

DOI: 10.7652/xjtuxb201503007

不同电极下电场对甲烷/空气稀 燃火焰影响的试验研究

孙天旗¹, 刘杰¹, 段浩¹, 刘兵¹, 高忠权¹, 吴筱敏^{1,2}

(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: 针对稀燃条件下燃烧存在燃烧速率慢、循环变动严重的问题,研究了定容燃烧弹内点、柱、网 3 种电极结构下的电场对火焰形状、火焰传播距离及速率、燃烧压力的影响。结果表明:3 种电极下加载电压,火焰形状均发生变形且在水平方向被拉伸;3 种电极中网电极下的电场对火焰的促进作用最大;混合气越稀,火焰在电场中停留的时间越长,电场对火焰的影响越大。过量空气系数为 1.2、1.4、1.6,网电极在加载-10 kV 电压时,平均火焰传播速率比未加载电压时分别提高了 66.82%、112.42%、126.16%,相对燃烧压力增大率的最大值分别为 71.60%、113.55%、114.97%。

关键词: 定容燃烧弹;稀燃火焰;电极结构

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)03-0038-06

Effects of Electric Fields with Different Electrodes on Methane /Air Lean Combustion Flame

SUN Tianqi¹, LIU Jie¹, DUAN Hao¹, LIU Bing¹, GAO Zhongquan¹, WU Xiaomin^{1,2}

(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: In view of lower combustion rate and severe cyclical variation under lean condition, an experiment was conducted to investigate different effects of electric fields with the point electrode, column electrode and mesh electrode on the flame shape, propagation distance, combustion rate and pressure in a constant volume combustion bomb. The results show that the flame deforms and is stretched in the horizontal direction as applying voltage to these electrodes; the electric field with the mesh electrode affects flame most obviously; the longer the period for flame in electric field, the rarer the mixture, the greater the effect of electric field on the flame. In the case of voltage of -10 kV and excess air ratio of 1.2, 1.4 and 1.6, flame propagating speed increases by 66.82%, 112.42% and 126.16%, respectively. Compared with the case without applied voltage, the maximum increasing rate of relative combustion pressure rises by 71.60%, 113.55% and 114.97%, respectively.

Keywords: constant volume combustion bomb; lean combustion; the electrode structure

电场对燃烧的作用已得到广泛研究^[1-5]。Vega 等通过实验和数值模拟对甲烷空气本生灯火焰及层流预混火焰研究时发现,电场作用下火焰传播的速率提高,火焰形状改变^[6-7]。van den Boom 等通过对甲烷空气平面火焰实验研究时发现,直流电场作用下化学计量比的混合气火焰燃烧速率可提高

收稿日期: 2014-07-18。 作者简介: 孙天旗(1989—),女,硕士生;吴筱敏(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176150,51306143);清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(KF14122)。 网络出版时间: 2014-01-05 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150105.1137.009.html>

7%, Volkov 等进一步研究发现,火焰燃烧速率提高的程度可达 8%^[8-9]。Won 等对丙烷空气三叉火焰的实验研究发现,交流电场作用下火焰传播速率明显提高^[10]。王宇等通过实验研究发现,针状电极、平板电极和环状电极下火焰形状的变化显著不同^[11]。上述研究表明,电场具有辅助燃烧的作用,不同电极下形成的电场对燃烧的影响有所不同。上述研究大多针对本生灯火焰、三叉火焰、平面火焰等开放空间的稳定火焰且在当量比附近进行,很少研究定容燃烧弹内的瞬态火焰。稀燃作为一种减少排放、提高燃油经济性的有效措施,燃烧时仍存在燃烧速率慢、循环变动严重等问题。本文在定容燃烧弹内对稀燃条件下点电极、柱电极和网电极形成的不同电场对甲烷/空气火焰的形状、传播特性及燃烧压力的影响进行了对比分析。

