

DOI: 10.7652/xjtuxb201401006

负电场下点电极和网状电极 对预混稀燃火焰的影响

康婵, 杨星, 刘杰, 孟祥文, 房建峰, 吴筱敏
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对相同能耗下电极形状对火焰的影响,研究了常温、常压下定容燃烧弹中过量空气系数为1.6时甲烷空气预混稀燃火焰的传播和燃烧特性与加载电压的关系,对比了点电极和网状电极对火焰的影响。结果表明:2种电极下加载电压都使得火焰发生了形变,对火焰横向传播均有明显的促进作用;与未加载电压相比,当加载电压为-5、-10、-12 kV时,点电极下火焰纵向传播速度分别提高9.32%、17.20%、4.67%,网状电极下分别提高0.62%、-20.90%、-22.80%,点电极下压力峰值增幅分别为6.4%、9.8%、11.2%,网状电极下增幅分别为5.6%、2.4%、1.3%;加载-5 kV电压时2种电极对火焰的影响相差不大,加载-10、-12 kV电压时点电极对火焰的促进作用明显优于网状电极。综合考虑可以得出,点电极的性能更加优越。

关键词: 预混稀燃火焰;点电极;网状电极;火焰传播特性;燃烧压力

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0031-06

Effect of Point and Mesh Electrodes with Applied Negative Voltage on Premixed Lean Combustion

KANG Chan, YANG Xing, LIU Jie, MENG Xiangwen, FANG Jianfeng, WU Xiaomin
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experiment was conducted to investigate the different influences of the point electrode and the mesh electrode with applied voltages on the flame propagation and combustion characteristics of premixed CH_4/air mixtures at the excess air ratio of 1.6, room temperature, and atmospheric pressure. The results show that the flame shape deformed and the horizontal flame speed significantly increased when the voltage was applied to the two kinds of electrodes. Compared with those without the applied voltage, when the applied voltage was -5 kV, -10 kV and -12 kV, the vertical flame speed of the point electrode increased by 9.32%, 17.20% and 4.67% while that of the mesh electrode increased by 0.62%, -20.9% and -22.8%, respectively; the peak pressure of the point electrode rose by 6.4%, 9.8%, 11.2% while that of the mesh electrode rose by 5.6%, 2.4% and 1.3%, respectively. The two electrodes had slightly different effect on the flame at the input voltage of -5 kV while the point electrode was more beneficial to the flame propagation and combustion at the input voltages of -10 kV and -12 kV. It is likely that the point electrode performed better.

Keywords: premixed lean combustion; point electrode; mesh electrode; flame propagation characteristics; combustion pressure

20 世纪 90 年代初,国内外的学者开始对电场与火焰的关系进行广泛的研究,通过对本生灯、平板火焰、烛形火焰等在稳定工况下的火焰分析,发现电场在提高火焰速度^[1-3]、增加火焰稳定性^[4-6]、减少碳排放^[7-8]等方面具有显著的效果。定容装置中的火焰作为一种基本的火焰类型,是一种燃烧机理较为复杂的瞬态火焰,因而在近年来才受到关注。Min 等研究了定容燃烧弹中利用电场使得球形外扩火焰表面破裂,来缩短火焰初始时间,但对燃烧持续时间影响不大^[9];Shinichi 等研究发现,在平板电极的非均匀电场下,当输入电压达到一定值时,定容装置中火焰前锋面出现了湍流,火焰底部的燃烧明显增强^[10];Meng 等通过实验和数值模拟得出,平板网状电极下直流电场对甲烷-空气预混层流火焰的燃烧特性提升具有显著的作用^[11]。上述研究仅针对平板电极电场对当量比附近的混合气火焰的影响,未涉及极限稀燃条件下不同电极的电场对火焰的影响。

本文在定容燃烧弹内,以点电极和网状电极加载直流负电压的方式,对过量空气系数 $\phi_a = 1.6$ 的甲烷-空气稀燃火焰传播和燃烧特性进行了定量分析,对比了在相同能耗下 2 种电极对火焰的作用,为电场对扩散的非稳定火焰的作用研究提供了数据,也为稀燃的性能指标研究提供了新的思路和方法。

