

DOI: 10.7652/xjtuxb201811007

低频交流电场对甲烷/空气预混 火焰影响的机理研究

何子奇, 高忠权, 贾伟东, 孟浩, 杨猛, 邓宇
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了明确低频交流电场对火焰的作用机理,在常温、初始压力 0.3 MPa 下,施加电压有效值为 5 kV、频率 $f=40, 60, 80, 100$ Hz 的电场对甲烷/空气混合气的燃烧特性进行研究,建立了预混甲烷/空气火焰离子反应模型,对燃烧过程各粒子的浓度变化进行模拟,将实验与模拟结果综合进行了分析。结果表明:加载低频交流电场后,预混球形火焰在横向发生明显形变,随着频率的增大,平均火焰传播速度 $\bar{S}_L$ 和压力峰值 $P_{\max}$ 均逐渐减小;模拟计算表明随着频率的增大,双离子风发展程度 ξ_{eff} 逐渐减小,平均火焰传播速度增大率 $\Delta\bar{S}_L$ 和压力峰值增大率 $\Delta P_{\max}$ 与双离子风发展程度 ξ_{eff} 的线性拟合相关系数分别为 0.995 82 和 0.919 96, ξ_{eff} 与电场对火焰的促进作用密切相关;电场下火焰前锋面粒子间的碰撞作用程度与火焰的宏观拉伸形变之间存在着直接联系,基于碰撞作用的双离子风效应是低频交流电场对预混火焰的主要促进因素。

关键词: 低频交流电场;双离子风效应;双离子风发展程度

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)11-0045-07

Mechanism Analysis on the Effect of Low-Frequency AC Electric Field on CH₄/Air Premixed Flame

HE Ziqi, GAO Zhongquan, JIA Weidong, MENG Hao, YANG Meng, DENG Yu
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The alternating electric field can promote flame combustion, and research shows that the promotion effect of low-frequency AC electric field on premixed flame is mainly based on the collision between particles in the flame. In order to further explore the effect mechanism of the particles in the flame under electric field, premixed methane/air flame ionization model was established to obtain the concentration distribution of the particles in the combustion process and calculate the developing degree of bi-ionic wind. Simulation results were compared with the experimental data. The results showed that the spherically flame was horizontally stretched obviously when low-frequency AC field was applied. As the frequency increases, the average flame propagation velocity $\bar{S}_L$ and pressure peak $P_{\max}$ decrease gradually. Simulation results also showed that the developing degree of bi-ionic wind ξ_{eff} decreases with the frequency, and the correlation coefficients of linear fitting of the average flame propagation velocity $\Delta\bar{S}_L$ and the pressure peak increase rate $\Delta P_{\max}$ with the developing degree of bi-ionic wind ξ_{eff} are 0.995 82 and 0.919 96, respectively. The parameter ξ_{eff} is closely related to the promotion of flame by the

electric field. There is a direct relationship between the collisions of particles in the flame front and the macroscopic stretch of the flame under the applied electric field. The bi-ionic wind effect based on the particles collision is the primary promotion of the low-frequency AC electric field on the premixed flame.

Keywords: low-frequency AC field; bi-ionic wind effect; developing degree of bi-ionic wind

随着能源短缺和环境污染问题的日益突出,能源行业面临严峻的挑战,应对这一问题,目前主要有两种解决方案:一种是新能源领域的研究;另一种是提高现有能源的利用效率,开发更清洁高效的燃烧技术。电场辅助燃烧技术可以提高火焰传播速率和燃烧效率^[1],降低碳烟和氮氧化物的排放^[2-3],利用该技术可有效提高燃料利用率。近年来,电场辅助燃烧理论受到国内外学者的广泛关注,在平板火焰、对冲火焰、本生灯火焰、射流火焰、球形火焰上加载正/负直流(DC)电场、低频及高频交流(AC)电场、脉冲直流电场等方面做了诸多研究。Kim 等对本生灯火焰加载不同频率低频交流电场,研究发现,低频交流电场下火焰中的正负离子在电场力作用下交替迁移,与中性分子发生碰撞进而引起宏观体积流,此现象称为双离子风效应^[4]。

