

DOI: 10.7652/xjtuxb202003010

高初始压力下交流电场对甲烷/空气预混球形火焰燃烧特性的影响

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

摘要: 为了明确在高初始压力下外加交流电场对天然气预混火焰的影响,以甲烷/空气预混的瞬态球形火焰为研究对象,利用定容燃烧弹探究了在过量空气系数为 1.2、常温 298 K、高初始压力 300 kPa 下,加载电压有效值 5 kV 的低频和高频交流电场对甲烷/空气预混火焰燃烧特性的影响。结果显示:低频条件($f=40, 60, 80, 100$ Hz)下,火焰传播速度分别增大 17.41%、6.53%、3.99%、1.54%时,燃烧压力峰值分别增大 2.06%、1.73%、1.04%、0.79%,质量燃烧率达到 100%所用的时间分别缩短 11.96%、10.27%、7.78%、3.74%;高频条件($f=10, 15, 20$ kHz)下,火焰传播速度分别增大 13.69%、19.76%、22.21%时,燃烧压力峰值分别增大 1.00%、2.37%、3.07%,质量燃烧率达到 100%所用的时间分别缩短 11.03%、14.94%、16.13%。对低频和高频交流电场的助燃机理——双离子风效应和电化学效应进行了具体的分析,分析结果与实验现象吻合,证明了电场助燃技术的可行性与有效性。

关键词: 电场助燃;燃烧特性;双离子风效应;电化学效应

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0080-08

Effect of AC Electric Field on Combustion Characteristics of Methane/Air Premixed Spherical Flame at High Initial Pressure

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

Abstract: To study the effect of applying AC electric field on the natural gas premixed flame at high initial pressures, we used a volume-constant combustion chamber, and the research object was a transient spherical flame of methane/air premixture, aiming at exploring the effects of low-frequency AC electric field and high-frequency AC electric field loaded with an effective voltage 5 kV on the combustion characteristics of methane/air premixed flames in the condition that excess air coefficient $\lambda=1.2$, temperature $T=298$ K and initial pressure $p=300$ kPa. The results showed that, under low frequency conditions, when the electric field frequency $f=40, 60, 80, 100$ Hz, the flame propagation speeds increased by 17.41%, 6.53%, 3.99% and 1.54%; the flame combustion pressure peak increased by 2.06%, 1.73%, 1.04% and 0.79%; the time for the mass burning rate reaching 100% shortened by 11.96%, 10.27%, 7.78% and 3.74%, respectively. Under high frequency conditions, when the electric field frequency $f=10, 15, 20$

收稿日期: 2019-08-26。 作者简介: 杜增晖(1997—),男,硕士生;高忠权(通信作者),男,副教授。 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(xjj2018174)。

网络出版时间: 2019-11-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191121.1721.002.html>

kHz, the flame propagation speeds increased by 13.69%, 19.76% and 22.21%; the flame combustion pressure peak increased by 1.00%, 2.37%, and 3.07%; the time for the mass burning rate reaching 100% shortened by 11.03%, 14.94% and 16.13%, respectively. Finally, the combustion-supporting mechanisms, i.e., the bi-ionic wind effect for low-frequency AC electric field and the electrochemical effect for high-frequency AC electric field, are analyzed and explained, and the results are in accordance with experiments, verifying the feasibility and effectiveness of the electric field-assisted combustion technology.

Keywords: electric field-assisted combustion; combustion characteristics; bi-ionic wind effect; electrochemical effect

能源是人类社会不断发展的物质基础,随着人口数量的持续增长和科技水平的飞速进步,能源短缺问题也日益突出,开发清洁能源并有效提高能源利用效率是目前各国关注的焦点。天然气作为一种气体燃料,主要成分是 CH_4 ,相较于传统的石油、煤炭资源有着安全性高、排放性能优良、抗爆性好、成本相对低廉等优势,在未来具有广阔的发展前景。特别是对我国而言,2017年天然气消耗量增长迅速,涨幅超过15%,占全球天然气净增长的32.6%^[1]。由此可见,我国已成为天然气消费大国,将在推动世界天然气消费中发挥至关重要的作用。

近年来,关于电场辅助燃烧的探索越来越多,得到了很多专家学者的认可,相关的研究表明,电场助燃可以有效地促进火焰传播、增加火焰稳定性、提高燃料质量燃烧率。因此,深入研究分析电场辅助燃烧技术,对于应对能源问题具有非常重要的意义。目前,关于电场助燃的研究主要集中在常温常压的本生灯火焰、平板火焰等一些稳态火焰上,对于高初始压力瞬态火焰的研究较少^[2]。吴筱敏等在常温常压、过量空气系数为1.6的初始条件下,研究分析了负直流电场和高频交流电场对甲烷/空气预混火焰燃烧特性的影响,结果表明加载负直流电场和高频交流电场均使得火焰燃烧压力峰值增大,初始燃烧期和主燃烧期缩短,在高频条件下,随着外加电场频率的升高,压力峰值增大,峰值到达时刻提前,初始燃烧期与主燃烧期也随之缩短^[3];张聪等在常温常压条件下通过改变交流电场的电压幅值和过量空气系数,得出了平均火焰传播速度随压力幅值和过量空气系数的增大而增大^[4];魏旭星等也在常温常压条件下比较了正/负电场对预混稀燃火焰燃烧进程的作用效果,研究表明在电压相同的情况下,正电场对燃烧的促进效果更好^[5]。