1 实验装置和方法

图 1 为实验装置,由定容燃烧弹系统、进排气系统、点火系统、测量系统和高压电供给系统组成。定容燃烧弹整体由碳钢浇铸而成,其内腔为 $\Phi 130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 的圆柱体,容弹内有聚四氟乙烯加工而成的厚度为 8.5 mm 的绝缘套,容弹两侧装有厚度为 30 mm 的石英玻璃。

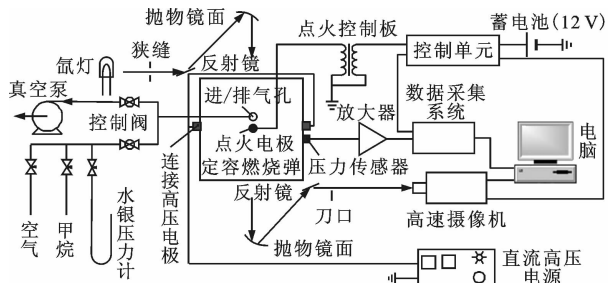


图 1 实验装置图

容弹中心上下端对称地分布着一对外裹聚四氟乙烯的针状电极,在火花点火后充当地电极。图 2 为容弹和电极结构。针状电极直径为 2 mm,两电

极的间距为 2 mm。测量系统由压力采集系统、图像采集系统组成。压力传感器为 Kistler 4075A10 压电式低压绝对压力传感器,采集频率为 20 kHz,误差小于 $\pm 0.3\%$ 。数据采集仪为日本 Yokogama 公司的 DL750 型动态测试仪,采样频率为 10 kHz。摄像机为美国 Redlake 公司的 HG-100K 型高速摄像机,拍摄速度为 5 000 帧/s。

实验中负电场采用 Wisman DEL30N45 负高压电源(输出电压范围为 $0 \sim -30 \text{ kV}$,最大输出功率 45 W)提供,高压电极是一对网状电极和一对点电极。两高压电极对称地布置在容弹中心的水平位置,间距为 70 mm。网状电极为 $\Phi 20 \text{ mm}$ 的 45 号钢圆盘,点电极为 $\Phi 4 \text{ mm}$ 的 45 号钢实心柱体。

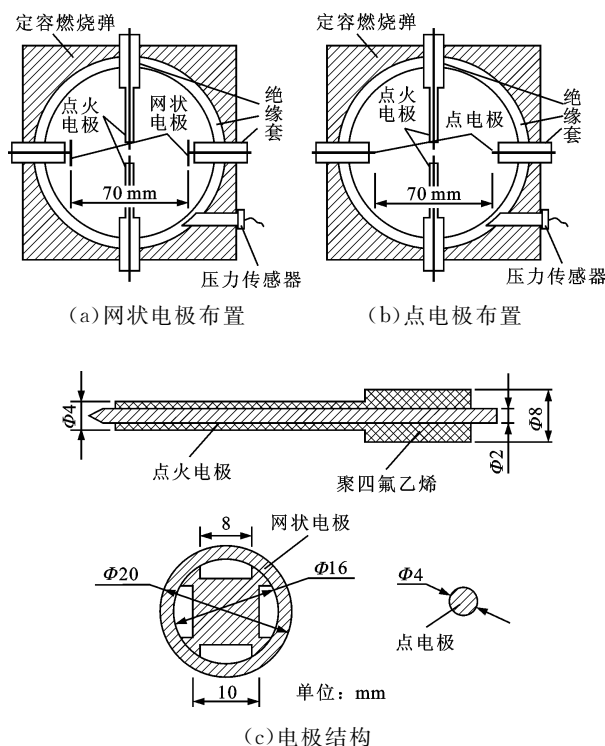


图 2 容弹和电极结构

实验在常温、常压下进行,依次向燃烧弹中充入 $\phi_a = 1.6$ 的甲烷和空气,静置 90 s 以消除扰动,与此同时加载电压。点火的同时触发测量系统,得到压力、火焰燃烧距离与时间的关系。每次实验结束后的废气由真空泵抽出,并用空气多次冲洗燃烧弹,以消除残留废气对下次燃烧的影响。每个工况点至少重复 3 次,从而减小实验误差。