天然气作为目前常用的一种清洁燃料,在汽车发动机、锅炉等多处广泛使用,因此研究低频交流电场对甲烷/空气预混火焰的助燃机理很有必要。为定量分析电场下火焰中带电粒子与中性分子间的作用,需计算参与碰撞的各种粒子的数密度以及正负离子与中性分子间的碰撞频率和碰撞响应时间等参数,进而获得电场下粒子间的碰撞作用与火焰拉伸现象之间的联系。本文分析了高初始压力下加载不同低频(40~100 Hz)交流电场对甲烷/空气预混稀燃火焰的燃烧特性,并将 Prager/Petersen 离子反应机理^[5-6]与 CHEMKINPRO 软件相结合,对实验工况下燃烧过程的离子产物及其浓度分布进行了模拟,通过实验及模拟结果的分析,进一步明确了低频交流电场对预混球形火焰的助燃机理。

1 实验装置和方法

实验装置主要包括定容燃烧弹、点火系统、进排气系统、低频交流电供给系统、高速摄像及纹影系统、压力采集系统等,如图 1 所示。其中定容燃烧弹容弹外部形状为正方体,材料为 45 号钢,容弹内腔为中空圆柱体,直径为 140 mm,长度为 180 mm。为防止外加高电压时高压电极与容弹内腔壁面之间放电影响燃烧室的电场分布,在容弹的内腔壁面上

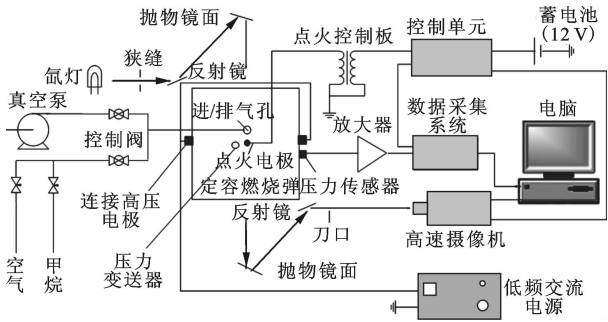


图 1 实验装置图

覆盖厚度为 5.0 mm 的聚四氟乙烯绝缘套。容弹的上下对置安装针状点火电极,外表面包裹聚四氟乙烯,两点火电极之间距离为 2 mm。容弹左右两侧对置安装一对高压电极,中间为网格状镂空,用于施加外部高电压。厚度为 60 mm、直径为 190 mm 的高抗冲石英玻璃安装在容弹的前后两面,提供纹影成像的光学通路。容弹结构及内部电极位置如图 2 所示。实验中低频交流电供给系统、高速摄像系统和压力采集系统所涉及的仪器型号及参数如表 1 所示。

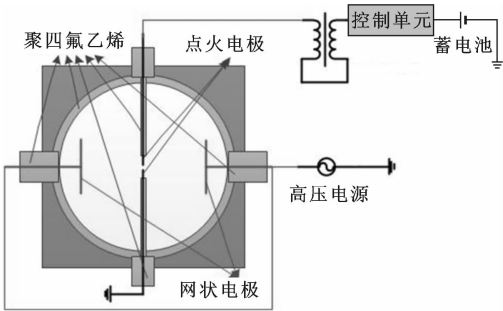


图 2 定容燃烧弹结构及电极位置

表 1 实验仪器型号及参数

实验仪器	型号	参数
高压电源	XIELI	输出电压~20 kV
	HV20 kV/10~1 000 Hz	频率 10~1 000 Hz
高速摄像机	Redlake HG-100 K	5 000 帧/s
压力传感器	Kistler 7061B 压电式	测量范围 0~25 MPa
电荷放大器	Kistler 5011 型	±10~±999 000 pC
数据采集仪	日本横河 DL750	采样频率 10 kHz

在常温、初始压力为 0.3 MPa 下,向容弹内充入过量空气系数 $\lambda=1.4$ 的甲烷/空气混合气,静置消除气体扰动后向左右两侧网状电极分别施加电压有效值 $U=5$ kV,频率 $f=40,60,80,100$ Hz 的低频交流电并点火。每个工况点至少重复 3 次,取最接近平均值的工况数据,从而减小实验误差。

