

# 含水乙醇多孔直喷喷油器喷雾特性试验研究

石秀勇<sup>1</sup>, 钱伟伟<sup>1</sup>, 廖延苏<sup>1</sup>, 马 骁<sup>2</sup>, 张 周<sup>2</sup>, 倪计民<sup>1</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 清华大学 汽车节能与安全国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 含水乙醇在具有现有燃料乙醇优点的同时,还可以降低生产过程中的能源消耗和排放。应用高速摄像机和定容弹系统,在五孔直喷汽油喷油器上研究体积分数 95% 的含水乙醇在不同燃油温度和喷射背压下的喷雾特性,分析其喷雾形态、贯穿距、喷雾锥角、喷雾宽度、喷雾投影面积及闪沸现象,并与纯汽油的喷雾特性进行对比。研究结果表明:含水乙醇喷雾处于冷态射流状态时,贯穿距大于汽油并随背压升高而降低、油温升高而升高;喷雾锥角小于汽油,并随着背压升高而减小;在完全闪沸状态下,喷雾坍塌成单束油束,喷雾贯穿距明显增长,喷雾锥角明显减小,在靠近喷孔区域喷雾宽度增加,远离喷孔区域喷雾宽度减小,此时喷雾投影面积主要受喷射背压影响。

**关键词:** 含水乙醇;多孔直喷喷油器;喷雾特性;闪沸

**中图分类号:** TK411.2

**文献标志码:** A

distance of hydrous ethanol spray is larger than that of gasoline in cold state, decreases with the increase of back pressure, and increases with the increase of oil temperature. The spray cone angle is smaller than that of gasoline and decreases with the increase of back pressure. In the complete flash boiling state, the spray penetration distance increases, the spray cone angle decreases significantly, the spray width increases in the area near the nozzle, and the spray width decreases in the area far away from the nozzle. Simultaneously, the spray projection area is mainly affected by the spray back pressure.

**Key words:** hydrous ethanol; multi-hole direct injector; spray characteristics; flash boiling

## Spray Characteristics of Hydrous Ethanol in Multi-hole Direct Injector

SHI Xiuyong<sup>1</sup>, QIAN Weiwei<sup>1</sup>, LIAO Yansu<sup>1</sup>, MA Xiao<sup>2</sup>, ZHANG Zhou<sup>2</sup>, NI Jimin<sup>1</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Hydrous ethanol has the advantages of high-octane number and valuable oxygen content, and can reduce the energy consumption and emission in the production process. By application of high-speed cameras and constant volume bomb system, the spray characteristics of 95% hydrous ethanol was studied at different temperatures and fuel injection back pressures with a direct injection gasoline injector with five holes. The spray shape, penetration distance, spray cone angle, spray width, spray projection area, and the flash boiling phenomenon were analyzed and compared with those of pure gasoline. The results show that the penetration

乙醇由于其辛烷值高、排放性好、可再生性强等特点是一种理想的生物质替代燃料。目前使用的燃料乙醇是无水乙醇,但由于生产工艺以及水-乙醇的共沸作用,无水乙醇在生产中蒸馏和脱水分别消耗了 23% 和 14% 的能量<sup>[1]</sup>,因此若使用含水乙醇可以节约生产过程的能源消耗和排放<sup>[2]</sup>。在含水乙醇作为替代燃料方面,Thompson 等人<sup>[3]</sup>在直喷发动机上对燃用不同含水量的含水乙醇进行研究,发现含水量的提高可降低氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的排放,但会造成 HC 排放增加,并且 90% 含水乙醇(乙醇体积分数 90%)在稀燃条件下相较化学计量当量比下燃用无水乙醇能够总体节能 31%。Bureshaid 等人<sup>[4]</sup>比较了汽油、乙醇及含水乙醇(乙醇体积分数 90%)的火焰速度和爆震特性,发现乙醇火焰速度最快,水减缓了火焰传播速度,在富燃和化学计量当量比条件下含水乙醇的爆震倾向最小。Li 等人<sup>[5]</sup>研究发现,柴油含水乙醇乳化燃料和柴油相比其运动粘度稍高,表面张力和十六烷值较低,乳化燃料的喷雾贯穿距略

收稿日期: 2021-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(51506111);上海市自然科学基金(16ZR1438500)