2 结果及分析

2.1 火焰传播图像分析

图 3 为 $\phi_a = 1.6$ 时点电极和网状电极下加载不

同电压所对应的火焰传播图像。从图中看出,2 种电极下加载电压后的火焰均出现了形变,变形的程度与加载电压正相关。网状电极时,火焰在横向拉伸的同时纵向稍有压缩;点电极时,火焰横向、纵向均明显拉伸。

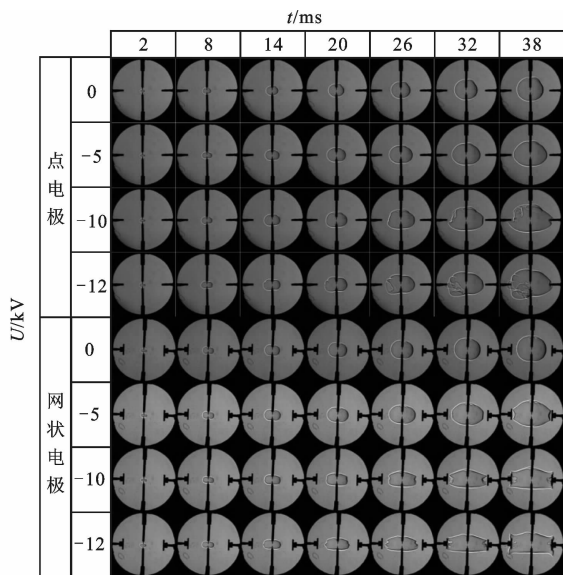


图 3 $\phi_a = 1.6$ 时点电极和网状电极下加载不同电压所对应的火焰传播图像

加载电压使得火焰变形的原因是,加载电压后电极(高压电极)与针状尖电极(地电极)形成了方向为由地电极指向高压电极的电场,在此电场的作用下,大量粒子沿电场方向定向迁移,该现象称为离子风效应^[11]。离子风会使得火焰前锋面在横向与未燃区的传质和传热增强,从而促进了火焰的横向发展。离子风效应与高压电极加载的电压幅值正相关,因此火焰横向拉伸的程度随着加载电压幅值的增加而增大。

网状电极和点电极对火焰纵向发展影响的差异可能来自于电晕放电效应^[12]。电晕放电是指,高压电极表面曲率半径过大,在加载高压时局部电场强度大于气体的电离强度,使得气体发生电离和激励。以加载电压 -12 kV 为例,网状电极的表面曲率半径较小,其最高场强大致为 0.518 MV/m,而点电极附近的最高场强达到 1.560 MV/m^[13]。本实验中网状电极的最高场强不足以使气体电离,不会产生电晕放电,因此加载电压后离子风效应使得燃烧产生的离子被牵引到横向的火焰前锋面,纵向火焰前锋面的离子浓度降低且反应速度变慢,所以纵向火焰发展受到抑制。加载高压(-10 、 -12 kV)时,在点电极产生的电场中除了离子风效应外,还存在电

晕放电效应,该放电产生的正离子主要分布在点电极附近的负高压电场内,产生的电子将高速跑出包围点电极的负高压电场且速度大幅下降,并被中性粒子吸附而形成负离子。在电场的作用下,负离子加速向火焰前锋面运动,局部火焰前锋面与未燃区的传质和传热得以增强,离子风效应加剧,火焰前锋面在接近电极时发生强烈的皱褶和扭曲,形成湍流,使得更多未燃混合气被卷吸到火焰区,从而促进了火焰的全局发展,所以火焰纵向拉伸。

