

DOI: 10.7652/xjtub201409011

不同电极结构下电场对甲烷/空气火焰的影响

段浩, 房建峰, 孙天旗, 刘兵, 刘杰, 高忠权, 吴筱敏

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 基于电场促进燃烧的理论, 为了进一步研究不同电极结构对燃烧的影响, 利用定容燃烧弹来模拟发动机气缸内的燃烧, 在常温常压不同当量比(0.8、1.0 和 1.2)下通过分别加载 3 种不同结构的电极对直流电场与甲烷/空气火焰的关系进行了研究。结果表明: 3 种电极结构下电场对火焰横向传播均有明显的促进作用, 且网状电极下火焰横向传播的促进效果最明显, 然后依次是柱状电极和点电极; 3 种电极结构下燃烧压力一开始均得到不同程度的提高, 而网状电极下电场对燃烧压力的影响最为明显。综上所述: 3 种电极结构中, 网状电极下电场对火焰的促进作用最大, 在今后的应用中较其他两种电极有更为明显的优势。

关键词: 定容燃烧弹; 甲烷/空气火焰; 电极结构; 火焰传播; 燃烧压力

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)09-0062-06

Effects of Electric Fields in Different Electrode Structures on Methane/Air Flames

DUAN Hao, FANG Jianfeng, SUN Tianqi, LIU Bing, LIU Jie, GAO Zhongquan, WU Xiaomin

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

Abstract: For the purpose of studying the effects of different DC electric fields on combustion, a constant volume combustion device was used to simulate the combustion process inside engine cylinder based on the theory of electric field assisted combustion. For the equivalent proportion of 0.8, 1.0 or 1.2, the relationship between DC electric field and methane/air flames was studied by applying three different electrode structures at normal temperature and pressure. The results show that the electric fields produced by the electrodes in three different structures have significant effects on promoting flame propagation in the horizontal direction, and the electric field produced by mesh electrodes promotes the flame propagation most, followed by columnar electrodes and needle electrodes. The combustion pressures under three electrode structures were enhanced differently at the beginning, and the electric field produced by the mesh electrodes raised the combustion pressure the most. To sum up: among the three electrodes, the mesh electrode has the most promotive influence on the flame, showing a greater advantage over the other two in future applications.

Keywords: constant volume combustion device; methane/air flames; electrodes structure; flame propagation; combustion pressure

工业革命以来, 能源的消耗呈现出井喷式的增长, 而化石能源储量的有限使得人们越来越多地意识到提高能源利用率的重要性。电场辅助燃烧已被

研究多年, 是提高能源利用率的有效思路。100 多年来, 国内外研究者分别针对交流或直流电场影响下的本生灯火焰等多种火焰行为和燃烧特性进行了

收稿日期: 2014-01-22。 作者简介: 段浩(1991—), 男, 博士生; 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: 2014-06-13 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140613.1457.004.html>

探索和研究,结果表明电场对火焰的稳定性^[1-3]、燃烧速率^[4-7]及燃烧产物^[8-9]均有显著影响。

然而,国内外研究者在研究电场对燃烧的影响时,绝大多数针对本生灯火焰等驻定火焰,对于非驻定火焰如预混层流火焰的研究则少之又少。近年来,西安交通大学的吴筱敏教授及其团队利用定容燃烧弹对发动机缸内燃烧进行了模拟,并开展了针对球形膨胀火焰的研究。孟祥文探究了电场作用下预混甲烷/空气火焰的传播规律,发现电场能够有效促进火焰传播、改善燃烧和提高燃烧稳定性^[10]。为了更进一步探讨不同电场对燃烧的影响机理,本文综合研究了网状电极、柱状电极和点电极(简称网、柱和点)这3种不同电极结构产生的非均匀电场对预混球形火焰燃烧特性的影响,具体从火焰形状、传播距离、传播速率及燃烧压力等方面进行了分析和比较。

