

点电极的电场对预混甲烷-空气火焰的影响^①

杨 星^{②*} 康 焯* 刘 杰* 孟祥文* 房建峰* 吴筱敏^{③**}

(* 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

(** 陕西理工学院 汉中 723399)

摘 要 通过改变过量空气系数和加载电压,研究了点电极产生的正电场对甲烷-空气预混火焰形状、传播速率以及燃烧压力的影响。结果表明:在电场作用下,离子风效应促进火焰的传播,使火焰沿水平方向被拉伸,并且火焰传播速率增加。当外加电压为 12kV 时,过量空气系数为 0.8、1.0 和 1.2 下的火焰传播速率最大值分别增加了 55.7%、13.2% 和 46.6%;过量空气系数为 1.4 时,离子风效应和电晕放电的共同作用促使传播速率曲线出现拐点,拐点后的传播速率最大值增加达到 128.9%。电场作用下,燃烧压力峰值有所增加,并且过量空气系数为 1.2 和 1.4 时压力峰值出现时刻最大分别提前了 14.1% 和 16.6%。

关键词 点电极,预混火焰,火焰传播速率,电晕放电,燃烧压力

0 引 言

为了应对日益突出的能源短缺和环境污染问题,国内外开始了对高效率、低污染的燃烧系统的研究。通过这些研究,人们认识到电场对火焰形状、传播速率、稳定性以及燃烧产物有很大的影响。Volkov^[1]等发现在平板火焰上施加直流电场会使火焰的形状发生改变。Van Den Boom 等^[2]通过研究直流电场对预混平面火焰的影响,发现在化学当量比时火焰的层流燃烧速率可增加 8%。Wisman 等^[3]通过对电场作用下的预混丙烷火焰的研究,发现电场可增强火焰的稳定性,而 Belhi 等^[4]在对直流电场下的甲烷/空气层流扩散火焰进行研究时也得到了相同的结论。王宇等^[5]通过研究针状、平板和环状电极对层流扩散火焰的影响,证明了环状电极会影响火焰形态,并且荷正电的中心电极将对碳烟颗粒的排放起到抑制作用。

综上所述,电场对火焰形状、传播速率、稳定性以及燃烧产物有很大的影响,但是目前的研究大都集中在平面火焰和本生灯火焰等连续稳定火焰,很

少涉及在定容燃烧装置中的预混球形火焰。预混球形火焰因其结构简单而易得到层流燃烧速率。而层流燃烧速率是表征层流燃烧特性的重要参数,并且预混层流燃烧特性的研究是研究燃烧机理的重要内容。因此本试验研究了在点电极上加载正高压后,产生的直流电场对甲烷-空气预混球形火焰的传播特性和燃烧压力的影响。

1 实验装置及方法

实验装置如图 1 所示,该套试验装置包含了定容燃烧弹、高速摄像及纹影光路系统、配气系统、点火系统、数据采集系统以及高压电系统。图 2 介绍了定容燃烧弹的结构。定容燃烧弹是几何尺寸为 $\Phi 130\text{mm} \times 130\text{mm}$ 的 45 号钢圆柱体,内腔为 $\Phi 114\text{mm} \times 130\text{mm}$,内腔上布置有壁厚为 8mm 的聚四氟乙烯绝缘套。容弹两侧装有厚度为 15mm 的石英玻璃,为高速摄像及纹影光路系统提供光学通路。高速摄像机为美国 REDLAKE 公司生产的,型号为 HG-100K,拍摄速度为 1000 ~ 10000 帧/s,本文用 5000 帧/s。压力传感器为 Kistler 4075A10 型低压

① 国家自然科学基金(50876087,51176150)资助项目。

② 女,1989 年生,硕士生;研究方向:发动机工作过程及测控技术;E-mail:yangxinghz@163.com

③ 通讯作者,E-mail:xmwu@mail.xjtu.edu.cn

(收稿日期:2013-07-09)