2.2 火焰传播距离和火焰传播速度

火焰的发展在横向和纵向存在差异,为了研究加载电压对横向和纵向火焰的影响,本文将火焰横向和纵向的传播距离 R_h 和 R_v 分别定义为火焰前锋面横向和纵向最远处到容弹中心的距离,即 $R_h = (L_1 + L_2)/2$, $R_v = (H_1 + H_2)/2$,如图 4 所示。

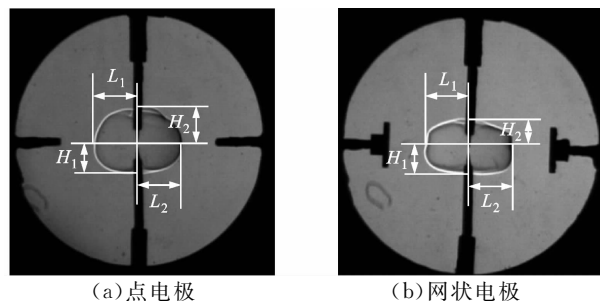


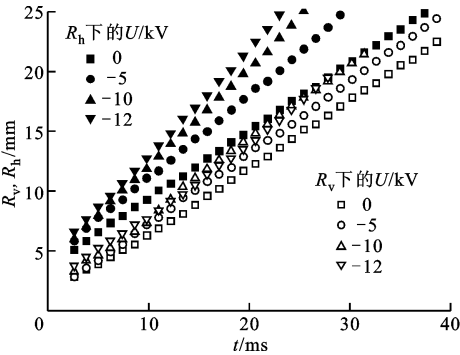
图 4 2 种电极下火焰横向和纵向的传播距离示意

火焰前锋面相对于静止的容弹壁面的运动速度定义为火焰传播速度,对于火焰横向和纵向的传播速度分别记为 S_h 和 S_v ,则

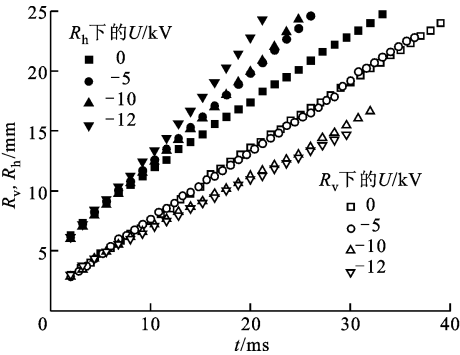
$$S_h = \frac{dR_h}{dt}; \quad S_v = \frac{dR_v}{dt}$$

为了消除打火和燃烧压力对火焰的影响,本文研究了 $R_h = 5 \sim 25$ mm 内的火焰传播特性^[14]。图 5 为 $\phi_a = 1.6$,且在 2 种电极加载电压 U 分别为 0 、 -5 、 -10 、 -12 kV 时火焰传播距离与时间的关系。从图中可以看出:2 种电极加载电压后,同时刻的 R_h 均比不加载电压时大,即 U 可以促进火焰的横向传播,同时刻的 R_h 随着加载电压幅值 $|U|$ 的增加而增大;网状电极加载 -5 kV 后,同时刻的 R_v 与未加载电压时基本无差别,加载 -10 、 -12 kV 电压后,同时刻的 R_v 比未加载电压时小;点电极加载电压后,同时刻的 R_v 均比未加载电压时有所增加,且在一定范围内随着 $|U|$ 的增加也有增加的趋势。

图 6 为 2 种电极下加载不同电压时火焰传播速度与火焰传播距离 R 的关系。从图中可以看出:在 2 种电极下,未加载电压时 S_h 和 S_v 差别不大,加载



(a)点电极



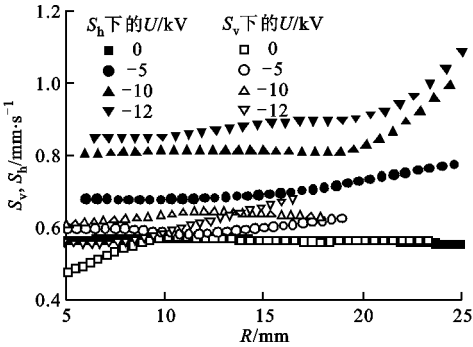
(b)网状电极

图 5 2 种电极加载不同电压时火焰的传播距离与时间的关系 ($\phi_a=1.6$)