1 实验设计

1.1 实验装置

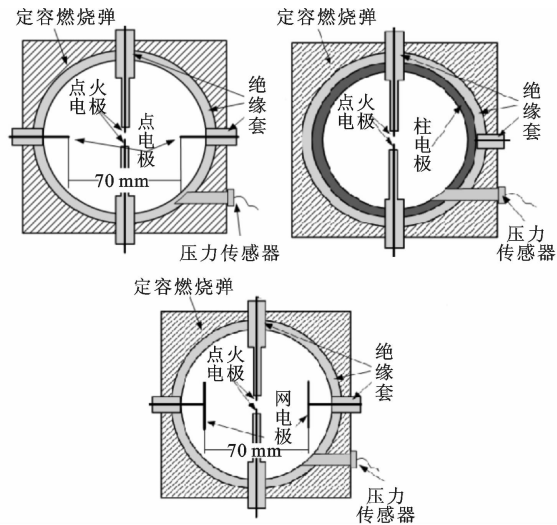
实验系统由定容燃烧弹、配气系统、点火控制系统、高速纹影摄像系统、燃烧压力采集系统、直流高压电源及电路系统组成,实验装置与文献[12]中的实验装置相同。

实验中采用压力传感器、电荷放大器和数据采集仪共同组成的燃烧压力数据采集系统。压力传感器为 Kistler 7061B 型压阻式绝对压力传感器,由 Kistler 4618A 型电荷放大器匹配校准。数据采集仪为日本 YOKOGAMA 公司研制的 DL750 型动态测试仪,采样频率最高可达 10 MHz。摄像机为美国 REDLAKE 公司生产的 HG-100K 型高速摄像机,拍摄速度在 $10^3 \sim 10^4$ 帧/s,用来记录火焰传播过程。电源为 Wisman DEL30N45 型负高压电源。

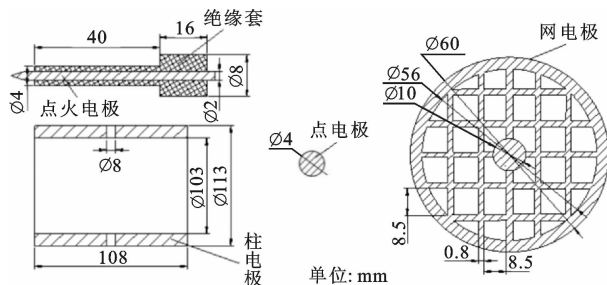
1.2 电极结构及实验方法

实验中用到两类电极:一类是点火电极,另一类是高压电极。点火电极用于火花点火形成火核,直径为 2 mm,材料为 45 号钢,尖端锥角为 30° ,外层包裹着聚四氟乙烯绝缘套。在形成电场时点火电极还充当地极的作用。实验中一对点火电极对称分布在容弹中心的竖直方向,二者间距为 2 mm。高压电极是一对点电极、一个柱电极和一对网电极,由 45 号钢加工而成,作用是加载高压并与充当地极的点电极形成电场。点电极直径为 4 mm,柱电极内径为 103 mm、外径为 113 mm 且与容弹内腔的聚四氟乙烯绝缘套匹配,网电极为外径 60 mm 的圆盘。2 个点电极和 2 个网电极均对称地分布在容弹

中心的水平位置,间距为 70 mm。各电极在容弹内的布置方式及电极结构如图 1 所示。



(a) 容弹布置



(b) 电极结构

图 1 电极在容弹内的布置方式及电极结构

实验在常温、常压下进行,根据计量比向容弹内配置过量空气系数 ϕ_a 分别为 1.2、1.4、1.6 的甲烷/空气混合气,静置 2 min 使其均匀混合,同时向高压电极加载负电压($V = -5$ kV, -10 kV),随后点火,与此同时触发高速摄像机和压力传感器,获得火焰纹影照片及燃烧压力曲线。燃烧结束后,关闭高压电源,用真空泵将容弹内的废气抽出,并用新鲜空气冲洗 3 次以上,以消除残余废气对下次实验的影响。每个工况点至少重复 3 次,以减小误差。实验中通过改变加载电压及电极结构来改变电场。

