

DOI: 10.7652/xjtuxb201701006

交流电场对高压下甲烷/空气预混 稀燃火焰的影响

侯俊才, 魏旭星, 段浩, 李超, 李一鸣, 贾伟东, 吴筱敏

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了改善天然气燃烧速率慢、稀燃条件下着火延迟以及火焰稳定性差等不足,在常温、初始压力为 3×97 kPa 下,研究分析了定容燃烧弹中低频交流电场对甲烷/空气预混稀燃火焰形状、火焰传播速度、燃烧压力相关特性参数等的影响。结果表明:与未加载交流电压相比,加载 10~100 Hz 交流电压的火焰在水平方向均发生拉伸变形,电压频率越小,拉伸变形越明显,在 15 Hz 附近时变化最明显;加载电压后火焰传播速度增大,且随电压频率的减小先增大后减小,在接近 15 Hz 时最大;交流电场作用下燃烧压力峰值增大,压力峰值到达时间、初始燃烧期和主燃烧期均缩短;随着电压频率的减小,燃烧压力峰值与火焰传播速度变化相一致,而压力峰值到达时间的变化则相反,但均在 15 Hz 附近其绝对值出现最大值,比未加载电压时分别增加了 19.90%、-42.23%。

关键词: 低频交流电场;稀燃;定容燃烧弹;火焰传播速度;燃烧压力

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)01-0031-07

Effects of Alternating Electric Fields on CH₄/O₂ Lean Combustion Flame under High Pressure

HOU Juncai, WEI Xuxing, DUAN Hao, LI Chao, LI Yiming, JIA Weidong, WU Xiaomin

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

Abstract: To improve the combustion speed, ignition delay and flame stabilization of the nature gas under lean combustion conditions, an experiment was conducted to investigate the effects of low-frequency alternating electric fields on the flame shape, propagation speed, combustion pressure and other characteristic parameters of premixed methane/air mixtures in a constant volume combustion bomb at room temperature and under high initial pressure of 3 local atmospheric pressure. The results show that the flame is stretched in the horizontal, and the average flame propagation speed increases when low-frequency alternating electric field of 10-100 Hz is applied to the electrodes. With the decreasing frequency the flame stretch deformation degree and flame propagation speed increase firstly then decrease and reach the maximum near 15 Hz. The peak combustion pressure increases, and the peak pressure arrival time, the initial combustion period and the main combustion period are shortened under alternating electric fields. As the frequency decreases, the changes of peak combustion pressure and flame propagation speed tend identically, but the change of peak combustion pressure arrival time tends oppositely, however both the peak combustion pressure and the peak arrival time get their maximum values

收稿日期: 2016-06-29。 作者简介: 侯俊才(1991—),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: 2016-10-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161018.1517.004.html>

near of 15 Hz, and increase by 19.90% and −42.23% respectively compared with the case without electric field.

Keywords: low-frequency alternating electric field; lean combustion; constant volume combustion bomb; flame propagation characteristics; combustion pressure

随着能源环境问题日益严峻,天然气作为目前常用的一种清洁替代燃料被应用于锅炉、发动机等,但是天然气仍然存在燃烧速率慢、稀燃条件下着火延迟、火焰稳定性差等不足^[1]。针对火焰传播速度,Vega 等人研究发现提高电压幅值可以提高火焰传播速度^[2];Won 等人发现改变电压有效值 0~6 kV、60~1 000 Hz 交流电场的电压幅值和频率可以提高丙烷三叉流火焰的传播速度^[3];Cha 等数值模拟验证了加载外加电场可以提高预混稀燃火焰的传播速度^[4];段浩等试验研究得出改变高频交流电场电压幅值和频率有助于提高火焰传播速率且在稀燃条件下更明显^[5]。针对火焰稳定性,Kim 等试验分析发现改变交流电场的电压幅值和频率可以改善火焰的稳定性^[6-7];Gan 等人试验发现交流电场可以改善小尺度扩散火焰的稳定性^[8]。针对燃烧排放物,Vega 等人分析得出加载电场下可以降低 NO、CO₂ 的排放^[9];张扬等研究得出电场作用下可以改善非预混喷射火焰的 NO 的排放^[10]。

以上研究大都基于直流电场和高于 100 Hz 的交流电场,且试验均基于常压条件开展。本文在定容燃烧弹中试验研究了初始压力为 3 个当地大气压(1 个当地大气压为 97 kPa)下 10~100 Hz 交流电场对甲烷/空气层流预混稀燃火焰燃烧的影响。

