

DOI: 10.7652/xjtuxb201807010

正直流电场对球形火焰影响的机理分析

孟浩, 杨猛, 何子奇, 魏旭星, 吴筱敏

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了确定正直流电场影响燃烧的机理,选取了初始压力为 303.975 kPa,过量空气系数为 1.2、1.4、1.6 的预混稀燃气,通过对容弹内网状电极分别加载幅值为 5 kV 的正/负直流电压以及幅值为 5 kV、频率为 15 kHz 的高频交流电压,对比分析了直流正电场与另外两种电场下预混球形火焰传播特性的异同。结果显示:不论火焰形变、火焰传播中速度的变化还是平均传播速度增大率随过量空气系数的变化,其在正直流电场下的规律都与负直流电场下相近而与高频交流电场下相差甚远;当过量空气系数从 1.2 增大至 1.6 时,正/负直流电场下火焰平均传播速度增大率从低于 15% 提高至约 40%,而交流电场下该值始终约为 11%。对比结果表明,正直流电场与负直流电场一样主要通过离子风效应影响火焰,但分析表明正电场下离子风的形成机理及促进效果与负电场下差异明显,这对不同条件下采用电场辅助燃烧时的电场种类选择有重要意义。

关键词: 高频交流电场;正直流电场;负直流电场;稀燃火焰;火焰传播特性;离子风

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)07-0068-06

Mechanism Analysis of the Effect of Positive DC Electric Field on Spherical Flame

MENG Hao, YANG Meng, HE Ziqi, WEI Xuxing, WU Xiaomin

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

Abstract: To investigate the affecting mechanism of positive DC electric field on the combustion, the premixed lean fuel gas with an initial pressure of 303.975 kPa and excess air coefficient of 1.2, 1.4, 1.6 was selected as the research object, and positive/negative DC voltage of 5 kV and high frequency AC voltage of 5 kV, 15 kHz were applied on the mesh electrodes within the combustion bomb. The flame's propagating characteristics under three electric fields were analyzed. The results showed that the change rules of the flame deformation, the flame propagation speed and the increase rate of the average propagation speed with the excess air coefficient under positive DC electric field are similar to those under negative DC electric field but different from those under high-frequency AC electric field. When the excess air coefficient increased from 1.2 to 1.6, the increase rate of average propagation speed under DC electric field increased from less than 15% to about 40%, while this value is always around 11% under AC electric field. It can be confirmed that both negative and positive DC electric fields affect the flame mainly through the ionic wind effect, but the formation mechanism and promotion effect of ionic wind between two electric fields are significantly different, which is of great significance for the

收稿日期: 2017-12-30。 作者简介: 孟浩(1992—),男,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(51476126)。

网络出版时间: 2018-04-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180412.1644.006.html>

choice of electric field type to assist combustion under different conditions.

Keywords: high-frequency AC electric field; positive DC electric field; negative DC electric field; lean-burn flame; flame propagation characteristics; ionic wind

天然气相对于汽油燃烧速度慢、燃烧稳定性较差的问题限制了天然气发动机更广泛的应用,电场助燃技术因可以增强天然气火焰稳定性^[1-2]、提高火焰传播速度^[3-4]、有效降低污染物排放^[5-6]而得到广泛关注,国内外学者对其作用机理也进行了深入的研究。在球形火焰中由于化学离子化的作用在锋面反应区内产生大量正离子与电子^[7],故国内外部分学者认为电场主要通过作用于正离子形成的正离子风效应以及作用于电子形成的电化学反应影响燃烧^[1-4]。试验研究表明,正直流电场对火焰也有明显促进作用,由于正电场下正离子风方向与火焰传播方向相反无法促进火焰传播,因此一般认为正直流电场主要通过电化学反应促进燃烧^[8]。然而, Kim 等在对低频交流电场影响本生灯火焰的研究中发现了双离子风效应(正离子风与负离子风的耦合效应)的存在^[2],说明正直流电场下还会产生负离子风效应,但目前的研究并不能确定哪种效应在正直流电场影响火焰过程中占据主导。