第一作者: 石秀勇(1979—),男,副教授,博士生导师,工学博士,研究方向为发动机节能与排放控制。E-mail: shixy@tongji.edu.cn

通信作者: 马骁(1983—),男,副教授,工学博士,研究方向为发动机喷雾和燃烧光学诊断。E-mail: max@tsinghua.edu.cn

高,锥角较小,燃烧生成的碳烟和 NO<sub>x</sub> 减少。Zhang<sup>[6]</sup>的研究建立了柴油含水乙醇乳化燃料的过热极限预测模型,预测了乳化燃料的过热极限和液滴微爆强度。Negro 等人<sup>[7]</sup>的研究提出了过热条件下多组分燃料,包括乙醇、甲醇、汽油的喷雾模型,考虑了喷嘴内部的过热液体气液平衡,并预测混合燃料的闪沸喷雾。可以看出,目前含水乙醇的研究主要集中在发动机台架试验,以及含水乙醇和其他燃料组成混合燃料的喷雾特性方面,而纯含水乙醇直喷的喷雾特性研究还鲜有报道。

本研究利用高速摄像机和定容弹系统,对 95% 含水乙醇(乙醇体积分数 95%)和纯汽油在不同燃油温度和喷射背压下的喷雾特性进行了试验研究,包括喷雾形态、喷雾贯穿距、喷雾锥角、喷雾宽度及喷雾面积,并分析了闪沸喷雾现象随试验条件的变化情况。研究结果为进一步研究含水乙醇在直喷发动机中的应用提供了一定的基础数据。

# 1 喷雾试验系统及方法

## 1.1 喷雾试验台架

喷雾试验台架由定容弹系统、喷油控制系统、高压燃油供给系统和高速摄影系统四部分组成。如图 1 所示。喷雾在定容弹内完成,通过调节充入定容弹的高压氮气量控制喷雾的背压,燃油温度通过布置在喷油器周围的加热棒控制,并用热电偶检测监测。直喷喷油器安装在定容弹顶部中心位置,并由燃油供给系统提供喷油压力,喷油控制系统控制喷油时刻和喷油脉宽,喷油信号同时发送给喷油器和高速相机,完成同步。

喷雾试验运用背光直拍方法拍摄,定容弹两侧装有石英玻璃提供光学通路,光路直径为 89 mm,相机采用 Photron SA X2 高速相机<sup>[8]</sup>,相机拍摄间隔为 25 μs/张,曝光时间 1 μs,照片的空间分辨率为

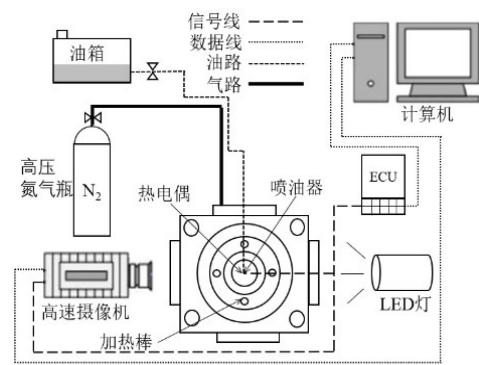


图 1 喷雾试验台架示意图  
Fig.1 Schematic of experiment

0.165 mm/像素。喷油器采用 GDI 发动机上的非对称五孔喷油器,喷孔直径为 0.18 mm,长径比  $L/D=0.93$ 。距喷嘴轴向距离 50 mm 处且与轴线垂直的平面上的油束落点(汽油,20℃,101 kPa 时)如图 2 所示。

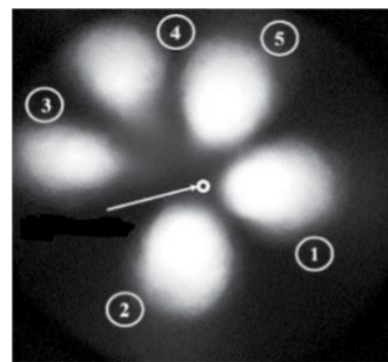


图 2 油束落点图(20℃, 101 kPa)  
Fig.2 Footprint of tested injector

## 1.2 喷雾试验方案

试验所用的含水乙醇 E100W(乙醇体积分数 95%)由市售无水乙醇和纯净水现场配置,汽油(E0)为市售 92 号汽油。喷雾试验条件如表 1 所示,为减小误差每个条件下进行 10 次试验。试验燃料在 20℃时的理化性质见表 2。

表 1 喷雾试验条件  
Tab.1 Spray test conditions

测试燃料	环境温度/℃	喷油压力/MPa	喷油脉宽/ms	喷射背压/MPa	燃油温度/℃
含水乙醇(E100W)	25	10	1.5	0.4、0.6、0.8、1.1、1.5	30、65、90
汽油(E0)	25	10	1.5	0.4、0.6、0.8、1.1、1.5	30、65、90

