

非均匀电场对火焰传播速率的影响

唐安东, 孟祥文, 周蓉芳, 周竹杰, 于化龙, 向曦, 吴筱敏

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在定容燃烧装置上,通过改变加载电压和电极结构形成了不同的非匀强电场,由此研究了电场对预混层流火焰形状和传播速率的影响.结果表明:在非均匀电场下,尖-网电极对应的火焰形状发生了显著变化,尖-柱电极对应的火焰形状变化较小;受离子风的影响,沿电场方向的火焰水平方向传播速率增加,加载电压越大,火焰水平方向传播速率增加得越多;当加载电压为 -5 kV 、 -10 kV 、 -12 kV 时,尖-网电极对应的水平方向平均传播速率分别增加了 10.4% 、 23.7% 、 34.1% ,尖-柱电极对应的水平方向平均传播速率分别增加了 2.5% 、 7.5% 、 8.8% ;加载电压相同时,尖-网电极比尖-柱电极对应的火焰水平方向传播速率增加得更多.

关键词: 非匀强电场;预混层流;离子风;火焰传播

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0016-05

Effect of Non-Uniform Electric Fields on Flame Propagation Speed

TAND Andong, MENG Xiangwen, ZHOU Rongfang, ZHOU Zhuojie,

YU Hualong, XIANG Xi, WU Xiaomin

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

Abstract: The experiment was conducted to investigate the effect of non-uniform electric fields on premixed laminar flame shape and propagation speed in a constant volume combustion device by changing applied voltage and electrode structure to create the different non-uniform electric fields. The results show that, in the non-uniform electric fields, the flame shape corresponding to tip-net electrodes changed significantly and the flame shape corresponding to tip-column electrodes changed slightly. The horizontal flame propagation speed increased in the field direction by the ionic wind effect. The increase in the horizontal flame propagation speed rose with an increase in the absolute value of applied voltage. When the applied voltage was -5 kV , -10 kV and -12 kV , the average flame propagation speed in the horizontal direction corresponding to tip-net electrodes increased by 10.4% , 23.7% and 34.1% , and the average flame propagation speed corresponding to tip-column electrodes increased by 2.5% , 7.5% and 8.8% , respectively. In addition, the horizontal flame propagation speed corresponding to tip-net electrodes increased more at the same applied voltage.

Keywords: non-uniform electric field; premixed laminar; ionic wind; flame propagation

在 20 世纪 40 年代,人们就发现电场对火焰的稳定性、燃烧速率、火焰形状及燃烧产物的形成具有显著的影响. Calcote 等^[1]对丁烷-空气本生灯火焰

进行了研究,发现电场作用下火焰稳定性显著增强. Jagers 等^[2]对火焰燃烧速率进行了研究,发现电场作用下火焰燃烧速率更快. Katzer 等^[3]通过实验研

究了不同电极形状和加载电压对火焰形状的影响。王宇等^[4]研究发现,针状电极会使火焰高度缩短,平板状电极可使火焰顶部向阴极板倾斜,带正电的中心电极对火焰中碳烟颗粒的生成有抑制作用。Moriya 等^[5]研究发现,在均匀电场中火焰传播沿正负两极板方向加快,在非均匀电场中受电晕放电的影响,火焰传播沿负极方向加快。Kim 等^[6-7]研究发现,在交变电场下本生灯火焰脱离速率加快,火焰的稳定性与交变电场的频率有关。

上述研究大多针对本生灯火焰或者蜡烛火焰等稳定火焰,很少涉及随时间发展和变化的火焰。均质混合气在定容燃烧弹中的燃烧与汽油机和气体燃料发动机的燃烧比较接近,研究定容燃烧弹内均质混合气的层流燃烧是研究、发展和验证燃料燃烧化学动力学机理的重要手段^[8],所以本文针对定容燃烧弹中非均匀电场下预混层流火焰进行了研究,同时分析了非均匀电场对火焰的形状及火焰传播速率的影响。