为了明确在高初始压力下外加交流电场对天然气预混火焰的影响,本文以甲烷/空气预混的瞬态球

形火焰为研究对象,利用定容燃烧弹探究了在过量空气系数为1.2、常温298 K、高初始压力300 kPa下,加载电压有效值5 kV的低频交流电场(40、60、80、100 Hz)和高频交流电场(10、15、20 kHz)对甲烷/空气预混火焰燃烧特性的影响;重点分析了外加电场后,火焰传播速度、火焰燃烧压力、燃料质量燃烧率的变化规律,并将低频和高频条件下的作用效果展开对比,将燃烧过程的离子反应机理与CHEMKIN-PRO软件相结合,进一步分析了低频和高频交流电场的助燃机理。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

本文在定容燃烧弹上进行相关实验,整体实验装置由高压电源系统、定容燃烧弹系统、进气和排气系统、点火系统、纹影和高速摄像系统、实验压力数据采集系统组成,如图1所示。

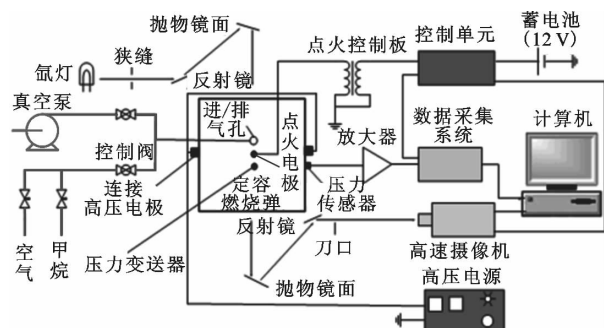


图1 实验装置图

本实验的燃烧装置采用定容燃烧弹装置,如图2所示,燃烧弹为260 mm×260 mm×315 mm的长方体,其横截面为正方形,材质为45号钢。燃烧弹内有一圆柱形空腔,直径为140 mm、高度为180 mm。为防止高压电极和容弹腔体发生高压放电,容弹内腔上覆有厚度为5 mm的聚四氟乙烯绝缘套。直径为190 mm、厚度为60 mm的高抗冲石英

玻璃安装在容弹的前后两面,玻璃外侧安装密封容弹体的盖板,盖板中心有 $\Phi 80\text{ mm}$ 的圆孔,给纹影系统提供光路。

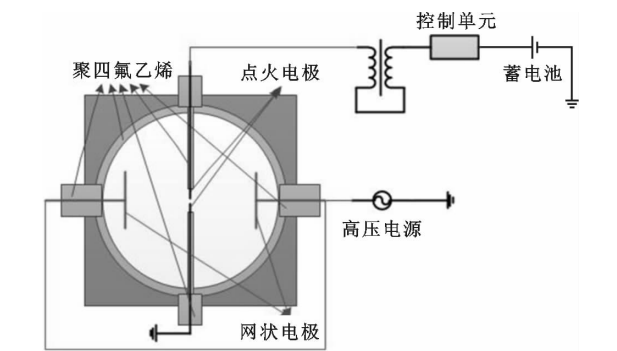


图 2 定容燃烧弹装置图

针状点火电极上下对称安装于容弹内,间距为 2 mm ,材质为 45 号钢,电极的直径为 2 mm ,尖端锥角为 30° ,电极外表面包裹聚四氟乙烯,用来防止点火电极与容弹腔体之间出现放电。加载高压电的网状电极位于容弹左右两侧,其形状为镂空圆盘,外径为 60 mm ,由 45 号钢锻造而成,网格大小为 $8.5\text{ mm}\times 8.5\text{ mm}$,网格的分割线厚度为 0.8 mm ,电极厚度为 3 mm ,电极距离为 70 mm 。高压电极通过钢棒与高压电源相连,其结构如图 3 所示。

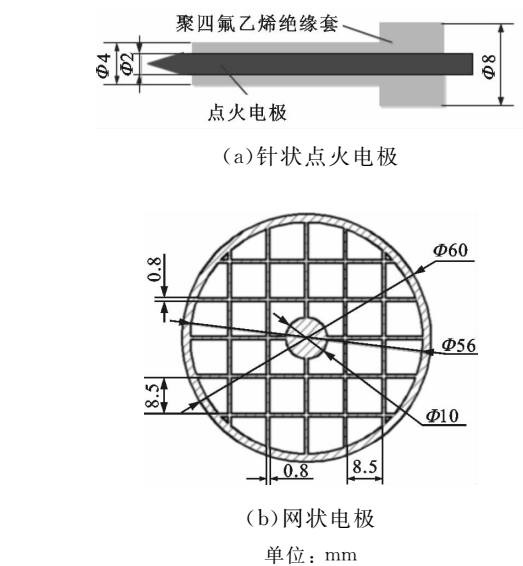


图 3 电极结构图

实验采用的低频交流高压电源型号为 XIELI HV20 kV/10—1 000 Hz,输入端交流电压为 $220(1\pm 10\%) \text{ V}$,电源输出电压范围为交流 $0\sim 20\text{ kV}$ 连续可调,频率范围为 $10\sim 1\,000\text{ Hz}$;高频交流高压电源型号为 Wisman WPS20P20,电源输出电压范围为直流 $0\sim 20\text{ kV}$ 叠加交流 $0\sim 20\text{ kV}$ 连续可

