

电极几何参数对离子电流影响的试验研究

高忠权, 吴筱敏, 向往, 宋轶明, 皮敏, 黄佐华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在定容燃烧弹中进行了正负电极面积对天然气-空气混合气燃烧产生的离子电流影响的研究, 并将高速摄影仪在燃烧过程中拍摄的纹影照片与相应的离子电流进行分析对比. 结果表明: 电极直径和所布置的圆盘面积等参数不影响离子电流曲线的形态, 曲线均存在点火、前锋区、后焰区3个阶段, 可以完整地体现燃烧信息; 电极几何参数影响电流的幅值, 而且正电极面积的影响大于负电极.

关键词: 电极几何参数; 离子电流; 电极面积; 燃烧

中图分类号: TK402 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0036-05

Experimental Study on Influence of Electrode Geometrical Parameters on Ionization Current

GAO Zhongquan, WU Xiaomin, XIANG Wang, SONG Yiming, PI Min, HUANG Zuohua

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The influence of electrodes on ionization current generated during the combustion of compressed natural gas (CNG)/air mixture was experimentally studied in a constant volume combustion bomb. In addition, the schlieren pictures taken by a high-speed camera were compared with the corresponding ionization currents. The results show that the electrode diameter and the area of the disks arranged on the electrode do not affect the profiles of the ionization current curves. All the curves include the information of the ignition, the front-flame and the post-flame stages which fully reflect the main combustion process. However, the values of the ionization current are affected by the electrode geometrical parameters, and the anode area has more influence on the ionization current than the cathode area.

Keywords: electrode geometrical parameter; ionization current; electrode area; combustion

随着发动机电控技术的发展, 离子电流法成为一种新型的发动机在线测量方法. 由于其包含了丰富的燃烧信息如空燃比、滞燃期、最大压力峰值等, 并且具有响应性能好、结构简单、价格低廉等特点, 因而成为点燃式发动机测量、控制领域中的研究热点. 离子电流法在实际应用中将点火电极作为测量元件, 虽不需改变发动机结构, 但由于离子电流所测量的是燃烧中的局部参数, 因此电极自身的几何参数对测量结果有重要的影响. 国外研究者对电极结构与离子电流之间的关系开展了大量的工作: 文献

[1]研究了正、负电极对离子电流的影响, 发现在偏置电压为 350 V 时, 负电极测量部分长度的改变对离子电流有影响; 文献[2]通过改变正、负电极面积进行实验, 发现在偏置电压为 80 V 时, 负极面积增大, 离子电流会出现一个较大的火焰前锋区峰值, 而正极面积增大, 前锋区离子电流只是略有增加; 文献[3]研究了火花塞中心电极结构与离子电流之间的关系, 发现在偏置电压为 600 V 时, 离子电流随着正电极顶部面积的增大而增加.

综上所述, 关于电极几何参数的影响存在着不

同的结论,另外因受发动机结构的限制,很多试验研究多是在小范围内改变电极结构的条件下进行的,实际操作非常困难,并且发动机可视化程度有限,不能够实时地观察火焰发展变化情况,以致对试验数据的分析、处理存在一定难度. 为了进一步研究电极几何参数与离子电流之间的关系,本文首次在定容燃烧弹中采用不同结构的电极,对当量空燃比的天然气-空气混合气燃烧产生的离子电流进行采集,为研究电极几何参数对离子电流的影响提供了有价值的试验数据.

1 试验装置及测量原理

图 1a 为测量系统示意图. 容弹内腔边长为 108 mm,容积为 1.57 L,2 个相对壁面分别装有采用特殊工艺加工而成厚度为 15 mm 的高抗冲石英玻璃,石英玻璃具有良好的表面质量和光学性能,光路几乎可以无损失通过,为燃烧的纹影成像提供了必要条件. 进排气阀将温度为 285 K、压力为 0.096 MPa 的天然气-空气混合气(当量空燃比)送入燃烧室. 室内安装的压力传感器为 Kistler 4075A10 型低压传感器,用来测量容弹内压力的变化. 容弹中心线上布置有一对点火电极,当容弹工作时,点火线圈将能量传入点火电极,使得混合气着火,燃烧产生大量离子,当电极两端加一偏置直流电压(400 V)时,在测量电极之间形成恒定电场使得这些离子产生定向移动,形成离子电流. 离子电流流过电阻 R_2 (150 k Ω),并通过数字采集系统最终被记录和保存下来. 高压硅堆为阻断点火高压的通过,以防止点火高压干扰测量电路.

