

Polymethoxy Dimethyl Ether/汽油混合燃料喷雾特性实验研究

李睿宸¹, 陈朝阳¹, 姚晓新², 汤成龙²

(1. 长安大学汽车学院, 710064, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了明确聚甲氧基二甲醚(PODE)掺混对汽油喷雾特性的影响,利用定容弹试验台和高速纹影摄像装置对不同喷射压力和环境温度下的汽油(G100)、PODE(P100)及其混合燃料(G80P20、G50P50)的宏观喷雾特性进行了实验研究,获得了燃料的喷雾过程图像,并提取了喷雾贯穿距离、喷雾锥角和喷雾投影面积等特征参数。实验结果表明,随PODE掺混比增大,混合燃料喷雾贯穿距离和喷雾锥角增大,且环境温度较高时,不同燃料之间的差异较大;喷射压力较大时,燃料喷雾投影面积较大,4种燃料的喷雾投影面积的差异也较大;随环境温度升高,混合燃料喷雾投影面积减小,且其减小幅度随PODE掺混比增大而减弱。G100的喷雾投影面积随环境温度升高大幅度减小,而P100的喷雾投影面积几乎不随实验范围内环境温度的升高而改变;掺混20%PODE的混合燃料具有比汽油略大的喷雾贯穿距离、喷雾锥角和喷雾投影面积,油气混合质量与汽油类似,更高比例PODE掺混会使燃料与空气混合程度和蒸发性能变差。

关键词: 汽油;聚甲氧基二甲醚;混合燃料;宏观喷雾特性

中图分类号: TK411.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202107020 **文章编号:** 0253-987X(2021)07-0179-07



OSID 码

Experimental Study on Spray Characteristics of Polymethoxy Dimethyl Ether and Gasoline Blended Fuel

LI Ruichen¹, CHEN Zhaoyang¹, YAO Xiaoxin², TANG Chenglong²

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to clarify the influence of PODE (polymethoxy dimethyl ether) blending on the spraying characteristics of gasoline, the macroscopic spraying characteristics of gasoline (G100), PODE (P100), and the blended fuels (G80P20/G50P50) are investigated in a constant volume chamber equipped with high-speed schlieren photography system at different injection pressures and ambient temperatures. Results show that higher PODE blending ratios accelerate the spray tip penetration (STP) of the test fuel, and as the ambient temperature increases, the discrepancy in STP of different fuels becomes more and more significant. Higher injection pressure produces larger spray projected area (SPA) and larger discrepancy in SPA of the fuels. With the increase of ambient temperature, the SPA of the fuel decreases, and the variation trend decreases with the PODE mixing ratio. With the increase of ambient temperature, the SPA of

收稿日期: 2020-12-21。 作者简介: 李睿宸(1996—),男,硕士生;陈朝阳(通信作者),女,副教授,硕士生导师。 基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2020JM-243);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102229202);陕西省创新能力支撑计划资助项目(2021TD-28)。

网络出版时间: 2021-04-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210416.1313.008.html>

G100 decreases significantly, while that of P100 almost does not change. The mixed fuel with 20% PODE has slightly larger STP, spray cone angle (SCA) and SPA than those of gasoline, and the quality of the gas-oil mixture is similar to that of pure gasoline, while more PODE mixing will make the atomization and evaporation quality worse.

Keywords: gasoline; polymethoxy dimethyl ether; blended fuel; macroscopic spraying characteristics

柴油机热效率高、经济性好,广泛应用于生产生活中,但其碳烟和 NO_x 排放偏高,且这两种污染物之间存在显著的此消彼长的关系,很难通过机内措施同时有效控制。与柴油机相比,汽油机排放较为清洁,但受爆震燃烧限制,压缩比小,热效率低,经济性差。汽油压燃技术结合了传统汽油机和柴油机的优点,利用汽油类燃料辛烷值高、蒸发性好的特点,使燃料与空气在着火前充分混合,避免在缸内形成过浓区和过稀区,从而减少碳烟和 NO_x 的生成,同时采用压缩着火的方式,压缩比较高,可大幅度提高热效率。然而,由于汽油类燃料反应活性低,着火能力差,汽油压燃技术在低负荷时存在着火困难、燃烧稳定性差的问题,高负荷时也会因为燃烧放热过快而使压力升高率过高,GCI 发动机全负荷工况运行还存在困难。