1 实验装置和方法

实验装置由定容燃烧弹系统、进排气系统、点火系统、纹影系统、高速摄像系统、压力采集系统和高压电供给系统7部分组成,如图1所示。

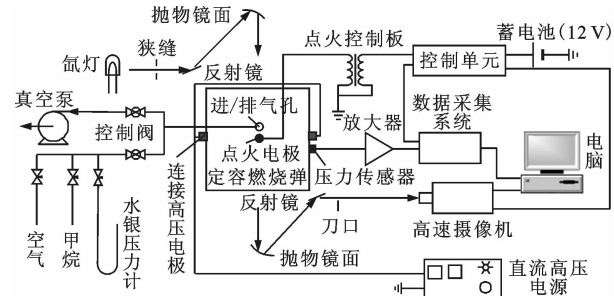


图1 实验装置图

定容燃烧弹是内腔为 $\Phi 113\text{ mm} \times 130\text{ mm}$ 的圆柱体,由碳钢整体浇铸而成,其内衬为聚四氟乙烯加工而成的绝缘套,两侧为厚30 mm的石英玻璃,给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HG-100K,用于记录火焰传播过程,拍摄速度为5 000 帧/s。压力传感器是型号为Kistler 4075A10的压电式低压绝对压力传感器,用于采集容弹内的燃烧压力,误差小于 $\pm 0.3\%$,采集频率为20 kHz。高压直流电源型号为Wisman DEL30N45,用于提供负高压产生负电场,电源输出电压范围为 $0 \sim -30\text{ kV}$ 连续可调,功率范围为1.5~45 W,输入电压变化为 $\pm 10\%$ 。

容弹中心竖直方向对称地分布着一对外裹聚四氟乙烯的针状点火电极,在火花点火后充当地电极。该点火电极直径2 mm,材料为碳钢,两电极尖端的

间距为2 mm。网状电极为 $\Phi 60\text{ mm}$ 的网状圆盘,点电极直径4 mm的实心钢棒,柱状电极为内径103 mm、外径113 mm的空心圆柱体,3种电极材料均为45号钢,结构及尺寸如图2所示。分别将高压通过高压电源加载到3种电极上形成高电势,并与地电极产生不同结构的电场,高压电极在容弹内的安装位置如图3所示。

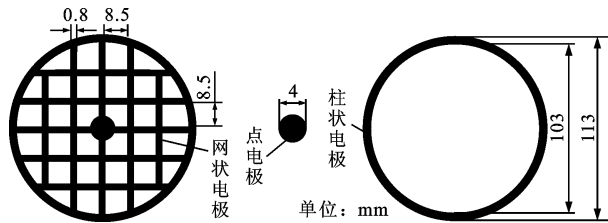


图2 不同电极结构

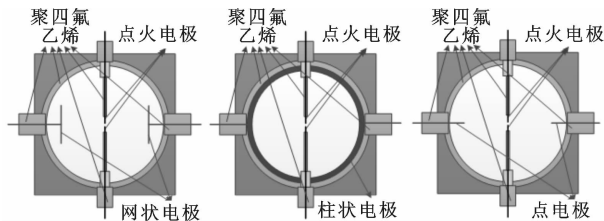


图3 容弹和3种电极结构简图

实验在常温常压下进行,实验前向容弹里配置当量比 λ 分别为0.8、1.0和1.2的甲烷/空气混合气,静置2 min使其混合均匀,与此同时对各电极加载负高压。点火同时触发高速摄像机和压力传感器,从而得到火焰图像和燃烧压力。燃烧后废气由真空泵抽出,并用空气冲洗燃烧弹至少2次以消除残留废气对下次燃烧的影响。每个实验工况至少重复3次,并取平均值以降低实验误差。对于火焰传播距离的测量,相对误差为 $\pm 3\%$ 。

2 结果及分析

2.1 电场数值模拟结果

利用Maxwell 14.0软件对3种电极在加载电压后形成的空间电场分布进行了数值模拟。由于本实验火焰燃烧持续期不超过60 ms,短时间内空间电荷难以形成有效积累,因此本实验在模拟静电场时忽略了空间电荷的影响。模拟时,点火电极接地,在3种电极上分别加载 -10 kV 直流电压,容弹中心截面的模拟结果如图4所示。

由图4可发现,3种电极下容弹内电场强度大小有明显的区别。图5列出了容弹中心水平方向的电场强度 E 的值,可以发现:距容弹中心较近时网状电极下电场强度最大,柱状电极其次,点电极最