调,具有 $1\sim 50\text{ kHz}$ 的可调频率及 $0\sim 60\text{ }\mu\text{s}$ 的可调脉宽。经过测试,本文实验最终选取的高速摄像系统的拍摄速度为 $5\times 10^3\text{ s}^{-1}$ (即两张纹影图像的间隔为 0.2 ms),根据上述要求,此拍摄速度下的纹影图像分辨率为 512×512 像素。

1.2 实验方法

实验在常温 298 K 、高初始压力 300 kPa 下进行,根据 $\text{CH}_4\text{-O}_2\text{-N}_2$ 的化学计量燃烧反应式和道尔顿分压定律,利用压力变送器向容弹内充入过量空气系数 $\lambda=1.2$ 的甲烷/空气混合气,待气体混合均匀后打开电源向容弹内的网状电极分别施加电压有效值为 5 kV 、 $f=40,60,80,100\text{ Hz}$ 的低频交流电场和 $f=10,15,20\text{ kHz}$ 的高频交流电场并点火。在每个工况点重复 3 次实验,取最接近平均值的工况数据作为最终的分析数据。

2 结果与分析

2.1 火焰传播图像

图 4 是改变外加交流电场的频率,通过纹影和高速摄像系统采集到的火焰传播图像。由图可以看出:在未加载电场时,点火完成后中心火核迅速扩大,总体上沿四周呈现球形平稳均匀扩展,竖直和水平方向上火焰的传播与发展情况基本一致;在水平方向的网状电极上加载交流电场之后,火焰在水平

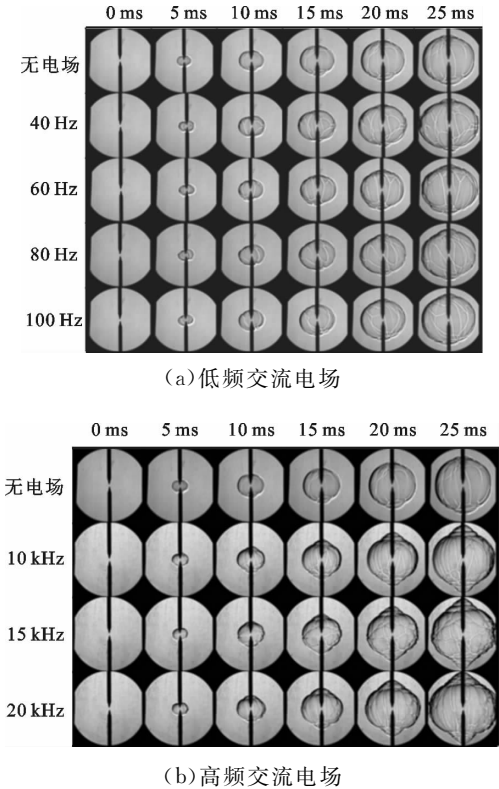


图 4 不同电场频率下的火焰传播图像

方向都出现了明显的拉伸,火焰的扩展呈椭球形,火焰表面褶皱增加;加载低频交流电场时火焰在竖直方向的形状无太大的变化,而加载高频交流电场时,在竖直方向上对火焰有一定的促进作用,不过变化量较小,火焰在竖直方向上出现尖状。这是因为虽然电场线主要集中在水平方向,但在高频条件下,正负极性短时间内变化加快,竖直方向上的电场作用不能忽略。此外,高频条件下,针状电极的大小对火核的发展也会产生一定程度的影响,导致竖直方向上的火焰形状呈现尖状。

2.2 火焰传播距离

由于网状电极对称布置在定容燃烧弹的左右两侧,因此在打开高压电源后,电场线的方向基本位于水平方向,故本文主要研究在水平方向上外加交流电场对火焰传播的影响。火焰水平方向的传播距离 L 定义为容弹中心位置到火焰水平方向左右两前锋面距离的平均值,即 $L=(L_l+L_r)/2$,如图 5 所示。已有的研究表明:当 $L<6\text{ mm}$ 时,点火时的能量波动会对火焰的传播造成一定程度的影响;当 $L>25\text{ mm}$ 时,火焰的传播则会受到容弹内压力与温度的影响^[6]。因此,取 L 为 $6\sim 25\text{ mm}$ 范围内的数据进行分析。为了尽可能提高 L 的准确度,本文利用 Photoshop 软件中的标尺工具提取火焰两侧前锋面的边界,求出不同时刻下火焰的传播距离。

