

预混层流燃烧中离子电流与火焰传播速度的相关性研究^①

邹星澄^② 吴筱敏^{③*} 皮 敏* 高忠权*

(西安交通大学电子与信息工程学院电子科学与技术系 西安 710049)

(* 西安交通大学能源与动力工程学院汽车系 西安 710049)

摘 要 在当量空燃比 $\phi_a = 1$ 、初始压力 $P_0 = 0.1\text{MPa}$ 、初始温度 $T_0 = 300\text{K}$ 、离子电流装置偏置电压 $U = 400\text{V}$ 的条件下,对压缩天然气掺氢(CNG + H_2)、液化石油气(LPG)、二甲醚(DME)在定容燃烧弹中的球形火焰燃烧过程进行了分析,分别测量了三种燃料的层流火焰传播速度、离子电流以及燃烧压力,利用相关性原理探讨了预混层流火焰传播速度与离子电流之间的关系,研究结果表明:正常燃烧的离子电流通常由点火、火焰前锋以及焰后区三部分组成,而火焰传播速度与焰后区离子电流峰值的样本相关系数在 0.51 ~ 0.95 之间。因此,三种燃料焰后区的离子电流峰值与层流火焰传播速度之间均存在一定的相关性。

关键词 离子电流,层流火焰传播速度,相关性原理,定容燃烧弹

0 引 言

近年来,由于能源短缺,寻找替代燃料并对其燃烧特性进行研究已经成为紧迫的任务。层流燃烧是研究燃烧机理的重要内容,是发展和验证化学反应动力学机理的主要内容,也是研究湍流燃烧的基础,层流火焰传播速度是层流燃烧研究中最重要参数之一,对于判断发动机的燃烧以及指导燃烧过程的改进都具有较大的理论价值和工程使用价值。因此,目前很多研究者都在该领域开展工作,如 Zhang, Ilbas, Huang, Hakan 等人分别对甲醇、甲醇掺氢、二甲醚、天然气以及天然气掺氢,汽油添加乙醇等不同燃料的层流火焰传播速度进行了测量^[1-6]。但这些测量都是根据球形火焰扩散理论,在定容燃烧室中利用高速摄影记录球形火焰的生长历程,从而提取火焰的传播速度,其实验和计算工作量非常大^[7]。为了便捷地获得火焰传播速度,一些研究者采用计算模型进行研究,如 Hakan^[4]利用准维模型对汽油、乙醇以及汽油添加乙醇进行了数值计算,而 Khizer^[6]则采用多区模型计算了甲醇,并获得了与实验值较为一致的结果,但这些方法计算工作量较大并且比较费时。另外,由于代用燃料的种类比较多,各

种燃料之间的掺混以及掺混比例都将使掺杂混合物燃烧速度发生变化,因此,如何能简单快捷并准确的计算出层流火焰传播速度对于燃料的燃烧特性分析非常有益。离子电流法是一种新型的燃烧在线测量和检测方法,它利用发动机的火花塞作为传感器,对燃烧中以及高温所产生的离子进行测量,无需附加其它装置即可实现燃烧信号的测量和检测,降低了测量成本,在国内外引起了广泛的关注。目前所涉及的领域较多地集中在测量电极自身的几何参数、燃烧压力、最大压力位置、空燃比等检测和控制,以及爆震和失火等故障的诊断方面^[8-10]。本研究在定容燃烧弹中利用点火电极测量了压缩天然气掺氢、液化石油气、二甲醚的离子电流,并对三种燃料的离子电流与层流火焰传播速度的相关性进行了研究,为用离子电流来计算与测量层流火焰传播速度奠定了基础。

1 实验研究

采用如研究论文^[8]所述的在定容燃烧弹中点火电极测量离子电流信号的原理和实验装置。本文在初始压力 $P_0 = 100\text{kPa}$ 、初始温度 $T_0 = 300\text{K}$ 、当量空燃比 $\phi_a = 1$ 、离子电流偏置电压 $U = 400\text{V}$ 的条件