向汽油中掺混高十六烷值燃料是公认的提高燃料反应活性、改善 GCI 发动机低负荷燃烧稳定性的有效措施^[1-2]。聚甲氧基二甲醚(PODE)十六烷值高、挥发性好,燃料本身含氧且不含碳碳键,与汽柴油互溶性好,常用作燃料添加剂来改善传统燃料的着火、燃烧及排放特性。王浒等对 PODE_3 /汽油混合燃料的反应活性控制压燃燃烧过程进行了数值模拟研究,结果表明相比于柴油/汽油混合燃料,掺混 PODE_3 能改善中高负荷喷雾燃烧过程的局部当量比分布和能量密度分布,可以降低发动机的碳烟排放,提高其指示热效率^[3]。刘佳林等对汽油/PODE 混合燃料的部分预混燃烧进行了研究,结果表明掺混 20%PODE,可明显降低高负荷下的压力升高率和碳烟排放,中等负荷燃烧可控性相应增强,低负荷时也有更好的燃烧稳定性以及更低的 HC 和 CO 排放^[4]。

燃料喷雾过程直接影响混合气的形成和燃烧,进而影响发动机的动力性和排放性。为了充分认识 PODE 掺混对汽柴油燃料燃烧过程的影响细节,研究者们对 PODE 及其混合燃料的喷雾特性进行了研究。李东华等通过高压共轨系统研究了 PODE 掺混对柴油雾化特性的影响,结果表明添加 PODE 后柴油的喷雾贯穿距离减小,平均喷雾锥角和喷雾

投影面积略有增大,索特平均直径(SMD)略有减小,说明 PODE 掺混有助于促进柴油的雾化^[5]。刘佳林等对 PODE/汽油混合燃料在单孔喷嘴中的喷雾特性进行了研究,结果表明掺混 PODE 会使混合燃料喷雾贯穿距离和喷雾锥角增加,SMD 增大^[6]。为了进一步了解 PODE 掺混对汽油喷雾特性的影响,本文基于定容弹实验台和高压多孔喷油器,利用高速纹影技术对不同掺混比的 PODE/汽油混合燃料在不同喷射压力和环境温度下的宏观喷雾特性进行了实验研究,重点分析 PODE 掺混对不同初始条件下混合燃料的喷雾贯穿距离、喷雾锥角和喷雾投影面积的影响。

1 实验装置和研究方法

1.1 实验装置和实验条件

本文的实验工作是在西安交通大学喷雾与燃烧实验室的定容弹喷雾实验台上展开的,实验装置如图 1 所示,主要由定容弹、燃油供给系统、纹影摄像系统和喷射控制系统(ECU)组成。具体实验仪器参数及布置参见文献[7]。

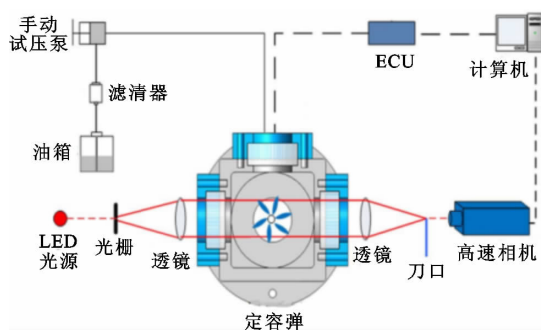


图1 定容弹喷雾实验装置图
Fig. 1 Experimental setup

实验主要对纯汽油 G100(RON95)、纯聚甲氧基二甲醚 P100 及其两种比例的混合燃料(PODE 的体积分数为 20%、50%, 分别记作 G80P20 和 G50P50)的喷雾特性进行对比研究。20℃时实验燃料主要物理性质如表 1 所示。

实验用喷油器采用缸内直喷(GDI)喷油器,喷

孔直径为 0.3 mm,喷射压力(P_{inj})分别取 10 MPa 和 20 MPa,环境背压(P_{amb})为 0.1 MPa,环境温度(T_{amb})分别为 20 ℃、100 ℃ 和 150 ℃。为了保证实验结果的可靠性,每个工况点重复 5 次实验,并取其平均值做为最终实验结果。