传感器,误差为 $\pm 0.5\%$,用于接收燃烧过程中定容燃烧弹内的压力变化信号。实验采用威思曼 DEL 系列直流正高压电源,输出电压为 $0 \sim 30\text{kV}$,本文取用 $0 \sim 12\text{kV}$ 。

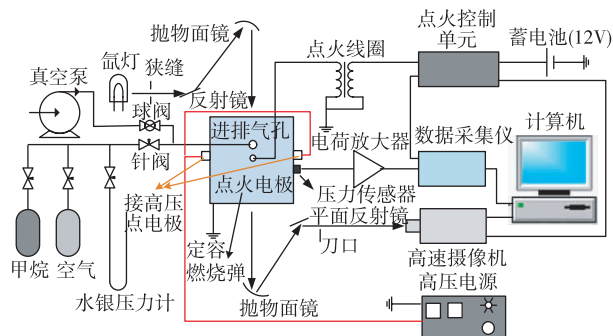


图1 实验装置

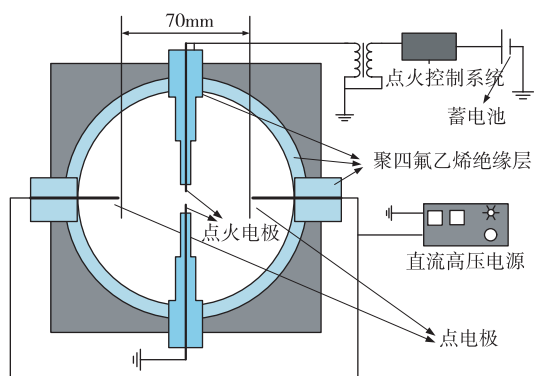


图2 定容燃烧弹结构

如图2所示,一对外包聚四氟乙烯的点火电极垂直对称安装在定容燃烧弹的上下面的中心处,用于点火时产生火核,并作为地极。点火电极的直径为 $\Phi 2\text{mm}$,尖端距离为 2mm 。高压点电极直径为 $\Phi 4\text{mm}$,与容弹壁接触的位置及外端包有聚四氟乙烯。点电极对称安装在水平左右面的中心处,距点火电极 35mm 。

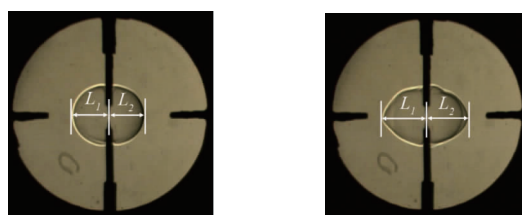
试验在常温常压下进行,利用分压定律分别配置了过量空气系数为 0.8 、 1.0 、 1.2 和 1.4 的均匀混合气。在高压电极上加载不同的试验电压之后点火,同时触发高速摄影仪拍照记录火焰发展变化以及数据采集仪记录压力变化。燃烧后利用真空泵抽出定容燃烧弹内的废气,并用新鲜空气多次冲洗,从而减少废气对下次试验的影响。

2 数据处理

本论文中定义点火电极的电势为零,而实验中

点电极上的输入电势高于点火电极的电势,故点电极与点火电极之间为正电压;定义电场线方向由点电极指向点火电极为正方向,规定电场线方向与正方向一致的电场简称为正电场。实验中心电极上加载正高压后产生的电场的电场线方向与正方向一致,故为正电场。

由于无论加载电压与否其火焰垂直方向的发展均无明显差异(图3),为了方便研究电场对火焰的影响,本论文仅讨论火焰水平方向的变化。火焰传播距离 L_h 定义为水平方向上的火焰的最左端和最右端的前锋面到点火电极中心的距离的平均值,即 $L_h = (L_1 + L_2)/2$, L_1 和 L_2 由纹影照片上直接得到,如图3所示。



(a) 球形火焰 ($U=0\text{kV}$)

(b) 拉伸后的火焰 ($U=10\text{kV}$)

