

二甲醚和柴油高压喷射喷雾与燃烧可视化对比研究

赵鹏云, 陈占明, 王涛, 张海涛, 王小琛, 陈朝阳, 陈昊, 耿莉敏

(长安大学能源与电气工程学院, 710018, 西安)

摘要: 为明晰高压喷射条件二甲醚闪急沸腾状态下的喷雾形态、自着火和火焰发展特性,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柴油和二甲醚的喷雾和燃烧特性。实验中将喷射压力设置为 60、100 MPa,环境背压设置为 4 MPa,在喷雾、燃烧条件下环境温度分别设置为 400、800 K。研究表明:同工况下二甲醚的喷雾贯穿距和喷雾面积均小于柴油,但其喷雾锥角大于柴油,雾化时间短于柴油,雾化效果优于柴油。随着喷射压力的提高,二甲醚与柴油的贯穿距和喷雾面积都增大,100 MPa 喷射压力下二甲醚喷雾面积较 60 MPa 增大 18.18%,而同工况下柴油增大 23.5%。相比于柴油,二甲醚燃烧滞燃期和火焰浮起长度较短,燃烧持续期与柴油相当,但二甲醚燃烧火焰亮度、火焰面积和碳烟生成量明显低于柴油。随着喷射压力的提高,柴油与二甲醚的碳烟生成量均降低,但二甲醚的碳烟生成量降低效果更加显著,该文碳烟生成量用体积分数 KL 因子总和来表示,发现 100 MPa 喷射压力下的二甲醚 KL 总和较 60 MPa 减小 33.3%,而同工况下柴油减小 19.32%。

关键词: 定容燃烧弹;二甲醚;柴油;喷雾;燃烧特性

中图分类号: TK40 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202306017 **文章编号:** 0253-987X(2023)06-0152-08

A Comparative Study of Visual Spray and Combustion Characteristics of Dimethyl Ether and Diesel under High Pressure

ZHAO Pengyun, CHEN Zhanming, WANG Tao, ZHANG Haitao, WANG Xiaochen,

CHEN Zhaoyang, CHEN Hao, GENG Liming

(School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: To clarify the spray, auto-ignition and flame development characteristics of dimethyl ether under flash boiling condition of high pressure injection, the spray and combustion characteristics of diesel and dimethyl ether were studied comparatively by using a constant volume vessel and the schlieren method. During the experiment, the injection pressure was 60 MPa and 100 MPa, the ambient pressure was 4 MPa, and the ambient temperature was 400 K and 800 K under spray and combustion conditions respectively. The results showed that the penetration distance and spray area of dimethyl ether were smaller than those of diesel, but the spray angle was larger than that of diesel, the atomization time was shorter than that of diesel, and the atomization was better than that of diesel. With the increase of injection pressure, the penetration distance and spray

收稿日期: 2023-01-07。 作者简介: 赵鹏云(2000—),男,硕士生;陈占明(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52006014)。

网络出版时间: 2023-03-06

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230303.1514.005.html>

area of both dimethyl ether and diesel increased. The spray area of dimethyl ether under 100 MPa injection pressure increased by 18.18% compared with 60 MPa, while that of diesel under the same condition increased by 23.5%. Compared with diesel, the ignition delay and flame lift-off length of dimethyl ether were shorter, and the combustion duration was similar, but the flame brightness, flame area, and soot of dimethyl ether were lower significantly. With the increase of injection pressure, the soot of diesel and dimethyl ether decreased, but the soot of dimethyl ether decreased much more significantly. For example, the *KL* sum of dimethyl ether under 100 MPa injection pressure decreased by 33.3% compared with 60 MPa, while that of diesel under the same working condition decreased by 19.32%.

Keywords: constant volume vessel; dimethyl ether; diesel; spray; combustion characteristics

二甲醚相比于柴油具有含碳量低、含氧量大、反应活性高等特点,是一种优良的柴油机替代燃料。二甲醚来源广泛,可通过可再生能源发电制氢,捕获封存二氧化碳催化合成后制取,是一种优良的碳中性燃料^[1]。二甲醚常温下加压高于 0.5 MPa 可液化,便于储存和运输。二甲醚分子中不含 C—C 键,燃烧不产生碳烟^[2]。二甲醚十六烷值高于柴油,具有良好的着火性,适用于压燃式发动机^[3]。二甲醚高效清洁应用对于动力装置节能减排具有重要作用^[4]。

