

DOI: 10.7652/xjtuxb202003011

直流电场对甲烷/空气预混火焰影响的机理研究

卢矍然, 高忠权, 何子奇, 郭致成, 鲍彦同, 张灏
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为明确直流电场对燃烧的作用机理,在常温、初始压力 100 kPa 下,向定容燃烧弹内的网状电极加载 3 种电场,分别为两侧同为负直流电场、同为正直流电场以及左侧为负直流电场右侧为正直流电场,研究 3 种电场加载方式下的直流电场对甲烷/空气预混火焰燃烧特性的影响。结果表明:在 3 种电场加载方式下,火焰形变、平均火焰传播速度、压力峰值随着电压的增大均增大;当电压幅值相同时,两侧同为负电场对火焰促进效果最强,其次为左侧为负电场右侧为正电场,两侧同为正电场对火焰促进效果最弱。由模拟计算可知:电体积力随着电压的增大而增大,两电极同为负电场与正电场时,平均火焰传播速度增大率和电体积力之间的相关系数分别为 0.996、0.997,压力峰值增大率和电体积力之间的相关系数分别为 0.989、0.971,说明电体积力与电场对火焰的促进作用密切相关;当电压幅值为 10 kV 时,两电极同为负电场与正电场的离子风发展程度分别为 0.153、0.019,说明正是由于离子风发展程度的不同导致了正负电场对燃烧促进作用不同。

关键词: 直流电场;燃烧;电体积力;离子风发展程度

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0088-09

Combustion Characteristics of CH₄/Air Premixed Flame under the Effect of DC Electric Field

LU Jueran, GAO Zhongquan, HE Ziqi, GUO Zhicheng, BAO Yantong, ZHANG Hao
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the effect of DC electric field on the combustion characteristics, experiments were conducted under the condition of normal temperature and initial pressure of 100 kPa, and electric field was applied on the mesh electrodes within the combustion bomb in three ways: applying negative DC electric field on both sides; applying positive DC electric field on both sides; and applying negative DC electric field on the left side and positive DC electric field on the right side. The methane/air premixed flame combustion characteristics were studied under the three kinds of electric fields. The results showed that the flame deformation, average flame propagation velocity and pressure peak all increased with the increase of the loading voltage. When the voltage amplitude was the same, the negative electric field applied on both sides had the strongest promotion effect on the flame, followed by the negative electric field on the left side and positive electric field on the right side, and the weakest promotion effect on the flame resulted from applying positive electric field on both sides. Simulation results show that electric body

force increases gradually with the increase of voltage, and the correlation coefficients of linear fitting of the average flame propagation velocity with the electric body force are 0.996 and 0.997 for the negative electric field and positive electric field, respectively. The simulation results also show that the correlation coefficients of linear fitting of the increasing rate of pressure peak with the electric body force are 0.989 and 0.971 for the negative electric field and positive electric field, respectively. These results indicate that the electric body force is closely related to the effect of applied electric field on the flame. When the voltage amplitude is 10 kV, the development degrees of ionic wind with the negative electric field and positive electric field applied on both sides are 0.153 and 0.019, respectively, indicating that it is the different development degrees of ionic wind that lead to the different promotion effects of positive and negative electric fields on combustion characteristics.

Keywords: DC electric field; combustion; electric body force; development degree of ionic wind

清洁替代燃料是未来能源结构的主要调控方向,天然气作为一种较清洁的替代燃料在清洁燃料中占据着重要的地位,在未来将有很广阔的发展空间。尽管天然气具有很多优点,但是其燃烧稳定性差、燃烧速度慢、排放污染物等也是急需解决的问题。电场辅助燃烧技术作为一种能够有效降低排放量^[1-2]、提高燃烧效率^[3-4]、增强火焰稳定性^[5]的新型燃烧技术,受到了国内外研究者广泛而深入的研究。van den Boom 等研究了直流电场对甲烷/空气平板火焰燃烧速率的影响,实验结果表明加载电压与绝热燃烧速率呈指数关系^[6];Belhi 等利用数值模拟的方法验证了电场中火焰电体积力的存在,并证实了电场作用的不同导致了火焰传播速率的不同^[7];Vega 等对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 层流本生灯火焰研究时发现,在高直流电场强度下,火焰温度与火焰传播速率会随着火焰正面形变产生显著变化,认为这主要是由于离子风效应改变了流场使得火焰拉伸,进而改变了火焰温度和速度所致^[4];Starikowskii 等利用 CHEMKIN 和 ANSYS CFX 软件建立了层流预混甲烷/空气火焰在弱直流作用下的一维和二维模型,并且发现直流电场可以降低 CO 的排放量和提高燃烧的完全性,同时结合火焰内化学反应机理的研究表明,直流电场作用下形成的离子风效应影响了火焰的发展^[8]。

尽管大量研究表明,负电场对火焰的影响主要是正离子风效应的结果^[9-12],但孟浩等通过将直流电场与另外两种电场的助燃结果进行对比,发现正直流电场主要通过负离子风效应促进火焰传播^[13]。孟祥文等通过正负直流电场对预混甲烷空气火焰影响的研究发现,负电场对火焰的促进作用强于正电场^[3]。已有研究缺少定量分析直流电场对火焰影响

