

# 一种研究柴油甲醇双燃料的定容燃烧弹试验装置

姚春德<sup>1</sup> 代 乾<sup>1,2</sup> 许汉君<sup>1</sup> 杨广峰<sup>1</sup>

1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室,天津,300072

2. 天津城市建设学院,天津,300384

**摘要:**设计并研制了一种定容燃烧弹试验装置,用于对柴油在甲醇/空气预混均质混合气中燃烧特性的基础研究。介绍了该试验装置的各子系统的原理、结构及特点。定容燃烧弹试验结果表明:甲醇抑制了柴油的着火燃烧,随着甲醇/空气混合气浓度的增大,燃烧火焰变暗,碳烟生成受到抑制。与空气热氛围相比,甲醇/空气混合气氛围延长了柴油的滞燃期,加长了火焰的浮起长度。火焰稳定后,甲醇氛围中火焰的浮起长度随时间的变化比在纯空气氛围中大。

**关键词:**定容燃烧弹;燃烧特性;甲醇;柴油

中图分类号:TK402

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.006

## An Experimental System of Constant Volume Combustion Bomb for Dual-fuel of Diesel/Methanol

Yao Chunde<sup>1</sup> Dai Qian<sup>1,2</sup> Xu Hanjun<sup>1</sup> Yang Guangfeng<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin, 300072

2. Tianjin Institute Urban Construction, Tianjin, 300384

**Abstract:** An experimental system of constant volume combustion bomb was designed and developed, which was carried out for the fundamental research of combustion characteristics of diesel in premixed air/methanol mixtures atmosphere. The distribution, function and characteristics of the sub-system of the experimental equipment were introduced. The experimental results show that the existence of methanol in the mixture can suppress ignition of diesel fuel. As the increase of the methanol concentration in the mixture, the flame of the combustion becomes dim and consequently the formation of soot are inhibited. Comparing with the combustion of diesel in the pure air atmosphere the ignition delay of diesel fuel is postponed and the lift-off length of diesel fuel flame is extended and the variation of lift-off length is strengthened in the premixed methanol ambient.

**Key words:** constant volume combustion bomb; combustion characteristic; methanol; diesel

## 0 引言

能源危机与环境恶化使得人们对降低内燃机燃油消耗率和有害物质的排放的要求越来越高。将甲醇作为代用燃料是解决我国石油资源短缺的

一条有效途径<sup>[1]</sup>。姚春德等<sup>[2-3]</sup>提出了采用组合燃烧的新方式来燃用甲醇,研究表明,采用这种组合燃烧可有效减少柴油机的微粒和 NO<sub>x</sub> 排放,而且可以实现甲醇的大比例替代,达到既减少柴油消耗,又减少有害气体排放的目标。为了使组合燃烧的方式得到进一步完善,从根源上探究柴油引燃甲醇/空气预混均质混合气的燃烧过程和燃烧特性是非常有必要的。实际中发动机的燃烧过

收稿日期:2011-03-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20533040,50876075);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200800560040)

[11] Pan Chao, Zuo Jianmin, Wang Mulan, et al. Theoretical Analysis and Experiment on Dynamic Performance of Linear Servo System Based on Pole Placement[C]//2010 3rd International Conference on Computer and Electrical Engineering(ICCEE). Chengdu, 2010:149-153.

[12] Zhang Dailin, Chen Youping, Zhou Zude, et al. Robust Adaptive Motion Control of Permanent Magnet Linear Motors Based on Disturbance Compensation[J]. IEEE Electr. Power Appl., 2007, 4: 543-548.

[13] 潘超,左健民,汪木兰. 基于前馈及反馈补偿的高

性能直线伺服系统[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(12):3025-3029.

