

DOI: 10.7652/xjtub201709006

正/负电场对预混稀燃火焰影响的对比研究

魏旭星, 贾伟东, 侯俊才, 李一鸣, 李超, 吴筱敏

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了比较正/负电场的助燃效果,在室温 298 K、气压 100 kPa 条件下,通过对定容燃烧弹内的网状电极分别加载正直流电压和负直流电压,研究了正/负电场助燃机理,由此分析了 2 种电压对甲烷/空气预混火焰形状、火焰传播速度以及燃烧压力等参数的影响。结果显示:正/负直流电场对过量空气系数分别为 1.2、1.6 的预混稀燃火焰均有促进作用,平均火焰传播速度在施加电压的电极方向得到增强;在施加电场后,相同过量空气系数下的火焰燃烧峰值压力增大,且随着电压幅值绝对值的增大,峰值压力到达时间相应缩短;在相同的电压幅值下,正电场的促进效果优于负电场。该结果对电场辅助燃烧的进一步研究具有指导意义。

关键词: 预混稀燃火焰;电场助燃;火焰传播速度;定容燃烧弹

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)09-0039-05

Comparative Research on Effect of Positive/Negative Electric Field on Premixed Lean Burn Flame

WEI Xuxing, JIA Weidong, HOU Juncai, LI Yiming, LI Chao, WU Xiaomin

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

Abstract: To compare the effects of positive and negative electric fields, at room temperature 298 K and under pressure 100 kPa, a mesh electrode is loaded with positive DC and negative DC voltage in constant volume combustion bomb to analyze the different voltage influences on the methane/air premixed flame shape, flame propagation velocity, combustion pressure and other parameters. The results show that the positive/negative DC field promotes premixed lean combustion flame with excess air coefficient 1.2/1.6, and the average flame propagation speed is enhanced in the direction of the electrode voltage. When the electric field is applied, the peak combustion pressure increases under the same excess air coefficient, and with the increasing absolute value of the voltage amplitude, the arrival time of the peak pressure is reduced accordingly. For the same voltage magnitude, the positive electric field effect is always better than that of negative electric field.

Keywords: premixed lean burn flame; electric field assisted combustion; flame propagation velocity; constant volume combustion bomb

电场助燃作为一种重要的辅助燃烧技术,广泛应用于燃烧领域。近年来,备受瞩目的天然气发动

机在高负荷下存在燃烧速度慢、发动机功率下降等问题,施加电场可改善这一缺陷。目前的技术主要

收稿日期: 2017-02-24。 作者简介: 魏旭星(1994—),男,硕士生;吴筱敏(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476126)。

网络出版时间: 2017-07-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170710.1712.006.html>

是将直流或者交流电场直接施加于各种火焰^[1]。

离子风效应是火焰中的带电粒子受到电场力作用产生的结果。Vega 等在对预混 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 层流本生灯火焰施加直流电场的研究中发现,伴随着火焰面的变形,火焰速率和火焰温度都有明显的变化^[2];Hujing 等在研究电场对烛焰燃烧的试验和数值分析中发现,电场诱导中性分子和离子,如 H_2O 、 CO 、 H_2 、 H 、 O 、 OH 、 CH_2O 、 CH 、 H_3O^+ 、 CHO^+ 、 C_3H_3^+ 等,加速向阴极移动,同时推动电子向阳极迁移,证实了电场作用下正离子和中性分子碰撞后加速移动形成了离子风效应^[3]。正离子从火焰锋面向预混区迁移,增强了反应区与未燃区的传热传质,这个机理很好地解释了负电场对火焰的促进作用。

