

DOI: 10.7652/xjtuxb201511004

交流电场气动效应对球形传播火焰影响的数值研究

李超¹, 张聪¹, 吴筱敏^{1,2}, 高忠权¹

(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: 为了验证电场对球形传播火焰的影响机理,通过采用给球形传播火焰锋面组分添加交变动量源项的方法,模拟了交流电场作用下火焰锋面受力产生的气动效应,以预测电场对球形传播火焰影响的机理。在 N-S 方程中通过为火焰锋面添加以流动时间 t 函数形式的水平方向动量源项并采用 Fluent 软件,来模拟交流电场对甲烷-空气球形传播火焰的拉伸影响,模拟时过量空气系数为 1.6,体积力有效值恒为 $30\ 750\ \text{N}/\text{cm}^3$,交变频率分别为 10 Hz、100 Hz 和 1 000 Hz。模拟结果表明:在交流电场下,低频时电场对火焰的拉伸作用较为明显,在此阶段气动效应是电场对火焰形变产生影响的主要因素;高频时没有发现火焰出现明显的拉伸现象,可以推断此时气动效应不是电场对火焰影响的主要因素;气动效应的界定频率的数量级可以通过数值模拟来估计,约在 $10^2 \sim 10^3\ \text{Hz}$ 左右。

关键词: 电场;火焰拉伸;气动效应;数值模拟

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)11-0020-06

Numerical Simulation for AC Electric Field Aerodynamic Effect on Spherically Expanding Flame

LI Chao¹, ZHANG Cong¹, WU Xiaomin^{1,2}, GAO Zhongquan¹

(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: To verify the mechanism of electric field acting on spherically expanding flame, by adding alternating momentum source items to flame surface, the aerodynamic effect under an AC electric field is simulated to predict the mechanism that electric field affects spherically expanding flame. CFD software Fluent is used to simulate the stretch effect resulting from AC electric field acting on methane/air premixed flame. A horizontal momentum source term consisting of flowing time is added into N-S equation, and excess air coefficient is taken as 1.6, volume force as $30\ 750\ \text{N}/\text{cm}^3$, and AC frequency as 10 Hz, 100 Hz and 1 000 Hz, respectively. The results show that for low frequency AC field, stretch effect on the flame is more obvious, aerodynamic effect gets the primary reason of flame deformation in this stage; for high frequency AC field, stretch effect on flame surface has not been found. Thus the magnitude of effective frequency is estimated within $10^2\text{--}10^3\ \text{Hz}$.

Keywords: electric field; flame stretch; aerodynamic effect; numerical simulation

电场助燃技术和等离子体助燃技术,在近些年逐渐成为内燃机以及航空发动机领域研究的重点。这项技术的原理,是将能量有选择性地传递给燃烧场中的正离子、电子及中性粒子,从而起到促进燃烧的作用。国内外的研究表明,通过使用电场助燃技术,火焰的稳定性、传播速度以及火焰燃烧速度明显提升。此外,通过结合稀燃技术,还能有效降低 NO_x 和烟灰等排放。

Calcote 等在电场对烛形火焰的研究中发现,加载电场可以促进火焰面反应物的化学电离,通过调节加载电场的大小和正负极性,可以对火焰进行拉伸和压缩调节^[1]。Hu 等在电场对烛形火焰形状的影响研究中发现,在加载了 3 kV 的电压后,某一固定高度下反应物、产物以及中性中间产物的质量分数差别并不大,而带电离子的浓度变化却因为电场的加载而出现明显的差异^[2]。Saito 等在本生灯纵向加载电场时发现,火焰位置的上下火焰极限点发生了改变,锋面及附近区域的湍流度增强,火焰温度升高,火焰传播速度增大^[3]。Volkov 等研究了直流电场对平面火焰的作用,结果表明电场对于平面火焰的绝热火焰传播速度最多能有 12% 的提升,激光诱导荧光检测 OH 自由基的浓度和分布没有明显变化^[4]。Belhi 等使用简化后的化学反应动力学模型,研究了本生灯层流火焰的离子浓度分布^[5]。Wisman 等在电场控制丙烷空气预混热扩散不稳定性研究中发现,给本生灯火焰加载正电场后,化学反应中的带电粒子,如 H_3O^+ 、 HCO^+ , 趋于向未燃预混区迁移,预混区的预热作用提升了燃烧的稳定性和降低了 Le 数^[6]。

