

二甲醚和甲醇双直喷喷雾燃烧特性的光学研究

南天天¹, 肖红亮¹, 张海涛¹, 黄吕萌¹, 陈占明^{1,2}, 陈昊¹, 何海斌², 吴杰²

(1. 长安大学陕西省交通新能源开发、应用与汽车节能重点实验室, 710018, 西安;

2. 宁波中策动力机电集团有限公司, 315020, 浙江宁波)

摘要: 为明晰高压喷射条件下二甲醚和甲醇双直喷的喷雾形态和火焰发展特性,通过高温高压定容燃烧弹,利用高速相机基于纹影法,对比研究了甲醇和二甲醚双直喷的喷雾燃烧特性。实验中,喷射压力设置为 60、80、100 MPa,环境背压设置为 0.2、4 MPa,环境温度分别为 500、800 K。背压为 0.2 MPa 时,二甲醚的气相和液相贯穿距以及喷雾投影面积小于甲醇;背压为 4 MPa 时情况相反。但是,二甲醚液相喷雾贯穿距和喷雾面积所占的比例在同工况下均小于甲醇,即两种背压条件下二甲醚的雾化效果均比甲醇的好。随着喷射压力的增加,双直喷喷雾的火焰浮起长度增加,喷射压力为 100 MPa 时的火焰浮起长度较 60 MPa 时增加约 26.42%,着火延迟期变长,KL 因子的总和减少了 44.05%;随着二甲醚喷射延时的增加,两种喷雾碰撞后形成的双直喷喷雾发展变快,喷雾面积先变小后变大,燃烧火焰的着火延迟期变长。相比于同步喷射,二甲醚延迟 1 ms 喷射时火焰浮起长度增加 8.34%,KL 因子的总和下降 26.12%。研究表明,增加喷射压力和二甲醚喷射延时对于优化二甲醚、甲醇双燃料发动机的喷雾与燃烧特性具有重要的促进作用。

关键词: 二甲醚;甲醇;闪急沸腾;喷雾特性;燃烧特性

中图分类号: TK40 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202406014 **文章编号:** 0253-987X(2024)06-0153-09

Optical Study of Dual Direct Injection Spray of Dimethyl Ether and Methanol and Combustion Characteristics

NAN Tiantian¹, XIAO Hongliang¹, ZHANG Haitao¹, HUANG Lümeng¹,

CHEN Zhanming^{1,2}, CHEN Hao¹, HE Haibin², WU Jie²

(1. Shaanxi Key Laboratory of New Transportation Energy and Automotive Energy Saving, Chang'an University,

Xi'an 710018, China; 2. Ningbo C. S. I. Power & Machinery Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315020, China)

Abstract: In order to clarify the spray morphology and flame development characteristics of dimethyl ether (DME) and methanol dual direct injection under high injection pressure conditions, the spray and combustion characteristics of methanol and DME are compared and studied based on the schlieren method by using high-speed camera and high-temperature and high-pressure constant volume bomb. In the experiment, the injection pressure is set to 60 MPa, 80 MPa and 100 MPa, the ambient pressure is set to 0.2 MPa and 4 MPa, and the ambient temperature is 500 K and 800 K, respectively. The results show that under 0.2 MPa ambient pressure, the gas

收稿日期: 2023-11-21。 作者简介: 南天天(2002—),女,硕士生;肖红亮(通信作者),男,讲师。 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2023M741840);青年科技新星资助项目(2024SR5020);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102383201)。

网络出版时间: 2024-02-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240223.1421.010>

phase and liquid phase penetration distance and the spray projection area of DME are smaller than those of methanol, while the result is on the contrary under 4 MPa ambient pressure, but the proportion of DME liquid phase spray penetration distance and spray area are less than those of methanol under the same working conditions, that is, the atomization effect of DME is better than that of methanol under the two ambient pressure conditions. With the increase of injection pressure, the flame floating length of dual direct injection spray increases, and the flame floating length under 100 MPa injection pressure increases by about 26.42% compared with 60 MPa, the ignition delay period becomes longer, and the sum of KL decreases by 44.05%. With the increase of the DME injection delay time, the development of dual direct injection spray formed by the collision of the two sprays becomes faster, the spray area becomes smaller first and then larger, and the ignition delay period becomes longer, the flame floating length increases by about 8.34%. Compared with synchronous injection condition, DME injection with a delay of 1 ms has the lower soot formation and 26.12% higher KL formation. It is indicated that increasing the injection pressure and delaying the injection time of DME are beneficial to optimize the injection and combustion of DME and methanol dual fuel engine.

Keywords: dimethyl ether; methanol; dual-fuel; flash boiling; spray; combustion

甲醇(CH_3OH)具有再生性好、易生产运输、碳中性和燃烧清洁^[1]等优点,其作为内燃机替代燃料受到了广泛的关注。由于甲醇的汽化潜热高、自燃温度高^[2],在传统的压缩点火发动机中,甲醇很难作为唯一燃料直接使用。研究表明,在压燃式发动机上使用甲醇时,可采取柴油/甲醇双燃料燃烧的方式辅助甲醇的利用^[3]。该方法通过进气道喷射甲醇形成均匀的混合气,柴油则在适当的曲轴转角时喷射使混合气点燃。文献[2-4]研究了柴油/甲醇复合燃烧系统(DMCC),发现 DMCC 的指示热效率高于纯柴油,而氮氧化物和烟尘排放低于纯柴油,但柴油/甲醇双燃料发动机仍存在甲醇替代率低、运行范围窄、非常规排放物高等缺点。研究证实,将甲醇喷油策略由进气道喷射改为直喷是提高甲醇替代率和控制排放的有效途径。Yin 等^[5]通过分析甲醇进气道喷射和甲醇直喷两种方式,对比研究了柴油/甲醇双燃料发动机的燃烧和排放特性,研究发现,与甲醇进气道喷射相比,甲醇直喷获得了更可控和稳定的放热速率。采用甲醇直喷时,甲醇替代率为 96%,指示热效率为 41.55%。Wang 等^[6]研究了双直喷柴油/甲醇扩散燃烧的燃烧和排放特性,研究发现,在柴油/甲醇双直喷模式下,由于传热和排气损失的减少,热效率提高了 10%。