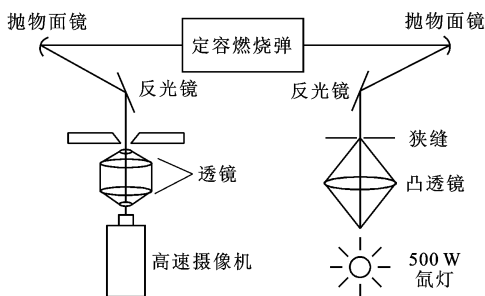
1 实验装置和方法

系统中纹影光路和实验装置如图 1 所示。定容燃烧弹内腔为 $\Phi 130\text{ mm} \times 108\text{ mm}$ 的圆柱体,材质为不锈钢,内腔中装有聚四氟乙烯绝缘套,绝缘套内径为 113 mm ,壁厚为 8.5 mm 。容弹两侧装有厚度为 15 mm 的高抗冲石英玻璃,可为火焰燃烧纹影成像提供光学通路。高速摄像机是美国 REDLAKE 公司生产的,型号为 HG-100K,拍摄速度为 10^4 幅/s 。室内安装的压力传感器为 Kistler 4075A10 型低压传感器,用于记录燃烧时容弹内的压力变化。实验中采用威思曼 DEL 系列直流负高压电源,输出电压范围为 $0\sim 30\text{ kV}$ 。

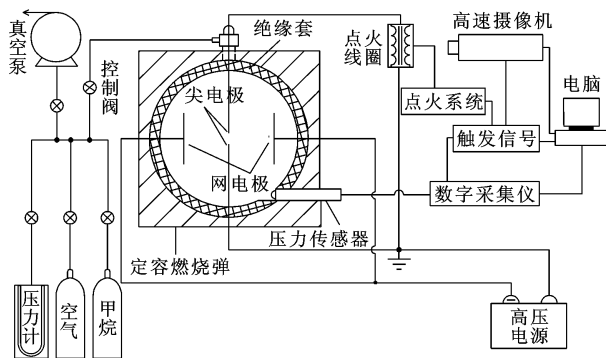
非均匀电场分别由两网电极-两尖电极(尖-网电极)和柱电极-两尖电极(尖-柱电极)组成,各电极的结构如图 2 所示。尖电极直径为 2 mm ,尖端锥角为 30° ,材料为 45 号钢,尖电极外套为聚四氟乙烯绝缘套。两尖电极对称安装在容弹中心竖直方向上(见图 1b),其既用于火花点火形成火核,也可在形成非均匀强电场时充当地极。网电极为外径 60 mm 的圆盘,网格大小为 $8.5\text{ mm} \times 8.5\text{ mm}$,材料为 45 号钢。实验中将网电极安装在容弹中心水平方向上(见图 1b),两网电极之间的距离为 70 mm ,与负高压电源连接,并与容弹中心两尖电极(接地)一起形成非均匀强电场。柱电极的外径为 113 mm ,内径为 103 mm ,长为 108 mm ,材料为 45 号钢。实验中柱电极安装

在容弹内,电极外径与聚四氟乙烯绝缘套匹配,与负高压电源相连,并与两尖电极形成非均匀电场。

实验在常温常压下进行,利用分压定律为容弹配制当量比为 1.0 的甲烷-空气的均匀混合气,在对网电极或柱电极加载合适的电压后点火,点火的同时触发高速摄像机和压力传感器。实验中通过调节高压电源的输出电压或采用不同的电极结构来改变电场的强度和分布。燃烧后的废气由真空泵抽出,并用空气多次冲洗容弹内腔,以减小残余废气对下次实验的影响。



(a) 纹影光路



(b) 实验装置

图 1 实验系统

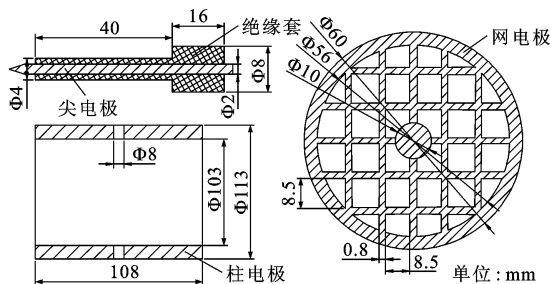


图 2 电极结构

2 结果及分析

2.1 电场数值模拟

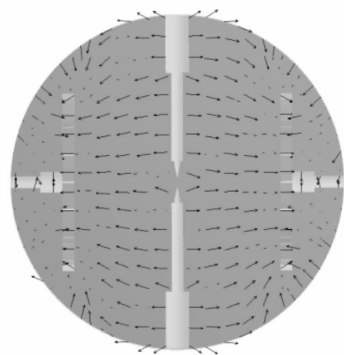
利用 ANSYS 13.0 软件对尖-网电极和尖-柱电极在加载电压后形成的空间电场分布进行了数值模

拟. 实验火焰的燃烧持续期很短,短时间内空间电荷难以形成有效积累,对外加电场的影响不大,因此在模拟静电场时忽略空间电荷的影响. 当两尖电极接地,且在两网电极或柱电极上加载比接地的尖电极低 5 kV 的直流电压(简称加载电压为-5 kV)时,电场强度 E 在容弹中心处的纵向截面云图和方向图如图 3 和图 4 所示.

