

甲、乙醇燃料喷雾特性的激光测试研究

曹菁菁¹, 许敏^{1,2}, 曾纬¹, 张玉银¹

1.上海交通大学汽车工程研究院,上海市200240

摘要:本文利用米氏(MIE)散射和激光诱导荧光(LIF)激光测试技术测得了甲醇、乙醇与汽油的喷雾特性。基于对该实验测得的大量喷雾图像的分析比较,获得了甲醇、乙醇、汽油在喷射初始阶段、喷雾发展阶段以及完全雾化阶段的不同喷雾特性。结果发现醇类燃料的喷雾特性不同于汽油,且乙醇与汽油的差距要大于甲醇与汽油的差距。在喷射初期,由于受燃料粘性的影响,粘性最大的乙醇的喷油延迟期最长。在喷雾发展早期阶段,汽油喷雾的贯穿距最长。在完全雾化阶段,三者液滴分布的差距并不明显。三者的喷射锥角无明显的差异。

1.引言

随着汽车保有量的增加,空气的污染情况和能源的危机问题都日益严重,寻求一种清洁有效的替代燃料显得尤为重要。甲、乙醇与汽油相比具有更高的辛烷值,更宽泛的着火范围,更高的火焰传播速度以及更高的汽化潜热值。这些特性保证了发动机可以在更高的压缩比和更清洁的工作范围下运行。目前,已经有多个国家采用醇类作为汽油的替代燃料进行使用。在这一不断发展的过程中,醇类燃料的一些优点得到体现,但同时一些问题也暴露出来,例如甲醇对发动机的腐蚀,冷启动困难等,因此为了更好的开发和利用醇类作为替代燃料,更深入和系统的基础理论研究显得格外重要。

本课题研究了甲醇和乙醇在不同喷射压力和环境背景下的喷雾特性。基于大量的实验数据结果,获得了喷雾初始喷射阶段的形态以及完全雾化阶段的喷雾特性,并对不同燃料的喷雾破碎机理进行分析。

为甲醇、乙醇、汽油火花点火发动机喷雾燃烧系统的设计提供一定的基本实验数据。

2.实验设备与实验方法

2.1实验设备

如图1、图2所示喷雾实验室的主要部分有: Nitron激光器, 定容高压容器, 灵活燃料供给系统以及由CCD相机、增强器intensifier以及相关的光学设备组成的激光成像系统。

LaVision激光和成像系统主要用来提供一定能量的激光束和拍摄实验所需的图像; 8孔直喷喷嘴固定安装在定容高压容器顶部, 并且利用密闭环境为喷雾提供需要的环境背压; 灵活燃料供给系统中, 三个相互独立的液力蓄压器向喷嘴供给具有稳定压力的燃料, 2个独立的氮气供气系统分别控制实验中的喷射压力和环境压力。实验过程中由Nd:YAG激光仪产生一束细的平面激光照射沿喷雾对称轴线的两束喷雾, 图像被LaVision成像系统拍摄下来, 并通过PTU同步记录入电脑中。



