

DOI: 10.7652/xjtuxb201507010

电极位置与电极面积对离子电流影响的试验研究

李春艳, 高忠权, 刘兵, 吴筱敏, 黄佐华

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在定容燃烧弹中将 5 个不同面积的电极安装在容弹中的不同位置,通过采用不同测量电极组合测量了燃烧过程中产生的离子电流信号。以离子电流信号、燃烧压力信号和火焰纹影照片为基础数据,分析了电极位置和电极面积对离子电流的影响。试验结果表明:电极位置会影响离子电流的出现时刻、大小、峰值及峰值时刻等特征参数;当正电极一定时,离子电流升高的次数随负电极数量的增加而增多,说明离子电流能够反映电极附近的局部燃烧信息;火焰与正电极、负电极可接触面积影响着电极吸收的电荷量及离子电流的幅值,且负电极面积的影响大于正电极面积的影响。该研究结果可为离子电流法获取发动机缸内燃烧信息的应用提供理论依据。

关键词: 电极位置;电极面积;离子电流;定容燃烧弹

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)07-0055-06

Experimental Investigation for Influences of Electrode Location and Area on Ionic Current

LI Chunyan, GAO Zhongquan, LIU Bing, WU Xiaomin, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Five electrodes with different areas were installed at different locations of the constant volume combustion bomb. Ionic current during combustion was obtained by the combination of different measuring electrodes. The influences of electrode location and area on ionic current were analyzed according to ionic current signals, pressure signals and schlieren pictures. The experiments show that the electrode location can affect starting timing, value, peak, peak timing, etc. of ionic current. When the anode keeps constant, the number of rising signals of ionic current increases with the number of cathode, revealing that partial combustion information in the vicinity of the electrode can be extracted from ionic current. The charge absorbed by electrodes increases with the increasing anode and cathode areas. Therefore, ionic current increases with the increasing anode and cathode areas, and cathode area exerts a greater effect on ionic current than anode area, which provides a theoretical basis for application of ionic current method to measuring combustion conditions of engine.

Keywords: electrode location; electrode area; ionic current; constant volume combustion bomb

离子电流法作为近年来新型发动机在线测量方法,因其包含丰富的燃烧信息,如空燃比、压力峰值等,且具有结构简单、成本低廉和响应性能好等优点,

引起了发动机测量和控制领域研究者的广泛关注^[1-4],并就电极位置和电极面积与离子电流的关系展开了大量的研究。Yoshiyama 等在一台汽油机的

收稿日期: 2014-10-14。 作者简介: 李春艳(1990—),女,硕士生;高忠权(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51306143);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xj2013001)。

网络出版时间: 2015-04-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150427.1754.003.html>

气缸垫内通过对称布置 8 个离子电流测量电极,成功检测了火焰传播模型^[5]。Wilstermann 等研究了火花塞中心电极结构与离子电流之间的关系^[6]。高忠权等通过将不同结构的圆盘布置在正、负测量电极上,发现电极面积影响离子电流的幅值^[7-8]。

目前,电极对离子电流影响的试验研究一般是在发动机上进行的,受发动机结构的限制,改动发动机电极安装位置和电极面积十分困难,大部分试验都在小范围内进行,且发动机可视化程度有限,不能实时记录火焰的传播情况,这对试验的后期数据处理带来了一定的困难。为了方便、有效地研究电极位置与电极面积对离子电流的影响,本文在定容燃烧弹中进行了试验,并首次安装了网状电极且火焰可穿越网状电极,从而避免了文献[7-9]中圆盘电极对火焰传播的阻碍,减小了电极结构对离子电流信号的干扰,提高了试验结果的准确性。试验中采用了不同形式的点、柱、网状电极,通过不同测量电极组合进行测量,获得了离子电流信号和相应的纹影照片,由此分析了电极位置与电极面积对离子电流的影响,计算了电极吸收电荷量的大小,以期研究电极位置与电极面积对离子电流的影响提供有价值的试验数据。