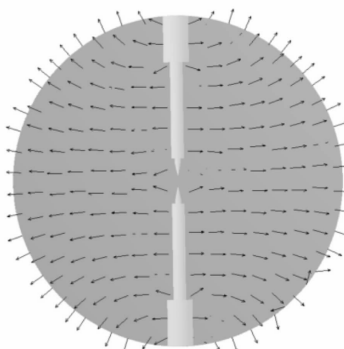
从图 3a 可以看出,沿水平和竖直方向的 E 分布是对称的,尖电极尖端空间的 E 最大,约为 2.6 MV/m. 尖电极与网电极之间的 E 分布比较均匀,在 0.1~0.2 MV/m 之间. 从图 3b 可以看出,在柱电极与尖电极上下交叉部位, E 最大,约为 3.9 MV/m,尖电极尖端空间的 E 很大,约为 3.0 MV/m. 尖电极与柱电极之间, E 变化很大,并沿容弹中心向左右两边迅速减小. 从图 4 可以看出,电场方向近似水平,截面处容弹左半部分的电场方向近似水平向左,右半部分近似水平向右. 对比两非匀强电场可知,电极结构对于电场分布具有重要影响.

2.2 火焰传播

图 5 为火焰传播示意图. 从图 5 可以看出,当无加载电压($V=0$ kV)时,火焰呈球形,并由已燃区向未燃区传播. 尖-网电极在非匀强电场下,火焰形状



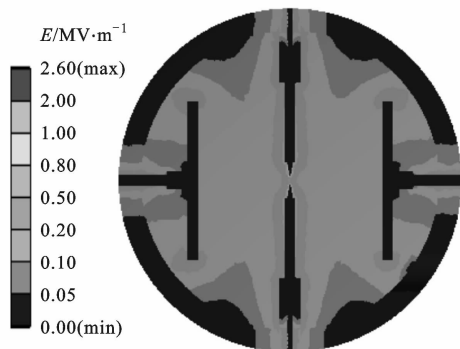
(a)尖-网电极



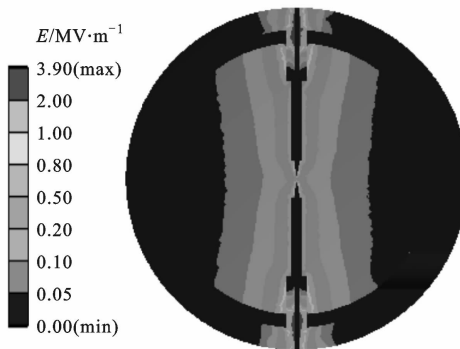
(b)尖-柱电极

图 4 电场方向图

发生了变化, V 越大,火焰形变越明显. 当 $V=-5$ kV 时,火焰发展近似球形;当 $V=-10$ kV 和 $V=-12$ kV 时,火焰在水平方向的发展受到明显的促进作用,在竖直方向的变化较小,所以火焰形变显著. 尖-柱电极在非匀强电场下,火焰形变不明显. 当 $V=-5$ kV 时,火焰发展近似球形;当 $V=-10$ kV 和 $V=-12$ kV 时,火焰在水平方向的发展受到的促进作用并不大,在竖直方向变化比较小,所以火焰形变不明显.



(a)尖-网电极



(b)尖-柱电极

图 3 电场分布的数值模拟结果

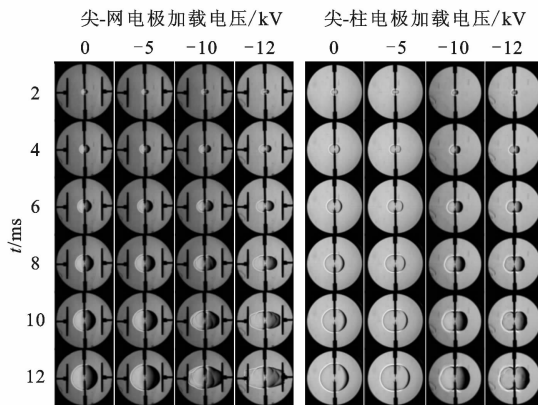


图 5 火焰传播示意图

在火焰传播过程中,受电场的影响,由电离形成

的正离子、负离子和电子存在向负极和正极移动的定向迁移速率^[9]. 由于本文加载电压为负高压,因此在电场作用下正离子向网电极或柱电极定向迁移;又因在运动过程中正离子与其他粒子碰撞形成了近似沿电场方向的正离子风,使得沿电场方向的火焰前锋面与未燃混合气之间的热量和质量交换增多,从而促进了火焰前锋面向未燃混合气发展. 同时,电场作用形成的离子风近似于水平方向,所以竖直向的火焰前锋面与未燃混合气之间的热量和质量交换减少,从而导致火焰在竖直方向的发展受到了抑制. 由图 3 和图 4 可知,尖-柱电极水平方向的电场强度沿尖电极至柱电极方向快速减小,随着火焰前锋面的发展,离子风强度迅速减弱,所以火焰水平方向发展不明显.