研究表明,负直流电场主要通过正离子风效应促进火焰传播^[4,9],高频交流电场主要通过电化学反应加速燃烧^[10-11],因此将正直流电场与另外两种电场的助燃效果进行对比研究将有助于确定正电场助燃的主导效应。本文选取了过量空气系数 λ 为 1.2、1.4、1.6 的预混稀燃气,在 303.975 kPa 初始压力下,分别施加幅值为 5 kV 的正/负直流电压以及有效值为 5 kV、频率为 15 kHz 的高频交流电压,通过对比直流正电场与另外两种电场下球形传播火焰的传播特性的异同,最终确定正电场辅助燃烧的机理。

1 实验装置与方法

该定容燃烧装置由定容燃烧弹、配气机构、点火电路、高速纹影摄像系统、燃烧压力采集系统、高压电源及其电路系统组成,如图 1 所示。定容燃烧弹的结构如图 2 所示。实验所用的定容燃烧弹内径为 140 mm、长为 180 mm,容弹内装有聚四氟乙烯材质的绝缘套,绝缘套内径为 130 mm、外径为 140 mm、长为 180 mm。两个点火电极在容弹内竖直对称安装,间距为 2 mm、直径为 2 mm,材质为 45 号钢。点火电极既能通过火花放电形成火核,也充当外加

交流电场的一极。一对网电极由 45 号钢锻造而成,形状为外径为 60 mm 的圆盘,网格大小为 8.5 mm $\times$ 8.5 mm,水平对称地安装在距点火电极 35 mm 处,将其与高压电源连接,与点火电极构成点-网电场分布结构。

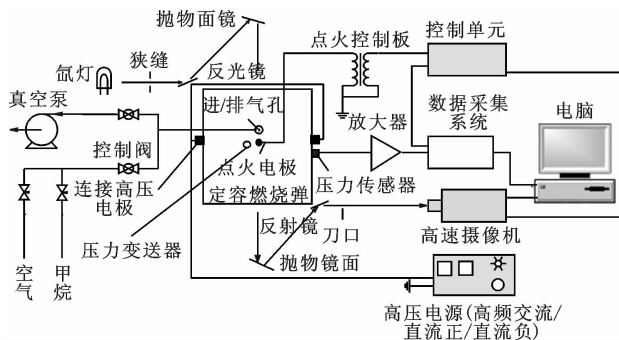


图1 实验装置图

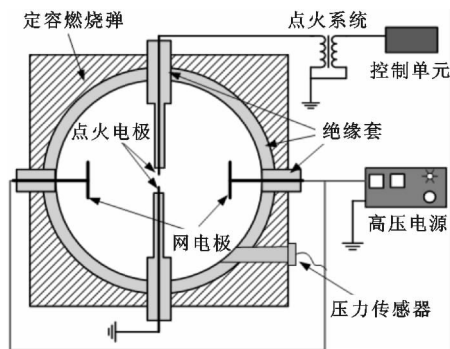


图2 定容燃烧弹与电极

实验用高压电源为威思曼高压电源(咸阳)公司生产的高稳定精密 DEL 系列高压电源,高频交流高压电源型号为 WPS20P20,输出 0~20 kV 电压连续可调。负直流高压电源型号为 DEL30N45,输出 0~-30 kV 电压连续可调。正直流高压电源型号为 DEL15P15,输出 0~15 kV 电压连续可调。实验中采用了美国 Redlake 公司生产的 HG-100K 型高速摄像机,每帧图像的拍摄间隔为 0.2 ms。

