

DOI: 10.7652/xjtuxb201601020

负直流及低频交流电场对 预混火焰影响的实验研究

崔雨辰¹, 侯俊才¹, 吴筱敏^{1,2}, 施璐³

(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, 723001, 陕西汉中;
3. 南京铁道职业技术学院机车车辆系, 210031, 南京)

摘要: 为了比较直流及低频交流电压的助燃效果,在常温常压下,对定容燃烧弹内的网状电极分别加载负直流和低频交流电压,研究了两种电压对甲烷/空气预混火焰的火焰形状、火焰传播速率和燃烧压力的影响。结果表明:负直流和低频交流电压对平均火焰传播速率和燃烧压力均有一定的促进作用,且低频交流电压的助燃效果要强于负直流电压,随着低频交流电频率的降低,对火焰的促进作用增大。当过量空气系数为1.6时,与未加载电压相比,负直流电场(电压为-5 kV)和低频交流电场(频率为40、60、80、100 Hz,电压有效值为5 kV)作用下的平均火焰传播速率分别提高37.93%、72.41%、55.17%、48.28%和39.66%,相对燃烧压力增大量的最大值分别为0.23、0.65、0.58、0.48和0.28。

关键词: 负直流电场;低频交流电场;频率;火焰传播速率;燃烧压力

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)01-0131-08

Experimental Research on the Effects of Negative DC Electric Field and Low-Frequency AC Electric Field on Premixed Flame

CUI Yuchen¹, HOU Juncai¹, WU Xiaomin^{1,2}, SHI Lu³

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

3. Department of Locomotive Vehicle, Nanjing Institute of Railway Technology, Nanjing 210031, China)

Abstract: An experiment was conducted on a constant-volume combustion bomb at normal temperature and atmospheric pressure to investigate the effects of negative DC electric field and low-frequency AC electric field formed by the mesh electrodes on the flame shape, propagation speed and combustion pressure of premixed CH₄/air mixtures. The results show that both the negative DC electric field and the low-frequency AC electric field can increase the average flame propagation speed and the combustion pressure and low-frequency AC electric field performs better than the negative DC electric field. When the frequency of low-frequency AC is decreased, the promoting effect is increased. When the excess air ratio is 1.6, compared with the case without the voltage applied, the average flame propagation speeds of negative DC electric field at -5 kV and low-frequency AC electric fields at the frequencies 40, 60, 80 and 100 Hz and when the effective voltage is 5 kV, will have an increase of 37.93%, 72.41%, 55.17%, 48.28% and 39.66%, respectively; and the maximum increasing rates of the relative combustion pressure are

0.23, 0.65, 0.58, 0.48 and 0.28, respectively.

Keywords: negative DC electric field; low-frequency AC electric field; frequency; flame propagation speed; combustion pressure

在环境污染和能源短缺的背景下,电场辅助燃烧技术不失为一种提高能源利用率的有效思路,该技术可以使火焰传播速度提高^[1-3]、火焰稳定性增强^[4-6]以及碳烟排放降低^[7-9],其中所涉及电场大多集中在直流电场,对直流电场辅助燃烧机理的研究已经相对成熟。

为了进一步完善电场辅助燃烧的机理,近几年,国内外许多学者又对交流电场展开了研究。Cha等在定容燃烧弹中研究甲烷和丙烷两种燃料的预混火焰在1 kHz的交流电场作用下的火焰传播特性和稳定性时,发现在高压电场的诱导下火焰表面出现了褶皱^[10],这个褶皱结构能够缩短火核形成的时间和整个燃烧持续时间,同时增大初始燃烧期内的火焰传播速率。张扬等研究了高频交流电场($f=10$ kHz, U 为0~4 kV)对非预混甲烷/空气喷焰燃烧行为和NO排放的影响^[11],他们认为是热效应、离子风效应和电化学反应综合作用的结果导致了火焰形变以及CO、NO的排放随电压幅值呈非单调性的变化。Kim等研究了低频交流电场($f \leq 60$ Hz)和直流电场对层流预混本生灯火焰稳定性的影响^[12],利用火焰内正、负离子共同引起的双离子风效应,成功解释了在低频区火焰吹熄速度随交流电场呈非单调性变化的行为。以上的研究大部分集中在高频交流电场上,对低频交流电场的研究也大多集中在对火焰稳定性的影响,很少涉及对火焰传播速率等其他参数方面的影响。本文通过大量实验,将不同频率的低频交流电场和负直流电场对甲烷/空气预混火焰传播以及燃烧特性的影响进行了对比研究。