图 1 喷雾测试实验装置

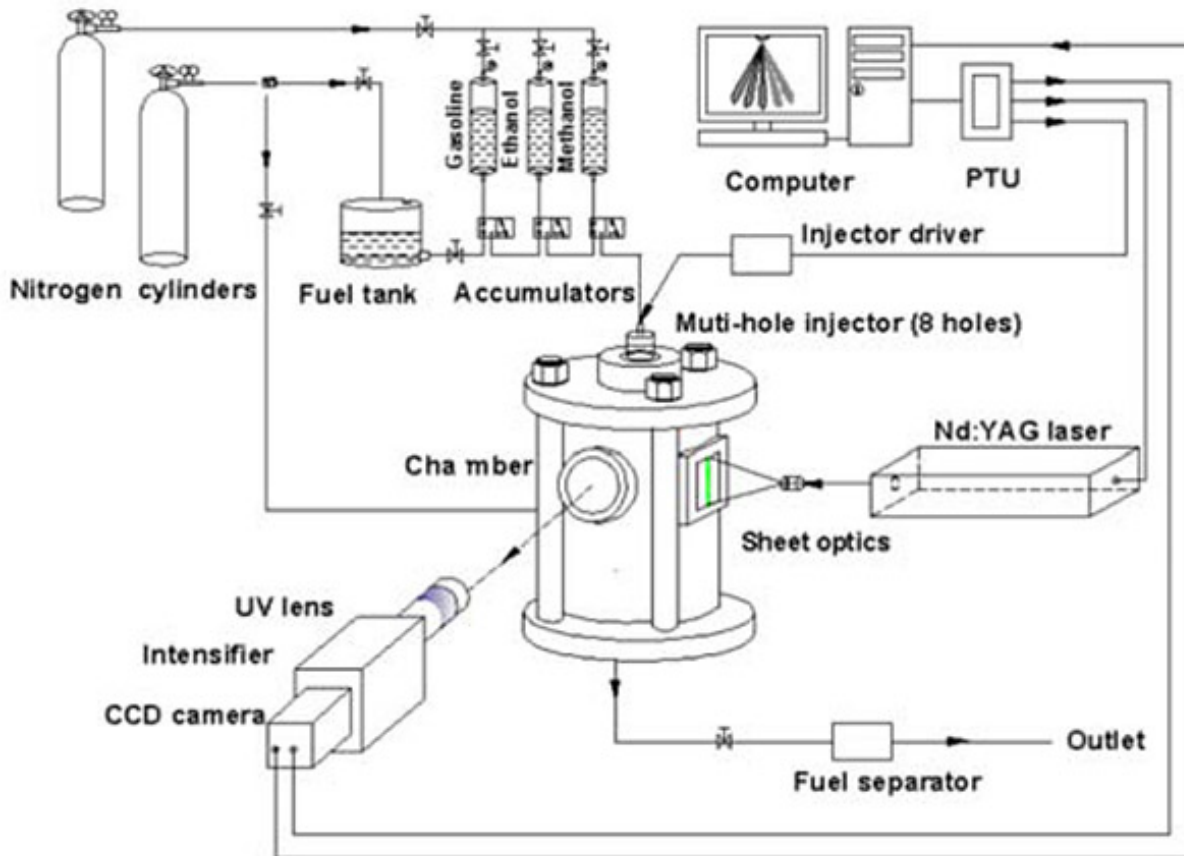


图 2 实验设备示意图

实验中采用八孔直喷喷油器，孔径为0.3mm，长径比L/D=2，这八个喷孔所在的圆锥的锥角为70°。激光器产生的一束直径约5mm激光束，经过一系列柱面透镜，形成0.5mm厚的平面激光。该平面激光束沿喷雾的对称轴线同时照射两束喷雾，如图3、4所示。

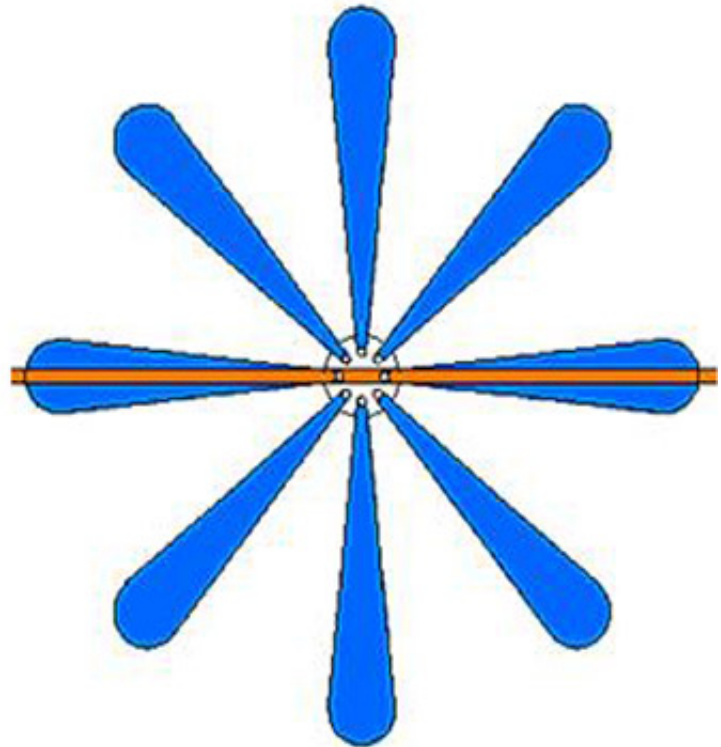
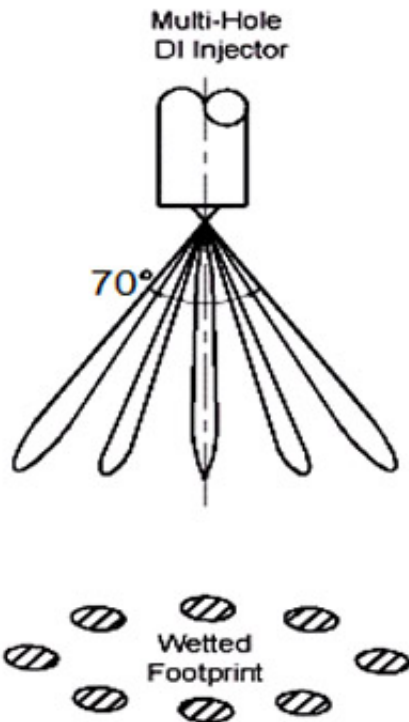


图3 喷孔油束（主视图） 图4 喷孔油束（仰视图）

2.2 实验方法

2.2.1 实验条件和燃料

研究燃料喷雾形状和雾化过程的实验条件如表1所示。控制参数为喷射压力和背压。这两个压力由高压氮气瓶出口处的调压阀进行调节、控制。实验中取喷射压力为1MPa,5MPa和10MPa。实验背压分别取环境压力、0.45MPa和1MPa。对于每种喷射压力和背压的组合，我们利用激光器以及光学成像系统分别在喷射始点,喷射后30 μs, 500 μs,喷射后1000 μs,喷射后1500 μs,喷射后2000 μs拍摄喷雾图片。实验所用燃料为97#汽油,无水乙醇和无水甲醇。三种燃料的物理特性见表2。

表 1 实验条件

喷射压力	1MPa, 5MPa, 10MPa
背压	0.1MPa, 0.45MPa, 1MPa
环境温度	20°C
燃料温度	20°C

表 2 燃料参数

	97# 汽油	甲醇	乙醇
密度 (g/ml, 20°C)	0.7406	0.796	0.79
粘度 (mPa*s, 20°C)	0.42	0.75	1.2
表面张力 (mN/m, 20 °C)	20-25	22.5	22.39