2 结果与分析

2.1 3 种电极下的电场模拟

利用 Ansoft Maxwell 12.0 软件对点、柱、网 3 种电极形成的空间电场进行了数值模拟。加载 -5 kV 电压时电场强度沿容弹中心线的变化如图 2 所示。从图中可以看出:3 种电极下电场强度沿水平方向对称分布;网、柱电极下形成的电场强度均在

容弹中心附近达到最大值后开始减小,前者变化是较为均匀地向两侧发展,后者变化是较快地向两侧发展;点电极下形成的电场强度一直较均匀地向两侧变化,在距容弹中心的距离 l 大约 ± 20 mm 处开始增大。在距容弹中心 $\pm 5 \sim \pm 25$ mm 范围,网电极下平均电场强度为 112.4 kV/m,柱电极下平均电场强度为 97.4 kV/m,点电极下平均电场强度为 42.2 kV/m。

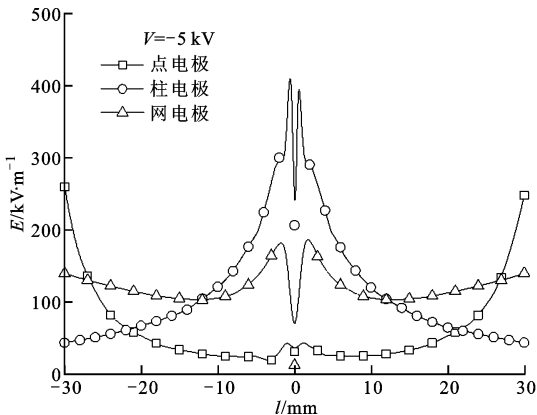


图 2 3 种电极下的电场强度沿容弹中心线向两侧的变化

2.2 火焰纹影照片

ϕ_a 分别为 1.2、1.4 和 1.6 时 3 种电极的火焰发展及变形较相似。 ϕ_a 为 1.6 加载不同电压时 3 种电极的火焰纹影照片如图 3 所示。从图中可以看出,3 种电极未加载电压时各过量空气系数混合气的火焰均呈近似球形向外传播。

加载电压后,火焰出现了变形,在水平方向被拉伸,且加载电压越大,拉伸越明显。由燃烧理论可知,甲烷燃烧时的火焰前锋面存在大量因化学电离产生的带电离子(CHO^+ 、 H_3O^+ 、 CH_5O^+ 、 OH^- 、 O^- 等)和电子^[13],其中正离子和电子的浓度较大,负离子在高温下易分解为中性粒子和电子且浓度较小^[14],由于电子质量很小而不考虑其影响。加载负电压后,点火电极与高压电极之间形成了方向大致由点火电极指向高压电极的电场,火焰前锋区的正离子在电场的作用下会向高压电极做定向运动,运动中与中性粒子发生碰撞而传递动量,从而产生近似电场方向的大规模的粒子定向运动,即离子风效应。离子风促进了火焰前锋面和已燃区与未燃区混合气之间的热量及质量的交换,促进了火焰前锋面向未燃区的发展。电场强度越大,离子风强度越大,加载电压越大,火焰在水平方向的拉伸就越明显。

2.3 火焰传播距离及火焰传播速率

由于加载电压与未加载电压时竖直方向的火焰

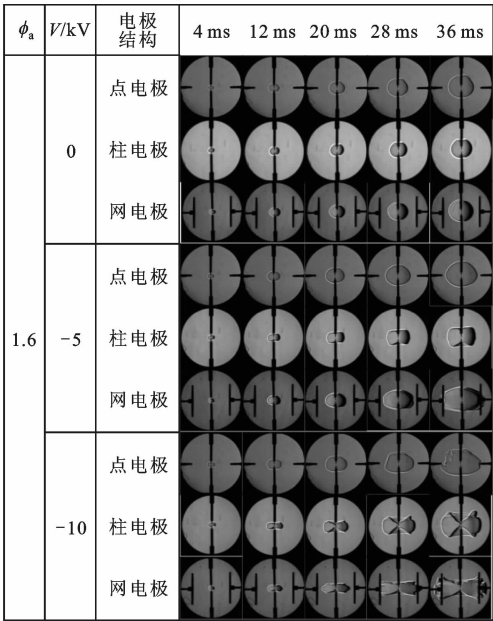


图 3 ϕ_a 为 1.6 时 3 种电极下的火焰纹影照片

变形不明显,所以在此仅考虑水平方向的火焰发展。定义水平方向火焰传播距离为 L , L 为给定极角 (0° 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 165^\circ$ 和 180°) 下的火焰传播半径的平均值,即