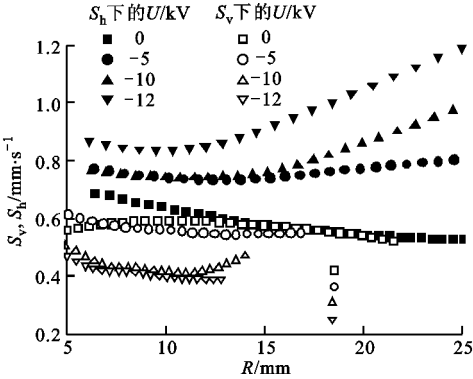
电压后 S_h 有所增加且与 $|U|$ 正相关;网状电极下, S_v 随着 $|U|$ 的增加而减小;点电极下, S_v 在一定范围内随着 $|U|$ 的增加而增大。

定义火焰横向平均传播速度 $\bar{S}_h$ 为在 $R_h=5\sim 25\text{ mm}$ 下火焰的传播距离与火焰在该距离内传播所用时间 t_1 之比;定义火焰纵向平均传播速度 $\bar{S}_v$ 为时间 t_1 内火焰纵向前锋面传播的距离与 t_1 之比。图 7 为 2 种电极下 $\bar{S}_h$ 、 $\bar{S}_v$ 与 $|U|$ 的关系。从图中可以看出:在 2 种电极下,加载电压后火焰的 $\bar{S}_h$ 均有较大幅度的增加,且随 $|U|$ 的增大而增加;网状电极下,加载 -5 kV 电压时 $\bar{S}_v$ 几乎不变(见如表 1),而当加载 -10 、 -12 kV 电压时,由于离子风使得火焰前锋面的离子沿水平方向运动,纵向火焰面的离子

数减少,所以 U 对 $\bar{S}_v$ 有明显的抑制作用;点电极下,在离子风和电晕放电的作用下, U 对 $\bar{S}_v$ 有促进



(a)点电极



(b)网状电极

图 6 2 种电极加载不同电压时火焰传播速度与火焰传播半径的关系

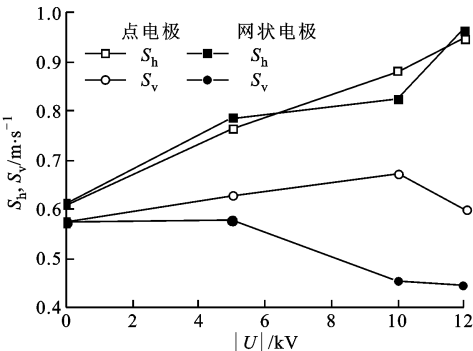


图 7 火焰横向、纵向传播的平均速度与加载电压的关系

表 1 2 种电极下平均速度及变化

工况		网状电极				点电极	
U/kV		0	-5	-10	-12	-5	-10
$\bar{S}_h/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		0.61	0.79	0.82	0.97	0.76	0.88
$\Delta S_h/\%$			28.3	34.6	58.3	25.1	44.0
$\bar{S}_v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		0.57	0.58	0.45	0.44	0.63	0.67
$\Delta S_v/\%$			0.62	-20.90	-22.80	9.32	17.20

作用,特别是加载 -12 kV 电压时,火焰纵向传播速度增幅 ΔS_v 小于加载 -5 、 -10 kV 电压时的情况,这是由于加载 -12 kV 电压时,离子风效应强烈导致纵向火焰前锋面的离子浓度减小的缘故。由表 1 可以看出:加载 -12 kV 电压时,网状电极下 ΔS_h 为 58.3% , ΔS_v 为 -22.8% ;点电极下, ΔS_h 、 ΔS_v 分别为 55.5% 和 4.67% 。由此得出,加载高电压时,点电极对火焰传播速度的促进作用大于网状电极。