综上所述,甲醇直喷被认为是进一步优化柴油/甲醇双燃料发动机燃烧和排放的有效途径^[7]。然而,面对脱碳问题,柴油是一种高碳燃料,不能实现碳中性的目标,而二甲醚(CH_3OCH_3)十六烷值高,

自燃性好,并且其可再生性好,易储存和运输^[8],所以二甲醚被认为是最有前途的内燃机替代燃料。将二甲醚与甲醇以双直喷方式混烧,一方面可以使难以自燃的甲醇被二甲醚点燃,另一方面甲醇喷雾蒸发可以降低燃烧温度,进而降低 NO_x 和碳烟的排放^[9]。同时,采用双燃料双直喷的燃料喷射策略,可灵活调控缸内混合气的形成,对于优化燃烧过程和降低排放具有重要意义。此外,二甲醚和甲醇同为碳中性燃料,混合燃烧可实现内燃机的零碳排放。但关于甲醇和二甲醚双直喷的研究甚少,尤其是在高喷射压力、闪急沸腾条件下的喷雾和燃烧特性尚需进一步明晰,本文采用光学方法研究了二甲醚/甲醇双直喷在定容燃烧弹中的喷雾发展和燃烧特性,研究结果可为二甲醚和甲醇在发动机上的高效应用提供理论基础。

1 实验装置及方法

1.1 实验系统的建立

为了研究二甲醚和甲醇双直喷的喷射和燃烧特性,在传统定容弹的侧窗上安装了一个水平喷射器,该喷射器连接二甲醚高压共轨燃油供给系统,而原来的垂直喷射器连接甲醇高压共轨燃油供给系统,两个高压共轨燃油供给系统的喷射压力调节范围为 0~200 MPa。满足实验条件下高压喷射压力为 60~100 MPa 的要求,实验系统示意图如图 1 所示。

图 1 中实验系统由弹体、双燃油喷射系统、进排气系统、图像采集系统和控制系统 5 部分组成。控制系统主要由压力控制系统和温度控制系统组成,

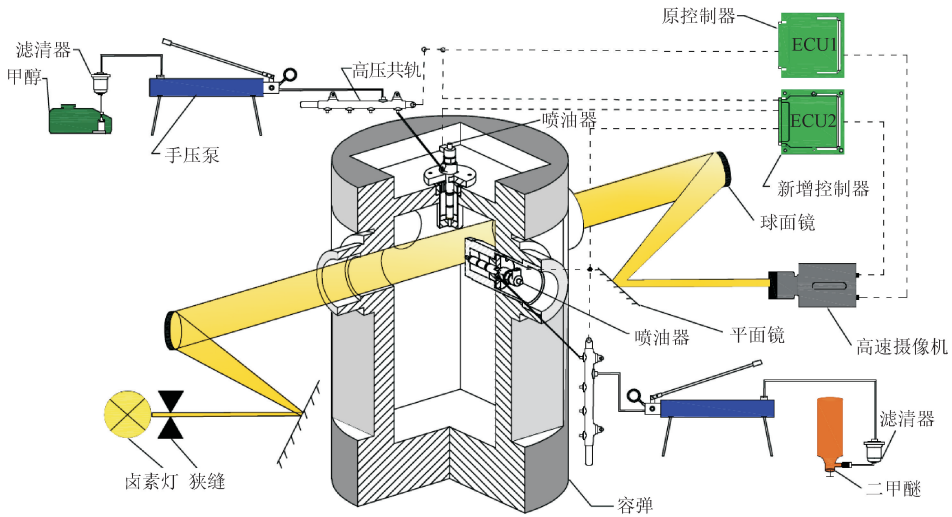


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

通过调节电加热丝的加热开度,可以精确控制定容弹的环境温度。通过控制进入容弹的空气和 N_2 ,使环境压力保持在 $0.2\sim 4\text{ MPa}$ 范围内。双燃油喷射系统使用两个电子控制单元 (ECU) 来精确控制油轨压力、喷射时间、脉冲宽度和频率,以此达到控制顶部和侧面喷油器的同步、异步喷射的目的。图像采集系统采用高速摄像机拍摄二甲醚、甲醇喷雾和火焰,实现可视化研究。本文采用 Fastcam mini AX200 高速相机,为了兼顾拍摄速度和分辨率,实验中拍摄速度设置为 $20\,000\text{ 帧/s}$,分辨率设置为 512×512 像素。高速摄像机的图像比例尺通过标准坐标纸标定为 4.2 像素/mm 。本文使用的相机控制软件是 Photron Fastcam Viewer 4.0 (PFV4.0),通过 PFV4.0 对喷雾和燃烧过程的图像进行保存,利用千兆以太网接口与高速摄像机进行通信,从而将图像下载到本地。