表 2 含水乙醇及汽油理化特性  
Tab.2 Properties of hydrous ethanol and gasoline

测试燃料	相对密度	沸点/℃	运动粘度/(Pa·s)	表面张力/(N/m)	饱和蒸汽压/kPa
含水乙醇(E100W)	0.816	78.15	0.00141	0.0228	5.732
汽油(E0)	0.72~0.78	30.00~220.00	0.000519	0.022	36.4

### 1.3 图像处理方法

采用MATLAB软件处理喷雾图像。高速相机拍摄的喷雾原始图像如图3a所示;将其背景删去,滤波去除噪声,并增强对比度,如图3b所示;设定合适的亮度阈值,将图像二值化,如图3c所示;在二值化的图片中提取喷雾轮廓,如图3d所示。计算喷雾贯穿距、喷雾锥角、喷雾宽度及喷雾投影面积。

按照美国机动车工程师学会(SAE)的标准<sup>[9]</sup>,

喷雾贯穿距 $L$ 定义为每个时刻喷雾轮廓距喷嘴的最远轴向距离;喷雾锥角 $\theta$ 定义为两侧喷雾轮廓上距喷嘴轴向距离5 mm和15 mm的4个点 $ABCD$ 构成的夹角;喷雾宽度 $w$ 定义为距喷嘴一定轴向距离处的喷雾轮廓两侧间的水平距离(见图3d);喷雾投影面积定义为喷雾在垂直于光路的平面上的投影面积,即图3c中的白色区域面积。每个条件下的喷雾参数都是10次试验的平均值。

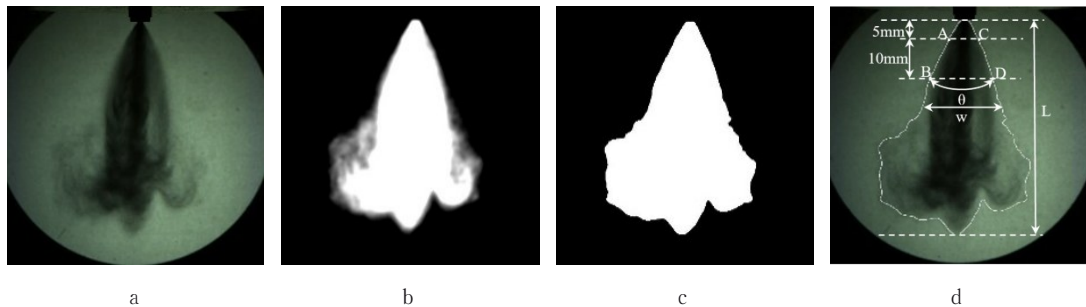


图3 喷雾图片处理及特性参数定义

Fig.3 Display of image processing and definition of spray parameter

## 2 试验结果及分析

### 2.1 喷雾宏观特性

图4所示是在喷油压力( $P_{in}=10$  MPa)和环境温度( $T_a=25$  °C)不变时,在不同的背压( $P_b=0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8$ 、 $1.1$ 、 $1.5$  MPa)和不同的燃油温度( $T_{fuel}=30$ 、 $65$ 、 $90$  °C)条件下,含水乙醇和纯汽油单次喷雾在1.5 ms时的图像。此时喷油已经结束,油束发展较为完全,可以认为此时的图像反映了喷雾的形态。

由图4可见,在相同条件下,在油温30 °C或背压1.5 MPa时,含水乙醇和汽油的喷雾图像均显示为边界明显的3束油束,此时喷雾处于冷态射流状态。由于含水乙醇的表面张力高于汽油,阻碍了液滴破碎,喷雾发展受到的阻力因此减小,促进了喷雾向前发展,贯穿距也较大。此外,由伯努利方程可知,喷雾的初速度和喷孔内外的压力差的平方根成正比,因此当喷油压力不变背压升高时,喷雾的初始动能减少,初速度降低,贯穿距相应缩短。并且背压的升高使定容弹内的气体环境密度升高,增大了油束液滴之间碰撞聚合的几率和油束向前发展受到的阻力,同样抑制了油束的发展,喷雾也因此变浓,图像中油束的颜色更深。此外背压升高造成油束与环境空气相互作用增强,使喷雾的末端边缘出现卷吸现象,并且含水乙醇的卷吸作用弱于汽油。

