

DOI: 10.7652/xjtuxb201511006

# 交流电场电压幅值对球形火焰影响的理论研究

张聪<sup>1</sup>, 侯俊才<sup>1</sup>, 段浩<sup>1</sup>, 李超<sup>1</sup>, 吴筱敏<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 陕西理工学院陕西省工业自动化重点实验室, 723001, 陕西汉中)

**摘要:** 为了获得高频交流电场电压幅值对球形扩展火焰的影响因素,运用电磁学原理进行了研究,得出:以两网状电极为底面的圆柱体中任意一点在任意时刻产生的电磁能量大小与交流电电压有效值的平方成正比,与该点到圆柱体轴心的距离成正比,在圆柱体中电磁能量密度沿径向递减;电磁能量产生的热效应和电化学效应可提高火焰平均传播速度,电磁能量密度的不均分布会引起火焰变形。同时,通过对常温、常压下定容燃烧弹中 3 种过量空气系数的甲烷-空气预混球形扩展火焰的平均传播速度和形状变化与加载交流电压有效值的关系进行了实验验证,结果表明:当电压有效值小于 2 kV 时,电磁能量以热效应的方式促进火焰传播,当电压有效值大于 2 kV 时,电磁能量以电化学效应的方式促进燃烧;实验中电磁能量密度的不均匀分布导致了火焰横向拉伸。该结果可为高频电场助燃研究提供新的思路和方法

**关键词:** 高频交流电场;球形扩展火焰;平均火焰传播速度;电磁能量

**中图分类号:** TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)11-0033-06

## Effects of AC Electric Field Voltage Amplitude on Spherical Flame

ZHANG Cong<sup>1</sup>, HOU Juncal<sup>1</sup>, DUAN Hao<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, WU Xiaomin<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China)

**Abstract:** To find out the influence factors of high frequency AC electric field voltage amplitude on spherically expanding flame, the basic principles of electromagnetism are used to conclude that the value of electromagnetic energy gets proportional to the square of RMS AC voltage and the distance to the axial in the cylinder with two mesh electrodes as its bottom surfaces at any time; the electromagnetic energy density decreases radially in the cylinder; the thermal and electrochemical effects produced by electromagnetic energy promotes the the average flame propagation rate, and the uneven distribution of electromagnetic energy density leads to a flame deformation. An experiment is conducted to investigate the relationship between RMS AC voltage and the average flame propagation rate/deformation of premixed CH<sub>4</sub>-air mixture flame at room temperature and 3 kinds of excess air ratio, under atmospheric pressure and high frequency AC electric fields. The results show that when RMS AC voltage is lower than 2 kV, thermal effect produced by electromagnetic energy promotes the average flame propagation rate, and when RMS AC voltage is higher than 2 kV, electrochemical effect promotes the average flame propagation rate, and the uneven distribution of electromagnetic energy density leads to transverse stretch of

the flame.

**Keywords:** high frequency AC electric field; spherically expanding flame; average flame propagation speed; electromagnetic energy

随着环境污染和能源危机的进一步加剧,有效提高能源利用率成为迫在眉睫的任务。电场助燃技术以其促进燃烧达到高效率、低污染的特点引起越来越多学者的广泛关注。Jaggers 等发现火焰传播速度在电场作用下显著提高<sup>[1]</sup>。后续大量学者应用各种不同类型火焰的研究结果验证了电场能够提高火焰传播速度<sup>[2-4]</sup>。除此之外,电场对提高火焰稳定性<sup>[5-7]</sup>和减少碳排放<sup>[8-11]</sup>同样效果明显。孟祥文等人通过实验研究验证了直流电场强度和高压电极结构对球形扩展传播火焰的影响,并将该影响合理地解释为离子风效应<sup>[12-13]</sup>。Min 等人的研究表明,在交流电场中火焰受离子风效应的影响随着电场频率的增加呈递减趋势,当电场频率高于 1 kHz 时,离子风效应已经微乎其微<sup>[14]</sup>,这意味着高频交流电场对燃烧的促进作用需要新的机理进行解释。Timothy 等人发现,高频电场的能量对燃烧过程中氧气的分解产生电化学的作用促进了燃烧<sup>[15-16]</sup>。张扬等人研究发现,火焰形变随电压幅值呈非单调性变化,并把这一变化的原因归结为热效应、离子风效应和电化学效应<sup>[17]</sup>。以上研究结果表明,热效应和离子风效应可能是高频交流电场的助燃机理,但这两种效应对火焰的影响随高频交流电场变化的关系却并不明确。