1 实验装置及方法

定容燃烧装置是本实验的主要装置,如图1所示,该套装置由定容燃烧弹、点火系统、配气系统、数据采集系统、高速摄像及纹影光路系统以及高压电系统组成。

定容燃烧弹是用45号钢粗锻后精加工而成的正方体,其内腔是直径为130 mm、长为130 mm的圆柱形空腔。容弹前后两侧装有直径为170 mm、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。为避免因高压电极和容弹发生高压放电而导致事故发生,在容弹内侧腔体安装了由

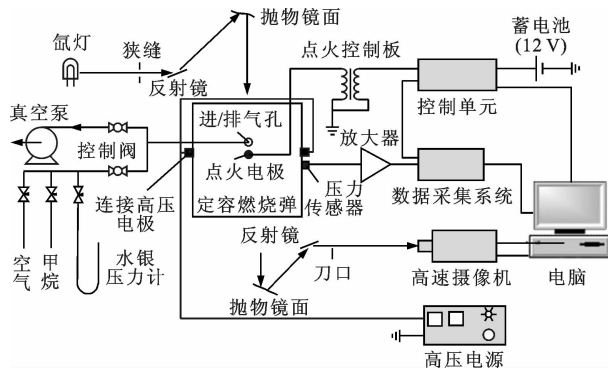


图1 实验装置示意图

聚四氟乙烯加工而成的绝缘套,厚度为8.5 mm。点火电极是一对直径为2 mm且由45号钢加工而成的针状电极,两点火电极分别对称安装在容弹上下面的中心处,电极间距为2 mm。网状电极是由45号钢锻造而成的镂空圆盘,对称地安装在容弹两侧左右面的中心处,距点火电极水平距离为35 mm。实验时将负直流和低频交流电压加在网状电极上,点火电极接地,形成点-网电场分布结构。电极结构及其在容弹中的安装位置如图2所示。

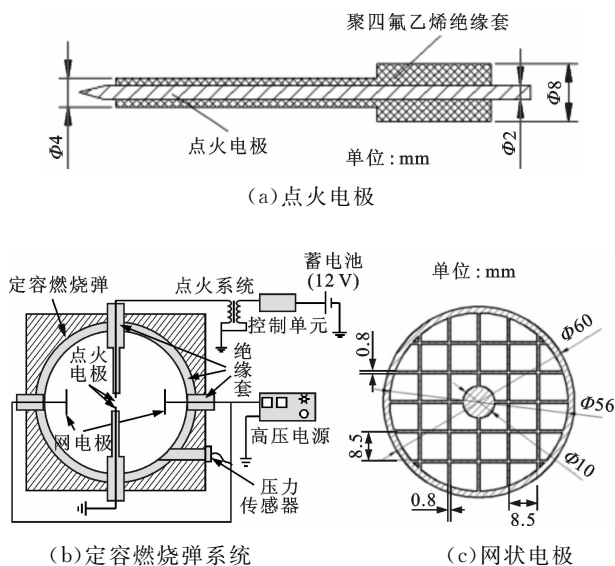


图2 电极和定容燃烧弹系统

实验中用到直流和低频交流两种高压电源。直流高压电源的型号是 Wisman DEL30N45, 输出电压范围为-30~0 kV, 功率范围为1.5~45 W。低频交流电源的型号为 Hv20 kV/10-200 Hz, 可测量的频率范围为10~200 Hz, 功率范围为0~10 W,

输出电压变化为 $\pm 10\%$ 。数据采集系统包含压力传感器、电荷放大器和数据采集仪 3 个部分,主要用于采集容弹内的燃烧压力。型号为 Kistler4075A10 的压电式绝对压力传感器,用于接收燃烧过程中容弹内的压力变化信号,可测量的压力范围为 $0 \sim 25$ MPa,误差为 $\pm 0.5\%$ 。电荷放大器用于放大压力传感器接收到的信号,型号为 Kistler4618A,与压力传感器匹配校准。数据采集仪是 DL750 动态测试仪,由日本 YOKOGAMA 公司研制,最高采样频率可达 10 MHz,本实验中设置的采用频率为 10 kHz。高速摄像机用于记录火焰传播过程,该摄像机是美国 Redlake 公司生产的 HG-100K,拍摄速度为 5 000 帧/s。

在常温、常压下,向容弹中配置过量空气系数 λ 为 1.0、1.6 的两种甲烷/空气混合气,并静置 2 min 使其充分混合,同时向网状电极分别施加 $U = -5$ kV 的直流电压和电压有效值为 5 kV 且频率 f 为 40、60、80、100 Hz 的低频交流电压,点火的同时触发高速摄像机拍照和压力传感器记录压力数据。燃烧完毕后,先关闭电源,用真空泵抽出废气,并通