压燃式发动机燃烧属于典型的扩散燃烧,燃油的喷射和雾化对混合气形成有重要影响,进而影响缸内的燃烧组织和排放物的生成。二甲醚相比于柴油具有更低的沸点和饱和蒸气压,更易实现闪急沸腾喷射和超临界喷射,其喷雾和燃烧特性与柴油有很大差别^[5]。Park 等^[6]通过实验与仿真对比研究二甲醚和柴油的喷雾特性,发现在常温常压下,二甲醚喷雾贯穿距小于柴油,但喷雾锥角大于柴油;在高背压环境下,二甲醚和柴油具有相类似的喷雾特性。Suh 等^[7]对比研究了柴油和二甲醚的雾化特性,发现二甲醚具有低的黏度和表面张力,相比于柴油喷雾具有更小的粒径和索特平均直径。Kim 等^[8]发现二甲醚的雾化过程主要受液滴雷诺数的影响,生物柴油和柴油主要受液滴韦伯数的影响,在相同喷射条件下二甲醚相比于柴油和生物柴油具有更好的喷雾破碎性能。Cung 等^[9]基于高温高压定容燃烧弹研究了二甲醚的自着火和火焰浮起长度等燃烧特性,相比于柴油,二甲醚燃烧具有更短的滞燃期和火焰浮起长度。此外,二甲醚自着火位置主要受环境温度影响,环境温度较高时着火局限在喷雾中心区域,而环境温度较低时着火发生在下游更分散区域。

综上,尽管已有文献对比研究了二甲醚和柴油

的喷雾特性,但其喷射压力大多低于 60 MPa,缺乏高压喷射条件下二甲醚的喷雾特性研究。此外,在闪沸喷雾下二甲醚的喷雾形态和燃烧室的匹配对于优化燃烧过程具有重要意义^[10],因此需要明晰高喷射压力下二甲醚的自着火和火焰发展特性,并与同工况下柴油的自着火和火焰发展特性进行对比。本文对已有的高温高压定容燃烧弹进行改装,增加二甲醚侧窗的喷射系统,进行二甲醚、柴油高压喷射条件下的喷雾和燃烧可视化研究。研究成果可为二甲醚在压燃式发动机上的高效应用提供理论基础。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

传统的定容燃烧弹即在一个耐高温高压的缸体的四周安装有可视化玻璃窗口,并通过玻璃窗口形成一定的光路进行图像采集等工作,只能通过定容弹上方的喷油器来对单一的燃料进行喷雾燃烧特性研究。本文在容弹一个侧窗加装了一套二甲醚的燃油喷射系统,从而可以实现二甲醚燃料在容弹内的水平喷射,以研究二甲醚的喷雾和燃烧特性,如图 1 所示。容弹采用高压共轨燃油供给系统,油喷射压力调节范围为 60~180 MPa,满足本次实验 60、100 MPa 的要求。

该系统主要由容弹本体,用于光学诊断的石英观察窗口,电加热丝,燃油、冷却液、实验气体阀门及管路,温度、压力传感器、油轨、喷油器适配底座及弹体支架组成。通过调整电加热丝的加热开度控制电压,起到调整维持实验环境温度的目的。进排气系统接口位于弹体固定架下方,气体经进气阀进入弹体内部提供气体环境氛围及压力,进排气阀门均可由数据采集控制系统通过电磁阀控制,进而实现容弹内部压力调节。排气系统安全阀可使系统超压时自动降压,保证安全实验环境。

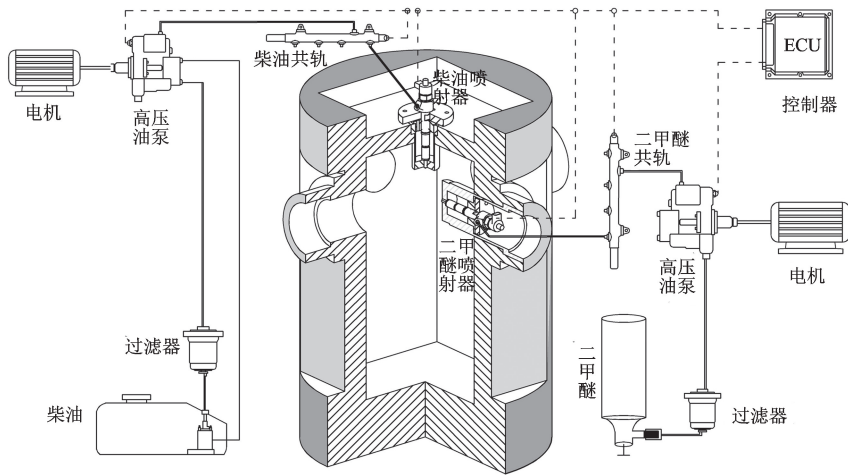


图 1 定容燃烧弹实验系统示意图

Fig.1 The schematic diagram of constant volume vessel

1.2 实验方法

本文分别通过容弹的顶部喷油器以及水平喷油器并利用纹影法来实现对柴油和二甲醚的喷雾燃烧特性的研究。表 1 为实验工况,背景压力、背景温度等环境参数的改变会显著影响燃料的喷雾特性。环境背压的升高可有效限制喷雾轴向贯穿而增强径向扩散,从而改善燃油雾化质量;背景温度对喷雾的贯穿距影响较大,而对喷雾锥角影响较小,同时背景温度很大程度影响喷雾的气相体积百分比,进而影响燃料燃烧特性和碳烟排放^[11]。在研究柴油二甲醚喷雾特性时,为了后续提取二甲醚的气液相,同时避免燃料喷雾燃烧,选用背压 4 MPa、环境温度 400 K 来对比研究柴油与二甲醚的喷雾特性。在研究柴油二甲醚燃烧特性时,为了保证柴油与二甲醚可以成功燃烧,为便于分析燃烧特性,将背压、环境温度设置为 4 MPa、800 K 来模拟发动机缸内燃烧的实际工作环境。本文实验使用日本 Photron 公司 Fastcam mini AX200 型的高速摄影机,为兼顾拍摄速度和分辨率,将拍摄速度设置为 20 000 帧/s,所拍摄图片尺寸设置为 512×512 像素。通过 Photron Fastcam Viewer 4.0 (PFV4.0) 软件对喷雾和燃烧过程图像进行保存,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。