1.2 实验方法

本文首先根据纹影法^[10]采集二甲醚和甲醇的喷雾和燃烧图像,然后利用 Photoshop、Matlab 等软件对喷雾和燃烧图像进行处理,得到双直喷喷雾的喷雾贯穿距和喷雾投影面积以及燃烧的 KL 因子、火焰浮起长度。由于二甲醚的十六烷值大,饱和蒸汽压高,其喷雾更容易气化和燃烧,因此在二甲醚/甲醇双直喷策略实验中,选择延迟喷射二甲醚,可以使较难气化的甲醇先在高温容弹环境中气化,然后再用二甲醚自燃的火焰点燃预先气化过的甲醇,这时候的甲醇比同步喷射时更容易着火。由此可见,二甲醚喷射延时 Δt 对提高二甲醚/甲醇双喷喷雾的雾化和燃烧起着至关重要的作用,其中 Δt 定义为开始喷射甲醇和

开始喷射二甲醚之间的时间间隔。喷雾贯穿距分为液相、气相喷雾贯穿距,分别定义为气相、液相喷雾能从喷嘴口到达油束最远端距离。喷雾投影面积同样分为气相、液相喷雾面积,即气相、液相喷雾在径向和轴向所达最远距离形成的边界所围面积,是燃料与空气雾化最直观的体现^[11]。由于高速摄像机的图像以彩色图像的形式存储,所以双直喷喷雾的火焰 KL 因子分布计算采用双色方法来衡量^[12-13], KL 因子与碳烟浓度有关^[14]。由于不均匀性的影响,不同条件下 KL 因子的误差和不确定度分别为 $5\%\sim 50\%$ ^[15-17]。本文将喷嘴到火焰顶点的距离定义为火焰浮起长度^[18],该参数通常用来表征喷雾在燃烧过程中夹带空气的程度,是碳烟生成多少的重要衡量指标^[19]。

本文设计了 3 组实验来分析二甲醚/甲醇双直喷的喷雾和燃烧特性,实验条件如表 1、2、3 所示。第 1 组实验比较了二甲醚和甲醇在不同环境压力下的喷雾特性,第 2 组实验研究了二甲醚/甲醇双直喷喷雾在不同 Δt 、环境压力下的喷雾特性,第 3 组实验研究了二甲醚/甲醇双直喷火焰在不同 Δt 、喷射压力下的燃烧排放特性。

表 1 第 1 组实验参数

Table 1 Experimental parameters of first group	
参数	数值及气体
喷射压力 P_{inj}/MPa	60
喷油脉宽/ms	1.0
喷孔直径/mm	0.14
环境压力 P_{amb}/MPa	0.2, 4.0
环境温度 T_{amb}/K	500
燃料温度/K	320
环境气体	N_2

表 2 第 2 组实验参数

Table 2 Experimental parameters of second group

参数	数值及气体
P_{inj}/MPa	60,80
喷油脉宽/ms	1.0
喷孔直径/mm	0.14
P_{amb}/MPa	0.2,4.0
T_{amb}/K	500
燃料温度/K	320
环境气体	N_2
$\Delta t/\text{ms}$	0,0.4,0.8

表 3 第 3 组实验参数

Table 3 Experimental parameters of third group

参数	数值及气体
P_{inj}/MPa	60,100
喷油脉宽/ms	1.0
喷孔直径/mm	0.14
P_{amb}/MPa	4.0
T_{amb}/K	800
燃料温度/K	320
环境气体	空气
$\Delta t/\text{ms}$	0,0.6,0.8,1.0

2 结果与讨论

2.1 环境压力对二甲醚/甲醇单喷嘴雾特性的影响

二甲醚与甲醇在 $P_{amb}=0.2\text{ MPa}$ 时的喷雾形态对比如图 2 所示,可知甲醇的喷雾发展速度要比二甲醚快得多,这主要与燃料的密度、黏度和表面张力有关^[20]。此外,甲醇喷雾呈现细而长的针状,其喷雾外侧的气相组分较少,而二甲醚则相反,由于其喷雾外侧气相组分多而使喷雾羽流边缘较光滑。这是因为二甲醚在 $P_{amb}=0.2\text{ MPa}$ ^[21] 时已达到闪沸状态,且闪沸喷雾在喷射初期具有喷射阻力^[22],所以二甲醚气相组分较多,但喷雾贯穿距较小。

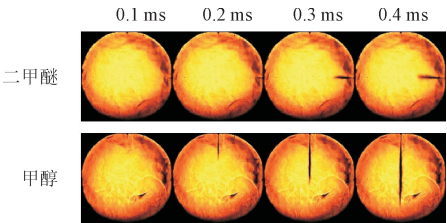


图 2 二甲醚与甲醇喷雾形态对比图($P_{amb}=0.2\text{ MPa}$)

Fig. 2 Comparison of morphology of dimethyl ether and methanol spray ($P_{amb}=0.2\text{ MPa}$)

$P_{amb}=0.2\text{ MPa}$ 时,二甲醚与甲醇喷雾贯穿距对比和喷雾面积对比如图 3、图 4 所示。由图 3、图 4 可以看出,二甲醚液相喷雾贯穿距、喷雾面积占总喷雾贯穿距、面积的比例小于甲醇的,说明该背压下二甲醚喷雾的气化效果优于甲醇。相同喷射压力下,甲醇的总喷雾贯穿距、面积始终大于二甲醚的,二甲醚的液相喷雾贯穿距、喷雾面积随着时间的推移在一定范围内上下波动,这导致二甲醚液相喷雾贯穿距、喷雾面积占总喷雾贯穿距、喷雾面积的比例随时间的推移减小,但是甲醇的液相喷雾贯穿距、喷雾面积随着喷射的持续而增大,这是由于随着喷射的进行,甲醇液体燃料不断从喷嘴喷出,新喷出的甲醇燃料不能及时气化,导致液相的喷雾贯穿距和喷雾面积变大,并且其所占总喷雾贯穿距和喷雾面积的比例也增大。