图3 纹影照片

火焰传播速率 S_h 记为火焰传播距离对时间的变化率,即

$$S_h = dL_h/dt \quad (1)$$

式中 L_h 是火焰传播距离, t 是时间。

定容燃烧弹中的火焰只有在未燃区温度和压力变化范围很小的情况下,才可以认为此时的火焰燃烧速度是待测量的速度^[6]。当 $L_h < 25\text{mm}$ 时,可以排除压力和温度的变化对火焰传播速率的计算结果的影响;当 $L_h > 6\text{mm}$ 时,可以消除点火对火焰发展产生的波动影响^[7]。因此为了保证 S_h 的变化主要由电场的作用引起,本研究中 L_h 的取值范围定为 $6 \sim 25\text{mm}$ 。

3 实验结果和分析

3.1 电场对火焰形状的影响

图4中给出的是在过量空气系数 ϕ_a 分别为 0.8 、 1.0 、 1.2 和 1.4 的工况下,外加电压分别为 0kV 、 5kV 、 10kV 和 12kV 时的火焰传播照片。在未加电场($U=0\text{kV}$)时,各过量空气系数下的火焰形状均呈规则的球形,并沿着水平和垂直方向有规则地传播。在施加电场后,火焰发生了形变,形变大

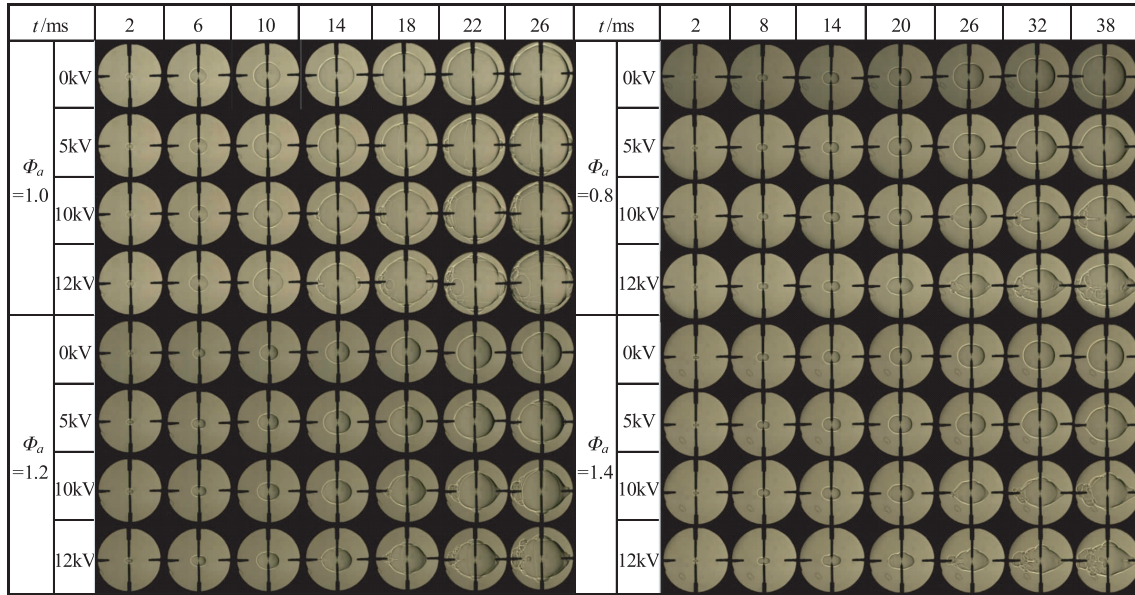


图4 火焰传播照片

小随着外加电压幅值的增大而增加。当外加电压 $U = 5 \text{ kV}$ 时,火焰在水平方向略有形变,垂直方向无明显变化,火焰形状近似呈球形。当外加电压 $U = 10 \text{ kV}$ 和 $U = 12 \text{ kV}$ 时,火焰沿着水平方向被明显地拉伸,垂直方向无明显变化。在 $\Phi_a = 1.4$, $U = 12 \text{ kV}$ 时,水平方向火焰前锋面在还未接触到电极时就已经出现褶皱。