入新鲜空气多次冲洗容弹,防止残留废气对下次实验造成影响。每个工况点至少重复 3 次以上的实验,取最接近该工况实验平均值的数据作为处理数据。

2 结果与分析

2.1 电场数值模拟结果

图 3 为加载 $U = -5$ kV 的直流电压以及电压有效值为 5 kV 的低频交流电压后,容弹内对应的电场数值模拟结果。由于电极和容弹的对称性,对电场云图和电场矢量图各取一半进行分析。从图 3 中可以看出,加载负直流电压时,网状电极间的电场方向由点火电极近似水平地指向网状电极,水平方向上的电场强度约为 $6.2 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^5$ V/m。加载低频交流电压时,电压波峰和波谷对应的网状电极间的电场方向也均近似水平,两者的方向正好相反,而波峰、波谷对应的电场强度分布几乎完全相同,水平方向上的电场强度约为 $4.0 \times 10^4 \sim 3.4 \times 10^5$ V/m,电场强度在点火电极的尖端附近空间最大,随着离容弹中心距离的增大先逐渐减小后增大。

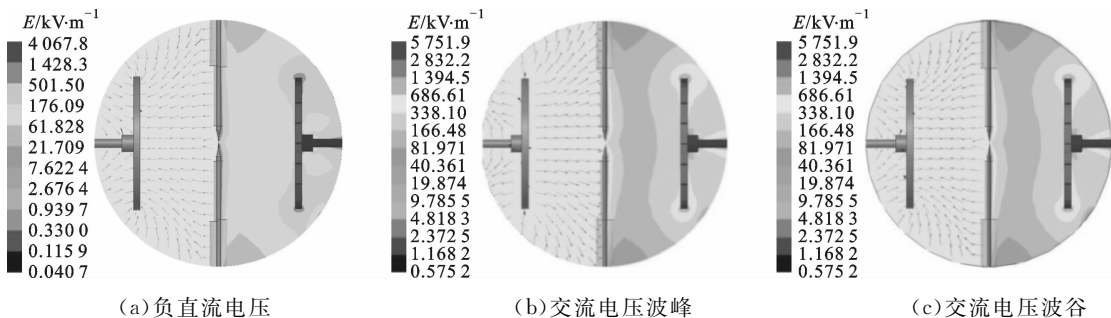


图 3 电场数值模拟结果

2.2 火焰传播图像

图 4 是未加载和加载 $U = -5$ kV 的负直流电压以及电压有效值为 5 kV 的低频交流电压时的火焰传播纹影图片。由图 4 可以看出:火焰在未加载电压时基本呈球形向外扩展;加载负直流和低频交流电压后,火焰在竖直方向的变化都不大,在水平方向上均得到了一定程度的拉伸,火焰近似呈椭球形向外传播。在低频交流电场作用下,随着交流电频率的降低,火焰在水平方向的拉伸越明显,特别是 $f = 40$ Hz 时,火焰拉伸最剧烈,火焰水平两端呈现尖状。

负直流电场对火焰的影响源于离子风效应。火焰在燃烧过程中,火焰前锋面上发生燃烧化学反应产生很多正、负离子,正离子主要有 CH_3^+ 、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$ 、

CH_5O^+ 和 CHO^+ 等^[13],负离子主要有 O_2^- 、 OH^- 、 O^- 和 CHO_2^- 等^[14],由于负离子在高温条件下易分解,因此在离子风效应中不考虑负离子的影响。加载负直流电压后,形成了由点火电极指向网状电极的电场,正离子在电场的作用下沿电场方向定向迁移,这大大增强了火焰前锋面在水平方向上与未燃区的能量交换,从而使得火焰横向发展得到促进,即为负直流电场作用下的离子风效应。

低频交流电场对火焰的影响主要源于热效应和双离子风效应^[12]。热效应是指当电场中存在较大电流时电能转换成热能而带入的能量,由于本实验中火焰中的电流很小,因而可以忽略热效应的影响。双离子风效应同时考虑了正、负离子引起的离子风,由于负离子浓度与正离子浓度的比值是不可忽视

的^[15],这意味着负离子引起的离子风效应也应当考虑。火焰中正、负离子的浓度差异导致了两者的碰撞响应时间不同,由正、负离子引起的存在碰撞响应时间差的离子风效应即为双离子风效应。由此可见,当低频交流电场的频率选取适当时,产生的双离子风效应可能强于直流电场的离子风效应。从图 4 中可以看出,当 f 为 40~100 Hz 时,低频交流电场对火焰的拉伸作用几乎均比负直流电场强,说明该频率段的双离子风效应发展比负直流电场作用下的离子风效应好。当 f 为 40~100 Hz 时,随着频率的增大,对火焰的拉伸作用呈逐渐递减的趋势,这是因为随着频率增大,离子获得的碰撞响应时间相对减少,双离子风效应发展有所减弱,从而对火焰的促进作用有所减小。

