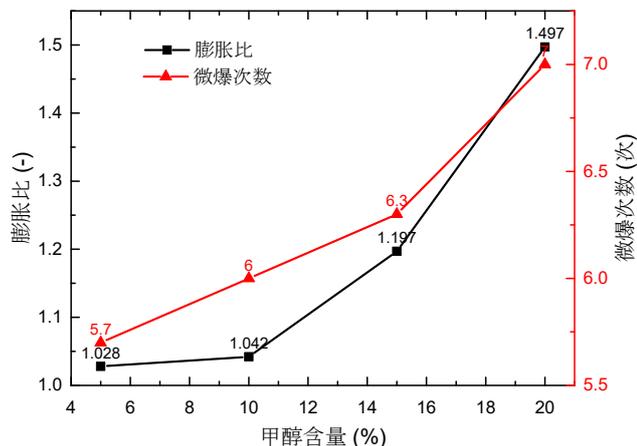


图 14 不同甲醇含量下膨胀比及微爆次数

## 4 结论

(1) 本文采用机械搅拌加超声搅拌的方式制备微乳

化液。研究了甲醇含量与乳化剂比例对微乳化甲醇柴油稳定性和分散相品质的影响规律。结果表明，配制的微乳化甲醇柴油经过 1 小时后，乳化液分布较为均匀，未出现分层现象，乳化液较为稳定。甲醇与乳化剂含量比为 2: 1 时，微乳化甲醇柴油中的甲醇分散相分布较为均匀，相索特平均直径保持在  $92 \mu\text{m}$ ，显著低于甲醇与乳化剂含量比为 10: 3 和 5: 4 的索特平均直径  $164.8 \mu\text{m}$  和  $258.7 \mu\text{m}$ 。因而选择改比例制备的微乳化甲醇能够确保其产生微爆现象的准确性。

(2) 液滴初始体积增大导致液滴波动幅度显著增大，波动次数显著增多。这是由于液滴初始体积增大，液滴内部甲醇分散相数量相应增加，从而增加了气泡成核的几率，进而激发多次微爆发生。相同甲醇含量下液滴初始体积与液滴蒸发时间占比、液滴蒸发速率基本无关。而液滴寿命呈线性增加趋势，其增长率为  $2.13 \text{ s}/\mu\text{l}$ 。液滴膨胀比和液滴膨胀次数逐渐增加。

(3) 甲醇含量增加会加快液滴微爆现象发生，液滴直径出现突增突减的波动蒸发现象。这是由于甲醇含量的增加更容易促使微乳化甲醇柴油液滴内气泡的生成和溃灭。甲醇含量每增加 1%，液滴蒸发速率增加  $0.27 \text{ s}^{-1}$ 。甲醇含量增加直接导致了液滴膨胀阶段和波动蒸发阶段的增加，膨胀时间最大可增加 2.9 倍，波动蒸发时间最大可增加 21.4%。同时甲醇含量超过 10% 后，膨胀比呈指数级增加。这是由于微爆次数增加，加快小液滴生成、受热气化。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2020 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] 姚春德. 柴油/甲醇二元燃料燃烧理论与实践[M]. 天津大学出版社, 2015.
- [3] Kumar H, Sarma A K, Kumar P. A comprehensive review on preparation, characterization, and combustion characteristics of microemulsion based hybrid biofuels [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2020, 117(Jan.): 109498.1-109498.17.
- [4] Ivanov V M, Nefedov P I. Experimental investigation of the combustion process of natural and emulsified liquid fuels. 1962.
- [5] Basu S, Miglani A. Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: A short review [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 96:482-503.

- 
- [6] Miglani, Ankur, Basu, et al. Effect of Particle Concentration on Shape Deformation and Secondary Atomization Characteristics of a Burning Nanotitania Dispersion Droplet[J]. Journal of Heat Transfer Transactions of the Asme, 2015.
- [7] Antonov D V , Kuznetsov G V , Sazhin S S ,et al.Puffing/micro-explosion in droplets of rapeseed oil with coal micro-particles and water[J]. Fuel, 2022, 316:123009.
- [8] Wang C. H., Liu X. Q., Law C. K. Combustion and micro explosion of freely falling multicomponent droplets[J]. Combustion and Flame, 1984, 56(2): 175-197.
- [9] Meng K , Bao L , Shi Y ,et al. Experimental investigation on Ignition, Combustion and Micro-explosion of RP-3, Biodiesel and Ethanol Blended Droplets[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178:115649.
- [10] Fedorenko R M , Antonov D V , Strizhak P A ,et al.Time evolution of composite fuel/water droplet radii before the start of puffing/micro-explosion[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 191:122838.
- [11] Xiaoqing Zhang, Bo YuanA,et al. A new shift mechanism for micro-explosion of water-diesel emulsion droplets at different ambient temperatures[J]. Applied Energy, 2022, 322:119448.
- [12] Zhang X , Li T , Wang B ,et al.Superheat limit and micro-explosion in droplets of hydrous ethanol-diesel emulsions at atmospheric pressure and diesel-like conditions[J].Energy, 2018, 154:535-543.
- [13] 齐正达,韩恺,倪兆静.柴油混合燃料液滴微爆现象及规律研究[J].内燃机学报, 2022(040-003).