

DOI: 10.7652/xjtuxb201505008

电场分布对球形传播火焰变形率的影响

崔雨辰¹, 段浩¹, 李超¹, 孙天旗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: 针对电场作用下球形传播火焰的变形问题, 利用 Maxwell 14.0 软件分别对点状、环状、直径为 20 mm 和 60 mm 的网状等 4 种电极产生的电场进行了模拟, 同时在常温、常压下, 定容燃烧弹中过量空气系数为 1.2 时, 通过对这 4 种结构的电极施加负电压(−5 kV 和 −10 kV)对甲烷/空气预混火焰在不同方向(与水平方向夹角为 0°、15°、30°、45°、60° 和 70°)上的火焰变形率进行了研究。结果显示: 施加负电压时, 环状电极下的火焰在不同方向上的平均变形率最小, 点状电极的次之, 直径为 20 mm 网状电极比点状电极的稍大; 直径为 60 mm 网状电极下施加 −5 kV 电压时, 火焰在不同方向上的平均变形率与点状电极的差别不大, 施加 −10 kV 电压时, 火焰在大于 45° 方向上的平均火焰变形率最大。由此表明, 环状电极的电场分布有利于火焰的均匀发展, 可以降低火焰淬熄的可能性。

关键词: 球形传播火焰; 电极; 电场分布; 火焰变形率

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)05-0049-07

Effects of Electric Field Distribution on Deformation Rates of Spherical Propagation Flame

CUI Yuchen¹, DUAN Hao¹, LI Chao¹, SUN Tianqi¹, 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: The electric fields around point electrode, ring electrode, and mesh electrodes with diameters of 20 mm and 60 mm are simulated with Ansoft Maxwell software, and the electric field distributions in constant volume combustion bomb are obtained. An experiment is also conducted to investigate the different influences of the four electrodes under applied negative voltages(−5 kV and −10 kV) on the deformation rates in different directions (at angles of 0°, 15°, 30°, 45°, 60° and 70° to the plane) of premixed CH₄/air mixtures at the excess air ratio of 1.2 room temperature and atmospheric pressure. The results show that the average flame deformation rates in different directions of the ring electrode get the minimum in the case of negative voltages, followed by point electrode and mesh electrode with diameter of 20 mm. As applied voltage of −5 kV, the average flame deformation rates in different directions of the mesh electrode with diameter of 60 mm slightly differ from those of point electrode. As applied voltage of −10 kV, the average flame deformation rates over 45° get larger than those of the other electrodes and the flame deforms greatly, the electric field distribution of the ring electrode thus

is beneficial for whole flame development to reduce the probability of flame quenching

Keywords: spherical propagation flame; electrode; electric field distribution; flame deformation rate

能源利用效率低已成为加剧研究能源及环境问题的重要因素。近年来,国内外的学者通过对本生灯、平板火焰等驻定火焰行为和燃烧特性进行了研究和分析,发现电场在增加火焰稳定性^[1-3]、提高火焰速度^[4-6]和减少碳烟排放^[7]等方面具有显著的作用。Belhi 等研究甲烷-空气的层流扩散火焰时,发现电场的存在会使火焰产生离子风效应,从而大大提高了火焰的稳定性^[8]。Volkov 在研究甲烷-空气平板火焰时,发现电场可以诱导火焰前锋面发生形变,火焰的绝对燃烧速率有所提高^[9]。Sakhrien 等研究了预混湍流的本生灯喷射火焰,认为电场作用下燃料的不完全燃烧降低^[10]。

近年来,孟祥文等对球形膨胀火焰进行了研究,通过实验和数值模拟,得出平板网状电极在直流电场下对甲烷/空气预混层流火焰的燃烧特性有显著提升的作用^[11]。康婵等研究了负电场下网状电极和点状电极对甲烷/空气预混火焰的影响,发现电场对火焰横向传播有促进作用,对火焰纵向传播有抑制作用^[12]。

以上研究表明,虽然电场在一定程度上促进了火焰在某一方向的发展,但同时使得火焰发生变形,引起不均匀发展,当不等扩散存在或火焰传播受到限制时容易出现火焰淬熄^[13],一旦发生淬熄,能源利用率会大幅下降。为了促进火焰的整体发展,寻找一种使火焰能够在不同方向得到均匀发展的电极结构至关重要。