本文引入电磁学经典理论推导出定容燃烧装置中电磁能量密度分布趋势和能量随电压幅值和频率的变化公式,对热效应和电化学效应作用于火焰的影响随高频交流电场产生的电磁能量的变化关系加以研究,并通过在定容燃烧装置中加入高频交流电场的甲烷-空气稀燃火焰实验进行了验证,以期高频电场助燃研究提供新的思路和方法。

## 1 理论研究

### 1.1 高频交流电场产生的电磁能量

以两网状电极为底面的圆柱体的研究区域 1 如图 1 所示。两网状电极间接有正弦变化的高频交流电源,此时两网状电极相当于一组平行板电容器,研究区域 1(以下简称为区域 1)内任意两点在任意时刻的电场强度相等、方向相同,且任意一点的电场强度随时间成正弦变化,方向由正电压正极板指向负极板。

麦克斯韦方程组在开放空间中的磁场环路定理的微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{H}$  为磁场强度; $\mathbf{E}$  为电场强度; $\epsilon$  为电介质常数。从式(1)可以发现,受区域 1 中正弦变化的电场激发,磁场将环绕电场产生。为了确定区域 1 中不同位置磁场强度的大小,确定了区域 1 中任意与网状电极平行的截面(研究区域 2,见图 1),引入麦克斯韦方程组在开放空间中的磁场环路定理的积分形式

$$\oint \mathbf{H} dL = \epsilon \iint \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} ds \quad (2)$$

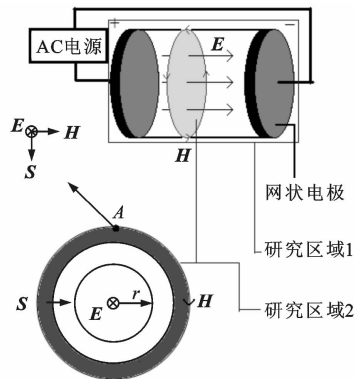


图 1 研究区域示意图

式中: $L$  为图 1 中半径为  $r$  的圆周长; $s$  为半径为  $r$  的圆面积。对式(2)以半径为  $r$  的圆面进行积分,使之成为在任意时刻不随位置变化的量,则有

$$\mathbf{H} = \frac{\epsilon \partial \mathbf{E}}{2 \partial t} r \quad (3)$$

式(3)表明,在区域 2 中,任意时刻的磁场随着半径的增大而增大,这说明靠近区域 2 边界附近的区域产生的磁场将远大于圆心处产生的磁场。因为区域 2 为区域 1 中任意横截面,因而区域 2 中的结论适用于整个区域 1,即区域 1 中的磁场以圆柱轴线为起点呈径向分布,且随着半径的增大而增大,并在圆柱体表面附近达到最大。

区域 1 中任意时刻的电场强度

$$E = \frac{U_0}{d} \sin \omega t \quad (4)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为电场频率; $U_0$  为交流电压峰值; $d$  为两网状电极之间的距离。由式(3)可知,任意时

刻磁场强度

$$H = \frac{\epsilon U_0 \omega r}{2d} \cos \omega t \quad (5)$$

电场和磁场在空间中相互作用产生电磁能量,并以辐射的形式充满区域 1。在电磁学中电磁能量的大小由坡印亭矢量<sup>[18]</sup>来表征,区域 1 中任意一点在任意时刻产生的电磁能量为

$$S = \frac{\epsilon U_0^2 \omega r}{4d^2} \sin 2\omega t \quad (6)$$

从式(6)中我们得出本文最重要的结论,即:区域 1 中任意一点在任意时刻产生的电磁能量大小与交流电压幅值的平方成正比,与该点到区域 1 轴心的距离成正比;电磁能量的大小随时间正弦变化。这一结论将成为接下来电磁能量密度推导和提高电压幅值促进燃烧理论的依据。