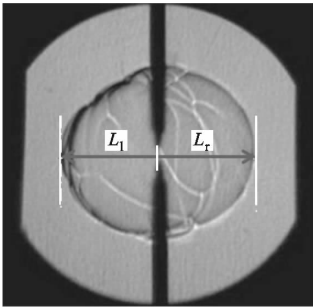
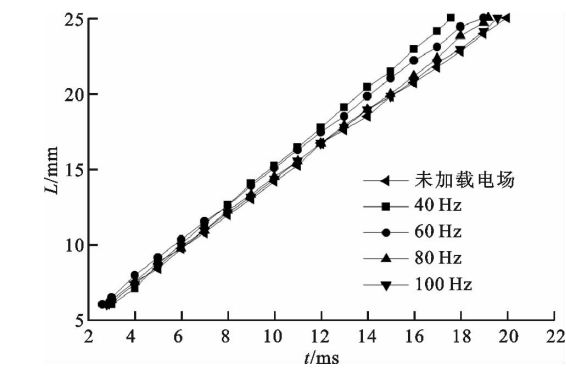


图 5 本文定义的火焰传播距离

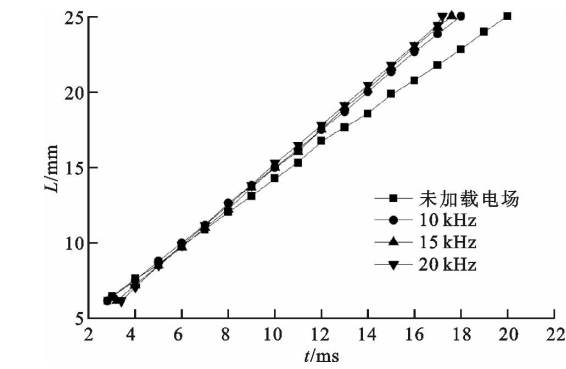
低频交流电场和高频交流电场的火焰传播距离随时间的变化关系如图 6 所示。由图可以看出:无论是加载低频交流电场还是高频交流电场,相较于未加载电场均有助于火焰的传播,使得火焰传播距离在相同时刻下增大;在电压有效值保持不变时,对于低频交流电场,火焰传播距离随着电场频率的增大而减小,对于高频交流电场,火焰传播距离随着电场频率的增大而增大。

2.3 火焰传播速度

对图 6 中的曲线进行拟合,结果显示 $f=40$,



(a) 低频交流电场



(b) 高频交流电场

图 6 不同电场频率下火焰传播距离随时间的变化

$60, 80, 100\text{ Hz}$ 和 $f=10, 15, 20\text{ kHz}$ 时的曲线拟合因子分别为 $0.999\ 06$ 、 $0.999\ 69$ 、 $0.999\ 38$ 、 $0.999\ 46$ 、 $0.999\ 80$ 、 $0.999\ 67$ 、 $0.999\ 75$,可见火焰传播距离与时间成线性关系,故将 L 在 $6\sim 25\text{ mm}$ 范围内的平均速度作为火焰传播速度进行分析研究。

图 7 给出了火焰传播速度 V_L 与电场频率的关系,表 1 和表 2 是通过计算得到的低频和高频条件下的火焰传播速度和 $L=25\text{ mm}$ 时的所用时间 t_{25} 。

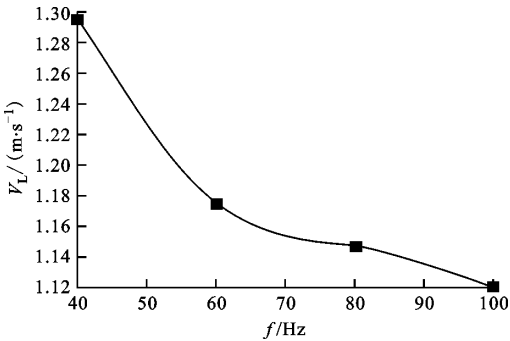
表 1 低频条件下火焰传播速度

f/Hz	t_{25}/ms	$ \Delta t_{25} /\%$	$V_L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$ \Delta V_L /\%$
无电场	20.0		1.103	
40	17.6	12	1.295	17.41
60	19.0	5	1.175	6.53
80	19.2	4	1.147	3.99
100	19.6	2	1.120	1.54

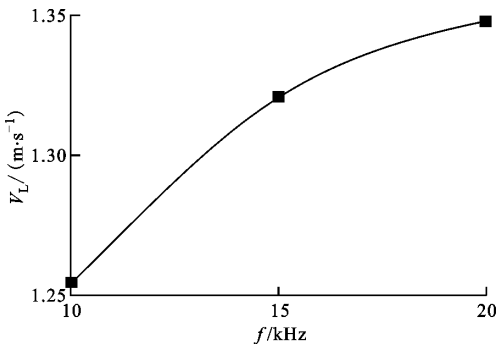
表 2 高频条件下火焰传播速度

f/kHz	t_{25}/ms	$ \Delta t_{25} /\%$	$V_L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$ \Delta V_L /\%$
无电场	20.0		1.103	
10	18.0	10	1.254	13.69
15	17.6	12	1.321	19.76
20	17.2	14	1.348	22.21