① 973 计划(2007CB210006)和 863 计划(2006AA110112)资助项目。

② 男,1987 年生;研究方向:电子技术;E-mail: zouxingcheng@stu.xjtu.edu.cn

③ 通讯作者, E-mail: xmwu@mail.edu.cn

(收稿日期:2008-07-15)

下,分别对压缩天然气(compressed natural gas, CNG)掺氢 20% (CNG + 20% H₂)、液化石油气(LPG)和二甲醚(DME)进行了实验测试研究,利用高速摄影系统拍摄了火焰发展的纹影照片,并利用离子电流检测系统和压力传感器分别测量了燃烧的离子电流和压力信号,同时根据双区准维模型^[7]计算了已燃区的温度。

1.1 离子电流与火焰发展

由于上述三种燃料的离子电流曲线有着类似的性质,图 1 选取了天然气掺氢 20% 的离子电流、压力信号曲线以及火焰发展照片,图中离子电流与照片中的数字标记表示记录时间为同一时刻。由图 1

可见,离子电流很明显地由点火、火焰前锋和焰后区三部分组成。其中又有火焰前锋区第 1 峰(I_1)、焰后区第 2 峰(I_2),三个阶段的时间分别为 t_1 , t_2 和 t_3 。点火信号是由高压放电,击穿电极间隙引起的,其特征是数值较大而持续时间短暂,而火焰前锋的离子信号则是由电极附近的可燃混合气燃烧所产生的离子和自由电子构成的,与滞燃期和燃烧初期的火焰传播速度有关,其大小和持续时间取决于火焰前锋面由化学反应所产生的离子数^[8-10]。焰后区的信号一般在压力到达最大值附近时产生,其大小和持续时间与已燃气体中的正、负离子、电子以及温度有关^[8-10]。

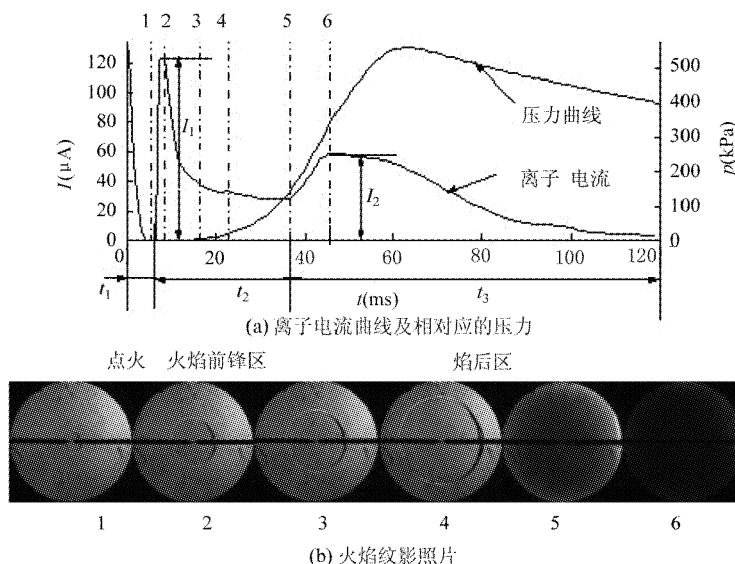


图 1 离子电流与压力及相对应的火焰纹影照片

1.2 三种燃料的离子电流与已燃区温度

图 2 是三种燃料所对应的离子电流以及根据双区准维模型和压力实验值计算的已燃区温度。由图可见,在这三种燃料的燃烧中,离子电流所呈现的特征基本保持一致,均由点火、火焰前锋与焰后区三部分组成,并且离子电流第 2 峰峰值与最高温度几乎同时出现,最高温度越大其离子电流第 2 峰也越大。另外,三种燃料离子电流第 1 峰峰值到达时间基本一致,各峰值大小相差不大,而第 2 峰峰值到达时间差别比较大,CNG + 20% H₂ 第 2 峰峰值时间是 DME 的 1.25 倍,LPG 第 2 峰峰值时间是 DME 的 1.91 倍。