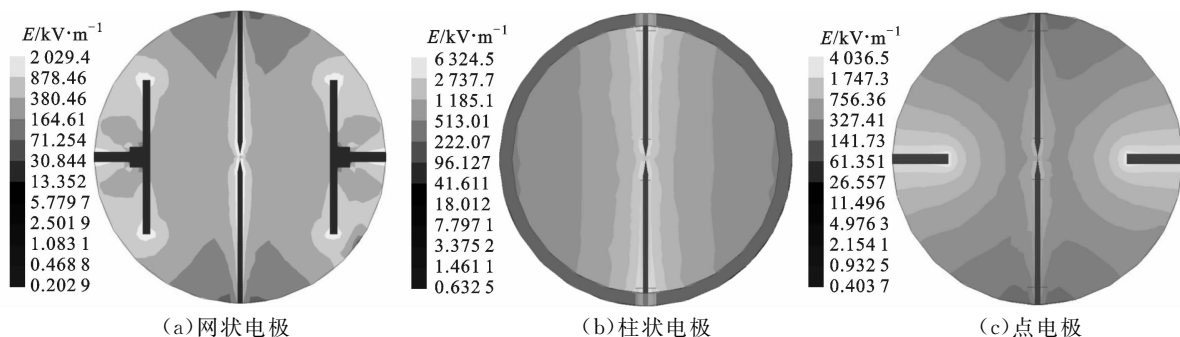


图4 -10 kV时容弹内电场分布数值模拟结果

小;随着离容弹距离的增加,点电极下的电场强度迅速增加,在 $L=20$ mm左右时超过了柱状电极,甚至在 $L=25$ mm时几乎与网状电极相等。

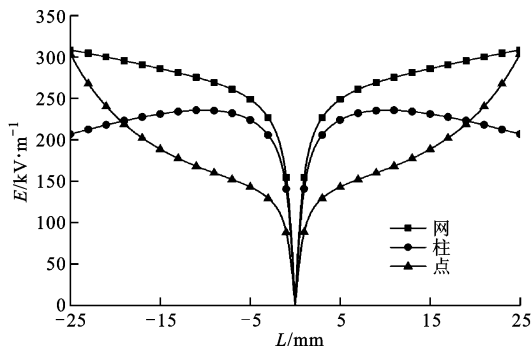
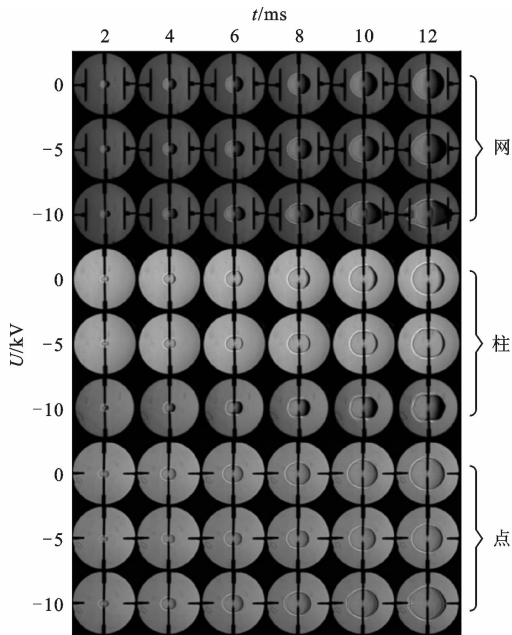


图5 容弹中心水平方向电场分布图

2.2 火焰传播图像

图6为当量比为1.0时的火焰传播图像,可以看出:当加载电压 U 为0 kV时,火焰均呈球形由已燃区向未燃区传播;当加载电压为-5 kV时,柱状电极和点电极下的火焰在水平方向得到了轻微拉伸,而网状电极下火焰横向拉伸幅度较大;当加载电压为-10 kV时,3种电极下的火焰形状均发生明显改变,网状电极下火焰横向拉伸最为明显,柱状电极次之,点电极拉伸程度最小。