机理的研究,因此急需通过模拟计算获得电场火焰中参与碰撞的各种粒子的数量,进而分析电体积力与火焰拉伸的关系,得到正负直流电场对火焰影响作用的机理。本文通过加载不同电压、不同方式的正负直流电场,得到加载直流电场下甲烷/空气预混燃烧的不同燃烧参数,并结合 CHEMKIN 软件与离子反应机理^[14-15]进行模拟计算,从而更深一步研究了直流电场对甲烷/空气预混燃烧的影响机理。

1 实验装置和方法

本文的实验装置主要由定容燃烧弹、点火控制装置、压力采集装置、进排气装置、高速纹影摄像装置和正负直流高压电源等 6 部分组成,如图 1 所示。

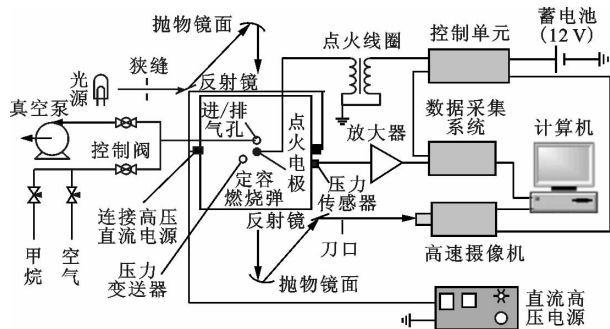


图 1 实验装置图

定容燃烧弹的材料为 45 号钢,其内部空腔直径为 140 mm,长度为 180 mm。在容弹内腔置有壁厚为 5 mm 的聚四氟乙烯绝缘套,用于防止打火电极与容弹壁面出现放电;容弹的上下方对称安装距离为 2 mm 的针状打火电极,另外容弹左右两侧分别安装一对高压电极,用于施加外部高电压,其结构如图 2 所示。容弹前后两侧装有高抗冲压的石英玻璃,为纹影系统提供必要的光学通路。在高速纹影

摄像系统中,火焰传播图像通过抛面镜反射进入高速摄像机,并经过 MotionCentral™ 软件传输到计算机上。

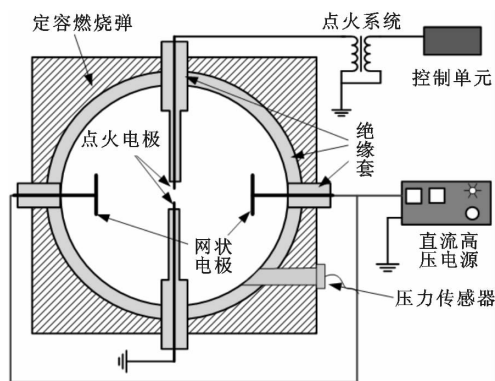


图2 电极与定容燃烧弹系统

实验中的压力采集系统由压力传感器(Kistler 4075A10 型压力传感器)、数据采集仪(DL750 型)、电荷放大器(Kistler 4618A 型)3部分组成,主要用于获得燃烧过程中的压力数据。

本实验在常温、初始气压 100 kPa 下,向容弹内配置过量空气系数为 1.4 的甲烷/空气的混合气。容弹内进气完成后,静置 2~3 min 以消除气体扰动并使其混合均匀,再向高压电极上加载直流电压并点火。为使实验误差最小,每个工况点至少重复测量 3 次,并取平均值。

2 结果与分析

2.1 火焰传播图像

图3给出了初始压力为 100 kPa、过量空气系数为 1.4 时,不同电场加载方式所对应的火焰传播纹影图像,从上到下依次为左右两侧同时施加正电压、左侧施加负电压右侧施加正电压、左右两侧同时施加负电压时的图像。

从图3可知:在未加载电压时,火焰近似呈球形向外扩展,由于网状电极布置在水平方向,所以加载电压后水平方向有明显的拉伸,竖直方向拉伸程度较小,火焰发展呈椭圆状;随着电压幅值的增大,火焰的拉伸程度逐渐变大,两侧同为负电压的火焰拉伸程度最大,其次为左侧负电压右侧正电压,两侧同为正电压的火焰拉伸程度最小;在相同时刻下,加载电压的火焰图像面积比未加载电压的火焰图像面积大,表明加载电场对火焰传播有明显的促进作用,随着施加电压的增大,电场对火焰传播的促进作用更明显;相同电压幅值下,两侧施加负电压的火焰图像面积最大,两侧施加正电压的图像面积最小,说明负

