

# 聚甲氧基二甲醚高温高压下喷雾燃烧特性光学诊断研究

李浩杰<sup>1</sup>, 玄铁民<sup>1</sup>, 王雨涛<sup>1</sup>, 常亚超<sup>2</sup>, 贾明<sup>2</sup>, 何志霞<sup>3</sup>, 王谦<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 210203; 2. 大连理工大学 能源与动力工程学院, 辽宁 大连, 116024; 3. 江苏大学 能源研究院, 江苏 镇江 210203)

## Optical Study on spray and combustion characteristics of polymethoxy dimethyl ethers under high-temperature and high-pressure conditions

Haojie Li<sup>1</sup>, Tiemin Xuan<sup>1\*</sup>, Yutao Wang<sup>1</sup>, Yachao Chang<sup>2</sup>, Ming Jia<sup>2</sup>, Zhixia He<sup>3</sup>, Qian Wang<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu Province, 212013, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning Province, 116024, China; 3. Institute for Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu Province, 212013, China)

**Abstract:** The ignition and combustion characteristics of two electric synthetic fuels, polymethoxydimethyl ether PODE<sub>3</sub> and PODE<sub>3,5</sub>, were investigated in a high-temperature high-pressure combustion chamber by means of multiple optical diagnostics. In addition, n-dodecane (NC<sub>12</sub>) and a blend fuel P50 (50% PODE<sub>3</sub>, 50% NC<sub>12</sub>, vol) were tested under the same operating conditions as references. During the test, the ignition delay (ID) and spray evolution were quantified using a high-speed Schlieren imaging technique. Meanwhile, the flame lift-off length (LOL) was determined by OH Chemiluminescence. In addition, the transient evolution of formaldehyde and OH were also obtained by means of planar laser induced fluorescence technique. Finally, the liquid length (LL) and the quantification of carbon soot generation were obtained thanks to the diffused back-illumination extinction imaging technique (DBI). The results show that PODE<sub>3,5</sub> has significantly longer LL compared to other fuels because of its higher specific heat capacity and latent heat of evaporation requiring higher enthalpy of air coiling; the ID of all fuels are relatively similar under the measured ambient conditions due to similar cetane values; due to the higher oxygen content of PODE fuel, the stoichiometric ratio is close to the spray axis, resulting in the OH\* distribution of the two PODE fuels being closer to the spray axis than NC<sub>12</sub>; formaldehyde is formed in large quantities in PODE fuel under low temperature conditions, and intense heat release occurs in the flame center near the LOL; PODE fuel does not contain C-C bonds and OH distribution in the spray center, so no carbon soot generation is detected under experimental conditions, P50 significantly reduces the amount of carbon soot in the steady-state flame compared to NC<sub>12</sub>.

**摘要:** 本文采用多种光学诊断方法, 探究了聚甲氧基二甲醚 PODE<sub>3</sub> 和 PODE<sub>3,5</sub> 两种电力合成燃料在高温高压定容燃烧弹内的喷雾及燃烧特性。此外, 还应用正十二烷 (NC<sub>12</sub>) 和混合燃料 P50(50%PODE<sub>3</sub>、50%NC<sub>12</sub>, vol) 作为参考燃料在相同的工况下也进行了测试。试验过程中, 采用高速纹影法获得了喷雾轮廓的演化过程和着火延迟期(ID), 应用 OH\* 化学荧光法测定了火焰浮起长度(LOL)。此外, 利用平面激光诱导荧光技术获得了甲醛和 OH\* 的瞬态演化过程。最后, 利用扩散背景光消光法(DBI)获得液相长度(LL)和火焰中的碳烟生成特性。结果表明: PODE<sub>3,5</sub> 因为其较高的比热容和蒸发潜热需要更高的空气卷吸焓, 相比较其他燃油具有明显较长的 LL; 由于相近的十六烷值, 所有燃油的 ID 在所测环境工况下比较相似; 由于 PODE 燃油含氧量较高, 化学计量比靠近喷雾轴心, 导致两种 PODE 燃料的 OH\* 分布相对于 NC<sub>12</sub> 更趋近喷雾轴心; PODE 燃料低温工况下甲醛大量形成, 在 LOL 附近的火焰中心出现剧烈释热现象; PODE 燃料由于不含 C-C 键和喷雾中心的 OH 分布, 实验工况下未检测到碳烟生成, P50 相比较 NC<sub>12</sub> 可显著减小稳态火焰中的碳烟量。

**关键词:** 聚甲氧基二甲醚; 液相长度; 火焰浮起长度; 甲醛; 碳烟

**Key words:** PODE; liquid length; flame lift-off length; formaldehyde; soot

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0199600); 国家自然科学基金项目(52276116);

作者简介: 李浩杰(1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为燃油喷雾碰壁传热特性, E-mail: 1831661990@qq.com;

玄铁民: E-mail: xuan723@ujs.edu.cn.

## 0 概述

近年来,随着能源产业的改革,‘双碳战略’的提出,可再生低碳、零碳燃料在压燃式发动机上的应用研究成为热点.其中,聚甲氧基二甲醚(PODE<sub>n</sub>)可用电力合成,具有高十六烷值、高挥发性等优点,其密度、黏度、熔沸点等物理特性与柴油相近,因其可再生性及对现有压燃式发动机结构的适用性,近年来受到科研工作者的广泛关注.

Ottenwaelder等人<sup>Error! Reference source not found.</sup>在定压燃烧弹内比较了PODE<sub>1</sub>和PODE<sub>3,5</sub>的喷雾特性和着火特性.结果表明:PODE<sub>1</sub>的低沸点和含氧量高,使得PODE<sub>1</sub>的液相长度远小于PODE<sub>3,5</sub>,火焰浮起长度远大于PODE<sub>3,5</sub>.PODE<sub>1</sub>较长的火焰浮起长度和特别长的着火延迟期会导致冷启动时点火不稳定.<sup>Error! Reference source not found.</sup>和<sup>Error! Reference source not found.</sup>研究了在柴油中混入PODE对燃烧的影响.Hui<sup>Error! Reference source not found.</sup>研究了在柴油中增加PODE的含量是否能够减小柴油机燃烧后碳烟颗粒物的排放.结果表明,在所有负荷下,在柴油中加入PODE可有效降低总颗粒数浓度(PNC)和颗粒质量浓度(PMC).Chen<sup>Error! Reference source not found.</sup>发现,柴油与PODE混合可以显著提高发动机热效率,降低PM、HC和CO排放,增加NO<sub>x</sub>排放.Wang<sup>Error! Reference source not found.</sup>研究了柴油/PODE/乙醇混合燃料耦合预喷射策略对重型柴油机燃烧和排放的影响.结果表明,预喷射策略与单次喷射策略相比,可以有效减少PODE/柴油/乙醇混合物的碳烟排放.Liu<sup>Error! Reference source not found.</sup>测试并分析了柴油/PODE/乙醇混合物在非反应性环境下的喷雾特性.研究发现,在柴油机中加入PODE和乙醇可以增加喷雾锥角,改善径向分散.Tianting Wang<sup>Error! Reference source not found.</sup>采用PODE/柴油混合燃料研究了喷油参数对CRDI柴油机燃烧、气体排放和碳烟粒径分布的影响.结果表明,随着喷油压力的增加,混合燃料中CO、HC和碳烟的排放量显著降低,而NO<sub>x</sub>的排放量则显著增加.