加载电压后火焰形状的改变主要是离子风效应造成的^[10],正离子在电场作用下向网状电极迁移,迁移过程中与其他粒子碰撞从而形成大量粒子沿电场方向大规模定向运动,即离子风效应,这使得沿电场方向的已燃区、火焰前锋面及未燃混合气之间的传质和传热加强,最终促进了火焰前锋区向未燃混合气发展。离子风效应的影响因素包括电场强度、带电粒子密度,以及带电粒子随火焰前锋面在电场内迁移的时间。离子风效应随着以上3个因素的增强而增强,这是因为它们均能提高电场作用下离子与中性粒子之间发生碰撞的频率,从而促进离子风效应的发展。

图6 $\lambda=1.0$ 时3种电极对应的火焰传播图像

3种电极下火焰横向拉伸程度的不同是因为其电场强度不同造成的。随着加载电压绝对值增大,离子风效应增强,因而火焰横向拉伸的幅度也随之增大。对于不同电极结构诱导的电场,电场强度不同,因此离子风效应的发展程度也不同,对火焰的促进效果也有差异。在图5中,取容弹中心两侧25 mm范围内的电场强度平均值 E_A 进行比较可以发现,网状电极下 E_A 最大,为266.16 kV/m,而柱状电极和点电极下 E_A 分别为216.30 kV/m和182.08 kV/m。因此,网状电极下火焰横向拉伸最明显,其次为柱状电极和点电极。

2.3 火焰传播距离

本文定义的火焰传播距离 L 指火焰在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 $L=(L_1+L_2)/2$, L 的值由纹影照片直接确定,如图7所示。当 $L<6$ mm时,点火能量对火焰发展的波动影响比较大;当 $L>25$ mm时,火焰发展又会受到来自容弹结构方面的显著影响^[11]。因此,

在分析电场对火焰水平方向传播速率的影响时, L 的计算范围选定为 6~25 mm。此外,该计算范围下定容燃烧弹内压力和温度变化甚小,可以排除或忽略其对火焰发展的影响。由于竖直方向上火焰发展受电场影响较小,其纵向发展变化也不大,故本文仅讨论水平方向上的火焰发展变化情况。

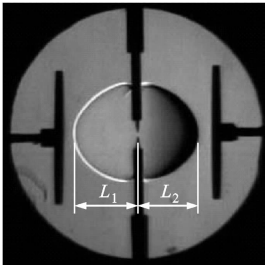


图 7 数据获取示意图

图 8 示出了当量比为 1.2 时 3 种电极下火焰传播距离随时间的变化关系。由图可知,加载电压相同时,网状电极下 $L-t$ 曲线斜率最大,然后依次是柱状电极和点电极,但均大于加载电压为 0 kV 时的曲线斜率。

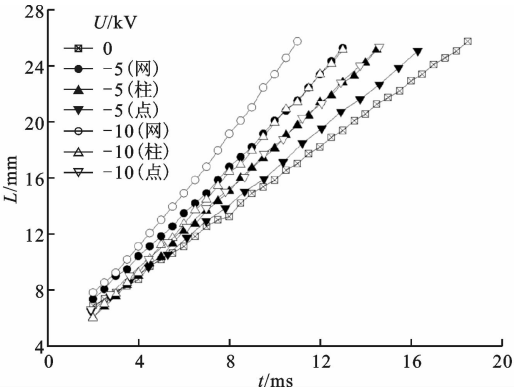


图 8 $\lambda=1.2$ 时 L 随 t 的变化

考察火焰传播距离发展到 25 mm 所需的时间 t_{25} 来分析 3 种电极结构对火焰传播距离的影响。表 1 给出了当量比为 0.8、1.0 和 1.2 时 t_{25} 的值,其中 Δt_{25} 为相比加载电压为 0 kV 时 t_{25} 的相对变化量。

表 1 3 种电极结构对应 t_{25} 和 Δt_{25} 的值

λ	U/kV	t_{25}/ms			$\Delta t_{25}/\%$		
		网	柱	点	网	柱	点
0.8	0	21.72	21.72	21.72	0	0	0
	-5	17.06	17.99	19.21	-21.45	-17.17	-11.56
	-10	14.88	16.05	17.76	-31.49	-26.10	-18.23
1.0	0	10.49	10.49	10.49	0	0	0
	-5	9.57	9.98	10.43	-8.77	-4.86	-0.57
	-10	8.31	9.50	9.59	-20.78	-9.44	-8.58
1.2	0	17.91	17.91	17.91	0	0	0
	-5	12.86	14.43	16.27	-28.20	-19.43	-9.16
	-10	10.69	12.94	14.39	-40.31	-27.75	-19.65