2 火焰传播速度分析

为了得到给定初始温度和压力下的层流火焰速

度值,在容弹试验条件下,当层流传播火焰半径小于 26mm 时,未燃区的温度和压力变化甚小,而为了消除点火对火焰发展产生波动的影响,火焰半径要大于 5mm^[11]。因此,在本文中测量了火焰半径在 6 ~ 26mm 之间部分的层流火焰传播速度。根据三种不同燃料所获得的纹影照片,通过测量各时刻下火焰半径 r_u 得出了火焰半径与时间,以及火焰传播速度 S_n 随火焰半径的变化关系如图 3 和图 4 所示。由图可见,对于试验的三种燃料,火焰半径的增长趋势基本都呈线性关系,而火焰传播速度随着火焰半径的变化规律则有所不同,二甲醚的火焰传播速度随着火焰半径的增加而减少,压缩天然气掺氢 20% 的火焰传播速度随着火焰半径的增加先增加后保持不变,液化石油气的火焰传播速度随着火焰半径的增加基本保持不变。

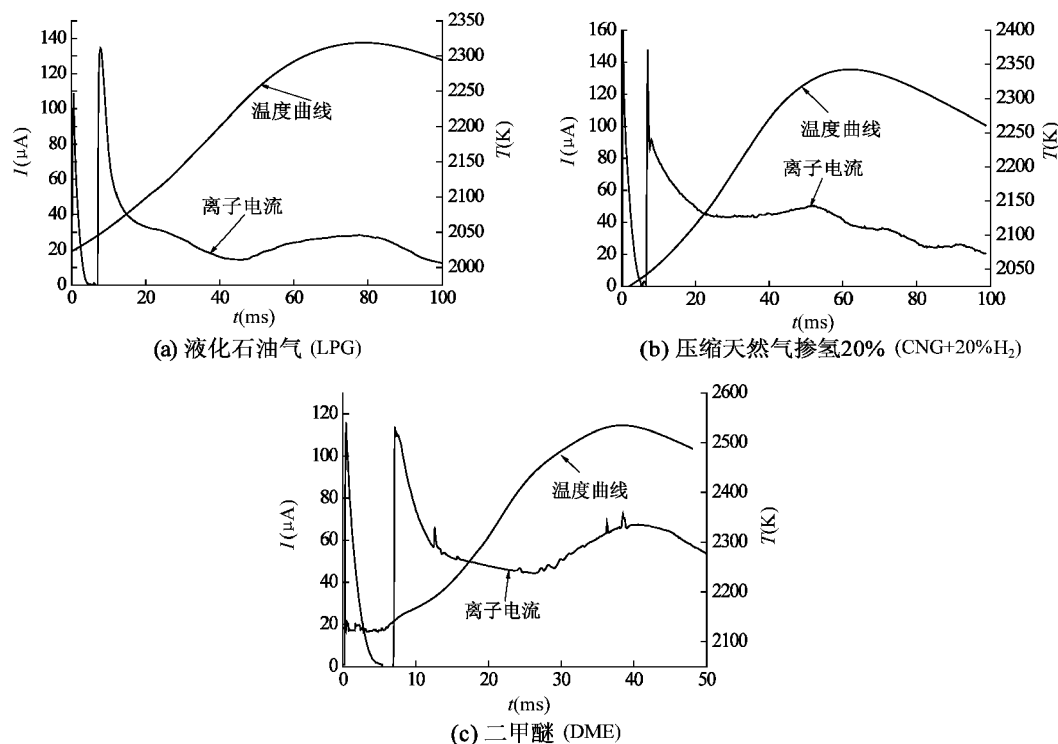


图 2 三种燃料的离子电流与温度曲线

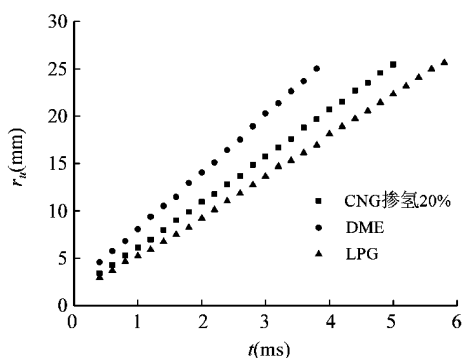


图 3 火焰半径与时间的关系图

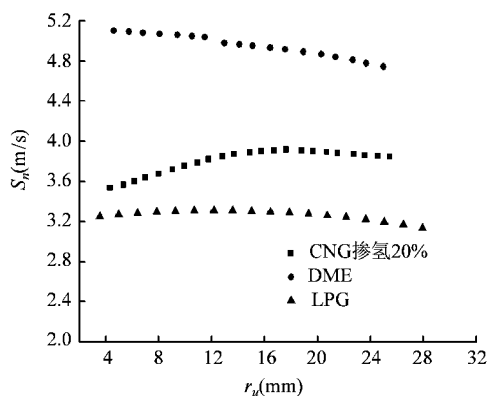


图 4 火焰传播速度随火焰半径的变化关系

根据 Mallard-Le Chatelier^[12]理论可知,火焰传播速度与温度之间呈现指数关系:

$$S_n \propto (e^{-T_A/T})^{1/2} \quad (1)$$

式中, T_A 为活化火焰温度(K), T 为火焰温度(K)。

从图 2 可知,离子电流第 1 峰对应的是燃烧初始温度其值较低,而离子电流第 2 峰对应的温度已接近最大值。因此,由离子电流第 2 峰对应温度计算得到的火焰传播速度更接近真实值,同时也说明了火焰传播速度与第 2 峰之间具有相关性,离子电流第 2 峰是表征火焰传播速度的重要变量。