2 实验结果

2.1 电场数值模拟结果

本文利用 ANSOFT Maxwell 14.0 工程电磁场有限元分析软件对不同电场下的空间静电场进行数值仿真,得到了其对应的电场强度分布。

2.1.1 电场强度幅值和矢量空间分布 图3为加

载不同电压后容弹中心截面电场强度和电场线分布的数值模拟结果。从图中可以看出,加载电压后,电极间的电场线方向近似水平,直流正电场与负电场、高频交流电场的波峰与波谷时刻下容弹内的电场线方向正好相反。加载正/负直流电压时容弹内电场强度分布几乎完全相同,电极间电场强度变化不大。同样,在加载的高频交流电压波峰和波谷时刻容弹内也有相同的电场强度分布。

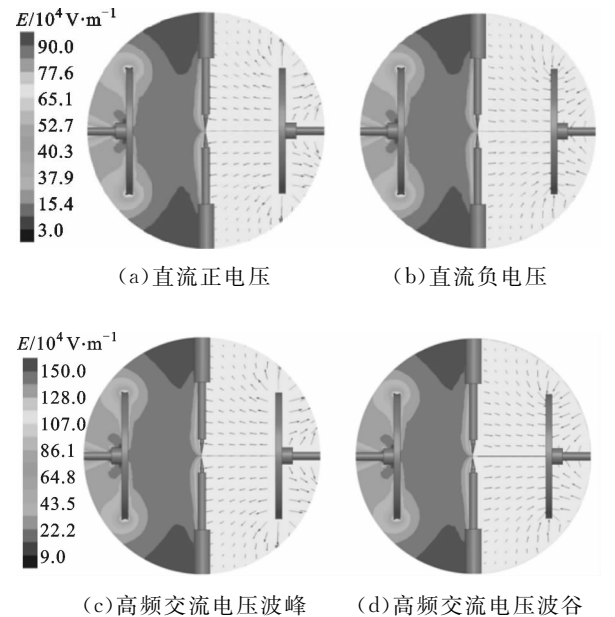


图 3 不同加载电压下的电场数值模拟结果

2.1.2 高压电极中心水平轴线上电场强度分布

图 4 为加载不同电压后电场强度沿中心水平轴线的分布,其中正/负直流电压、高频交流电压波峰/波谷时刻下场强分布相同。由图可见,无论加载何种高压电场,随着离容弹中心处距离 d 的增加,电场强度均呈现出先减小后增大的趋势,但是场强值变化

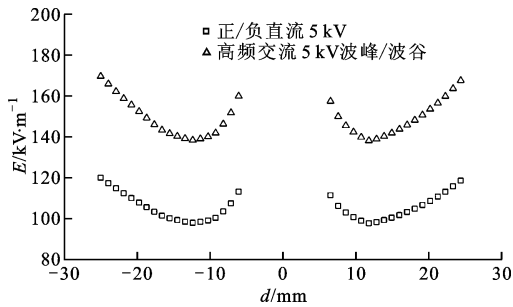


图 4 不同电压下容弹内沿中心水平轴线的电场强度分布

幅度较小。

2.2 火焰传播图像

图 5 给出了 3 种不同电压下火焰传播的对比图片。由图可见:当 λ 为 1.2 时,3 种电场下的火焰水平前锋面拉伸均较小且相近;当 λ 为 1.4 时,直流正/负电场的拉伸作用开始强于高频交流电场;当 λ 为 1.6 时,火焰锋面在高频交流电场下的变化依然较小,而在直流正/负电场下则出现了明显的形变。因此,在火焰传播图片的对比上,正直流电场与负直流电场保持了较好的一致性。

2.3 水平方向火焰传播速度

图 3 所示的电场数值模拟结果表明,加载 3 种电源后容弹中电场线的方向基本都在水平方向,因此本文主要研究电场对火焰水平方向传播的促进作用。定义火焰水平传播距离 L 为容弹中心到火焰水平方向左右两前锋面距离的平均值,即 $L=(l_1+l_2)/2$,如图 6 所示。研究表明:当 $L<6\text{ mm}$ 时,火焰的传播会受点火能量波动的影响;当 $L>25\text{ mm}$ 时,火焰的传播会受容弹内压力与温度的显著影响^[12-14]。因此,本文研究的火焰传播距离的范围为 $L=6\sim 25\text{ mm}$ 。火焰传播速度 S_L 、平均火焰传播速