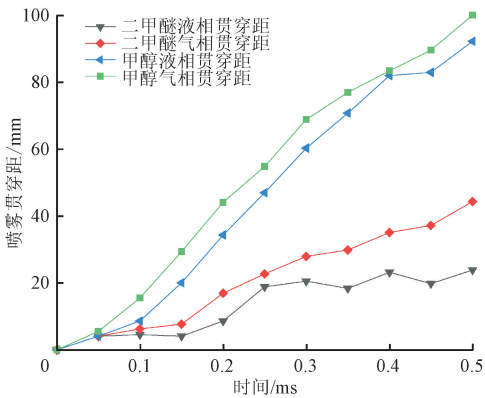


图 3 二甲醚与甲醇喷雾贯穿距对比图($P_{amb}=0.2\text{ MPa}$)

Fig. 3 Comparison of penetration distance between dimethyl ether and methanol spray ($P_{amb}=0.2\text{ MPa}$)

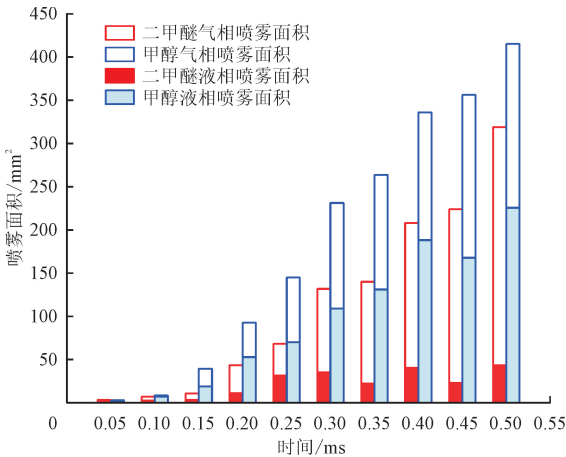


图 4 二甲醚和甲醇的喷雾面积对比图($P_{amb}=0.2\text{ MPa}$)

Fig. 4 Comparison of spray area of dimethyl ether and methanol ($P_{amb}=0.2\text{ MPa}$)

$P_{amb}=4\text{ MPa}$ 时,二甲醚与甲醇单独喷射的喷雾发展情况如图 5 所示,可知二甲醚的喷雾发展速度要快于甲醇。当喷射时间为 2 ms 时,二甲醚喷雾已完全汽化,而甲醇喷雾中仍有一些液相成分,这是因为二甲醚的饱和蒸汽压高于甲醇,在相同背压条件下,二甲醚喷雾比甲醇更容易汽化。

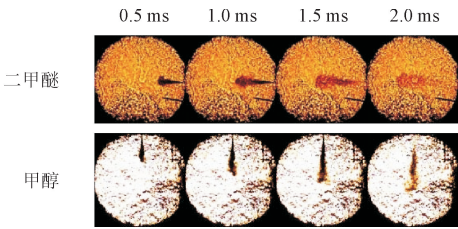


图 5 二甲醚与甲醇喷雾形态对比图($P_{amb}=4\text{ MPa}$)
Fig. 5 Comparison of dimethyl ether and methanol spray morphology ($P_{amb}=4\text{ MPa}$)

$P_{amb}=4\text{ MPa}$ 时,二甲醚和甲醇喷雾贯穿距对比、二甲醚和甲醇喷雾面积对比如图 6、图 7 所示。从图 6 可以看出,二甲醚和甲醇在 $P_{amb}=4\text{ MPa}$ 时的喷雾贯穿距随喷射时间的变化与其在 $P_{amb}=0.2\text{ MPa}$ 时的变化趋势相同,但是在 $P_{amb}=4\text{ MPa}$ 时,相同喷射压力下二甲醚的气相喷雾贯穿距始终大于甲醇,这与图 5 的趋势一致。而图 7 中的喷雾面积变化趋势与图 6 的喷雾贯穿距变化相对应,二甲醚的气相喷雾面积远远大于甲醇的,但二者的液相喷雾面积占总喷雾面积的比例随喷射时间的推移而减小,在喷射时间为 2 ms 时,二甲醚减小到 0% ,而甲醇则减小到 57% ,这进一步说明了二甲醚喷雾的气化状态比甲醇好。

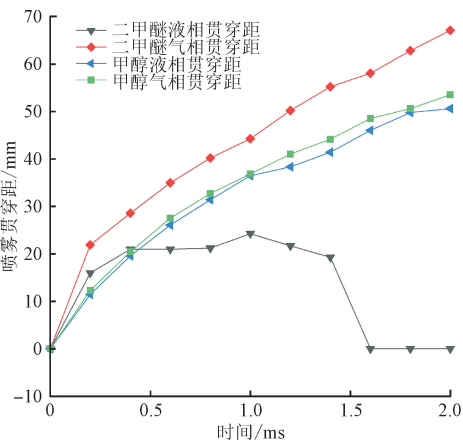


图 6 二甲醚和甲醇喷雾贯穿距对比图($P_{amb}=4\text{ MPa}$)
Fig. 6 Comparison of penetration distance between dimethyl ether and methanol spray ($P_{amb}=4\text{ MPa}$)