1 试验装置及测量系统

1.1 试验装置

试验装置由定容燃烧弹、进排气系统、点火系统、数据采集系统、高速摄像及纹影系统 6 部分组成,如图 1 所示。定容燃烧弹内腔为 $\Phi 130\text{ mm} \times 130\text{ mm}$ 的不锈钢圆柱体,并装有内径 114 mm、外径 130 mm、长 130 mm 的柱状聚四氟乙烯绝缘套。容弹两侧装有厚度为 15 mm 的高抗冲石英玻璃,为纹影系统拍摄火焰照片提供光路。试验采用 Kistler 4075A10 型压电式低压绝对压力传感器,采集频率为 20 kHz,误差小于 $\pm 0.3\%$ 。试验所用摄像机为美国 REDLAKE 公司生产的 HG-100K 型高速摄像机,拍摄速度为 5 000 帧/s。

1.2 离子电流测量系统

定容燃烧弹与离子电流测量电路如图 2 所示。容弹内共安装了 5 个电极,其中:垂直安装的为一对附有聚四氟乙烯绝缘底座的点电极(裸露长度为 8 mm),即图中电极 1、2,直径为 2 mm,2 个电极尖端距离为 2 mm,该对电极用于点燃混合气,同时用于离子电流测量(电极 2 为点火电极的负电极,与容弹体共同接地);水平安装的为 2 个结构不同的网电

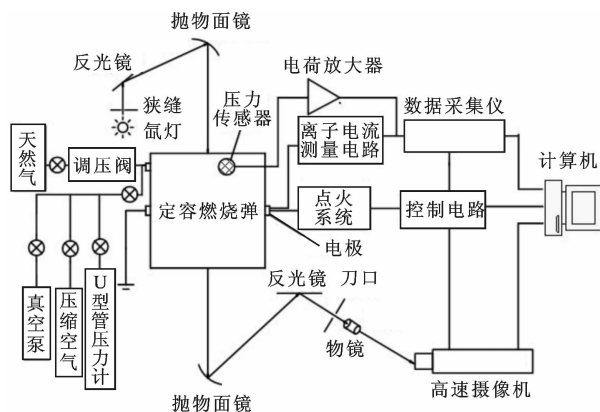


图1 试验系统布置图

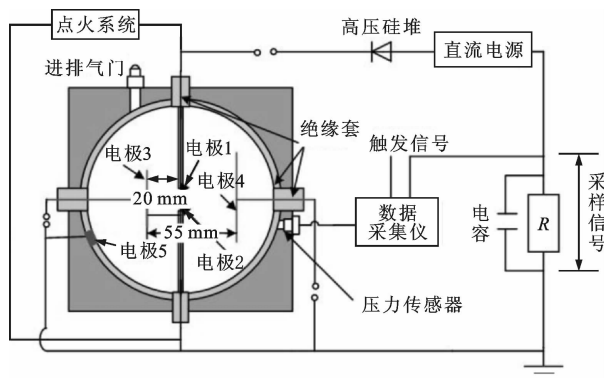


图2 定容燃烧弹和离子电流测量电路

极,左边网电极(即图中电极 3)的圆盘部分为外径 40 mm 的网状圆盘,圆盘距容弹中心 20 mm,而右边网电极(即图中电极 4)的圆盘部分为外径 60 mm 的网状圆盘,圆盘距容弹中心 35 mm;在容弹左下侧安装的为 $\Phi 10\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的柱电极(即图中电极 5),该电极始终接地。5 个电极材料均为 45 号钢,结构和尺寸如图 3 所示。电极 1~5 的面积分别记为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 ,通过 ProE 画图软件建模计算,上述面积分别为 25、25、625、865、78 mm^2 。

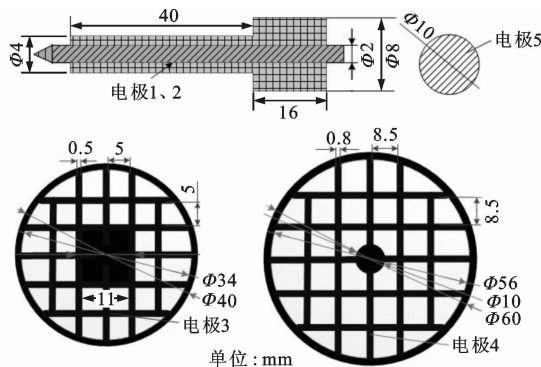


图3 电极结构和尺寸

将直流偏置电压 350 V 加载在测量电极的正、负电极之间,以产生恒定电场,使得燃烧产生的带电

粒子定向移动,形成离子电流。试验中通过在5个电极上分别加载不同正、负电压的方式,形成不同正、负电极的数量和面积,并采集不同测量电极组合下电阻 $R(150\text{ k}\Omega)$ 上的离子电流信号,经数据采集系统最终记录和保存下来。测量系统利用了高压硅堆阻断点火时的高压,以防止点火或者高压对测量电路的干扰。