表 1 喷雾和燃烧实验工况

参数	数值	
	喷雾	燃烧
喷射压力/MPa	60 100	60 100
喷油脉宽/ms	1	1
喷孔直径/mm	0.14	0.14
环境温度/K	400	800

1.3 图像后处理

处理纹影法喷雾图像时,按照每 3 张图片为一组,将其分别转换为灰度图,计算同一位置的标准差,从而生成相同灰度的图像并相减以去除图像背景。随后对图片进行降噪处理,可得喷雾的边缘轮廓,可利用 Matlab 编译的程序来计算喷雾的宏观特性参数。

在实验前需用坐标纸进行标定操作,得到视野中的喷嘴坐标(x,y)以及像素数与实际长度的比值

$$k = \frac{S_p}{S} \tag{1}$$

式中: S 为利用坐标纸所标定的实际距离; S_p 为图像在长度为 S 时所对应的像素数。

喷雾贯穿距 D 指从喷嘴口能到达油束最远端距离。喷雾锥角定义为从喷嘴出口沿着喷雾边界到 $D/2$ 处时两条切线之间的夹角。喷雾面积是喷雾在横向和纵向所能达到的最远距离的边界所围成的面积,是燃料与空气雾化的最直观的体现。喷雾面积可在计算喷雾边界范围内的像素点总数后再转换为实际的物理尺寸。

本文以 R、G、B 三基色的方式对燃烧图像进行储存,并利用双色法通过选取两种合适的基色来处理图像,双色法是一种非接触测温技术,其原理是测量火焰在 2 个波长 λ_1 、 λ_2 下对应的单色辐射强度,建立不同波长的强度与温度、碳烟体积分数的关系式,联合求解得出火焰单元对应的温度和碳烟的体积分数。在计算中所用到的波长分别取 λ_G 为 0.546 1 μm 、 λ_B 为 0.435 8 μm 。由于实验条件有限,参考文献[12]的标定结果来计算不同燃料燃烧时的火焰温度、 KL 因子。

在实验过程中,当使用不同的燃料进行实验时,需要将视窗上的石英玻璃拆下并用乙醇进行清洁,减少实验过程中油雾和烟尘对图像采集的干扰,保证光路上的清洁。同时,在使用不同的燃料进行实验时,需要用新的实验样油对整个供油管路进行清洗。

2 结果与讨论

2.1 喷雾形态变化

本文采用纹影法来采集喷雾和燃烧图像,并选取喷雾或燃烧现象出现的第一帧作为喷雾或燃烧图像的起点。在环境压力为 4 MPa、环境温度为 400 K 时,喷射压力分别为 60、100 MPa 经过图像处理后的柴油喷雾形态变化如图 2 所示。

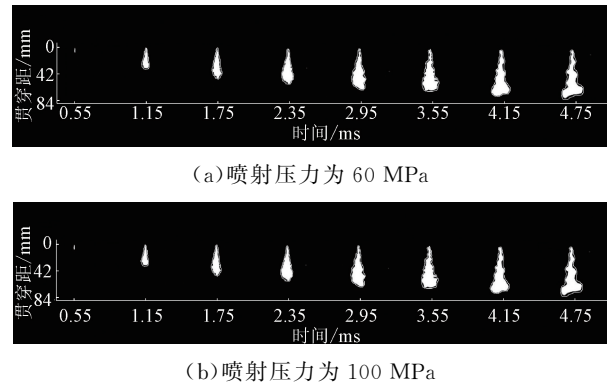


图 2 柴油喷雾的形态变化

Fig. 2 The shape variation of diesel spray

由图 2 可知:在两种喷射压力下,喷射油束随着时间的推移明显增大,不同工况下液相区的柴油形态稳定,液相区的长度和位置在喷雾发展后期变化不大,所以在喷雾纹影图像中喷雾锥角在燃料喷射过程中的变化不大,随着喷射压力的提高,柴油喷雾的贯穿距增大;在喷油稳定时,喷雾液相区随机凸起面积小、存在时间短、形状规则,易返回喷雾主体^[13],这是因为液滴的惯性和湍流剪应力主要影响喷雾液区形状的稳定。喷雾头部的随机凸起部分面积大,存在时间长、形状不规则,这是因为空气黏度和燃料的蒸发特性会影响喷雾的气相区域。在喷油过程中,油束会受到高温环境的影响而迅速蒸发,初始动能和惯性对喷雾气相影响不大。因此,在喷雾发展的过程中,喷雾头部的形状变化较多。当喷射压力提高时,喷雾周围有更多的凸起出现,同时形状也更加明显,这说明柴油的雾化随喷射压力的提高而得到了改善。