## 1.2 高频交流电场产生的电磁能量分布

电场中产生的电磁能量是径向传播的,式(6)显示电磁能量的传播方向为电场强度与磁场强度的叉积方向。区域 2 中任意一点(见图 1 中点 A)的电磁能量传播方向(由式(6)可知)应为该点沿径向指向圆心,同理可以推得区域 1 中任意一点电磁能量传播方向为该点沿径向指向轴心,因此区域 1 距离轴心的位置越近,该区域接收到的来自其他区域的电磁能量越大,所以区域 1 中的电磁能量呈现从轴心沿径向的分布,且沿径向呈递减的趋势,如图 2 所示。

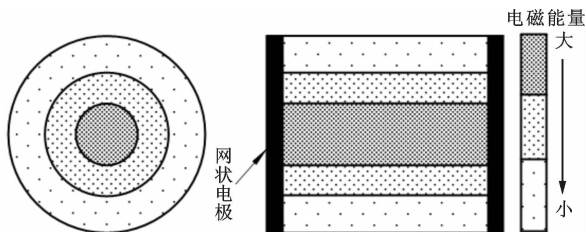


图 2 区域 1 坡印亭矢量正半周期电磁能量分布示意图

由于坡印亭矢量为正弦变量,因而在负半周期内电磁能量的传播方向将与正半周期相反,即区域 1 内任意一点电磁能量的方向将沿径向垂直指向圆柱柱面,此时电磁能量分布形式将呈现沿轴心径向分布,且随着半径的增大而增大。由于靠近轴心处的电磁能量小于靠近柱面处的能量,因而靠近柱面的电磁能量密度将远远大于靠近轴心处的密度。

## 2 实验装置和方法

### 2.1 实验装置

整个实验台架如图 3 所示。定容燃烧弹、配气系统和点火电路相互配合完成甲烷-空气混合气的

燃烧,容弹内交变电磁场由高频交流电源提供,火焰传播的整个过程由高速纹影摄像机记录。

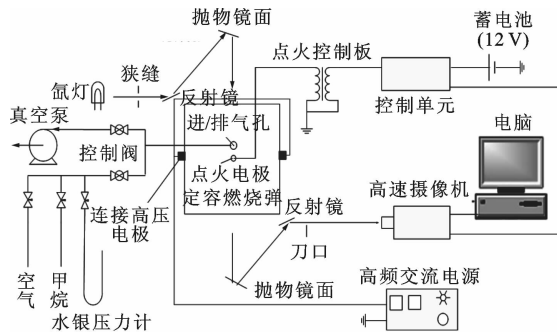


图 3 实验装置图

定容燃烧弹的内部结构如图 4 所示。定容燃烧弹整体由 45 号碳钢加工而成,燃烧弹的内腔为圆柱体结构( $\Phi 130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ )。圆柱体内腔上镶嵌着一层厚度为 8.5 mm 的聚四氟乙烯绝缘套。内腔的水平方向对称分布 45 号钢制圆形网状平板电极,间距为 70 mm,电极直径为 60 mm。内腔的竖直方向对称分布 45 号钢制点火电极,间距为 2 mm,点火电极的直径为 2 mm。

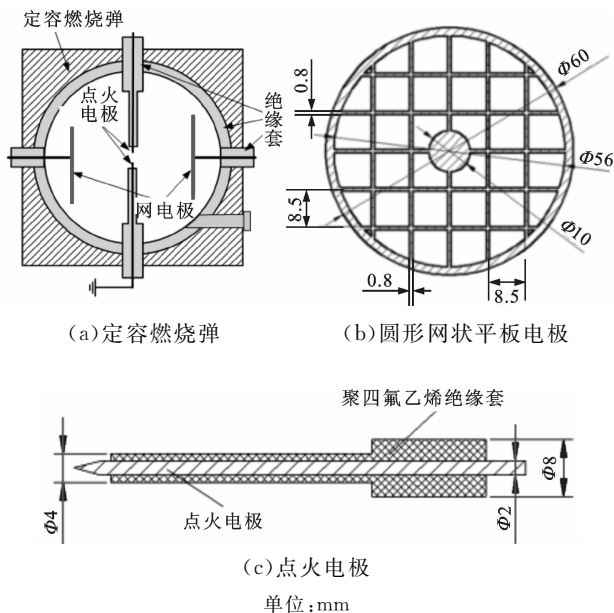


图 4 电极和容弹结构

实验中采用了美国 Redlake 公司生产 HG-100K 型高速摄像机,拍摄速度高达 5 000 帧/s,选用了 Wisman 公司生产的 WPS20P20 型高压交流电源,输出电压范围为 0~20 kV,功率范围为 1.5~45 W,输出电压变化为  $\pm 10\%$ 。