综上所述,目前已有一些关于PODE在压燃式发动机上应用的研究文献,但是由于实验方案和诊断技术的局限性,目前关于PODE的喷雾和燃烧特性的基础研究仍然有限.本文利用多种光学诊断方法,在高温高压定容燃烧弹中研究了两种PODE燃料的喷雾燃烧特性,并与正十二烷和其混合燃料进行了对比,深入分析了PODE燃料物化属性对液相长度、着火过程、火焰结构和碳烟生成特性等的影

响机理,对该类燃料在压燃式发动机的应用研究提供一定的理论基础.

## 1 试验装置及研究方法

试验所用装置主要包括定容燃烧弹与光学测试系统两部分.定容燃烧弹主体为圆柱形的腔体,有效容积为12L,腔体内下方壁面固定螺圈式电加热丝,同时在电加热丝和腔体内壁之间放置石棉保温层减少热量散失.对腔体周围和顶部缸盖进行循环冷却水连接,维持视窗及喷油器温度恒定.容弹内部环境温度最高可达900K.定容燃烧弹通过外接高压储气瓶向腔体内充气,压力最高可达6MPa.通过控制电加热丝的温度和充入定容燃烧弹内气体的压力,可以模拟内燃机缸内第二冲程压缩冲程上止点处的高温、高压工况.<sup>Error! Reference source not found.</sup>在容弹腔体四周均匀对称布置有4个直径为100mm的光学视窗,借助高速数码相机(CMOS)、像增强器相机(ICCD)等其他光学器件,即可实现多种喷雾和燃烧的光学测试.供油系统采用一款博世高压共轨系统,喷油压力最高可达170MPa.一个竖直单孔喷油器安装于定容燃烧弹的顶部,油束和火焰自上而下贯穿.

### 1.1 燃料及试验方案

本文探究了聚甲氧基二甲醚PODE<sub>3</sub>和PODE<sub>3,5</sub>两种电力合成燃料,以及正十二烷燃料(NC<sub>12</sub>)和混合燃料P50在高温高压定容燃烧弹内的着火及燃烧特性,其中PODE<sub>3,5</sub>由体积占比为49.7%PODE<sub>3</sub>、34.8%PODE<sub>4</sub>和14.1%PODE<sub>5</sub>组成,P50由50%体积的PODE<sub>3</sub>和50%NC<sub>12</sub>组成.实验工况总结在表1中,喷油压力保持在100MPa不变,环境密度保持21.43kg/m<sup>3</sup>,容弹内环境温度分为750/800/850/900K四种情况.本文在定容燃烧弹的高压高温环境下,进行了四种不同环境温度下的实验,控制喷油压力及氧浓度,研究了不同条件下喷雾燃烧特性.喷嘴孔径为0.12mm,喷油激励脉宽为2200μs,实际喷油持续期为4000μs,为减少循环变动和多次喷油之间的误差,每组工况喷油10次,喷油间隔为10s.<sup>Error! Reference source not found.</sup>四种燃油部分参数见表2.所有燃油十六烷值的测定方法为GB/T 386-2021于江苏省质检院检测.此方法通过一台柴油发动机在特定的操作条件下测试燃油的十六烷值,基于标定燃油的十六烷值进行计算.

表 1: NC<sub>12</sub>/P50/PODE<sub>3</sub>/PODE<sub>3-5</sub> 四种燃油的试验工况

| 参数  | 数值  |
|---|---|
| 环境温度 T <sub>a</sub> /(K)                  | 700/800/850/900   |
| 环境密度 ρ <sub>a</sub> /(Kg/m <sup>3</sup> ) | 21.43   |
| 喷油压力 P <sub>inj</sub> /(MPa)              | 100   |
| 环境氧气浓度/(%)                                | 15  |
| 喷油脉宽/μs                                   | 2200  |
| 燃油种类                                      | NC <sub>12</sub> , P50, PODE <sub>3</sub> , PODE <sub>3-5</sub> |

表 2: 四种燃油的主要实验参数

| 参数                           | NC <sub>12</sub> | P50       | PODE <sub>3</sub> | PODE <sub>3-5</sub> |
|------------------------------|------------------|-----------|-------------------|---------------------|
| 密度 (Kg/m <sup>3</sup> @20°C) | 749              | 852       | 1004              | 1039                |
| 粘度 (mm <sup>2</sup> /s@20°C) | 1.94             | 1.31      | 1.17              | 1.55                |
| 十六烷值                         | 74               | 70        | 65                | 69                  |
| 低热值(MJ/kg)                   | 44               | 46.18     | 22.8              | 22.1                |
| 蒸发潜热 (kJ/kg)                 | 256.4            | 301.9     | 347.4             | 378.9               |
| 含氧量(%)                       | 0                | 27.0      | 47.1              | 47.8                |
| 比热容 (J/kg/K)                 | 2217             | 2550      | 2800              | 3218                |
| 沸点(°C)                       | 216.3            | 156-216.3 | 156               | 156-242             |

## 1.2 光学方法

本文试验中采用了高速纹影法、OH\*化学荧光法、扩散背景光消光法(DBI)、自然光法以及平面激光诱导甲醛荧光法(PLIF-CH<sub>2</sub>O)四种光学诊断技术来获得喷雾燃烧特性。其中，高速纹影法联合 OH\*化学荧光法，组合成同步光路。应用高速纹影法获得燃油喷雾的气相的几何形态发展、喷雾贯穿距以及着火延迟期(Ignition delay, 简写 ID)等信息；OH\*化学荧光法获得火焰 OH 分布以及火焰浮起长度(flame lift-off length, 简写 LOL)，相应的光学布置原理图如图 1(a)所示。扩散背景光消光法用来获得喷雾液相长度(liquid length, 简写 LL)以及对碳烟质量的定量测量，相应的光学布置原理图如图 1(b)所示。图 1(c)展示了平面激光诱导甲醛荧光法(PLIF-CH<sub>2</sub>O)、OH\*化学荧

光法以及自然光法，分别观测火焰结构中的甲醛、OH 和其他燃烧产物的瞬态发展过程。

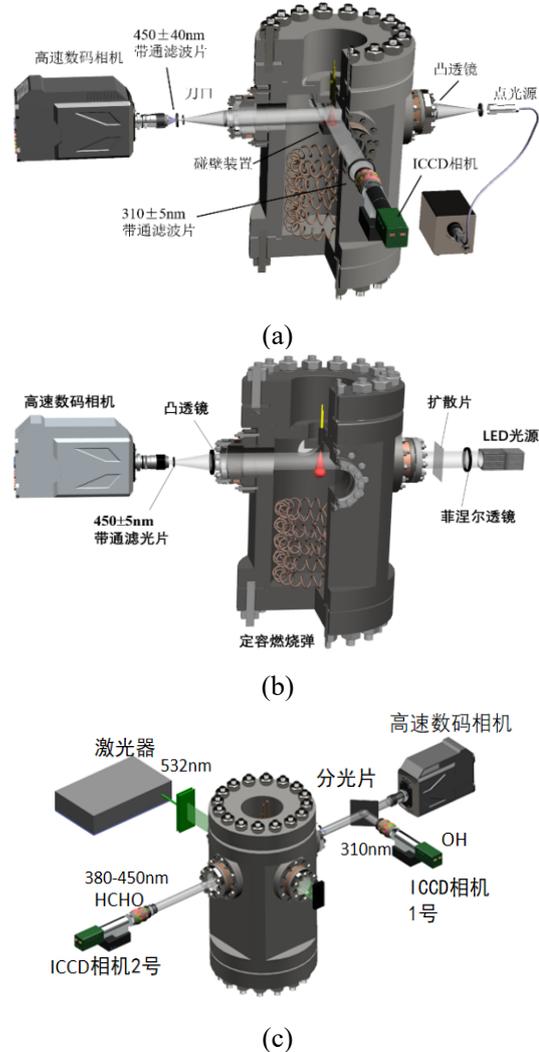


图1 光学布置：(a)高速纹影法与OH\*化学荧光法同步光路；(b)扩散背景光消光法 (c)PLIF激光诱导CH<sub>2</sub>O荧光法、OH\*化学荧光法及自然光法同步光路