1 试验装置和方法

试验装置主要由 6 部分组成,如图 1 所示,分别为定容燃烧弹部分、进排气管路部分、火花点火部分、纹影光路摄像部分、高电压部分和压力数据采集部分。

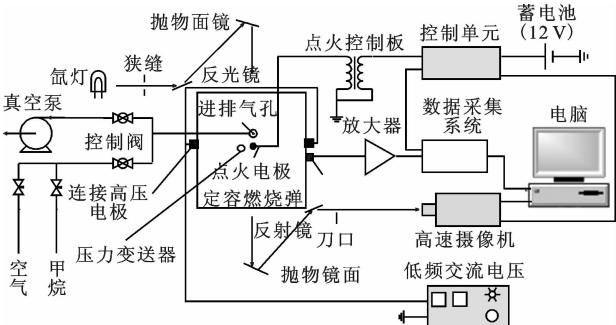


图 1 试验装置图

电极和定容燃烧弹结构如图 2 所示。定容燃烧弹如图 2b 所示,其内部为空心圆柱体,直径为 130 mm,长度为 130 mm,材质为 45 号钢。为了避免高压电极与容弹壁面之间出现放电,在内腔壁面安装有厚度为 8.5 mm 的聚四氟乙烯绝缘套。如图 2a 所示,在容弹的上下表面的中心安装点火电极,其直径为 2 mm 并覆有聚四氟乙烯绝缘套,点火电极之间相距 2 mm,点火结束后充当地极。试验中采用了纹影光路系统,纹影仪为锦州航星光电设备有限公司的 WCL 型纹影仪。纹影光学通路由直径为 170 mm、厚度为 60 mm 的高抗冲石英玻璃提供,且安装在容弹的前后两面。使用 HG-100K 型的拍摄速度为 5 000 帧/s 的高速摄像机记录容弹内火焰的传播过程。

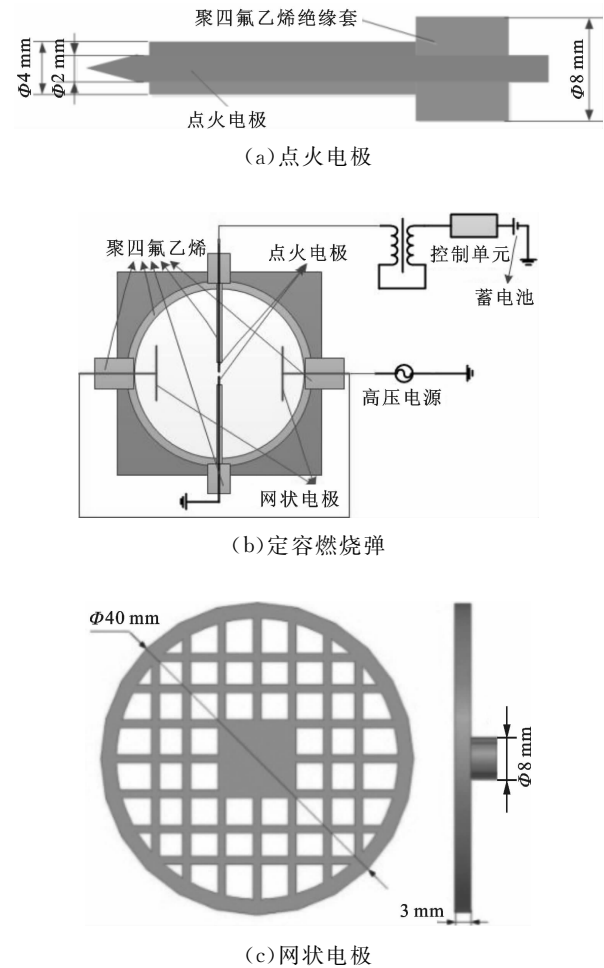


图 2 电极和定容燃烧弹结构

图 2c 为提供高电压的网状电极,直径为 60 mm,材质为 45 号钢,水平对称地安装在容弹左右两侧中心处,两网状电极到容弹中心的距离均为 35 mm。网状电极上加载了交流高压电,由型号 HV 20 kV/10~1 000 Hz 的低频交流电源提供,输入电压为 220 V±0.1 V,电压频率 f 的范围为 10~1 000 Hz,电源功率为 0~10 W。