对于非稳态传播火焰的研究,Cha 通过实验研究发现,电场对球形传播火焰的影响不完全是“离子风”效应的作用,还存在其他因素的影响^[7]。吴筱敏等通过实验验证了不同的过量空气系数、初始压力、交流电频率、电场强度和高压电极结构对球形传播火焰的影响,同时发现在球形传播火焰轴线方向上通过加载电场力对轴线上的火焰传播具有促进作用,但是同时会抑制径向上的火焰传播,这种电场对火焰的影响在高频交流电场下比直流更加明显^[8-9]。

综上所述,电场对传播火焰的影响机理与电场对驻定火焰的影响机理存在一定的差异,此外直流电场与交流电场对火焰影响的机理也存在一定的差异,目前也没有新的理论和相关的数值研究验证电场对球形传播火焰的影响机理。因此,本文通过采用在球形传播火焰锋面组分添加交变动量源项的方

法,模拟了交流电场作用下火焰锋面受力产生的气动效应,通过对相关的数值结果进行分析,预测了电场对于球形传播火焰影响的机理。

1 理论研究

1.1 现有理论

现有的电场对火焰影响的主流理论大致分为两种,一是以离子风理论为主的气动效应,另一种是电场作用下化学反应动力学的电化学反应效应。

离子风效应^[10-11]主要是指,对燃烧的火焰施加电场,火焰锋面上由化学离子化产生的离子和电子受电场力的作用被分离、加速,并在加速和运动过程中与中性分子发生碰撞,在发生碰撞的同时将动量传递给中性分子。由于离子的质量远大于电子的质量,而离子的平均自由程很短,所以发生碰撞后离子会再次被电场加速。这样周而复始使得大量中性分子定向移动,由此形成了已燃区与未燃区动量和能量交换的理论。

电化学反应主要是指,电场加载到火焰之上,能量直接添加到了反应区的各组分之上,进而反应区的离子被活性化且发生电离,由此降低了反应时所需活化能的要求,使相同工况下该区域的化学反应更易进行,火焰稳定性、燃烧速率等得以提升。

1.2 现有理论存在的问题

离子风效应和电化学反应效应大多是基于驻定火焰的,如本生灯火焰、平面驻定火焰和烛形火焰等,驻定火焰实验中最终观察到的结果通常是一种累积效应,对加载电场后离子的真正迁移路径和火焰面的能量密度分布等无法进行观察和分析,因此从驻定火焰上得到的理论和实验结果存在一定的局限性。

对于传播火焰,由于火焰锋面的位置会随时间发生变化,因此离子的迁移过程等会受到该点离子存在时间的约束,在传播火焰中的离子也不像驻定火焰那样通过累积达到新的平衡点。所以,相比基于驻定火焰研究,通过研究传播过程中电场对火焰的影响,可以得到更加合理的理论解释。

2 数值研究

2.1 数值方法

正常情况下甲烷-空气预混火焰锋面带正电的粒子主要是 CHO^+ 、 CH_3^+ 、 H_3O^+ 等,其中 CHO^+ 、 CH_3^+ 出现时间较早,而 H_3O^+ 出现时间较晚^[5],但是为了保证数值计算的效率,采取火焰锋面不区分物种且统一添加动量源项的简化方法,可以模拟电

场力对火焰锋面内离子的作用。从化学反应动力学角度分析,带电粒子对燃烧反应的影响很小,因此大多数燃烧简化机理是将这些物质视为非敏感性物种。

本文主要是讨论交流电场气动效应对球形传播火焰的影响,并通过在水平方向上添加交变的体积力来模拟交流电场气动效应的影响。这种方法在不考虑电化学效应且只考虑气动效应时是可行的。