### 2.2 实验方法

常温、常压下向定容燃烧弹中充入过量空气系数  $\lambda = 1.2, 1.4, 1.6$  的甲烷-空气混合气并静置 2

min 以消除混合气扰动。待混合气均匀混合后,向网状电极分别施加频率  $f=15\text{ kHz}$ 、电压有效值(下文简称电压) $U=1,2,3,4,5\text{ kV}$  的交流电压。按下点火按钮的同时高速摄像机和压力传感器开始采集燃烧数据,燃烧结束后用真空泵抽气  $1/2\text{ min}$ ,以保证下次实验不受燃烧废气的影响。每个工况点完成3次上述操作,并取实验数据的平均值以减小实验误差。

本实验主要研究了电场对轴线火焰传播的影响,忽略了电场对纵向火焰传播的影响,因此本文定义的火焰传播距离  $L$  为水平方向上左右两边火焰前锋面到容弹中心距离的平均值,即

$$L = (L_1 + L_2) / 2 \quad (7)$$

$L_1$  和  $L_2$  由纹影照片确定,如图5所示。

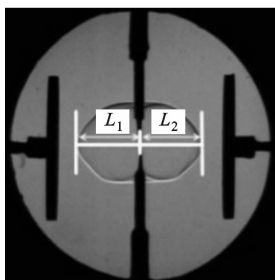


图5 火焰传播距离示意图

当  $L < 6\text{ mm}$  时,受点火能量的影响火焰的发展会产生波动;当  $L > 25\text{ mm}$  时,容弹内温度、压力和网状电极结构的变化对火焰产生影响<sup>[19]</sup>,因此本文中  $L$  的范围为  $6 \sim 25\text{ mm}$ 。

火焰传播速度  $S_L$ 、平均火焰传播速度  $\overline{S_L}$ 、平均火焰传播速度的变化率  $\Delta \overline{S_L}$  分别定义为

$$S_L = dL/dt \quad (8)$$

$$\overline{S_L} = \sum_{i=1}^n \frac{S_{L,i}}{n} \quad (9)$$

$$\Delta \overline{S_L} = (\overline{S_L} - S_0) / S_0 \quad (10)$$

式中: $t$  为火焰传播时间; $S_{L,i}$  为  $i$  点的火焰传播速度; $S_0$  为未加载电场时的火焰传播速度。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 火焰传播图像分析

$\lambda=1.6$ 、 $U=1,2,3,4,5\text{ kV}$  时的火焰传播图像如图6所示。由图可见:未加载电压时火焰呈球形传播,火焰沿各个方向的传播速度相同;当电压从0增加到2 kV 时,火焰依然呈球形传播,只是球形半径略有增加,这说明火焰沿各个方向的传播速度随着电压的增加而有所增大;当电压增加到3 kV 时,

火焰形状由球形逐渐变化成椭球形,说明火焰在水平方向上得到拉伸,即水平方向的火焰传播速度增大;当电压增加到5 kV 时,火焰的横向拉伸更加明显。

电压从0增加到2 kV 时火焰没有明显的横向拉伸,这是电磁能量与电压幅值的平方成正比的缘故,见式(6)。当电压比较小时,加载在两电极之间的电磁能量不大,这部分电磁能量可能无法对燃烧过程中的中间反应物产生电化学反应,但却可以转化为热能通过热效应来提高反应区的温度,温度的提高使得化学反应速率常数增大,因而燃烧反应加快,平均火焰传播速度加快,表现为球形半径增大。

当电压增加到3 kV 时,电磁能量进一步加大,燃烧反应的中间产物吸收这部分能量后可能被激励到更高能级,使得接下来的化学反应需要的能量更少,进而达到了降低化学反应活化能的目的,表现为交流电场对火焰的电化学效应。当电压进一步增大到5 kV 时,与电压平方成正比关系的电磁能量迅速增大,带来更显著的电化学效应,而电磁能量在区域1中沿径向的递减分布(见图2)导致电化学效应沿径向递减,从而造成了火焰面横向被明显拉伸。