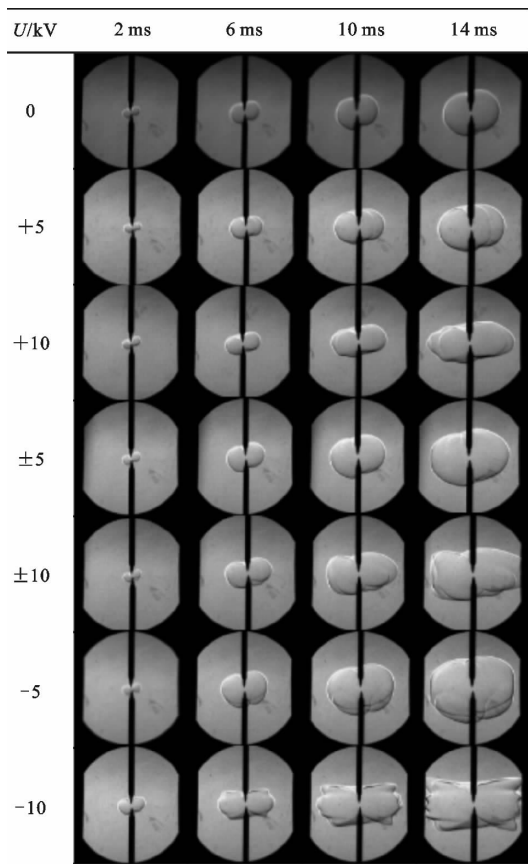


图3 不同电压下火焰传播纹影图像

电场比正电场对球形扩展火焰传播有更好的促进作用;相同电压幅值下,从火焰面发展程度来看,两侧同为负电压时火焰沿着火焰面周围呈现旋涡状拉伸,两侧同为正电压时火焰沿着左右两侧水平均匀拉伸,而左侧施加负电压右侧施加正电压的火焰面左右两端发展不均匀,并且左侧火焰面发展明显被抑制。

2.2 火焰传播距离和速度

由于电场对火焰的影响主要发生在水平方向,对竖直方向的影响非常小,所以本文在水平方向两侧的网状电极上施加电场。将火焰水平左右两侧火焰前锋面到容弹的中心距离 L_1 、 L_2 之和的平均值定义为火焰传播距离 L ,即 $L = (L_1 + L_2) / 2$,为了降低点火能量波动、压力和温度的变化对火焰传播的影响^[14],文中的火焰传播距离研究范围为 6~25 mm。

图4为加载不同直流电压的火焰传播距离随时间的变化关系。由图4可知:无论是否施加电场,随着时间的增加,火焰传播距离不断增大,并且近似呈线性增长。

在相同时刻下,加载直流电场后的火焰传播距离比未加载电场时大,并且按照 +5 kV、±5 kV、-5 kV、+10 kV、±10 kV、-10 kV 的顺序递增, L

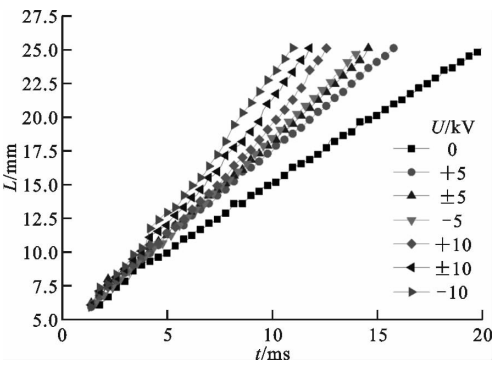


图 4 不同电压直流电场下火焰传播距离随时间的变化

随 t 的变化率逐渐增大。由层流燃烧速度的定义可知,火焰传播速度 S_L 为火焰相对于静止燃烧壁面的运动速度,即 $S_L = dL/dt$,所以火焰传播速度按照 $+5\text{ kV}$ 、 $\pm 5\text{ kV}$ 、 -5 kV 、 $+10\text{ kV}$ 、 $\pm 10\text{ kV}$ 、 -10 kV 的顺序逐渐增大。

平均火焰传播速度定义为火焰传播距离从 6 mm 变化到 25 mm 时与对应的传播时间的比值,即

$$\bar{S}_L = \frac{L_{25} - L_6}{t_{25} - t_6} \tag{1}$$

$$\Delta \bar{S}_L = (\bar{S}_L - S_0)/S_0 \tag{2}$$

式中 S_0 为未加载电场时的平均火焰传播速度。

表 1 为不同加载电压下 3 种电场加载方式的 $\bar{S}_L$ 及其相对于未加载电压时的平均火焰传播速度增大率 $\Delta \bar{S}_L$ 。由表 1 可看出:不同电压下,平均火焰传播速度相比于未施加电压时明显提高,随着电压增大,平均火焰传播速度不断增大;在相同电压幅值下,两侧加载负电压的平均火焰传播速度最大,两侧加载正电压的平均火焰传播速度最小,左侧加载负电压右侧加载正电压的平均火焰传播速度介于两者之间。

表 1 不同电压直流电场下的 $\bar{S}_L$ 和 $\Delta \bar{S}_L$

U/kV	$\bar{S}_L/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\Delta \bar{S}_L/\%$
0	1.04	
+5	1.32	26.92
±5	1.44	38.46
-5	1.51	45.19
+10	1.70	63.46
±10	1.83	75.96
-10	1.88	80.77

随着施加电压幅值的增大,3 种加载方式下的平均火焰传播速度和平均火焰传播速度增大率的差异性更加显著,加载电压为 $+10\text{ kV}$ 、 $\pm 10\text{ kV}$ 、 -10 kV

的平均火焰传播速度增大率分别为 63.46% 、 75.96% 、 80.77% ,说明在相同电压幅值下,负电场对平均火焰传播速度的促进作用最强。

2.3 燃烧压力参数

图 5 给出了不同加载电压下 3 种电场加载方式的燃烧压力随时间的变化。由图 5 可知:施加电压后容弹内压力峰值均较未加载电压时大,并且达到压力峰值的时间明显缩短。