然而,在一些研究中发现,正电场也可促进火焰传播。Marcum 等在喷焰上方施加正电压时发现,正电场可以显著改变火焰形状和层流火焰传播速度^[4]。这一现象很难用正离子的离子风效应来解释,因为正电压作用下的电场方向与负电压作用下的电场方向恰好相反,正离子从火焰锋面向已燃区扩散,这对促进火焰燃烧显然是不利的。Kim 等在层流本生灯上研究了低频交流电场(60 Hz)和直流电场对火焰稳定性影响时发现,正离子的离子风效应已经不足以解释低频区火焰吹熄速度随交流电场呈单调性变化的行为^[5]。在现有的研究中,对正电场促进火焰燃烧的作用机理还缺乏合理的解释。本文选取了过量空气系数为 1.2、1.6 的预混稀燃气,并在相同过量空气系数下分别施加正/负直流电场,通过对比预混稀燃火焰的不同作用效果,结合理论推导,得出各自作用机理。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

图 1 为试验装置,主要由定容燃烧弹、进排气系

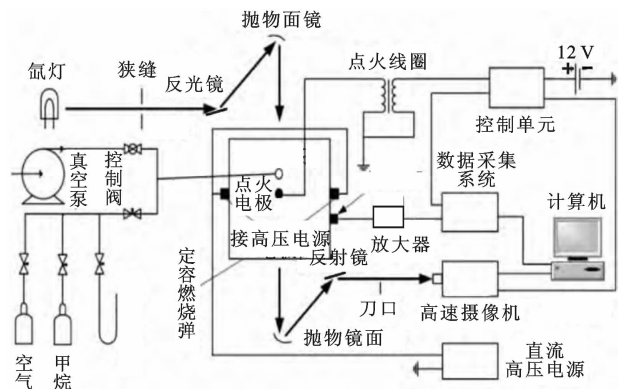


图 1 试验装置图

统、点火控制系统、直流高压电源、纹影光路系统以及压力采集系统等 6 部分组成。

定容燃烧弹系统是预混稀燃火焰燃烧过程发生的区域,其内部空腔为直径 130 mm、高 130 mm 的圆柱体,结构如图 2a 所示。网状电极与直流高压电源相连,为试验提供高压电场。网状电极:外径为 60 mm 的圆形,内部网格为 8.5 mm 的正方形,结构如图 2b 所示。

点火电极竖直对称地安装在容弹上下面的中心位置,作为点火控制系统的输出端,并在点火结束后作为容弹内的地极,其结构如图 2c 所示。为了避免点火电极与容弹壁面出现放电现象,在容弹内腔上嵌套壁厚为 8.5 mm 的聚四氟乙烯绝缘套。容弹上侧开进、排气孔,用于试验过程中甲烷/空气混合气的充入以及燃烧废气的排出,并通过压力计对进气过程中的压力进行监测。

纹影光路系统利用光在流场中的折射率梯度正比于流场气体密度的基本原理进行测量,其反映燃烧过程中火焰前锋面的变化。火焰传播图像经抛面镜反射进入高速摄像机,并通过 MotionCentral™ 软件传输到计算机上。试验中采用了美国 Redlake 公司生产的 HG-100K 型高速摄像机,每帧图像的拍摄间隔为 0.2 ms。

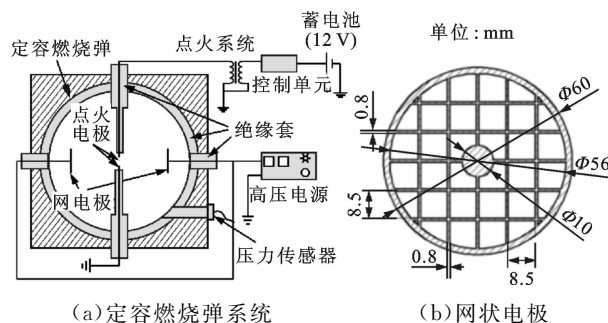


图 2 电极与定容燃烧弹系统

压力采集系统将火焰燃烧过程中的压力波动转化成可以直接处理的数字信息,包括压力传感器、电荷放大器以及数据采集仪等 3 部分。压力传感器与电荷放大器均来自瑞士 Kistler 公司,其在试验工况下的测量误差不超过 $\pm 0.3\%$;数据采集仪为日本 YOKOGAMA 公司生产的 DL750 型,采集频率最