随着油温升高和背压降低,燃油在喷出喷嘴后压力迅速降低到其饱和蒸汽压以下从而发生闪沸现象,油束之间的边界逐渐消失,并被向中间挤压,此时喷雾首先由冷态射流转变为过渡闪沸状态,此时喷雾的蒸发程度增强,喷雾和周围气体环境动量交换增强,喷雾向前发展受到阻力增强,贯穿距减小,喷雾也因此向两侧发展,并且出现了更强的卷吸<sup>[8]</sup>。当油温90 °C,背压0.4 MPa时,由于燃油温度很高,背压很低,喷雾由过渡闪沸变为完全闪沸状态,此时喷雾坍塌成单束油束,单束油束的贯穿动量因此增加,并且喷雾前锋面积减小,受到的阻力减小,贯穿距离明显增加。由于含水乙醇沸点低于汽油,在相同的背压和油温下液体过热度更高,因此更容易进入过渡闪沸和完全闪沸状态,且程度更加强烈,因此含水乙醇在过渡闪沸状态下喷雾发展受到的阻力更强,而在完全闪沸状态下喷雾向前发展受到的促进更强,卷吸作用也更强。

### 2.2 喷雾贯穿距

图5是含水乙醇和汽油燃料在不同燃油温度和背压下的喷雾贯穿距对比。可以看出在背压0.4 MPa下,随着温度升高含水乙醇的贯穿距先降低后升高;在背压0.8 MPa时,含水乙醇的贯穿距在油温为30 °C和65 °C时几乎相同,而在90 °C时减小;在背压1.5 MPa时,含水乙醇的贯穿距随着温度升高而



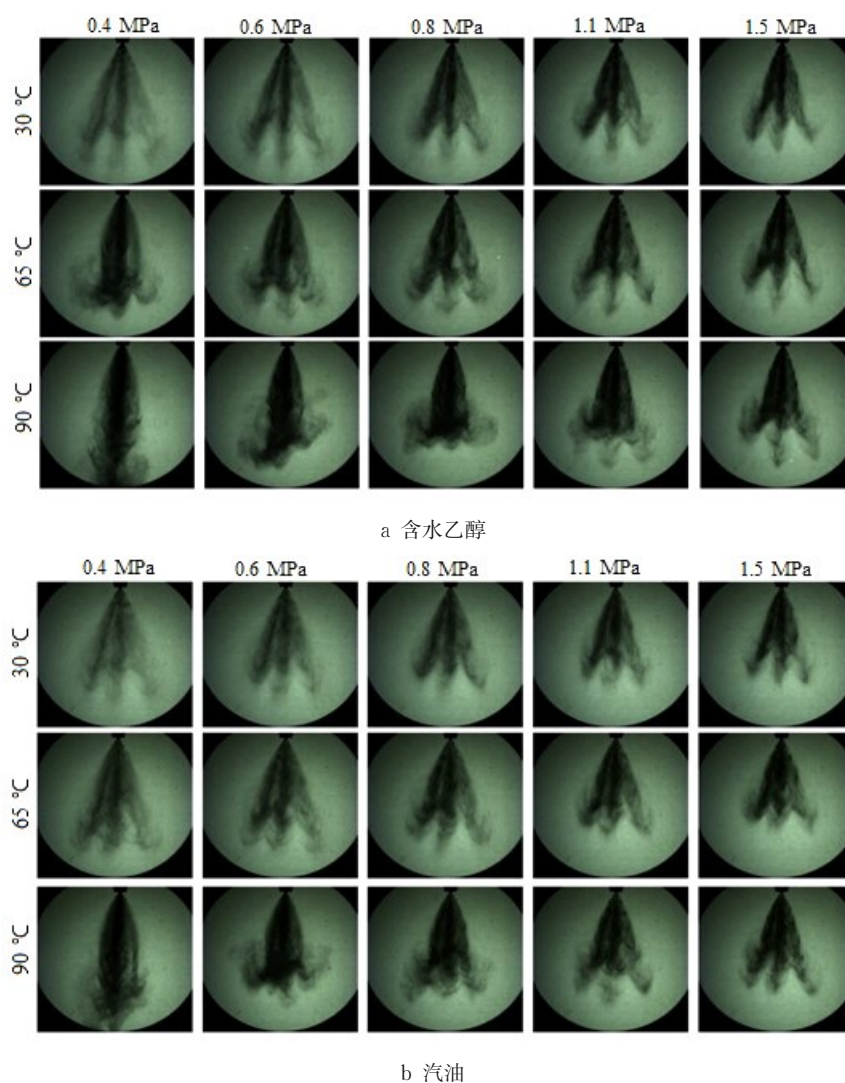


图4 不同背压和燃油温度下的喷雾图像

Fig.4 Morphology of hydrous ethanol and gasoline spray at different back pressures and fuel temperatures