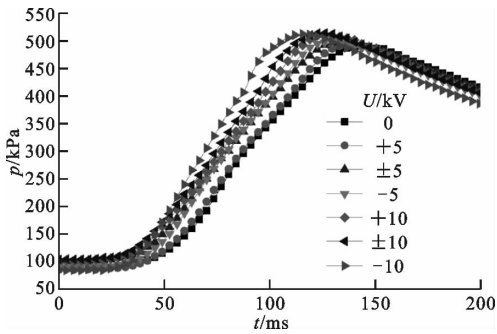


图 5 不同电压下燃烧压力随时间的变化

表 2 为不同加载电压下 3 种电场加载方式的压力峰值 $p_{\max}$ 、压力峰值到达时间 t_p 及其相对于未施加电压时的变化率。由表 2 可以看出:施加电压后 $p_{\max}$ 均呈现增大趋势, t_p 均呈现减小趋势,随着电压的增大,这种趋势更加显著。

表 2 不同电压直流电场下的燃烧特性参数

U/kV	$p_{\max}/\text{kPa}$	t_p/ms	$\Delta p_{\max}/\%$	$\Delta t_p/\%$
0	492.50	146.4		
+5	498.63	137.7	1.24	-5.94
±5	501.25	134.4	1.78	-8.20
-5	507.56	130.8	3.06	-11.93
+10	513.75	126.3	4.31	-13.73
±10	514.38	125.5	4.44	-14.28
-10	516.46	113.4	4.86	-22.54

两侧加载负电压时压力峰值增大程度最大,两侧加载正电压时压力峰值增大程度最小,左侧加载负电压右侧加载正电压时压力峰值增大程度介于两者之间;两侧加载负电压的压力峰值到达时间最短,两侧加载正电压的压力峰值到达时间最长,左侧加载负电压右侧加载正电压的压力峰值到达时间介于两者之间;加载电压为 -10 kV 、 $\pm 10\text{ kV}$ 、 $+10\text{ kV}$ 的压力峰值增大率分别为 4.86% 、 4.44% 、 4.31% ,压力峰值到达时间分别缩短 22.54% 、 14.28% 、 13.73% 。

3 直流电场助燃机理分析

3.1 甲烷/空气预混火焰燃烧过程带电粒子计算

目前研究普遍认为离子风效应是直流电场影响火焰燃烧过程的主要机理,火焰受到电场产生的电体积力而引起离子定向移动,这种离子定向移动的累积过程就是离子风效应的本质。单位体积的电体积力与离子数密度呈正相关,所以为了分析直流电场对火焰燃烧影响的本质,必须首先获取离子数密度。利用CHEMKIN-PRO软件并结合包含离子反应的甲烷燃烧机理^[16],对未加电场、过量空气系数 $\lambda=1.4$ 、初始压力为100 kPa的甲烷/空气预混燃烧进行带电粒子模拟计算,得到甲烷/空气预混燃烧时不同火焰位置处带电粒子的浓度(单位体积内的粒子个数,即粒子数密度)分布如图6所示。由图6可知,在已知压力和过量空气系数的情况下,Alqaity等所测量的稀释火焰中正离子的浓度分布与本文模拟得到的正离子浓度分布相一致^[17]。贾伟东等从层流燃烧和离子数密度的角度对甲烷燃烧机理进行了验证^[16],并将计算结果与Wortberg等测量的甲烷空气平面火焰在大气压下的离子数密度和温度曲线进行比对,发现测量值与计算值分布一致^[18],验证了利用该燃烧机理计算离子数密度的可行性。

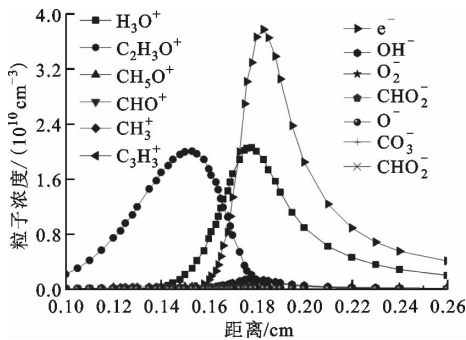


图6 甲烷/空气预混火焰带电粒子浓度分布图

为了对某一时刻所有粒子进行分析计算,需要对火焰前锋面处各带电粒子的浓度进行分析。预混甲烷/空气火焰中主要正离子的生成与消耗可由CH的浓度分布反映,所以取CH的浓度峰值位置为其他粒子浓度研究的基准位置,并以此位置作为火焰前锋面研究位置^[19]。