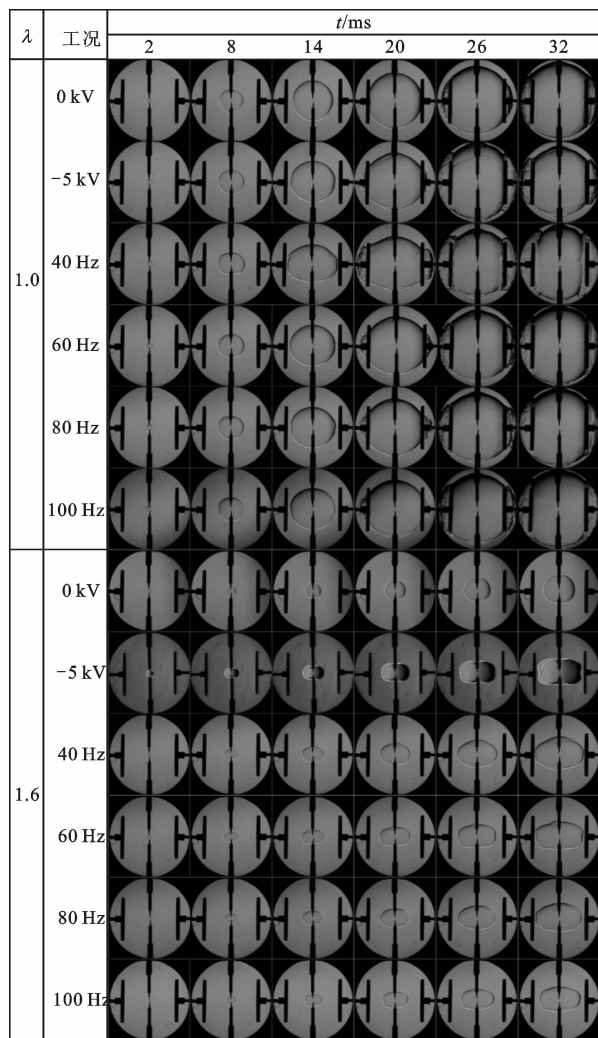


图 4 负直流和低频交流电压作用下的火焰传播图像

从图 4 中还可以看出, $\lambda=1.0$ 时各电压作用下的火焰在水平方向上没有明显拉伸,但随着过量空气系数的增大,即 $\lambda=1.6$ 时火焰在水平方向上的拉伸逐渐变得剧烈,各电压作用下的火焰在水平方向

上的发展均远远超过竖直方向上的发展。这可能是由于电场对火焰的作用是一个不断累积的过程,即(双)离子风效应是电场作用下的正(负)离子在经过短暂的分子自由程被加速后,通过碰撞将动量和能量传递给中性粒子,而正(负)离子在碰撞后又将周而复始地进行“加速—碰撞”循环。因此,传播速度越慢的火焰,其前锋面在电场中停留的时间越长,燃烧产生的正(负)离子就经过更多的“加速—碰撞”循环,这将使(双)离子风效应大大增强。由于未加电压时, $\lambda=1.0$ 时的火焰本身传播得相对较快,而 $\lambda=1.6$ 时的火焰传播得相对较慢,因而 $\lambda=1.6$ 时的火焰受到(双)离子风效应的促进作用更明显,由于发展越慢的火焰本身与未燃区的热量和质量交换越少,此时电场引起的热量和质量交换的增加对火焰的影响更明显。

2.3 火焰传播距离和火焰传播速率

2.3.1 火焰传播距离 由图 3、4 可知,负直流、低频交流电场对火焰在竖直方向上的影响较小,可忽略不计,本文中只讨论电场对火焰水平方向上的影响。本文中火焰传播距离 L 定义为火焰在水平方向上左右两边的火焰前锋面到容弹中心距离的平均值,即 $L=(L_1+L_2)/2$, L_1 、 L_2 的确定方式如图 5 所示。当 $L<6$ mm 时,火焰会受到点火能量产生的波动影响,而当 $L>25$ mm 时,容弹内温度和压力的变化会对火焰产生影响^[16-19],本文研究的火焰传播距离的范围为 6~25 mm。

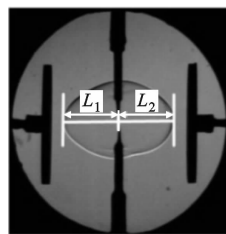


图 5 火焰传播距离示意图

图 6 是 $\lambda=1.6$ 时,未加载和加载 $U=-5$ kV 的负直流电压以及电压有效值为 5 kV 的低频交流电压时的火焰传播距离 L 随传播时间 t 的变化。由图 6 可知,未加载和加载电压后,火焰横向传播距离 L 随时间 t 几乎都呈线性增加,且在同时刻下, L 值按照加载低频交流电压(频率由低到高)、加载负直流电压以及未加载电压的顺序依次递减。