根据表中的数据可以发现,网状电极下 t_{25} 最小,柱状电极次之,点电极最大。例如当量比为 1.2、加载电压为 -10 kV 时网状电极对应的 t_{25} 为 10.69 ms,比加载电压为 0 kV 时提前了 40.31%,而柱状电极和点电极对应的 t_{25} 分别为 12.94 ms 和 14.39 ms,分别仅提前了 27.75%和 19.65%。

2.4 火焰传播速率

火焰传播速率指火焰相对于静止燃烧壁面的运动速度,可从高速摄影仪拍到的火焰传播图像中测出。本文主要研究水平方向上的火焰传播,记水平方向火焰传播速率为

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

图 9 所示为当量比为 1.2 时 3 种电极的 S_L 随 L 的变化关系。由图可知,加载电压相同时,网状电极下 S_L 最大,然后依次是柱状电极和点电极,但均大于加载电压为 0 kV 时的 S_L 。

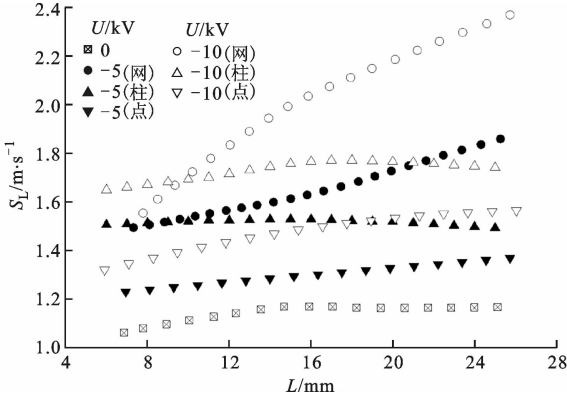


图 9 $\lambda=1.2$ 时 S_L 随 L 的变化

考察 $L=20$ mm 时的火焰传播速率 S_{20} 来分析不同电场结构对火焰传播速率的影响。表 2 给出了当量比为 0.8、1.0 和 1.2 时 S_{20} 的值,表中 ΔS_{20} 为相比加载电压为 0 kV 时 S_{20} 的相对变化量。根据表中的数据可以发现,网状电极下 S_{20} 最大,柱状电极次之,点电极最小。例如当量比为 1.2、加载电压为 -10 kV 时网状电极对应的 S_{20} 为 2.18 m/s,比加载电压为 0 kV 时增大了 87.93%,而柱状电极和点电极对应的 S_{20} 分别为 1.76 m/s 和 1.53 m/s,分别增大了 51.72%和 31.90%。

为了直观地表示出电场强度对燃烧速率的影响,建立了不同当量比下对 3 种电极分别加载 -10 kV 电压时, S_{20} 与 E_A 之间的关联曲线,如图 10 所示。由图可见,当量比一定时,随着 E_A 的增大, S_{20} 呈现出单调上升的趋势。这进一步证明了随着电场强度的增大,离子风效应变得显著,火焰传播速率加快,

电场对火焰拉伸的促进效果也越大。

表 2 3 种电极结构对应 S_{20} 和 ΔS_{20} 的值

λ	U/kV	$S_{20}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$			$\Delta S_{20}/\%$		
		网	柱	点	网	柱	点
0.8	0	1.14	1.14	1.14	0	0	0
	-5	1.42	1.33	1.42	1.33	1.42	1.33
	-10	1.71	1.45	1.71	1.45	1.71	1.45
1.0	0	2.08	2.08	2.08	0	0	0
	-5	2.45	2.32	2.45	2.32	2.45	2.32
	-10	2.95	2.50	2.95	2.50	2.95	2.50
1.2	0	1.16	1.16	1.16	0	0	0
	-5	1.73	1.52	1.73	1.52	1.73	1.52
	-10	2.18	1.76	2.18	1.76	2.18	1.76