由表 1、2 和图 7 可知:无论是加载低频交流电场还是高频交流电场,与未加载电场时的工况相比都会促进火焰的传播,使得火焰传播距离到达 25 mm 所需要的时间缩短,火焰传播速度增大;对于低频交流电场,随着电场频率的增大,其对火焰传播速度的促进效果反而减弱;对于高频交流电场,火焰传播速度随着外加电场频率的增大而增大。与低频交流电场相比,高频交流电场对火焰传播速度的促进效果更加显著。



(a) 低频交流电场



(b) 高频交流电场

图 7 不同电场频率下的火焰传播速度

提高初始压力,火焰传播速度减小,是因为在燃烧过程中火焰传播速度与初始压力存在如下关系

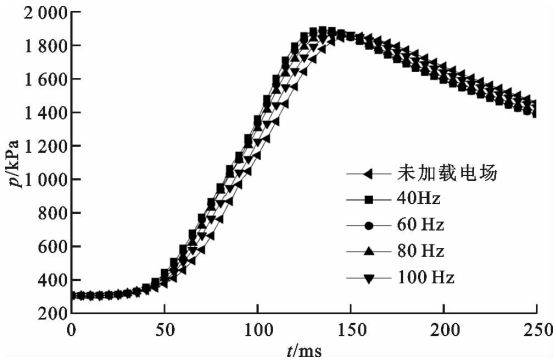
$$V_L \propto p^{(n-2)/2} \tag{1}$$

式中 n 表示总反应级数,一般轻质碳氢燃料在空气中燃烧时 $n \leq 2^{[7]}$,因此在高初始压力下,火焰传播速度较常压条件下减小。

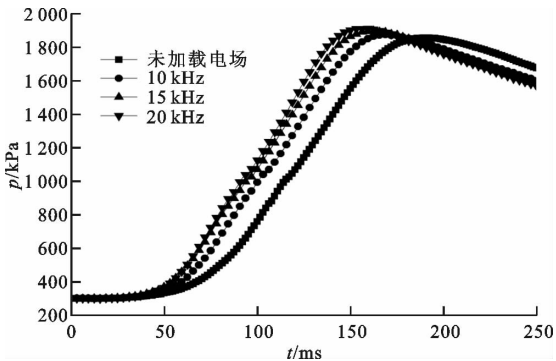
2.4 火焰燃烧压力

火焰燃烧压力作为燃料燃烧过程中的特性参数之一,跟具体的燃烧状况密切相关。火焰燃烧压力随时间的变化关系如图 8 所示。在容弹上加载低频或高频交流电场后,相同时刻下火焰燃烧压力较未加载电场时均增大,火焰燃烧压力峰值也增大,达到压力峰值的时刻提前。低频交流电场在电场频率逐渐增大时,火焰燃烧压力提高程度降低,到达压力峰

值的时间缩短程度也减小。高频条件下电场频率的作用规律与低频交流电场相反,随着电场频率的增大,相同时刻下火焰燃烧压力增大的程度越大,到达压力峰值时刻越早。



(a) 低频交流电场



(b) 高频交流电场

图 8 不同电场频率下火焰燃烧压力随时间的变化

表 3 和表 4 给出了火焰燃烧过程中压力采集系统收集到的火焰燃烧压力峰值 $p_{\max}$ 和压力峰值到达时间 t_p ,并计算了相应的变化率。从表中可以看出,高频条件下火焰燃烧压力峰值的提升程度较低频条件下更加明显。

表 3 低频交流电场下火焰燃烧压力峰值

f/Hz	$p_{\max}/\text{kPa}$	$ \Delta p_{\max} /\%$	t_p/ms	$ \Delta t_p /\%$
无电场	1 854.38		150.95	
40	1 892.50	2.06	132.90	11.96
60	1 886.46	1.73	135.45	10.27
80	1 873.75	1.04	139.20	7.78
100	1 868.96	0.79	145.30	3.74

此外,由已有的甲烷/空气预混火焰在常温常压下的研究结果可知,由于初始压力不高,故燃料能量释放速率较低,燃烧压力增长速度较慢。本文研究表明,在高初始压力下,火焰燃烧压力峰值到达时刻提前。

表 4 高频交流电场下火焰燃烧压力峰值

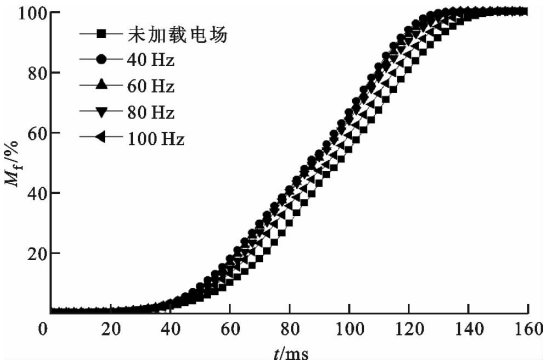
f/kHz	$p_{\text{max}}/\text{kPa}$	$ \Delta p_{\text{max}} /\%$	t_p/ms	$ \Delta t_p /\%$
无电场	1 854.38		150.95	
10	1 872.92	1.00	134.30	11.03
15	1 898.33	2.37	128.40	14.94
20	1 911.25	3.07	126.60	16.13