表 1 为两种电压作用下的火焰半径传播到 25 mm 所需时间 t_{25} 以及相比未加电压时的缩短比率 Δt_{25} 。由表 1 可知, $\lambda=1.0$ 时,未加电压时 $t_{25}=12.1$ ms,若选取的交流电压频率 $f\leq 30$ Hz,则电场

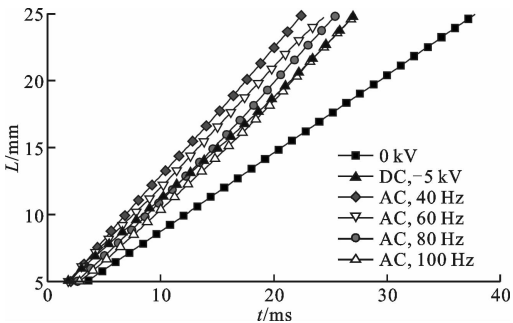


图 6 $\lambda=1.6$ 时负直流和低频交流电压作用下的火焰传播距离随时间的变化

方向至少需要 16.7 ms 才改变一次,即在本实验中当 $\lambda=1.0$ 时,电场方向在火焰传播到 25 mm 之前可能一直保持不变,此时低频交流电场对火焰的作用并不充分,本文选取交流电压频率 $f\geq 40$ Hz。与未加载电压相比,加载电压后的 t_{25} 要明显缩短,且低频交流电压的缩短程度要大于负直流电压,而频率越低的低频交流电压,缩短的程度越大。当加载电压一定时,混合气越稀, t_{25} 和 Δt_{25} 均越大,例如 $f=40$ Hz、 $\lambda=1.0, 1.6$ 时, t_{25} 分别为 10.4、22.2 ms, Δt_{25} 分别为 14.05%、41.27%。

表 1 火焰半径发展到 25 mm 所用的时间及其相比未加电压时的缩短比率

工况	$\lambda=1.0$		$\lambda=1.6$	
	t_{25}/ms	$\Delta t_{25}/\%$	t_{25}/ms	$\Delta t_{25}/\%$
0 kV	12.1		37.8	
DC, -5 kV	11.6	4.13	27.5	27.25
AC, 40 Hz	10.4	14.05	22.2	41.27
AC, 60 Hz	10.9	9.92	24.3	35.71
AC, 80 Hz	11.1	8.26	25.4	32.80
AC, 100 Hz	11.4	5.79	27.2	28.04

2.3.2 火焰传播速率 本文中定义火焰传播速率 S_L 为水平方向上的火焰前锋面与静止的容弹壁面的相对运动速度,即

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

图 7 是 $\lambda=1.6$ 时,未加载和加载 $U=-5$ kV 的负直流电压以及电压有效值为 5 kV 的低频交流电压时的火焰传播速率 S_L 随传播距离 L 的变化。从图中可以看出,火焰传播速率随火焰传播距离呈非线性变化,与未加载电压相比,加载电压后的火焰传播速率有了明显的提高,且低频交流电压对火焰传播速率的促进作用要强于负直流电压,而低频交流电的频率越低,其促进的程度越大。从图中还可

以看出,交流 40 Hz 和直流 -5 kV 作用下的 S_L 随着 L 先减小后增大,而其他电场作用下的 S_L 随着 L 先增大后减小。这可能是因为离子风效应的形成是一个累积的过程,交流 40 Hz 和直流 -5 kV 作用下的火焰,其离子风发展较为充分,而在火焰刚开始发展的一段时间,受离子风累积效应的影响,离子风作用不是很明显,受温度等诸多外界因素的影响,火焰传播速率可能会有所下降,但随着火焰进一步向外传播,离子风效应逐渐增强,火焰传播速率开始增大,因而也就出现了速率先减小后增大的现象。交流 60、80 和 100 Hz 由于频率相对较大,离子没有足够的碰撞响应时间,此时离子风效应发展不充分,但此时同一时间带电粒子受到的电场力方向交替改变的次数增多,因此粒子间的无规则碰撞加剧,这将产生一定的能量使得火焰传播速率有一定的提高,但由于这种促进作用十分有限,以致于火焰发展到后期的传播速率基本不变或有轻微减小。虽然这 3 种电场作用下的离子风发展不充分,但离子风效应仍然是影响火焰发展的主要因素,而随着频率的增加,离子风发展越来越不充分,因而也就出现了火焰传播速率随频率增大而减小的现象。