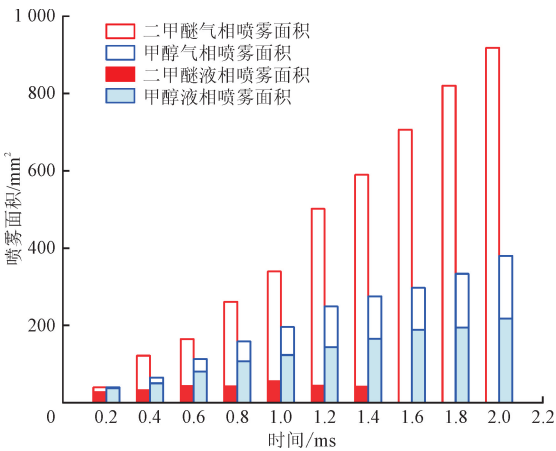


图 7 二甲醚和甲醇喷雾面积对比图($P_{amb}=4\text{ MPa}$)
Fig. 7 Comparison of spray area of dimethyl ether and methanol ($P_{amb}=4\text{ MPa}$)

2.2 环境压力对二甲醚/甲醇双直喷雾特性的影响

在 $\Delta t=0$ 时研究环境压力为 $0.2, 4\text{ MPa}$ 对二甲醚/甲醇双直喷雾特性的影响,如图 8 所示。

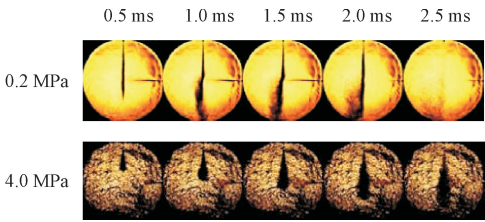


图 8 不同环境压力下二甲醚/甲醇双直喷雾形态($P_{inj}=60\text{ MPa}$)
Fig. 8 Dimethyl ether/methanol dual direct injection spray form under different ambient pressures ($P_{inj}=60\text{ MPa}$)

由图 8 可以看出,随着环境压力增加,二甲醚和甲醇喷雾羽流的撞击时间变晚,两种燃料的喷雾形态也由针状变为羽毛状,喷雾锥角明显增大。当 $P_{amb}=0.2\text{ MPa}$ 时,由于其背压较小,碰撞损耗的动能少,因此两喷雾碰撞呈现贯穿趋势,双直喷雾斜向下发展;当 $P_{amb}=4\text{ MPa}$ 时,两喷雾的碰撞呈现聚合趋势,使双直喷雾向下穿透,这是由于此时二甲醚喷雾几乎已经全部气化,对甲醇喷雾运动轨迹几乎无影响。与两种燃料分别单喷对比,二甲醚/甲醇双直喷雾的雾化质量明显更好,这是因为二甲醚和甲醇液滴在碰撞时开始相互作用,产生强烈的湍流^[23],前期高动能液滴碰撞后油束动能耗散,喷雾液滴之间发生聚合,液滴的不断聚合使喷雾羽流逐渐变大,进而使两种不同的燃料与空气混合的更加

充分。

2.3 Δt 对双直喷雾特性的影响

在 $P_{\text{amb}}=4\text{ MPa}$ 、 $P_{\text{inj}}=80\text{ MPa}$ 的条件下,对比了 Δt 为 0、0.4、0.8 ms 时的喷雾特性,如图 9、图 10 所示。

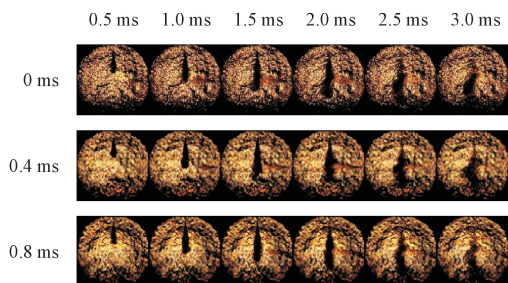


图 9 不同 Δt 下二甲醚/甲醇双直喷雾形态
($P_{\text{amb}}=4\text{ MPa}$)

Fig. 9 Dimethyl ether/methanol dual direct injection spray morphology under different Δt ($P_{\text{amb}}=4\text{ MPa}$)

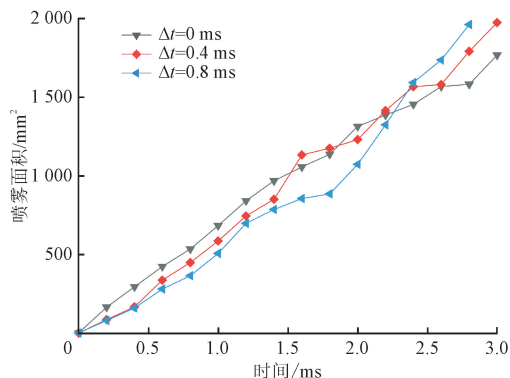


图 10 不同 Δt 下二甲醚/甲醇双直喷雾面积
($P_{\text{amb}}=4\text{ MPa}$)

Fig. 10 Spray area of dimethyl ether/methanol dual direct injection spray at different Δt ($P_{\text{amb}}=4\text{ MPa}$)

由图 9 可以看出,随着 Δt 变大,甲醇单独气化的时间越长,其喷雾羽流的气化程度变高,因此在喷雾对撞时,甲醇更容易被二甲醚冲散,使得双直喷雾扭曲成钩状的程度增加,喷雾发展的更快并且其气相组分变多。从图 10 可以看出,在喷射前期,随着 Δt 的增加,双直喷雾的喷雾面积减小,而在喷射后期, Δt 越大,双直喷雾的喷雾面积越大。这是由于 Δt 越大,二甲醚越晚喷射,使得总喷雾面积在喷射前期减小,而延迟时间越长,两种喷雾碰撞后发展的越快,使得双直喷雾发展迅速,进而超过 Δt 较短时的喷雾面积。这说明 Δt 的增加可以提高双直喷雾雾化效果。

