

高频交流电场对预混稀燃火焰影响的机理分析

卢矍然¹, 高忠权¹, 潘俊宇²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 110870, 沈阳)

摘要: 为了明确高频交流电场对火焰燃烧的影响机理, 分别选取了初始压力为 0.1、0.3、0.5 MPa 的 CH_4 /空气和初始压力为 0.1 MPa 的 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 预混稀燃气, 通过在定容燃烧弹内的网状电极上加载幅值为 5 kV、频率为 15 kHz 的高频交流电场, 对比分析了在高频交流电场下两种预混气火焰传播特性的异同, 以及不同初始压力下 CH_4 /空气火焰传播特性的异同。结果表明: 加载高频交流电场后, 随着初始压力的增大, 电场对 CH_4 /空气火焰面发展的影响程度逐渐减小, 平均火焰传播速度增大率逐渐减小; 随着过量空气系数的增大, 加载电场后对 CH_4 /空气火焰的拉伸作用逐渐减小, 对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 火焰的拉伸作用逐渐增大, CH_4 /空气的平均火焰传播速度增大率逐渐减小, $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 的平均火焰传播速度增大率逐渐增大, 电场对两种混合气火焰传播的影响趋向相同。这说明在 CH_4 /空气预混稀燃气中, 高频交流电场影响火焰燃烧的电化学效应中电子与燃烧产物分子的振动碰撞及其后续的链式反应占据主导。在不同初始压力下, 平均火焰传播速度增大率随着简化场的增大呈线性增大, 说明利用简化场来衡量高频交流电场电化学效应的强弱是可行的。

关键词: 高频交流电场; 稀燃火焰; 平均火焰传播速度; 电化学效应

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202005002 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0009-08



OSID 码

Mechanism Analysis on the Effect of High-Frequency AC Electric Field on Premixed Lean Burn Flame

LU Jueran¹, GAO Zhongquan¹, Pan Junyu²

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

2. School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to clarify the affecting mechanism of high frequency AC electric field on flame combustion, two premixed lean gases including CH_4 /Air with the initial pressures of 0.1, 0.3, 0.5 MPa and $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ with the initial pressures of 0.1 MPa were selected as the research object. The high-frequency AC electric field with the amplitude of 5 kV and the frequency of 15 kHz was applied on the mesh electrodes within the combustion bomb. The flame propagation characteristics of the two premixed gases under the high-frequency AC electric field and the flame propagation characteristics of CH_4 /Air at different initial pressures were analyzed. The results show that the degree of influence of the electric field on the development of the CH_4 /Air flame surface gradually decreases, and the increase rate of average flame propagation velocity gradually decreases with the initial pressure increasing under high-frequency AC electric field. With the

收稿日期: 2019-12-03。 作者简介: 卢矍然(1993—),男,硕士生;高忠权(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51306143);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xjj2018174);西安市科技计划资助项目(2017040CG/CG014/成果转化-10)。

网络出版时间: 2020-01-23

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200123.1138.002.html>

increase of the excess air coefficient, the tensile effect on the CH_4/Air flame gradually decreases but that on the $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ flame gradually increases under the electric field. The increase rate of the average flame propagation velocity of CH_4/Air gradually decreases, and that of $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ gradually increases under the electric field. The influences of the electric field on the flame propagation of the two mixtures tend to be the same. This shows that in the premixed CH_4/Air lean gas, the vibrational collision between electrons and combustion product molecules, as well as subsequent chain reactions, dominates the electrochemical effect in high-frequency AC electric fields affecting combustion. The increase rate of the average flame propagation velocity changes linearly with the increase of the simplified field E/N under different initial pressures. It shows that it is feasible to use the simplified field E/N to measure the strength of the electrochemical effect of high-frequency AC electric field.

Keywords: high-frequency AC electric field; lean burn flame; average flame propagation velocity; electrochemical effect

当今能源面向多元化发展,既要发展新型绿色清洁能源,也要改善传统化石燃料的燃烧。化石燃料仍然是我国能源组成中占比最大的部分,而以甲烷为主要成分的天然气作为一种重要的清洁替代能源被广泛应用到工业生活中。电场助燃技术作为一种新型的燃烧技术,可以应用到燃烧流动领域来改善传统的燃烧,尤其是能够优化天然气的燃烧,有效改善天然气燃烧方面的不足。