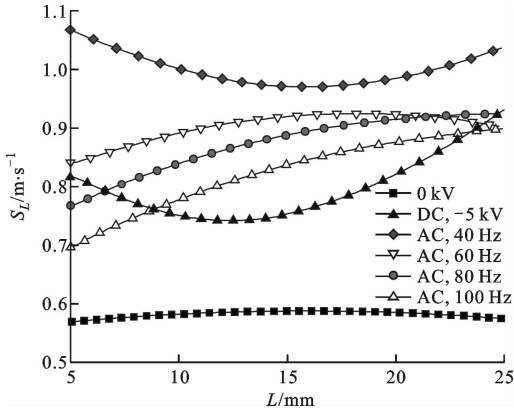


图 7 $\lambda=1.6$ 时负直流和低频交流电压作用下的火焰传播速率随火焰传播距离的变化

图 7 中有些速率曲线出现了相交的情况,比如直流 -5 kV 的速率线与 80、100 Hz 的速率线均有相交,这可能是由于点火的随机性和燃烧的不稳定性引起的。图中每一条曲线代表不同工况下的瞬时火焰传播速率随火焰传播距离的变化,由于实验中点火和燃烧的不稳定性,很有可能出现不同工况下的火焰传播到相同距离时火焰传播速率相等,因而也就会出现图中曲线相交的情况,但是就整体而言,火焰传播速率随加载电压和频率的不同呈一定规律的变化。

表 2 是两种电压作用下的平均火焰传播速率 $\bar{S}_L$ 及其相比未加电压时的增大率 $\Delta\bar{S}_L$ 。由表 2 可以看出,当过量空气系数一定时,加载电压后的平均火焰传播速率均比未加电压时的大,且 $\Delta\bar{S}_L$ 按加载负直流电压、加载低频交流电压(频率由高到低)的顺序依次递增。当加载电压一定时,混合气越稀, $\Delta\bar{S}_L$ 越大,例如 $f=100\text{ Hz}$ 、 $\lambda=1.0, 1.6$ 时, $\Delta\bar{S}_L$ 分别为 8.76% 和 39.66%。

表 2 平均火焰传播速率及其相比未加电压时的增大率

工况	$\lambda=1.0$		$\lambda=1.6$	
	$\bar{S}_L/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta\bar{S}_L/\%$	$\bar{S}_L/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta\bar{S}_L/\%$
0 kV	1.94		0.58	
DC, -5 kV	2.09	7.73	0.80	37.93
AC, 40 Hz	2.36	21.65	1.00	72.41
AC, 60 Hz	2.27	17.01	0.90	55.17
AC, 80 Hz	2.23	14.95	0.86	48.28
AC, 100 Hz	2.11	8.76	0.81	39.66

2.4 燃烧压力

为了更好地比较负直流和低频交流电场对预混火焰燃烧压力的促进作用,本文采用归一化方式处理燃烧压力,从而获得一个归一化相对燃烧压力增大率,即

$$\varphi = (P - P_0)/P_0 \tag{2}$$

式中: P_0 和 P 分别为未加载和加载电压时的瞬时燃烧压力值。

图 8 是 $\lambda=1.6$ 时,未加载和加载 $U=-5\text{ kV}$ 的负直流电压以及电压有效值为 5 kV 的低频交流电压时的相对燃烧压力的增大率 φ 随时间 t 的变化。从图中可以看出, φ 随 t 的增大先增大后减小。这主要是因为燃烧初期,容弹内燃料充足,火焰受电场的促进作用明显,燃烧压力迅速增大到一个峰值,随着燃烧的进行,容弹内的燃料逐渐消耗,电场的促进作用逐渐减弱,部分热量因火焰面与电极及容弹壁面的接触而损失掉,燃烧压力开始下降;加载电压后的压力与未加载电压时的相比有了较大幅度提高,低频交流电场作用下燃烧压力提高的程度比负直流电场作用下提高的程度大,且随着低频交流电频率的降低,燃烧压力增加的幅度越大,峰值出现时间提前得越多。

表 3 是两种电压作用下的相对燃烧压力增大率的最大值 $\varphi_{\max}$ 及出现时间 $t_{\max}$ 。从表中可以看出,过量空气系数一定时, $\varphi_{\max}$ 按加载低频交流电压(频率