(编辑 王艳丽)

**作者简介:**汪木兰,男,1967年生。合肥工业大学电气与自动化工程学院博士研究生,南京工程学院先进数控技术江苏省高校重点实验室教授。主要研究方向为先进数控技术、运动控制中先进控制策略。发表论文 100 余篇。张崇巍,男,1945年生。合肥工业大学电气与自动化工程学院教授、博士研究生导师。林健,男,1971年生。南京工程学院先进数控技术江苏省高校重点实验室副教授。潘超,男,1982年生。江苏大学机械工程学院博士研究生。

程非常复杂,燃烧基础研究在模拟燃烧的设备上进行。现在常用的燃烧模拟试验设备有激波管、快速压缩机、单缸机以及定容燃烧弹等。激波管设计难度大,对加工工艺要求高,所以制造成本很高,而且激波管加热过程难控制,因此它多用于爆炸波与爆炸力学效应、航空发动机、火箭发动机等的研究,车用发动机燃烧试验中应用较少<sup>[4-5]</sup>。快速压缩机在燃烧学研究领域的应用较广泛,但是受其自身的结构以及工作原理的限制,多用于对低速发动机或发动机在低速工况下的燃烧模拟研究,在高速发动机的研究中应用较少<sup>[6]</sup>。单缸机在发动机的试验研究中被广泛应用,但在工作过程中单缸机存在着较大的循环变动,且其热力学参数有较大的随机性<sup>[7]</sup>。本文采用可以精确控制多种热力学参数的定容燃烧弹进行燃烧基础研究,设计了用于该研究的定容燃烧弹试验装置,介绍了该试验装置各子系统的组成、特点及应用。

### 1 试验系统的组成

图1是定容燃烧弹试验装置示意图。系统主要包括以下几个部分:定容燃烧弹系统、燃油注入系统、温度控制系统、混合气配置系统、压力测量和高速摄像系统。

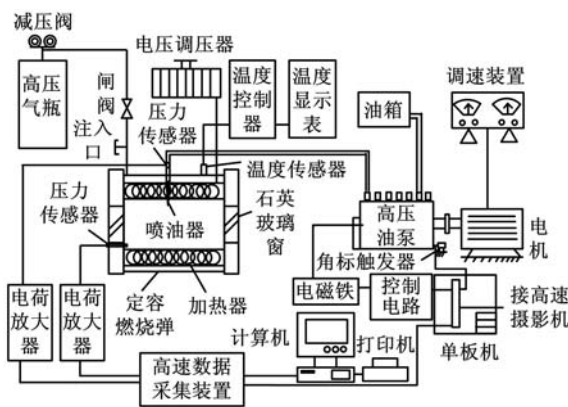
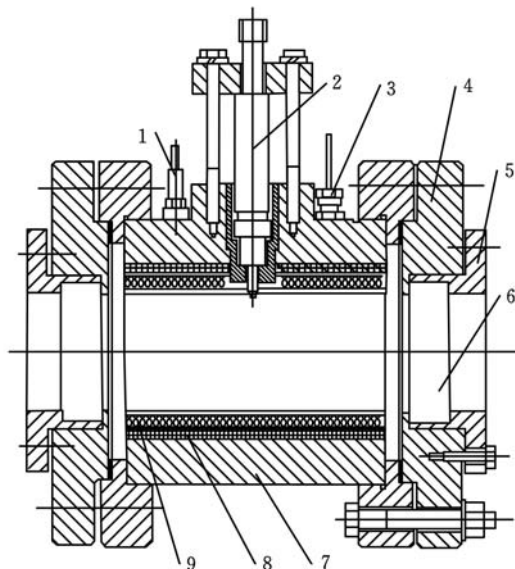


图1 试验装置示意图

#### 1.1 定容燃烧弹系统

为了便于研究在高温高压条件下柴油引燃甲醇/空气预混均质混合气的燃烧过程,定容燃烧弹装置必须能够模拟与实际发动机相似的高温高压条件。图2为定容燃烧弹结构示意图,主要尺寸为:内膛直径100mm,长200mm,两端盖上的观察窗用石英玻璃制成,其尺寸为 $\phi 130\text{mm} \times 32\text{mm}$ ,有效视场范围为直径为100mm的圆形区域,有充分的空间观察油束在碰壁前的发展及燃烧过程。采用该装置研究高温高压柴油的喷雾燃烧过程时,最高加热温度为1073K,最高承压力为10MPa。