升高。含水乙醇喷雾的贯穿距在不同背压下随着油温的变化趋势并不一致,这是由于油温升高一方面减小了液体燃料的运动粘度<sup>[10]</sup>,使喷雾的初速度升高,增大了贯穿距;另一方面温度升高也减小了液体

的表面张力,使液滴易于破碎,受到的空气阻力增加,限制了贯穿距增长。当背压较低(0.4、0.8 MPa)时,油温升高会使喷雾进入闪沸和过渡闪沸状态,在过渡闪沸状态时液滴破碎程度升高,受到空气

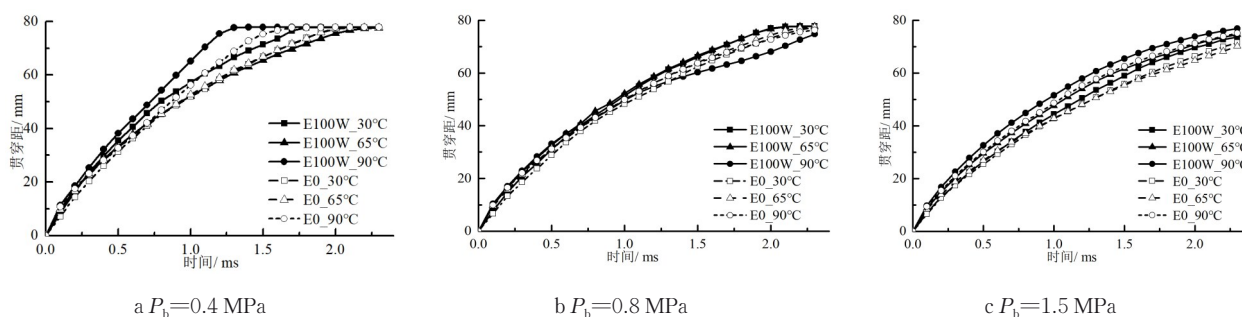


图5 不同条件下含水乙醇和汽油喷雾贯穿距

Fig.5 Spray penetration distance of hydrous ethanol and gasoline at different fuel temperatures and ambient pressures

阻力大大增加,贯穿距减小,而处于闪沸状态时,喷雾坍塌成单束油束,贯穿距显著增加。

在背压较高(1.5 MPa)时,喷雾均处于冷态射流状态,此时温度升高导致初速度升高起主要影响,贯穿距随温度升高而升高;而当背压降低,表面张力对贯穿距的影响逐渐提高,因此在背压0.8 MPa下,油温升高至65℃时贯穿距未升高,而在背压0.4 MPa时贯穿距减小。当温度升高到90℃,背压0.8 MPa时喷雾处于过渡闪沸状态,贯穿距减小,背压0.4 MPa下喷雾处于闪沸状态,贯穿距升高。

背压对贯穿距的影响上文已经讨论,从图5中也可得到证实。并且随着背压降低,贯穿距曲线的斜率增大,即喷雾前锋面速度增加,且在油温30℃,背压0.4 MPa时速度最快。此时含水乙醇和汽油喷雾的贯穿距的差别最小。比较图5中含水乙醇和汽油贯穿距曲线,可以发现当喷雾处于冷态射流状态时,含水乙醇喷雾贯穿距高于汽油;处于过渡闪沸状态时,含水乙醇贯穿距和汽油较为重合,差别很小;处于闪沸状态时,大于汽油。

### 2.3 喷雾锥角

图6是含水乙醇和汽油在喷油开始后1.5 ms时的喷雾锥角,在不同背压和燃油温度条件下的变化曲线。由图6可见,在相同条件下,含水乙醇的喷雾锥角均小于汽油。此外从喷雾锥角曲线看出在不同燃油温度下,喷雾锥角随着背压增大有着不同的变化趋势。在温度较低(30℃)时,喷雾处于冷态射流状态,此时背压升高,一方面促进了喷雾和空气的动量交换,并在喷雾边缘出现卷吸,使喷雾锥角有增大趋势;另一方面增加了油束向前发展受到的阻力,抑制了喷雾纵向贯穿距的同时也抑制了喷雾横向发展,减小了喷雾锥角。从图4中可见,卷吸作用只在喷雾前端明显,对喷雾锥角影响较小,因此喷雾锥角