3 相关性分析研究

在多变量的分析中,为了既简化繁多的变量又避免重要信息的遗漏,本文对预混层流燃烧速度与离子电流参数之间的相关性进行了研究。由于火焰前锋区以及焰后区离子电流的幅值以及持续时间是表征其特征最重要的参数,直接反映了燃烧状况,因此,首先选取了这些参数进行相关性分析。相关性研究主要包括相关系数的求法和相关系数检验^[13]。

相关系数是刻画 x, y 变量间线性相关关系强弱的一个指标。设样本容量为 n 的变量组合 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 则 x 与 y 之间的样本相关系数 ρ 可定义为

$$\rho = l_{xy} / \sqrt{l_{xx} \times l_{yy}} \quad (2)$$

式中:

$$l_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

由相关系数的定义可知,其值反映的是 x 与 y 之间关系的密切程度。但通过上述方法得到的相关

系数,还不能简单确定两组变量之间存在关系。还需通过相关系数显著性检验,确定变量之间是否存在相关性,对于两个不同的变量可采用 f 分布检验。当 (x, y) 误差服从 f 分布时,有统计量 $F_0 = \frac{\rho^2(n-2)}{1-\rho^2}$ 。在显著性水平 α 下(本文取 α 为 0.05),从 f 分布表查得所对应的上侧分位数为 $F_\alpha(1, n-2)$,从而得到拒绝域 $(F_\alpha(1, n-2), +\infty)$ 。即若 $|F_0| > F_\alpha(1, n-2)$,则拒绝原假设,认为 x 与 y 之间具有相关性,反之,则认为 x 与 y 不相关。