- 1. 接线柱 2. 喷油器 3. 热电偶 4. 端盖 5. 压盖
- 6. 石英玻璃 7. 燃烧弹体 8. 隔热材料 9. 电阻丝

图2 定容燃烧弹结构图

#### 1.2 燃油注入系统

由于甲醇着火温度在相同条件下较柴油低,并且易于点燃,所以在装置加热条件下注入系统中很容易被高温的电炉丝点燃,因此笔者采用预混的方式来模拟柴油引燃甲醇/空气预混均质混合气。在容弹腔体内的温度,特别是电炉丝温度低于引燃温度时,将甲醇通过混合气进气管上的三通阀注入,加热形成所需要的混合气氛围,并且通过计算确定注入量,保证混合气浓度在着火界限之外,然后继续加热、加压,形成柴油自燃所需要条件。

#### 1.3 温度控制系统

本系统包括加热装置和温度控制器。加热电阻丝埋于弹体内的炉膛内,对容弹内的燃料进行加热。使用调压器控制加热电阻丝的电压。试验中使用的单相调压器最大容量为10kW,输出电压为0~250V,电阻丝的功率为5kW,能实现快速加热,能在20min之内把密度为 $16\text{kg/m}^3$ 的压缩空气由室温加热到1073K。容弹内部装有热电偶温度传感器,由与之相连的温度控制器显示容弹内温度。实验中采用了TDW-201型温度控制器,其量程为0~1000℃。

#### 1.4 混合气配置系统

为了研究预混可燃混合气当量燃空比、压力等参数对燃烧过程的影响,笔者设计了混合气配置系统,气源为压缩空气。首先,用真空泵将容弹内气体抽出,将甲醇加热蒸发注入定容燃烧弹内。然后,打开闸阀和减压阀将气瓶中的气体充入容弹中,配置混合气。充气结束后,关闭减压阀和闸

阀。闸阀的作用是保持弹体压力以及防止火焰回入进气管中。

### 1.5 压力测量系统

试验中使用石英压电型压力传感器(型号为 SYC03A)和 KISTLER 公司生产的硅压阻传感器(型号为 4067A)分别测量燃烧压力和油管压力。压力采集频率为每秒 10 000 个点,信号通过压力采集线传送至电荷放大器,经过放大后,传入计算机,通过 LabVIEW 软件处理得到。电荷放大器的型号为 YE5850。

### 1.6 高速摄像系统

高速摄像系统主要包括摄像头(charge coupled device, CCD)、主机、监视器和多通道数据采集器(MCDL)。其中 CCD 为 YORK TECH Phantom v7 系列高速数字摄像机,摄像机的基本内存为 2GB,最高摄像速度为 190 000 帧/秒。拍摄使用以燃烧火焰为光源的直接摄影拍摄法。直接摄影拍摄法的图像是燃烧火焰的直接信息,方法简单,不需要设计光学系统,图像分析也比较容

易。高速摄像系统的调整应在定容燃烧弹组装好之后进行。首先在石英玻璃窗口中心放置一光源(此光源为单联新闻灯,在本试验中起照明作用,以方便高速摄影机的调节。型号:QH-H1300;电流:6A;色温:3200K,1000W 碘钨灯管),然后调整 CCD 摄像头的高度、角度、焦距和光圈,使石英窗口范围内的图像可以被清晰地采集到。

## 2 定容燃烧弹系统的应用

### 2.1 燃烧过程图像

图 3 所示为纯柴油在空气中和不同浓度甲醇空气预混均质混合气中的着火情况,其中每个图像的时间间隔为 0.1ms。试验中的燃烧起始温度为 893K,针阀开启压力为 22MPa,定容燃烧弹内的背压为 3MPa。从图 3 可以看出,随着甲醇在预混均质混合气中浓度的增大,柴油的着火过程受到抑制,这与以往在发动机试验中得到的结论一致。从图 3 中还可以看出,火焰的亮度随混合气浓度的增大而变暗,说明碳烟的生成受到了抑制。