### 高速纹影法

纹影法由于测试原理简单、测试精度高，已经成为测量喷雾气相贯穿距离最常用的光学测试方法之一。纹影法主要的测试原理是利用所测流场中的折射率梯度与流场的气流密度成正比，从而实现对气流边界层的捕捉。燃油气相与环境气体空气之间存在较大的折射率差和密度差，而空气与气相密度、折射率之间存在线性关系，从而采用纹影法即可获得非常清晰的燃油气相与环境气体之间的边界轮廓。此外，除了喷雾贯穿距外，还从纹影图像中得到了ID。在喷雾出现高温着火之前，喷雾头部出现冷焰燃烧，释放微弱热量，喷雾头部密度梯度接近环境密度梯度，使纹影图像喷雾头部变得透明，随后的高温燃烧会使喷雾迅速膨胀，喷雾总强度急剧增加。因此，通过分析纹影图像可以得到ID。图1(a)是本文中所用纹影法的试验光路布置示意

图, 点光源所发射光束经过光阑放大形成锥形光束, 再经过凸透镜(直径150mm, 焦距600mm)的聚焦将锥形光束转化为平行光束经过容弹直径为100mm的视窗, 对容弹内部进行照明, 再通过容弹另一侧的透明视窗和同规格凸透镜将平行光速进行聚焦, 在凸透镜焦点处放置刀口, 控制刀口开合程度, 以高速相机接受图像信息. 控制刀口开度和高速相机进光率, 便可通过高速相机获得目标区域清晰的纹影图像, 如图2的图像选取了时刻为3000的火焰图像, 下方图像为纹影图像处理过程示意图. 为了消除碳烟辐射光的影响, 在高速相机前放置波长为450nm的带通滤波片.

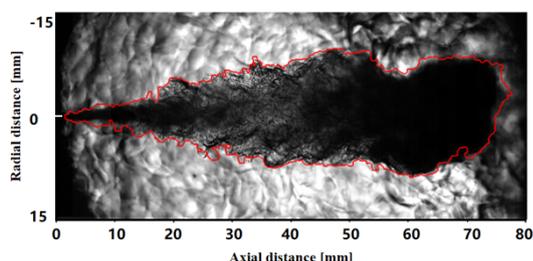


图2 纹影法纹影图像处理过程示意图

### OH\*化学荧光法

OH\*化学荧光法能很好地反映OH分布, 对于研究LOL, 以及火焰结构与碳烟产生的关系具有重要作用<sup>Error! Reference source not found.</sup>. 本文采用OH化学荧光法获得LOL, OH\*荧光辐射是波长为310nm左右的OH\*化学荧光<sup>Error! Reference source not found.</sup>. 试验采用像增强器相机(ICCD)并选择焦距为100 mm、孔径为f/2.8的UV镜头, 分辨率为1344\*1024, 曝光时间设置为2 ms, 燃油喷射后增强器的门宽设置为2.5 ms~4.0 ms之间, 此时间段火焰浮起长度处于稳定阶段. 在相机前安装了一个中心波长为310 nm, 半带宽为10nm的带通滤波器, 以避免燃烧时产生的其他波长辐射信号对OH\*荧光的干扰. 如图3所示为ICCD相机拍摄到的火焰图像, 将火焰沿中轴线分为上下两部分, 分别计算图像沿中轴线方向上的轴向上的总强度值, 定义每部分第一个强度峰值一半的位置与喷嘴之间的距离为该部分的火焰浮起长度(LOL), 两部分的平均值为一次火焰的LOL<sup>Error! Reference source not found.</sup>, 为减少循环波动的误差, 每个工况重复喷射10次, 10次火焰浮起长度的平均值则为该工况的LOL.

为分析火焰对称面上的OH分布, 进而分析OH与甲醛、碳烟等的相对位置, 本文应用Inverse Radon方法对OH\*化学荧光图像进行了层析重建, 如图4所示.

### 平面激光诱导荧光技术(PLIF)技术

平面激光诱导荧光技术(Planar Laser Induced Fluorescence)的工作原理是利用激光束通过火焰燃

烧区域并调节激光波长, 甲醛 $\text{CH}_2\text{O}$ 分子会吸收光子能量跃迁至高能态<sup>Error! Reference source not found.</sup>. 处于高能态的甲醛分子不稳定, 在一定时间内会从高能态返回到基态. 在此过程中, 甲醛分子会通过自发辐射释放能量发光而产生荧光. 研究发现, PAH烃和甲醛信号的位置并不是连续的, 它们之间存在一个缺口<sup>Error! Reference source not found.</sup>. PLIF可以同时获得甲醛和碳烟信号, 但是空间位置存在明显不同, 能够得以区分. 图1(c)中PLIF光路将点光源转化成片光, 以获得甲醛的平面荧光, 荧光信号的强度和甲醛的浓度成正比. 本文通过在ICCD相机前放置一块波长在380-450nm之间的滤波片, 用于捕捉瞬态的甲醛生成.

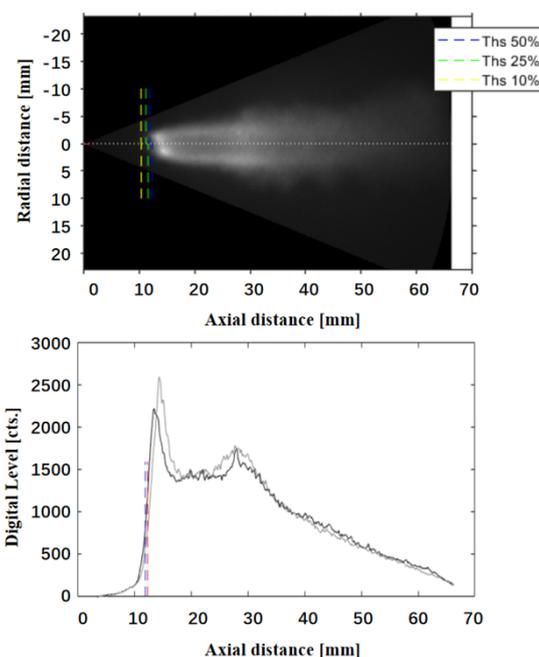


图3 火焰浮起长度的数据处理

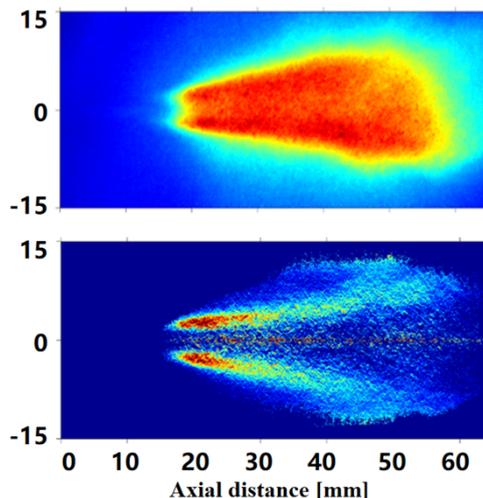


图4 火焰图像层析重建示意图:上图为原始OH\*图像, 下图为层析重建获得对称面上的OH分布图像

## 自然光法

自然光法的光路示意图如图1(c)右侧部分光路所示, 使用一台高速相机拍摄火焰自发光图像, 相机前未放置任何滤波片, 采用火焰直拍的方式进行数据采集. 试验过程中相机分辨率为896\*368, 采集频率为60000fps, 拍摄过程中针对不同燃料和不同工况相机曝光时间随之变化以避免曝光现象产生, 详细曝光参数如表3所示.