$$L = \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{n}, \quad n = 6$$

3 种电极下火焰传播半径的测取方式相同,以点电极为例给出了火焰传播半径的测取方式,如图 4 所示。

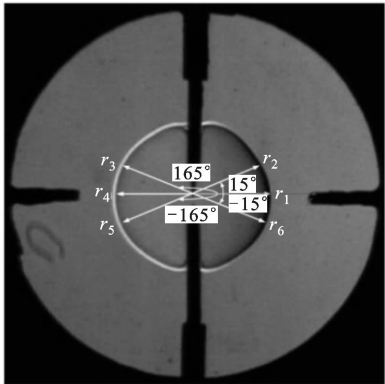


图 4 火焰传播半径的测取方式

火焰传播速率是指火焰前锋面相对于静止的燃烧室壁面的运动速率,即 $S = dL/dt$,其中 t 为时间。

$L > 5$ mm 时可以消除点火对火焰发展的影响, $L < 25$ mm 时容弹内的压力和温度变化不大,可以消除压力及温度变化对火焰发展的影响^[15],所以本文中 $L = 5 \sim 25$ mm。

ϕ_a 为 1.6 加载不同电压时 3 种电极下 L 随 t 的变化如图 5 所示。从图中可以看出,相同过量空气

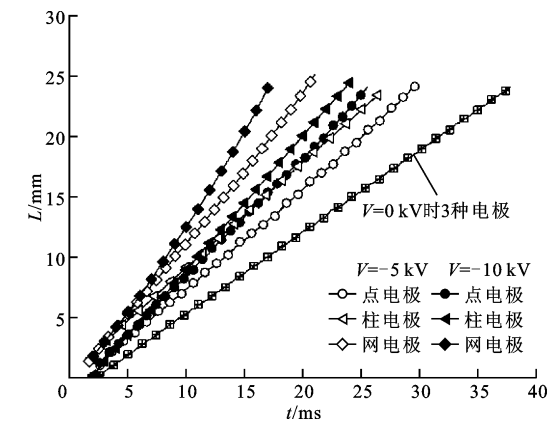


图5 ϕ_a 为 1.6 加载不同电压时 3 种电极下的火焰传播距离随时间的变化

表 1 ϕ_a 分别为 1.2、1.4、1.6 加载不同电压时 3 种电极的 t_{25} 及 Δt_{25}

参数	$V=0\text{ kV}$	$V=-5\text{ kV}$			$V=-10\text{ kV}$			ϕ_a
		点	柱	网	点	柱	网	
t_{25}/ms	16.67	15.42	14.25	12.86	13.62	12.47	10.70	1.2
$\Delta t_{25}/\%$	0	7.47	14.52	22.84	18.27	25.17	35.84	
t_{25}/ms	28.06	24.69	23.49	16.76	22.11	20.31	12.97	1.4
$\Delta t_{25}/\%$	0	12.00	17.36	40.24	21.20	27.62	53.79	
t_{25}/ms	37.51	29.30	27.01	20.18	25.40	23.50	16.95	1.6
$\Delta t_{25}/\%$	0	23.14	28.00	46.21	32.29	37.35	54.81	

相同电极加载相同电压时 t_{25} 和 Δt_{25} 均随着过量空气系数的增大而增大,即混合气越稀,火焰发展所用时间越长,电场对火焰发展的影响就越大。

ϕ_a 为 1.6 加载不同电压时 3 种电极下的火焰传播速率随火焰传播距离的变化如图 6 所示。从图中可以看出,相同过量空气系数下,3 种电极在加载电压后的火焰传播速率均比未加载电压时大,加载