2.2 数值模型

数值模拟使用 Fluent 软件进行,模型采用二维封闭容弹燃烧模型,计算区域如图 1 所示,尺寸、边界条件和分区如表 1 所示。数值计算通过求解 Navier-Stokes 方程完成,燃烧模型为非稳态甲烷-空气预混单步反应模型^[12],过量空气系数为 1.6,反应式以及反应速率表达式如下

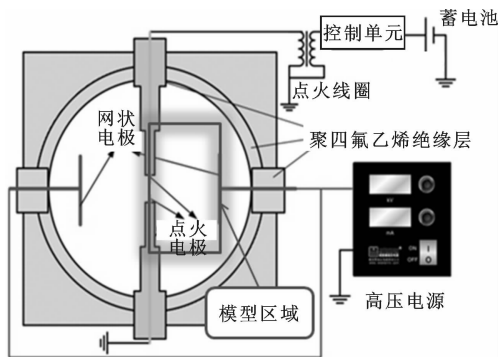
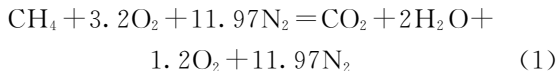


图 1 数值计算区域示意图

表 1 模型参数及数值

参数	参数描述
计算域大小	35 mm×70 mm
点火区	左部中心 $r=1$ mm 半圆
预混区	除点火区外的空间
网格总数	39 405
网格最大尺寸	小于 1 mm
网格最小尺寸	0.2 mm, 在点火区
网格属性	三角形非均匀网格
计算时间步长	10^{-7} s



$$\omega = 9.76 \times 10^{14} e^{-21952.1/T} C_{\text{CH}_4} C_{\text{O}_2} \quad (2)$$

层流燃烧采用两部矫正的 PISO 算法进行隐式迭代,计算结果均为二阶精度。体积力采用 UDF 法、通过向 Navier-Stokes 方程中特定粒子添加 x 向动量源项来实现,即

$$\rho \frac{Du}{Dt} = k_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{V} \right) \right] +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \dot{O} \quad (3)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为矢量速度 $\mathbf{V}$ 在 x 、 y 、 z 方向的分量; k_x 、 k_y 、 k_z 分别为外部作用于单位质量流体的体积力沿 x 、 y 、 z 方向的分量; p 为压力; ρ 为密度; μ 为动力黏度; $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$; t 为时间;

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}.$$

式(3)为 Navier-Stokes 方程沿 x 向动量守恒方程的一般式,其 $\dot{O}$ 为数值计算式添加的体积力源项。由于模拟的是交变体积力,因此源项是时间 t 的正弦函数,表达式如下

$$\dot{O} = \begin{cases} 2^{1/2} F_{\text{const}} \sin(2\pi\omega t), & 550 \text{ K} < T < 1600 \text{ K} \\ 0, & 1600 \text{ K} < T < 550 \text{ K} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_{const} 是交变体积力的有效值; ω 是交流频率。

源项的添加是使用 C 语言通过编写子程序完成的,火焰锋面粒子的筛选通过当前粒子的温度进行(见式(4)),体积力有效值的数量级通过 David^[13]等在驻定火焰中测量得到的离子浓度 C (数量级约 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)、实验高压电极上的加载电压 U (10 kV)、基元电荷电量 e ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$) 以及高压电极与点火电极间的距离 d (35 mm) 通过 $F = eUC/d$ 估算得到。由于采用在火焰面统一添加体积力的方法,因此本文对使用的交变体积力的有效值进行了放大,体积力大小始终为 30750 N/cm^3 ,而主要变量是 ω 。

3 数值模拟结果

图 2~图 5 列举出了不添加交流体积力以及添加 30750 N/cm^3 体积力时频率分别为 10 Hz、100 Hz 和 1000 Hz 共 4 种情况下点火后 0.002~0.008 s 火焰锋面传播情况。

以不添加体积力的数值模拟结果(见图 2)为基准,通过将图 3 和图 4 与基准结果对比可以看出,在低频情况下,火焰因受电场力的影响而被拉伸,且随着交变频率的增大而增大。由于加载的体积力是水平方向的,因此在水平方向上观察到了明显的拉伸作用,而在点火位置的竖直方向上火焰传播受到了明显的抑制,如图 3b~3d 及图 4a~4b 所示。当时间到达 0.005 s 后,10 Hz 下电场方向依然保持着与初始时一致,100 Hz 下电场方向开始掉转,此时火焰发生变形且由于体积力始终作用于火焰面上方,所以出现了图 4c~4d 中火焰面向左侧拖拽的现象,