表 1 20 ℃ 时实验燃料主要物理性质
Table 1 Physical parameters of test fuels

燃料型号	密度/ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	黏度/ ($\text{MPa} \cdot \text{s}$)	表面张力/ ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)
G100	0.751 1	0.703 33	21.465 7
G80P20	0.797 7	0.916 67	22.312
G50P50	0.888 2	1.356 67	23.396 9
P100	1.064 1	2.553 33	29.631 6

1.2 喷雾图像处理

实验采用 Matlab 软件对高速纹影摄影系统得到的喷雾过程图片进行处理,以获取喷雾贯穿距离、喷雾锥角和喷雾投影面积等宏观喷雾特性参数。首先将原图转换为灰度图并减去背景,然后设置固定阈值,通过剪背景、降噪、图像二值化、边界提取等图像处理方法得到喷雾轮廓图,最后基于喷雾轮廓图定量测取喷雾宏观特性参数。喷雾贯穿距离 L 定义为从喷嘴口能到达油束最远端的距离;喷雾锥角^[8] θ 定义为在离喷嘴口轴向距离 5 mm 和 15 mm 与油束外轮廓交点的两条线段的夹角;喷雾投影面积 A 定义为与光路方向垂直的喷雾面最外沿包裹的投影区域面积。喷雾宏观特性参数的定义如图 2 所示。

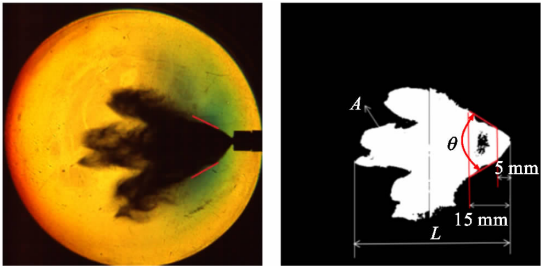


图 2 喷雾宏观特性参数的定义

Fig. 2 Definition of the spray characteristic parameters

2 实验结果与讨论

2.1 喷雾形态分析

图 3 给出的是喷射压力为 20 MPa、环境背压为 0.1 MPa 时,不同环境温度(20 ℃、100 ℃、150 ℃)条件下 4 种燃料在 1.5 ms 喷射时刻(ASOI)的喷雾图像。从图中可以看出,随着 PODE 掺混比的增加,

喷雾贯穿距离小幅增加。对 G100、G80P20 和 G50P50,随着环境温度升高,喷雾形态发生了不同程度的变化,喷雾锥角逐渐减小,且前两种燃料的油束结构明显向轴向收缩,喷雾边缘呈现弧形, G50P50 相对于前两者收缩程度较小,仍能观察到油束分叉现象。这是因为随环境温度升高,这 4 种燃料在喷雾过程中产生了不同程度的闪急沸腾现象,如图中红色框中所示。环境温度升高对 P100 燃料的喷雾形态几乎没有影响。

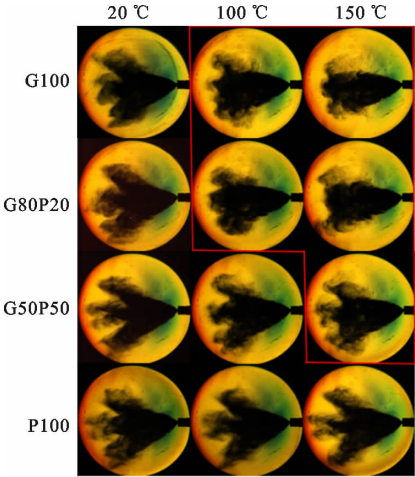


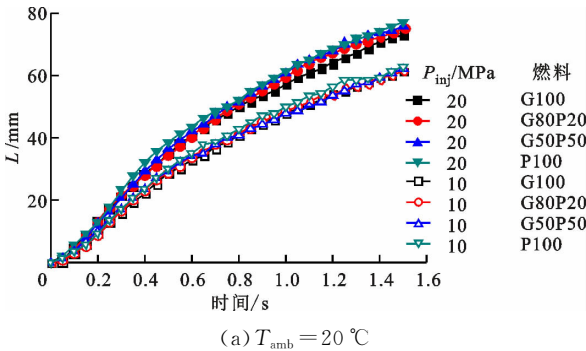
图 3 不同环境温度下 4 种燃料在 1.5 ms 喷射时刻的喷雾图像

Fig. 3 Spray images at different ambient temperatures
($P_{inj}=20\text{ MPa}$, $P_{amb}=0.1\text{ MPa}$, $t_{inj}=1.5\text{ ms}$)