压力数据采集系统主要由 3 部分组成:压力传感器为 Kistler7061B 型压阻式低压绝对压力传感器,测量范围为 0~25 MPa,测量精度为±0.005;电荷放大器的型号为 Kistler4618A;数据采集仪是 DL750 动态测试仪,频率为 10 kHz。

试验条件为常温、3 个当地大气压。甲烷纯度(质量分数)为 99.99%,空气由体积分数为 21% 的氧气与 79% 的氮气组成的混合气。首先将容弹抽真空,根据计算的进气量先后充入过量空气系数 $\lambda=1.6$ 的甲烷和空气,关闭进排气阀,静置 150 s 以便均匀混合,在该期间打开高压电源,分别向网状电极施加有效值 $U=5$ kV, f 分别为 100、80、60、40、30、20、15、10 Hz 的交流电压,然后点火并触发高速摄像机以记录火焰传播。燃烧过程结束,先关闭高压电源,后将废气用真空泵抽出,使用新鲜空气清洗容弹 3 次以上。每个试验工况点重复至少 3 次,取平均值作为该工况的试验值,以降低试验误差。

2 结果与分析

2.1 电场模拟

使用 ANSOFT Maxwell 14.0 电磁场有限元软件模拟了容弹内有效值 $U=5$ kV 的高压交流电场的分布。图 3a、3b 为容弹中心截面电压波峰、波谷的电场线分布,图 3c、3d 为对应的电场强度分布。由图 3 电场线分布可知,两网状电极之间电场方向基本为水平方向,电压波峰时电场方向由两网状电极分别指向点火电极,电压波谷时电场方向与波峰时相反。由图 3 电场强度分布可知,电压波峰与波谷时电场强度分布基本相同,两网状电极之间电场强度变化很小,近似为均匀场强。

2.2 火焰传播图像

图 4 为不同交流电场下火焰传播纹影照片。由图可以看出,未加载电压时火焰呈近似球形传播,加载交流电压后火焰发生了一定程度的拉伸变形,火焰拉伸变形主要发生在水平方向上,纵向拉伸不太明显。这是因为加载电场的方向主要在水平方向上,随着电压频率的减小,总体上火焰形变程度逐渐