2.4 甲醇/二甲醚双直喷在不同 Δt 和喷射压力下的燃烧特性

甲醇/二甲醚双直喷喷雾在 $P_{\text{inj}}=100\text{ MPa}$ 时,同步喷射和二甲醚单独喷射的燃烧火焰形态如图 11 所示。由图 11 可以看出:火焰先出现在横向喷射的二甲醚,然后再引燃垂直喷射的甲醇,进而斜向左下发展,这是由于两种喷雾对撞产生湍流,使得左下角的喷雾与空气混合较好,比纯二甲醚喷雾和纯甲醇喷雾更易燃烧;随着时间的推移,火焰偏离竖直方向的角度变小,并且自发光强度变弱,这是由于未和二甲醚碰撞的甲醇沿着竖直方向往下运动,影响了火焰的发展和方向;2.2 ms 时双直喷雾形成的火焰几乎消失。

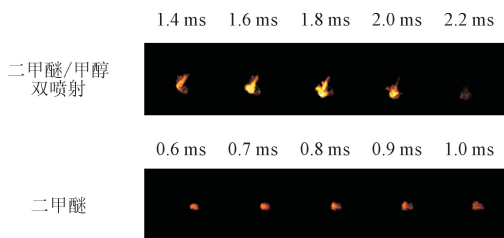


图 11 甲醇/二甲醚双直喷燃烧火焰形态

Fig. 11 Methanol/dimethyl ether double direct injection combustion flame form

2.4.1 着火延迟期

着火延迟期是表征燃料燃烧的重要参数,着火延迟期过短不利于燃料混合,使得燃烧过程变差,适当延长燃烧着火延迟时间,可使燃油与空气混合更充分,有利于减少碳排放^[24]。 Δt 、 P_{inj} 对二甲醚/甲醇双直喷着火延迟期的综合影响如图 12 所示,可知 Δt 越长,着火延迟期越长。这是因为甲醇的汽化潜热较高,随着 Δt 的增大,甲醇的蒸发和雾化程度更高,注入燃烧室的甲醇会在气化和蒸发过程中吸收部分热量,从而降低容弹温度。同时,甲醇在扩散过程中吸入大量空气,与二甲醚碰撞后吸入部分二甲醚,从而降低了二甲醚喷雾羽流内氧气和二甲醚的浓度,阻碍了二甲醚的自燃。因此,甲醇蒸发引起的环境温度下降和甲醇对二甲醚点火的抑制作用共同延长了着火延迟期^[25]。随着 P_{inj} 的增加,着火延迟期变长。主要是因为在较高的压力下,甲醇喷雾获得了较高的初始动能,使得更多的甲醇喷雾向二甲醚喷雾器下部移动,甲醇对二甲醚自燃的抑制作用加强。结合喷雾相互作用可知, P_{inj} 、 Δt 对二甲醚点火的影响取决于二甲醚/甲醇混合程度、二甲醚/空气和甲醇/空气混合程度。因此,通过合理调节

P_{inj} 、 Δt ,可以获得最佳着火延迟期,改善二甲醚/甲醇双直喷雾的燃烧特性。

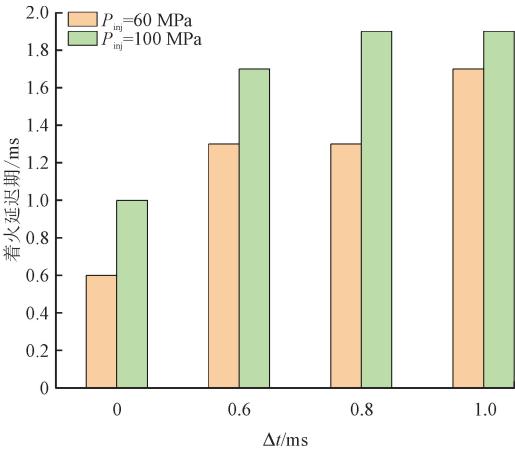


图 12 P_{inj} 、 Δt 对着火延迟期的综合影响
Fig. 12 The combined effect of P_{inj} and Δt on the ignition delay period

2.4.2 火焰浮起长度

火焰浮起长度是影响柴油机燃烧排放特性的重要特性参数。一般来说,较长的火焰浮起长度会延长燃料与空气的混合时间,改善油气的混合质量,降低局部燃料空气当量比,从而减少烟尘的产生,并且促进了已生成烟尘基团的氧化^[19]。

火焰浮起长度随 P_{inj} 、 Δt 的变化情况如图 13 所示。由图 13 可以看出,二甲醚与甲醇撞击后产生了强烈的湍流扰动,促进了二甲醚/甲醇与二甲醚/空气的混合,使得双直喷雾迅速蒸发雾化,进而缩短着火延迟期和火焰浮起长度。

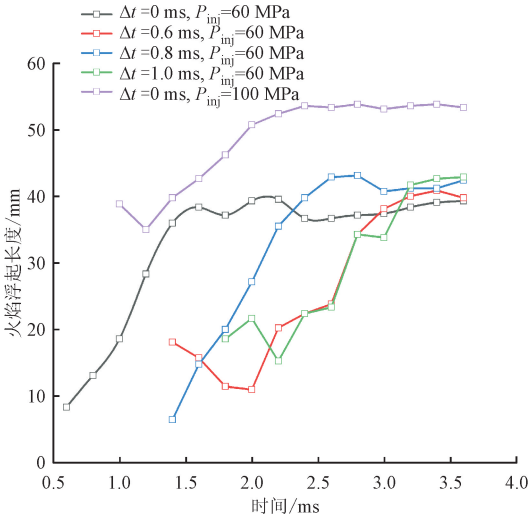


图 13 P_{inj} 、 Δt 对火焰浮起长度的影响
Fig. 13 Effect of P_{inj} and Δt on the length of flame floating