2 结果与分析

2.1 火焰传播图像

初始压力为 0.3 MPa、过量空气系数为 1.4 时,在有效值为 5 kV 的不同频率低频交流电场下的火焰传播纹影图像如图 3 所示。由图 3 可知:未加载电场时,火焰呈近似球形向外传播,水平和竖直方向变化程度基本一致;加载低频交流电场后,火焰在水平方向有明显的拉伸,竖直方向火焰拉伸幅度较小,这主要是因为网状电极布置于水平方向;随着交流频率减小,火焰的拉伸变形程度逐渐增大,火焰锋面褶皱也略有增加,当交流频率为 40 Hz 时,火焰拉伸变形程度最大。

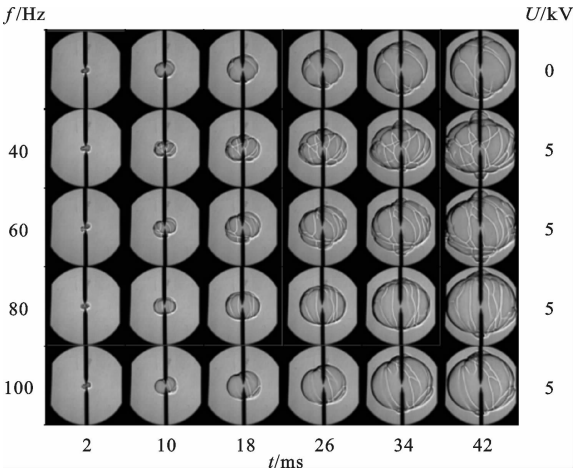


图 3 火焰传播纹影图像

2.2 火焰传播距离和传播速度

2.2.1 火焰传播距离 由于加载低频交流电场的网状电极水平对置于容弹内,因而火焰在水平方向拉伸明显。本文定义火焰传播距离 L 为水平方向两侧火焰前锋面到容弹中心距离 L_a, L_b 之和的平均值,即 $L=(L_a+L_b)/2$ 。纹影图通过 Matlab 程序处理提取火焰前锋面, L_a, L_b 分别为图像中心到火焰两侧前锋面的距离,火焰传播距离如图 4 所示。本文研究的火焰传播距离范围为 6~25 mm,主要是避免了点火能量和容弹内温度和压力变化对火焰造成的影响^[7]。

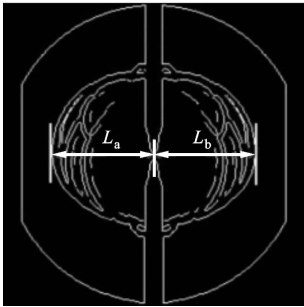


图 4 火焰传播距离示意图

离随时间的变化如图 5 所示。由图 5 可知:随着时间的增加,加载和未加载电压时火焰传播距离均呈近似线性增长,且在相同时间间隔下,加载低频交流电场下的火焰传播距离均比未加载电场时的大;当交流电场频率 f 减小时, L 随 t 的变化率逐渐增大,当 $f=40$ Hz 时, L 随 t 的变化率最大,即火焰传播速度最大。