2.3 燃烧压力

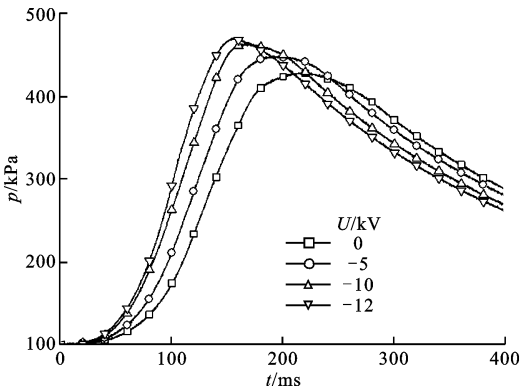
图 8 为 2 种电极下 U 分别为 0 、 -5 、 -10 、 -12 kV 时火焰压力与时间的关系。从图中可以看

出:2 种电极在加载电压后的压力峰值均比未加载电压时高,峰值到达的时间缩短,说明 2 种电极下 U 对燃烧具有促进作用。另外,网状电极下,虽然加载电压后压力峰值均大于未加载电压,但当 $|U|$ 大于 5 kV 时,压力峰值随着 $|U|$ 的增加而降低。其原因是,网状电极下加载高电压,火焰初期的横向传播速度明显提高,使得火焰更早地与网状电极接触而导致传热损失增大,所以压力峰值比加载 -5 kV 电压时小。点电极下,压力峰值随着 $|U|$ 的增大而增大,峰值到达的时间缩短,这是离子风效应和电晕放电效应共同作用的结果。其原因是,点电极下离子风效应使得 S_h 明显增大,但是点电极的表面积很小,火焰横向发展加快所增加的传热损失比较小,点电极下加载高电压会产生电晕放电,使得火焰发生褶皱和湍流,这进一步促进了火焰的全局发展。

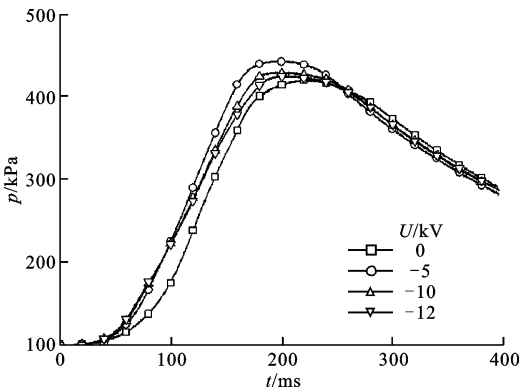
表 2 是 2 种电极下 U 分别为 0 、 -5 、 -10 、 -12 kV 时火焰压力峰值和峰值到达时间与加载电压的关系。表中显示:当加载 -5 kV 电压时,2 种电极下压力峰值增加幅度相当,但点电极下峰值到达时间更早;当加载 -10 、 -12 kV 电压时,网状电极的压力峰值增幅分别为 2.4% 、 1.3% ,峰值提前到达的时间分别为 21.0 、 10.6 ms ,而点电极下压力峰值增幅分别为 9.8% 、 11.2% ,峰值提前到达的时间分别为 49.6 、 59.7 ms 。由表中结果得出,点电极下加载高电压对火焰燃烧有促进作用。

3 结 论

- (1)2 种电极下,火焰横向传播速度随着加载电压幅值的增大而增加。加载 -5 、 -10 、 -12 kV 电压时,网状电极下火焰横向传播速度分别提高了 28.3% 、 34.6% 、 58.3% ,点电极下分别提高了 25.1% 、 44.0% 、 55.5% 。
- (2)加载 -5 、 -10 、 -12 kV 电压时,网状电极下 ΔS_v 分别为 0.62% 、 -20.9% 、 -22.8% ,点电极下 ΔS_v 分别为 9.32% 、 17.20% 、 4.67% 。