由图6还可以看出,火焰受电磁能量影响的主要区域为靠近区域1轴心附近的区域,靠近区域1柱面的区域对火焰几乎没有影响,而当坡印亭矢量为负半周期时,区域1中电磁能量主要分布在靠近柱面的区域,这说明坡印亭矢量为负半周期时电磁能量对于火焰的影响很小,可以忽略。

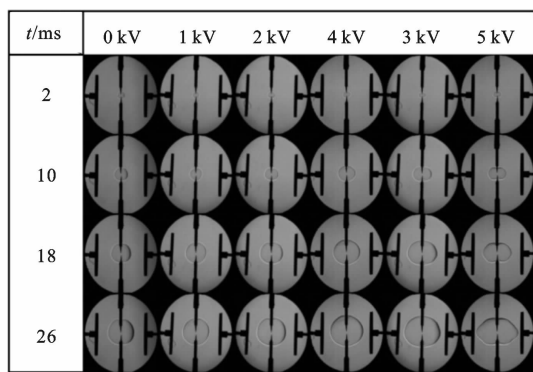


图6  $\lambda=1.6$ 、 $f=15\text{ kHz}$  时不同电压下的火焰传播图像

#### 3.2 火焰传播速度分析

$f=15\text{ kHz}$ 、 $\lambda=1.2, 1.4, 1.6$  时平均火焰传播速度随交流电压的变化如图7所示。结合表1看,在3种过量空气系数下,平均火焰传播速度随电压的增大而增大。当电压从0增大到2 kV 时,平均火焰传播速度提高缓慢,这是交流电场对火焰产生热

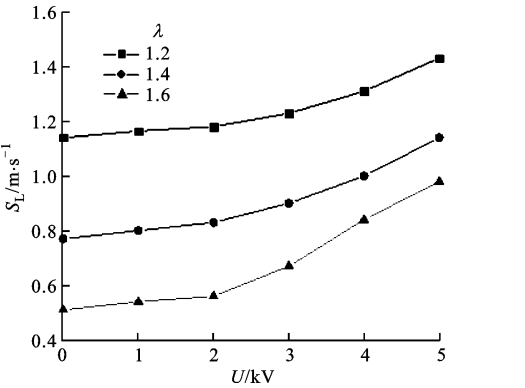


图 7  $f=15\text{ kHz}$ , $\lambda=1.2,1.4,1.6$  时平均火焰传播速度随电压的变化

表 1 不同电压下平均火焰传播速度及其变化率

| $U/\text{kV}$ | $\overline{S_L}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |       | $\Delta \overline{S_L}/\%$ |       | $\overline{S_L}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |       | $\Delta \overline{S_L}/\%$ |  | $\overline{S_L}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |  | $\Delta \overline{S_L}/\%$ |  |
|---------------|---------------------------------------------|-------|----------------------------|-------|---------------------------------------------|-------|----------------------------|--|---------------------------------------------|--|----------------------------|--|
|               | $\lambda=1.2$                               |       | $\lambda=1.4$              |       | $\lambda=1.6$                               |       |                            |  |                                             |  |                            |  |
| 0             | 1.14                                        |       | 0.77                       |       | 0.51                                        |       |                            |  |                                             |  |                            |  |
| 1             | 1.16                                        | 1.75  | 0.80                       | 3.90  | 0.54                                        | 5.88  |                            |  |                                             |  |                            |  |
| 2             | 1.18                                        | 3.51  | 0.83                       | 7.80  | 0.56                                        | 9.80  |                            |  |                                             |  |                            |  |
| 3             | 1.23                                        | 7.89  | 0.91                       | 18.18 | 0.67                                        | 31.37 |                            |  |                                             |  |                            |  |
| 4             | 1.33                                        | 16.67 | 1.02                       | 32.47 | 0.84                                        | 64.71 |                            |  |                                             |  |                            |  |
| 5             | 1.43                                        | 25.44 | 1.14                       | 48.05 | 0.98                                        | 92.08 |                            |  |                                             |  |                            |  |