随着燃烧时间的推移,大部分工况下火焰浮起长度先略有减小,然后迅速增大,最终达到稳定状态。二甲醚自燃后,由于二甲醚前方喷雾与甲醇碰撞的一瞬间抑制了二甲醚的燃烧和火焰的发展,促使火焰沿着喷雾羽流向喷口方向扩散,而两种燃料喷雾碰撞后迅速混合发展,使得火焰前端的喷雾比后端的更易燃烧,火焰沿正向迅速发展,直到稳定。当火焰浮起长度稳定后, Δt 越大,火焰浮起长度越长, $\Delta t=1\text{ ms}$ 的火焰浮起长度比 $\Delta t=0\text{ ms}$ 的长 8.34%。随着 P_{inj} 的增大,喷雾羽流穿透能力变强,在二甲醚自燃前喷雾贯穿距变长,因此火焰浮起长度变大,100 MPa 下的火焰浮起长度比 60 MPa 大了 26.42%。

2.4.3 KL 因子

KL 因子是描述烟尘浓度的参数,KL 因子值越大,烟尘浓度越高^[26],不同 Δt 下火焰的 KL 因子如图 14 所示。

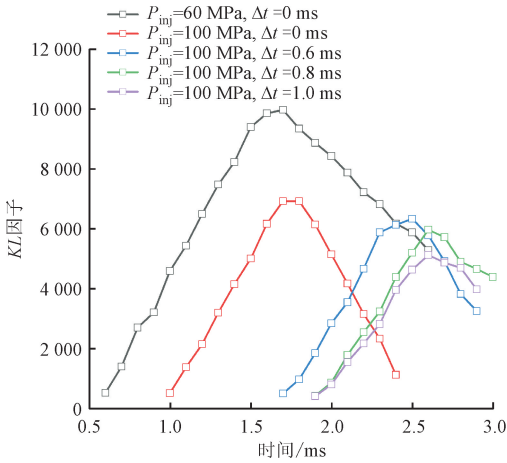


图 14 不同 Δt 下火焰的 KL 因子
Fig. 14 KL factor of flame at different Δt

由图 14 可以看出,在所有喷射过程中,随着二甲醚自燃,火焰中开始形成烟尘,KL 因子的总和在增加,而在燃烧反应后期,燃料即将耗尽,燃烧反应变弱,烟尘生成减少,KL 因子的总和减小。随着 Δt 的增加,KL 因子的总和明显减小,延迟 1 ms 的 KL 因子比同步喷射工况下减少了 26.12%。这是因为较长 Δt 延长了着火延迟期,使甲醇有更多的时间蒸发,降低了环境温度,使得烟尘减少。同时,较长的 Δt 提高了燃料和气体的混合质量,降低了局部燃空当量比,促进了预混燃烧,从而提高了燃烧放热速率并降低烟尘排放^[27]。KL 因子的总和随着 P_{inj} 的增加而显著降低,100 MPa 喷射压力下的 KL 因子的总和比 60 MPa 少了 44.05%。高喷射压力可以改

善燃油的雾化效果,降低局部当量比,进而促进碳烟氧化,导致碳烟减少^[26]。同时,在较高的喷射压力下,甲醇的蒸发和雾化速度更快,部分甲醇不参与燃烧,这部分未燃烧的甲醇可以氧化生成的烟尘,从而减少整个燃烧过程中的烟尘^[28]。综上所述,通过适当调整二甲醚喷射延迟和喷射压力,二甲醚/甲醇双直喷燃烧过程中碳烟可大幅减少。

3 结 论

(1) $P_{\text{amb}}=0.2\text{ MPa}$ 时,二甲醚的气相和液相贯穿距以及喷雾投影面积较甲醇的小,而 $P_{\text{amb}}=4\text{ MPa}$ 背压下呈现相反的趋势。两种工况下二甲醚液相喷雾贯穿距和喷雾面积所占的比例都小于甲醇。这说明两种背压条件下二甲醚的雾化效果都比甲醇好。

(2) 二甲醚和甲醇喷射时的 $P_{\text{amb}}、\Delta t$ 对优化双直喷喷雾特性起着重要作用。在 4 MPa 背压下,随着 Δt 的增加,两种喷雾碰撞后气相组分变多,双直喷喷雾发展变快,其喷雾面积先减小后增大,并且着火延迟期变大,火焰浮起长度变长, KL 因子下降约 26.12% ,碳烟产生量减少。

(3) 随着喷射压力的增加,双直喷喷雾羽流的高度雾化促进了二甲醚和甲醇的燃烧,着火延迟期变长,火焰浮起长度增加。 100 MPa 喷射压力下的火焰浮起长度较 60 MPa 增加约 26.42% , KL 因子的总和减少了 44.05% 。

参考文献:

- [1] 姚春德,姚安仁. 甲醇燃料的应用现状及其展望 [J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(5): 521-535.
YAO Chunde, YAO Anren. Review on methanol as fuel for engines and its future prospect [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2023, 14(5): 521-535.
- [2] WEI Hongyuan, YAO Chunde, PAN Wang, et al. Experimental investigations of the effects of pilot injection on combustion and gaseous emission characteristics of diesel/methanol dual fuel engine [J]. Fuel, 2017, 188: 427-441.
- [3] 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.
- [4] WANG Bin, YAO Anren, YAO Chunde, et al. In-depth comparison between pure diesel and diesel methanol dual fuel combustion mode [J]. Applied Energy, 2020, 278: 115664.
- [5] YIN Xiaojun, XU Leilei, DUAN Hao, et al. In-depth comparison of methanol port and direct injection strategies in a methanol/diesel dual fuel engine [J]. Fuel Processing Technology, 2023, 241: 107607.
- [6] WANG Yang, XIAO Ge, LI Bo, et al. Study on the performance of diesel-methanol diffusion combustion with dual-direct injection system on a high-speed light-duty engine [J]. Fuel, 2022, 317: 123414.
- [7] 尹晓军,任宪丰,栾建伟,等. 甲醇替代率对甲醇/柴油双直喷发动机性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(9): 71-78.
YIN Xiaojun, REN Xianfeng, LUAN Jianwei, et al. Effect of methanol energy substitution ratio on performance of methanol/dieseldual-direct injection engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(9): 71-78.
- [8] PARK S H, LEE C S. Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 848-863.
- [9] 胡春明,马建义,何永辉,等. 低压空气辅助喷射甲醇发动机冷起动试验研究 [J]. 内燃机工程, 2023, 44(2): 64-72, 80.
HU Chunming, MA Jianyi, HE Yonghui, et al. Experimental study on cold start of a low pressure air assisted injection methanol engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2023, 44(2): 64-72, 80.
- [10] ZHANG Xiaoteng, GENG Chao, MING Zhenyang, et al. Optical characterization of ethanol spray flame on a constant volume combustion chamber [J]. Fuel Processing Technology, 2023, 250: 107928.
- [11] HE Jingjing, CHEN Hao, CHEN Yisong, et al. Optical study on the spray and combustion of diesel cyclopentanol blend fuels on a constant volume chamber [J]. Fuel, 2022, 315: 123171.
- [12] CHEN Hao, SU Xin, HE Jingjing, et al. Investigation on combustion characteristics of cyclopentanol/diesel fuel blends in an optical engine [J]. Renewable Energy, 2021, 167: 811-829.
- [13] HOTTEL H C, BROUGHTON F P. Determination of true temperature and total radiation from luminous gas flames [J]. Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition, 1932, 4(2): 166-175.
- [14] 何旭,马骁,吴复甲,等. 生物柴油碳烟特性的可视化研究 [J]. 内燃机工程, 2009, 30(2): 1-5.

- HE Xu, MA Xiao, WU Fujia, et al. Visualization investigation of soot characteristics of engine fuelled with biodiesel fuel [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2009, 30(2): 1-5.
- [15] MUSCULUS M P B, SINGH S, REITZ R D. Gradient effects on two-color soot optical pyrometry in a heavy-duty DI diesel engine [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 153(1/2): 216-227.
- [16] HE Xu, LI Yankai, LIU Cong, et al. Characteristics of spray and wall wetting under flash-boiling and non-flashing conditions at varying ambient pressures [J]. *Fuel*, 2020, 264: 116683.
- [17] HE Xu, LI Yankai, SJÖBERG M, et al. Impact of coolant temperature on piston wall-wetting and smoke generation in a stratified-charge DISI engine operated on E30 fuel [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 4955-4963.
- [18] 钟汶君, 颜飞斌, 相启龙, 等. 正戊醇/正十二烷二元燃料着火及燃烧特性 [J]. *内燃机学报*, 2023, 41(2): 123-130.
- ZHONG Wenjun, YAN Feibin, XIANG Qilong, et al. Ignition and combustion characteristics of n-pentanol/n-dodecane binary fuel [J]. *Transactions of CSICE*, 2023, 41(2): 123-130.
- [19] XUAN Tiemin, SUN Zhongcheng, EL-SEESY A I, et al. An optical study on spray and combustion characteristics of ternary hydrogenated catalytic biodiesel/methanol/n-octanol blends: spray morphology, ignition delay, and flame lift-off length [J]. *Fuel*, 2021, 289: 119762.
- [20] LI Gang, DAI Jiayi, LIU Zhien, et al. Optical study on spray, combustion and flame characteristics of n-hexanol/diesel blends under various diesel engine-like conditions [J]. *Fuel*, 2022, 325: 124941.
- [21] TENG H, MCCANDLESS J C, SCHNEYER J B. Thermochemical characteristics of dimethyl ether-an alternative fuel for compression-ignition engines [C]// SAE 2001 World Congress. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2001: 2001-01-0154.
- [22] LIU Xiao, YAO Xiaoxin, WANG Ze, et al. Single hole ammonia spray macroscopic and microscopic characteristics at flare and transition flash boiling regions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 235: 121443.
- [23] ZHANG Zhenyu, ZHANG Peng. Cross-impingement and combustion of sprays in high-pressure chamber and opposed-piston compression ignition engine [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 144: 137-146.
- [24] SHAHRIDZUA N ABDULLAH I, KHALID A, JAAT N, et al. A study of ignition delay, combustion process and emissions in a high ambient temperature of diesel combustion [J]. *Fuel*, 2021, 297: 120706.
- [25] YANG Ziming, FEI Chunguang, LI Yikai, et al. Experimental study of the effect of physical and chemical properties of alcohols on the spray combustion characteristics of alcohol-diesel blended fuels [J]. *Energy*, 2023, 263: 126158.
- [26] ZHANG Ji, JING Wei, ROBERTS W L, et al. Soot measurements for diesel and biodiesel spray combustion under high temperature highly diluted ambient conditions [J]. *Fuel*, 2014, 135: 340-351.
- [27] ZHANG Ji, JING Wei, FANG Tiegang. High speed imaging of OH* chemiluminescence and natural luminosity of low temperature diesel spray combustion [J]. *Fuel*, 2012, 99: 226-234.
- [28] ZHU Xinchang, LIU Shuai, WANG Zhong, et al. Study of the effect of methanol/biodiesel fuel mixtures on the generation of soot particles and their oxidation reactivity [J]. *Fuel*, 2023, 341: 127632.

(编辑 赵炜)