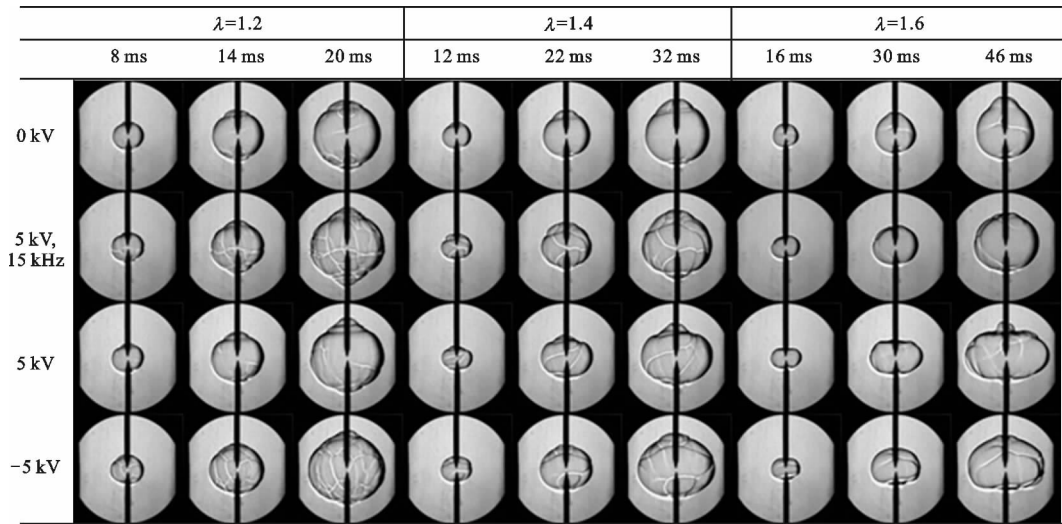


图 5 3 种电场下火焰传播图片

度 $\bar{S}_L$ 、平均火焰传播速度的变化率 $\Delta\bar{S}_L$ 分别定义为

$$S_L = dL/dt \tag{1}$$

$$\bar{S}_L = \frac{L_{25} - L_6}{t_{25} - t_6} \tag{2}$$

$$\Delta\bar{S}_L = (\bar{S}_L - S_0)/S_0 \tag{3}$$

式中: t 为火焰传播时间; S_0 为未加载电场时的火焰传播速度; $L_{25} = 25\text{ mm}$; $L_6 = 6\text{ mm}$ 。

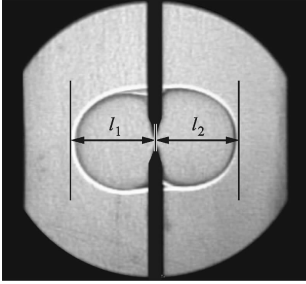
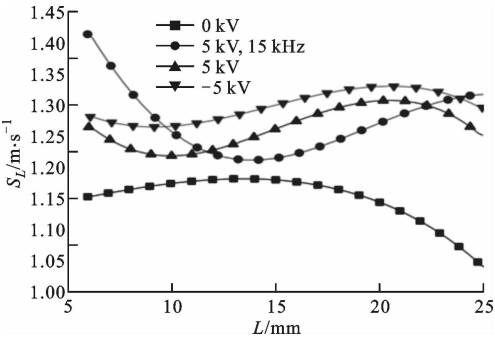
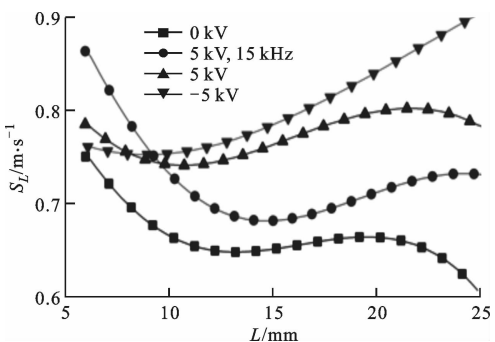