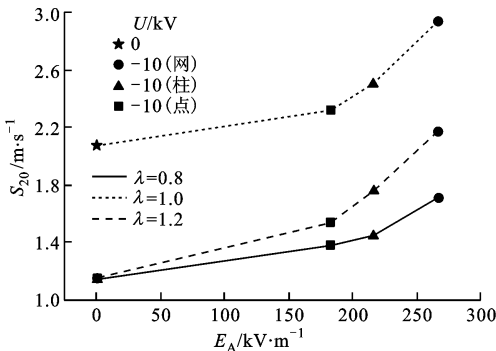


图 10 S_{20} 随 E_A 的变化

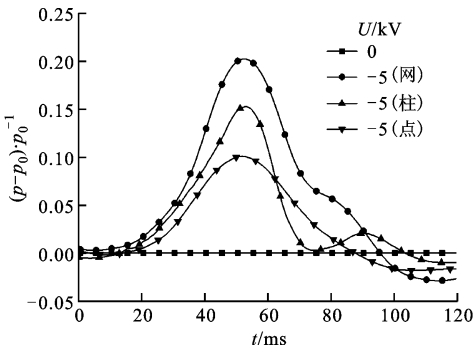
由图 6 和表 1、表 2 可知,当量比为 0.8 或 1.2 时,火焰形状、传播距离以及传播速率的变化规律均与当量比为 1.0 时相同,但从 3 种电场对其影响幅度的差异上看,均较当量比为 1.0 时更加显著。这是由于当量比为 0.8 或 1.2 时,火焰传播相对较慢,火焰前锋面中的带电粒子在电场内迁移的时间增加,3 种电极下电场作用于火焰所产生的离子风效应的累积差别也比较大造成的。

2.5 燃烧压力

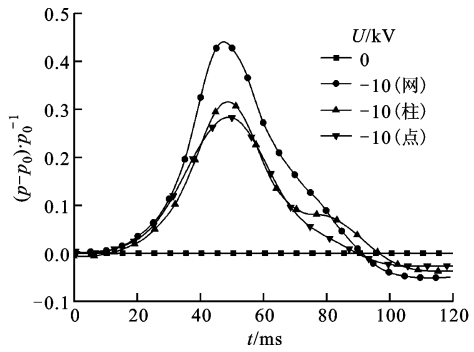
为了突出显示 3 种电极下燃烧压力相对未加电场时燃烧压力的变化情况,本文考察了 $(p-p_0)/p_0$ 随时间 t 的变化规律,其中 p_0 为未加电场时的瞬时压力值, p 为加载电场时的瞬时压力值。峰值 $((p-p_0)/p_0)_{\max}$ 体现了加载电压时燃烧压力相对未加载电压时燃烧压力的最大增加幅度,该值越大,有无电场时燃烧压力的差别越大,电场对燃烧压力的提高效果也越明显。

图 11~13 分别为当量比为 0.8、1.0 和 1.2 时 $(p-p_0)/p_0$ 随 t 的变化曲线。表 3 定量地给出了当量比为 0.8、1.0 和 1.2 时 $((p-p_0)/p_0)_{\max}$ 的值,可以发现,对于不同的当量比,网状电极下峰值总是最大的,其次为柱状电极,点电极下峰值最小。这是