(a)点电极



(b)网状电极

图 8 加载电压时火焰压力与时间的关系

表 2 火焰压力峰值和峰值出现时间与加载电压的关系

工况点		网状电极				点电极	
U/kV	0	-5	-10	-12	-5	-10	-12
压力峰值/ kPa	421.8	444.6	431.4	427.9	448.7	463.9	470.0
压力峰值增幅/ $\%$		5.6	2.4	1.3	6.4	9.8	11.2
峰值出现的时间/ ms	217.2	200.0	196.2	206.6	190.2	167.6	157.5
峰值提前到达的时间/ ms		17.2	21.0	10.6	27.0	49.6	59.7

(3) 2种电极下加载电压后的压力峰值均有所增大。当加载-5、-10、-12 kV电压时,网状电极下压力峰值增幅分别为5.6%、2.4%、1.3%,点电极下压力峰值增幅分别为6.4%、9.8%、11.2%。

(4) 加载电压后,2种电极对火焰燃烧都有明显的促进作用,加载高电压(-10、-12 kV)时,点电极的促进作用较网状电极更明显。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] MEMDOUH B, PASCAL D, PIERRE V. Direct numerical simulation of the effect of an electric field on flame stability [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(12): 2286-2297.
- [7] MASAHIRO S, MASAYUKI S, SAWADA K. Variation of flame shape and soot emission by applying electric field [J]. *Journal of Electrostatics*, 1997, 39(4): 305-311.
- [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] MIN S C, LEE Y. Premixed combustion under electric field in a constant volume chamber [J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 2012, 40(12): 3131-3138.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] GOLDMAN M, GOLDMAN A, SIGMOND R S. The corona discharge, it's properties and specific uses [J]. *Pure & Appl Chem*, 1985, 57(9): 1353-1362.
- [13] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996: 243-261.
- [14] 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: 165-167, 186-187.

[本刊相关文献链接]

- 张猛, 王金华, 谢永亮, 等. $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ 预混湍流火焰锋面结构探测. 2013, 47(11): 14-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201311003]
- 王金华, 张猛, 谢永亮, 等. 合成气纯氧高压预混湍流火焰结构研究. 2013, 47(10): 87-90. [doi: 10.7652/xjtuxb201310015]
- 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. 2013, 47(7): 13-17. [doi: 10.7652/xjtuxb201307003]
- 张进华, 李婷, 王孙安, 等. 可变视场下的火灾探测算法. 2012, 46(10): 29-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201210006]
- 唐安东, 孟祥文, 周蓉芳, 等. 非均匀电场对火焰传播速率的影响. 2012, 46(9): 16-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201209004]
- 周蓉芳, 魏若男, 周竹杰, 等. 点火能量对天然气空气预混合气层流燃烧的影响. 2012, 46(7): 21-25. [doi: 10.7652/xjtuxb201207005]
- 刘德新, 刘斌. 二次喷油优化直喷汽油机冷启动排放特性的研究. 2012, 46(1): 13-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201201003]
- 刘亦夫, 刘兵, 刘亮, 等. 天然气缸内直喷发动机在不同喷射和点火时刻下的排放与燃烧特性. 2011, 45(5): 12-16. [doi: 10.7652/xjtuxb201105003]
- 高辉, 吴筱敏, 高忠权, 等. 盲源分离法在火花塞离子电流信号分离中的应用. 2010, 44(1): 22-26. [doi: 10.7652/xjtuxb201001006]
- 冉帆, 王锡斌, 朱瑞军, 等. 甲醇空气预混层流燃烧的简化化学反应动力学机理. 2009, 43(9): 27-31. [doi: 10.7652/xjtuxb200909007]
- 巩静, 金春, 姜雪, 等. 高辛烷值燃料-空气预混层流燃烧特性研究. 2009, 43(5): 26-30. [doi: 10.7652/xjtuxb200905006]
- 陈亘, 陈朝阳, 黄佐华, 等. 二甲醚-氢气-空气混合气预混燃烧的实验研究. 2008, 42(5): 542-545. [doi: 10.7652/xjtuxb200805007]

(编辑 苗凌)