2.2.2 激光测试技术

实验中，我们采用了米氏散射（MIE）和激光诱导荧光技术（LIF）两种激光测试技术来获得不同的喷雾图样。其中，MIE的主要原理是通过观测喷雾的反射光来捕捉喷雾的形态，当光束照在液滴上时，和原光具有相同的波长的散射光极被摄像机摄取。由于米氏散射信号与喷雾中液滴的表面形态具有直接关系，我们便可获取液滴分布以及喷雾的几何信息，比如喷雾锥角，贯穿距。目前，我们采用光密度高的532nm波长的激光来照亮喷雾，获取了试验用喷嘴的喷雾特性。但MIE存在的问题的是，在实验的过程中，来自喷嘴以及其他油束的反光可能会影响到实验的准确性。与MIE相比，LIF的主要原理是用激光束激发一个原子或者分子，使其发光。一般来说，由激光诱导荧光测量物质的特性比由一般光源诱导荧光所测的灵敏度提高2-10倍。因此，通过LIF技术，有效的避免了MIE技术中背景噪音的影响，同时可以较为清晰的观察到喷雾蒸发的过程。

实验中，我们通过更换不同的滤镜来实现不同测试技术的使用。

3. 实验结果处理及分析

甲醇、乙醇作为一种替代燃料，表现出与汽油不同的喷雾特性，要阐明三种燃料之间喷雾特性的区别，必须对喷射后喷雾各发展阶段的性质进行详细描述，主要包括燃油喷射初始阶段，喷雾的二次雾化。

因此，在获得甲醇、乙醇、汽油的喷射图样以后，进一步对三者喷雾的发展趋势、几何特性以及液滴分布等进行分析，研究燃料物理特性、环境压力、喷射压力等参数对喷雾特性的影响。

3.1 不同燃料对初始时刻的影响

喷射初始时刻SOI（startofinjection）是指燃油即将要离开喷孔的时刻，能够一定程度上反映出燃料在喷嘴内部流动的情况，同时，其初始状态对于开始喷射以后喷雾的发展过程也起到重要的作用。以大气压力下喷射压力为5MPa为例，在实验的过程中，拍摄不同时刻的照片，发现不同燃料的喷射初始时刻是不同的，汽油最早离开喷嘴，约在脉冲开始以后的730 μs时刻，甲醇略晚于汽油，约为740 μs时刻，乙醇离开喷嘴的时间最晚，为脉冲开始之后的750 μs时刻。以喷射压力5MPa，环境背压0.1MPa为例，图5为三种燃料在喷射开始后750 μs时刻的喷射图样。

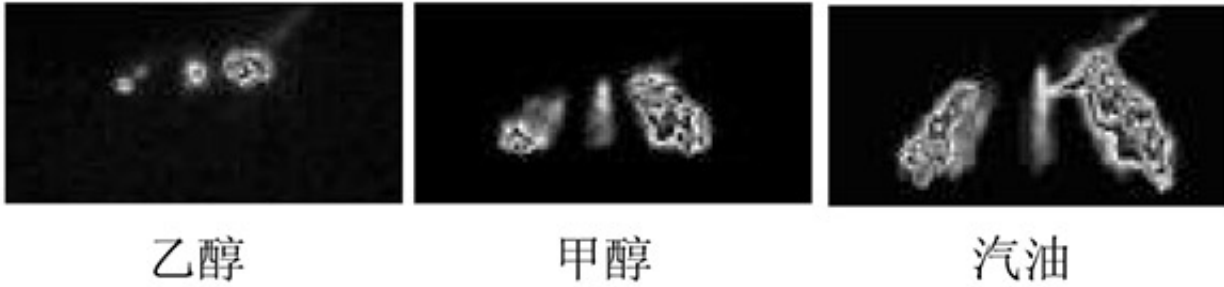


图 5 喷射压力 5MPa，大气压力下初始时刻喷射图样

为了从理论上对这一现象进行分析，我们建立了在喷射开始前关于燃料在喷孔内流动时的动力学方程。图5是喷孔内部结构简图由图上可以看出：喷孔内部有一个电磁线圈、一个锁定弹簧、一个电枢和球形针阀，当球形针阀打开后，液体从里面流出。当系统发出脉冲信号后，电枢通电，使得电器线圈感应产生电磁力，以用来克服锁定弹簧力、燃料喷射压力的阻力以及燃料粘性力的阻力，打开喷嘴的球型针阀，使得燃料喷出。