2.2 喷雾贯穿距离

图 4 给出了不同喷射压力和环境温度下 4 种燃料的喷雾贯穿距离随喷射时间的发展历程。由图中可以看出,对 4 种燃料来说,随着喷射压力的升高,其喷雾贯穿距离都明显增加,这是因为喷射压力增加使得喷嘴口初始射流速度增加,从而使喷雾沿轴向发展的初始动量增加所致^[9]。

对比 4 种燃料在不同喷射压力和环境温度下的喷雾贯穿距离,发现当喷射压力较低(10 MPa)时,燃料的喷雾贯穿距离随 PODE 掺混比增加变化很



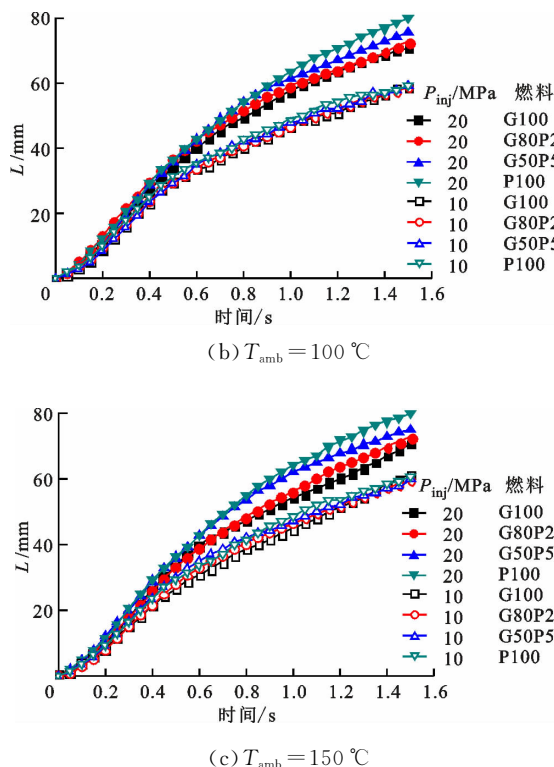


图4 不同喷射压力和环境温度下喷雾贯穿距离随喷射时间的发展历程

Fig. 4 Development of spray tip penetration under different injection pressures and ambient temperatures

小;当喷射压力较高(20 MPa)时,随 PODE 掺混比的增加,喷雾贯穿距离明显增大。与汽油相比,PODE 密度更大。PODE 掺混使得喷雾油束初始动能增大,同时 PODE 较大的黏度和表面张力也使得液滴不容易变形和破碎^[10]。当喷射压力较大时,喷雾出口射流初始速度较大,燃料性质对喷雾贯穿距离的影响也更加明显。

随环境温度升高,4 种燃料的喷雾贯穿距离之间的差异越来越明显,对于 G100、G80P20 来讲,其喷雾贯穿距离随环境温度增加有不同幅度减小,其中 G100 减小幅度最大,G50P50 的喷雾贯穿距离减小幅度十分有限,而 P100 的喷雾贯穿距离随环境温度增大却略微增加。取喷射时间为 1.4 ms 时的喷雾贯穿距离进行比较,温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 150 $^{\circ}\text{C}$ 时,G100 的贯穿距离由 71.00 mm 缩小到 66.92 mm;而 P100 的贯穿距离则由 74.42 mm 增大到 77.50 mm。这主要由于燃料的蒸发差异所致,对于 G100 和 PODE 掺混比较小的混合燃料(G80P20),其馏出温度较低,环境温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 和 150 $^{\circ}\text{C}$ 时,喷雾过程中会发生闪急沸腾现象^[11],喷雾油束发生坍塌,油束之间互相重叠,向轴线方向收缩,细小的液

滴被空气卷吸在喷雾尖端两侧,形成与射流运动方向相反的涡旋结构,小的液滴受高温环境影响蒸发^[12],削弱了喷雾向前发展的动能;随 PODE 掺混比增大,燃料馏出温度升高,闪急沸腾和蒸发作用减弱。对于 G50P50 来说,其闪沸程度较低,液滴蒸发对喷雾贯穿距离削弱和高温低密度环境对喷雾贯穿距离的促进程度相当,使得喷雾贯穿距离变化很小。P100 馏出温度高,实验温度下蒸发作用影响很小,而较高的环境温度使环境气体密度降低,对喷雾的反作用力减小,这在一定程度上促进了喷雾在轴向的发展。