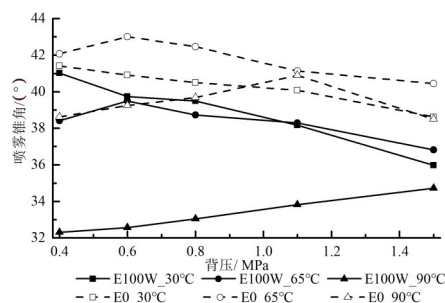


图6 含水乙醇和汽油不同条件下的喷雾锥角

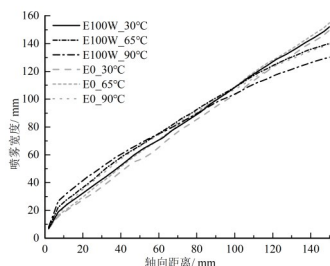
Fig.6 Spray cone angle of hydrous ethanol and gasoline at different fuel temperatures and back pressures

随着背压增大而减小。当油温升高,含水乙醇和汽油喷雾进入过渡闪沸和完全闪沸状态,此时油束内部压力迅速降低,喷雾因此受到环境压力的作用被向中间挤压<sup>[11]</sup>,并且随着油温升高和背压降低,闪沸作用增强,喷雾锥角减小,并最终坍塌成单束油束,喷雾锥角也最小。因此在油温65℃和90℃时,在背压较低时,喷雾锥角随着背压增大而增大,直到喷雾进入冷态射流状态。

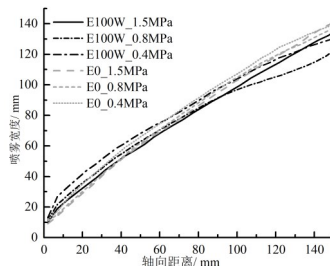
### 2.4 喷雾宽度

当发生闪沸时,喷雾由于坍塌发生形态改变,此时贯穿距和喷雾锥角难以准确反映喷雾的形态。图7是改变油温和背压时含水乙醇和汽油的喷雾宽度随轴向距离发展的曲线。其选取时刻为开始喷油后的1.5 ms,并且由于轴向距离过远处喷雾与空气动量交换发生卷吸等因素的影响,因此对宽度的分析集中在轴向距离25 mm以内,以此分析油温和背压对喷雾形态的影响。

图7a中可见,在背压0.4 MPa下,油温升高,含水乙醇喷雾发生闪沸时,靠近喷孔区域喷雾宽度增加,在远离喷孔区域喷雾宽度减小,并且随着温度升高,闪沸作用增强,这种喷雾宽度的变化也更显著。



a  $P_b=0.4$  MPa,  $T_{\text{fuel}}=30, 65, 90$  °C



b  $T_{\text{fuel}}=90$  °C,  $P_b=0.4, 0.8, 1.5$  MPa

图7 不同燃油温度和背压下的喷雾宽度

Fig.7 Spray width of hydrous ethanol and gasoline at different fuel temperatures and back pressures

在汽油喷雾中,在油温 65℃ 时,由图 5 可见此时未发生闪沸,此时喷雾宽度均大于 30℃ 下的喷雾宽度;在油温 90℃ 时发生闪沸,喷雾宽度的变化趋势与含水乙醇一致。这是由于燃油喷出喷孔后压力迅速下降,燃油中的气泡膨胀破碎,这一作用随燃油温度的升高增强,使得靠近喷嘴的区域喷雾宽度增加<sup>[12]</sup>;当喷雾发生闪沸时,远离喷孔的区域产生低压区<sup>[13]</sup>,喷雾受到周围挤压宽度减小。

在图 7b 中,改变背压,在油温 90℃ 下,背压从 1.5 MPa 降低到 0.4 MPa,此时含水乙醇和汽油喷雾均发生闪沸。由于燃油过热,燃油中的气泡膨胀破碎,以及背压降低空气阻力减小,靠近喷孔区域的喷雾宽度均增加;在远离喷孔的区域,背压减小一方面增强了由燃油过热形成的低压区,另一方面也减弱了周围气体能够产生的挤压作用<sup>[14]</sup>,因此喷雾受到的挤压作用并不显著。在 90℃ 和 0.8 MPa 条件下受到的挤压最强,喷雾宽度最窄。并且,从图 6 中可见,在发生闪沸时,在相同条件下在靠近喷孔区域乙醇喷雾的喷雾宽度宽于汽油,而在远离喷孔区域的喷雾宽度窄于汽油。

## 2.5 喷雾投影面积

喷雾投影面积是衡量喷雾发展质量的重要因素。图 8 为含水乙醇和汽油在不同燃油温度和背压条件下的喷雾投影面积随时间的变化曲线。含水乙醇在燃油温度 30℃、背压 0.4 MPa、燃油温度 90℃、背压 0.4 MPa 的条件下,汽油在燃油温度 90℃、背压 0.4 MPa 的条件下,在喷雾发展末期,喷雾面积随