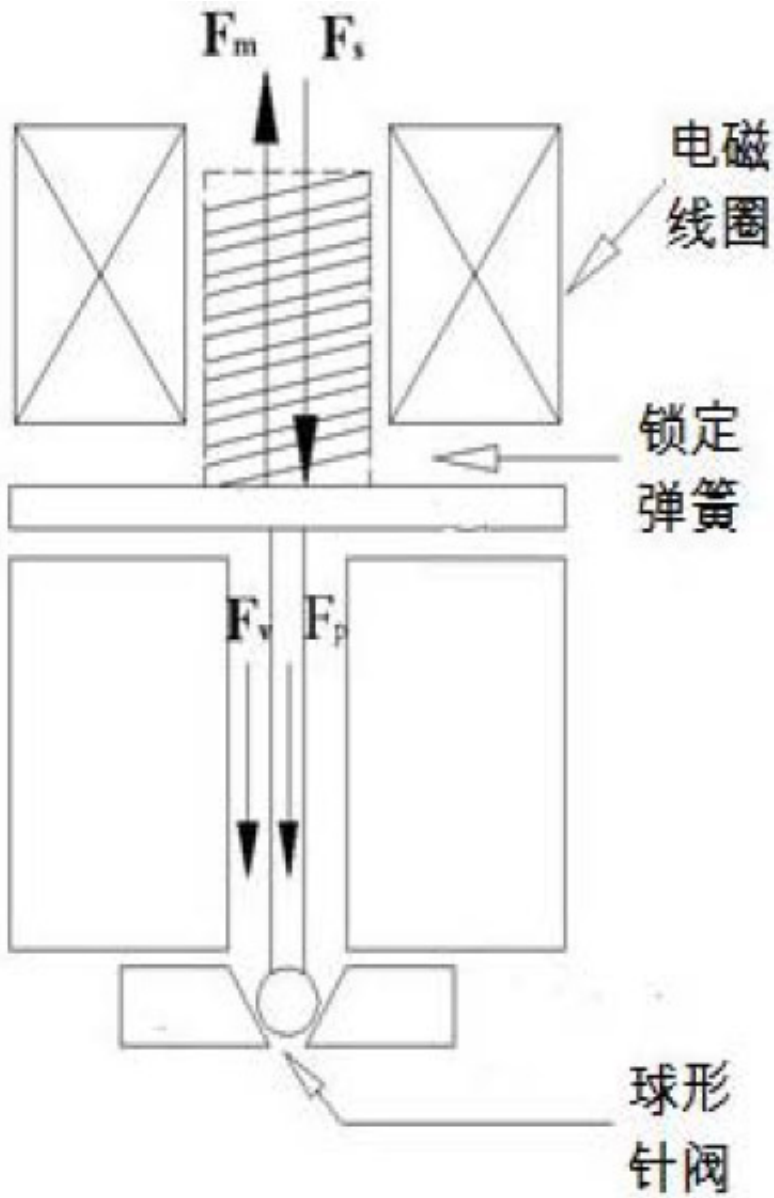


图 6 喷孔内部结构示意图

动力学方程如下：

$$F_m - F_s - F_p - F_v = m \cdot a \quad (1)$$

其中, F_m 是电磁驱动力, F_s 是锁定弹簧的阻力, F_p 是来自燃油喷射压力的阻力, F_v 是燃料在喷孔内粘性阻力, m 是球形针阀的质量, a 是球形针阀的加速度。由牛顿粘性定理, 这一粘性力主要与燃料的速度以及粘度有关。

在相同的喷射条件下, 我们可以近似认为 F_m 、 F_s 、 F_p 是一样的, 为同一常数 A , 在燃油即将离开球形针阀的时候, 可近似认为燃油的速度与球形针阀的速度是一致的, 因此, F_v 可简化为: $F_v = \mu \frac{ds}{dt}$

因此, 式 (1) 可以简化为:

$$A - \mu \frac{ds}{dt} = m \frac{d^2s}{dt^2} \quad (2)$$

式中, s 是球型针阀的升程, t 是球形针阀升程达到 s 时需要的时间。利用有限差分分析法对该式进行定性的分析:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{s_n - s_{n-1}}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \frac{v_n - v_{n-1}}{\Delta t} = \frac{s_n + s_{n-2} - 2s_{n-1}}{\Delta t^2} \quad (4)$$

在初始时刻 $v_{n-1} = 0$, 所以 $\frac{s_{n-1} - s_{n-2}}{\Delta t} = 0$,

又因为 $s_{n-1} = 0$, 所以方程式 3、4 进一步简化为:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{s_n - s_{n-1}}{\Delta t} = \frac{s_n}{\Delta t} \quad (5)$$

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \frac{s_n - s_{n-1} - (s_{n-1} - s_{n-2})}{\Delta t^2} = \frac{s_n}{\Delta t^2} \quad (6)$$

最终方程 2 简化为如下形式:

$$A\Delta t^2 - \mu s_n \Delta t - m s_n = 0 \quad (7)$$

方程 7 表明了燃料粘度对针阀开启时刻的影响, 即对燃料喷射初始时刻的影响。式中 s_n 是阀门开启所经过的升程, Δt 是阀门开启所经过的时间。由方程式 5 可以解出:

$$\Delta t = \frac{\mu s_n + \sqrt{\mu^2 s_n^2 + 4Ams_n}}{2A} \quad (8)$$

当在同样的喷射环境下, A 、 s_n 、 m 是相同的, 所以, 喷射的初始时刻与燃料的粘度密切相关。当粘性越大的时候, 需要的时间越长。由表 2, 在环境温度下, 汽油的粘度为 $0.42\text{mPa}\cdot\text{s}$ 小于甲醇的粘度为 $0.75\text{mPa}\cdot\text{s}$, 乙醇的粘度最大, 为 $0.79\text{mPa}\cdot\text{s}$, 跟据方程式 8, 乙醇的离开针阀的需要的时间最长, 其次是甲醇, 最后是汽油, 这与实验所得到的结果是相一致的。