试验在常温、常压下进行,并向容弹内依次充入不同空燃比 $\lambda(0.8\sim 1.3)$ 的甲烷/空气混合气,静置 2 min 使其混合均匀。点火的同时触发测量系统,得到火焰纹影照片、离子电流和压力曲线。燃烧结束后,用真空泵将容弹内的废气抽出,并用新鲜空气多次冲洗,以减小残余废气对下次配气的影响。

2 试验结果分析

2.1 电极位置对离子电流的影响

不同负电极数量下空燃比 $\lambda=1$ 时混合气燃烧的离子电流和压力曲线及对应的火焰纹影发展照片如图4所示。图中纹影照片下标记的数字1~8与离子电流波形中 $t_1\sim t_8$ 时刻相互对应,各时刻记为 $t_i(i=1,2,3,\dots,8)$ 。为了更准确地获取离子电流特征值,记录时间为 $0\sim 50\text{ ms}$ 。电极安装方式有2种且正电极均为电极1,其中方式1有4个负电极,即电极2、3、4、5,方式2有2个负电极,即电极2、5。从图4中可以看出,2种安装方式的压力信号基本一致,表明2种安装方式下燃烧情况相同。

方式1中,离子电流曲线可定义为3个阶段:点火、前锋区和后焰区阶段。点火阶段信号从 0 ms 到 $t_1=2.6\text{ ms}$,此段电流主要与点火有关。前锋区阶段从 $t_1=2.6\text{ ms}$ 到火焰充满燃烧室,此段离子电流主要由火核以及火焰前锋面内化学离子化过程产生的 CH_3^+ 、 CHO^+ 、 H_3O^+ 及自由电子等带电粒子形成^[10]。电极的安装位置对离子电流的影响主要表现在前锋区。 $t_2=3.7\text{ ms}$ 时出现了一个明显的电流信号,幅值约为 $0.4\text{ }\mu\text{A}$ 。从图4纹影照片1可知, t_1 时刻火焰已接触到点火电极的非绝缘部分,此时火焰刚刚发展,燃烧的温度和压力较低,离子浓度也很低,因此离子电流很小。混合气着火后,离子电流从 $t_3=8.0\text{ ms}$ 开始上升,在 $t_4=13.8\text{ ms}$ 出现峰值,约为 $9.5\text{ }\mu\text{A}$ 。从图4纹影照片3可以看出, t_3 时刻火焰前锋面正好传播到电极3,由于电极3与容弹壁面相连并共同接地,与电极1形成通路,因此离子通过图2所示测量电路形成离子电流,离子电流开始上升。从 $t_5=18.4\text{ ms}$ 到 $t_6=23.2\text{ ms}$,离子电流第

3次出现了上升。从图4纹影照片5可以看出, t_5 时刻火焰前锋面正好接触电极4,离子通过测量电路形成离子电流,随后离子电流在 t_6 时刻出现峰值,约 $7.1\text{ }\mu\text{A}$ 。火焰前锋面接触电极5时(t_7 时刻),该离子电流信号比较小,因此离子电流没有发生明显的变化。后焰区离子电流主要由电离能较低的NO在高温、高压下热离子化产生,与电极的安装位置无关。

方式2中,前锋区离子电流只出现了2次上升,分别在 $t_1=2.6\text{ ms}$ 到 $t_2=3.7\text{ ms}$ 和 $t_7=24.1\text{ ms}$ 到 $t_8=27.3\text{ ms}$,第1次上升是火焰接触电极2所致,第2次上升是火焰前锋面传播到电极5所致,并在 t_8 时刻出现离子电流峰值,约 $2.8\text{ }\mu\text{A}$ 。

从上面的分析可知,当火焰接触负电极时,带电粒子在偏置电压的作用下发生定向移动,测量电路形成回路,导致离子电流上升。由于2种安装方式的负电极数量不同,所以离子电流出现上升的次数不同,且每次上升中离子电流的大小、峰值及峰值时刻等特征参数均有所差异。可见,根据离子电流特征参数可判断容弹中不同位置化学反应的剧烈程度,结合火焰发展信息(厚度与温度),可获得局部燃烧信息,如放热率、已燃质量分数、火焰传播速度等,可为开发基于离子电流为信号源的新型发动机电控系统提供基础试验数据。