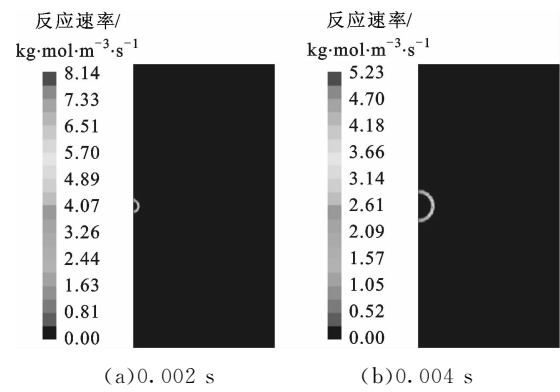


图 2 不添加体积力的火焰锋面传播示意

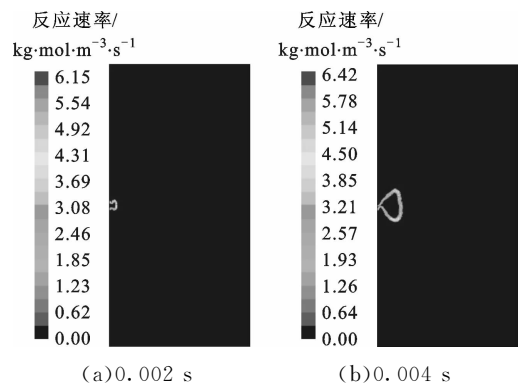


图 4 体积力 30 750 N/cm^3 、交变频率 100 Hz 的火焰锋面传播示意

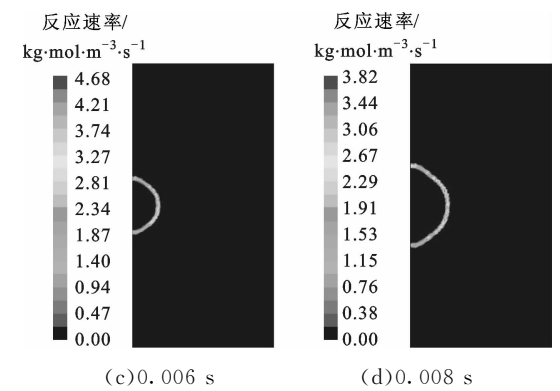


图 3 体积力 30 750 N/cm^3 、交变频率 10 Hz 的火焰锋面传播示意

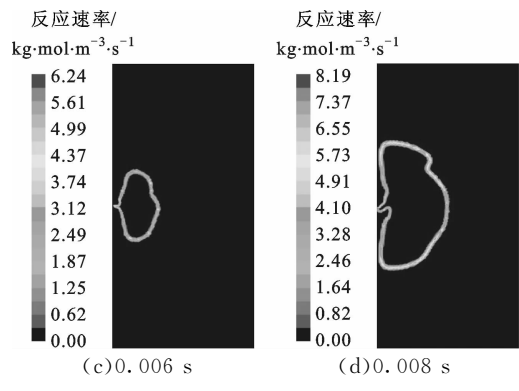


图 5 体积力 30 750 N/cm^3 、交变频率 1 000 Hz 的火焰锋面传播示意

这个结果与直流电场作用于球形传播火焰所得到的结果相同,即在此阶段气动效应可以有效影响火焰。当交变频率升高到 1 000 Hz 时,火焰的拉伸趋势随着频率的增大而逐渐减小(见图 5),即在高频情况下,给火焰锋面加载交流体积力没有产生气动效应。