高达 10 MHz,为了兼顾采集精度和时长的需求,此次试验中的采样频率为 10 kHz。

1.2 试验方法

在试验过程中,采用控制变量法分别改变加载电压的极性、幅值以及容弹内甲烷与空气的计量比,得到不同过量空气系数 λ 下正/负电场对火焰传播和燃烧特性的影响。试验数据分别采用光学法和压力法获得。光学法涉及火焰传播纹影图像、火焰传播距离以及火焰传播速度,该方法可以较好地描述火焰发展初期火焰形态的变化;压力法涉及燃烧压力和质量燃烧率,该方法可以较好地记录火焰主燃烧期的燃烧状况。这 2 种方法各有所长、互为补充,从而全面反映出火焰在容弹中的发展过程。

2 结果与分析

2.1 火焰传播

图 3 为 λ 分别为 1.2、1.6 时加载不同电压所对应的火焰传播纹影图像。为了方便直观对比,图中点火电极左侧为网状电极施加正电压时的火焰传播图片,右侧则为施加负电压时的火焰传播图片。从图 3 中可以看出:在未加载电压时,各过量空气系数下火焰近似呈球形向外扩展,加载电压后火焰发展呈椭圆状;同一时刻,加载电压下的火焰面均比未加载电压时的火焰面大,说明施加的电场对火焰有明显的促进作用,且随着加载电压的增大,促进作用越

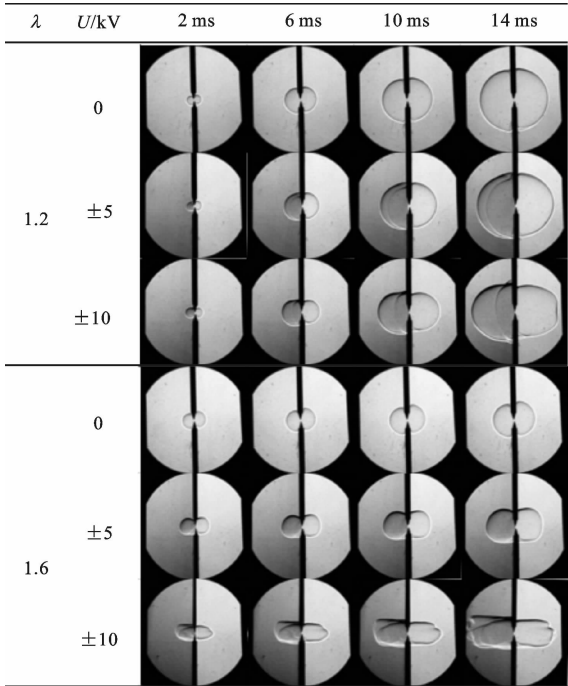


图 3 不同电压下火焰传播纹影图像

来越明显;相同电压幅值下,施加正电压的火焰面均比负电压的大,说明正电场对球性扩展火焰有更好的促进作用。

2.2 火焰传播距离与火焰传播速度

2.2.1 火焰传播距离 由图 3 火焰传播纹影图像还可以看出,不同电压下电场对火焰的促进作用都发生在水平方向,而竖直方向受电场的影响很小。

因此,将火焰传播距离 L 定义为火焰在水平方向上左右两边火焰前锋面之间的距离,并进行单位换算,即 $L=(70/236)(L_1+L_2+L_3)/(3\times 2)$, L_2 为水平方向上火焰传播距离, L_1 和 L_3 分别为 L_2 旋转 $\pm 15^\circ$ 得到的火焰传播距离,相应的测量方式如图 4 所示。