2.5 火焰质量燃烧率

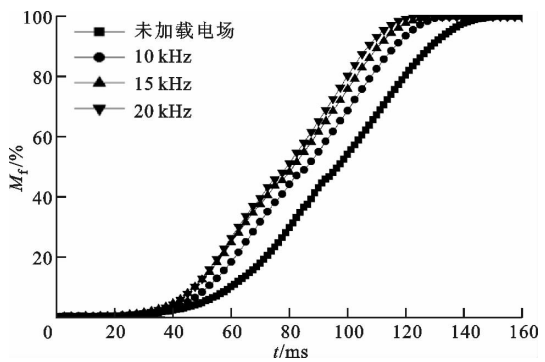
质量燃烧率可作为表征燃料燃烧状况的参数。根据 Elbe’s 方程,由采集到的实时压力数据,可计算得出不同工况下的质量燃烧率,计算方程^[8]如下

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

式中: $p(t)$ 为实验过程中采集得到的瞬时火焰燃烧压力; p_i 为燃烧前的初始压力。本文最终得到的各工况下的质量燃烧率如图 9 所示。



(a) 低频交流电场



(b) 高频交流电场

图 9 不同电场频率下质量燃烧率随时间的变化

质量燃烧率与火焰燃烧过程中的燃烧压力密切相关,因此加载低频或者高频交流电场都会通过改变燃烧压力进而影响质量燃烧率。通过对实验数据的处理和分析发现,加载不同频率的交流电场都使得相同时刻下的质量燃烧率提高,质量燃烧率达到 100% 的时刻提前。当 $f=40,60,80,100\text{ Hz}$ 时,质

量燃烧率达到 100% 所用的时间分别缩短了 11.96%、10.27%、7.78%、3.74%;当 $f=10,15,20\text{ kHz}$ 时,质量燃烧率达到 100% 所用的时间分别缩短了 11.03%、14.94%、16.13%。通过对各工况的数据对比可知,高频交流电场对质量燃烧率的影响更大。

3 助燃机理分析

3.1 低频交流电场助燃机理分析

通过 CHEMKIN-PRO 软件模拟可以得到在 $\lambda=1.2$ 、常温 298 K、初始压力 300 kPa 的条件下,甲烷/空气预混火焰燃烧过程中火焰前锋面的粒子浓度(单位体积内的粒子个数)分布,模拟结果如图 10 所示。

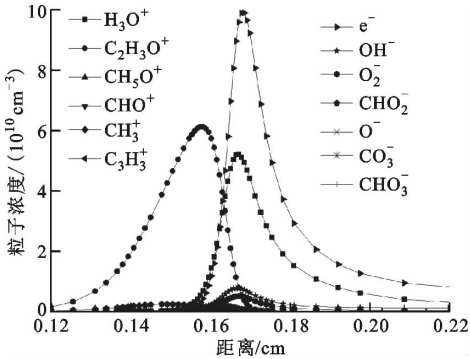


图 10 火焰前锋面的粒子浓度分布

甲烷/空气预混火焰在燃烧过程中产生正离子主要通过一步化学电离形成,其起源于 $\text{CH}^{[9-11]}$,故取 CH 粒子浓度极值位置为其他粒子浓度研究的基准位置,并定义其为本文研究的火焰前锋面位置^[12]。由图 10 可以看出,在火焰前锋面处,正负离子的浓度各不相同,而且差异较大。表 5 列出了火焰前锋面各粒子的浓度。

表 5 火焰前锋面各粒子的浓度

粒子种类	正离子	负离子	电子	中性分子
浓度/ (10^{10} cm^{-3})	6.82	1.34	6.95	1.28×10^9

对于低频交流电场助燃的机理主要认为是双离子风效应^[13],这是因为在低频条件下,火焰燃烧过程中产生的负离子浓度相对于正离子浓度来说不能忽略^[9,14-15],由正负离子共同引起的双离子风效应对火焰的燃烧起到了促进作用。双离子风的有效发展程度 ξ_{eff} 可由下式表示

$$\xi_{\text{eff}} = \xi_p - \eta \xi_n = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_{\text{cp}}}\right) - \eta \left[1 - \exp\left(-\eta \frac{t}{t_{\text{cp}}}\right)\right] \tag{3}$$

式中： ξ_p 为正离子风发展程度； ξ_n 为负离子风发展程度； t 为离子在火焰中的迁移时间； t_{cp} 为正离子与中性分子的碰撞响应时间； η 为燃烧过程中负离子浓度与正离子浓度之比。 t_{cp} 的计算式^[16] 如下

$$t_{cp} = \frac{1}{zR_i}$$

(4)