表3给出了初始压力为100 kPa、 $\lambda=1.4$ 时火焰前锋面中心位置各种粒子的浓度。

3.2 正负直流电场电体积力分析

电场对火焰的影响主要是由于电体积力诱导离子分子的碰撞,使得未燃混合气与火焰前锋面快速

表3 甲烷/空气预混火焰前锋面中心位置
各粒子浓度 cm⁻³

正离子浓度	负离子浓度	电子浓度	中性分子浓度
2.37×10^{10}	2.71×10^9	2.70×10^{10}	4.64×10^{18}

接触,加速了火焰前锋面的化学反应进程,从而加快了水平方向火焰的燃烧速度,使火焰前锋面出现褶皱与水平方向的拉伸,所以火焰呈现出梭形、椭球型和矩形。综上所述,如果想要分析电场对火焰的影响,进行电体积力的计算尤为关键。根据Lawton等的研究^[20],火焰反应区域的电体积力可以表示为

$$F_{\pm} = en_{\pm}E \tag{3}$$

式中: $e=1.6 \times 10^{-19}$ C为元电荷电量; n_+ 和 n_- 分别为正离子和负离子的浓度; E 为电场强度。

本文根据Duan等建立的电场仿真计算模型^[9],利用Ansoft Maxwell电场模拟计算得到所有电压下对应的平均电场强度,其中仿真模拟过程的边界条件为狄利克雷边界条件(第一类边界条件),即模拟时已知边界上的电位。崔雨辰等验证了该计算模型计算误差小、精度高,具有一定的准确性^[21]。本文电场模拟结果与上述文献的模拟结果相一致。结合3.1节计算的离子浓度,可以粗略得到加载不同电压的正负直流电场时火焰前锋面离子受到的电体积力,这里把加载负电场时离子受到的电体积力记为 F_- ,加载正电场时离子受到的电体积力记为 F_+ ,且正负电压统一取其绝对值。

图7给出了不同电压正负电场下甲烷/空气预混火焰前锋面离子受到的电体积力。由图7可知,随着电压幅值的增大,火焰前锋面离子受到的电体积力呈线性增大,并且加载负电场时产生的电体积力远大于加载正电场时产生的电体积力,随着电压增大,这种趋势更加明显。

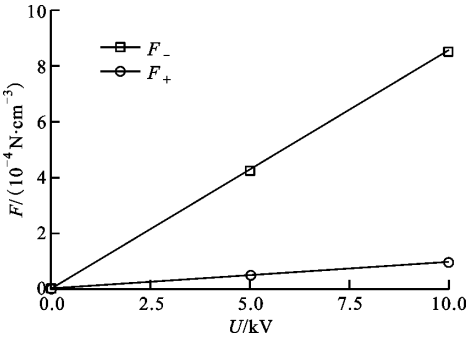


图7 不同电压正负电场下甲烷/空气预混火焰
前锋面离子受到的电体积力

图8给出了不同加载电压下平均火焰传播速度

增大率与压力峰值增大率随电体积力的变化关系。由图可以看出,平均火焰传播速度增大率与压力峰值增大率均随着电体积力增大近似呈线性增长。为了进一步明确电体积力与平均火焰传播速度增大率和压力峰值增大率之间的关系,分别对图 8 中的曲线进行线性拟合,得到负电场与正电场的平均火焰传播速度增大率和电体积力之间的皮尔逊相关系数分别为 0.996、0.997,压力峰值增大率和电体积力之间的皮尔逊相关系数分别为 0.989、0.971。这一方面说明火焰中带电粒子受到的电体积力与不同电压有效值下的火焰传播速度以及压力峰值高度相关,另一方面说明当加载不同电压时,电体积力的变化主导了电场对火焰的助燃程度。

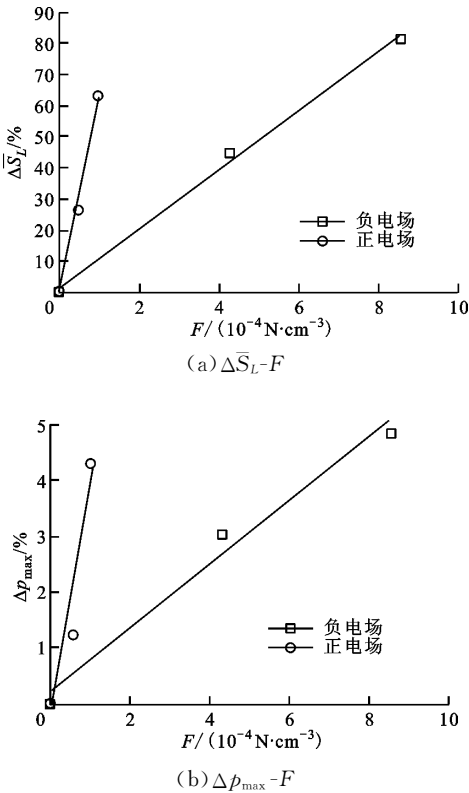


图 8 平均火焰传播速度增大率与压力峰值增大率随电体积力的变化

随着甲烷/空气预混火焰不断向外传播,由于外加电场电体积力的促进作用,火焰前锋面的带电粒子在不断向外运动的过程中与大量中性分子进行碰撞,中性分子继续碰撞其他粒子,并在不断碰撞的过程中形成了超大的流场从而促进燃烧。同时,随着外加电压不断增大,电体积力也不断增大,火焰前锋面中的粒子获得了更多动能,从而大大促进了火焰的燃烧。

但是,从图 8 中看出:无论是 $\Delta \bar{S}_L-F$ 的拟合曲

线还是 $\Delta p_{\max}-F$ 的拟合曲线,正电场拟合曲线的斜率均比负电场的大。这是由于正电场受到的电体积力较小,火焰传播速度较慢,在定容燃烧弹中传播的时间增加,从而受到电体积力的作用更多。由于本文中研究的是球形传播火焰,火焰在电场中停留时间越长,电场的作用效果就越明显。因此,在比较正负电场对火焰的影响时不仅要考虑电体积力的作用,还应考虑火焰在电场中驻留的时间。