1 电场数值模拟

在 Pro/E 中建立了与实际定容燃烧弹尺寸一致的三维电场模型,同时对模型进行了简化,以达到一定的计算精度。

材料包括聚四氟乙烯、不锈钢、空气和甲烷。聚四氟乙烯作为定容燃烧弹内壁的绝缘套和点火电极的保护套,不锈钢是高压电极和点火电极的材料。容弹内的混合气视为理想气体,由于甲烷的相对介电常数与空气十分接近,因此模拟中甲烷的相对介电常数用空气代替。材料属性设置如表 1 所示。

表 1 材料属性设置

材料	聚四氟乙烯	不锈钢	空气	甲烷
相对介电常数	2.05	1	1.000 6	1.000 8

模拟中的激励源为电压,所有边界条件均为狄里克莱边界条件(第一类边界条件)。高压电极的电压 V 分别为 -5 kV 和 -10 kV ,点火电极的电压为 0 kV ,定容燃烧弹绝缘套外壁电压为 0 kV ,定容燃烧弹以外区域为完全绝缘。

利用 Ansoft Maxwell 软件自动划分网格,通过限制网格的最大边长、网格深度、最大表面偏差、最大表面法线偏差等来控制网格的大小和细密程度。点状电极网格数为 103 650,环状电极网格数为 427 206,网状(直径 20 mm)电极网格数为 160 178,网状($\Phi 60\text{ mm}$)电极网格数为 360 690。求解中最大迭代次数为 20,迭代误差小于 0.1% 时迭代停止。

2 实验装置和方法

图 1 为实验装置,由定容燃烧弹系统、配气系统、点火系统、高速摄像及纹影光路系统、数据采集系统和高压电供给系统组成。

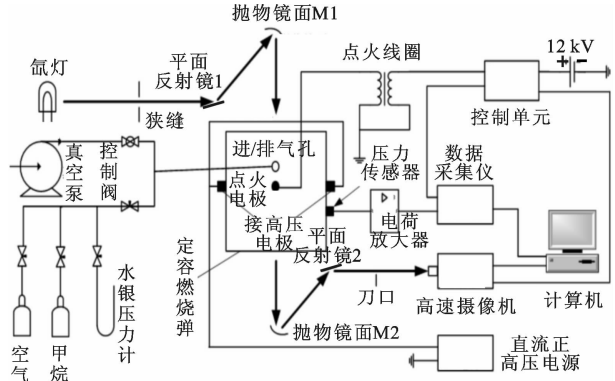
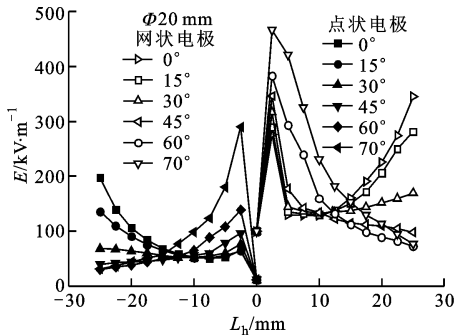


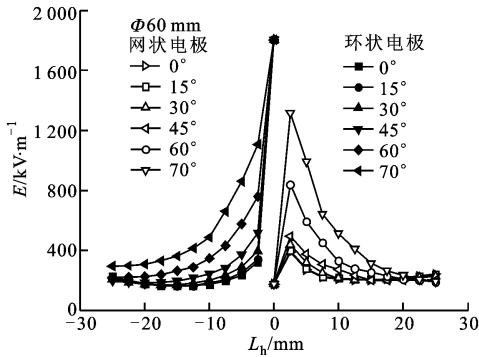
图 1 实验装置图

定容燃烧弹由碳钢浇铸而成,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 的高抗冲石英玻璃,为纹影系统提供必要的光学通路,石英玻璃与定容燃烧弹之间利用 O 型橡胶圈密封。在容弹中心竖直方向上对称布置了一对外裹聚四氟乙烯的针状点火电极,用于点火时产生火核,点火完成后作为地极。点火电极的直径为 2 mm ,2 个电极的间距为 2 mm 。高压电极分别为一对点状电极($\Phi 4\text{ mm}$)、一个环状电极(内径 70 mm ,外径 85 mm)和 2 种网状电极($\Phi 20\text{ mm}$, $\Phi 60\text{ mm}$)。点状电极和网状电极均对称安装在定容燃烧弹两侧左右面的中心处,距点火电极的水平距离为 35 mm ;