式中： R_i 为正离子与尚未发生碰撞的中性分子浓度之比，由于中性分子与正负带电离子浓度之比的数量级大约为 10^9 ，因此可以使用中性分子总浓度代替未发生碰撞的中性分子浓度； z 表示离子与中性分子的碰撞频率，计算式为

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

(5)

其中 σ 为碰撞直径， m 为粒子的平均质量， k_B 为玻尔兹曼常数 ($1.390\ 62 \times 10^{-23}$ J/K)， T 为绝热火焰温度。表 6 给出了式 (4)、式 (5) 中各参数的计算结果。

表 6 式 (4)、式 (5) 中各参数计算结果

$\sigma/(10^{-10}\text{ m})$	T/K	η	$m/(10^{-26}\text{ kg})$	z/GHz	t_{cp}/ms
3.746	2 054.87	0.2	4.55	8.27	22.73

将表 6 中的数据代入式 (3)，可计算出低频条件下的 ξ_{eff} ，计算结果如表 7 所示。

表 7 不同电场频率下的双离子风发展程度

电压有效值/kV	f/Hz	ξ_{eff}
5	40	0.63
5	60	0.49
5	80	0.40
5	100	0.34

从表 7 可知，若外加低频交流电场的压力保持不变，随着电场频率的增大，双离子风发展程度减弱，电场频率对于火焰传播速度以及燃烧压力峰值的促进作用减弱。这和前文根据实验结果所分析的频率作用规律相似，说明在低频交流电场条件下，双离子风发展程度与火焰燃烧情况密切相关。为此，本文将双离子风发展程度与火焰传播速度和燃烧压力峰值变化率之间的关系做了进一步分析，结果如图 11、图 12 所示。

将图 11、图 12 中的散点进行拟合，双离子风发展程度与火焰传播速度和燃烧压力峰值变化率之间的拟合因子分别达到了 0.929 20 和 0.912 92，可认为双离子风发展程度和火焰传播速度变化率、燃烧压力峰值变化率具有线性关系。低频条件下，电场频率越低， ξ_{eff} 越大，火焰传播速度和燃烧压力峰值

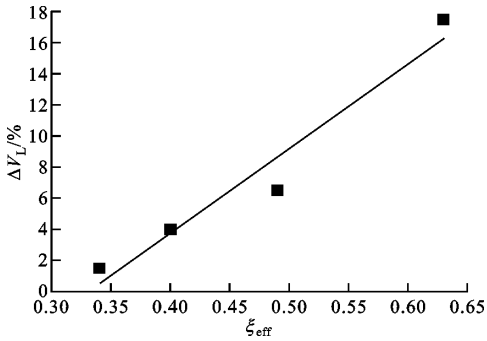


图 11 双离子风发展程度与速度变化率的关系

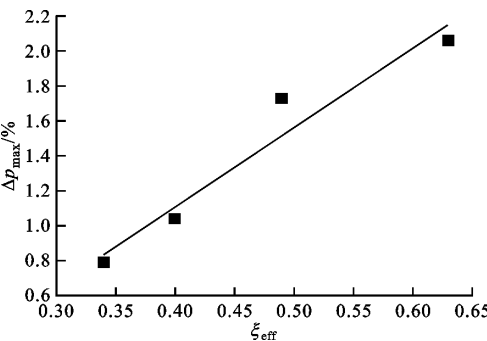


图 12 双离子风发展程度与压力峰值变化率的关系

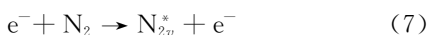
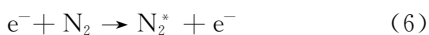
提升的程度越大，这与前文的分析吻合，证明了双离子风效应在低频交流电场助燃方面的可行性。

3.2 高频交流电场助燃机理分析

高频条件下电场极性变化极快，正负离子在电场力的作用下无法得到充足的响应时间，因此双离子风效应不再明显。除了双离子风效应外，电场对火焰中带电粒子作用的机理还有热效应和电化学反应，在本实验条件下，由网状电极加载电压而引起热效应相对于甲烷/空气预混燃料的着火温度可以忽略不计。由巴申定律可知，本文实验所加载电压的有效值为 5 kV，远低于对应的空气击穿电压，所以通过击穿放电产生的热效应也不予考虑。

因此，本文从电化学反应的角度对高频交流电场的助燃机理展开分析讨论。与双离子风效应直接影响火焰燃烧的物理进程不同，电化学反应直接作用于火焰燃烧的化学过程，通过网状电极加载交流电场，在火焰燃烧过程中施加了额外的电磁能量，从而使得反应区内的一些离子受到激励。这些受到激励的离子自身能量提高，再作用到火焰燃烧的一系列化学反应式中，提高了化学反应速度。 N_2 在空气中占绝大多数， N_2 是惰性气体，不直接参与燃烧过程，但电场会对 N_2 进行激发从而有助于燃烧，这一理论目前是高频交流电场助燃的主流思想。通过外加高频交流电场，火焰燃烧过程中产生的各种粒子