图 6 为体积力为 $30\ 750\ \text{N/cm}^3$ 、交变频率分别为 100 Hz 和 1 000 Hz 且在 0.008 s 时的速度场矢量图。通过对比可以发现,锋面粒子的定向迁移在 100 Hz 下较为明显,迁移路径主要沿火焰面进行。由于迁移的存在,火焰锋面内粒子浓度分布呈现出明显的不均匀性,这种浓度差异引起的化学反应速率变化可以很好地解释火焰受电场力后的变形现象。此外,伴随着迁移过程,在火焰锋面内外还出现了涡流,涡流对已燃区和未燃区的扰动会导致火焰面的形变进一步加剧。在 1 000 Hz 下,火焰锋面内的离子没有明显出现迁移的现象,因此粒子沿火焰面的分布是均匀的,不同火焰面位置的化学反应速率不会因为粒子浓度的差异而不同,同时高频交流电场下也没有形成涡流,火焰可以持续维持圆形进行传播。

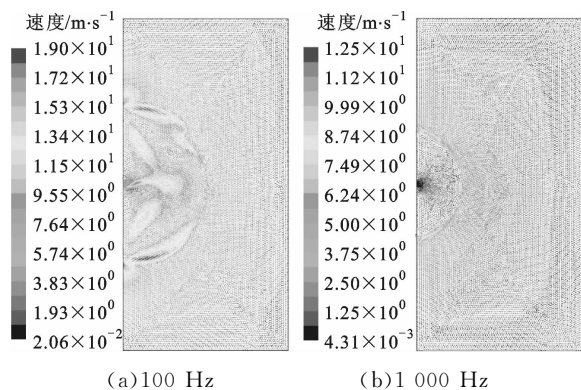


图 6 体积力 $30\ 750\ \text{N/cm}^3$ 下点火后 0.008 s 的速度场

4 数值模拟结果分析

根据 Kim 的理论^[14],在加载电场力后,被加速的带电正离子和电子碰撞中性粒子需要一定的响应时间,这个响应时间与电场强度、带电离子浓度、交变频率等因素有关。

按照理论计算,1 000 Hz 频率的交变电场下,尽管响应无因次时间非常短,约为 0.02,但是由带电离子与中性粒子间的碰撞而驱动的粒子只占该区域离子总量约 4%,因此在相同的有效体积力和离子浓度情况下,高频交流电场无法产生明显的气动效应,而且随着频率的进一步提高,这种影响力还会下降。100 Hz 频率的交变电场下,响应需要无因次

时间约为 0.2,能够有效驱动的粒子数百分比大约为 30%,尽管响应较慢,但是由于驱动的离子量比 1 000 Hz 频率的高,因此得到的火焰形变相对较大。10 Hz 频率交变电场下,响应需要无因次时间约为 2,能够有效驱动的粒子数百分比大约为 95%,但是由于该频率太低,致使火焰锋面在受作用的时间段内的电场力并没有达到理论有效值,而是维持在较低水平上,因此 10 Hz 频率下所得到的火焰拉伸率比 100 Hz 小。

Kim 的理论可以通过图 7 进行概括,即式(4)中的 $\sin(2\pi\omega t)$ 与流动时间 t 的关系。假设在传播火焰中粒子的受力作用时间为 0.005 s,此时在 1 000 Hz 交流电场下体积力已经运行了 5 个周期,由于体积力的方向是往复变换的,因此 5 个周期的交变体积力并没有对火焰面粒子的迁移产生大的扰动。对于 100 Hz 的交流电场,0.005 s 时间内电场方向始终如一,且时间恰好为 1/2 周期,此时交变电场的平均值可以达到有效值,因此在 100 Hz 情况下,火焰面在传播过程中会有明显的被扰动现象。当交变频率为 10 Hz 时,尽管在 0.005 s 时间内电场方向仍然维持不变,但是由于周期太长,使得该时间段内变频系数均值在一个很低的位置上,图 7 中约为 0.147(100 Hz 为 0.707),因此 10 Hz 频率的交变电场对传播火焰的扰动比 100 Hz 小。