向点火电极对火焰的干扰,选取与水平面夹角 θ 为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 70° 方向进行了研究。图 5 为 4 种电极下施加 -10 kV 电压后不同方向上的电场强度随传播距离的变化。从图中可以看出:当传播距离较小时,4 种电极下不同方向上的电场强度随传播距离的变化趋势基本一致; θ 越大,同一传播距离对应的电场强度越大,随着传播距离的增大,各个角度上电场强度的差异逐渐减小;点状电极和 $\Phi 20\text{ mm}$ 网状电极在传播距离约为 $15\sim 25\text{ mm}$ 时, θ 越大,同一传播距离对应的电场强度越小,不同角度上电场强度的差异逐渐增大。



(a)点状电极和 $\Phi 20\text{ mm}$ 网状电极



(b)环状电极和 $\Phi 60\text{ mm}$ 网状电极

图 5 4 种电极下施加 -10 kV 电压后不同方向上电场强度随传播距离的变化

3.2 火焰传播图像

图 6 为 4 种电极施加 -5 kV 、 -10 kV 电压后的火焰传播图像。从图中可以看出,加载电压后,4 种电极下的火焰在不同方向上均发生了不同程度的变形,随着外加电压值的增大,火焰变形越明显。原因是加载电压后,形成了方向由点火电极指向高压电极的电场,在电场的作用下,大量粒子沿电场方向定向迁移,该现象称为离子风效应^[11]。

从图 6 还可以看出:4 种电极下最初时的火焰变形最明显,即偏离水平方向的火焰面发展很慢,这可能是点火时纵向点火电极对火焰的干扰起主导作

用;施加 -5 kV 电压时,随着时间的推移,4 种电极下火焰面在偏离水平方向的发展与水平方向之间的差异减小,变形减小,环状电极最为明显;施加 -10 kV 电压时,点状、环状电极和 $\Phi 20\text{ mm}$ 网状电极下火焰随时间的变形趋势与施加 -5 kV 电压时的差异不大,而 $\Phi 60\text{ mm}$ 网状电极下火焰随时间的变形越来越明显,火焰拉伸成近似长方体。

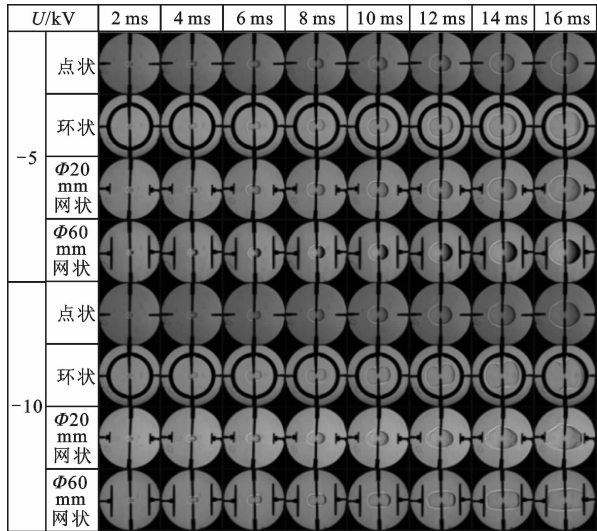


图 6 $\varphi_a=1.2$ 时 4 种电极施加负电压后的火焰传播图像

3.3 火焰传播距离

火焰传播距离 L_h 定义为任意方向上火焰的最左端和最右端的前锋面到点火电极中心距离的平均值。不同方向上的火焰传播距离 $L_h=(L_1+L_2)/2$, L_1 和 L_2 从火焰发展照片上得到,如图 7 所示。

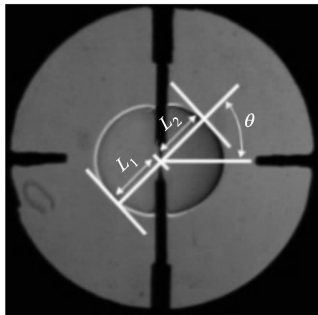


图 7 不同方向上的火焰传播距离获取方法

图 8 为 4 种电极在不同角度、不同电压下火焰传播距离随时间的变化。从图中可以看出:加载 -5 kV 电压时,4 种电极下的火焰在不同角度上的传播距离与传播时间近似呈线性关系,点状电极、 $\Phi 20\text{ mm}$ 和 $\Phi 60\text{ mm}$ 网状电极下,随着角度的增大,同一时间对应的火焰传播距离逐渐减小,环状电极下火焰在各个角度的传播距离随时间变化的差异不大;加载 -10 kV 电压时,点状电极在不同方向上的