3.3 正负直流电场离子风发展程度分析

离子风效应与离子数密度、外加电场的电场强度以及火焰在电场中的驻留时间呈正相关。负电场对火焰的作用主要归因于电场诱导正离子与中性粒子相互碰撞产生的正离子风效应;正电场对火焰的作用主要归因于电场诱导负离子与中性粒子相互碰撞产生的负离子风效应^[22]。为了明确说明正负直流电场离子风效应对火焰的影响过程,必须研究加载直流电场后火焰在发展过程中的离子风发展程度^[23]。根据 Kono 等基于碰撞频率以及中性分子与离子的占比定义的碰撞反应时间^[24],定义离子风的发展程度 ξ 为

$$\xi = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_c}\right)$$
 (4)

$$t_c = \frac{1}{zR_i}$$
 (5)

$$z = \frac{4\pi\sigma^2 p}{\pi m k_B T}$$
 (6)

式中: σ 为分子碰撞直径,对于甲烷/空气混合气,根据 CHEMKINPRO 输运参数文件选取为 $3.746 \times 10^{-10} \text{ m}$; p 为初始压力; m 为粒子平均相对分子质量; $k_B = 1.390\ 62 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 为玻尔兹曼常数; t 为瞬态火焰传播时间(当量火焰传播距离为 6~25 mm); t_c 为离子碰撞响应时间^[20]; R_i 为离子与尚未发生碰撞的中性分子的浓度之比,由于离子浓度与中性分子浓度的比值非常小,大约在 10^{-8} 左右^[23],则中性分子浓度比正负带电离子浓度约大 8 个数量级,故使用中性分子总浓度代替未发生碰撞的中性分子浓度; T 为绝热火焰温度,利用 CHEMKIN 软件求解得到。各参数的具体计算结果如表 4 所示。

表 4 式(5)、式(6)中各参数计算结果

p/kPa	$\sigma/(10^{-10} \text{ m})$	$m/(10^{-26} \text{ kg})$	T/K	$z/(10^9 \text{ s}^{-1})$
100	3.746	4.56	1 862.36	2.90

由式(4)得到电压幅值为 10 kV 下的正负电场的离子风发展程度如表 5 所示,其中 t_{cp} 为正离子碰撞响应时间, t_{cn} 为负离子碰撞响应时间, R_{ip} 为正离

子与中性分子浓度之比, R_{in} 为负离子与中性分子浓度之比。

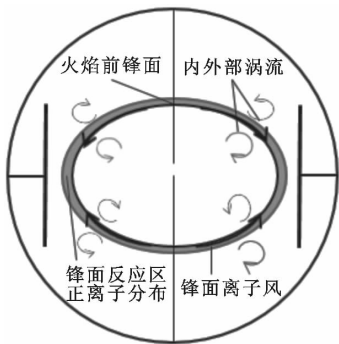
表 5 正负电场离子风发展程度

U/kV	$R_{ip}/10^{-10}$	$R_{in}/10^{-10}$	t_{cp}/ms	t_{cn}/ms	ξ
+10		5.84		590.41	0.019
-10	51.08		65.08		0.153

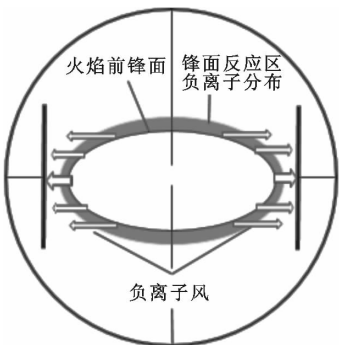
由前文分析可知,相对于未加电场,加载电压为 -10 kV 、 $+10\text{ kV}$ 电场时的平均火焰传播速度增大率分别为 80.77% 、 63.46% ,压力峰值增大率分别为 4.86% 、 4.31% ,压力峰值到达时间分别缩短了 22.54% 、 13.73% ,可见正是由于正负电场离子风发展程度的巨大差别,造成了对火焰促进作用的程度明显不同,这从理论上说明了直流负电场相比于直流正电场对火焰促进作用更明显的原因。

3.4 正负直流电场离子风发展过程分析

根据现有研究^[13,25],图 9 给出了甲烷/空气预混火焰前锋面离子风形成过程模拟图。由图 9a 可知,大量带电粒子高速迁移会产生涡流,火焰上下侧面的离子迁移会在内外部形成漩涡,加载负电场时正离子风主要沿着环形的涡流不断发展,随着电压的增大,形成的涡流逐渐增大,这种正离子风的涡流作用,使得两侧加载负电压的火焰表面出现明显的



(a)正离子风发展过程



(b)负离子风发展过程

图 9 加载正负直流电场下的离子风发展过程

褶皱,火焰表面被剧烈拉伸呈现长方形。由图 9b 可知,加载正电场时负离子风主要沿着两侧水平方向发展,随着电压增大,这种趋势更加明显。正是由于负离子风的这种作用,使得两侧加载 $+10\text{ kV}$ 电压的火焰传播图像沿着水平方向明显被拉伸呈现梭形。