2.3 喷雾锥角

图 5 给出了喷射压力为 20 MPa、环境背压为 0.1 MPa 时,不同环境温度下 4 种燃料的喷雾锥角随喷射时间的变化关系。由图可以看出,在喷雾初

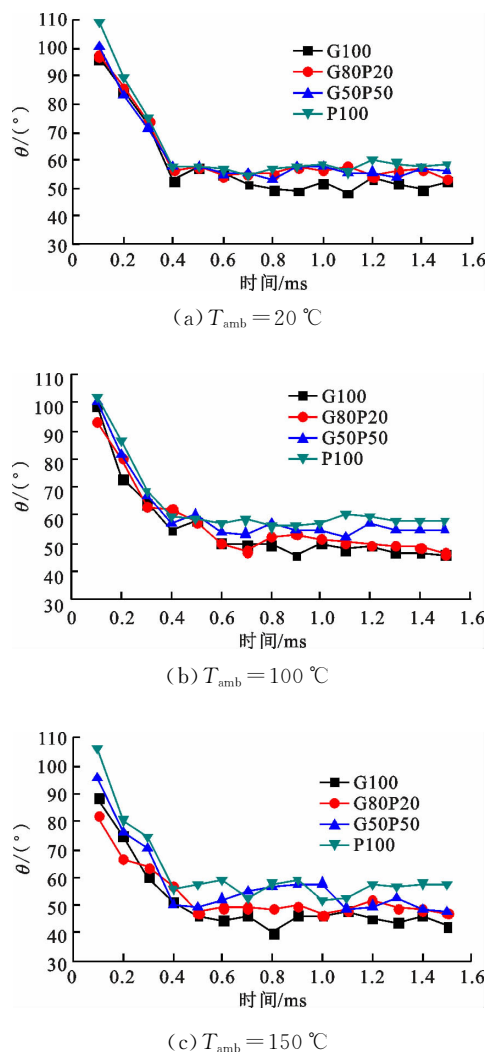


图5 $P_{inj}=20\text{ MPa}$ 时不同环境温度喷雾锥角随喷射时间的发展历程

Fig. 5 Development of spray cone angle at different ambient temperatures when $P_{inj}=20\text{ MPa}$

始阶段,4 种燃料的喷雾锥角都很大,且随喷射时间的推进迅速减小,在 0.4 ms 之后趋于稳定。这主要是受喷油器针阀开启瞬态响应、喷嘴内部流动特性和上一次喷射的低压燃油沉积作用的影响,这些因素使得喷雾锥的整体形态在喷雾初期产生不稳定,当喷油器针阀完全开启后,喷雾锥角趋于稳定^[13]。为了避免喷雾锥角波动,取 0.4 ms 后稳定的喷雾锥角数据,并求其平均值进行比较。

图 6 所示为 4 种燃料在不同喷射压力和环境温度时的平均喷雾锥角。由图可以看出,随着喷射压力升高,喷雾锥角有一定幅度的减小,这主要是因为高的喷射压力会使喷雾射流初始动能和湍动能增加,环境气体对喷雾油束的反作用力相对减弱,使得喷雾锥角减小^[14-15]。

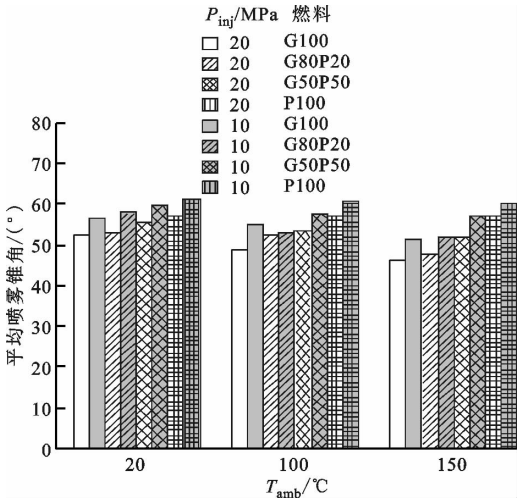


图 6 不同喷射压力和环境温度下的平均喷雾锥角
Fig.6 Average spray cone angle under different injection pressures and ambient temperatures