时间而减小。这可能是由于喷雾发展超出了定容弹的视窗范围,并可由图 5a 中的 3 种条件下贯穿距在喷雾末期发展停滞得到证实。

从图 8a 中可以看出,在燃油温度 30℃ 时,随着背压升高,含水乙醇和汽油的喷雾投影面积明显减小。此时喷雾处于冷态射流状态,环境压力增加,一方面减小了燃油喷出时的初速度,另一方面增大了油束前进受到的空气阻力,同时限制了喷雾的贯穿距和横向发展。虽然背压升高增强了油束和空气间动量交换,并在喷雾边缘出现卷吸区域,促进了喷雾的发展,但这一作用相对较小,因此喷雾投影面积总体减小。在图 8b 中,在背压 1.5 MPa 下,温度升高,含水乙醇和汽油的喷雾投影面积相应增大,此时喷雾处于冷态射流状态。由图 4c 中可以看出,温度升高导致喷雾初速度升高,因此温度升高在提高贯穿距同时,也促进了喷雾的横向发展,导致喷雾投影面积增加。当温度较高,背压较低时,喷雾处于闪沸状态,此时喷雾贯穿距增加,但是由于喷雾坍塌成单束横向宽度减小<sup>[15-16]</sup>。由图 8a 可以看出,当喷雾处于完全闪沸状态(油温 90℃,背压 0.4 MPa)时,和相同背压下冷态射流状态时的喷雾投影面积相比略微升高;和图 8b 中的冷态射流状态时的喷雾投影面积相比明显增大,因此背压是决定闪沸状态下喷雾面积的主要因素<sup>[17-18]</sup>。此外,由图 8 还可以看出含水乙醇喷雾的投影面积均大于相同条件下的汽油喷雾,只有在 30℃ 和 1.5 MPa 条件下几乎相等,这是由于此时喷雾发展受到的阻力较大,燃料的性质产生的影响相比很小。

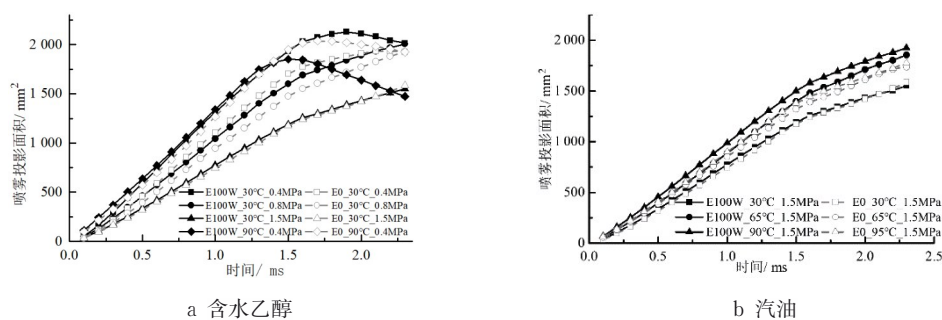


图 8 不同条件下含水乙醇和汽油喷雾投影面积

Fig.8 Spray projection area of hydrous ethanol and gasoline at different fuel temperatures and back pressures

## 3 结论

本文利用 5 孔 GDI 喷油器,研究了含水乙醇在不同背压和油温条件下的喷雾特性,并和汽油喷雾进行对比,主要结论如下:

(1) 在油温 30℃ 或背压 1.5 MPa 条件下,含水乙醇喷雾处于冷态射流状态,此时含水乙醇贯穿距大于汽油,并随着背压升高降低,随着油温的升高而升高;喷雾锥角小于汽油,并随着背压升高减小;喷雾投影面积大于汽油,并随着背压升高而降低,油温



的升高而增大。

(2) 随着背压减小及油温升高,含水乙醇相比汽油更容易达到过渡闪沸和完全闪沸状态。在过渡闪沸状态下,含水乙醇喷雾贯穿距减小,和汽油差距不大。由于喷雾锥角减小,小于汽油并随着背压增大而增大。

(3) 含水乙醇喷雾处于完全闪沸状态时,含水乙醇喷雾贯穿距明显增长并大于汽油;喷雾锥角明显减小并小于汽油;此时喷雾投影面积主要受背压影响,大于冷态射流状态下的喷雾面积,且大于汽油喷雾。