效应的结果,此时电化学效应还未出现。

当电压从 2 kV 继续增大到 5 kV 时,不同过量空气系数下平均火焰传播速度皆随电压的增大显著增大,两者呈线性关系。取  $\lambda=1.6$  进行分析时发现,电压每增加 1 kV,速度变化率增加 30% 左右,电压和速度增长率确实呈现线性关系。对电压和平均火焰传播速度曲线进行线性拟合显示,当电压在 2, 3, 4, 5 kV 时,平均火焰传播速度变化率  $\Delta \overline{S_L}$  随电压变化的曲线近似为一条斜率为 0.31 的直线,计算式如下

$$\Delta \overline{S_L} = 0.31U$$

(11)

对式(11)两边平方后乘以速度变化率  $\Delta \overline{S_L}$  的火焰前锋面任意一点的质量  $m$  由下式计算

$$\frac{1}{2}m\Delta \overline{S_L}^2 = kU^2$$

(12)

式中: $k=0.048\text{ Jm}$ ,为常数。式(12)左边表示速度变化率为  $\Delta \overline{S_L}$  的火焰前锋面上任意一点的动能增量,式(12)右边电压的平方项可以表示电磁能量,见式(6),这说明火焰动能的增长与电磁能量增长呈线性关系,这是一种十分高效的能量转化方式。根据热力学第二定律可知,热效应无法达到如此高效的

能量转化效率。在电化学效应中,电磁能量却可以全部用来为化学反应提供能量,即电化学效应可以使得火焰动能的增长与电磁能量增长呈线性关系,这也从侧面证明当电压增大到 2 kV 之后, $\lambda=1.6$  时电化学效应超越热效应,并在对火焰的影响中起主导作用。

过量空气系数  $\lambda=1.2,1.4$  工况下,通过对平均火焰传播速度变化率  $\Delta \overline{S_L}$  与电压  $U$  进行线性拟合时发现,两种工况下同样满足式(12),其中当  $\lambda=1.2$  时式(12)中常数  $k=0.004\text{ Jm}$ , $\lambda=1.4$  时式(12)中常数  $k=0.011\text{ Jm}$ ,这说明当电压大于 2 kV 时, $\lambda=1.2,1.4,1.6$  工况下电化学效应对火焰的影响起主导作用。

4 结 论

通过交流电场对火焰锋面加载电磁能量,使得燃烧产生热效应和电化学效应,进而促进燃烧,并表现为火焰锋面变形和平均火焰传播速度提高。由电磁学理论的推导和理论与实验数据的结合得到以下结论。

(1)提高电压幅值,在  $\lambda=1.2,1.4,1.6$  工况下平均火焰传播速度均得到提高, $\lambda=1.6$  时提高得最为明显。与未加载电场相比, $\lambda=1.6$ 、 $f=15\text{ kHz}$ 、 $U=5\text{ kV}$  工况下平均火焰传播速度最多可提高 92.08%。

(2)本实验中电压小于 2 kV 时对燃烧的影响主要为热效应,当电压大于 2 kV 时该影响主要为电化学效应。

(3)在以两网状电极为底面的圆柱体区域内,高频交流电提供的电磁能量以轴心为起点沿径向递减分布,因而靠近轴线的火焰锋面吸收到更多的电磁能量,产生更明显的电化学效应,从而造成平均火焰传播速度沿半径递减分布,最终导致火焰变形,即火焰横向拉伸。

参考文献:

[1] JAGGERS H C, ENGEL A V. The effect of electric fields on the burning velocity of various flames [J]. Combustion and Flame, 1971, 16(3): 275-285.

[2] VOLKOV E N, SEPMAN A V, KORNILOV V N, et al. Towards the mechanism of DC electric field on flat premixed flames [C]//Proceedings of the 4th European Combustion Meeting. Pittsburgh, PA, USA: Combustion Institute, 2009: 14-17.