火焰传播距离随时间的变化趋势与加载-5 kV 电压时的差异不大,环状电极下在 0°、15°、30°和 45°方向上的火焰传播距离随时间的变化基本一致,而在 60°和 70°方向上同一时间对应的传播距离有所减小,Φ20 mm 和 Φ60 mm 网状电极下,随着角度的增

大,同一时间对应的火焰传播距离明显减小,特别是 Φ60 mm 网状电极下各个方向上火焰传播距离的差异较大。

3.4 火焰变形率

火焰变形率 α 定义为某一时间水平方向的平均火焰半径与偏离水平方向平均火焰半径的比值,即

$$\alpha = R_{0^{\circ}}/R_{\theta} \tag{1}$$

式中: $R_{0^{\circ}}$ 为某一时间水平方向平均火焰半径; R_{θ} 为某一时间与水平方向夹角为 θ 的平均火焰半径, θ 取 15°、30°、45°、60°和 70°。

图 9 为 4 种电极在不同角度、不同电压下火焰变形率随时间的变化。从图中可以看出,4 种电极下火焰在不同方向上的火焰变形率都在火焰发展初期最大,这可能是点火时点火电极对火焰抑制的缘故。加载-5 kV 电压时,4 种电极下同一时间对应的火焰变形率随着角度的增大而增大,环状电极下在 15°、30°和 45°方向上的火焰变形率基本维持在 1 附近,60°和 70°方向上的火焰变形率随着时间的推移迅速下降,最后也维持在 1 附近,其他 3 种电极下的火焰变形率相差不大,且都明显大于环状电极下的火焰变形率。加载-10 kV 电压时,点状电极和 Φ20 mm 网状电极在不同方向上的火焰变形率的变化趋势与加载-5 kV 电压时大致相同,环状电极下在 15°、30°和 45°方向上的火焰变形率基本在 1 附近,在 60°和 70°方向上的火焰变形率虽然较大,但是随着时间的推移呈直线减小的趋势,Φ60 mm 网状电极在同一时间对应的火焰变形率随着角度的增大而明显增大,特别是在 45°、60°和 70°方向上的火焰变形率均远远超过了其他电极。

图 10 为 4 种电极在不同电压下的火焰平均变形率随角度的变化。从图中可以看出,施加-5 kV、-10 kV 电压时,环状电极在不同方向上的火焰平均变形率均最小,点状电极次之,Φ20 mm 网状电极比点状电极稍大。施加-5 kV 电压时,Φ60 mm 网状电极在不同方向上的火焰平均变形率与点状电极差别不大,施加-10 kV 电压时,在大于 45°方向上的火焰平均变形率相比其他电极大得多。因此,Φ60 mm 网状电极下火焰不等扩散不稳定性较强,火焰容易出现淬熄,而环状电极下火焰不等扩散不稳定性较弱,火焰淬熄的可能性较小。

结合图 4 和图 5 可知:环状电极下电场线方向接近垂直于火焰面,即与火焰扩散的方向吻合较好,且电场强度随着火焰面与水平方向夹角的增大而增大,表明火焰在大角度方向上受到的促进作用明显,