增强,特别是在接近 15 Hz 时拉伸形变最明显。

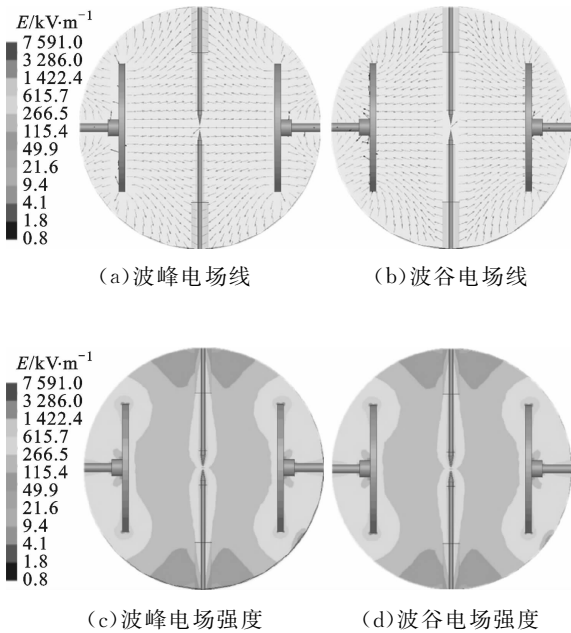


图 3 交流电压波峰和波谷的电场数值模拟结果

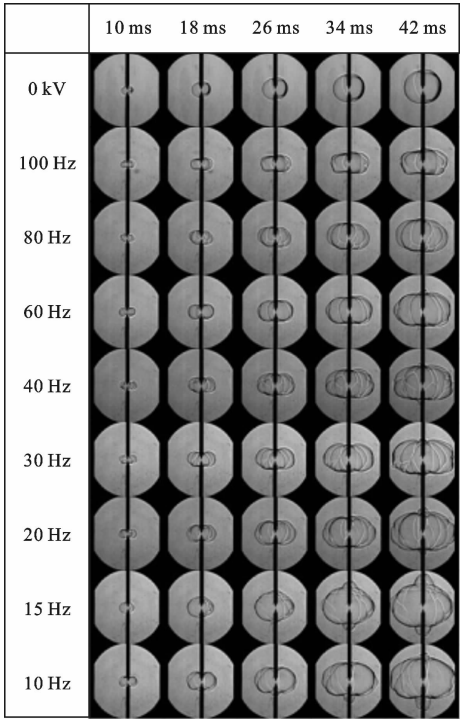


图 4 不同频率交流电场下火焰传播纹影照片

2.3 火焰传播距离和速度

2.3.1 火焰传播距离 定义水平方向的火焰传播距离 L 为给定极角(0° ,与水平方向夹角为 $\pm 15^\circ$)下火焰前锋面到两点火电极中心之间距离的平均值,即 $\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{n}$, $n=6$, $L_1 \sim L_6$ 如图 5 所示。这是因为高压电场对火焰燃烧的作用主要在容弹的水平方向

上。为了避免点火能量、容弹内温度以及压力变化对火焰发展的影响^[11],文中所选的火焰的传播距离范围为 $L=6\sim 25$ mm。

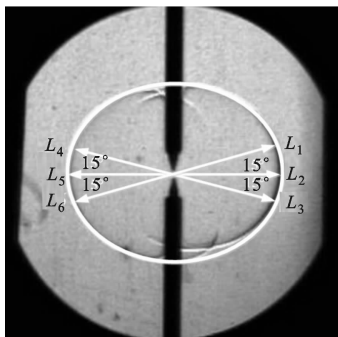


图5 火焰传播距离定义示意图

图6为不同电压频率下 L 随燃烧时间 t 的变化。由图可知:随着 t 的增加, L 近似呈线性增加;相同时间内,加载交流电压后的 L 均比未加载电压时的长;随着电压频率的逐渐减小, L 随 t 的变化率逐渐增大,在 f 接近 15 Hz 附近时最大。

2.3.2 火焰传播速度 定义平均火焰传播速度

$$\bar{S}_L = \frac{L_{25\text{ mm}} - L_{6\text{ mm}}}{t_{25\text{ mm}} - t_{6\text{ mm}}}$$

式中: $\bar{S}_L$ 为火焰从 6 mm 传播到 25 mm 时与所对应时间的比值。

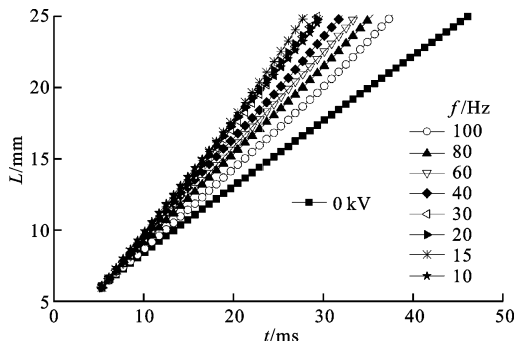


图6 不同电压频率下火焰传播距离随时间的变化

图7为不同电压频率下 $\bar{S}_L$ 及其增大率 $\Delta\bar{S}_L$ (相比于未加载电压时的增大程度)。由图可知:未加载电压时 $\bar{S}_L$ 为 0.46 m/s,加载电压后 $\bar{S}_L$ 增大;随着 f 的减小, $\bar{S}_L$ 先增大后减小,在 f 为 15 Hz 时达到最大值 0.84 m/s,比未加载电压时增大了 81.69%,而在 f 为 100 Hz 时达到最小值 0.59 m/s,比未加载电压时增大了 28.26%, f 为 15 Hz 时 $\bar{S}_L$ 比 f 为 100 Hz 时增大了 42.37%。

2.4 燃烧特性参数

2.4.1 燃烧压力 图8为不同电压频率下燃烧压力随时间的变化。由图可知,与未加载电压相比,加

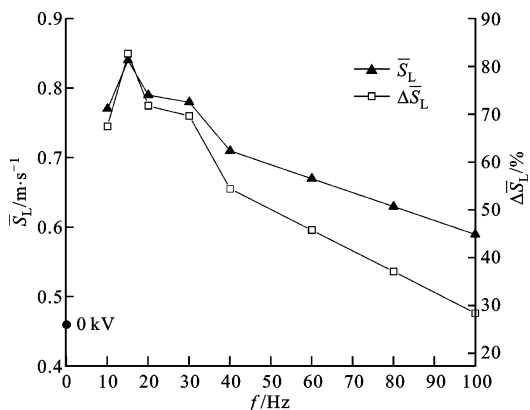


图7 不同电压频率下平均火焰传播速度及其增大率

载交流电压后的燃烧压力峰值 $P_{\max}$ 有所提高, $P_{\max}$ 到达时间 t_p 有所提前。随着电压频率的减小,燃烧压力先增大后减小, $P_{\max}$ 到达时间则相反,但均在 f 为 15 Hz 时变化最明显。