表3 不同燃料自发光相机曝光时间

| 燃料                  | 曝光时间 ( $\mu\text{s}$ ) |
|---------------------|------------------------|
| NC <sub>12</sub>    | 0.25、                  |
| P50                 | 15、0.25                |
| PODE <sub>3</sub>   | 15                     |
| PODE <sub>3-5</sub> | 15                     |

## 扩散背景光消光法(DBI)

扩散背景光消光法(DBI)广泛用于研究燃油喷雾液相长度(LL)及燃烧生成碳烟的质量. 试验光路布置示意图如图1(c)所示. 容弹右侧由一个LED灯、菲涅尔透镜和一个扩散片形成强度均匀的扩散背景光, 当光路通过喷雾火焰后, 液相部分由于米散射对光强有减弱作用, 碳烟对光强的吸收也有减弱作用. 在拍摄过程中用相机触发LED使得其频率为相机一半, 进而捕捉碳烟热辐射光

根据Beer-Lambert定律, 可以得到校正后表征碳烟浓度的KL值<sup>Error! Reference source not found.</sup>, 如等式所示(1):

$$\frac{I_{sum} - I_f}{I_0} = \exp(-KL) \quad (1)$$

其中,  $I_{sum}$  表示 LED 光源开启时的捕捉到的光强,  $I_f$  表示 LED 光源关闭时捕捉到的光强,  $I_0$  表示 LED 灯的入射光强,  $K$  值表示空间消光系数,  $L$  表示入射光在碳烟内的光学长度. 其中, 局部消光系数  $k$  和碳烟体积分数正相关<sup>Error! Reference source not found.</sup>:

$$f_v = \frac{\lambda \cdot k}{k_e} \quad (2)$$

式(2)中,  $f_v$  表示碳烟体积分数,  $\lambda$  表示入射光的波长, 即本文中的450nm,  $k_e$  为无量纲消光系数, 本文中 $k_e$ 值选取7.81<sup>Error! Reference source not found.</sup>, 碳烟体积分数乘以碳烟密度即可获得碳烟质量, 其中假设碳烟密度为1.8g/cm<sup>3</sup><sup>Error! Reference source not found.</sup>. 视窗内所有像素点的碳烟质量之和可以由式(3)求得:

$$m_{soot} = \rho K L \lambda \times \text{pixel area} / k_e \quad (3)$$

喷雾LL的处理方式如图5所示, 以喷嘴位置为中心, 截取y轴 $\pm 2$  mm之间的矩形区域进行喷雾LL的计算. 喷雾液相区域对应的KL曲线有一个峰值, 在KL峰值右侧曲线进行线性拟合, 拟合函数与横坐标的交点即为喷雾LL.

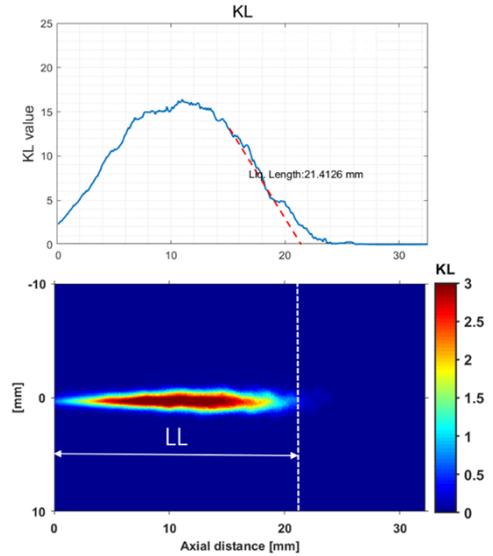


图5 喷雾液相长度定义示意图

## 2.1 液相长度和气相贯穿距

图6给出了环境密度为21.43kg/m<sup>3</sup>、氧气浓度为15%及喷油压力为100MPa工况下, NC<sub>12</sub>、P50、PODE<sub>3</sub>和PODE<sub>3-5</sub>四种燃油随环境温度的变化. 从图6(a)可以看出, 四种燃油的LL均随着环境温度的升高而降低, 且降低幅度随温度的升高而降低. 这是由于随着环境温度的升高, 环境气体可以将燃油加热到更高的温度, 提高燃油的整体蒸发速率, 从而导致了LL减少. 从单个油来说, PODE<sub>3-5</sub>的LL值明显比其他3种燃料更高, 其次是NC<sub>12</sub>, 而P50和PODE<sub>3</sub>之间没有明显差异, 这是由于PODE<sub>3-5</sub>拥有着与NC<sub>12</sub>相近的沸点, 这是导致PODE<sub>3-5</sub>拥有最长LL相当重要的因素. 同时, PODE<sub>3-5</sub>还拥有四种燃油中最大的密度、粘度及表面张力. 最大的密度可以保证在相同的喷油周期下, 释放出更多的质量, 相当于NC<sub>12</sub>的1.5倍; 而PODE<sub>3-5</sub>较高的粘度及表面张力(PODE<sub>3-5</sub>的表面张力高于NC<sub>12</sub>将近30%)减缓了PODE<sub>3-5</sub>液滴的分裂、破碎、蒸发, 以致其液相长度增大. 除此以外, 根据Higgins等人<sup>Error! Reference source not found.</sup>的研究发现, 仅依靠燃油的单个属性无法确定对液相长度的影响, 因此需要引入“特性能力比”这一无量纲参数, 来更好的预测单质燃油以及混合燃油的液相长度:

$$d_{eq} = d_0 \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_a}} \quad (4)$$

$$\frac{LL}{d_{eq}} = k A^a \quad (5)$$

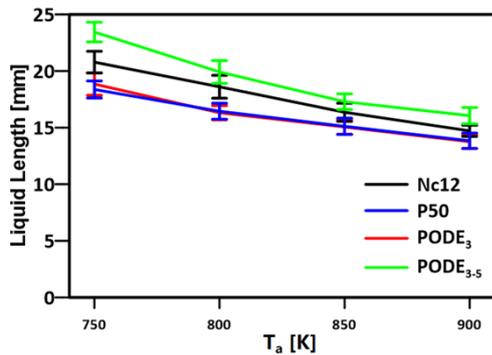
$$A = \frac{\sum_i m_i h_{vap,i} + (T_{b,max} - T_f) \sum_i m_i C_{p,i}}{C_{p,a} (T_a - T_{b,max}) \sum_i m_i} \quad (6)$$

其中,  $d_{eq}$  定义为等效直径,  $d_0$  为喷嘴孔径,  $\rho_f$

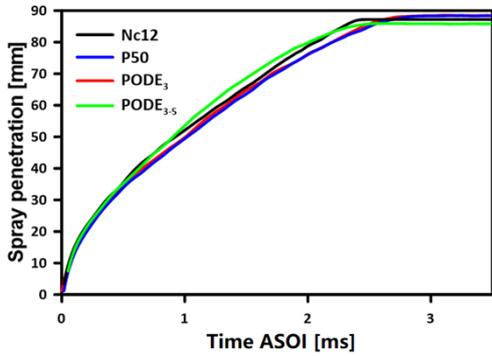
为燃油密度,  $\rho_a$  为环境密度,  $k$ ,  $a$  为常数,  $A$  为特性能力比,  $m_i$  为燃油组分  $i$  的质量分数,  $h_{vap,i}$  为对应的比焓,  $C_{p,i}$  为对应的比热容,  $T_{b,max}$  为最高沸点温度,  $T_f$  为燃油温度.