在甲烷的燃烧火焰中含有大量的带电粒子,主要包括 CHO^+ 、 H_3O^+ 、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$ 、 CH_5O^+ 、 O_2^- 、 OH^- 、 O^- 、 CHO_2^- 、 CHO_3^- 、 CO_3^- 以及自由电子^[8]。火焰中负离子的浓度本来很低,但是在电场作用下,电子产生漂移速度,在运动过程中遇到中性粒子并附在中性粒子上,成为负离子,因此负离子的浓度有所提升,不能忽略。在正电场作用下,火焰前锋面和已燃区中的负离子有一定的定向迁移率^[9],它们会逆着电场线方向由火焰前锋面向着未燃区移动,在移动的过程中与中性粒子发生碰撞并进行能量传递,从而导致大量粒子产生逆着电场线方向的定向运动(离子风),增大了火焰前锋面和已燃区向未燃区的热量扩散,促进了燃烧,并且提高了火焰的稳定性。由于负离子的迁移率会随着电场的增强而增大^[10],所以当外加电压幅值增大时,离子风效应更明显,从而使火焰的拉伸效果更明显,对燃烧的促进效果也更明显。

3.2 电场对 L_h 和 S_h 的影响

不同外加电压下的火焰传播距离 L_h 随时间 t 的变化如图5所示。从图中可以看出,在各过量空

气系数下,无电场作用时的 L_h 随 t 变化近似呈线性关系。在电场作用下,火焰传播距离比无电场作用

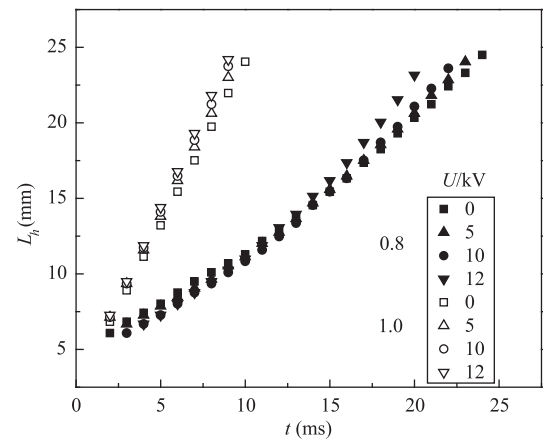
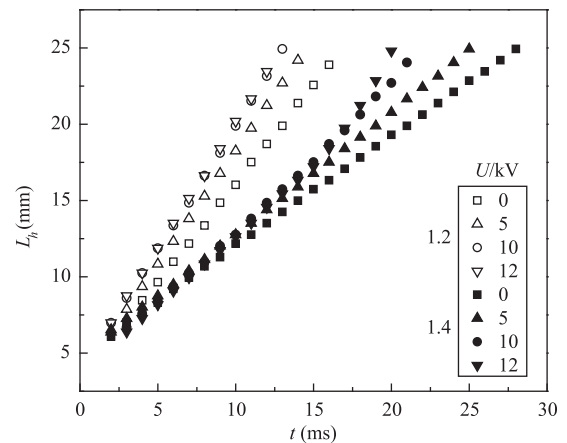
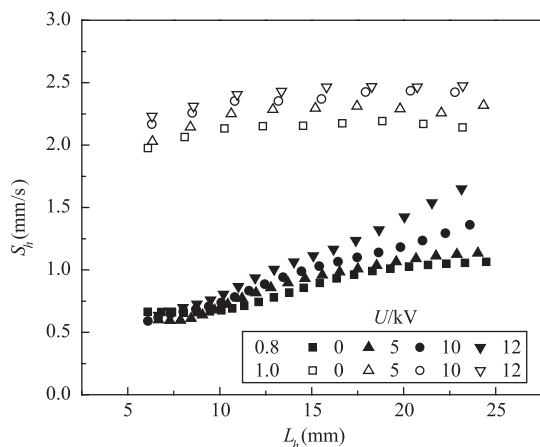