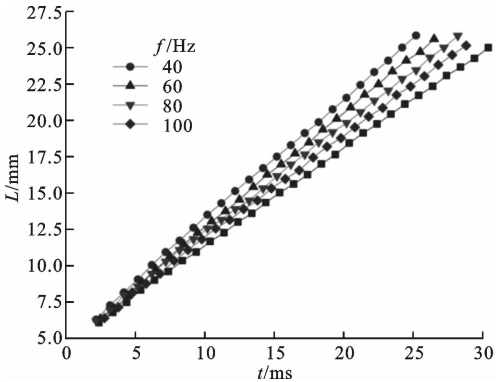


图 5 不同频率交流电场下火焰传播距离随时间的变化

2.2.2 平均火焰传播速度 火焰传播速度 S_L 为火焰前锋面相对于静止的容弹内腔的运动速度,即 $S_L=dL/dt$ 。

本文定义平均火焰传播速度 $\bar{S}_L$ 为火焰从 6 mm 传播到 25 mm 的距离与时间的比值,即

$$\bar{S}_L = \frac{L_{6-25}}{t_{6-25}}$$

式中: L_{6-25} 、 t_{6-25} 分别为火焰从 6 mm 传播到 25 mm 的距离和对应的时间。

表 2 给出了不同频率下平均火焰传播速度 $\bar{S}_L$ 及其相对于未加载交流电压的增大率 $\Delta\bar{S}_L$ 。由表 2 可知,加载低频交流电压后平均火焰传播速度 $\bar{S}_L$ 较未加载电压时均有提高,且随着交流电场频率增加平均火焰传播速度 $\bar{S}_L$ 逐渐减小。平均火焰传播速度增大率 $\Delta\bar{S}_L$ 与 $\bar{S}_L$ 的变化趋势相同,在频率为 40、60、80、100 Hz 下平均火焰速度增大率 $\Delta\bar{S}_L$ 依次为 26.47%、16.18%、10.29%、4.41%,40 Hz 交流

电压下电场对火焰的促进效果最强。

表 2 加载不同频率交流电压下的 $\bar{S}_L$ 和 $\Delta\bar{S}_L$

U/kV	f/Hz	$\bar{S}_L/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta\bar{S}_L/\%$
0		0.68	0
5	40	0.86	26.47
5	60	0.79	16.18
5	80	0.75	10.29
5	100	0.71	4.41

2.3 燃烧特性参数

初始压力为 0.3 MPa、过量空气系数为 1.4 时,不同频率交流电场作用下燃烧压力随时间的变化如图 6 所示。由图 6 可知,相较于未加载电场,加载低频交流电场后燃烧压力峰值 $P_{\max}$ 增大且压力峰值时刻 t_p 提前。由于电场加速了火焰传播,相同时间内有更多未燃气参与燃烧,整个燃烧过程加速完成,因此压力峰值时刻 t_p 提前,压力峰值 $P_{\max}$ 增大。

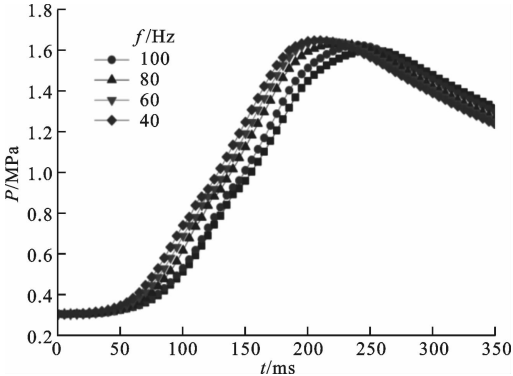


图 6 不同频率交流电场下燃烧压力随时间的变化

表 3 给出了加载不同低频交流电场的压力峰值 $P_{\max}$ 、压力峰值时刻 t_p 及其相较未加载电场对应的变化率 $\Delta P_{\max}$ 、 Δt_p 。由表 3 可知,加载交流电场后压力峰值 $P_{\max}$ 均增大,且频率越低增大程度越大,压力峰值时刻 t_p 均减小,且频率越低减小程度越大。加载有效值为 5 kV,频率分别为 40、60、80、100 Hz 的交流电场时,燃烧压力峰值分别增大 3.48%、2.90%、1.91%、1.49%,压力峰值时刻分别提前 15.01%、13.82%、11.81%、5.88%。

表 3 低频交流电场燃烧特性参数

U/kV	f/Hz	$P_{\max}/\text{kPa}$	t_p/ms	$\Delta P_{\max}/\%$	$\Delta t_p/\%$
0		1 603.33	253.2	0.00	0.00
5	40	1 659.17	215.2	3.48	15.01
5	60	1 649.79	218.2	2.90	13.82
5	80	1 633.96	223.3	1.91	11.81
5	100	1 627.29	238.3	1.49	5.88