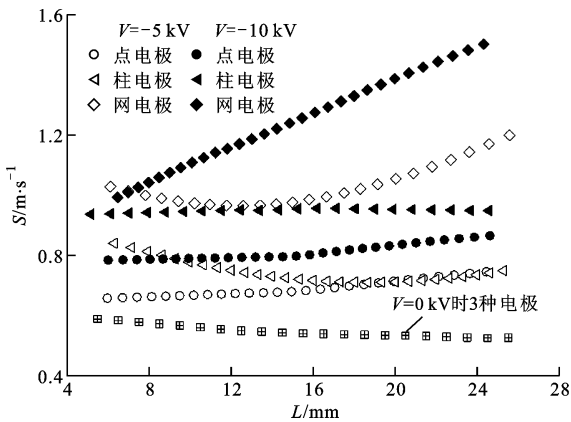


图 6 ϕ_a 为 1.6 加载不同电压时 3 种电极下的火焰传播速率随火焰传播距离的变化

系数 3 种电极下的火焰传播距离均随时间单调增加,加载电压后 L 均比未加载电压时大,且 L 随加载电压的增大而增大。网电极下火焰传播距离 L_m 、柱电极下火焰传播距离 L_c 、点电极下火焰传播距离 L_p 在相同加载电压时呈现出 $L_m > L_c > L_p$ 。

表 1 给出了不同过量空气系数加载不同电压时 3 种电极下火焰半径发展到 25 mm 所用的时间 t_{25} ,以及加载电压后的 t_{25} 比未加载电压时缩短的程度 Δt_{25} 。从表 1 可以看出,相同过量空气系数加载相同电压时,网电极所用的时间最短、缩短的程度最大,点电极所用的时间最长、缩短的程度最小。例如 ϕ_a 为 1.6、 V 为 -10 kV 时,点、柱、网电极下的 t_{25} 分别比未加载电压时缩短了 32.29%、37.35%、54.81%。

电压越大,火焰传播速率越高。相同加载电压时 3 种电极下的火焰传播速率呈现出 $S_m > S_c > S_p$ 。

不同过量空气系数 3 种电极下的火焰前锋面从 $L=5\text{ mm}$ 发展到 $L=25\text{ mm}$ 所传播的距离与所用时间之比(平均火焰传播速率 $\bar{S}$)随加载电压值 $|V|$ 的变化如图 7 所示。从图中可以看出,相同过量空气系数下,3 种电极下的平均火焰传播速率均随电

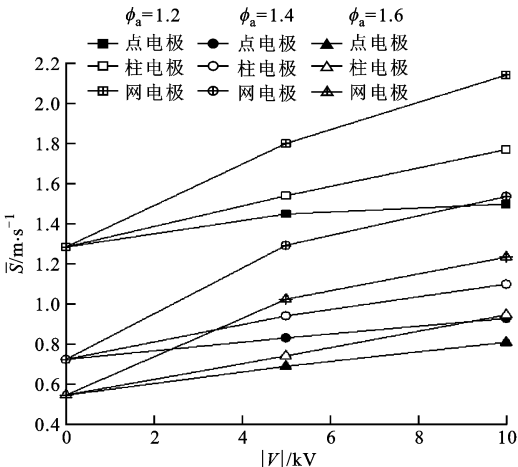


图 7 3 种电极下的平均火焰传播速率

压值的增加而增大,在相同电压值下平均火焰传播速率呈现出 $\bar{S}_m>\bar{S}_c>\bar{S}_p$ 。

表 2 给出了不同过量空气系数加载不同电压时 3 种电极下的平均火焰传播速率及其比未加载压力时增大的程度 $\Delta\bar{S}$ 。从表 2 可以看出,相同过量空气系数加载相同电压时 3 种电极下的 $\Delta\bar{S}$ 呈现出 $\Delta\bar{S}_m>\Delta\bar{S}_c>\Delta\bar{S}_p$ 。例如 ϕ_a 为 1.6、 V 为 -10 kV 时,点、柱、网电极下的 $\bar{S}$ 分别比未加载电压时增加了 48.42%、73.38%、126.16%。3 种电极下的电场对火焰传播速率影响的差异主要与电场强度的大小有关。如图 2 所示,加载电压为 -5 kV 时,在本文所考虑的 $L=5\sim 25\text{ mm}$ 的范围内,网电极下的平均电场强度最大,点电极最小,柱电极介于两者之间,可