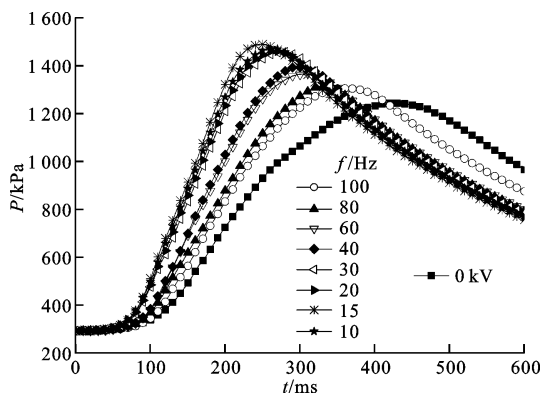


图8 不同电压频率下的燃烧压力随时间的变化

图9为不同电压频率下 $P_{\max}$ 、 t_p 及其相对未加载电压的变化率 $\Delta P_{\max}$ 、 Δt_p 。由图可知:加载交流电场后 $P_{\max}$ 增大, t_p 减小;随着电压频率的减小, $P_{\max}$ 先增大后减小, t_p 则与之相反,但均在 f 为 15 Hz 时变化最大,分别为 1 493.50 kPa、247.7 ms,比未加载电压分别增加了 19.90%、-42.23%; f 为 100 Hz 时 $P_{\max}$ 、 t_p 变化最小,分别为 1 308.92 kPa、354.6 ms,比未加载电压分别增加了 5.08%、-17.30%; f 为 15 Hz 时 $P_{\max}$ 、 t_p 比 100 Hz 时分别增加 14.10%、-30.15%。

2.4.2 质量燃烧率 根据试验的压力数据,利用 Elbe's 方程^[12],令 $P(t)$ 为瞬时压力, P_i 为初始压力, $P_{\max}$ 为峰值压力,则质量燃烧率

$$M_f(t) = \frac{P(t) - P_i}{P_{\max} - P_i}$$

定义初始燃烧期 t_{id} 为开始点火时刻到质量燃烧率为 10% 所经历的时间,燃烧持续期为开始点火时刻到质量燃烧速率为 90% 所经历的时间,主燃烧

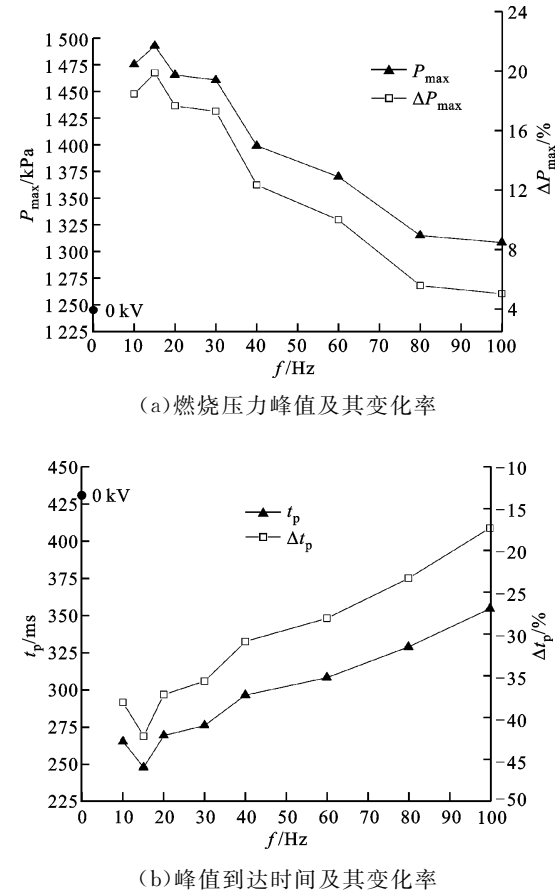


图 9 不同电压频率下燃烧特性参数及其相对变化率

期 t_{md} 为质量燃烧速率为 10%~90% 所经过的时间^[12]。

图 10 为不同电压频率下质量燃烧率随时间的变化。由图可知:加载电压后质量燃烧率增大;同一时刻随着电压频率的减小,质量燃烧率先增大后减小,在 f 为 15 Hz 附近最大,反映出燃烧速率随着电压频率的减小先增大后减小,15 Hz 附近最大。