表 4 为环境温度 850 K 工况下四种燃油的  $d_{eq}$  和  $A$ , 从表中可以发现 PODE<sub>3-5</sub> 的燃料和卷吸空气的比焓值远大于其他三种燃油. 通过拟合计算求的  $k$ ,  $a$  分别为 18.24, 0.27. 特性能力比与液相长度呈正相关. PODE<sub>3-5</sub> 由于最大的比热容和蒸发潜热使得其燃料和卷吸空气的比焓最大, 因此可以解释 PODE<sub>3-5</sub> 的液相长度显著大于其他三种燃油.

虽然四种燃油 LL 区别明显, 但是除了 PODE<sub>3-5</sub> 贯穿速度略微高于其它三种燃油外, NC<sub>12</sub>、P50 及 PODE<sub>3</sub> 的气相贯穿距(VP)并没有太大区别, 如图 6(b) 所示.



(a)



(b)

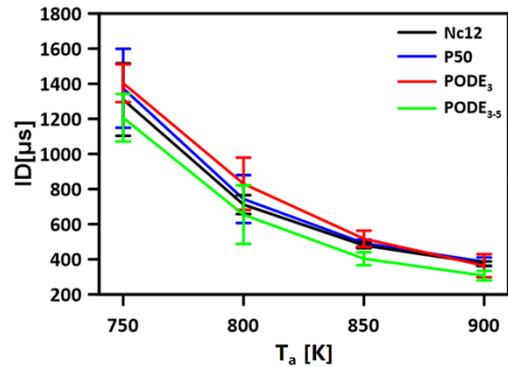
图 6 (a):不同燃油的 LL 随环境温度的变化 (b):在 850K 工况下不同燃油的 VP 随时间的演化

表 4 环境温度 850 K 下的  $d_{eq}$  和  $A$  值

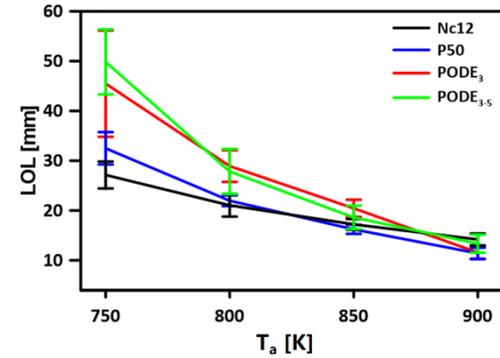
| 燃油                  | $T_a$ [K] | $d_{eq}$ [mm] | $A$  |
|---------------------|-----------|---------------|------|
| NC <sub>12</sub>    | 850       | 0.71          | 1.45 |
| P50                 | 850       | 0.76          | 1.62 |
| PODE <sub>3</sub>   | 850       | 0.82          | 1.32 |
| PODE <sub>3-5</sub> | 850       | 0.84          | 2.26 |

## 2.2 着火延迟期和火焰浮起长度

图 7(a)和(b)给出了四种燃油在不同环境温度下的 ID 和 LOL. 由于高温环境加速了液相蒸发和化学反应过程, 两者都呈现随温度升高而减小的趋势, 然而燃料特性对两者影响却呈现了差别. 对于 ID 而言, 由于相对接近的十六烷值四种燃料在不同环境温度下的 ID 也比较接近. PODE<sub>3-5</sub> 测试获得十六烷值虽然略小于正十二烷, 但是 ID 值总是略小余其他三种燃料. 这可能是由于 PODE<sub>3-5</sub> 中的 PODE<sub>4</sub>、PODE<sub>5</sub> 占据了 48%, 而 PODE<sub>4</sub> 和 PODE<sub>5</sub> 的十六烷值都要高于正十二烷的十六烷值, 在喷雾燃烧过程中具有较高活性的 PODE<sub>4</sub> 和 PODE<sub>5</sub> 先发生化学反应进而导致了较短的 ID. 对于 LOL, 四种燃料在高温环境下(850K, 900K)展现了相似的数值, 而随着环境温度的降低(800K, 750K), PODE 燃料的 LOL 开始明显高于 NC<sub>12</sub> 和 P50.



(a)



(b)

图 7 不同燃油的 ID 和 LOL 随环境温度的变化

## 2.3 火焰结构

### 2.3.1 稳态 OH 分布

图 8 给出了在 15% 环境氧浓度, 100 MPa 喷油压力工况下, 不同环境温度的四种燃油稳态火焰的 OH\* 在对称平面的分布情况. NC<sub>12</sub> 和 P50 均呈现为传统的扩散火焰形态, OH\* 分布在化学计量比表面附近

位置, 但 P50 相对较高的氧含量使得 OH\* 更靠近喷雾中心. 环境温度由于对非燃烧油气混合影响不大, 对于同一种燃油, 不同环境温度下在相同的轴线位置的 OH 分布类似.

此外, 可以观测出 PODE 燃油(PODE<sub>3</sub> 和 PODE<sub>3-5</sub>) 与 NC<sub>12</sub> 和 P50 火焰结构有着较大差异, 高环境温度

时 PODE 由于更高的含氧量, OH\* 分布相对于 P50 更趋近喷雾中心区域, 而低环境温度时 PODE 燃油 OH\* 呈现为团状分布, 聚集在喷雾中心. 在轴向方向上, NC<sub>12</sub> 和 P50 的 OH\* 分布更广, 从 LOL 成锥形分布几乎一直贯穿到可视化窗口边界. 而 PODE 燃油的 OH\* 在轴线方向分布范围较小.

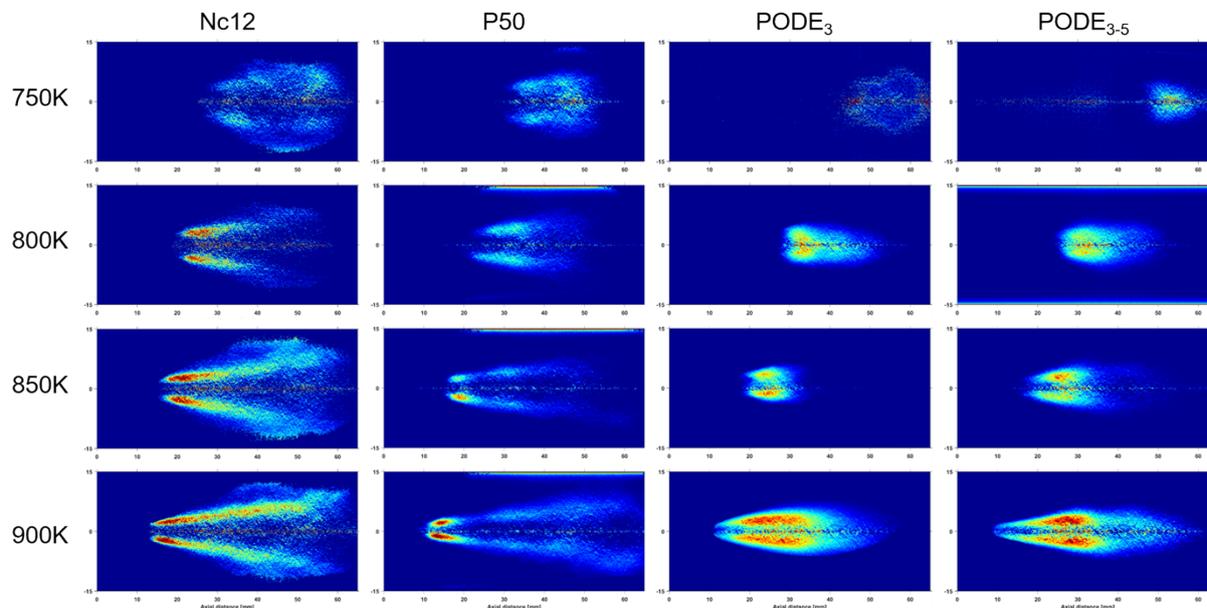


图 8 环境氧浓度为 15%, 喷油压力为 100 MPa 工况下, 不同环境温度的四种燃油的火焰层析重建图像

### 2.3.2 瞬态甲醛和 OH\* 分布

甲醛的产生作为进入冷焰燃烧的标志, 即燃烧的第一阶段, 被称为“冷焰”, 其特征是形成大量甲醛. 在第二阶段, 甲醛被快速消耗, 反应区形成 OH 和碳烟, 释放大化学能.