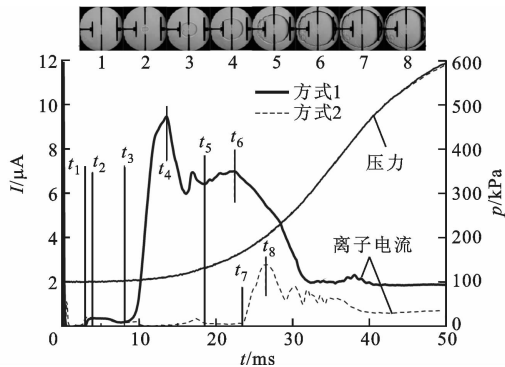


图4 各种负电极数量下离子电流与压力曲线及对应的火焰发展照片

2.2 正电极面积对离子电流的影响

电极2、4、5均为负电极且在2种正电极面积和空燃比 $\lambda=1$ 时混合气燃烧的离子电流和压力曲线如图5所示。当电极1为正电极时,正电极面积 $A_1=S_1=25\text{ mm}^2$;当电极3为正电极时,正电极面积 $A_2=S_3=625\text{ mm}^2$, $A_2>A_1$ 。从图5可以看出,2种正电极面积下,压力基本一致,离子电流都是在同一时刻迅速上升,但是峰值、峰值时刻差异很大。本文选取参数 Q 分析正电极面积对离子电流的影响, Q

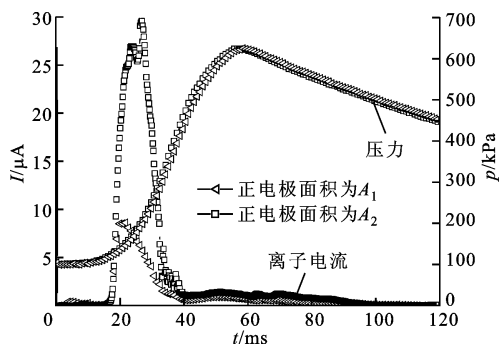


图5 2种正电极面积下离子电流和压力曲线

为电极从 0 ms 到 120 ms 所吸收的电荷量

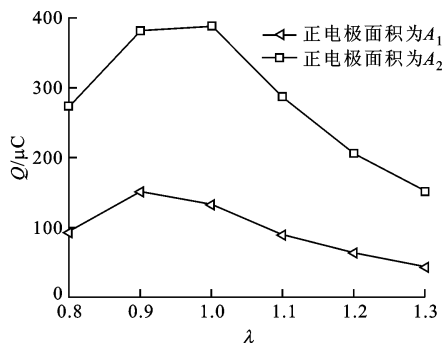
$$Q = \int_{0 \text{ ms}}^{120 \text{ ms}} Idt$$

其反应了离子电流的大小。

记 A_1 和 A_2 的 Q 分别为 Q_1 和 Q_2 。2 种正电极面积下 Q 随 λ 的变化如图 6 所示。从图 6 中可以看出, λ 在 0.8~1.3 的范围内 $Q_2 > Q_1$ 。根据气体导电理论^[11], 正电极主要吸收自由电子而形成电流

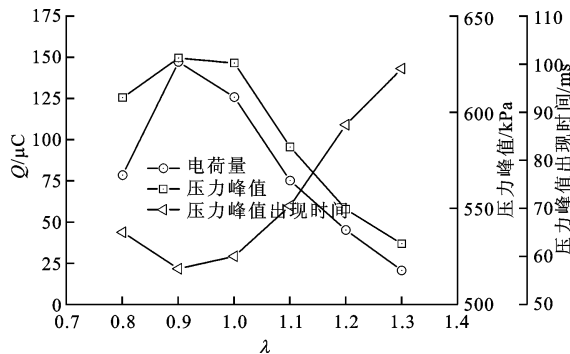
$$I = nqSv$$

式中: n 是单位体积内的电荷数; q 是每个自由电荷的电量; S 是导体的横截面积; v 是电荷运动的速度。当负电极一定时, 每组试验初始条件相同, 每次燃烧生成离子的状况(数量、分布)不变, 即 n 、 v 和 q 不变, 所以离子电流大小仅与导体横截面积有关。正电极面积增加, 相当于导体横截面积 S 增加, 故相同时间内正电极吸收的自由电子增多, 电极吸收的电荷量增多, 电流增大。但是, 燃烧生成的离子总数是一定的, 电极单位时间内吸收离子的数目并不会随着正电极的面积的增加而快速增多。