在环境压力为 4 MPa、环境温度 400 K 时,喷射

压力分别为 60、100 MPa 二甲醚喷雾的形态变化如图 3 所示,图中中间白色实心区域为二甲醚液相,白色外轮廓为二甲醚气相。

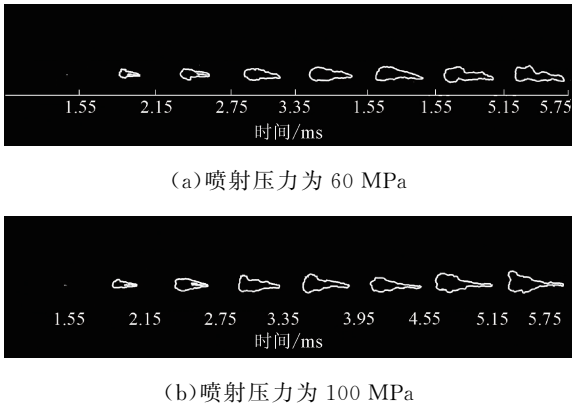


图 3 二甲醚喷雾的形态变化

Fig. 3 The shape variation of dimethyl ether spray

对于二甲醚的喷雾特性,由图 3 可知:二甲醚与柴油的喷雾特性不同,在相同喷射压力下,二甲醚的喷雾束更容易蒸发汽化,气相区的喷雾锥角要比柴油的喷雾锥角大;随着喷射压力的提高,二甲醚的喷射速度得到了提高,在相同背压下,二甲醚汽化速度变大,由气动雾化机理^[14]可知雾化效果较好。在较高的喷射压力下喷雾锥角较小,并且随着时间增加两者的差异有增大的趋势,其主要原因是喷射压力高,使液柱周围产生了相对细小的液滴,即雾化效果较好,这些液滴迅速蒸发,导致喷雾锥角变小^[15]。

2.2 贯穿距

环境背压为 4 MPa、环境温度为 400 K 时,柴油和二甲醚在喷射压力为 60、100 MPa 下喷雾贯穿距随时间的变化如图 4 所示。

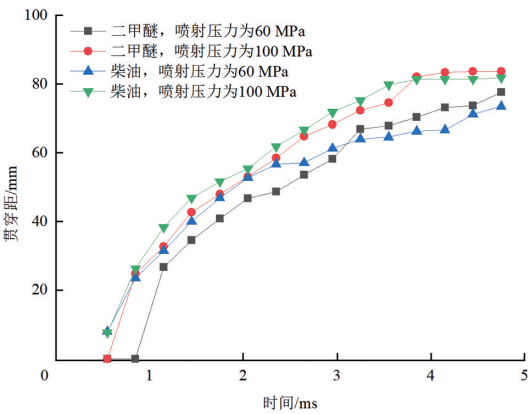


图 4 二甲醚与柴油喷雾贯穿距随时间变化

Fig. 4 The comparison of penetration distance between diesel and dimethyl ether

由图4可知:各工况下随着喷射压力的提高,喷雾的贯穿距均增大,原因在于喷孔外的环境背压不变,喷油压力增大导致喷孔内外压差增大,因此油滴的初始动能更高、喷雾贯穿得更远;在喷射初期与中期,柴油的喷射贯穿距大于二甲醚,原因在于初期柴油喷雾破碎不完全,液滴较大,贯穿动能较高,贯穿距迅速增大。喷雾中期,喷雾前端的质量增加,因为喷雾边缘包裹了更多的环境气体,根据能量守恒,喷雾前端的速度自然会降低,由于环境气体对喷雾的阻碍,贯穿距的增长逐渐减缓。在此期间因为二甲醚沸点低,蒸发速度比柴油快,从喷嘴喷出后便很快汽化,由于气相燃料的贯穿速度比液相燃料的小,同时柴油的密度更大,喷射压力一定时柴油获得的动量更大,因此喷雾在轴向方向上能够更快地发展。喷射初、中期,柴油的喷射贯穿距大于二甲醚,喷射后期,由于二甲醚喷雾液滴的蒸发,液滴表面蒸发产生的气体环流使液滴的运动阻力减小,并且柴油喷雾的贯穿距增长逐渐缓慢,所以柴油的喷雾贯穿距在喷射后期小于二甲醚的喷雾贯穿距。

2.3 喷雾面积

环境背压为4 MPa、环境温度为400 K时,柴油和二甲醚在喷射压力为60、100 MPa下喷雾面积随时间的变化如图5所示,喷雾面积可以用来表征燃料与周围空气的结合程度^[16]。由图5可知:各工况下柴油和二甲醚的喷雾面积均随喷射压力的提高而增大,原因在于较高的喷射压力下,喷雾燃料的初始动量更大、动能也更高,液滴进一步渗透和雾化成更小的尺寸,从而可以夹带更多的空气并与空气更好地混合^[17];在相同喷射压力下二甲醚的喷雾面积大