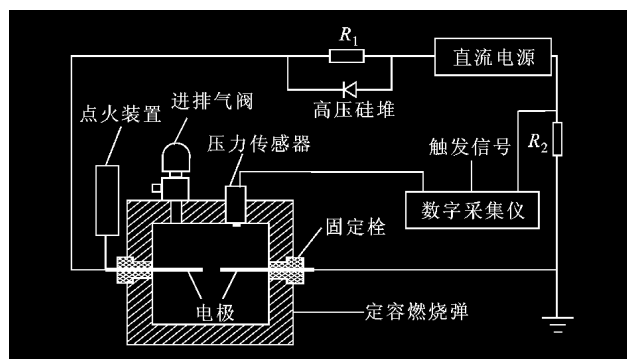
图 1b 为纹影的光路布置示意图,光源采用 500 W 氙灯,2 个抛面镜直径为 15 cm,焦距为 150 cm,狭缝的宽度在 2 mm 左右,摄影机为美国 RED-LAKE 公司生产的 HG-100 K 的高速摄像机,拍摄速度为 5 000 幅/s.

图 2 为试验中采用的电极结构示意图,通过在直径 D_1 为 4 mm 的正、负电极上布置直径 D_2 分别为 10、15、20 mm 的铁质材料圆盘,实现其几何参数的改变, δ 为两圆盘之间的距离.

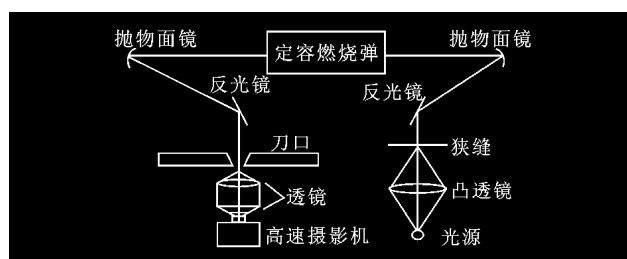
2 试验研究

图 3 为在距点火中心 5 mm($\delta/2$)处,正、负电极上均布置直径 D_2 为 10 mm 圆盘情况下所测得的离子电流曲线以及与之相对应的火焰照片.

从图 3 可以看出:离子电流(以下简称电流)曲



(a)测量系统示意图



(b)纹影光路布置示意图

图 1 试验装置示意图

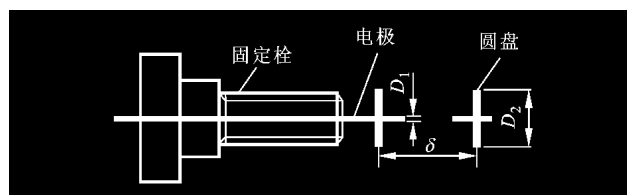


图 2 电极结构示意图

线明显地分为点火阶段、前锋区和后焰区.

点火阶段(t_0),指从 0 ms 时刻到火焰刚接触圆盘(状态点 2)这一阶段,该阶段电流主要与点火有关.

前锋区指从状态点 2 到火焰充满燃烧室(状态点 5)这一阶段,此阶段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^+ 、 C_3H_3^+ 和 H_3O^+ 以及自由电子等带电粒子形成^[4],反映了火焰发展过程中的燃烧信息. 着火后,电流从 7.0 ms 时刻(状态点 2)开始上升,在 7.65 ms 时刻(状态点 3)达到第二峰,从纹影照片上得出状态点 3 处火焰半径大约为 14.8 mm,此时火焰前锋面已将圆盘包围,前锋区电流达到最大值,此后火焰前锋面超出测量圆盘,电流迅速下降,在 14.5 ms(状态点 4)时刻,火焰半径为 37.9 mm,这时火焰前锋面已远离了圆盘,此后电流缓慢下降,并且在 35.15 ms(状态点 5)时刻,电流终止下降,对应的火焰半径大于 50 mm.