图6 2种正电极面积下 Q 随 λ 的变化

由图 6 还可知, 燃气偏浓、偏稀时电极吸收的电荷量降低, 通过比较相同测量电极下的电荷量的大小, 可以提取空燃比信息。 A_1 下不同空燃比时 Q 对应的压力峰值和峰值时刻如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 不同空燃比下电荷量与压力峰值及峰值

位置呈现正相关关系。电极吸收的电荷量越大, 压力峰值越高, 峰值时刻越早。

图7 不同 Q 对应的压力峰值和压力峰值出现时间

2.3 负电极面积对离子电流的影响

正电极均为电极 1 且在不同负电极面积和 $\lambda = 1$ 时混合气燃烧的离子电流和压力曲线如图 8 所示。当电极 2、3、4、5 为负电极时, 负电极面积为 $A_3 = S_2 + S_3 + S_4 + S_5 = 1593 \text{ mm}^2$; 当电极 2、3、5 为负电极时, 负电极面积 $A_4 = S_2 + S_3 + S_5 = 728 \text{ mm}^2$; 当电极 2、4、5 为负电极时, 负电极面积 $A_5 = S_2 + S_4 + S_5 = 968 \text{ mm}^2$; 当电极 2、5 为负电极时, 负电极面积 $A_6 = S_2 + S_5 = 103 \text{ mm}^2$ 。从图 8 中可以看出, 4 种负电极面积 ($A_3 > A_5 > A_4 > A_6$) 下, 压力信号基本一致, 离子电流峰值、峰值时刻均有很大差异。

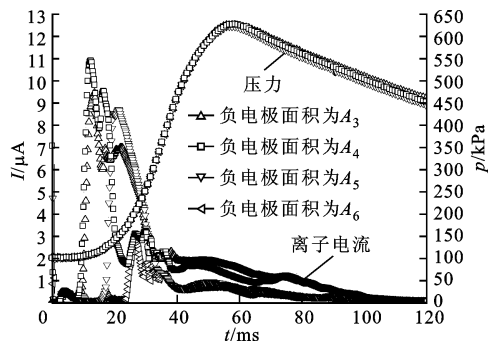


图8 4种负电极面积下的离子电流和压力曲线

记 A_3 、 A_4 、 A_5 、 A_6 的 Q 分别为 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 。4 种负电极面积下 Q 随 λ 的变化如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 当 λ 在 0.8~1.3 范围内时, 均存在 $Q_3 > Q_5 > Q_4 > Q_6$, 表明负电极面积对离子电流的影响与正电极面积类似。根据气体导电理论, 负极主要吸收正离子团 CH_3^+ 、 CHO^+ 、 H_3O^+ 等, 所以负电极面积越大, 电场作用面积增加, 负电极吸收的正离子越多, 离子电流幅值也就越高。

2.4 电极极性对离子电流的影响

2 种电极极性下 $\lambda = 1$ 时混合气燃烧的离子电

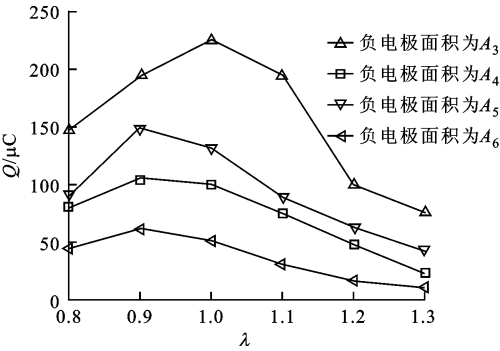


图 9 4 种负电极面积下 Q 随 λ 变化的关系

流和压力曲线如图 10 所示,其中正电极为电极 3、负电极为电极 4 为极性 1,正电极为电极 4,负电极为电极 3 为极性 2。极性 1 中,正电极面积 $A_7 = S_3 = 625 \text{ mm}^2$,负电极面积 $A_8 = S_4 = 865 \text{ mm}^2$;极性 2 中,正电极面积 $A_9 = 865 \text{ mm}^2$,负电极面积 $A_{10} = 625 \text{ mm}^2$ 。显然, $A_7 < A_9, A_8 > A_{10}$ 。从图 10 中可以看出,2 种极性下压力曲线基本一致,离子电流都是在同一时刻上升,但峰值、峰值时刻差异很大。