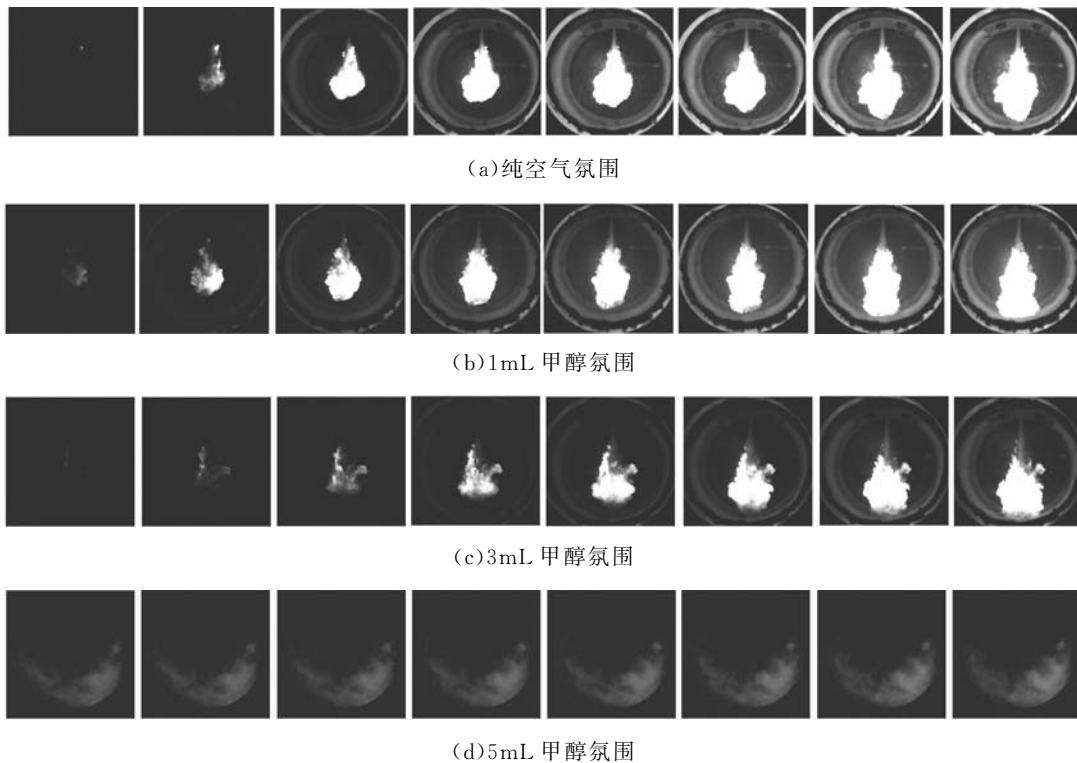


图 3 柴油在不同氛围中的着火过程

### 2.2 滞燃期

目前用压升滞燃期和发光滞燃期来确定着火滞燃期的较多,因为这两个物理量较易测量,压力传播速度快,测量仪器可以快速响应压力的变化情况。但从燃料的燃烧机理来看,发光滞燃期能更真实地反映着火滞燃期情况。本研究所测得的滞燃期是柴油的发光滞燃期,即从开始喷油到可

以测量到明显的着火点(可见闪光点)这一段时间。图 4 所示为柴油在空气及甲醇/空气预混均质混合气中滞燃期随初始温度的变化规律曲线。从图 4 可以看出,随着初始温度的降低,柴油在不同氛围中的滞燃期都有所延长。相对于柴油在纯空气氛围中的燃烧,加入甲醇延长了柴油的滞燃期,并且随着甲醇在预混均质混合气中浓度的增

大滞燃期得到进一步延长。较长的滞燃期可以延长油气混合时间,加大预混燃烧的比例。

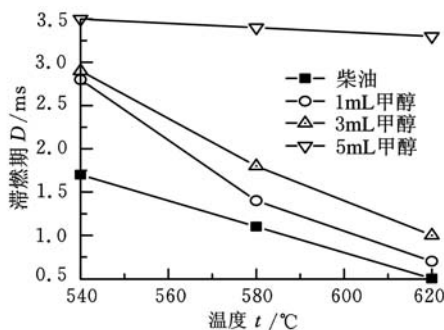


图4 柴油在不同氛围中滞燃期随初始温度的变化

### 2.3 火焰浮起长度

扩散燃烧火焰的浮起长度(lift-off length),即火焰脱离喷孔的最近距离,会通过影响油气混合对碳烟的形成过程,对其造成重要的影响<sup>[8]</sup>。浮起长度与碳烟生成和氧化的关系比较复杂,低温、低空气密度以及高喷射压力均可导致浮起长度的增大。总的来说,浮起长度的增大可以为油气混合赢得一定的时间,使油气混合充分进行,增加预混燃烧的比例,减小碳烟的生成。图5所示为不同氛围对柴油火焰浮起长度的影响曲线。由图5可知,在甲醇氛围中柴油火焰的浮起长度远大于空气氛围中柴油火焰的浮起长度。但两种氛