图 6 火焰传播距离示意图

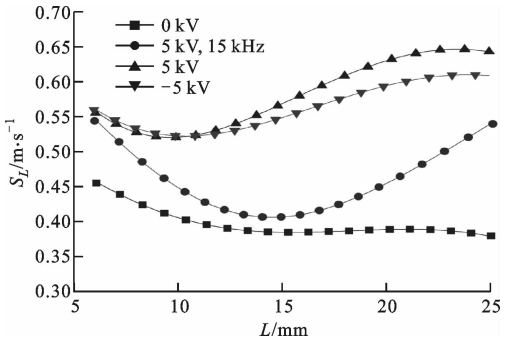
图 7 给出了加载不同电压时水平传播速度随距离变化的曲线。由图可见,当 λ 不变时,高频交流电场下 S_L 随 L 先减小后增大,并与图 4 交流电场下 $E-d$ 曲线变化相似。这是由于电化学反应下 S_L 正相关于 E ,且电化学反应影响燃烧存在迟滞性,使 S_L-L 曲线滞后 $E-d$ 曲线 $1\sim 2\text{ mm}$ 。负直流电场下 S_L 随 L 有增大的趋势,这是正离子风不断积累发展的结果。对比直流正电场下 S_L-L 曲线,可明显看出其与加载直流负电场时有几乎相同的变化规律。



(a) $\lambda = 1.2$



(b) $\lambda = 1.4$



(c) $\lambda = 1.6$

图 7 不同电场下火焰水平传播速度随传播距离的变化

图 8 给出了加载不同电压时火焰平均传播速度变化率随过量空气系数变化的曲线。由图可见,高频交流电场下 $\Delta\bar{S}_L$ 随 λ 变化很小,而负直流电场下 $\Delta\bar{S}_L$ 随燃料的变稀显著增大。由于离子风发展程度主要受加载电场强度、火焰中离子与中性分子的浓度比以及发展时间影响,随着 λ 的增大,火焰在电场下传播时间变长,离子风的发展更为充分,使得负直流电场下 $\Delta\bar{S}_L$ 随 λ 增大而显著增大,但其变化趋势仍然与加载正直流电场时一致。

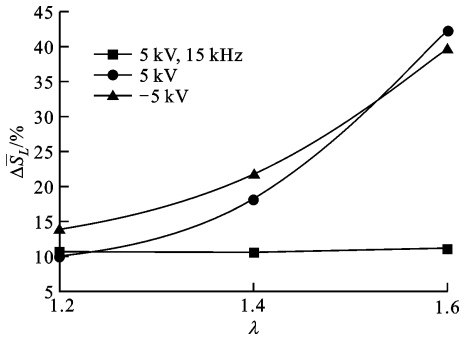


图 8 加载不同电压后平均火焰传播速度的变化率随过量空气系数的变化

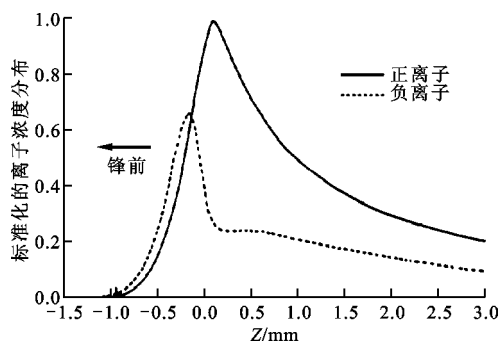
3 直流正电场助燃机理分析

无论是火焰的传播照片还是 S_L-L 、 $\Delta\bar{S}_L-\lambda$ 曲线,直流正电场下的曲线变化都与加载负直流电场时相近,与离子风效应影响火焰的特征吻合,因此正直流电场主要通过负离子风效应促进火焰传播。