后焰区指从状态点 5 开始,离子电流上升经历最高点(状态点 6),最后下降至 0 这一阶段. 如图 3

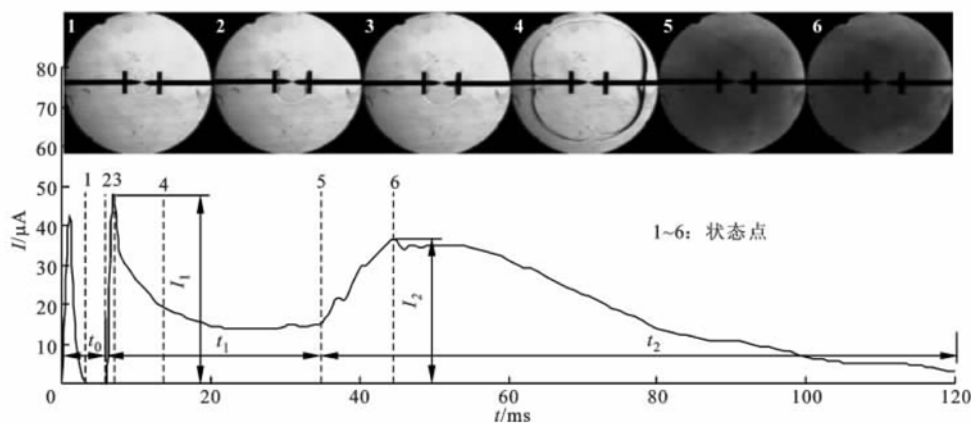


图3 离子电流火焰纹影照片及相对应的曲线

中第5号火焰纹影照片所示,在35.15 ms时刻,电极周围已充满了已燃气体(图片颜色变黑)^[5],此时火焰几乎充满整个燃烧室,由于燃烧释放的热量很高,已燃区的温度达到2 000 K以上,所以该区域电流取决于高温情况下离子的状态^[6-7]。根据Zeldovich的研究,NO生成速度要比燃烧速度慢得多,NO生成主要集中在已燃区,并且由于NO离子化所需要的活化能量(320 kJ/mol)是最小的,所以燃烧后区大约95%的自由活动离子都与NO有关^[7]。

本文选取了离子电流的7个特征参数,根据公式 $dq=Idt$,可以分别计算出

$$Q_1 = \int_{t_1}^{t_1+t_2} Idt; \quad Q_2 = \int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3} Idt$$

式中: I_1 为火焰前锋区离子电流的最大值; I_2 为后焰区离子电流的最大值; t_1 为前锋区离子电流持续时间; t_2 为后焰区离子电流持续时间; Q_1 和 Q_2 分别为电极在前锋区、后焰区所吸收的电量。

2.1 正、负电极对离子电流的影响

图4所示为采用直径 D_1 为2、4 mm的裸电极以及将直径 D_2 为10 mm的圆盘分别布置在正极、负极以及两极情况下($\delta/2=5$ mm)测量得到的离子电流曲线。从图中可以看出,无论是否布置圆盘,还是如何布置圆盘,电流曲线波形均一致,都包含点火、前锋区、后焰区3个阶段的离子电流,即在这3种条件下均可获取这3个区域中所包含的燃烧信息,但当采用裸电极直径 D_1 为2 mm的电极测量时,前锋区和后焰区电流之间发生中断,并且两区域电流持续时间都很短。这可能是由于此时电极表面积比较小且长径比较大,使得火焰在传播过程中有很大热损失,从而对电流产生了显著影响。尽管如此,在前锋区和后焰区电流仍存在2个峰值。