 (a) $\Phi_a = 0.8$ 和 $\Phi_a = 1.0$

 (b) $\Phi_a = 1.2$ 和 $\Phi_a = 1.4$

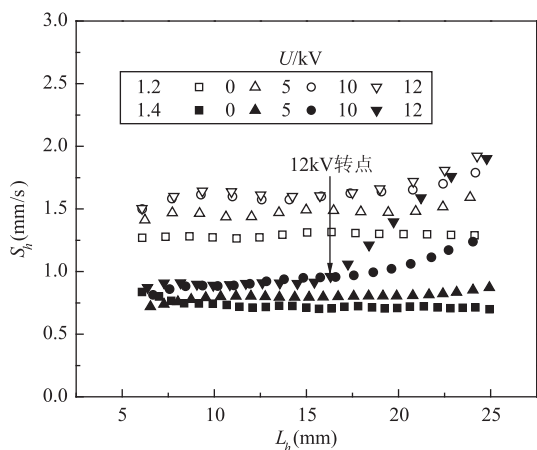
图5 火焰半径随时间的变化

时的大,且随着加载电压幅值的增大,同时 L_h 也随之增大。在 $\Phi_a = 1.0, t = 8\text{ms}$ 时,外加电压为 0kV 下的火焰传播距离为 19.7mm ,而外加电压为 5kV 、 10kV 和 12kV 下的 L_h 分别增加到 20.6mm 、 21.2mm 和 21.8mm ,增加幅度分别为 4.6% 、 7.6% 和 10.7% 。

图 6 所示的是不同过量空气系数下的火焰传播速率 S_h 随火焰传播距离 L_h 的变化。从图中可以得到,当无电场作用时, $\Phi_a = 0.8$ 工况下的火焰传播速率随距离的增大而增加,最大火焰传播速率为 1.06m/s ; $\Phi_a = 1.0$ 、 1.2 和 1.4 工况下的 S_h 随着 L_h 的增大变化很小,最大 S_h 分别为 2.19m/s 、 1.31m/s 和 0.83m/s 。当有电场作用时,各过量空气系数下的火焰传播速率均比不加电场时的 S_h 大,并且随着外加电压幅值的增大, S_h 也随之整体增大。在外加电压为 12kV 时,火焰传播速率达到最大, $\Phi_a = 0.8$ 、 1.0 、 1.2 和 1.4 工况下的最大火焰传播速率分别为 1.65m/s 、 2.48m/s 、 1.92m/s 和 1.90m/s ,较 0kV 时分别增加了 55.7% 、 13.2% 、 46.6% 和 128.9% 。



(a) $\Phi_a = 0.8$ 和 $\Phi_a = 1.0$



(b) $\Phi_a = 1.2$ 和 $\Phi_a = 1.4$

图 6 火焰传播速率随火焰传播距离的变化

从图 6(b)中还可以看到, $\Phi_a = 1.4, U = 12\text{kV}$ 时, S_h 曲线产生一个明显的转折点,经过此点后 S_h 曲线的变化趋势发生明显改变,将此点定为转折点。

3.3 对 S_h 曲线转点的讨论

在 $\Phi_a = 1.4, U = 12\text{kV}$ 时,火焰传播距离到达转点之前, S_h 曲线随 L_h 的增大无明显变化;经过转点后, S_h 曲线随 L_h 的增大呈现明显的上升趋势。转点出现在 $L_h = 16.3\text{mm}$ 附近,此时火焰传播速率为 0.96m/s ,经过转点后的 $S_h - L_h$ 曲线的斜率增大,促使 $\Phi_a = 1.4$ 时最大火焰传播速率大幅度提高,可以达到 1.90m/s ,较转点出现时的火焰传播速率增加了 97.9% 。

S_h 曲线产生转点的原因可能与电场的不均匀分布有关。图 7 是利用 Ansoft Maxwell 13.0 软件对点电极加载 $U = 12\text{kV}$ 的电压后形成的空间电场强