3.2 喷雾早期的特性研究

喷射开始以后，液体射流的分裂长度与喷射速度、液体粘度、喷嘴尺寸和结构等因素有密切关系。液体从喷嘴被射入另一种流体介质（例如空气）后，由于气动力、惯性力、粘性力和表面张力等各种力的相互作用导致其破碎[1]。在某些特定情况下，射流表面的扰动会变的更加强烈，射流会破裂成一系列大的液滴，这个过程对于之后形成小的油滴并且最终完全蒸发是非常重要的[2]。因此，本文对三种燃料喷雾初期分裂阶段的喷雾特性进行了详细分析。

以喷射压力为5MPa，环境压力下喷射初期汽油、甲醇、乙醇的LIF喷射发展图样为例。

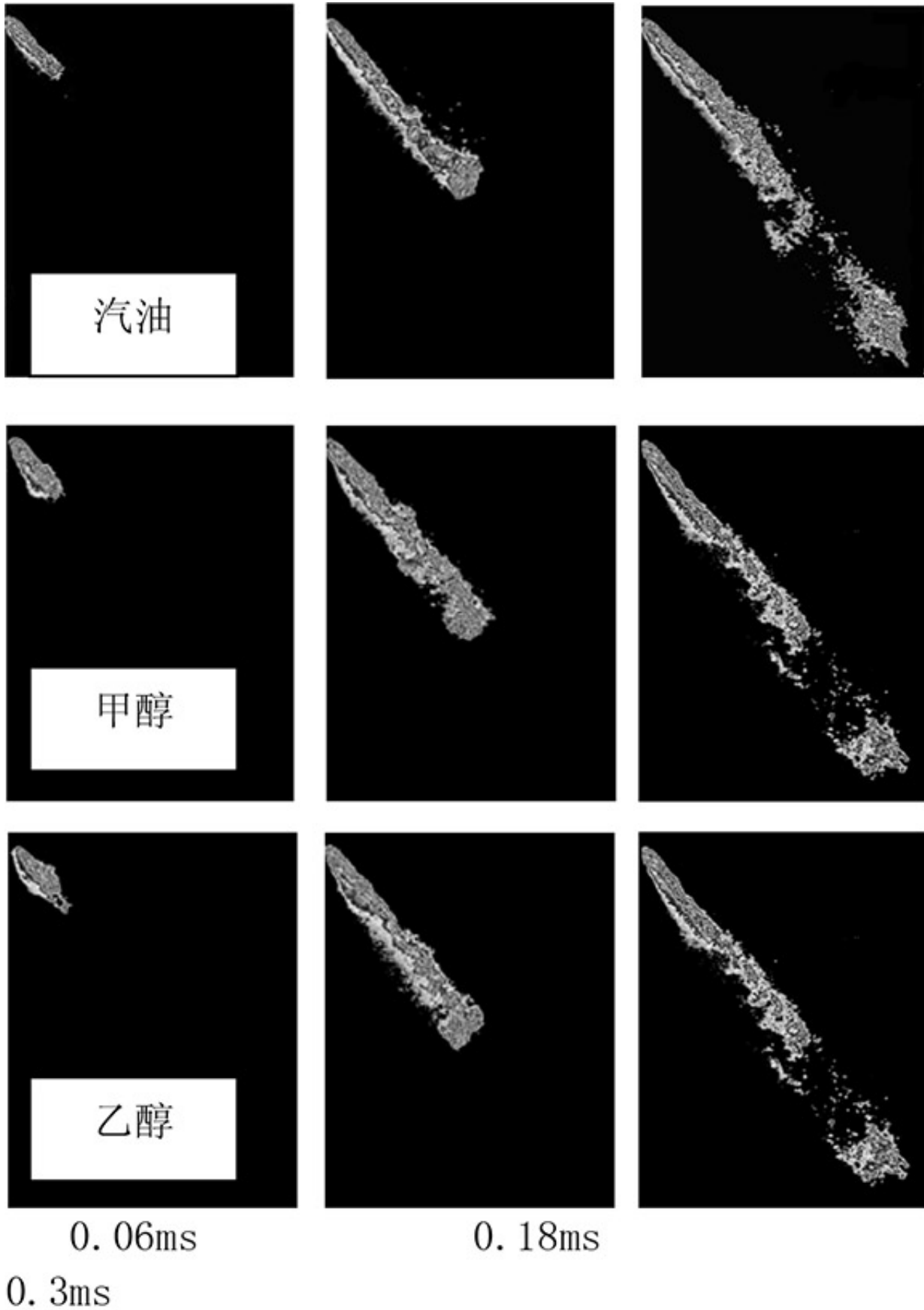


图 7 不同燃料早期喷雾过程(喷射压力 5MPa, 大气压力)

由图7可以看出，喷射刚开始的时候，三者的液核区域基本相同，均随着喷射的继续而变大，相互之间并没有发现明显区别。在0.18ms时刻出现了射流破裂的现象，喷雾末端分离成大小不等的液滴，到了0.3ms时刻，这种破裂现象更为明显，可以较为清晰的观察到喷雾的液核和破裂区域。另外，由图上测量的结果可以看出汽油的贯穿距最长，其次是甲醇，乙醇的贯穿距最短，这可能与三者不同的密度以及粘度相关。