3 模拟计算及机理分析

3.1 火焰中粒子的模拟计算

交流电场作用下,火焰中的正负离子在电场力作用下发生迁移,与中性分子发生碰撞。为定量分析电场下火焰中带电粒子的碰撞作用,获取离子数密度变得尤为关键。将离子反应机理与 CHEMKIN-PRO 软件相结合,对初始压力为 0.3 MPa、过量空气系数为 1.4 的未加电场的甲烷/空气预混燃烧进行模拟,获取燃烧过程中的离子产物及其浓度分布。

碳氢燃料燃烧时,火焰中有大量带电粒子,包括正离子、电子和负离子。甲烷/空气预混火焰中常见的正离子有 H_3O^+ 、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$ 、 CH_5O^+ 、 CHO^+ 、 CH_3^+ 、 C_3H_3^+ 等,负离子包括 CHO_2^- 、 CHO_3^- 、 CO_3^- 、 O^- 、 O_2^- 、 OH^- 等^[5]。甲烷/空气火焰中正离子的形成始于基态的 CH 与 O 发生热中性反应($\text{CH} + \text{O} \rightarrow \text{CHO}^+ + \text{e}^-$)生成初级离子产物 HO^+ ,生成的大部分 CHO^+ 发生反应($\text{CHO}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CO}$)生成 H_3O^+ ,两反应时间间隔很小,几乎同步完成,随后初级离子产物通过质子转移、电荷转移产生大量的正离子^[5]。初始压力为 0.3 MPa、过量空气系数为 1.4 的未加电场的甲烷/空气预混燃烧过程中的带电粒子随火焰位置的浓度分布如图 7 所示。

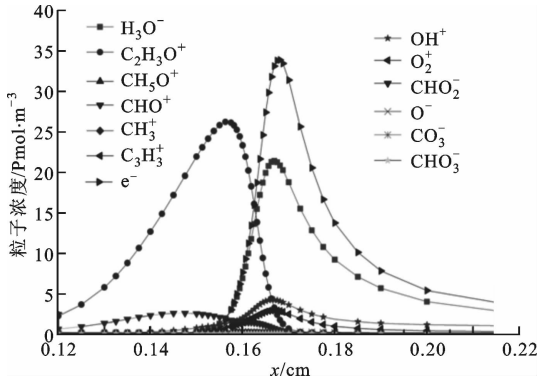


图 7 初始压力为 0.3 MPa、 $\lambda=1.4$ 的甲烷/空气预混火焰带电粒子浓度分布图

由图 7 可知,初始压力为 0.3 MPa、过量空气系数为 1.4 的甲烷/空气预混火焰中各离子的生成时间及浓度大小各不相同,正离子中 H_3O^+ 和 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$ 的浓度最大,这与 Alqaity 等使用质谱仪所测稀燃火焰中正离子的浓度分布一致^[8]。由于甲烷/空气火焰中正离子形成主要通过一步化学电离形成,其起源于 CH ^[5,8-9],故取 CH 粒子浓度极值位置为其他粒子密度研究的基准位置,并定义为本文研究的火焰锋面位置。以正离子为例,该位置处

H_3O^+ 、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$ 、 CH_5O^+ 、 CHO^+ 、 CH_3^+ 、 C_3H_3^+ 数量分别为 1.87×10^{10} 、 9.32×10^9 、 4.02×10^7 、 6.70×10^6 、 1.63×10^6 、 $6.55 \times 10^4/\text{cm}^3$,可知不同离子间的浓度差异较大,初始压力为 0.3 MPa、 $\lambda=1.4$ 时,正离子总数密度为 $2.80 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,负离子总数密度为 $7.60 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$,电子数密度为 $2.46 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,中性分子数密度为 $1.34 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

3.2 双离子风发展程度分析

在电场作用下,火焰锋面带电粒子受电场力作用加速,与中性分子发生碰撞,进行动量和热量的传递,促进电场方向上火焰已燃区与未燃区之间的传质和传热,进而促进火焰传播^[10]。正离子浓度和电子浓度均较高,电子质量远小于中性分子质量,与中性分子之间的动量传递忽略不计,负离子的浓度较低,但不可忽略^[11-12],本实验工况负离子浓度约占正离子浓度的 27%。