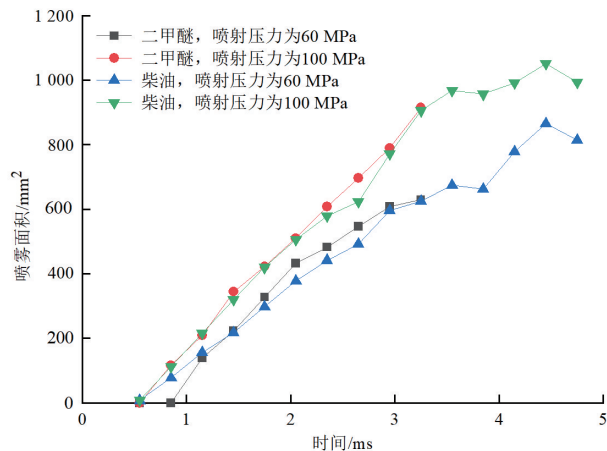


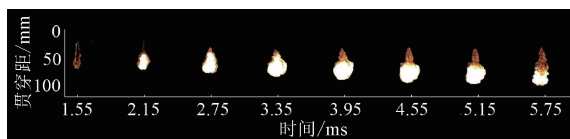
图5 二甲醚柴油喷雾面积对比

Fig. 5 The comparison of spray area between diesel and dimethyl ether

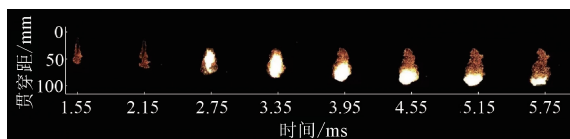
于柴油的喷雾面积,原因在于相同工况下,在喷雾过程中,柴油的扩散性不如二甲醚。二甲醚沸点低,离开喷嘴后会形成扩散面短而宽的喷雾,很快蒸发成气态,能较好地与空气混合,燃料能够更好地雾化。在柴油较大的黏度和表面张力作用下燃料的雾化效果会变差,因而柴油喷雾面积小于二甲醚喷雾面积^[18]。

2.4 燃烧火焰对比

环境背压为4 MPa、环境温度为800 K条件下,柴油和二甲醚在喷射压力为60、100 MPa下的燃烧火焰变化如图6、7所示,选取1.55~5.75 ms之间的8幅图进行对比研究。



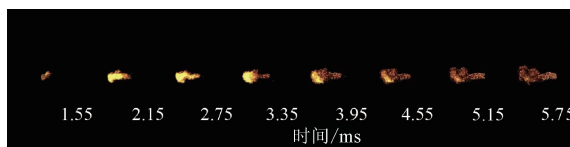
(a) 喷射压力为60 MPa



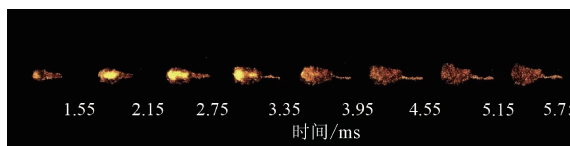
(b) 喷射压力为100 MPa

图6 柴油燃烧的形态变化

Fig. 6 The flame variation of diesel combustion



(a) 喷射压力为60 MPa



(b) 喷射压力为100 MPa

图7 二甲醚燃烧的形态变化

Fig. 7 The flame variation of dimethyl ether combustion

由图6、7可知,喷射柴油时着火点位于燃料喷雾头部区域,整体看上去火焰呈现出瓢的形状,这是因为定容燃烧弹是一个完全封闭的空间,基本不受外界因素影响,燃烧的火焰均匀稳定^[19]。火焰先向喷雾尾部传播后收缩头部的趋势并随着喷雾向下运动,后向下扩散至燃烧结束^[20]。二甲醚喷射时的着火点位于喷雾头部,着火后火焰沿着喷雾体开始向喷孔方向传播,喷雾结束后火焰便传播到了喷孔附近,燃烧达到顶峰。二甲醚具有良好的雾化和蒸发

特性,喷雾体周围的燃油蒸汽量明显多于柴油,因而在容弹中,二甲醚比柴油更容易被气流运动所影响。受喷雾引起的附加气流运动和涡旋运动的影响,喷雾体周围的二甲醚燃油蒸汽聚集到位于容弹燃烧室壁面附近的涡旋运动区域,形成可燃混合气,在燃烧室壁面附近,二甲醚首先发生自燃。随着喷射压力的提高,柴油和二甲醚燃烧火焰的亮度均有所降低,这是因为喷射压力的增加改善了燃料的雾化,雾束拥有更高的初始动能,燃料相对空气的速度变快,从而卷吸更多的空气,燃料能够更均匀地与空气混合,局部当量比减小,燃料燃烧得更加彻底^[21],从而使燃烧过程中火焰亮度减小。对比柴油与二甲醚的燃烧火焰变化,二甲醚燃烧过程中其火焰亮度低于柴油燃烧时的火焰亮度,这主要是因为二甲醚火焰的发光非常微弱,而柴油火焰是发光的,它的发光要比二甲醚火焰强得多,这是由于柴油在燃烧过程中产生了碳烟,碳烟燃烧会发出耀眼的强光。