为了更好的研究这一现象，我们引用Levich's的破碎理论和Hiroyasu的方程[3]进行数值分析。相关方程式如下：

$$0 \leq t < t_b: \quad S = C \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_l}} t \quad (9)$$

式中， C 是速度系数， ΔP 是喷射压力与环境背压的差值， ρ_l 是液体密度， t 是喷射开始以后的时间， t_b 是射流出现破裂的时刻，实验中，各种燃料的喷射压力和环境压力是一致的，因此我们近似认为这些参数为参数，所以方程式(9)可以简化为：

$$S = f(V_i, \frac{1}{\rho_l^{0.5}}) \quad (10)$$

式中， V_i 是初始速度。由式(10)可以看出，喷射初期，喷雾贯穿距和破裂长度与初始速度以及燃料密度相关。当燃料初始速度较大、密度较小的时候，燃料喷雾的贯穿距较大。利用式(10)，计算出在0.18ms时刻，甲醇与汽油的差距为6.4%，乙醇与汽油的差距为12.3%，与实际测得的结果相比：甲醇与汽油的差距为6.7%，乙醇与汽油的差距为10.5%。由计算结果可以看出，实际测得的结果与理论计算的结果基本相似。

3.3完全雾化阶段喷雾特性分析

上面的数据主要分析了第一次喷雾破裂的过程，在这个过程中，初始的大液滴从液核中分离出来。第二次破裂过程描述了从液核分离出的液滴由大到小的分裂过程。下面我们对甲醇、乙醇、汽油三种燃料的二次破裂进行实验分析。分析的主要区域是位于喷嘴以下约50mm位置区域已经充分发展的喷雾末端的液滴。

下面，我们列出了三种燃料在相同时刻的LIF图样来对比不同的液滴分布，如图8所示喷射压力为5MPa，环境压力为大气压力。

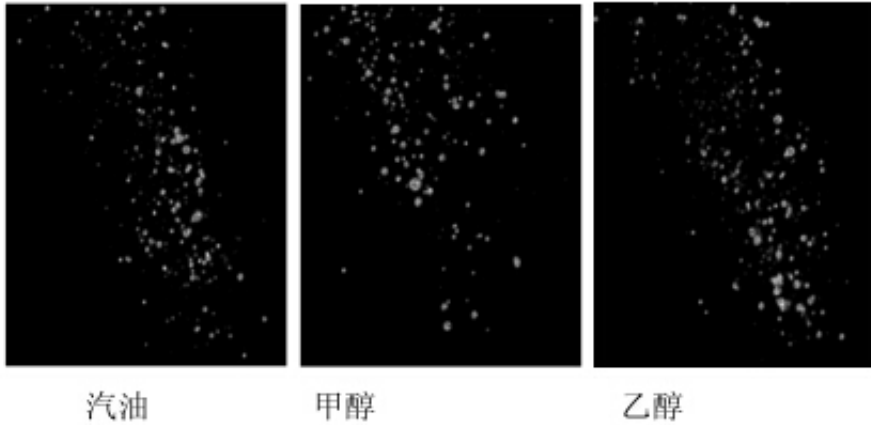


图 8 三种不同燃料的喷雾末端的液滴分布

图像上可以看出，三者的喷雾末端液滴分布并没有呈现明显的不同。这一过程通常由Ohnesorge(Oh)数和Weber(We)数来表征[4]。Oh无量纲数表征的是液体粘性力与液体表面张力的比值，We数表征的是空气动力与表面张力的比值。除了少数粘度极大的液体外，大多数液体都满足 $Oh < 0.3$ [1]，所以对于甲醇、乙醇、汽油这三种粘性均不大的液体来说，它们的oh数都是低于0.3的，由图上可以看出，此时三者二次

破裂的形态仅与We数相关。同时，汽油、甲醇、乙醇三者的表面张力差别不大，继而We数几乎相等，所以，三者在二次破裂阶段表现出相似的性质。

3.4 喷雾的贯穿距和喷雾锥角

喷雾的贯穿距和喷雾锥角是喷雾的重要结构特性参数，研究喷雾的贯穿距和喷雾锥角对工程实践具有较大的意义。下面分析不同控制参数对三种燃料的喷雾特性影响，并比较三者之间的不同。

3.4.1 喷射压力对三种燃料喷雾特性的影响

图9是背压为0.1MPa，不同喷射压力的喷雾贯穿距曲线，从图中可以看出，在环境背压相同的情况下，随着压力的增大，喷雾的贯穿距逐渐增大，且在相同的喷射条件下，乙醇的贯穿距最短，其次是甲醇，汽油的贯穿距最长。