见网电极下电场通过离子风效应对火焰传播速率的影响最大,柱电极次之,点电极最小。

从表 2 中还可以看出,相同电极加载相同电压时, $\Delta\bar{S}$ 均随过量空气系数的增加而增大,即混合气越稀,电场对火焰传播速率的促进作用越大。由表 1 可知,混合气越稀,火焰发展到相同半径所用时间越长,即火焰前锋面在电场中停留的时间越长。例如网电极在加载电压为 -10 kV , ϕ_a 分别为 1.2、1.4、1.6 时,火焰前锋面在电场中停留的时间分别为 10.7、12.97、16.95 ms,后两者的火焰前锋面在电场中停留的时间分别比前者增加了 21.21%、58.41%。由于离子风效应是正离子与中性粒子在电场作用下不断发生碰撞所产生的累积效应,火焰

表 2 ϕ_a 分别为 1.2、1.4、1.6 加载不同电压时 3 种电极的平均火焰传播速率及其增大率

参数	$V=0\text{ kV}$	$V=-5\text{ kV}$			$V=-10\text{ kV}$			ϕ_a
		点	柱	网	点	柱	网	
$\bar{S}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.29	1.45	1.54	1.81	1.50	1.78	2.15	1.2
$\Delta\bar{S}/\%$	0	12.82	19.87	40.23	16.68	37.91	66.82	
$\bar{S}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.73	0.83	0.94	1.30	0.93	1.10	1.54	1.4
$\Delta\bar{S}/\%$	0	14.90	29.98	78.67	28.29	51.92	112.42	
$\bar{S}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.55	0.69	0.74	1.03	0.81	0.95	1.24	1.6
$\Delta\bar{S}/\%$	0	26.40	35.92	87.61	48.42	73.38	126.16	

前锋面在电场中停留时间越长,离子风的累积效应越强,电场通过离子风效应对火焰产生的影响也就越强,所以混合气越稀,电场对火焰的影响越大。

2.4 燃烧压力

为了更好地比较 3 种电极下电场对火焰的促进作用,燃烧压力经归一化处理后获得了相对燃烧压力增大率 φ ,即

$$\varphi = \frac{P_v - P_0}{P_0}$$

式中: P_v 为加载电压时的燃烧压力; P_0 为未加载电压时的燃烧压力。

ϕ_a 为 1.6 加载不同电压时,3 种电极下的相对燃烧压力增大率随时间的变化如图 8 所示。从图中可以看出,相同过量空气系数下,3 种电极在加载电压后的燃烧压力比未加载电压时均有不同程度的增加,说明电场对燃烧有一定的促进作用。加载电压越大,燃烧压力增大率越大。

表 3 给出了不同过量空气系数加载不同压力时,3 种电极下的相对燃烧压力增大率的最大值 $\varphi_{\max}$ 变化。从表 3 可以看出,加载相同电压时,相对

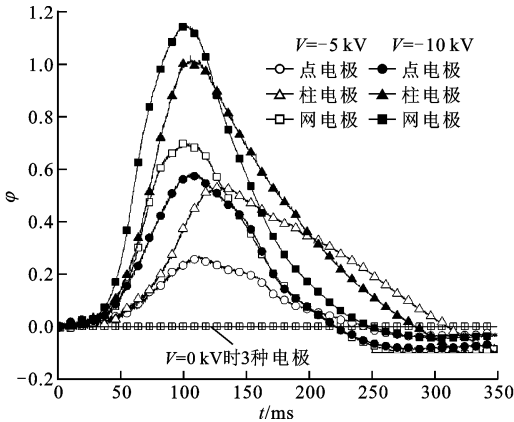


图 8 ϕ_a 为 1.6 加载不同电压时 3 种电极下的相对燃烧压力增大率

燃烧压力增大率的最大值呈现出 $\varphi_{\max,m}>\varphi_{\max,c}>\varphi_{\max,p}$,网电极下的电场对燃烧压力的促进作用最大,点电极最小,柱电极介于两者之间。例如 ϕ_a 为 1.6、 V 为 -10 kV 时,点、柱、网电极下的 $\varphi_{\max}$ 分别为 58.30%、103.68%、114.97%。相同电极加载相同电压时, $\varphi_{\max}$ 随过量空气系数的增加而增大,即混合气越稀,电场对燃烧的影响就越大。