根据气体导电理论^[8],正极主要吸收电子,负极

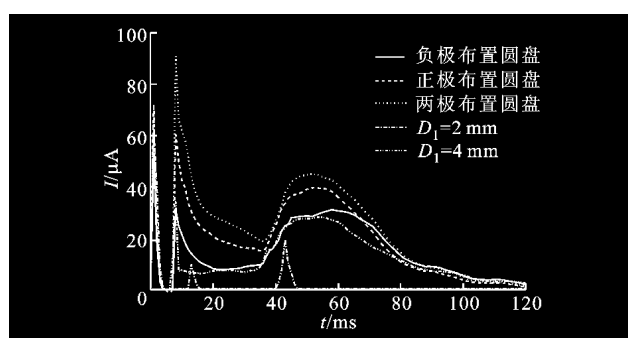


图4 正负电极对离子电流的影响

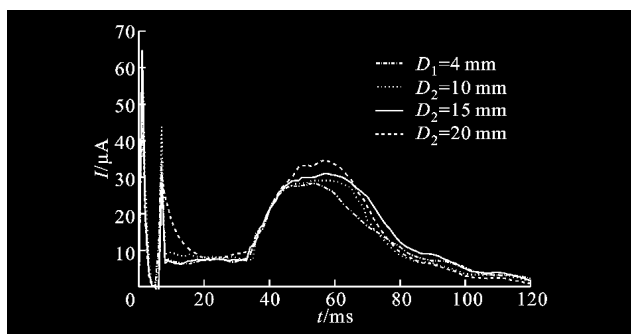
则主要吸收正离子团。因为自由电子的质量远小于正离子,同样电场强度下自由电子的速度要远大于正离子,自由电子容易被电极吸收,所以正极对离子电流影响较大,圆盘布置在正极时的电流比布置在负极时的离子电流显著增加。

另外,根据气体导电理论^[8],偏置电压较低(50~100 V)时,导电形式主要为电弧放电,而偏置电压较高(大于200 V)时,导电形式主要为辉光放电。文献[2]是在80 V的偏置电压下进行试验的,其放电形式为电弧放电,而本试验(400 V)和文献[3](600 V)的放电形式为辉光放电,因此当气体导电机理不同时,所测得的结果也会不同。

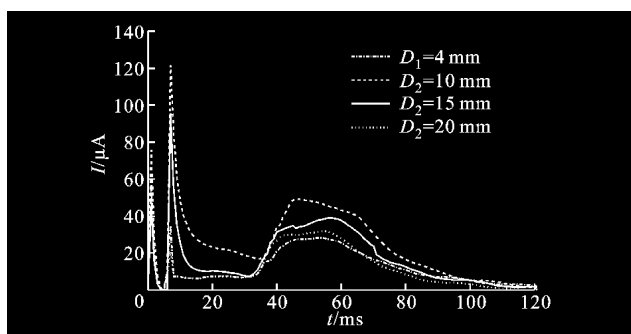
2.2 电极面积对离子电流的影响

为了进一步证明电极面积对离子电流的影响,试验中还分别将直径 D_2 为10、15和20 mm的圆盘布置在正、负电极($D_1=4$ mm)上以及两极上,所测得的离子电流曲线如图5所示,离子电流特征参数与圆盘直径的关系如图6所示。

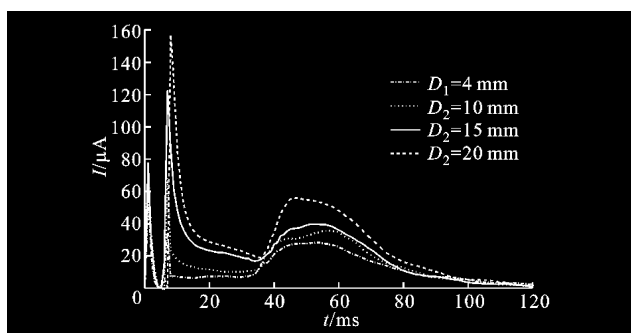
从图5中可以看出,3组曲线形态基本一致,该图进一步证明了无论改变正极、负极还是两极上圆盘的面积,每条曲线均存在点火、火焰前锋区和后焰区3个阶段,即由点火、化学反应以及已燃区高温所