表 1 至表 4 给出了相应的相关性分析结果。

表 1 火焰传播速度与三种燃料离子电流第 1 峰相关系数

燃料	采样频率(ms)	样本数 n	相关系数	第 1 峰 F 统计量值 F_0	F 检验的拒绝域	相关性检验结论
DME	0.2	34	0.34	4.13	$(4.15, +\infty)$	不相关
CNG + 20% H	0.4	21	-0.21	0.90	$(4.38, +\infty)$	不相关
LPG	1	30	0.24	1.76	$(4.20, +\infty)$	不相关

表 2 CNG 掺氢 20% 燃料火焰传播速度与离子电流第 2 峰相关系数

采样频率(ms)	样本数 N	相关系数	第 2 峰 F 统计量值 F_0	F 检验的拒绝域	相关性检验结论
0.2	34	0.94	241.59	$(4.15, +\infty)$	相关
0.4	34	0.95	310.92	$(4.15, +\infty)$	相关
1	34	0.89	125.71	$(4.15, +\infty)$	相关

表 3 DME 燃料火焰传播速度与离子电流第 2 峰相关系数

采样频率(ms)	样本数 n	相关系数	第 2 峰 F 统计量值 F_0	F 检验的拒绝域	相关性检验结论
0.2	21	0.76	26.19	$(4.38, +\infty)$	相关
0.5	21	-0.70	18.47	$(4.38, +\infty)$	相关

表 4 LPG 燃料火焰传播速度与离子电流第 2 峰相关系数

采样频率(ms)	样本数 n	相关系数	第 2 峰 F 统计量值 F_0	F 检验的拒绝域	相关性检验结论
0.1	30	0.51	9.67	$(4.20, +\infty)$	相关
0.5	30	0.63	18.73	$(4.20, +\infty)$	相关
1	30	0.66	21.53	$(4.20, +\infty)$	相关
2.5	30	0.89	110.60	$(4.20, +\infty)$	相关

4 结果及讨论

4.1 火焰传播速度与离子电流第 1 峰

由图 3 和图 4 可知,三种燃料的火焰传播速度

有一定差异,二甲醚的火焰传播速度最快,压缩天然气掺氢 20% 次之,液化石油气最慢,因此在采样频率上二甲醚、压缩天然气掺氢 20% 以及液化石油气也是由高到低依次排列。

由表 1 可知,三种燃料传播速度与电子电流第

1 峰两个物理量之间不具有相关性。

4.2 火焰传播速度与离子电流第 2 峰

离子电流第 2 峰持续时间是一个很重要的参数,该时间间隔越短表明该燃烧反应速度越快。下面分析火焰传播速度与第 2 峰时间间隔之间的关系。

由表 2 可见,对于压缩天然气掺氢 20% 的燃料,在三种采样时间频率下的相关性都成立,相关系数在 0.89~0.95 之间,在采样时间频率为 0.4ms 时 CNG 掺氢 20% 燃料火焰传播速度与离子电流第 2 峰相关系数为最大。

由表 3 可见,DME 燃料火焰传播速度与离子电流第 2 峰是相关的。在采样时间频率为 0.2ms 时相关系数最大。

由表 4 可知,液化石油气燃料在这 4 种不同的采样频率下,其火焰传播速度与离子电流第 2 峰的相关性都成立。

通过上面的分析可知,三种燃料的离子电流只有第 2 峰与火焰传播速度之间均存在一定的相关性,与离子电流第 1 峰相关性并不成立。

5 结 论

(1) 利用球形扩散火焰理论分析纹影照片,获得了 CNG 掺氢 20%、DME、LPG 与空气混合气的层流火焰传播速度。三种燃料火焰半径的增长趋势基本都呈线性变化关系,而火焰传播速度随着火焰半径的变化规律则有所不同,二甲醚的火焰传播速度随着火焰半径的增加而减少,而压缩天然气掺氢 20% 的火焰传播速度随着火焰半径的增加先增加后保持不变。液化石油气的火焰传播速度随着火焰半径的增加基本保持不变。