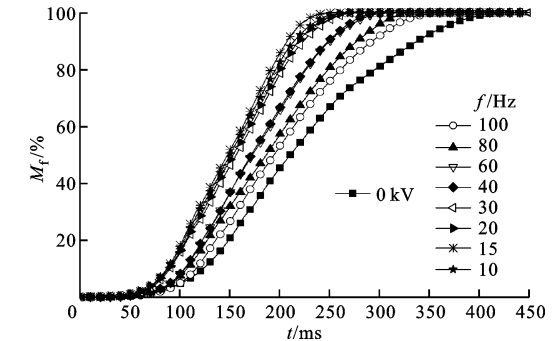


图 10 质量燃烧率随时间的变化

图 11 为初始燃烧期和主燃烧期及其相对于未加载电压的变化率 Δt_{id} 、 Δt_{md} 。由图可知: t_{id} 和 t_{md} 随电压频率的变化趋势与图 9b 中 t_p 变化相一致,在 f 为 15 Hz 时最小,分别为 88.1 ms、119.3 ms,比未

加载电压时分别减少了 29.52%、44.02%; t_{id} 和 t_{md} 在 100 Hz 时最大,分别为 117.2 ms、175.6 ms,比未加载电压时分别减少了 6.24%、17.60%; f 为 15 Hz 时的 t_{id} 和 t_{md} 比 f 为 100 Hz 时分别减少了 24.82%、32.06%。这说明低频交流电场对火焰燃烧的促进作用随电压频率的减小先增大后减小, f 为 15 Hz 时促进作用最大。

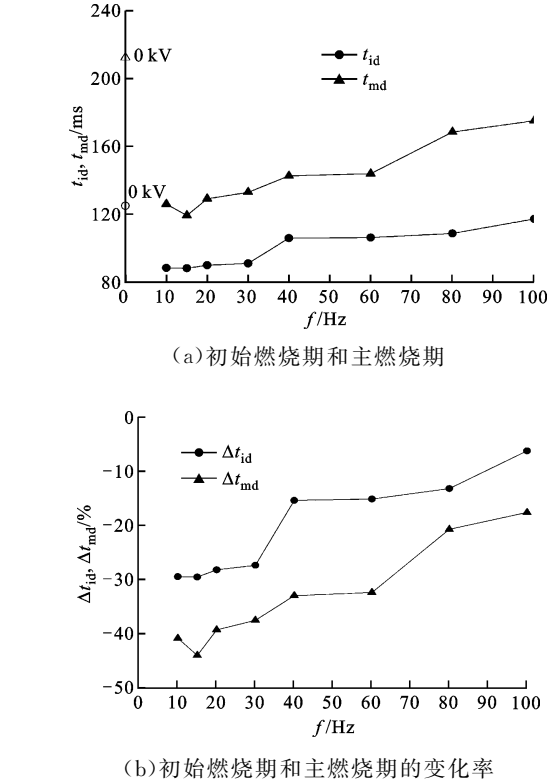


图 11 初始燃烧期和主燃烧期及其变化率随电压频率的变化

2.5 低频交流电场对火焰作用的机理

燃烧时天然气火焰的前锋面因化学电离会产生大量的带电粒子,如正离子(主要有 H_3O^+ 、 $C_2H_3O^+$ 、 CH_5O^+ 、 CHO^+ 等)、负离子(主要有 CHO_2^- 、 CHO_3^- 、 CO_3^- 等)和电子等,其中:正离子和电子的浓度较大,但电子质量很小可不考虑其影响;负离子的浓度较小,但其浓度不可忽略^[13-15]。由图 3 电场分布知,两网状电极与点火电极之间形成了方向交替变化的电场,火焰前锋面中大量正、负离子在电场力的作用下定向迁移,迁移过程中与中性分子发生碰撞,进行动量和热量传递,这样促进了电场方向上火焰前锋面的已燃区和未燃区之间的传质和传热,进而促进了火焰传播,这称之为双离子风效应^[7],目前认为这是低频交流电场对火焰作用的主要机理。

离子风效应表示如下

$$\xi = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_c}\right) \quad (1)$$