当左侧加载负电场右侧加载正电场时,由于加载了正负电场,所以左侧火焰前锋面的正离子风效应与右侧的负离子风效应共同起作用,使点火电极左侧的正离子和右侧的负离子在电场作用下均加速移向中间的点火电极,电场效应不起作用。因此,该加载方式对火焰的影响效应介于正负离子风之间。同时,由图 3 也可以看到,左侧加载负电场右侧加载正电场时,火焰传播图像的左侧明显受到抑制,这恰恰是由于左侧正离子风的涡流被右侧负离子风的水平传播作用所阻碍,因此从实验的角度验证了甲烷/空气预混火焰前锋面离子风形成过程模拟图的正确性。

4 结 论

(1)在火焰上施加电压时,火焰在施加电压的方向上受到拉伸并产生变形;随着电压的增大,3 种电场加载方式下的平均火焰传播速度和压力峰值均逐渐增大,相同电压幅值下,两侧同为负电场时,对火焰的作用效果最强。

(2)不同电压下的直流电场对火焰的促进作用主要是电体积力的作用,随着施加电压幅值的增加,火焰受到的电体积力逐渐增加,火焰变形程度增大,平均火焰传播速度和压力峰值均增大。电体积力与平均火焰传播速度增大率和压力峰值增大率的皮尔逊相关性系数均大于 0.97。

(3)正负电场对燃烧影响的差异性主要是离子风效应发展程度的不同和离子风发展过程的不同。负电场形成的正离子风效应发展程度明显比正电场形成的负离子风效应发展程度更强。正离子风以内部形成涡流的方式影响火焰的发展,使得火焰出现褶皱呈现长方形;负离子风则是从水平两侧形成水平的作用力,使得火焰两侧明显被拉伸成梭形。

参考文献:

[1] PARK D G, CHOI B C, CHA M S, et al. Soot reduction under DC electric fields in counter-flow non-premixed laminar ethylene flames [J]. Combustion Science and Technology, 2014, 186(4/5): 644-656.
[2] ZHANG Y, WU Y, YANG H, et al. Effect of high-

- frequency alternating electric fields on the behavior and nitric oxide emission of laminar non-premixed flames [J]. *Fuel*, 2013, 109: 350-355.
- [3] 孟祥文, 杨星, 康婵, 等. 直流电场对预混 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 火焰传播特性影响的试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(7): 13-17.
- MENG Xiangwen, YANG Xing, KANG Chan, et al. Effect of direct-current electric field on flame propagation characteristics of premixed $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ flames [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(7): 13-17.
- [4] VEGA E V, LEE K Y. An experimental study on laminar $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ premixed flames under an electric field [J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2008, 22(2): 312-319.
- [5] ATA A, COWART J S, VRANOUS A, et al. Effects of direct current electric field on the blowoff characteristics of bluff-body stabilized conical premixed flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 2005, 177(7): 1291-1304.
- [6] VAN DEN BOOM J, KONNOV A A, VERHASSELT A, et al. The effect of a DC electric field on the laminar burning velocity of premixed methane/air flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 1237-1244.
- [7] BELHI M, DOMINGO P, VERVISCH P, et al. Direct numerical simulation of the effect of an electric field on flame stability [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(12): 2286-2297.
- [8] STARIKOWSHII A, SKOBLIN M, HAMMER T, et al. Influence of weak electric fields on the flame structure [C]//2008 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 629-632.
- [9] DUAN H, WU X M, SUN T Q, et al. Effects of electric field intensity and distribution on flame propagation speed of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ flames [J]. *Fuel*, 2015, 158: 807-815.
- [10] KUHL J, SEEGER T, ZIGAN L, et al. On the effect of ionic wind on structure and temperature of laminar premixed flames influenced by electric fields [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 176: 391-399.
- [11] HU J, RIVIN B, SHER E, et al. The effect of an electric field on the shape of co-flowing and candle-type methane-air flames [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2000, 21(1): 124-133.
- [12] 侯俊才, 李超, 贾伟东, 等. 负直流电场对不同初始压预混甲烷/空气火焰的影响 [J]. *化工学报*, 2017, 69(4): 1602-1610.
- HOU Juncai, LI Chao, JIA Weidong, et al. Effects of negative DC electric fields on CH_4/air premixed flame at different initial pressures [J]. *CIESC Journal*, 2017, 69(4): 1602-1610.
- [13] 孟浩, 杨猛, 何子奇, 等. 正直流电场对球形火焰影响的机理分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(7): 68-73.
- MENG Hao, YANG Meng, HE Ziqi, et al. Mechanism analysis of the effect of positive DC electric field on spherical flame [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(7): 68-73.
- [14] PEDERSEN T, BROWN R C. Simulation of electric field effects in premixed methane flames [J]. *Combustion & Flame*, 1993, 94(4): 433-448.
- [15] PRAGER J, RIEDEL U, WARNATZ J, et al. Modeling ion chemistry and charged species diffusion in lean methane-oxygen flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 1129-1137.
- [16] 贾伟东, 何子奇, 杨猛, 等. 稀释气对离子电流影响的试验研究与机理分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(1): 148-155.
- JIA Weidong, HE Ziqi, YANG Meng, et al. Experimental study and mechanism analysis on the influence of dilution gas on ion current [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(1): 148-155.
- [17] ALQUAITY A B S, HAN J, CHAHINE M, et al. Measurements of positively charged ions in premixed methane-oxygen atmospheric flames [J]. *Combustion Science & Technology*, 2016, 189(4): 575-594.
- [18] WORTBERG G. Ion-concentration measurements in a flat flame at atmospheric pressure [J]. *Symposium on Combustion*, 1965, 10(1): 651-655.
- [19] 何子奇, 高忠权, 贾伟东, 等. 低频交流电场对甲烷/空气预混火焰影响的机理研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(11): 45-50.
- HE Ziqi, GAO Zhongquan, JIA Weidong, et al. Mechanism analysis of the effect of low-frequency AC electric field on CH_4/air premixed flame [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(11): 45-50.
- [20] LAWTON J, WEINBERG F J. Maximum ion currents from flames and the maximum practical effects of applied electric fields [J]. *Proceedings of the Royal Society: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1964, 277(1371): 468-497.
- [21] 崔雨辰, 段浩, 吴筱敏, 等. 交流和直流电场对天然气贫燃火焰的影响 [J]. *化工学报*, 2015(6): 238-244.