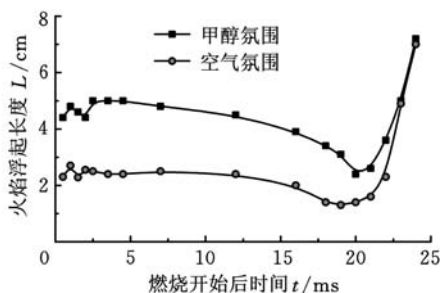


图5 火焰浮起长度随燃烧时间的变化

围中,曲线的变化规律基本上相同。初期,即5ms之前,火焰浮起长度均有小的起伏,波动的原因可能是:开始受逐渐加强的喷射射流的影响,火焰远离喷孔,随后燃烧加强,火焰又向喷孔方向靠近,接着射流进一步加强,火焰又远离喷孔,最后,喷油稳定后,火焰也就跟着稳定;中期,即5ms至15ms是喷油稳定期,在这段时间内,可以看到,纯空气氛围柴油的火焰浮起长度几乎无变化,而对于甲醇,浮起长度呈线性减小,原因在于随着燃烧的进行,温度的升高,削弱了甲醇抑制柴油低温氧化着火的作用,柴油低温氧化反应加剧,使得火焰向上游扩展,渐渐接近在纯空气氛围中的浮起长度;后期,即15ms以后,喷油速度降低,两种氛围下柴油的火焰浮起长度均快速减小,到约22ms

时,喷油结束,失去柴油支持的火焰无法保持,二者的火焰浮起长度均急剧增大。

### 3 结论

(1)定容燃烧弹试验装置能方便地改变热力学参数(包括空燃比、压力和温度)。

(2)甲醇氛围对柴油的着火燃烧具有很大的抑制作用,燃烧火焰的亮度随着混合气浓度的增大而变暗,碳烟的生成受到抑制。

(3)随着初始温度的降低,柴油在不同氛围中的滞燃期都延长。相对于柴油在纯空气氛围中的燃烧,甲醇延长了柴油的滞燃期,并且随着混合气浓度的增加滞燃期进一步延长。

(4)柴油在甲醇/空气混合气氛围中的火焰浮起长度大于在纯空气氛围中的火焰浮起长度。火焰稳定后,甲醇氛围中火焰的浮起长度随时间的变化比在纯空气氛围中大。

### 参考文献:

- [1] 黄露,张凡,帅石金,等. 甲醇与汽油混合气形成的可视化试验与数值模拟[J]. 车用发动机, 2008(3): 8-12.
- [2] 姚春德,王银山,李云强,等. 柴油机清洁燃用甲醇的组合燃烧法[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 24-27.
- [3] 姚春德,李云强,王银山,等. 进气预混甲醇降低柴油机碳烟与 $\text{NO}_x$ 排放的影响参数研究[J]. 汽车工程, 2004, 26(6): 635-639.
- [4] 俞鸿儒,李斌,陈宏. 激波管氢氧爆轰驱动技术的发展进程[J]. 力学进展, 2005, 35(3): 315-322.
- [5] 王苏,范炳诚,何宇中,等. 硅烷对JP10和煤油点火特性影响的激波管研究[J]. 力学学报, 2007, 39(4): 460-465.
- [6] 郑士卓. 低热值气体燃料层流燃烧特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [7] 林辉. 定容燃烧弹的研制[D]. 青岛: 青岛大学, 2009.
- [8] 虞育松,李国岫,孙晶晶. 基于PaSR湍流燃烧模型的直喷式柴油机火焰举升长度[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(1): 91-95. (编辑 王艳丽)

作者简介:姚春德,男,1955年生。天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室教授、博士。主要研究方向为内燃机工作过程、内燃机废气净化、替代燃料。发表论文200余篇。代乾,男,1981年生。天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室博士研究生,天津城市建设学院能源与机械工程系讲师。许汉君,男,1986年生。天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室博士研究生。杨广峰,男,1978年生。天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室博士研究生。