(a) 圆盘布置在负极时的离子电流曲线



(b) 圆盘布置在正极时的离子电流曲线



(c) 圆盘布置在两极时的离子电流曲线

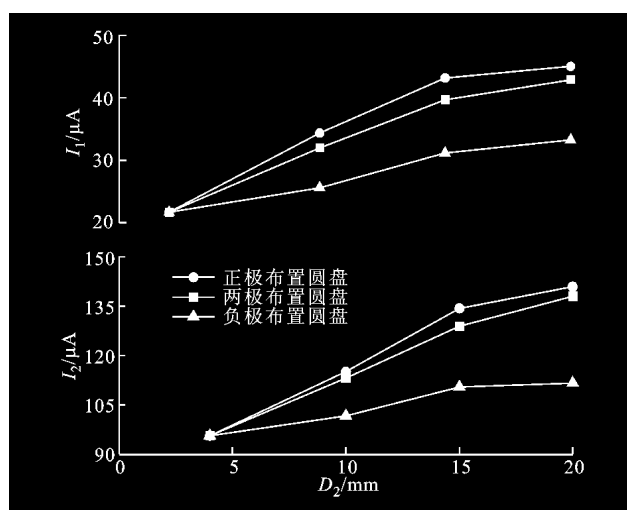
图5 电极面积对离子电流的影响

产生的 CH_3^+ 、 CHO^+ 、 C_3H_3^+ 、 H_3O^+ 、 NO^+ 离子所形成的电流均有非常明显的体现,说明正、负电极面积不影响燃烧信息。从图5中还可以看出,无论在正极、负极还是两极上布置圆盘,电流均增大。当电极上布置圆盘、不改变偏置电压时,容弹内电场强度不变,电场面积增加,从而相同时间内电极吸收的电荷数目增多,电流增加。电流的表达式^[8]为

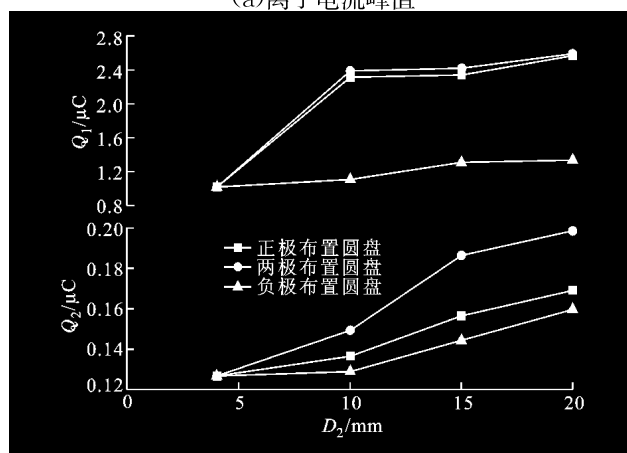
$$I = nqSv$$

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。由于每组试验初始条件不变,所以每次燃烧生成离子的状况(数量、分布)不变,即 n 、 v 和 q 不变,所以离子电流大小只与电极横截面积有关。圆盘面积增加,相当于导体横截面积 S 增加,故电流变大。

从图6可以看出,随着圆盘直径的增加, I_1 、 I_2 、 Q_1 、 Q_2 呈上升趋势,但上升趋势均变缓,尤其负极上的圆盘直径增加时,电流特征值升高趋势最为平缓。这是由于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能随圆盘面积的增加而快速增加,所以 I_1 、 I_2 、 Q_1 、 Q_2 的上升趋势变缓。文中的负电极与容弹壁面同时接地,负极的面积相当于负电极面积与容弹内表面面积之和,在负电极上布置圆盘对负极面积的改变较小,所以电流特征值升高趋势最平缓。



(a) 离子电流峰值



(b) 电极吸收电量

图6 离子电流特征参数

3 结 论

(1) 将圆盘分别布置在正极、负极、两极和采用未布置圆盘的裸露电极,所测得的离子电流形态一致,均包括点火、前锋区与后焰区3个阶段,能够完整地反映燃烧信息。

(2) 电极正极面积对离子电流的影响大于负极。

(3) 随着圆盘面积增加,前锋区、后焰区离子电流以及在该区间的电流均增大,但增加趋势随面积