2.3 火焰传播速率

火焰传播速率 S_p 指火焰相对于静止燃烧壁面的运动速度,它可以用高速摄影直接测出^[10]. 本文记水平方向火焰传播速率为

$$S_h = \frac{dL}{dt}$$

式中: L 为沿水平方向从左右两边火焰前锋面到容弹中心的距离的平均值,即 $L = (L_1 + L_2)/2$, L_1 和 L_2 可由纹影照片直接确定,如图 6 所示; t 为点火后的时间.

在分析电场对火焰水平方向传播速率的影响时,选取 $L=5\sim 25\text{ mm}$. 原因是,压力和温度的变化会影响火焰的发展. 当 $L<25\text{ mm}$ 时,定容燃烧弹中的压力和温度变化甚小,可以排除压力和温度对火焰发展的影响;当 $L>5\text{ mm}$ 时,点火对火焰发展产生的波动影响可以消除^[10],因此该阶段火焰传播速率的变化可以视为由电场作用引起的.

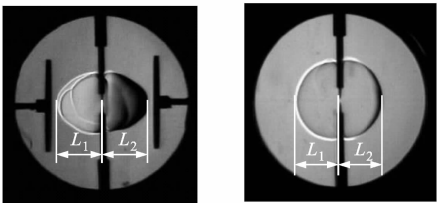
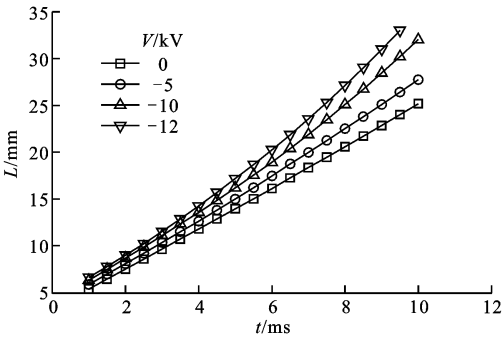


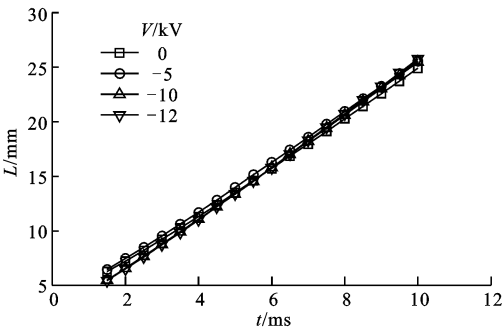
图 6 纹影照片

L 随时间的变化如图 7 所示. 从图 7 可以看出:对于尖-网电极,加载电压后相同时间内 L 增加, V 越大, L 增加得越多;对于尖-柱电极,加载电压后 L 增加很小. S_h 随 L 的变化如图 8 所示. 从图 8 可以看出,在非匀强电场下, S_h 随 L 的增加而增大, V 越大, S_h 越大. 对于尖-网电极, $V=0\text{ kV}$ 时, S_h 的最大

值为 2.38 m/s ;当 $V=-5\text{ kV}$ 时, S_h 增加,最大值达到 2.59 m/s ;当 $V=-10\text{ kV}$ 和 -12 kV 时, S_h 增加明显,最大值分别达到 3.26 m/s 和 3.52 m/s . 对于尖-柱电极,加载电压后 S_h 有所增大, V 越大, S_h 增加得越多,但与尖-网电极相比, S_h 增加得很少. 原因是,加载电压相同时,尖-网电极与尖-柱电