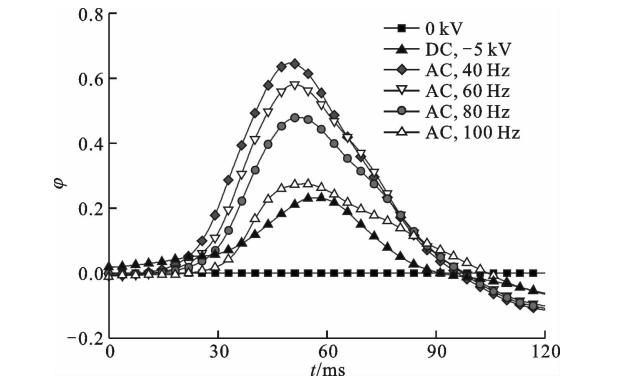


图 8 $\lambda=1.6$ 时负直流和低频交流电压作用下的相对燃烧压力增大率随时间的变化

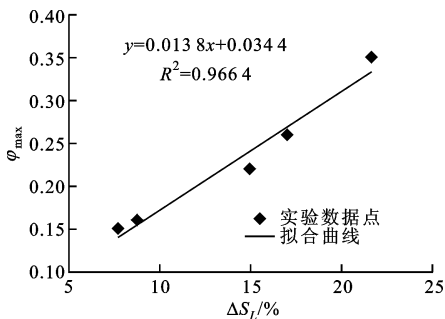
由低到高)、加载负直流电压的顺序依次递减, $t_{\max}$ 则呈完全相反的趋势。这说明低频交流电场对燃烧的促进作用优于负直流电场的促进作用,且低频交流电场的频率越低,电场的促进作用越明显。当加载电压一定、混合气越稀时,电场对火焰燃烧压力的影响越明显,例如 $f=40\text{ Hz}$ 、 $\lambda=1.0, 1.6$ 时, $\varphi_{\max}$ 的值分别为 0.35 和 0.65。

表 3 相对燃烧压力增大量的最大值及其出现时间

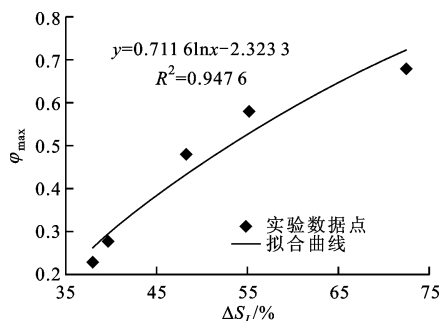
工况	$\lambda=1.0$		$\lambda=1.6$	
	$\varphi_{\max}$	$t_{\max}/\text{ms}$	$\varphi_{\max}$	$t_{\max}/\text{ms}$
DC, -5 kV	0.15	21.80	0.23	56.65
AC, 40 Hz	0.35	20.20	0.65	50.05
AC, 60 Hz	0.26	20.80	0.58	50.95
AC, 80 Hz	0.22	20.95	0.48	52.10
AC, 100 Hz	0.16	21.75	0.28	53.75

图 9 是由表 2 中的平均火焰传播速率增大量 $\Delta\bar{S}_L$ 和表 3 中的相对燃烧压力增大率的最大值 $\varphi_{\max}$ 拟合出来的曲线,从图中可以看出,无论是 λ 为 1.0 还是 1.6,拟合的曲线斜率均大于 0,且 R^2 均大于 0.9,即说明两者正相关。这可能是因为电场对火焰的拉伸作用使得火焰传播速率有所提高,而速率增大量越大时,火焰在相同时间内传播得更远,使得更多的未燃混合气参与燃烧,燃烧初期压力升高率增大,即对应的相对燃烧压力增大量增大。 $\lambda=1.0$ 时的拟合曲线是一条直线,即 $\varphi_{\max}$ 随 $\Delta\bar{S}_L$ 呈线性增长,而 $\lambda=1.6$ 时的拟合曲线是一条对数曲线,即 $\varphi_{\max}$ 随 $\Delta\bar{S}_L$ 呈对数增长。这是因为电场对稀燃火焰($\lambda=1.6$)的促进效果要远大于对当量比火焰($\lambda=1.0$)的促进作用,由于 $\lambda=1.0$ 时的 $\varphi_{\max}$ 和 $\Delta\bar{S}_L$ 整体较小,因而在有限的范围内($\Delta\bar{S}_L$ 为 5%~25%, $\varphi_{\max}$ 为 0.1~0.4), $\varphi_{\max}$ 随 $\Delta\bar{S}_L$ 可能呈线性增长,增长速度较

快,而 $\lambda=1.6$ 时的 $\Delta\bar{S}_L$ 和 $\varphi_{\max}$ 本身就较大($\Delta\bar{S}_L$ 为35%~75%, $\varphi_{\max}$ 为0.2~0.8),且燃烧压力不会无限制的增大,因而随着 $\Delta\bar{S}_L$ 的增大, $\varphi_{\max}$ 增长相对缓慢。



(a) $\lambda = 1.0$



(b) $\lambda = 1.6$

图 9 $\varphi_{\max}$ 和 $\Delta\bar{S}_L$ 的拟合结果

3 结 论

(1)无论加载负直流还是低频交流电场,火焰在水平方向均得到了不同程度的拉伸。当低频交流电频率为40~100 Hz时,低频交流电场作用下的火焰拉伸程度整体要比负直流电场作用下的剧烈,而随着低频交流电频率的降低,火焰拉伸越明显。