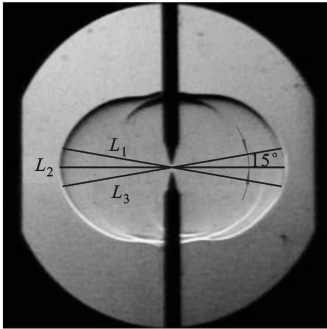
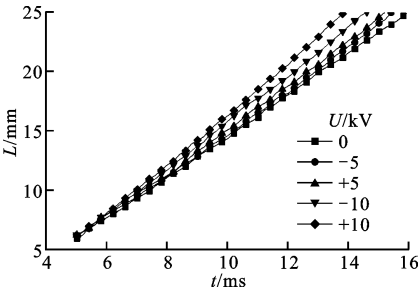


图 4 火焰传播距离示意图

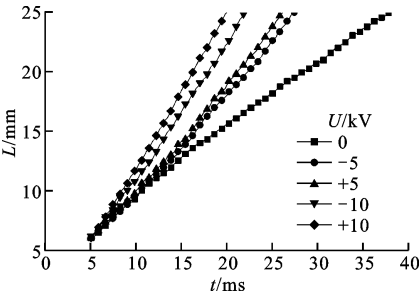
试验中火焰传播距离的范围为 $L=6\sim 25\text{ mm}$,主要是为了避免点火能量以及容弹内温度和压力的变化对火焰传播造成影响^[6]。

图 5 为 λ 分别为 1.2、1.6 时加载不同电压下 L 随时间 t 的变化。由图 5 可知:随着 t 的增加, L 近似呈线性增长;对于确定的 λ ,同一时刻下加载电压后的火焰传播距离比未加载电压时的大,且按照 -5 kV 、 $+5\text{ kV}$ 、 -10 kV 、 $+10\text{ kV}$ 的顺序递增, λ 为 1.6 时这一规律更为明显。

2.2.2 火焰传播速度 火焰传播速度 $\bar{v}$ 定义为火焰从 6 mm 传播到 25 mm 时与所对应时间的比值,即 $\bar{v}=(L_{25\text{ mm}}-L_{6\text{ mm}})/(t_{25\text{ mm}}-t_{6\text{ mm}})$, $t_{6\text{ mm}}$ 和 $t_{25\text{ mm}}$ 分别为火焰传播到 6 mm 和 25 mm 时所对应的时间。表 1 给出了 λ 分别为 1.2、1.6 时,加载不同电压下 $\bar{v}$ 及其相比于未加载电压时的增大率 $\Delta\bar{v}$ 。从表 1 中可以看出,加载电压后火焰传播速度均较未加载电压时有所提升,且随着电压的升高,火焰传播速度的变化呈增长趋势。取 $\lambda=1.2$,对比正/负电场的作用发现,加载 -5 kV 电压下的 $\bar{v}$ 较 $+5\text{ kV}$ 电压下降了 0.1 m/s ,加载 -10 kV 电压下的 $\bar{v}$ 较 $+10\text{ kV}$ 电压下降了 0.1 m/s ,这一趋势在 $\lambda=$



(a) $\lambda = 1.2$



(b) $\lambda = 1.6$

图 5 不同 λ 下火焰传播距离随时间的变化

1.6 时更加明显,说明在相同电压幅值下,正电场对 $\bar{v}$ 的提升更大。

表 1 λ 分别为 1.2、1.6 时加载不同电压下的 $\bar{v}$ 及 $\Delta\bar{v}$

λ	电压/kV	$\bar{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta\bar{v}/\%$
1.2	0	1.7	0.0
	-5	1.8	5.9
	+5	1.9	11.7
	-10	2.0	17.6
	+10	2.1	23.5
1.6	0	0.6	0.0
	-5	0.8	33.3
	+5	0.9	50.0
	-10	1.1	83.3
	+10	1.3	116.6