直流电场下离子定向迁移进而促进火焰的发展,称这种作用为离子风效应^[13];低频交流电场下,网状电极与点火电极之间形成方向交替变化的电场,正负离子交替沿电场线方向迁移,Kim 等的研究将其归为双离子风效应^[4],这是低频交流电场对火焰促进作用的主要机理。

离子风效应对火焰传播的促进效果可由离子风发展程度 ξ 表示,即

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

$$t_c = \frac{1}{zR_i} \tag{2}$$

$$z = \frac{4\pi\sigma^2 p}{\sqrt{\pi m k_B T}} \tag{3}$$

式中: t 为离子在火焰中作用的时间; t_c 为碰撞响应时间^[14]; z 为离子与中性分子的碰撞频率; R_i 为离子与尚未发生碰撞的中性分子浓度之比,由于中性分子浓度比正负带电离子浓度约大 8 个数量级^[4],使用中性分子总浓度代替未发生碰撞的中性分子浓度; σ 为碰撞直径,根据 CHEMKINPRO 输运参数文件取为 $3.746 \times 10^{-10} \text{ m}$; $p=3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 为初始压力; m 是平均粒子质量,根据模拟结果以单位体积粒子总质量比粒子总数求得为 $4.59 \times 10^{-26} \text{ kg}$; $k_B=1.390\ 62 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ 为玻尔兹曼常数; T 为绝热火焰温度。使用 CHEMKIN-PRO 软件,计算 $\lambda=1.4$ 、初始温度为 298 K、压力为 $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时绝热火焰温度为 1 863 K,将数值代入式(3),得到实验工况下离子与中性分子的碰撞频率为 $8.65 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 。

正离子和负离子的浓度不同,因而其对应的碰撞响应时间也不相同,低频交流电场下正负离子交替迁移形成双离子风作用,发展程度可表示为

$$\xi_{\text{eff}} = \xi_p - \eta \xi_n = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_{cp}}\right) - \eta \left[1 - \exp\left(-\eta \frac{t}{t_{cp}}\right)\right] \tag{4}$$

式中: t_{cp} 为正离子的碰撞响应时间; η 为负离子与正离子浓度之比; ξ_p 、 ξ_n 分别为正负离子单独作用下的离子风效应。通过离子的模拟计算,过量空气系数为 1.4、初始压力为 0.3 MPa 的甲烷/空气火焰中正离子与中性分子浓度之比为 2.09×10^{-9} , z 为 $8.65 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 、 η 为 0.27、 t_{cp} 为 55.20 ms、 $U=5 \text{ kV}$ 、 $f=40, 60, 80, 100 \text{ Hz}$ 的低频交流电场单位周期时间的双离子风发展程度分别为 0.33、0.24、0.19、0.15。双离子风发展程度 ξ_{eff} 随交流频率的变化如图 8 所示,可知随着频率的增大,双离子风发展程度逐渐减小。

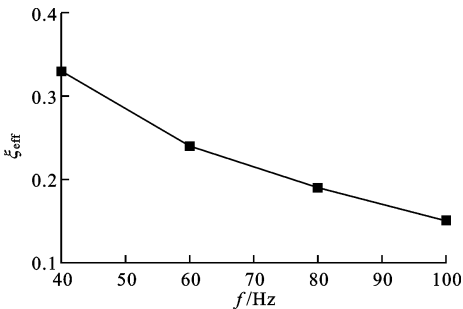


图 8 双离子风发展程度 ξ_{eff} 随频率的变化

3.3 双离子风发展程度与平均火焰传播速度增大率及压力峰值增大率的相关性分析

模拟计算表明,随着频率的增大,双离子风发展程度 ξ_{eff} 逐渐减小,这与实验中平均火焰速度增大率 $\Delta \bar{S}_L$ 和压力峰值增大率 ΔP_{max} 随频率的变化趋势一致,说明 ξ_{eff} 与 $\Delta \bar{S}_L$ 及 ΔP_{max} 之间存在联系。