在电场力的作用下会产生相互碰撞,包括电子与分子间的碰撞、分子与分子间的碰撞、分子与自由基间的碰撞、自由基与自由基间的碰撞。在燃烧过程的化学反应中,电子与分子的碰撞是第一步,电子的质量很小,大约为其他粒子的千分之一,因此电子对于交流电场的响应更加迅速,从而更容易获得能量,通过进一步与其他粒子碰撞传递能量,使其激发。电子与 N_2 的碰撞就属于电子与分子间的碰撞组合,有两种碰撞过程,一种是电子激发碰撞,另一种是振动激发碰撞。两者的反应过程^[17]如下



受到激发振荡的 N_2 可将自身的振荡能传递给其他分子,特别是 O_2 接收振荡能后受到激励,可以增大火焰中的一些分支反应速率,例如 $H + O_2^* \rightarrow OH + O$,而该分支反应速率基本决定了 OH 自由基的生成, OH 自由基又会对碳氢火焰的燃烧起到重要的推动作用,最终表现为整个燃烧过程被促进。

由物理学知识可知,电磁能与电压的平方成正比,当电压有效值逐渐增大时,容弹内的电磁能量密度成平方倍的提高,达到可以激发 N_2 的阈值,电压有效值越大, N_2 能被激发到更高的能级,使得式(6)和式(7)反应加快,从而进一步推动激发 O_2 等其他分子的过程,最终加快火焰燃烧过程。当高频交流电场的电压有效值一定,增大电场频率时,燃烧特性参数的变化幅度不再十分明显。这是因为电压有效值不变,研究区域内的电磁能量密度不变,频率从 5 kHz 增大到 20 kHz 时,单位时间内的高能电子迅速增加,但由于反应物的物质的量确定,燃烧过程中能产生的电子总数是一定的,频率越高,进一步增加的高能电子数就越来越少,最终使得电化学作用的影响增长缓慢,各频率之间燃烧的差异逐渐变小。

4 结 论

(1)低频交流电场对火焰燃烧的促进效果随电场频率的升高而减弱,当 $f=40, 60, 80, 100$ Hz 时,火焰传播速度分别增大 17.41%、6.53%、3.99%、1.54%,燃烧压力峰值分别增大 2.06%、1.73%、1.04%、0.79%,质量燃烧率达到 100% 所用时间分别缩短 11.96%、10.27%、7.78%、3.74%。

(2)与低频交流电场作用规律不同,高频交流电场对火焰燃烧的促进效果随电场频率的升高而增强,当 $f=10, 15, 20$ kHz 时,火焰传播速度分别增大 13.69%、19.76%、22.21%,燃烧压力峰值分别增

大 1.00%、2.37%、3.07%,质量燃烧率达到 100% 所用时间分别缩短 11.03%、14.94%、16.13%。

(3)低频交流电场的助燃机理主要为双离子风效应,本文根据 Kim 的理论计算了甲烷/空气预混火焰燃烧过程中的双离子风发展程度,当 $f=40, 60, 80, 100$ Hz 时,双离子风发展程度分别是 0.63、0.49、0.40、0.34,表明当电场频率增大时,双离子风的有效发展程度在逐渐降低,对燃烧的促进作用减弱。

(4)高频交流电场的助燃机理主要为电化学反应,由于施加的高频交流电场向容弹内提供了额外的电磁能量,在到达激发 N_2 阈值后使其激发到更高的能级,并可将自身的振荡能传递给 O_2 等其他分子,从而提高了火焰燃烧过程中的分支反应速率,最终使得火焰燃烧的整个进程加快。

(5)通过低频和高频交流电场各工况下的数据对比发现,高频交流电场较低频交流电场对于促进甲烷/空气预混火焰的燃烧更具优势。

参考文献:

- [1] 钱伯章,李敏. 能源结构随能源需求增长而持续多样化: 2018 年世界能源统计年鉴解读 [J]. 中国石油和化工经济分析, 2018(8): 51-54.
QIAN Bozhang, LI Min. The energy mix continues to diversify as energy demand increases: 2018 world energy statistics yearbook interpretation [J]. Economic Analysis of China Petroleum and Chemical Industry, 2018(8): 51-54.
- [2] 李超,张聪,侯俊才,等. 直流电场对甲烷-空气预混球形扩展火焰的影响 [J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(1): 78-85.
LI Chao, ZHANG Cong, HOU Juncai, et al. Effect of DC/AC electric field acting on premixed methane-air spherically expanding flame [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2016, 7(1): 78-85.
- [3] 吴筱敏,侯俊才,张聪,等. 交直流电场对甲烷/空气火焰燃烧特性影响的试验与分析 [J]. 汽车安全与节能学报, 2016, 7(1): 72-77.
WU Xiaomin, HOU Juncai, ZHANG Cong, et al. Experimental study of effects of DC/AC electric fields on the combustion characteristic of $CH_4/O_2/N_2$ flames [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2016, 7(1): 72-77.
- [4] 张聪,侯俊才,段浩,等. 交流电场电压幅值对球形火焰影响的理论研 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 33-38.

(下转第 96 页)

- 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)