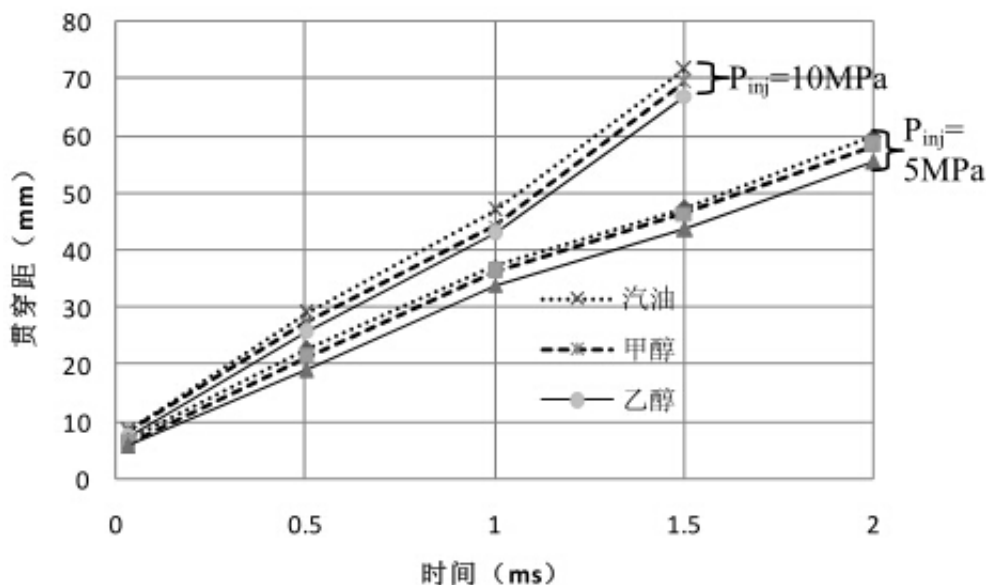


图 9 背压 0.1MPa 下，三种燃料贯穿距曲线

3.4.2环境背压对三种燃料喷雾特性的影响

图10选取了喷射压力为5MPa，0.5ms时刻，环境背压分别为0.1MPa、0.45MPa、1MPa甲醇、乙醇、汽油的喷雾贯穿距进行比较。由图可以看出，随着环境压力的增加，喷雾的贯穿距明显减小。为了更好的研究环境背压对三种燃料喷雾特性的影响，我们绘制出图10进行分析。

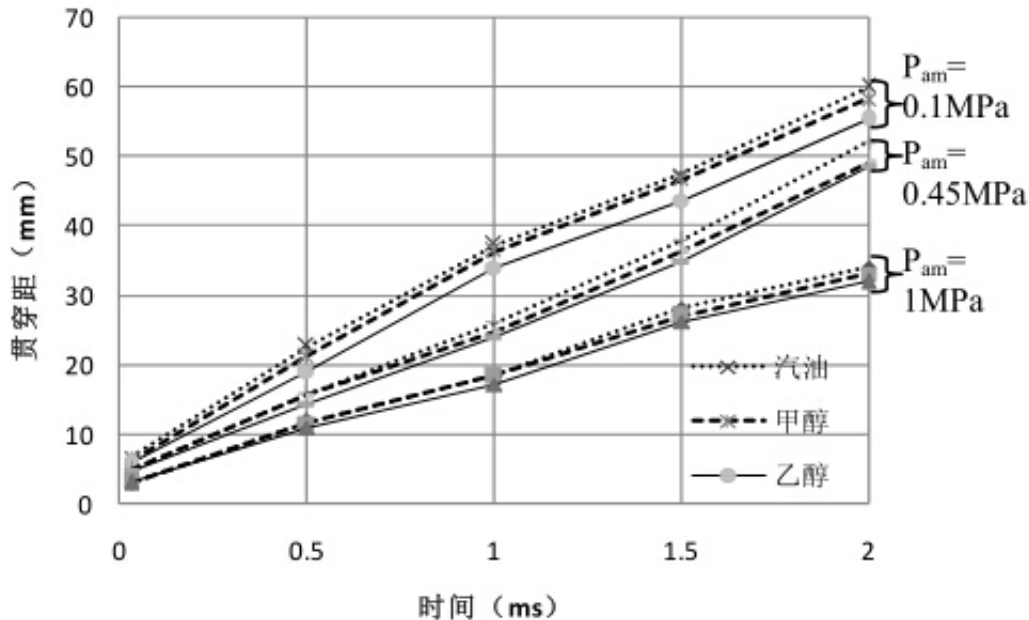


图 10 喷射压力 5MPa 下，三种燃料贯穿距曲线

由图10可以看出，随着背压的上升，三种燃料的贯穿距显著下降。在同样的喷射条件下，汽油的贯穿距最长，其次是甲醇，乙醇的贯穿距最短。另外，从图上还可以观察到，当环境背压增大的时候，乙醇与汽油之间贯穿距的差距愈发明显。例如，当环境背压较小的时候（0.1MPa），汽油、乙醇的喷雾贯穿距差距约在5mm左右，但当环境背压升高至1MPa时，这种差距减小到2mm左右。可见，随着环境背压的增加，两者的贯穿距差距减小。

下面分析甲醇、乙醇、汽油三种燃料的喷雾锥角随喷射条件变化的情况，图11描述了汽油、甲醇、乙醇在喷射开始以后0.5ms时刻，不同喷射压力、不同环境压力对喷雾锥角特性曲线。