图 9、图 10 分别给出双离子风发展程度 ξ_{eff} 与平均火焰速度增大率 $\Delta \bar{S}_L$ 和压力峰值增大率 ΔP_{max} 的

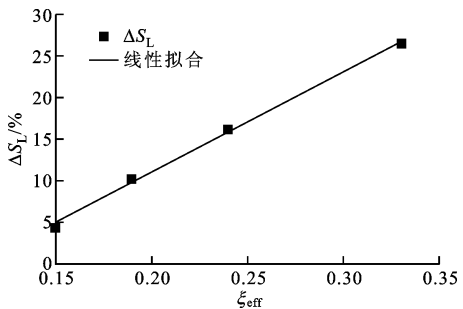


图 9 双离子风发展程度 ξ_{eff} 与 $\Delta \bar{S}_L$ 的拟合曲线

拟合曲线。由图9、图10可知,随着双离子风发展程度 ξ_{eff} 的增大,平均火焰传播速度增大率 $\Delta\bar{S}_L$ 和压力峰值增大率 ΔP_{max} 均逐渐增大,拟合曲线的相关系数分别为0.995 82、0.919 96,表明 $\Delta\bar{S}_L$ 、 ΔP_{max} 与 ξ_{eff} 密切相关,电场下火焰锋面离子与中性分子之间的碰撞作用程度与火焰的宏观拉伸形变有直接关联。

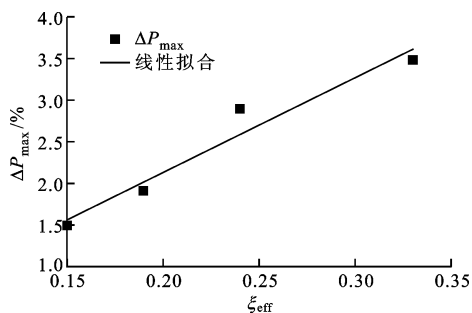


图10 双离子风发展程度 ξ_{eff} 与 ΔP_{max} 的拟合曲线

低频交流电场呈周期变化,电场方向每隔半周期变化一次,正负离子交替作用,当交流电场频率增大时,每半周期离子受电场作用的时间减小,离子加速碰撞还未形成较大的体积流时,电场方向发生改变,离子风无法持续发展,因此双离子风发展程度受到限制^[15],宏观上表现为火焰在多周期累积作用下拉伸效果减弱。当交流电场频率较小时,双离子风发展程度 ξ_{eff} 较大,离子与中性分子之间碰撞更加充分,电场对火焰的促进效果变强。因此,低频交流电场对预混球形火焰的作用机制主要为正负离子与中性分子之间的碰撞作用,运用双离子风发展程度 ξ_{eff} 可以准确描述不同频率低频交流电场对预混球形火焰的影响程度。

4 结 论

(1)加载40~100 Hz低频交流电场,火焰在横向发生拉伸形变;随着频率的减小,平均火焰传播速度 $\bar{S}_L$ 和压力峰值 P_{max} 均逐渐增大,40 Hz时电场对火焰的作用效果最强,平均火焰传播速度增大26.47%,压力峰值增大3.48%。

(2)低频交流电场对火焰的促进作用主要基于双离子风效应,随着频率的减小,双离子风发展程度 ξ_{eff} 逐渐增大,火焰拉伸程度增大,平均火焰传播速度和压力峰值均增大。当频率分别为100、80、60、40 Hz时,双离子风发展程度分别为0.15、0.19、0.24、0.33。

(3)加载不同低频交流电场后,平均火焰传播速度增大率 $\Delta\bar{S}_L$ 和压力峰值增大率 ΔP_{max} 的变化与双

离子风发展程度 ξ_{eff} 密切相关,相关系数均大于0.9,说明使用参数 ξ_{eff} 描述低频交流电场对预混球形火焰的影响程度是准确可行的。

参考文献:

- [1] MIN S C, LEE Y. Premixed combustion under electric field in a constant volume chamber [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(12): 3131-3138.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] PEDERSEN T, BROWN R C. Simulation of electric field effects in premixed methane flames [J]. Combustion & Flame, 1993, 94(4): 433-448.
- [7] HUANG Z, ZHANG Y, ZENG K, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures [J]. Combust Flame, 2006, 146: 302-311.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

(下转第141页)