[3] WON S H, CHA M S, PARK C S, et al. Effect of

- electric fields on reattachment and propagation speed of tribrachial flames in laminar coflow jets [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 963-970.
- [4] WON S H, RYU S K, KIM M K, et al. Effect of electric fields on the propagation speed of tribrachial flames in laminar coflow jets [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 152(4): 496-506.
- [5] MEMDOUH B, PASCAL D, PIERRE V. Direct numerical simulation of the effect of an electric field on flames stability [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(12): 2286-2297.
- [6] ALTENDORFNER F, KUHL J, ZIGAN L, et al. Study of the influence of electric fields on flames using planar LIF and PIV techniques [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 3195-3201.
- [7] CESSOU A, VAREA E, CRINER K, et al. Simultaneous measurements of OH, mixture fraction and velocity fields to investigate flame stabilization enhancement by electric field [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(4): 905-917.
- [8] XIE L, KISHI T, KONO M. Investigation on the effect of electric fields on soot formation and flame structure of diffusion flames [J]. *International Symposium on Combustion*, 1992, 24(1): 1059-1066.
- [9] MASAHIRO S, MASAYUKI S, ASWADA K. Variation of flame shape and soot emission by applying electric field [J]. *Journal of Electrostatics*, 1997, 39(4): 305-311.
- [10] WANG Y, NATHAN G J, ALWAHABI Z, et al. Effect of a uniform electric field on soot in laminar premixed ethylene/air flames [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(7): 1308-1315.
- [11] PARK D G, CHOI B C, CHA M S, et al. Soot reduction under DC electric fields in counterflow non-premixed laminar ethylene flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 2014, 186(4/5): 644-656.
- [12] MENG Xiangwen, WU Xiaomin, KANG Chan, et al. Effects of direct-current (DC) electric fields on flame propagation and combustion characteristics of premixed  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$  flames [J]. *Energy Fuels*, 2012, 26(11): 6612-6620.
- [13] 康婵, 杨星, 刘杰, 等. 负电场下点电极和网状电极对预混稀燃火焰的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(1): 31-36.
- KANG Chan, YANG Xing, LIU Jie, et al. The effect of negative electric field with point electrode and mesh electrode to premixed lean combustion flame [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(1): 31-36.
- [14] MIN K K, SUK H C. 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.
- [15] OMBRELLO T, WON S H. Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen: part I Effects of  $\text{O}_3$  [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(10): 1906-1915.
- [16] OMBRELLO T, WON S H. Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen: part II Effects of  $\text{O}_2$  (at  $\Delta g$ ) [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(10): 1916-1928.
- [17] 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.
- [18] LIAO S Y, JIANG D M, CHENG Q. Determination of laminar burning velocities for natural gas [J]. *Fuel*, 2004, 83(9): 1247-1250.
- [19] 杨儒贵, 刘运林. 电磁场与波简明教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 130-131.

#### [本刊相关文献链接]

- 杨振中, 秦朝举, 宋立业, 等. 传统缸内壁面传热模型在氢内燃机中的适用性. 2015, 49(9): 36-40. [doi:10.7652/jxtxb201509007]
- 汤成龙, 司占博, 张旭辉, 等. 稀释气对高甲烷含量天然气燃烧特性的影响. 2015, 49(9): 41-46. [doi:10.7652/jxtxb201509008]
- 李春艳, 高忠权, 刘兵, 等. 电极位置与电极面积对离子电流影响的试验研究. 2015, 49(7): 55-60. [doi:10.7652/jxtxb201507010]
- 崔雨辰, 段浩, 李超, 等. 电场分布对球形传播火焰变形率的影响. 2015, 49(5): 49-55. [doi:10.7652/jxtxb201505008]
- 孙天旗, 刘杰, 段浩, 等. 不同电极下电场对甲烷/空气稀燃火焰影响的试验研究. 2015, 49(3): 38-43. [doi:10.7652/jxtxb201503007]
- 刘兵, 李春艳, 孙天旗, 等. 离子电流法测量  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  混合气燃烧火焰传播速度的实验研究. 2015, 49(1): 40-45. [doi:10.7652/jxtxb201501007]
- 于会宾, 胡二江, 杨柯, 等. 碳酸二甲酯层流火焰特性的实验和数值研究. 2014, 48(11): 25-31. [doi:10.7652/jxtxb201411005]
- 段浩, 房建峰, 孙天旗, 等. 不同电极结构下电场对甲烷/空气火焰的影响. 2014, 48(9): 62-67. [doi:10.7652/jxtxb201409011]

(编辑 苗凌)