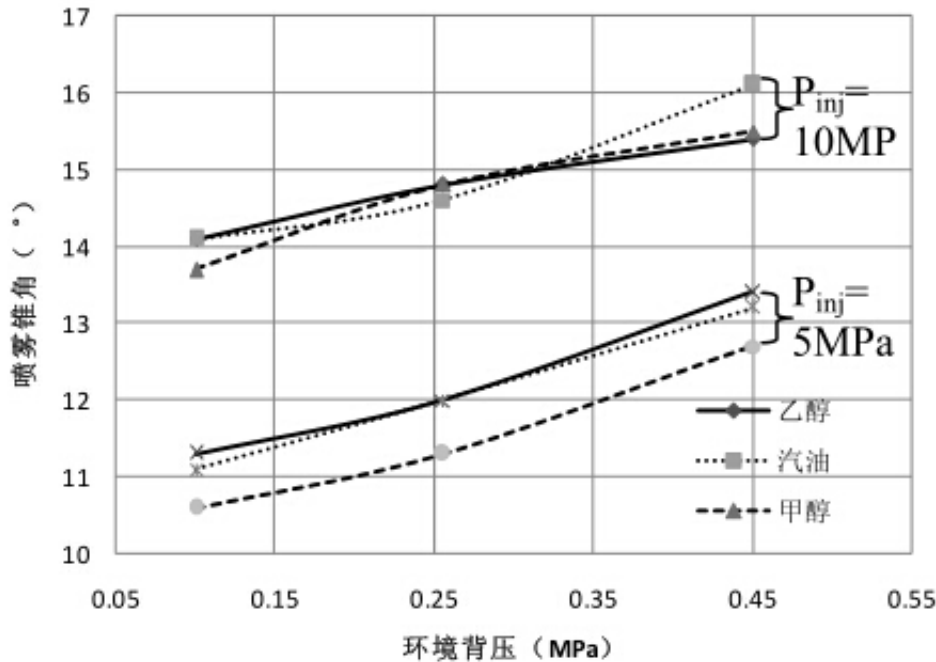


图 11 不同燃料在不同喷射条件下喷雾锥角曲线

由图11可以看出，随着环境背压的增加，喷雾的喷射锥角逐渐增大，在同样的喷射压力下，当环境背压从0.1MPa上升到0.45MPa的过程中，喷雾锥角增大了2.5°到3°，当环境背压一定的时候，当喷射压力从5MPa上升到10MPa时，喷雾锥角上升了3°左右。

当喷射压力为5MPa时，甲醇的喷雾锥角明显小于汽油和乙醇的喷雾锥角，但当喷射压力为10MPa时，这种差异并不显著，因而从图中未能总结出三种燃料对喷雾锥角特性的显著影响规律。

4.全文总结

通过分析激光测试的喷雾图像，掌握了DISI发动机中甲醇、乙醇、汽油三种燃料在不同阶段的喷雾特性，所得结论如下：

- 1) 在实验中，观测到三种燃料的喷射开始时刻不一样，存在时间不等的延时。汽油喷射开始时刻早于甲醇的时刻，而乙醇最晚。这种现象与燃料在喷嘴内部流动的形态有关，对于粘度越大的燃料，阀门开启需要的时间越长。
- 2) 在喷雾初始阶段，乙醇的贯穿距最短，其次是甲醇，汽油的贯穿距最长。利用Hiroyasu方程式，计算出甲醇与汽油之间贯穿距差距为6.4%，乙醇与汽油贯穿距的差距为12.3%，而由图像实际测得的甲醇贯穿距差距为6.7%，乙醇的差距为10.5%，实际与理论计算出的结果基本一致，这种不同燃料之间喷雾贯穿距的差异是由喷射燃料的初始速度以及燃料密度决定的。
- 3) 在完全雾化阶段，由于种燃料具有相似的表面张力，三者表现出相似的雾化特性，末端液滴的分布没有观测到明显区别；
- 4) 测量和分析了不同喷射压力、不同环境背压下三种燃料喷雾贯穿距和角度的变化，结果发现随着喷射压力的增大和环境背压的减小，喷雾的贯穿距增大。

在相同的喷射条件下，汽油喷雾的贯穿距长于甲醇的贯穿距，乙醇的贯穿距最小。对于乙醇而言，当环境背压增大的时候，贯穿距的差异减少，以喷射开始以后2ms时刻为例，当背压为0.1MPa时，乙醇的贯穿距比汽油的贯穿距少5mm，当背压上升到0.45MPa的时候，这种差距变为2mm。

- 5) 随着喷射压力的增大和环境背压的增大，喷雾的喷射角增大，当喷射压力从5MPa上升到10MPa，或者环境背压

从0.1MPa上升到0.45MPa时，单束喷雾锥角上升了 $2.5^{\circ} - 3^{\circ}$ ，但不同燃料之间的差距并未呈现明显规律。

5.致谢

感谢通用汽车公司高级工程师DavidCleary博士的技术支持。感谢实验室张高明硕士、张铭硕士、陈豪硕士在实验以及全文撰写过程中的大力支持。

参考文献

[1]解茂昭，内燃机计算燃烧学，大连：大连理工大学出版社，2005

[2]Arthur H Lefebvre. Atomization and Sprays. 1989;37-46.

[3]Min Xu, Keiya Nishida, Hiroyuki Hiroyasu. A Practical Calculation Method for Injection Pressure and Spray Penetration in Diesel Engines. SAE Paper 1992. 920624

[4]Christos Chryssakis, Dennis N Assanis. Development and Validation of a Comprehensive CFD Model of Diesel Spray Atomization Accounting for High Weber Numbers.SAE Paper 2006. 2006-01-1546.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/99712.html>