(4) 当闪沸发生时,靠近喷孔区域的喷雾宽度增大;远离喷孔的区域,喷雾宽度随着温度的升高减小,而随着背压减小受到的影响较为复杂,在90℃和0.8 MPa条件下最窄。

#### 参考文献:

- [1] MATRINEZ J, ACEVES S, FLOWERS D. Improving ethanol life cycle energy efficiency by direct utilization of wet ethanol in HCCI engines [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2007, 129 (4) :332.
- [2] SAFFY H A, NORTHROP W F, KITTELSON D B, *et al.* Energy, carbon dioxide and water use implications of hydrous ethanol production [J]. *Energy Conversion and Management*. 2015,105:900.
- [3] THOMPSON D, MACKLINI D, HUA Z. Performance and economic analysis of a direct injection spark ignition engine fueled with wet ethanol[J]. *Applied Energy*. 2016,169:230.
- [4] BURESHAID K I, FENG D, VAFANEHR H, *et al.* Study of flame speed and knocking combustion of gasoline, ethanol and hydrous ethanol (10% water) at different air/fuel ratios with port-fuel injection [C]//WCX World Congress Experience. SAE Technical paper, 2018-01-0655. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0655>.
- [5] LI T, ZHANG X Q, WANG B, *et al.* Characteristics of non-evaporating, evaporating and burning sprays of hydrous ethanol diesel emulsified fuels[J]. *Fuel*, 2017, 191: 251.
- [6] ZHANG X Q, 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.
- [7] NEGRO S, BRUSIANI F, BIANCHI G. Superheated sprays of alternative fuels for direct injection engines [C]//SAE 2012 World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper, 2012-01-1261. <https://doi.org/10.4271/2012-01-1261>.
- [8] 马骁, 郭恒杰, 李雁飞, 等. 汽油掺混丁烷的GDI喷雾特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(2): 433.  
MA Xiao, GUO Hengjie, LI Yanfei, *et al.* A study on GDI spray characteristics of gasoline blended with butane[J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2016, 37(2): 385.
- [9] HUANG D, HARRINGTON D, GANDHI A, *et al.* Gasoline fuel injector spray measurement and characterization-a new SAE J2715 recommended practice [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2009, 1(1): 534.
- [10] 姚春德, 陈志方, 银增辉, 等. 燃油温度和环境温度对甲醇低压喷雾的影响[J]. *内燃机学报*, 2015, 33(4): 310.  
YAO Chunde, CHEN Zhifang, YIN Zenghun, *et al.* Influence of fuel temperature and ambient temperature on methanol low pressure spray[J]. *Transactions of CSICE*, 2015, 33 (4): 310.
- [11] XU Q, SUN Z, WANG S, *et al.* A morphological study of supercritical fuel flash-boiling spray [J]. *Fuel*, 2021, 310: 122365.
- [12] MOJTABI M, WIGLEY G, HELIE J. The effect of flash boiling on the atomization performance of gasoline direct injection multi-stream injectors [J]. *Atomization and Sprays*, 2014, 24(6):467.
- [13] GUO H, DING H, LI Y, *et al.* Comparison of spray collapses at elevated ambient pressure and flash boiling conditions using multi-hole gasoline direct injector [J]. *Fuel*, 2017, 199:125.
- [14] DURONIO F, RANIERI S, MONTANARO A, *et al.* ECN Spray G injector: Numerical modelling of flash-boiling breakup and spray collapse [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, 145:103817.
- [15] SUN Z, WANG H, CUI M, *et al.* Investigation of flash boiling injection schemes in lean-burn gasoline direct injection engines [J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2021, 7: 100035.
- [16] ZHOU Z, LI Y, ZHANG J, *et al.* Effects of component proportions on multi-jet instant expansion of binary solutions under flash boiling conditions[J]. *Fuel*, 2022, 308:122018
- [17] 李雁飞, 郭恒杰, 王建昕, 等. 高背压下GDI油束喷雾特性的试验[J]. *内燃机学报*, 2016, 34(4): 326.  
LI Yanfei, GUO Hengjie, WANG Jianxin, *et al.* Experiment on spray characteristics of GDI jet under elevated ambient pressure[J]. *Transactions of CSICE*, 2016, 34(4): 326.
- [18] 郭恒杰, 李雁飞, 李莉, 等. 棕榈油生物柴油掺混燃料宏观与微观喷雾特性[J]. *内燃机学报*, 2015, 33(5): 385.  
GUO Hengjie, LI Yanfei, LI Li, *et al.* Experiment on macroscopic and microscopic spray characteristics of palm oil methyl ester[J]. *Transactions of CSICE*, 2015, 33(5): 385.