(2)低频交流电场对火焰传播速率的促进程度要大于负直流电场,且随着低频交流电频率的降低,其促进程度逐渐增大。负直流及低频交流电场作用下的平均火焰传播速率相比于未加电压时的增大率 $\Delta\bar{S}_L$ 按加载负直流电压、加载低频交流电压(频率由高到低)的顺序依次递增。

(3)低频交流电场对燃烧压力的促进作用优于负直流电场,且低频交流电场下的促进程度随频率的降低呈增大的趋势。负直流及低频交流电场对燃烧压力促进的最大程度 $\varphi_{\max}$ 按加载低频交流电压(频率由低到高)、加载负直流电压的顺序依次递减。

(4)低频交流电场对火焰传播和燃烧特性的促进效果要优于负直流电场,特别是 $f=40$ Hz时的

促进效果最好。由于受容弹空间和火焰发展时间的限制,本文只研究到 $f=40$ Hz,在今后的研究中,还需拓宽频率范围,研究更低频率的低频交流电场对火焰的影响,从而获得更有意义的结果。

参考文献:

- [1] 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(1): 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(1): 31-36.
- [2] 李腾, 王京, 魏小林. 高频高压电场对甲烷预混倒置焰锥火焰的影响与分析[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(10): 2097-2101.
LI Teng, WANG Jing, WEI Xiaolin. The phenomenon analysis of high frequency high voltage electric field to premixed inverted methane flame [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(10): 2097-2101.
- [3] 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[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(9): 62-67.
DUAN Hao, FANG Jianfeng, SUN Tianqi, et al. Effects of electric fields in different electrode structures on methane/air flames [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 62-67.
- [4] MEMDOUH B, PASCALE 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.
- [5] 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, 2010, 33(1): 1137-1144.
- [6] 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.
- [7] PARK D G, CHOI B C, CHA M S, et al. Soot reduction under DC electric fields in counterflow non-premixed laminar ethylene flames [J]. Combustion Science and Technology, 2014, 186(4/5): 644-656.
- [8] WANG Y, NATHAN G J, ALWAHABI Z, et al. Effect of a uniform electric field on soot in laminar premixed ethylene/air flames [J]. Combust Flame, 2010, 157(7): 1308-1315.

- [9] 方朝纲, 宋菁, 仲磊, 等. 重力场作用下三种不同燃料液滴在垂直电场中的燃料特性 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, 54(1): 97-101.
FANG Chaogang, SONG Qiang, ZHONG Lei, et al. Combustion behavior of three different fuel droplets in vertical electric field under gravity [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2014, 54(1): 97-101.
- [10] CHA M S, LEE Y. Premixed combustion under electric field in a constant volume chamber [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(12): 3131-3138.
- [11] 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.
- [12] 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]. Combust Flame, 2012, 159(3): 1151-1159.
- [13] GOODINGS J, BOHME D, NG C W. Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames; I Positive ions [J]. Combustion and Flame, 1979, 36(1): 27-43.
- [14] GOODINGS J, BOHME D, NG C W. Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames; II Negative ions [J]. Combustion and Flame, 1979, 36(1): 45-62.
- [15] PRAGER J, RIEDEL U, WARNATZ J. Modeling ion chemistry and charged species diffusion in lean methane-oxygen flame [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 1129-1137.
- [16] HUANG Z H, 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.
- [17] 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.
- [18] MENG X W, WU X M, LIU J, et al. Effects of direct-current (DC) electric fields on flame propagation and combustion characteristics of lean premixed $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ flames [EB/OL]. [2015-05-06]. <http://papers.sae.org/2013-01-0309/>.
- [19] 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 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 38-43.
SUN Tianqi, LIU Jie, DUAN Hao, et al. Effects of electric fields with different electrodes on methane/air lean combustion flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 38-43.

[本刊相关文献链接]

- 李超, 张聪, 吴筱敏, 等. 交流电场气动效应对球形传播火焰影响的数值研究. 2015, 49(11): 20-25. [doi:10.7652/xjtuxb201511004]
- 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. 2015, 49(11): 33-38. [doi:10.7652/xjtuxb201511006]
- 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]
- 汤成龙, 司占博, 张旭辉, 等. 稀释气对高甲烷含量天然气燃烧特性的影响. 2015, 49(9): 41-46. [doi:10.7652/xjtuxb201509008]
- 李春艳, 高忠权, 刘兵, 等. 电极位置与电极面积对离子电流影响的试验研究. 2015, 49(7): 55-60. [doi:10.7652/xjtuxb201507010]
- 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:10.7652/xjtuxb201401002]
- 袁晨恒, 冯慧华, 李延骁, 等. 自由活塞直线发电机总体参数设计方法. 2014, 48(7): 41-45. [doi:10.7652/xjtuxb201407008]
- 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]
- 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]
- 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 赵炜 苗凌)