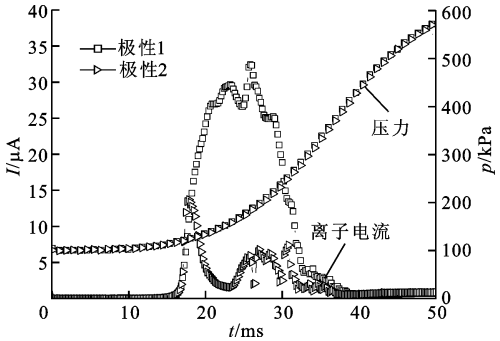


图 10 2 种电极极性下离子电流和压力曲线

记 2 种极性下 Q 为 $Q_7、Q_8$ 。2 种电极极性下 Q 随 λ 的变化如图 11 所示。当 λ 在 0.8~1.3 范围内时,均存在 $Q_7 > Q_8$ 。极性 1 中,负电极面积较大,电极吸收的电荷量比极性 2 大,说明负电极面积对离子电流的影响大于正电极面积对离子电流的影响。

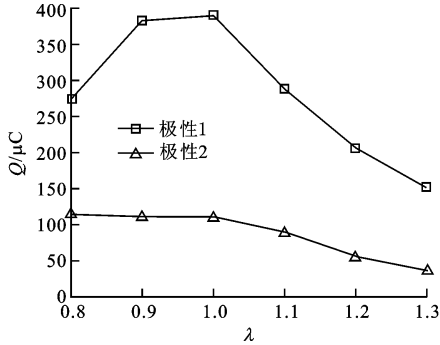


图 11 2 种电极极性下 Q 随 λ 的变化

根据气体导电理论,本试验偏置电压为 350 V,导电形式主要是辉光放电。辉光放电时,在负电极附近聚集了较多的异号空间电荷,因而形成明显的电位降落,称为阴极电势降^[12]。在放电过程中,2 次发射是由亚稳态成分和离子引起的,而电子主要是 2 次发射激发的^[13]。阴极电势降为已发射的电子提供了电子离子化和与分子碰撞的能量,以保证阴极能吸收足够数量的离子和亚稳态成分。放电时,正离子的运动速度远小于电子,正离子空间的电荷密度比电子空间的电荷密度大得多,所以整个极间电压大部分集中在阴极附近。从上述分析可知,负电极对离子电流的影响更大,且电场与火焰相互作用机理是基于火焰前锋面的化学离子化生成的正离子,所以正离子的作用比自由电子大,这进一步证实了负电极面积对离子电流的影响大于正电极面积对离子电流的影响。

火花点火汽油机通常以火花塞作为测量电极,但是为了获得发动机燃烧室内更多的燃烧信息,需额外布置电极,特别是测量非火花点火发动机缸内燃烧过程中的离子电流信息,需要设计不同面积的电极且加装在指定的位置。本文的试验结论可为设计离子电流测量电极的结构与安装位置提供基础试验数据。

3 结 论

- (1) 电极位置决定着离子电流的出现时刻,并影响着离子电流的大小、峰值及峰值时刻等特征参数。
- (2) 当正电极一定时,离子电流的上升次数随着负电极数量的增加而增多,说明离子电流能够反映电极附近的局部燃烧信息,采用多个电极可获得定容燃烧弹中的多个位置的燃烧信号。
- (3) 火焰与测量电极(正极、负极)接触面积越大,电极吸收的电荷量就越多,离子电流幅值也就越高,且负电极面积对离子电流的影响大于正电极面积的影响。

参考文献:

[1] HENEIN N, BRYZIK W, ABDEL-REHIM A, et al. Characteristics of ion current signals in compression ignition and spark ignition engines, SAE 2010-01-0567 [R]. Washington DC, USA; SAE, 2010.