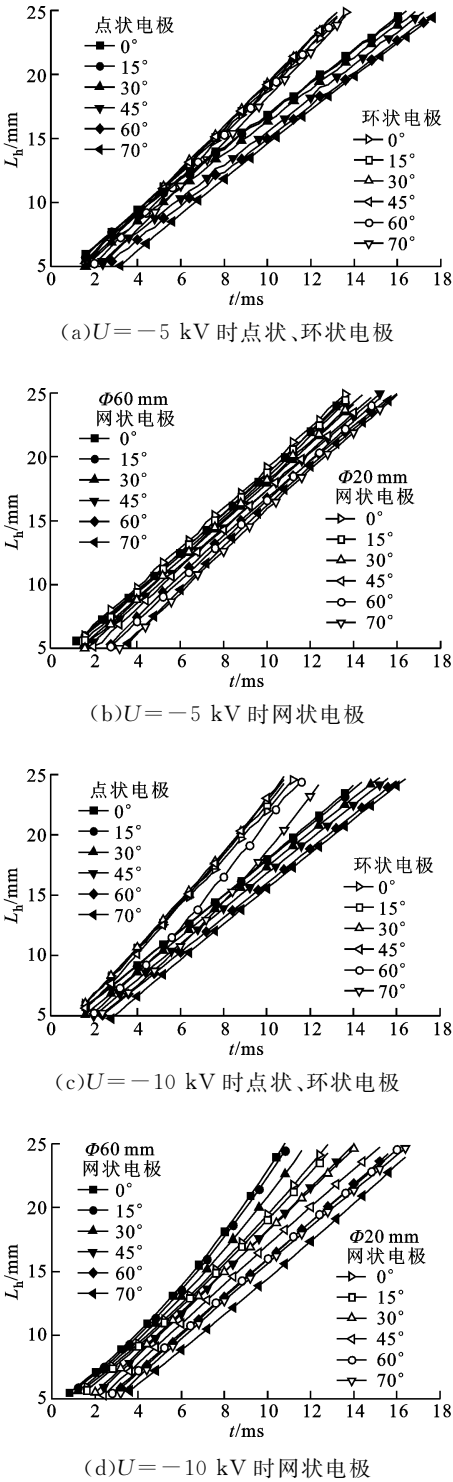


图 8 4 种电极在不同方向、不同电压下火焰传播距离随时间的变化

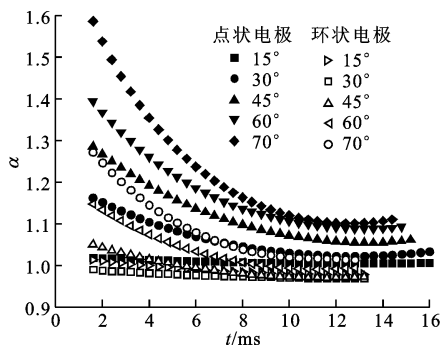
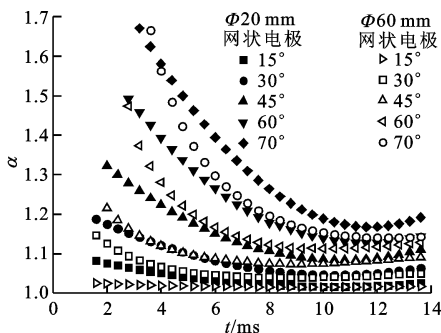
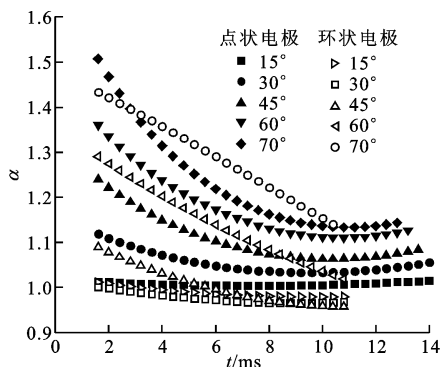
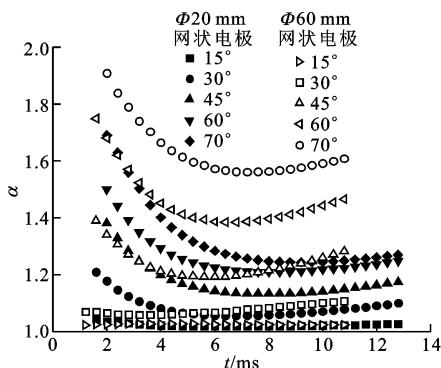
(a) $U = -5$ kV 时点状、环状电极(b) $U = -5$ kV 时网状电极(c) $U = -10$ kV 时点状、环状电极(d) $U = -10$ kV 时网状电极