2.3 燃烧压力

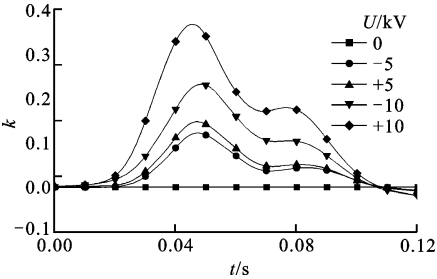
在定容燃烧弹中,预混稀燃火焰燃烧放热会导致容弹中压力上升,在燃料耗尽后,由于散热等原因使得容弹中的压力会慢慢下降,直到容弹冷却。所以,本文在对压力处理时,只考虑压力升高到峰值的过程,并采用归一化的方式获得施加电场后相对燃烧压力变化率

$$k = (p - p_0) / p_0 \tag{1}$$

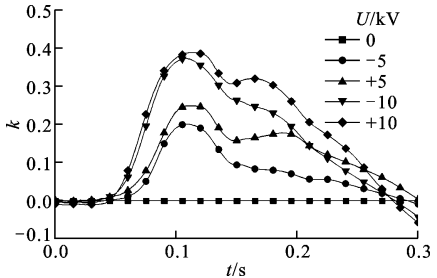
式中: p 为施加电场后容弹内瞬时压力; p_0 为未施加电场时容弹内瞬时压力。

图 6 给出了 λ 分别为 1.2、1.6 且加载不同电压

时的相对燃烧压力变化率。从图 6 可以看出:加载电压后容弹内瞬时压力均较未加载电压时大,这是因为加载电压后火焰在相同时间内传播得更远,使得更多的未燃混合气参与燃烧,从而导致燃烧压力升高率增大;加载 -5 kV 电压时对燃烧压力的提升效果不如 +5 kV,加载 -10 kV 电压时对燃烧压力的提升效果不如 +10 kV,说明在相同电压幅值下,正电场对燃烧压力的提升效果更好。



(a) $\lambda = 1.2$



(b) $\lambda = 1.6$

图 6 不同 λ 下相对燃烧压力的变化率

2.4 质量燃烧率

利用数据采集仪记录压力数据,根据 Elbe's 方程^[7]计算质量燃烧率

$$M_f = \frac{p(t) - p_i}{p_{\max} - p_i} \tag{2}$$

式中: $p(t)$ 为瞬时燃烧压力; p_i 为可燃混合气初始压力; $p_{\max}$ 为燃烧过程的峰值压力。定义燃烧持续期 t_i 为质量燃烧率从 0% 到 90% 所用的时间,即

$$t_i = t \Big|_{90\% M_f} - t \Big|_{0\% M_f} \tag{3}$$

图 7 给出了 λ 分别为 1.2、1.6 且加载不同电压时质量燃烧率随时间的变化。从图 7 可以看出:加载电压后容弹内质量燃烧率增大,说明加载电压能更好地促进火焰燃烧;同一时刻,随着电压幅值的增大,质量燃烧率的提升幅度也在不断增大,且在相同电压幅值下,正电场的提升效果优于负电场。

表 2 给出了 λ 分别为 1.2、1.6 且加载不同电压时燃烧持续期 t_i 及其相对于未加载电压时的变化率 Δt_i 。从表 2 可以看出,加载电压后燃烧持续期均