图 9 上展示了甲醛 PLIF(绿色)、OH\* 层析重建二维面分布(红色)和 DBI 获得的液相分布(蓝色). 在 400 $\mu$ s ASOI 时刻已经处于冷焰燃烧阶段, 可以检测到大量的甲醛. 600 $\mu$ s ASOI 时火焰头部已经检测出 OH\* 阶段, 开始高温燃烧. 随着燃烧的进行, 可以观察到 OH\* 向上下游贯穿, 甲醛头部区域被 OH 氧化, 开始首缩. 1000  $\mu$ s ASOI 以后甲醛分布和上游 OH 基本达到稳定状态.

图 10 为四种燃油在稳态火焰时刻高低温两种环境温度下的火焰结构. 在低温 800K 环境工况下, NC<sub>12</sub> 和 P50 两种燃油的 LOL 相比较 PODE 燃料明显更靠近上游, PODE 较长的 LOL 为甲醛提供了更为广阔的发展空间. 高温 900K 时, NC<sub>12</sub> 和 P50 两种燃油的 PLIF 在火焰中下游检测到了明显的信号, 这主要是 PAH 荧光信号和碳烟热辐射光组成, 而 PODE 燃料在中下游并未检测到信号, 且由于较短的 LOL, 甲醛分布明显减小.

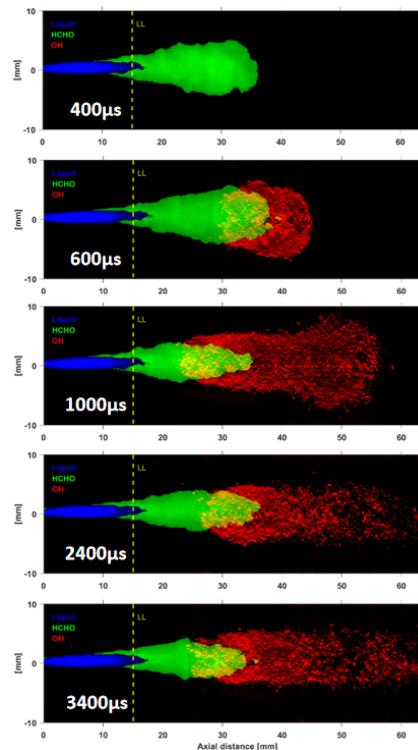


图 9 在 850K-15%-100MPa 工况下 PODE<sub>3</sub> 瞬态甲醛和 OH\* 分布时序图

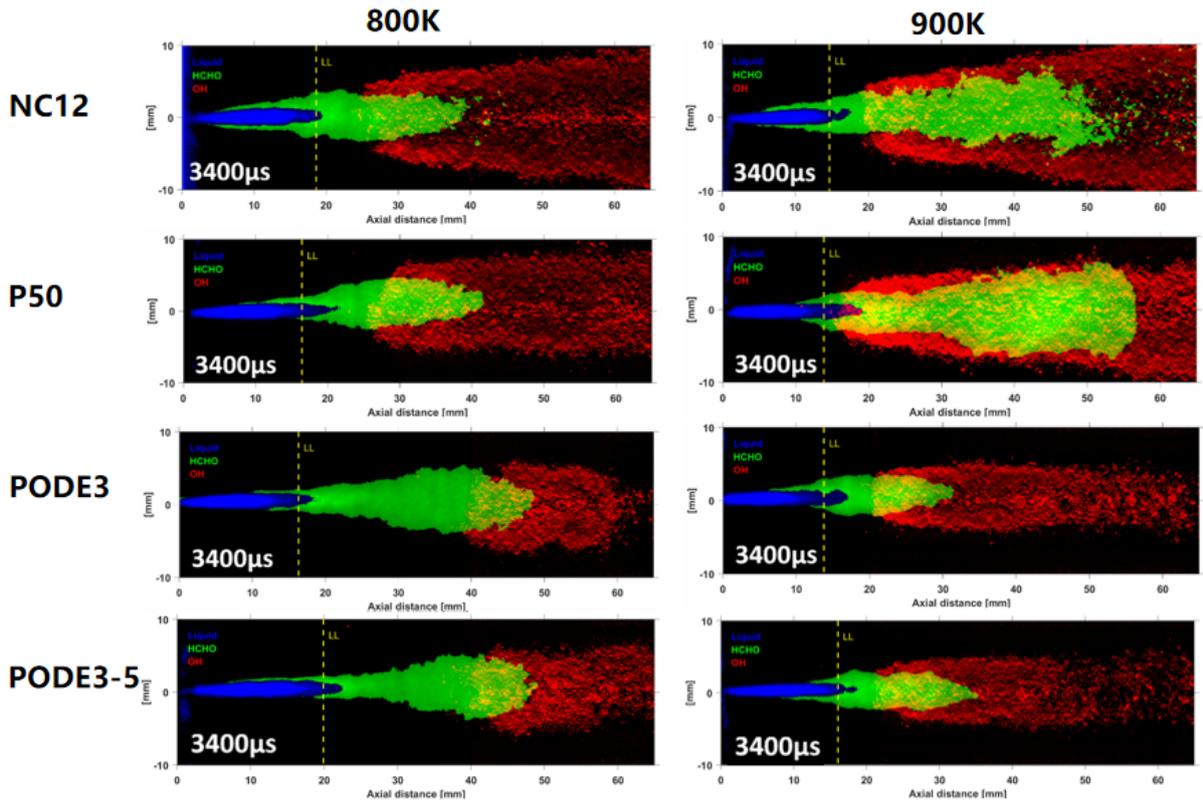


图 10 800K 和 900K 环境温度工况下四种燃油于 3400 微秒时刻瞬态火焰结构示意图

### 2.3.3 火焰自发光

本文分别对低温环境 800K 和高温环境 900K 工况下的四种燃油自然发光法数据进行处理, 对每个时间节点的图像, 在火焰轴线方向各个位置进行径向上的光强积分, 再将所有时刻的积分图像进行合并成如图 11 所示的光强-时间的轴向分布图, 其中光强针对各自工况的最大值进行了标准化处理. 此外, 图中还标出了喷雾气相贯穿距(黄色实线)、着火延迟期(黑色垂直虚线)和火焰浮起长度(红色水平虚线, 水平位置对应了 OH\*拍摄时间).