式中: t_c 为离子与中性分子碰撞响应时间

$$t_c = \frac{1}{zR_i} \quad (2)$$

其中 z 为离子与中性分子的碰撞频率, R_i 为离子与中性分子浓度的比值。一个标准大气压力下, 在化学当量比时 R_i 为 2×10^{-8} [7], 本文中为 2×10^{-8} 。

离子与中性分子的碰撞频率

$$z = \frac{4\pi\sigma^2 P_i}{(\pi m k_B T)^{1/2}} \quad (3)$$

式中: σ 为碰撞半径, 取 4×10^{-10} m; m 为平均分子质量, 取 4.66×10^{-26} kg; k_B 为玻尔兹曼常数, 取 $1.390\,62 \times 10^{-23}$ J · K⁻¹; P_i 为初始压力, 为 291 kPa; T 为绝热火焰温度。在初始温度为 298 K、压力为 3 个标准大气压、 $\lambda = 1.6$ 时, 使用 CHEMKIN 软件模拟计算可得绝热火焰温度 T 为 1 708 K。

双离子风效应大小

$$\xi_{\text{eff}} = \xi_p - \eta \xi_n \quad (4)$$

式中: 下标 p、n 分别代表正、负离子; ξ_p 、 ξ_n 分别为正、负离子单独作用下的离子风效应; η 为负离子与正离子浓度比。1 个标准大气压下甲烷氧气当量比 $\Phi = 0.216$, η 约为 0.1。由于初始压力为 1~3 个标准大气压, 离子浓度变化不大, 所以本文工况下 η 约为 0.1 [16-17]。由式(1)~式(4)可求得双离子风效应, 双离子风效应与交流电压频率的关系如图 12 所示。由图可知, 随着电压频率的减小, 双离子风效应先增大后减小, 并逐渐趋于稳定, 在 f 为 20 Hz 附近时最大。这说明在该频率范围内, 双离子风效应对火焰的促进作用先增大后减小并逐渐趋于稳定, 在 f 为 20 Hz 附近时出现峰值。图 5 纹影图片拉伸变形、图 7 平均火焰传播速率、图 8 燃烧压力以及图 9~11 相关的燃烧特性参数等变化, 均随电压频率

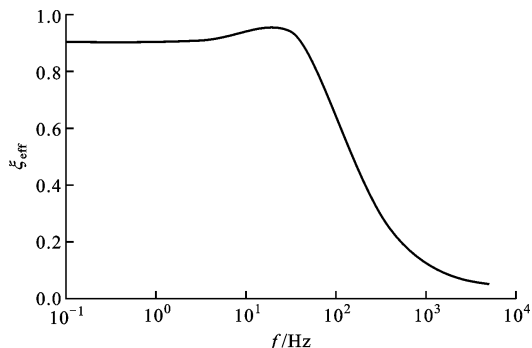


图 12 双离子风效应随电压频率的变化

的减小先增大后减小, 在 f 为 15 Hz 时变化最大, 这与理论分析变化规律比较相符。由于本文中离子浓度比并不是准确选取该试验工况下的值, 且与试验存在误差等, 使离子风效应程度最大值对应的频率与试验出现了偏差。

3 结 论

(1) 加载 f 为 100~10 Hz 的交流电场, 火焰在水平方向均出现拉伸变形; 随电压频率的减小, 火焰变形程度逐渐增大, 接近 15 Hz 时最大。

(2) 与未加载电压相比, 交流电场作用下平均火焰传播速度均有所提高, 且随电压频率的减小先增大后减小, 在 f 为 15 Hz 时最大, 增大率为 81.69%。这说明交流电场对火焰的促进作用随电压频率的减小先增大后减小, 在 15 Hz 附近促进效果最显著。

(3) 交流电场作用下 P_{max} 增大, t_p 缩短; 随电压频率的减小, P_{max} 先增大后减小, t_p 则相反, 但均在接近 15 Hz 时变化最明显, 比未加载电压分别增大 19.90%、-42.23%。初始燃烧期和主燃烧期变化与峰值到达时间相一致, 比未加载电压时减少了 29.52%、44.02%。

参考文献:

- [1] 路林, 苗海燕, 黄佐华, 等. 天然气在不同初始温度和压力下的燃烧特性研究 [C]//中国工程热物理学会 2008 年燃烧学学术会议. 北京: 中国工程热物理学会, 2008: 1771-1774.
- [2] 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 Technology, 2008, 22(2): 312-319.
- [3] WON S H, RYU S K, KIM M K, et al. Effect of electric fields on the propagation speed of tribrachial flames in coflowjets [J]. Combustion and Flame, 2008, 152(4): 496-506.
- [4] SÁNCHEZ-SANZ M, MURPHY D C, FERNÁNDEZ-PELLO C. Effect of an external electric field on the propagation velocity of premixed flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3463-3470.
- [5] DUAN H, WU X, ZHANG C, et al. Experimental study of lean premixed CH₄/N₂/O₂ flames under high-frequency alternating-current electric fields [J]. Energy & Fuels, 2015, 29(11): 7601-7611.
- [6] KIM M K, CHUNG S H, 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.
- [7] 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.
- [8] GAN Y, LUO Y, WANG M, et al. Effect of alternating electric fields on the behaviour of small-scale laminar diffusion flames [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 89: 306-315.
- [9] VEGA E V, SHIN S S, LEE K Y. NO emission of oxygen-enriched $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ premixed flames under electric field [J]. *Fuel*, 2007, 86(4): 512-519.
- [10] 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.
- [11] HUANG Z, ZHANG Y, ZENG K, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146(1/2): 302-311.
- [12] CHA M S, LEE Y. Premixed combustion under electric field in a constant volume chamber [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2012, 40(12): 3131-3138.
- [13] PRAGER J, RIEDEL U, WARNATZ 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] JONES H R N, HAYHURST A N. Measurements of the concentrations of positive and negative ions along premixed fuel-rich flames of methane and oxygen [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 166: 86-97.
- [15] HAYHURST A N, GOODINGS J M, TAYLOR S G. The effects of applying electric fields on the mass spectrometric sampling of positive and negative ions from a flame at atmospheric pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(12): 3249-3262.
- [16] CHOI S, BISETTI F, CHUNG S H. Simulation of electron and ion transport in methane-air counter flow diffusion flames [C/OL]//2010 63rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics. American Physical Society. [2015-11-15]. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010APS.DFD.LU005C>.
- [17] LABUDA S, KARRER M, SUTTON J, et al. Numerical study of methane/air flame ion composition at high pressures and temperatures [C]//Proceedings of the European Combustion Meeting. Cardiff, UK: University of Twente, 2011: 1-5.

(编辑 苗凌)

(上接第12页)

- [7] HESTENES D. New foundations for classical mechanics [M]. New York, USA: Kluwer Academic Publisher, 2002: 2-26.
- [8] PERWASS C. Geometric algebra with applications in engineering [M]. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2009: 160-180.
- [9] ROSENHAHN B, SOMMER G. Pose estimation in conformal geometric algebra; part 1 The stratification of mathematical spaces [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2005, 22(5): 27-48.
- [10] 张立先. 基于几何代数的机构运动学及特性分析 [D]. 河北秦皇岛: 燕山大学, 2008: 48-51.

[本刊相关文献链接]

- 李海涛, 郭俊杰, 邓玉芬, 等. 数控机床几何精度的位姿测量原理. 2016, 50(11): 62-68. [doi:10.7652/xjtuxb201611010]
- 曹建安, 朱鑫, 吴昊, 等. 一种改进的空间全方位旋转角度测量方法. 2016, 50(10): 1-7. [doi:10.7652/xjtuxb201610001]

- 刘贵杰, 刘鹏, 穆为磊, 等. 采用能耗最优改进蚁群算法的自治水下机器人路径优化. 2016, 50(10): 93-98. [doi:10.7652/xjtuxb201610014]
- 秦友蕾, 曹毅, 陈海, 等. 两移动三转动完全解耦混联机器人机构型综合. 2016, 50(1): 92-100. [doi:10.7652/xjtuxb201601015]
- 刘冠初, 熊静琪, 乔林, 等. 四足机器人自由步态规划建模与算法实现. 2015, 49(6): 84-89. [doi:10.7652/xjtuxb201506014]
- 闫志远, 杜志江, 吴冬梅. 手术机器人运动再现及最优布置系统. 2013, 47(12): 116-122. [doi:10.7652/xjtuxb201312020]
- 张晓艳, 孙建桥, 丁千. 五自由度机械臂的运动学分析及及时滞控制. 2013, 47(10): 103-108. [doi:10.7652/xjtuxb201310018]
- 杨德伟, 冯祖仁, 张翔. 新型三臂巡线机器人机构设计及运动分析. 2012, 46(9): 43-48. [doi:10.7652/xjtuxb201209009]

(编辑 葛赵青)