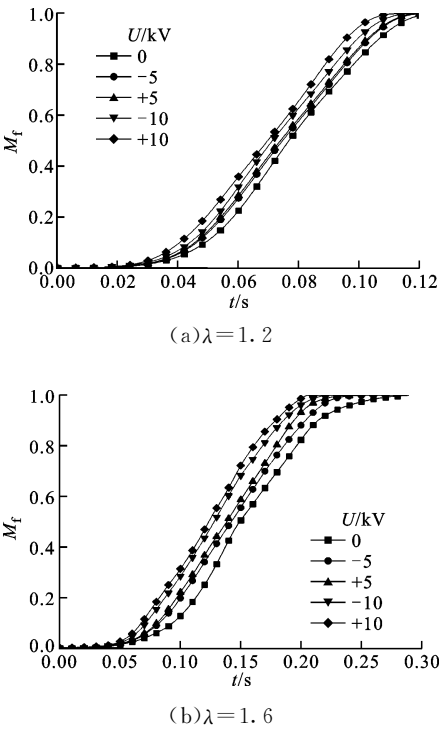


图 7 不同 λ 下的质量燃烧率

较未加载电压时减小,即燃烧过程加快,且随着电压的升高,燃烧持续期越来越短。

表 2 λ 分别为 1.2、1.6 且加载不同电压时的 t_i 及 Δt_i

λ	电压/kV	t_i /ms	Δt_i /%
1.2	0	88.8	0.0
	-5	86.2	2.9
	+5	85.6	3.6
	-10	82.8	6.8
	+10	79.6	10.4
1.6	0	213.7	0.0
	-5	203.3	4.9
	+5	193.8	9.3
	-10	185.0	13.4
	+10	178.7	16.4

取 $\lambda=1.2$,对比正/负电场的作用效果发现,加载+5 kV 电压下的燃烧持续期较-5 kV 电压下缩短了 0.6 ms,加载+10 kV 电压下的燃烧持续期较-10 kV 电压下缩短了 3.2 ms,这一趋势在 $\lambda=1.6$ 时更加明显,说明在相同电压幅值下,正电场对缩短燃烧持续期的作用更好。

2.5 正/负电场对火焰的作用机理

正电场对火焰的促进效果优于负电场,这可能是正/负电场下的粒子特性表现出了差异,进而导致作用机理以及输运特性不同。

碳氢燃料燃烧时会在火焰前锋面产生大量的带电粒子,对网状电极施加负电压会形成由点火电极指向网状电极的电场,火焰中的正离子,如 H_3O^+ 、 CHO^+ 等^[8],将在电场力的驱动下从火焰前锋面向未燃区传播。正离子在一个自由程内获得电场的能量成为加速的正离子,加速的正离子通过碰撞中性粒子交换能量使得中性粒子被加速,这样正离子在电场中发生定向迁移,并在迁移过程中与中性分子碰撞且进行动量与热量传递,从而促进火焰传播。这就是负电场对火焰作用的主要机理——离子风效应^[9]。试验工况下的离子风效应,增强了火焰前锋面与未燃区在水平方向上的能量交换,从而使得火焰得到横向发展,火焰传播速度加快,燃烧压力急剧上升,燃烧持续期相应缩短。

对网状电极施加正电压时,电场方向和施加的负电压相反,此时在电场力的作用下负离子和自由电子从火焰前锋面向未燃区迁移。由于高温下负离子极易分解^[10],因此只考虑自由电子对火焰传播的影响。自由电子在穿过甲烷预混气体的火焰前锋面时,具有较高能量的电子可以激发反应中低电离能的粒子,低电离能的粒子(激发态)通过碰撞将能量传递给 O_2 ,从而参与化学反应^[11],即

$$\text{N}_2(u=0)+e=\text{N}_2(u=1)+e \tag{4}$$

$$\text{N}_2(u=1)+\text{O}_2(u=0)=\text{N}_2(u=0)+\text{O}_2(u=1) \tag{5}$$

在上述链式化学反应中, $u=0$ 或 1 代表了分子处于基态或激发态,激发态的 O_2 化学活性增大,加速了链分支基元的反应,从而促进了整个燃烧过程中的化学反应,提高了正电场作用下火焰传播速度,加快了燃烧过程的进行,有效缩短了燃烧持续期。

由以上机理可知,施加正/负电场时,带电粒子会跟随火焰面向外传播而表现出输运特性,迁移率是表征输运特性的主要参数,文献[12-13]给出了电子的迁移率为 $4\,000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,正离子的迁移率为 $1\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,这说明在相同电压下,电子可获得的速度要远高于正离子,即相同电压幅值下,电子可以比正离子更快速地传播,与中性分子的碰撞也更加剧烈,进而加快了燃烧过程中的化学反应。

因此,在试验中正电场的促进效率优于负电场。

3 结 论

(1)施加电场时,正/负电场均会引起火焰变形,且在施加电场的方向上火焰得到拉伸。

(下转第 164 页)