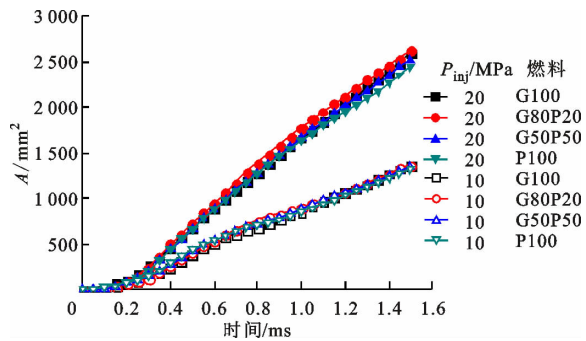
对于 G100、G80P20 和 G50P50,随环境温度升高,平均喷雾锥角明显减小,环境温度从 20 °C 增大至 150 °C 时,3 种燃料的喷雾锥角减小幅度分别为 11.7%、9.8% 和 6.9%,这主要是受两方面作用的影响。一方面,随环境温度升高,喷雾边缘与空气扰动效果增强,边缘细小液滴蒸发加快,喷雾锥角减小。另一方面,不同燃料因蒸发性差异引起在喷雾过程中产生不同程度的闪急沸腾现象,喷雾油束向轴向方向收缩,其中 G100 闪沸程度最大,喷雾锥角减小幅度也最大。P100 的喷雾锥角随环境温度升高减小幅度十分有限,仅为 1.5%。

对比 4 种燃料的喷雾锥角发现,随 PODE 掺混比增加,喷雾锥角不断增加。这主要是因为与汽油相比,PODE 密度较高,较高的燃料密度会加剧喷雾

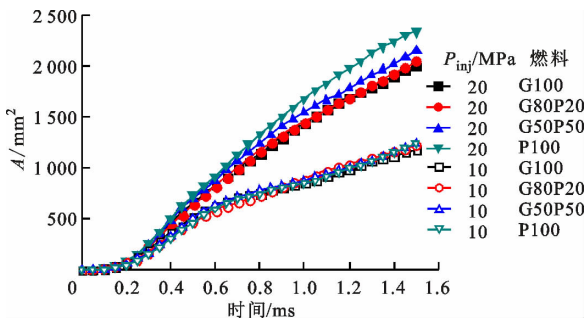
边缘和周围环境气体之间的湍流相互作用,使得喷雾锥角增大^[6,16]。

2.4 喷雾投影面积

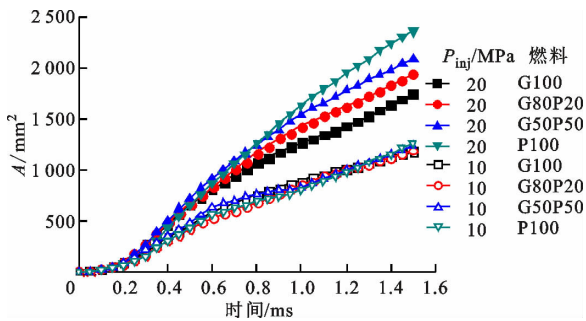
喷雾投影面积可以表征燃料与周围空气的混合程度。图 7 给出了喷射压力为 10 MPa 和 20 MPa 时,4 种燃料在不同环境温度下的喷雾投影面积随喷射时间的变化关系。由图可以看出,随喷射压力增大,4 种燃料的喷雾投影面积均明显增加。这主要是因为随喷射压力增大,喷雾质量流量增大,液滴与空气的速度差增大,卷吸作用增强,因此液滴的碎裂能力增强,喷雾投影面积增加。



(a) $T_{amb} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $T_{amb} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $T_{amb} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 7 不同喷射压力和环境温度下喷雾投影面积发展历程
Fig.7 Development of spray projected area under different injection pressures and ambient temperatures