- CUI Yuchen, DUAN Hao, WU Xiaomin, et al. Effects of AC and DC electric fields on lean-burn flames of premixed CH_4/air mixture [J]. *CIESC Journal*, 2015(6): 238-244.
- [22] 孟祥文, 吴筱敏, 田绪东, 等. 直流电场对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 预混扩展火焰的影响效应 [J]. *高电压技术*, 2016, 42(3): 775-781.
- MENG Xiangwen, WU Xiaomin, TIAN Xudong, et al. Effect of electric field distribution on premixed expanding flames of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(3): 775-781.
- [23] KIM M K, CHUNG S H, KIM H H, et al. Effect of electric fields on the stabilization of premixed laminar bunsen flames at low AC frequency: bi-ionic wind effect [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(3): 1151-1159.
- [24] KONO M, CARLETON F B, JONES A R, et al. The effect of non-steady electric fields on sooting flames [J]. *Combustion and Flame*, 1989, 78(3/4): 357-364.
- [25] 李超, 吴筱敏, 段浩, 等. 电场对于球形传播火焰影响的数值研究 [J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(8): 1809-1814.
- LI Chao, WU Xiaomin, DUAN Hao, et al. Simulation on spherically expanding flame under electric field [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(8): 1809-1814.
- (编辑 荆树蓉)
-
- (上接第 87 页)
- ZHANG Cong, HOU Juncui, DUAN Hao, et al. Effects of AC electric field voltage amplitude on spherical flame. [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(11): 33-38.
- [5] 魏旭星, 贾伟东, 侯俊才, 等. 正/负电场对预混稀燃火焰影响的对比研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(9): 39-43.
- WEI Xuxing, JIA Weidong, HOU Juncui, et al. Comparative research on effect of positive/negative electric field on premixed lean burn flame [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(9): 39-43.
- [6] HUANG Z, ZHANG Y, ZENG K, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146(1/2): 302-311.
- [7] CEN K. *Advanced combustion theory* [M]. Hangzhou, China: Zhejiang University Press, 2002: 89-90.
- [8] CHA M S, LEE Y. Premixed combustion under electric field in a constant volume chamber [J]. *Plasma SCI*, 2012, 40(12): 3131-3138.
- [9] PRAGER J, RIEDEL U, WARNATZ J. Modeling ion chemistry and charged species diffusion in lean methane-oxygen flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 1129-1137.
- [10] ALQUAILTY A B S, HAN J, CHAHINE M, et al. Measurements of positively charged ions in premixed methane-oxygen atmospheric flames [J]. *Combustion Science & Technology*, 2016, 189(4): 575-594.
- [11] GOODINGS J, BOHME D, NG C W. Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames; I Positive ions [J]. *Combustion and Flame*, 1979, 36: 27-43.
- [12] 何子奇, 高忠权, 贾伟东, 等. 低频交流电场对甲烷/空气预混火焰影响的机理研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(11): 45-50.
- HE Ziqi, GAO Zhongquan, JIA Weidong, et al. Mechanism analysis on the effect of low-frequency AC electric field on CH_4/air premixed flame [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(11): 45-50.
- [13] KIM M K, CHUNG S H, KIM H H. Effect of electric fields on the stabilization of premixed laminar bunsen flames at low AC frequency: bi-ionic wind effect [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(3): 1151-1159.
- [14] JONES H R N, HAYHURST A N. Measurements of the concentrations of positive and negative ions along premixed fuel-rich flames of methane and oxygen [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 166: 86-97.
- [15] HAYHURST A N, GOODINGS J M, TAYLOR S G. The effects of applying electric fields on the mass spectrometric sampling of positive and negative ions from a flame at atmospheric pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(12): 3249-3262.
- [16] KONO M, CARLETON F B, JONES A R, et al. The effect of non-steady electric fields on sooting flames [J]. *Combustion and Flame*, 1989, 78(3/4): 357-364.
- [17] 殷燕. 氧气、氮气及其混合气体直流放电的蒙特卡罗模拟 [D]. 保定: 河北大学, 2003: 28-29.
- (编辑 荆树蓉)