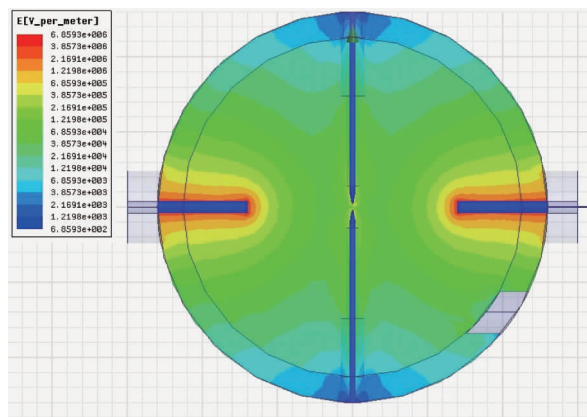


图 7 $U = 12\text{kV}$ 数值模拟结果

度分布的数值模拟结果。从图中可以看出,高压电极为点电极时电场强度分布很不均匀。在点电极附近的电场强度很高,最高达到 $E_{\max} = 6.9 \times 10^6\text{V/m}$,然后沿着正方向快速降低。电场的不均匀程度是由电场不均匀系数

$$f = E_{\max}/E_{\text{av}} \quad (2)$$

来描述,式中, $E_{\max}$ 为间隙中最大场强, E_{av} 为平均场强,式为

$$E_{\text{av}} = U/d \quad (3)$$

式中 U 为间隙上施加的电压, d 为电极间最短的绝缘距离。根据电场强度的数值模拟结果以及公式 (2) (3) 可以得到 $f > 4$, 因此该电场属于极不均匀电场^[11]。

在极不均匀电场中,可能会产生特殊的放电形式——电晕放电^[12]。当外加电压由零逐渐增大时,

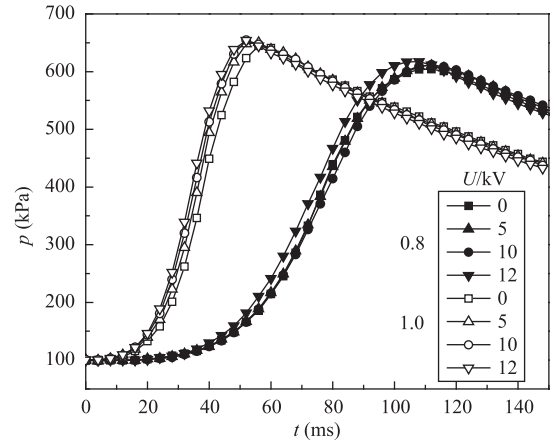
起初点电极到点火电极这段间隙之间会产生微弱的暗电流,这是由外电离因子在间隙气体中产生电子及离子引起的饱和电流^[9]。当电压继续增大到一定幅值时,点电极上产生流注电晕,使间隙之间的电流急剧增大,此时便产生了电晕放电。电晕放电会产生光子,光子可以促使未燃气体分子或原子提高自身能级,提高未燃气体的能量;电晕放电还会产生热效应,提高未燃气体的温度,使未燃气体的能量提高。电晕放电产生的这两种效应都可以提高未燃气体的能量,从而降低反应所需要的活化能,达到促进火焰前锋面燃烧反应的效果。

电晕放电的产生可能是导致转点产生的直接原因。当电压加载到 12kV 时,点电极上可能会产生流注,促使放电电流大幅度增大,使未燃气体产生电离,提高了未燃气体的能量,降低了燃烧反应所需要的活化能。并且随着火焰前锋面的向外扩展,火焰前锋面会触到流注分枝,这一点便可能产生转点,因为在此处火焰前锋面上产生强烈的电离,提高了火焰前锋面上的电子的浓度,因此有更多的电子被中性分子吸附,产生更多的负离子,提高了负离子的浓度,从而增大了火焰前锋面上的离子风效应,因此转点之后火焰传播速率有较大幅度的提高。