喷射压力较低 ($P_{inj} = 10\text{ MPa}$) 时,燃料掺混对

喷雾投影面积的影响较小,而喷射压力较高($P_{inj} = 20 \text{ MPa}$)时,4种燃料喷雾投影面积的差异较大,且随环境温度增大,差异程度增大。环境温度为 20°C 时,4种燃料的喷雾投影面积相差很小,且除 G80P20 外,随 PODE 的添加燃料的喷雾投影面积略有减小,这主要是因为 PODE 黏度和表面张力较大,汽油掺混 PODE 后,燃料在较大的黏度和表面张力作用下雾化效果变差,喷雾投影面积减小。环境温度为 100°C 和 150°C 时,随 PODE 的添加燃料的喷雾投影面积逐渐减小,且环境温度为 150°C 时减小幅度更大。这主要是因燃料蒸发性能差异引起。环境温度升高时,混合燃料中的低馏分成分在喷雾过程中会优先蒸发,产生闪急沸腾效应,加速燃料液滴蒸发,使液相喷雾投影面积减小。环境温度越高、PODE 掺混量越小时,闪急沸腾现象越强烈,喷雾投影面积就越小。

为了便于比较不同燃料在不同环境温度下的喷雾投影面积,图 8 给出了不同喷射压力 1.5 ms 喷射时刻,4种燃料的喷雾投影面积随环境温度的变化关系。可以看出,喷射压力较大时,燃料的喷雾投影面积较大,且4种燃料的喷雾投影面积差异较大;随环境温度升高,4种燃料的喷雾投影面积的差异越来越明显。由于闪沸效应,环境温度升高时蒸发性能较好的 G100 喷雾锥角减小,同时喷雾边缘液滴大

量蒸发使得喷雾投影面积快速减小;随 PODE 掺混比的增大,喷雾过程中的闪沸效应减弱,喷雾投影面积随温度升高而减小的幅度变缓;环境温度升高对 $P100^\circ\text{C}$ 的喷雾投影面积的影响很小,这主要是因为 PODE 沸点较高,在实验涉及的3个温度下都不会蒸发。

3 结 论

在定容弹实验台上研究了不同喷射压力和环境温度下 G100、P100 及其混合燃料 (G80P20 和 G50P50) 的宏观喷雾特性,得到以下结论。

(1) 当环境温度为 100°C 或 150°C 时, G100、G80P20 和 G50P50 燃料喷雾过程中出现了不同程度的闪急沸腾现象。

(2) 随 PODE 掺混比增加,汽油/PODE 混合燃料的喷雾贯穿距离增加。当喷射压力和环境温度较高时,4种燃料的喷雾贯穿距离的差异较为显著。

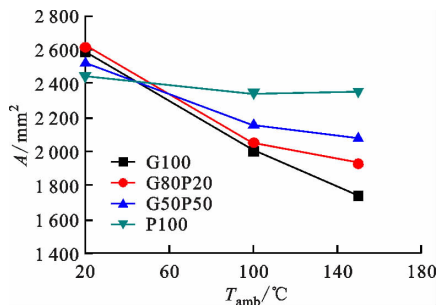
(3) 在相同喷射条件下,随 PODE 掺混比增加,喷雾锥角略有增加。对于同种燃料,环境温度升高喷雾锥角减小。P100 的喷雾锥角随环境温度升高几乎不变。

(4) 喷射压力较大时,燃料喷雾投影面积较大,4种燃料的喷雾投影面积间的差异也较大;随环境温度升高,燃料喷雾投影面积减小,且其减小幅度随 PODE 掺混比增大而减小。G100 的喷雾投影面积随环境温度升高大幅度减小, P100 的喷雾投影面积几乎不随实验范围内环境温度的升高而改变。

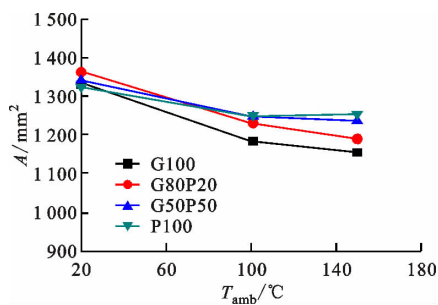
(5) 掺混 20%PODE 具有比汽油略大的喷雾贯穿距离、喷雾锥角和喷雾投影面积,油气混合质量与汽油类似,更高 PODE 掺混比会使得燃料与空气混合程度和蒸发性能变差。

参考文献:

- [1] PARK S H, YOUN I M, LIM Y, et al. Influence of the mixture of gasoline and diesel fuels on droplet atomization, combustion and exhaust emission characteristics in a compression ignition engine [J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106: 392-401.
- [2] SHI Yu, REITZ R D. Optimization of a heavy-duty compression-ignition engine fueled with diesel and gasoline-like fuels [J]. Fuel, 2010, 11(89): 3416-3430.
- [3] WANG Hu, ZHONG Xin, MI Shan, et al. Numerical investigation on the combustion characteristics of PODE₃/gasoline RCCI and high load extension [J]. Fuel, 2020, 263: 116366.