对于 NC<sub>12</sub> 和 P50 两种燃料的自发光图像, 可以看出, 辐射强度在着火延迟期较长时间才检测到, 且初始位置与 LOL 相隔较远距离, 两种燃料自发光图像获得的光强主要来自碳烟的热辐射. 而对于 PODE 燃料, 高温着火时刻与自发光开始时刻高度吻合, 且初始位置与 LOL 距离很近. 之前的研究[27][28]已经指出获得图片自发光的波长主要在 430nm 峰值左右的宽波段连续光谱. 文献[29]指出这主要是由

CO 的氧化反应释放的连续光谱辐射. PODE 燃料的辐射光在初始时刻的喷雾头部位置出现明显类似碳烟热辐射的高光强, 这可能由于着火延迟期内喷雾头部形成较多预混合气, 预混燃烧的高温导致了较高的辐射光强. 高低温环境工况下 NC<sub>12</sub> 和 P50 两种燃料的碳烟辐射光强相对位置没有明显区别, 都是开始喷雾头部区域相对较高的光强, 而后在喷雾内部相对均匀分布. 对于 PODE 燃料, 高低温工况下的光强分布呈现明显差别, 低温工况下在靠近 LOL 处呈现明显高光强辐射, 在中下游后光强显著减小; 而高温工况下与碳烟类似, 也是在喷雾中相对均匀分布. 主要原因是低温工况下 LOL 较长, 为甲醛提供了较大发展空间, 大量甲醛在 LOL 附近氧化释热, 且 OH 在低温工况下集中喷雾中心较短空间, 多数氧化反应在此完成, 下游释热显著减小. 而高温环境工况下, OH 分布成典型扩散火焰形状, 在喷雾贯穿方向分布较广, 中间产物在火焰中心一边向前运输一边像 OH 扩散氧化, 呈现了相对均匀的辐射光强.

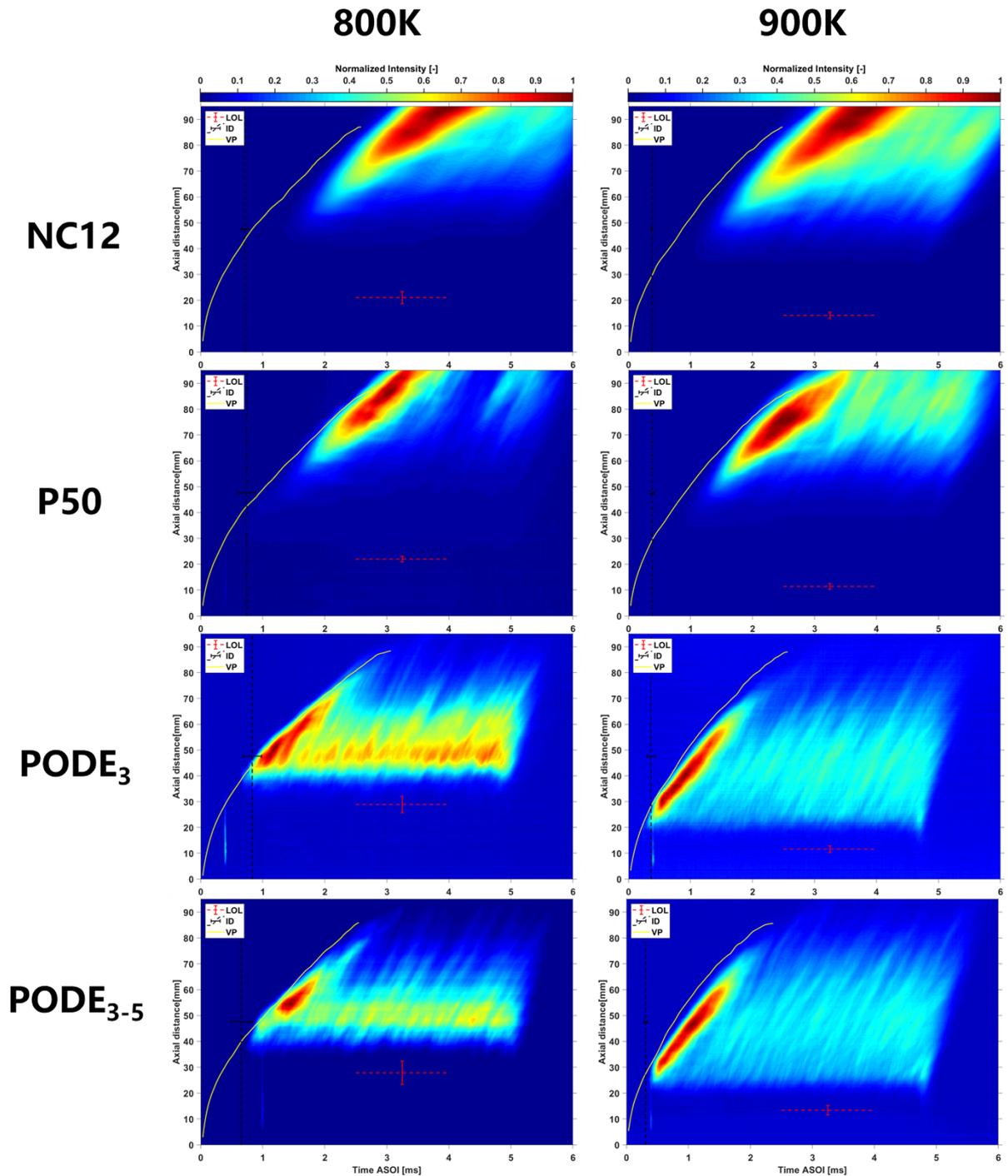


图 11 低温环境 800K 和高温环境 900K 工况下的四种燃油火焰自发光 IXT 图

## 2.4 碳烟生成特性

图 12 展示了四种燃料在所测最高环境工况下 (900K) 稳态火焰时刻 (3400 $\mu$ s) DBI 处理得到的 KL 云图. 图 13 为 NC<sub>12</sub> 和 P50 两种燃料的碳烟质量在整个喷雾过程的变化曲线. 从图 12 中可以看出, PODE 两种燃料在所测环境下未检测到任何碳烟生成. 在

所测环境下未检测到任何碳烟生成. P50 由于 PODE<sub>3</sub> 的加入碳烟生成量也大大降低, 在稳态火焰时刻碳烟质量减小大约 16 倍. PODE 燃料火焰中无碳烟主要由以下两个方面的原因: 首先是 PODE 燃料不含 C-C 键, 较难形成乙炔和 PAH 等碳烟前驱物, 此外, PODE 含氧量高, 较高的含氧量使得 OH 集中在当量比较高的喷雾轴线上, 加速了微弱碳烟和前驱物的氧化过程.

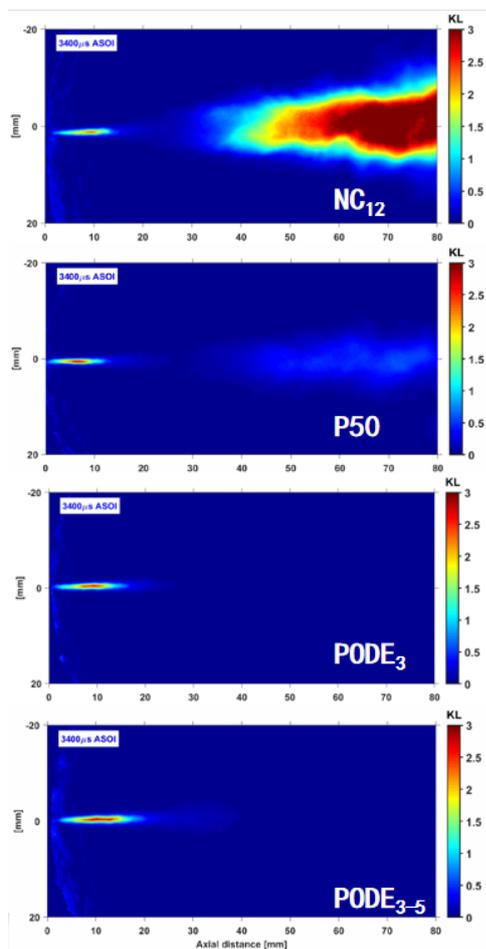


图 12 3400ASOI 时四种燃油 KL 云图

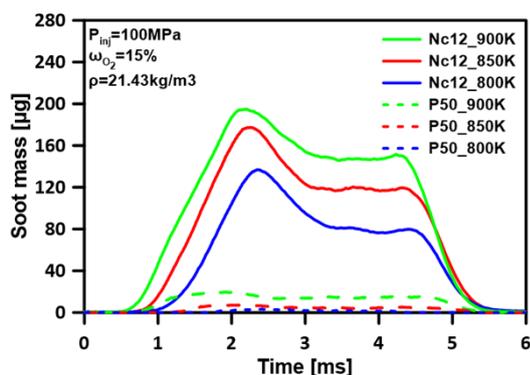


图 13 三种温度条件下 NC<sub>12</sub> 和 P50 的碳烟质量演变

### 3 结论

本文采用多重光学诊断技术探究了聚甲氧基二甲醚 PODE<sub>3</sub> 和 PODE<sub>3-5</sub> 两种电力合成燃料在高温高压定容燃烧弹内的喷雾燃烧特性.并以正十二烷燃料和混合燃料 P50 作为参考燃料在相同的试验条件下也进行了测试.得出以下重要结论:

1)液相长度为燃油热力学性质综合影响的结果,沸点并不能直接决定液相长度的大小. PODE<sub>3-5</sub> 由于较高的比热容和蒸发潜热, 导致其拥有最高的液相长度.

2)PODE<sub>3-5</sub> 由于组分中具有较高活性的 PODE<sub>4</sub> 和 PODE<sub>5</sub> 率先发生化学反应进而导致了较短的 ID. 但其 LOL 却在低环境条件(750K, 800K)下表现出相反的趋势, 两种 PODE 燃料的 LOL 都比 NC<sub>12</sub> 和 P50 长的多, 但随温度升高四种燃油的火焰浮起长度差异减小.

3)两种 PODE 燃料的 OH\*分布相对于 NC<sub>12</sub> 更趋近喷雾轴心区域, 这是由于 PODE 燃油含氧量较高, 以至于化学计量比更加靠近喷雾轴心.

4)四种燃油在 LL 的下游均可以观察到甲醛的形成. PODE 较长的 LOL 为甲醛提供了更为广阔的发展空间. 高温 900K 时, NC<sub>12</sub> 和 P50 两种燃油的 PLIF 在火焰中下游检测到了 PAH 荧光信号和碳烟热辐射光的信号, 且由于较短的 LOL, 甲醛分布明显减小.

5)PODE 含氧量较高且不含 C-C 键, 较难形成乙炔和 PAH 等碳烟前驱物, 所以 PODE 燃烧无碳烟生成. 在 NC<sub>12</sub> 中掺混 PODE<sub>3</sub> 会使得碳烟初生时刻和位置延长, 且能有效减少碳烟生成.

### 参考文献:

- [1] 李燊, 等. 不同聚合度的聚甲氧基二甲醚对柴油性能的影响[J]. 化工进展, 2020, 39(3):947-955.
- [2] Ottenwaelder T, et al. Effects of Biofuels on the Mixture Formation and Ignition Process in Diesel-Like Jets[C]// *International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting*. 2017.
- [3] Hen, Hui, et al. Potential improvement in particulate matter's emissions reduction from diesel engine by addition of PODE and injection parameters[J]. *Applied Thermal Engineering* 2019, 150: 591-604.
- [4] Chen, Hao et al. Research progress on the spray, combustion and emission of polyoxymethylene dimethyl ethers as a diesel blend fuel: A review[J]. *Fuel* 2022, 324: 124731.
- [5] Wang, Xichang et al. Effect of diesel/PODE/ethanol blends coupled pilot injection strategy on combustion and emissions of a heavy duty diesel engine[J]. *Fuel* 2023,335: 127024.
- [6] Liu, Yu et al. Experiment and analysis on the spray characteristics of diesel/polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE)/ethanol blends in non-reacting environment[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2021, 131: 110528.
- [7] Tianting, Wang et al. Influence of injection parameters on combustion, gaseous emissions and particle size distribution of a CRDI diesel engine operating with PODE/diesel blends[J]. *Fuel* 2020, 281: 118733.
- [8] 商伟伟, 等. 基于消光法的加氢催化生物柴油的碳烟测试[J]. 燃烧科学与技术, 2018, 24(6): 63-68.
- [9] 李贝, 等. 加氢催化生物柴油喷雾燃烧及碳烟的试验[J]. 内燃机学报, 2018, 36(5): 35-41.
- [10] Li Haoran, et al. Measurements and Derivation of the Spray Simulation Required Physical Properties of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers (PODEn)[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2023,44(3).
- [11] Qinjie Lin, et al. Effects of polyoxymethylene dimethyl ether

- 3 (PODE 3 ) addition and injection pressure on combustion performance and particle size distributions in a diesel engine[J]. *Fuel*,2021,283.
- [12] Zhong W, 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.
- [13] Desantes J M, et al. A study on tip penetration velocity and radial expansion of reacting diesel sprays with different fuels [J]. *Fuel*, 2017, 207: 323-335.
- [14] Benajes J, et al. Experimental characterization of diesel ignition and lift-off length using a single-hole ECN injector[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 58(1-2): 554-563.
- [15] 米永刚, 等. 加氢催化生物柴油-柴油的喷雾燃烧特性[J]. *内燃机学报*,2021, 39(04): 314-319.
- [16] Som S, et al. Effect of nozzle orifice geometry on spray, combustion, and emission characteristics under diesel engine conditions [J]. *Fuel*, 2011, 90(3): 1267-1276.
- [17] Siebers D L, et al. Flame Lift-Off on Direct-Injection Diesel Sprays Under Quiescent Conditions [J]. *SAE Technical Papers*, 2001, 110.
- [18] Schulz C, et al. Tracer-LIF Diagnostics: Quantitative Measurement of Fuel Concentration, Temperature and Fuel/Air Ratio in Practical Combustion Systems[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2005, 31(1):75-121.
- [19] Jose V. Pastor, et al. Characterization of the oxymethylene ether fuels flame structure for ECN Spray A and Spray D nozzles, *Applied Energy*, 2023, 332,120475.
- [20] Jose, M., et al. Soot Quantification of Single-Hole Diesel Sprays by Means of Extinction Imaging [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2015, 8(5): 2068-2077.
- [21] Zhao H, et al. Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 1998, 24(3): 221-255.
- [22] KöYLü Ü Ö, et al. Structure of overfire soot in buoyant turbulent diffusion flames at long residence times [J]. *Combustion and Flame*, 1992, 89(2): 140-156.
- [23] Pickett L M, et al. Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 138(1): 114-135.
- [24] Manin J, et al. Two-Color Diffused Back-Illumination Imaging as a Diagnostic for Time-Resolved Soot Measurements in Reacting Sprays [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2013, 6(4): 1908-1921.
- [25] Manin J L, et al. Extinction-based Imaging of Soot Processes over a Range of Diesel Operating Conditions [J]. 2013.
- [26] Higgins B.S, et al. Measurements of fuel effects on Liquid-phase penetration in DI sprays[J], *SAE Technical Paper*, 1999, 01: 0519-053.
- [27] José V. Pastor, et al. Simultaneous high-speed spectroscopy and 2-color pyrometry analysis in an optical compression ignition engine fueled with OME X-diesel blends[J], *Combustion and flame*,2021,230,111437.
- [28] Zheng Z Q, et al. Optical investigation on polyoxymethylene dimethyl ethers spray flame at different oxygen levels in a constant volume vessel. *Sci China Tech Sci*, 2021, 64: 611-1623.
- [29] Wontae Hwang, et al. Spectroscopic and chemical-kinetic analysis of the phases of HCCI autoignition and combustion for single- and two-stage ignition fuels[J], *Combustion and Flame* 2008, 154: 387-409.