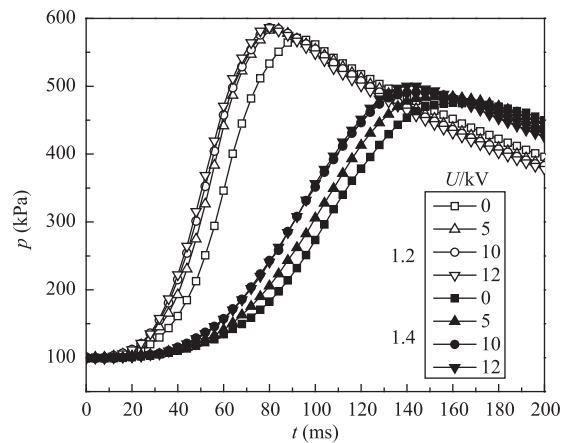
3.4 电场对燃烧压力的影响

图 8 所示的是燃烧压力随时间的变化。从图中可以看出,在各过量空气系数下,点电极产生的正电场作用下的燃烧压力曲线的规律与不加电场时大体一致。在电场作用下,各过量空气系数下压力峰值有所增加。在 $\Phi_a = 1.0$ 、 $\Phi_a = 1.2$ 和 $\Phi_a = 1.4$ 时燃烧初期的压力升高率较无电场作用时大,因此压力峰值的到达时刻比无电场作用下的提前,且随着电压幅值的增大,压力峰值提前的幅度也随之增大。产生这些现象的原因是点电极正电场作用下的离子风效应促进了火焰的发展与传播,因此相同时间内有更多的未燃区气体参与反应,促使燃烧初期的压力升高率增大,压力峰值到达时刻提前,压力峰值有所提高。

表 1 给出的是不同过量空气系数下加载电压分别为 5kV、10kV 和 12kV 时的压力峰值和峰值时刻相对于 0kV 时的变化。从表中可以看出,电场作用下, $\Phi_a = 0.8$ 、1.0 和 1.2 时的压力峰值略有提高; $\Phi_a = 1.4$ 时,外加电压达到 12kV 时的压力峰值较 0kV 时有明显提高,达到 6.3%。压力峰值在此工况下的明显提高可能与产生转点的电晕放电有关,电晕放电的流注强烈促进了燃烧反应,促进了最大爆发



(a) $\Phi_a = 0.8$ 和 $\Phi_a = 1.0$



(b) $\Phi_a = 1.2$ 和 $\Phi_a = 1.4$

图 8 燃烧压力随时间的变化

压力的上升。电场作用下峰值出现时刻有较大幅度的提前。在 $\Phi_a = 1.0$ 、1.2 和 1.4 时,压力峰值出现时刻提前的程度随着外加电压的增加而变大,在 $U = 12\text{kV}$ 时达到最大,分别为 9.8%、14.1% 和 16.6%。并且加载电压后稀混合气状态 ($\Phi_a = 1.2$ 和 1.4) 下压力峰值出现时刻提前程度更明显,均在 8% 以上,最大均达到 14% 以上。可以看出,外加电场可以促进混合气的燃烧,并且对稀混合气的促进作用更明显。

表 1 不同加载电压下压力峰值和峰值时刻的变化

Φ_a	压力峰值变化 (%)			峰值时刻变化 (%)		
	5kV	10kV	12kV	5kV	10kV	12kV
0.8	1.2	1.4	2.6	-2.5	2.3	-4.1
1.0	1.3	1.9	1.7	-5.6	-9.4	-9.8
1.2	2.5	3.4	3.4	-11.0	-12.6	-14.1
1.4	2.5	4.0	6.3	-8.5	-14.5	-16.6