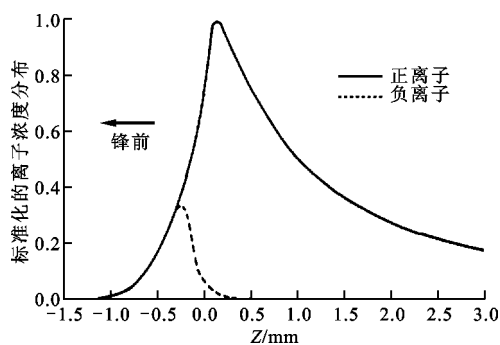
由于火焰中存在大量正离子,目前为止一直假设对离子风效应负责的带电粒子是正离子,但是由于电子与中性粒子吸附反应的存在,稀燃火焰中负离子与正离子浓度比相当可观,加载正直流电场后,由于电场使电子能量升高,促进了电子与电负性物质的吸附反应。同时,大量电子迁移到焰前预热区参与生成负离子,预热区的低温环境延长了负离子

的存在时间,使火焰中的负离子浓度进一步提高。

图9给出了预混层流甲烷火焰中总的正、负离子浓度分布曲线^[15]。由图可见,即使稀燃火焰中负离子与正离子浓度比较浓燃火焰有了明显升高,火焰中负离子浓度仍小于正离子,因此正电场对火焰传播的促进作用弱于负电场,但图7中当 λ 为1.6时,正直流电场的促进效果超过了负直流电场,这是因为负离子风的形成机理与正离子风有较大差别。



(a) 稀混合气

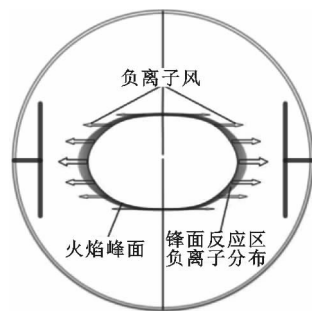


(b) 浓混合气

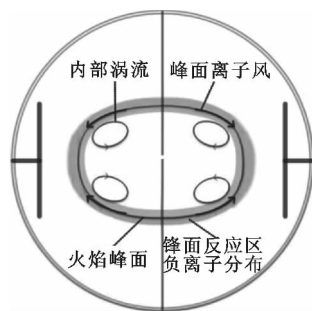
图9 甲烷/氧气火焰中总的正、负离子浓度分布曲线^[15]

根据火焰中带电粒子分布理论^[15-17],图10a模拟了正直流电场下球形火焰中负离子的分布以及负离子风发展状况。如图所示,负离子主要在火焰锋前预热区内通过电子与中性粒子的吸附反应生成,加载正直流电场后负离子沿水平方向迁移形成负离子风,且由于越靠近竖直中心负离子受电场作用时间越长、负离子风发展程度越高,电场的促进作用也越明显。图10b给出了现有研究中正离子风发展模拟图^[18],加载负直流电场后火焰中正离子沿火焰锋面迁移,当正离子风发展到一定程度会形成涡流^[18],涡流的出现阻碍了火焰水平锋面中心的传播速度。当 λ 为1.6时,由于火焰传播时间长,正负离子风都有了较程度的发展,正是正离子风产生的涡流使正直流电场对火焰传播的促进作用超过负直流电场。

正直流电场下负离子风的形成机理表明了其应用场景,燃料越稀,火焰中负离子浓度占比越高,负离子风效应越强,正直流电场较另外两种电场的促进效果越明显。因此,对 $\lambda \geq 1.6$ 的稀薄混合气,应优先选择正直流电场来辅助燃烧。



(a) 加载正直流电场



(b) 加载负直流电场

图10 直流电场下的火焰锋面反应区离子分布以及离子风发展

4 结 论

(1)无论是火焰的传播照片,还是 S_L-L 、 $\Delta\bar{S}_L-\lambda$ 曲线,正直流电场下的曲线变化都与加载负直流电场时相近,而与加载高频交流电场时相差甚远。对比分析结果表明,正直流电场主要通过负离子风效应促进球形火焰传播。