2.5 火焰浮起长度对比

火焰浮起长度为从喷嘴中心到火焰所能达到最远轴向距离的差值,是描述喷雾燃烧条件下火焰特性的重要参数。火焰浮起长度由燃料混合速度和火焰传播速度间的关系确定,可以表征喷雾中所夹带空气的多少,较长的火焰浮起长度有助于燃料油束夹带更多的新鲜空气,从而降低局部燃油空气当量比,改善燃烧并减少碳烟的生成。二甲醚和柴油在喷射压力为 60、100 MPa 下的火焰浮起长度随时间的变化如图 8 所示。

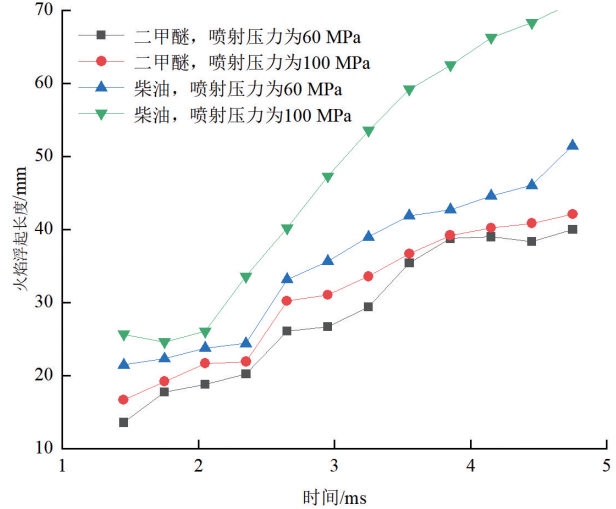


图 8 二甲醚柴油火焰浮起长度随时间的变化

Fig. 8 The comparison of flame lift-off between diesel and dimethyl ether

由图 8 可知:随着喷射压力的提高,各燃料燃烧时的火焰浮起长度均增大,这是因为喷射压力提高后,雾束拥有更高的初始动能,喷雾的贯穿距增大,结果表明提高喷射压力后火焰浮起长度也随之增大;在相同喷射压力下,二甲醚的火焰浮起长度小于柴油的火焰浮起长度,这是因为二甲醚沸点很低,进入燃烧室后能够很快汽化,其滞燃期短于柴油,滞燃期短的燃料其火焰浮起长度通常较短^[17]。

2.6 火焰面积对比

火焰面积作为光学测试中重要的定量参数,在一定程度上反映了燃料雾化的效果和燃烧的质量^[22]。环境背压为 4 MPa,环境温度为 800 K 条件下,柴油和二甲醚在喷射压力为 60、100 MPa 下火焰面积随时间的变化如图 9 所示。

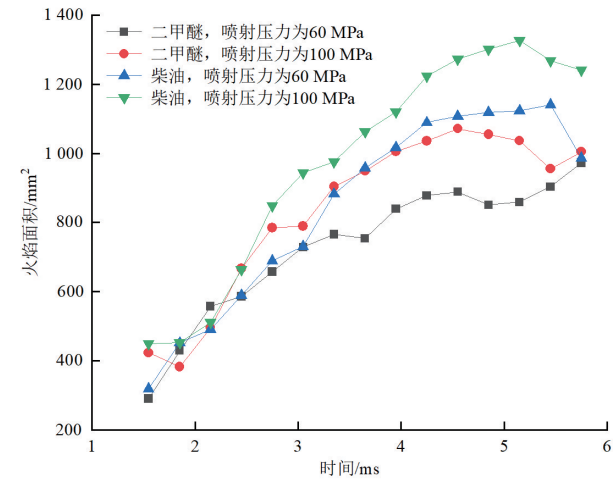


图 9 二甲醚柴油火焰面积随时间的变化

Fig. 9 The comparison of flame area between diesel and dimethyl ether

由图 9 可知:二甲醚与柴油的火焰面积在开始着火后开始增大至峰值,之后有所减小;同种燃料在燃烧时,随着喷射压力的提高,火焰面积峰值增大,火焰面积增加速度加快,原因在于提高喷射压力可减小液滴尺寸,改善扩散效果,从而使燃料更好地雾化;在相同喷射压力下,柴油的火焰面积大于二甲醚的火焰面积,这是因为火焰面积的大小及发展规律与碳烟的分布范围之间存在一定的联系^[23],在柴油燃烧过程中,部分燃料由于受热分解而产生碳粒进而产生较大的火焰面积^[18],同时柴油的滞燃期较长,在滞燃期内有较多的燃油喷入,这些预混燃油在急燃期内燃烧,并且柴油的十六烷值比二甲醚的低,火焰传播速度低^[24],因而其火焰面积大于二甲醚的火焰面积。