4 结 论

(1) 在点电极产生的正电场作用下, 火焰形状发生改变, 火焰沿水平方向被拉伸, 垂直方向上无明显变化。并且随着电压幅值的增大, 火焰变形更明显。

(2) 在点电极产生的正电场作用下, 火焰传播速率提高, 且外加电压越大, S_h 增加程度越明显。

(3) 当外加电压增加到一定幅值时, 电场不仅会使火焰前锋面产生离子风效应, 也会产生电晕放电。在 $\Phi_a = 1.4$, $U = 12\text{kV}$ 时, 电晕放电的流注强烈促进燃烧反应的进行, 导致 $S_h - L_h$ 曲线产生一个转折点, 转点后 S_h 大幅度提高, 最大值较 0kV 时提高 128.9%。

(4) 在点电极产生的正电场作用下, 燃烧压力峰值有所提高, 且在 $\Phi_a = 1.4$, $U = 12\text{kV}$ 时压力峰值提高较明显。在 $\Phi_a = 1.0$ 、 1.2 和 1.4 时, 燃烧初期压力升高率明显增大, 峰值出现时刻有较大幅度的提前, 特别是在稀混合气状态时提前程度更加明显, 最大分别达到 14.1% 和 16.6%。

参考文献

- [1] Volkov E N, Sepman A V, Kornilov V N, et al. Towards the mechanism of DC electric field effect on flat premixed flames. In: Proceedings of the European Combustion Meeting, Vienna, Austria, 2009. 10-16
- [2] Van-den-Boom J D B J, Konnov A A, Verhasselt A M H, et al. The effect of a DC electric field on the laminar burning velocity of premixed methane/air flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32: 1237-1244
- [3] Wisman D L, Marcum S D, Ganguly B N. Electrical control of the thermo diffusive instability in premixed propane-air flames. *Combustion and Flame*, 2007, 151: 639-648
- [4] Belhi M, Domingo P, Vervisch P. Effect of electric field on flame stability. In: Proceedings of the European Combustion Meeting, Vienna, Austria, 2009. 1-7
- [5] 王宇, 姚强. 电场对火焰形状及碳烟沉积特性的影响. *工程热物理学报*, 2007, 28(2): 27-29
- [6] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 186-187
- [7] Liao S Y, Jiang D M, Cheng Q. Determination of laminar burning velocities for natural gas. *Fuel and Flame*, 2004, 83(9): 385-393
- [8] Prager J, Riedel U, Warnatz J. Modeling ion chemistry and charged species diffusion in lean methane-oxygen flame. *Proceeding of the Combustion Institute*, 2007, 21: 1129-1137
- [9] 杨津基. 气体放电. 北京: 科学出版社, 1983. 75-84
- [10] [苏] 华耳特尔等著; 张和康等译. 电介质物理. 北京: 高等教育出版社, 1957. 130-133
- [11] 厉伟, 滕云, 庚振新等. 高电压工程. 北京: 科学出版社, 2011. 21-28
- [12] 林福昌. 高电压工程. 北京: 中国电力出版社, 2011. 12-14

Effect of point electrode-generated electric field on premixed methane/air flames

Yang Xing*, Kang Chan*, Liu Jie*, Meng Xiangwen*, Fang Jianfeng*, Wu Xiaomin**

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

(** Shanxi University of Technology, Hanzhong 723399)

Abstract

An experiment was conducted to study the effect of positive electric fields of point electrodes on the shape, propagation speed and the combustion pressure of premixed methane/air flames by altering the excess air ratio and the applied voltage. The results showed that the effect of ionic wind promoted the flame propagation, and made flames stretched in the horizontal direction with the propagation speed being increased. When the applied voltage was 12 kV, the maximum of propagation speed was increased by 55.7%, 13.2% and 46.6% at the excess air ratio of 0.8, 1.0 and 1.2, respectively. When the excess air ratio was 1.4, a turning point appeared because of the combination effect of ionic wind and corona discharge. The maximum of propagation speed was increased by 128.9% after the turning point. Under the influence of electric fields, the value of peak pressure was increased and the time of peak pressure was advanced by 14.1% and 16.6% when the excess air ratio was 1.2 and 1.4, respectively.

Key words: point electrodes, premixed flame, flame propagation speed, corona discharge, combustion pressure