表 3 ϕ_a 分别为 1.2、1.4、1.6 加载不同电压时 3 种电极的相对燃烧压力增大率的最大值变化

ϕ_a	$\varphi_{\max}/\%$						
	V=0 kV	V=-5 kV			V=-10 kV		
		点电极	柱电极	网电极	点电极	柱电极	网电极
1.2	0	11.90	17.44	50.35	29.10	39.06	71.60
1.4	0	16.45	33.02	68.60	34.60	84.94	113.55
1.6	0	27.29	53.85	70.10	58.30	103.68	114.97

3 结 论

(1)加载电压后,3 种电极下的火焰均在水平方向拉伸,加载电压越大,拉伸越明显。

(2)加载电压后,3 种电极下的火焰传播速率和燃烧压力均比未加载电压时大;网电极下的平均火焰传播速率增大率和相对燃烧压力增大率的最大值最大。相同过量空气系数加载相同电压时,网电极下的电场对火焰的促进作用最大。

(3)混合气越稀,电场对火焰的影响越大。 ϕ_a 分别为 1.2、1.4、1.6,加载电压为-10 kV 时,网电极下的平均火焰传播速率比未加载电压时分别增加了 66.82%、112.42%、126.16%,相对燃烧压力增大率的最大值分别为 71.60%、113.55%、114.97%。

参考文献:

[1] MARCUM S, GANGULY B. Electric-field-induced flame speed modification [J]. Combustion and Flame, 2005, 143(1/2): 27-36.

[2] WISMAN D, MARCUM S, GANGULY B. Electrical control of the thermodiffusive instability in premixed propane-air flames [J]. Combustion and Flame, 2007, 151(4): 639-648.

[3] 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.

[4] 夏云春, 吴静. 电场对旋转火焰温度的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(2): 126-130.

XIA Yunchun, WU Jing. Effect of an electrical field on temperature of a fire whirl [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(2): 126-130.

[5] 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.

[6] VEGA E V, LEE K Y. An experimental study on laminar CH₄/O₂/N₂ premixed flames under an electric field [J]. Journal of Mechanical Science and Technolo-

gy, 2008, 22(2): 312-319.

[7] STARIKOWSKII A, SKOBLIN M, HAMMER T. Influence of weak electric fields on the flame structure [C]//17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 629-632.

[8] VANDEN 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.

[9] VOLKOV E, SEPMAN A, KOMILOV V, et al. Towards the mechanism of DC electric field effect on flat premixed flames [C]// Proceedings of the European Combustion Meeting. Vienna, Austria: Combustion Institute Austria Section, 2009: 14-17.

[10] WON S H, RYU S K, KIM M K, et al. Effect of electric fields on the propagation speed of tribrachial flames in coflow jets [J]. Combustion and Flame, 2008, 152(4): 496-506.

[11] 王宇, 姚强. 电场对火焰形状及碳烟沉积特性的影响 [J]. 工程热物理论, 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.

[12] MENG Xiangwen, WU Xiaomin, KANG Chan, et al. Effects of direct-current (DC) electric fields on flame propagation and combustion characteristics of premixed CH₄/O₂/N₂ flames [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(11): 6612-6620.

[13] PRAGER J, RIEDEL U, WAMATZ J. Modeling ion chemistry and charged species diffusion in lean methane-oxygen flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 1129-1137.

[14] LAWTON J, WEINBERG F J. Electrical aspects of combustion [M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1969.

[15] 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.

(编辑 苗凌)