[2] ZHENG S, ZHANG X, SHEN Z. Study on cycle-by-cycle variations of ion current integral and pressure in spark ignition engine [C]// 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and In-

- formation Technology (EMEIT). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 3404-3407.
- [3] OGATA K. Investigation of robustness control for practical use of gasoline HCCI engine: an investigation of a detecting technology of conditions of HCCI using an ion current sensor, SAE 2014-01-1279 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2014.
- [4] SUN Y, YUAN Z, LI S, et al. An investigation on the relationship between engine knock and amplitude characteristics of spark plug's ionic current signals [C]//2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 5683-5686.
- [5] YOSHIYAMA S, TOMITA E, TABUCHI N, et al. Detection of flame propagation pattern in a spark ignition engine using gasket ion sensor, SAE 2004-01-1919 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2004.
- [6] WILSTERMANN H, GREINER A, HOHNER P, et al. Ignition system integrated AC ion current sensing for robust and reliable online engine control, SAE 2000-01-0553 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2000.
- [7] 高忠权, 吴筱敏, 向往, 等. 电极几何参数对离子电流影响的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 36-40.
- GAO Zhongquan, WU Xiaomin, XIANG Wang, et al. Experimental study on influence of electrode geometrical parameters on ionization current [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(1): 36-40.
- [8] 高忠权, 吴筱敏, 向往, 等. 电极结构对离子电流影响的试验研究 [J]. 内燃机学报, 2008, 26(4): 364-368.
- GAO Zhongquan, WU Xiaomin, XIANG Wang, et al. Experimental study on influence of electrode geometric parameters on ionization current [J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(4): 364-368.
- [9] FRANKE A, REINMANN R, LARSSON A. The role of the electrodes for the ionization on sensor signal, SAE 2003-01-0714 [R]. Washington DC, USA: SAE, 2003.
- [10] ERIKSSON L, NIELSEN L, GLAVENIUS M. Closed loop ignition control by ionization current interpretation, SAE 970854 [R]. Washington DC, USA: SAE, 1997.
- [11] 陈宝柱, 高树香. 气体导电理论 [M]. 南京: 南京工学院出版社, 1988.
- [12] THOMSON J J. Conduction of electricity through gases [M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1906.
- [13] RAIZER Y P. Gas discharge physics [M]. Berlin, Germany: Springer, 1997.
- [本刊相关文献链接]**
- 高忠权, 李春艳, 刘兵, 等. 采用离子电流法的发动机非正常燃烧诊断. 2015, 49(5): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201505001]
- 刘兵, 李春艳, 孙天旗, 等. 离子电流法测量 CH_4/H_2 混合气燃烧火焰传播速度的实验研究. 2015, 49(1): 40-45. [doi:10.7652/xjtuxb201501007]
- 周竹杰, 魏若男, 周蓉芳, 等. 离子电流法在不正常点火中的实验模拟. 2013, 47(1): 43-47. [doi:10.7652/xjtuxb201301009]
- 高辉, 吴筱敏, 高忠权, 等. 盲源分离法在火花塞离子电流信号分离中的应用. 2010, 44(1): 22-26. [doi:10.7652/xjtuxb201001006]
- 高忠权, 吴筱敏, 向往, 等. 电极几何参数对离子电流影响的试验研究. 2008, 42(1): 36-40. [doi:10.7652/xjtuxb200801009]
- 崔雨辰, 段浩, 李超, 等. 电场分布对球形传播火焰变形率的影响. 2015, 49(5): 49-55. [doi:10.7652/xjtuxb201505008]
- 孙天旗, 于会宾, 胡二江, 等. 碳酸二甲酯层流火焰特性的实验和数值研究. 2014, 48(11): 25-31. [doi:10.7652/xjtuxb201411005]
- 于会宾, 胡二江, 杨柯, 等. 碳酸二甲酯层流火焰特性的实验和数值研究. 2014, 48(11): 25-31. [doi:10.7652/xjtuxb201411005]
- 段浩, 房建峰, 孙天旗, 等. 不同电极结构下电场对甲烷/空气火焰的影响. 2014, 48(9): 62-67. [doi:10.7652/xjtuxb201409011]
- 陈朝阳, 耿莉敏, 巩静, 等. 掺氢对二甲醚预混层流燃烧特性的影响. 2014, 48(6): 122-126. [doi:10.7652/xjtuxb201406021]
- 魏若男, 周蓉芳, 周竹杰, 等. 双电极点火时间间隔对天然气-空气预混合气层流燃烧的影响. 2014, 48(1): 7-12. [doi:10.7652/xjtuxb201401002]
- 康婵, 杨星, 刘杰, 等. 负电场下点电极和网状电极对预混稀燃火焰的影响. 2014, 48(1): 31-36. [doi:10.7652/xjtuxb201401006]

(编辑 苗凌)