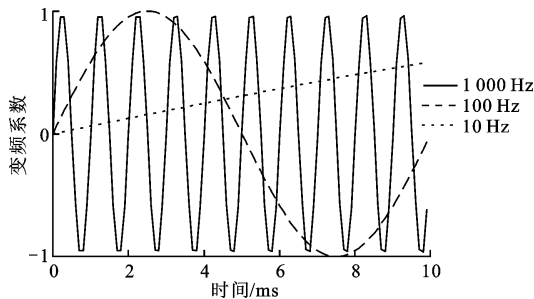


图 7 变频系数随时间的变化

5 结 论

采用火焰锋面添加交变体积力的方法可以有效模拟电场对球形传播火焰气动效应的影响,通过对比和分析不同交流频率对火焰传播过程和流场的变化的影响,可以得出以下结论。

(1)在低频情况下,火焰锋面受力后锋面内粒子会沿着火焰面迁移,此时电场对传播火焰影响的主要因素应为粒子迁移产生的浓度分布不均和火焰面内外两侧形成的涡流。

(2)在高频情况下,没有发现明显的离子定向迁

移,即没有气动效应使火焰产生形变。

(3)交流电场对火焰气动效应的影响存在最佳频率,在本文 $30\ 750\ \text{N}/\text{cm}^3$ 体积力、1.6 过量空气系数的甲烷-空气预混球形传播火焰条件下,最佳频率约在 $10^2\sim 10^3\ \text{Hz}$ 之间。

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] HU Jing, 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 and Fluid Science*, 2000, 21(1/2/3): 124-133.
 - [3] SAITO M, SATO M, SAWADA K. Variation of flame shape and soot emission by applying electric field [J]. *Journal of Electrostatics*, 1997, 39(4): 305-311.
 - [4] VOLKOV E N, SEPMAN A V, KORNILOV V N, et al. Towards the mechanism of DC electric field effect on flat premixed flames [C]//*Proceedings of the European Combustion Meeting*. Pittsburgh, PA, USA: Combustion Institute, 2009: 242385613.
 - [5] 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.
 - [6] WISMAN D L, MARCUM S D, GANGULY B N. Electrical control of the thermodiffusive instability in premixed propane-air flames [J]. *Combustion and Flame*, 2007, 151(4): 639-648.
 - [7] CHA M S, LEE Y Y. Premixed combustion under electric field in a constant volume chamber [J/OL]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012. [2014-12-01]. <http://dx.doi.org/10.1109/tps.2012.2206120>.
 - [8] 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.
 - [9] 康婵, 杨星, 刘杰. 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 (1): 31-36
- KANG Chan, YANG Xing, LIU Jie. The effect of negative electric field with point electrode and mesh

electrode to premixed lean combustion flame [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(1): 31-36.

- [10] VAN 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.
- [11] VANDENBOOM 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.
- [12] LEE S T, TSAI C H. Numerical investigation of steady laminar flame propagation in a circular tube [J]. *Combustion and Flame*, 1994, 99 (3/4): 484-490.
- [13] WISMAN D L, RYAN M D. OH PLIF measurements in a low electric field perturbed CH_4 /air flame [C]//*46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reston, VA, USA: AIAA, 2008: 1400-1409.
- [14] 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.

[本刊相关文献链接]

- 杨振中,秦朝举,宋立业,等.传统缸内壁面传热模型在氢内燃机中的适用性.2015,49(9):36-40. [doi:10.7652/xjtuxb201509007]
- 孙天旗,刘杰,段浩,等.不同电极下电场对甲烷/空气稀燃火焰影响的试验研究.2015,49(3):38-43. [doi:10.7652/xjtuxb201503007]
- 刘兵,李春艳,孙天旗,等.离子电流法测量 CH_4/H_2 混合气燃烧火焰传播速度的实验研究.2015,49(1):40-45. [doi:10.7652/xjtuxb201501007]
- 段浩,房建峰,孙天旗,等.不同电极结构下电场对甲烷/空气火焰的影响.2014,48(9):62-67. [doi:10.7652/xjtuxb201409011]
- 魏若男,周蓉芳,周竹杰,等.双电极点火时间间隔对天然气-空气预混合气层流燃烧的影响.2014,48(1):7-12. [doi:DOI:10.7652/xjtuxb201401002]
- 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.2014,48(1):31-36. [doi:10.7652/xjtuxb201401006]

(编辑 苗凌)