(2) 三种燃料 CNG 掺氢 20%、DME、LPG 的离子电流所呈现的特征基本保持一致,均由点火、火焰前锋与焰后区三部分组成,并且离子电流第 2 峰峰值与最高温度几乎同时出现。三种燃料离子电流第 1 峰峰值到达时间基本一致,而离子电流第 2 峰峰值到达时间差别比较大。

(3) 在三种燃料 CNG 掺氢 20%、DME、LPG 中,层流火焰传播速度只与离子电流第 2 峰存在一定的

相关关系,与离子电流第 1 峰不存在相关性。离子电流第 2 峰与层流火焰传播速度之间的样本相关系数范围是 0.51~0.95。

参考文献

- [1] Zhang Z, Huang Z, Wang X, et al. Measurements of laminar burning velocities and Markstein lengths for methanol-air-nitrogen mixtures at elevated pressures and temperatures. *Combustion and Flame*, 2008, 74(7):1-11
- [2] Ilbas M, Crayford A P, Yilmaz I, et al. Laminar-burning velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane-air mixtures: an experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006,31(12):1768-1779
- [3] Huang Z, Wang Q, Yu J, et al. Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-air premixed mixtures. *Fuel*, 2007,86(15):60-71
- [4] Hakan B. Theoretical investigation of flame propagation process in an SI engine running on gasoline-ethanol blends. *Renewable energy*, 2007,32(5):758-771
- [5] Huang Z, Zhang Y, Zeng k, et al. Measurement of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures. *Combustion and Flame*, 2006,146(1-2): 2-11
- [6] Khizer S, Stone C. Measurements of laminar burning velocity of methanol and air from a constant-volume vessel using a multizone model. *Combustion and Flame*, 2004, 139(1-2): 152-166
- [7] 蒋德明.内燃机燃烧与排放学.西安:西安交通大学出版社,2001.270-282
- [8] Wu X, Li K, Jiang D. Investigation of air-fuel ratio control using ionic current signal. *Proceeding of the institution of mechanical engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, 2007, 221(9):1139-1148
- [9] Attard P, Micallef J. Ion Current Combustion Technology for Controlled Auto-ignition Gasoline Engines. *International journal of engine research*, 2007,8:429-437
- [10] Huang T, Mehta D. Investigation of an in-cylinder ion sensing assisted HCCI control strategy. *SAE transactions*, 2005, 114(3):180-189
- [11] Heywood J B. Internal Combustion Engine Fundamentals. Columbus: Mcgraw-hill Book Company, 1988.427-437
- [12] 蒋德明,陈长佑,杨嘉林等.高等车用内燃机原理(下册).西安:西安交通大学出版社,2006.148-15
- [13] 梅长林,范金城.数据分析方法.北京:高等教育出版社,2006

The correlation of ionic current and flame propagation speed

Zou Xingcheng, Wu Xiaomin^{*}, Pi Min^{*}, Gao Zhongquan^{*}

(Department of Electronic Science and Technology, School of Electronic and Information Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(* Department of Automotive Engineering, School of Energy and Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract

Spherically, expanding flames of methane-hydrogen (hythane) and liquefied petroleum gas (LPG) and dimethyl ether (DME) were analysed in a constant volume combustion bomb at the initial condition of equivalence fuel-air ratio $\phi_a = 1$, pressure $P_0 = 0.1\text{MPa}$ and temperature $T_0 = 300\text{K}$. The laminar flame speed, ionization current and pressure of three fuels were measured, respectively. The correlation theory principle is used to establish the relationship between pre-mixed laminar flame propagation speed and the ionization current. The results show that the time history of the ionization current consists of three phases, i.e. ignition, flame front and post flame, within a normal ignition and combustion processes. The correlation coefficient between flame propagation speed and the current peak during post flame phase is from 0.51 to 0.95. Therefore, the post flame current peak can be used to forecast laminar flame speed for the three fuels.

Key words: ionization current, laminar flame speed, correlation principle, constant volume combustion bomb