(2)负离子风效应与正离子风效应在形成机理与作用效果上都存在区别。火焰中正离子主要通过化学离子化作用生成,负离子主要通过电子与中性分子的吸附反应生成,这使得正离子风发展到一定程度后会在火焰锋面内形成涡流阻碍其促进效果,而负离子风则随着发展程度的提高逐步增强其促进效果。

(3)燃料越稀,正直流电场较另外两种电场的助燃效果越明显。对 $\lambda \geq 1.6$ 的稀薄混合气,应加载正直流电场辅助燃烧。

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: 2726-2731.
- [2] 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): 11 37-1144.
- [3] 侯俊才, 李超, 贾伟东, 等. 负直流电场对不同初始压力预混甲烷/空气火焰的影响 [J]. 化工学报, 2018, 69(4): 1602-1610.
- HOU Juncai, LI Chao, JIA Weidong, et al. Effects of negative DC electric fields on CH_4/air premixed flame at different initial pressures [J]. CIESC Journal, 2018, 69(4): 1602-1610.
- [4] 张聪, 侯俊才, 段浩, 等. 交流电场电压幅值对球形火焰影响的理论研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 33-38.
- ZHANG Cong, HOU Juncai, DUAN Hao, et al. Effects of AC electric field voltage amplitude on spherical flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11): 33-38.
- [5] 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(7): 350-355.
- [6] MIN S C, LEE Y. Premixed combustion under electric field in a constant volume chamber [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(12): 3131-3138.
- [7] CALCOTE H F. Mechanisms for the formation of ions in flames [J]. Combustion and Flame, 1957, 1: 385.
- [8] 魏旭星, 贾伟东, 侯俊才, 等. 正/负电场对预混稀燃火焰影响的对比研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(9): 39-43.
- WEI Xuxing, JIA Weidong, HOU Juncai, et al. Comparative research on effect of positive/negative electric field on premixed lean burn flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 39-43.
- [9] DUAN H, WU X, SUN T, et al. Effects of electric field intensity and distribution on flame propagation speed of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ flames [J]. Fuel, 2015, 158: 807-815.
- [10] 崔雨辰, 段浩, 张聪, 等. 高频交流电场的频率对预混稀燃火焰的影响 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(5): 944-949.
- CUI Yuchen, DUAN Hao, ZHANG Cong, et al. Effects of frequencies of high-frequency alternating electric fields on premixed lean combustion [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(5): 944-949.
- [11] DUAN H, WU X M, ZHANG C, et al. Experimental study of lean premixed $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{O}_2$ flames under high-frequency alternating-current electric fields [J]. Fuel, 2016, 181(11): 1011-1019.
- [12] LITTLE D N, PETERSEN J C. Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: physical and chemical interactions revisited [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(2): 207-218.
- [13] LESUEUR D, PETIT J, RITTER H J. The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review [J]. Road Materials & Pavement Design, 2013, 14(1): 1-16.
- [14] LAOUTID F, LORGUILLOUX M, LESUEUR D, et al. Calcium-based hydrated minerals: promising halogen-free flame retardant and fire resistant additives for polyethylene and ethylene vinyl acetate copolymers [J]. Polymer Degradation & Stability, 2013, 98(9): 1617-1625.
- [15] GOODINGS J M, BOHME D K, NG C W. Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames: II Negative ions [J]. Combustion and Flame, 1979, 36: 45-62.
- [16] HU J, RIVIN B, SHER E. The effect of an electric field on the shape of co-flowing and candle-type methane-air flames [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2000, 21(1): 124-133.
- [17] FIALKOV A B. Investigations on ions in flames [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(5/6): 399-528.
- [18] 李超, 吴筱敏, 段浩, 等. 电场对于球形传播火焰影响的数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(8): 1809-1814.
- LI Chao, WU Xiaomin, DUAN Hao, et al. Simulation on spherically expanding flame under electric field [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(8): 1809-1814.

(编辑 荆树蓉)