由于网状电极产生的电场强度最大,而柱状电极和点电极产生的电场强度较小造成的。

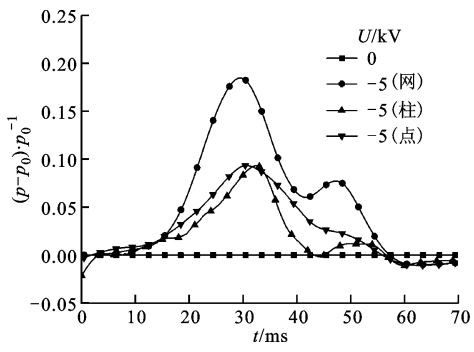


(a) $\lambda=0.8, U=-5 \text{ kV}$

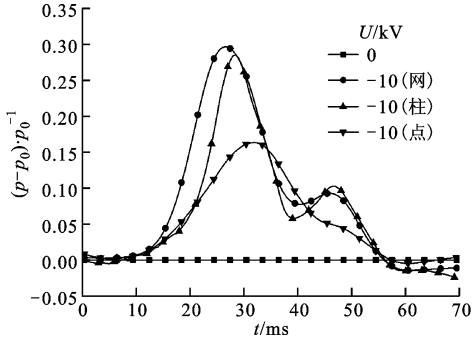


(b) $\lambda=0.8, U=-10 \text{ kV}$

图 11 $\lambda=0.8$ 时 $(p-p_0)/p_0$ 随 t 的变化

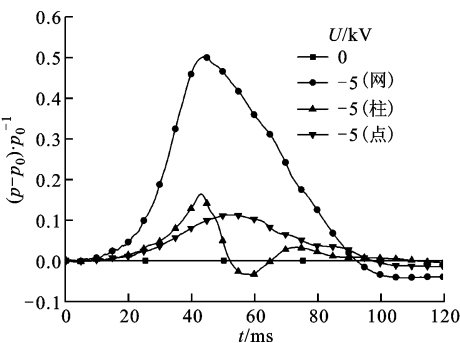


(a) $\lambda=1.0, U=-5 \text{ kV}$

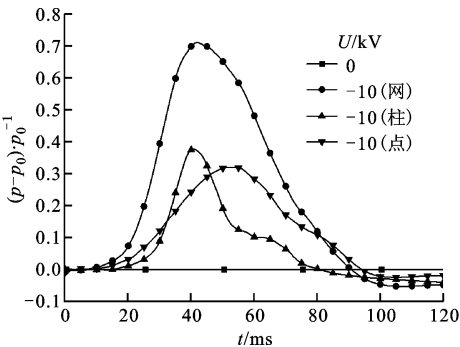


(b) $\lambda=1.0, U=-10 \text{ kV}$

图 12 $\lambda=1.0$ 时 $(p-p_0)/p_0$ 随 t 的变化



(a) $\lambda=1.2, U=-5\text{ kV}$



(b) $\lambda=1.2, U=-10\text{ kV}$

图 13 $\lambda=1.2$ 时 $(p-p_0)/p_0$ 随 t 的变化

表 3 3 种电极结构对应 $((p-p_0)/p_0)_{\max}$ 的值

λ	U/kV	$((p-p_0)/p_0)_{\max}$		
		网	柱	点
0.8	-5	0.20	0.15	0.10
	-10	0.44	0.32	0.28
1.0	-5	0.18	0.09	0.09
	-10	0.30	0.29	0.16
1.2	-5	0.50	0.16	0.11
	-10	0.71	0.38	0.32

3 结 论

(1)利用 Maxwell 14.0 软件对 3 种电极所产生的电场进行了模拟,结果发现网状电极产生的电场强度最大,柱状电极次之,点电极最小。

(2)3 种电极作用下火焰形状均发生改变,电场方向上火焰传播得到了促进,火焰横向传播速率增大。当加载电压相同时,网状电极对火焰横向传播的促进作用最明显,柱状电极次之,点电极最弱。

(3)3 种电极作用下相同时刻容弹内压力均有所增大,网状电极结构下的电场对燃烧压力的影响效果最明显,然后依次为柱状电极和点电极。

(4)综合来看,3 种电极中网状电极形成的电场

对甲烷燃烧的促进效果是最好的,在今后的应用中较其他两种电极有更大的优势。

参考文献:

[1] CALCOTE H F, PEASE R N. Electrical properties of flames-burner flames in longitudinal electric fields [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1951, 43(12): 2726-2731.

[2] GAYDON G A, WOLFFHARD G H. 火焰学 [M]. 王方,译. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 210-211.

[3] BELHI M, DOMINGO P, VERVISCH P. Direct numerical simulation of the effect of an electric field on flame stability [J]. Combustion and Flame, 2010, 157 (12): 2286-2297.

[4] 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.

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

[6] 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.

[7] 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.

[8] FOWLER R G, COORIGAN S J B. Burning wave speed enhancement by electric fields [J]. The Physics of Fluids, 1966(9): 156-159.

[9] 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. Effect of electric fields on flames shape and smoke sedimentary features [J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 2007, 28 (8): 237-239.

[10] 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.

[11] 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 荆树蓉)