2.7 KL因子

KL因子可用于衡量碳烟体积分数分布和质量,将火焰图像中大于0的KL因子进行累加得到火焰的累加KL因子。二甲醚和柴油在不同喷射压力下KL因子总和随燃烧时间的变化如图10所示。

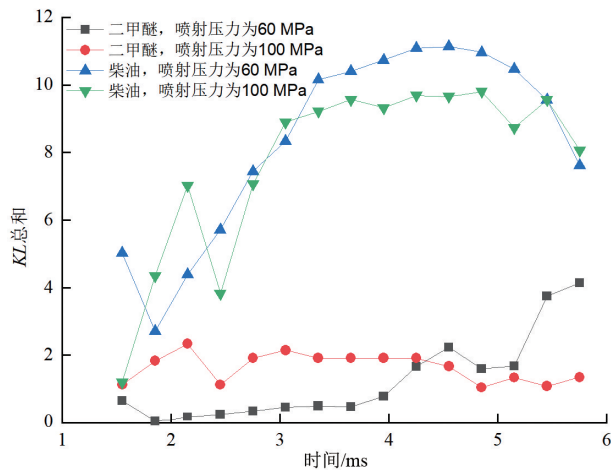


图10 二甲醚柴油KL总和随时间的变化

Fig. 10 The comparison of KL between diesel and dimethyl ether

由图10可知:同种燃料喷射时,随喷射压力的提高,KL总和减小,原因在于喷射压力的提高使得燃料能够卷吸更多的空气,从而使燃料能够与空气更好地混合,降低了局部当量比、抑制了碳烟的排放,同时喷射压力的提高可以使燃料的燃烧温度提高,进而促进碳烟的氧化,从而生成更少的碳烟^[25],提高喷射压力是减少碳烟排放的有效途径;从喷雾燃烧特性来看,提高喷射压力会使喷雾贯穿距增加,使得整体火焰结构在扩散燃烧开始时远离喷嘴,满足碳烟生成条件的火焰区域相对较远,喷射压力也影响着火焰浮起长度,提高喷射压力后火焰浮起长度增加,而扩散燃烧的稳定位置通常与火焰浮起长度有关,火焰浮起长度增大时,其中间区域的燃空比减小,碳烟生成量减少;相同喷射压力下,柴油燃烧时的KL总和大于二甲醚燃烧时的KL总和,原因在于二甲醚分子中不含C—C化学键,同时燃料中富含氧,尤其是燃料在喷雾芯区的自供氧有利于燃料的完全燃烧^[26],由于二甲醚沸点低,具有良好的蒸发性能,燃料的雾化效果好并且能与空气充分混合,从而减少了因局部缺氧而生成的碳烟量。

3 结论

(1)二甲醚喷雾比柴油更容易蒸发汽化。在相同喷射压力下,二甲醚喷雾的贯穿距小于柴油,但其喷雾面积大于柴油。随着喷射压力的提高,二甲醚与柴油的贯穿距和喷雾面积都增大,喷射压力为100 MPa下二甲醚喷雾面积较60 MPa下增大18.18%,而同工况下柴油增大23.5%。

(2)在相同喷射压力下,二甲醚的火焰浮起长度小于柴油。随喷射压力的提高,二甲醚和柴油的火焰浮起长度均增大,柴油燃烧的火焰面积大于二甲醚,随着喷射压力的提高,二甲醚与柴油的火焰面积均增大。

(3)二甲醚与柴油燃烧时的碳烟生成量均随喷射压力的提高而降低。在相同喷射压力下,二甲醚燃烧时的碳烟生成量更低,有利于实现清洁燃烧。随着喷射压力的提高,柴油与二甲醚的碳烟生成量均减少,但二甲醚的碳烟生成量降低效果显著,喷射压力为100 MPa下的二甲醚KL总和较60 MPa下减小33.3%,而同工况下柴油减小19.32%。

参考文献

- [1] MATZEN M, DEMIREL Y. Methanol and dimethyl ether from renewable hydrogen and carbon dioxide: alternative fuels production and life-cycle assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 1068-1077.
- [2] PARK S H, LEE C S. Combustion performance and emission reduction characteristics of automotive DME engine system [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 147-168.
- [3] PUTRASARI Y, LIM O. Dimethyl ether as the next generation fuel to control nitrogen oxides and particulate matter emissions from internal combustion engines: a review [J]. ACS Omega, 2022, 7(1): 32-37.
- [4] 王贺武, 周龙保. 二甲醚喷雾特性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(9): 918-921.
WANG Hewu, ZHOU Longbao. Study on spray characteristics of dimethyl ether [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(9): 918-921.
- [5] 王理堃, 张光德, 三次勇太, 等. 模拟发动机工况下二甲醚喷雾燃烧实验及仿真研究 [J]. 武汉科技大学学报, 2018, 41(1): 70-74.
WANG Likun, ZHANG Guangde, MITSUGI Y, et al. Experiment and simulation of dimethyl ether spray combustion in engine-like conditions [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2018, 41(1): 70-74.