图9 4种电极在不同方向、不同电压下的火焰变形率随时间的变化

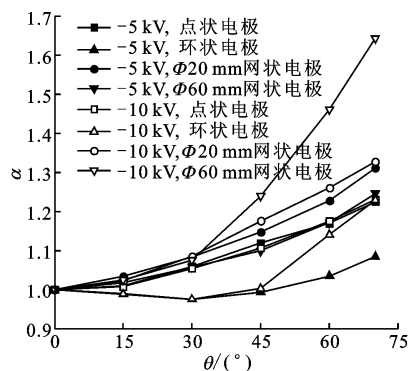


图10 4种电极在不同电压下的火焰平均变形率随方向的变化

因此火焰在不同方向上的传播距离与水平方向上的传播距离的差异逐渐减小,变形率减小;其他3种电极下电场线方向与火焰扩散方向存在夹角,因此火焰中的离子会发生偏移,导致不均匀的离子风效应,从而引起火焰变形。为了研究电场分布对不同电极下火焰变形率的影响,定义离子相对偏移倾向为 λ ,其为不同方向上的平均电场强度在该方向的法线投影与水平方向平均电场强度的比值,即

$$\lambda = \bar{E}_\theta / \bar{E}_0 \quad (2)$$

式中: $\bar{E}_\theta$ 表示不同方向上的平均电场强度在该方向的法线投影; $\bar{E}_0$ 表示水平方向上的平均电场强度。

表2为加载 -10 kV电压时点状、 $\Phi 20$ mm和 $\Phi 60$ mm网状电极下火焰在不同方向上的离子相对偏移倾向。从表中可以看出,电极在任意角度上的离子相对偏移倾向从大到小排序为: $\Phi 60$ mm网状电极— $\Phi 20$ mm网状电极—点状电极,可见 $\Phi 60$ mm网状电极下的离子偏移更明显,从而导致偏离水平方向上的离子浓度大幅降低,离子风作用减弱,使得偏离水平方向的火焰面发展减缓,变形率增大。从图5电场强度分布可知, $\Phi 60$ mm网状电极下电场对火焰水平方向的促进作用明显大于点状电极和 $\Phi 20$ mm网状电极,该电极下火焰水平方向的发展较快,与其他方向的发展差异较大,由此火焰变形率增大。

表2 电压为 -10 kV时的离子相对偏移倾向

$\theta/(^\circ)$	15	30	45	60	70
点状电极	0.23	0.33	0.41	0.56	0.82
λ $\Phi 20$ mm 网状电极	0.25	0.39	0.47	0.65	0.95
$\Phi 60$ mm 网状电极	0.26	0.51	0.79	1.19	1.78

4 结 论

(1)环状电极下电场线方向与火焰扩散方向吻

合较好,且电场强度随着火焰面与水平方向夹角的增大而增大,有利于火焰的均匀发展。点状电极、 $\Phi 20\text{ mm}$ 和 $\Phi 60\text{ mm}$ 网状电极下的电场线方向与火焰扩散方向存在夹角,因此存在离子偏移倾向,特别是 $\Phi 60\text{ mm}$ 网状电极下离子偏移倾向最大,不利于火焰的均匀发展。

(2)施加负电压时,4种电极在不同方向上的火焰均发生变形,在最初发展阶段火焰变形最明显,随着时间的推移变形减弱,环状电极下最明显。施加 -10 kV 电压时, $\Phi 60\text{ mm}$ 网状电极下的火焰拉伸显著,近似拉伸成长方体。

(3)施加负电压时,环状电极下火焰在不同方向上的平均变形率均小于其他电极,说明环状电极可以促进火焰的均匀发展,减小火焰淬熄的可能性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] KIM M K, CHUNG 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.
- [3] KIM M K, CHUNG S H, 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.
- [4] VAN DEN BOOM J, KONNOV 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.
- [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 coflow jets [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 963-970.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] VOLKOV E, SEPMAN A, KORNILOV 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] SAKHIEH A, LINS G, DINKELACKER F, et al. The influence of pressure on the control of premixed turbulent flames using an electric field [J]. Combustion and Flame, 2005, 143(3): 313-322.
- [11] MENG X W, WU X M, KANG C, 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] 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(11): 31-36.
KANG Chan, YANG Xing, LIU Jie, et al. Effect of point and mesh electrodes with applied negative voltage on premixed lean combustion [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(11): 31-36.
- [13] 暴秀超, 刘福水, 刘兴华. 氢气预混层流燃烧球形膨胀火焰的拉伸研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2011(3): 237.
BAO Xiuchao, LIU Fushui, LIU Xinghua. Stretch of hydrogen-air outwardly propagating spherical laminar premixed flames [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2011(3): 237.
- [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.

(编辑 苗凌)