(a) $P_{inj} = 20 \text{ MPa}$



(b) $P_{inj} = 10 \text{ MPa}$

图 8 不同喷射压力和环境温度的喷雾投影面积 (1.5 ms)

Fig. 8 Spray projected area under different injection pressures and ambient temperatures ($t_{inj} = 1.5 \text{ ms}$)

- [4] LIU Jialin, SHANG Hongyan, WANG Hu, et al. Investigation on partially premixed combustion fueled with gasoline and PODE blends in a multi-cylinder heavy-duty diesel engine [J]. *Fuel*, 2017, 193: 101-111.
- [5] LI Donghua, GAO Yuxin, LIU Shenghua, et al. Effect of polyoxymethylene dimethyl ethers addition on spray and atomization characteristics using a common rail diesel injection system [J]. *Fuel*, 2016, 186: 235-247.
- [6] LIU Jialin, FENG Lei, WANG Hu, et al. Spray characteristics of gasoline/PODE and diesel/PODE blends in a constant volume chamber [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113850.
- [7] ZHAN Cheng, TONG Shangqing, TANG Chenglong. The spray vaporization characteristics of gasoline/diethyl ether blends at sub-and super-critical conditions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 164: 114453.
- [8] HUNG D L S, HARRINGTON D L, GANDHI A H, et al. Gasoline fuel injector spray measurement and characterization: a new SAE J2715 recommended practice [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2008, 1(1): 534-548.
- [9] 郭金晶, 钱勇, 陶文操, 等. 煤油掺混乙醇燃料的喷雾特性试验研究 [J]. *燃烧科学与技术*, 2019, 25(5): 408-413.
- GUO Jinjing, QIAN Yong, TAO Wencao, et al. Experimental study on spray characteristics of kerosene blended with ethanol [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2019, 25(5): 408-413.
- [10] 朱浩月, 方俊华, 张武高, 等. 生物柴油高压共轨喷雾特性实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(10): 1785-1788.
- ZHU Haoyue, FANG Junhua, ZHANG Wugao, et al. Spray characteristics of biodiesel within a common rail system [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(10): 1785-1788.
- [11] 宋志平, 王天友, 杨晟华, 等. 汽油直喷闪急沸腾喷雾特性的试验 [J]. *内燃机学报*, 2013, 31(5): 420-424.
- SONG Zhiping, WANG Tianyou, YANG Shenghua, et al. Experiment of flash boiling spray characteristics based on GDI multi-hole injector [J]. *Transactions of CSICE*, 2013, 31(5): 420-424.
- [12] 张青, 吴志军, 赵文伯, 等. 可控热氛围下丙烷柴油混合燃料喷雾特性试验研究 [J]. *工程热物理报*, 2015, 36(9): 2050-2054.
- ZHANG Qing, WU Zhijun, ZHAO Wenbo, et al. Experimental study on spray characteristics of diesel-propane blend fuel in a controllable active thermo atmosphere [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(9): 2050-2054.
- [13] ZHAN Cheng, FENG Zehao, MA Wen'an, et al. Experimental investigation on effect of ethanol and diethyl ether addition on the spray characteristics of diesel/biodiesel blends under high injection pressure [J]. *Fuel*, 2018, 218: 1-11.
- [14] LIU Yanju, LI Fengyu, FU Wei, et al. Experimental investigation of effects of di-n-butyl ether addition on spray macroscopic characteristics of diesel-biodiesel blends [J]. *Journal of Energy Engineering*, 2019, 145(6): 04019028.
- [15] 付伟. 生物柴油及其混合燃料的喷雾特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 45-46.
- [16] LI Fengyu, YI Bolun, FU Wei, et al. Experimental study on spray characteristics of long-chain alcohol-diesel fuels in a constant volume chamber [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2017, 92(1): 94-107.

(编辑 武红江)