- [6] PARK S H, KIM H J, LEE C S. Macroscopic spray characteristics and breakup performance of dimethyl ether (DME) fuel at high fuel temperatures and ambient conditions [J]. *Fuel*, 2010, 89(10): 3001-3011.
- [7] SUH H K, PARK S W, LEE C S. Atomization characteristics of dimethyl ether fuel as an alternative fuel injected through a common-rail injection system [J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(4): 1471-1481.
- [8] KIM H J, PARK S H, SUH H K, et al. Atomization and evaporation characteristics of biodiesel and dimethyl ether compared to diesel fuel in a high-pressure injection system [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(3): 1734-1742.
- [9] CUNG K D, MOIZ A A, ZHU Xiucheng, et al. Ignition process and flame lift-off characteristics of dimethyl ether (DME) reacting spray [J]. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2021, 7: 547204.
- [10] 孙哲, 崔明利, 王鸿雨, 等. 低速稀薄燃烧工况下闪沸喷雾燃烧特性 [J]. *燃烧科学与技术*, 2021, 27(4): 376-381.
- SUN Zhe, CUI Mingli, WANG Hongyu, et al. Combustion characteristics of flash-boiling spray under low-speed lean burn conditions [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2021, 27(4): 376-381.
- [11] MOHAN B, YANG Wenming, YU Wenbin, et al. Numerical analysis of spray characteristics of dimethyl ether and diethyl ether fuel [J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 1403-1410.
- [12] 田辛. 用双色法研究内燃机燃烧火焰的温度场及碳烟浓度场 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [13] XU Sidu, YAO Mingfa, XU Junfeng. An experimental investigation on the spray characteristics of dimethyl ether (DME) [C]//SAE 2001 World Congress. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2001: 2001-01-0142.
- [14] 衡思江. 小型航空发动机气动雾化喷嘴雾化特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [15] 张新赞. 柴油/PODE3-4 混合燃料的喷雾气液两相特性研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [16] 李睿宸, 陈朝阳, 姚晓新, 等. Polymethoxy Dimethyl Ether/汽油混合燃料喷雾特性实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(7): 179-185.
- LI Ruichen, CHEN Zhaoyang, YAO Xiaoxin, et al. Experimental study on spray characteristics of Polymethoxy Dimethyl Ether and gasoline blended fuel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(7): 179-185.
- [17] 董全, 任晓光, 宋恩哲, 等. 基于纹影法的高压柴油喷雾反射激波特性 [J]. *内燃机学报*, 2020, 38(2): 97-103.
- DONG Quan, REN Xiaoguang, SONG Enzhe, et al. Reflection shockwave characteristics of high pressure diesel spray based on schlieren method [J]. *Transactions of CSICE*, 2020, 38(2): 97-103.
- [18] 曾繁鸣. 二甲醚喷雾实验研究及液滴蒸发数值模拟 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [19] 王龙, 刘永峰, 毕贵军, 等. 柴油表征燃料在高浓度 CO₂ 氛围下燃烧机理的分析 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(11): 4477-4488.
- WANG Long, LIU Yongfeng, BI Guijun, et al. Analysis of the combustion mechanism of diesel surrogate fuel under high-CO₂ atmosphere [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(11): 4477-4488.
- [20] 易文韬, 丰雷, 王煜, 等. 稀释气体组分和浓度对柴油喷雾燃烧特征影响 [J]. *内燃机学报*, 2021, 39(1): 1-10.
- YI Wentao, FENG Lei, WANG Yu, et al. Effects of oxygen and buffer gas concentration on diesel spray flame characteristics [J]. *Transactions of CSICE*, 2021, 39(1): 1-10.
- [21] 李峻辉. 容弹与光学发动机中柴油乙醇环戊醇混合物喷雾和燃烧特性的可视化研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [22] 周成龙. 柴油/环戊醇混合燃料喷雾与燃烧特性的可视化研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [23] 张雨新. 船用低速柴油机燃烧特性可视化实验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [24] 钟汶君. 二代生物柴油喷雾燃烧特性和碳烟生成过程可视化研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [25] 钟汶君, 袁起飞, 相启龙, 等. 戊醇/正十二烷二元燃料碳烟生成特性实验研究 [J]. *内燃机工程*, 2022, 43(2): 20-29.
- ZHONG Wenjun, YUAN Qifei, XIANG Qilong, et al. Experimental study on soot formation characteristics of pentanol/N-dodecane blends [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2022, 43(2): 20-29.
- [26] 付雪青, 何邦全, 徐思鹏, 等. 二甲醚微火焰引燃高稀释汽油混合气燃烧和排放特性 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2021, 12(4): 580-586.
- FU Xueqing, HE Bangquan, XU Sipeng, et al. Combustion and emissions characteristics of highly diluted gasoline mixture ignited by DME enabled micro-flame [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2021, 12(4): 580-586.