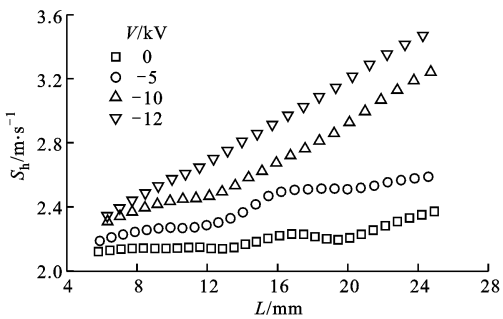


(a)尖-网电极

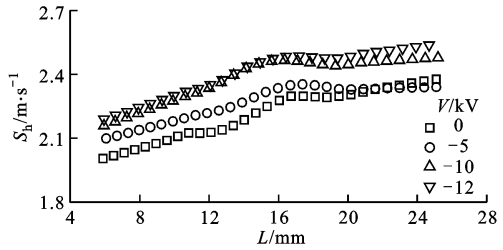


(b)尖-柱电极

图 7 L 随 t 的变化



(a)尖-网电极



(b)尖-柱电极

图 8 S_h 随 L 的变化

极形成的电场分布有所不同,尖电极与网电极之间的 E 在 $0.1 \sim 2.0$ MV/m 之间,尖电极与柱电极之间在水平方向的 E 沿尖电极至柱电极由 0.2 MV/m 迅速减小,所以尖-网电极对应电场对火焰发展的促进作用更大。

火焰水平方向平均传播速率定义为火焰前锋面从 $L=5$ mm 发展到 $L=25$ mm 时传播的距离与所用时间之比。图 9 为尖-网电极和尖-柱电极对应火焰水平方向平均传播速率随 V 的变化。从图 9 可以看出,在非匀强电场下,火焰平均传播速率增大, V 越大,平均速率增加得越多。对于尖-网电极, $V=0$ kV 时,平均传播速率为 2.21 m/s; V 分别为 -5 、 -10 和 -12 kV 时,平均传播速率分别增加到 2.44 、 2.73 和 2.96 m/s,平均传播速率分别增加了 10.4% 、 23.7% 和 34.1% 。对于尖-柱电极, $V=0$ kV 时,平均传播速率为 2.22 m/s; V 分别为 -5 、 -10 和 -12 kV 时,平均传播速率分别增加到 2.28 、 2.39 和 2.42 m/s,平均传播速率分别增加了 2.5% 、 7.5% 和 8.8% 。可以看出,当 V 相同时,尖-网电极对应电场对火焰水平方向平均传播速率的影响更大。

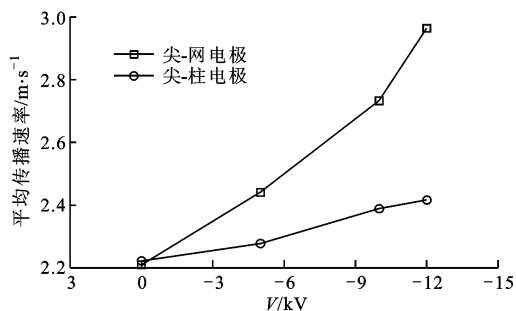


图9 火焰水平方向平均传播速率随 V 的变化

3 结 论

(1)在非匀强电场下,火焰的形状发生变化。对于尖-网电极,沿电场方向火焰被拉伸, V 越大,火焰形变越明显;对于尖-柱电极,火焰形变较小。

(2)在非匀强电场下,火焰水平方向传播速率增大, V 越大,横向传播速率增加得越多。当 V 分别为 -5 、 -10 和 -12 kV 时,尖-网电极对应的平均传播

速率分别增加了 10.4% 、 23.7% 和 34.1% ,尖-柱电极对应的平均传播速率分别增加了 2.5% 、 7.5% 和 8.8% 。

(3)当 V 相同时,较之尖-柱电极,尖-网电极对应的火焰水平方向传播速率增加得更多。

参考文献:

- [1] GAYDON G A, WOLFARD G H. 火焰学[M]. 王方,译. 北京:中国科学技术出版社,1994:210-211.
- [2] 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.
- [3] KATZER M, WEBER A P, KASPER G. The effect of electric field on growth of titania particles formed in a $\text{CH}_4\text{-O}_2$ diffusion flame [J]. Journal of Aerosol Science, 2001, 32(9):1045-1067.
- [4] 王宇,姚强. 电场对火焰形状及碳烟沉积特性的影响 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(8):237-239. WANG Yu, YAO Qiang. Variation of flame shape and soot deposits by applying electric fields [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(8):237-239.
- [5] MORIYA S, YOSHIDA K, SHOJI H, et al. The effect of uniform and non-uniform electric fields on flame propagation [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2008, 3(2):254-265.
- [6] KIM M K, CHUNG H S, KIM H H. Effect of AC electric fields on the stabilization of premixed bunsen flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1):1137-1144.
- [7] KIM M K, CHUNG H S, 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.
- [8] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2011:91.
- [9] 杨津基. 气体放电物理 [M]. 北京:科学出版社, 1983:75-84.
- [10] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001:166-137,186-187.

(编辑 苗凌)