在目前电场助燃的研究中,主要针对直流电场以及低频交流电场进行了大量研究^[1-5],对于高频交流电场的研究较少,近些年来国内外研究者对高频交流电场也开始展开了研究。张扬等研究了不同电压下高频交流电场对非预混甲烷空气喷焰的燃烧和 CO 、 NO 排放的影响^[6]。Won等研究了加载交流电场对丙烷层流三叉火焰的影响,加载电场后火焰传播速度随交流电压呈线性增大,并且火焰稳定性的极限得到了扩展^[7]。张聪等研究了高频交流电压幅值对球形火焰的影响,根据电压幅值不同,影响机理主要为热效应和电化学效应^[8]。李腾等开展了高频高压电场对火焰形态变化的实验,发现倒置焰锥火焰悬停位置受到电压的影响较大^[9]。崔雨辰等研究了高频交流电场的频率对火焰的影响,发现频率越大电场对火焰的促进作用越明显,认为频率越大高频交流电场的电化学效应越强,对火焰的促进作用越强^[10]。Cha等进行了高压交流电场对甲烷空气预混燃烧特性和稳定性影响的研究,发现在高压交流电场下火焰表面出现胞状结构,火焰不稳定性增强^[11]。

以上高频交流电场研究大多只是针对当量比附近进行研究,而稀燃条件对于降低排放、改善燃烧尤为重要,所以有必要对稀燃条件下加载高频交流电

场的火焰燃烧进行研究。目前,普遍认为高频交流电场对甲烷空气预混气体影响机理为电化学效应,但是没有明确电化学效应的深层次机理,尤其是没有明确电化学效应强度的衡量标准,大多数研究只是针对恒定的常压下进行。由于生产生活中的实际情况多为压力不断变动的高压情况,所以有必要研究在不同初始压力下高频交流电场对火焰燃烧的影响机理。本文通过加载 5 kV、15 kHz 的高频交流电场,并设置 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 与 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 的对比实验,利用化学较稳定的 Ar 代替空气中的 N_2 ,通过理论分析与实验结合明确了高频交流电场对甲烷空气预混燃烧的影响机理,给出了电化学效应的明确机理与电化学效应强度的衡量标准。

1 实验装置和方法

图 1 为整个实验装置系统,由定容燃烧弹、点火电路、燃烧压力采集装置、配气装置、高速纹影摄像装置和高压交流电源等 6 部分组成。

实验所用的点火电极和高压网状电极的材料均为 45 号钢,其中内部为圆柱形空腔(直径为 140 mm、长为 180 mm)。点火电极为一对针状电极,上下对置于燃烧弹中,间距为 2 mm,针状电极外包裹

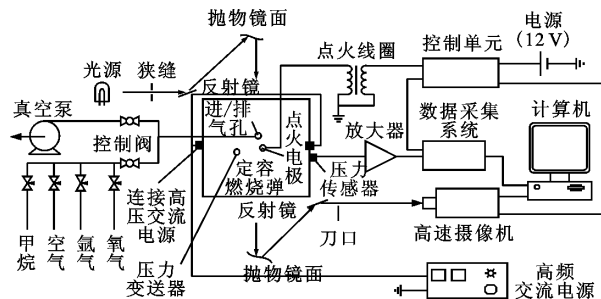


图 1 实验装置系统图

着一层厚度为 1 mm 的聚四氟乙烯绝缘套,加载高压电的网状电极为镂空圆盘形状,水平对置于燃烧弹两侧,网状电极的外径为 40 mm,厚度为 3 mm,结构如图 2 所示。容弹的前后装有厚度为 60 mm 的高抗冲压石英玻璃,为纹影和高速摄像系统提供必要的光学通路。

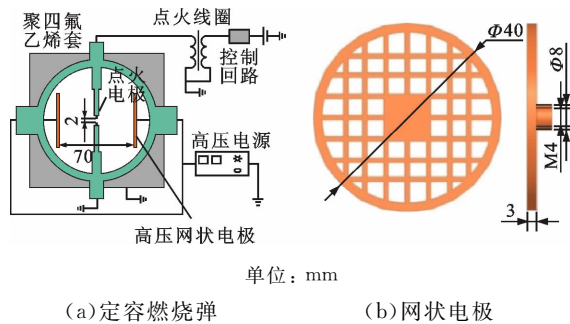


图 2 定容燃烧弹和电极结构图

实验所用的高频交流电源型号为 WPS20P20,输出电压为 0~20 kV。数据采集仪为日本生产的横河 DL750,压力传感器型号为 Kistler 4075A10,电荷放大器型号为 Kistler 4618A,高速摄像机为美国 Redlake 生产的 HG-100K,拍摄速度为 5 000 帧/s。

首先,在常温,初始压力分别为 0.1、0.3、0.5 MPa 下,向容弹内配置过量空气系数为 1.2、1.4、1.6 的 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 混合气,静置 3~5 min 消除气体扰动并使其混合均匀,向高压电极上加载高频交流电压并点火;其次,在常温、初始压力为 0.1 MPa 下,按照 O_2/Ar 的分压比为 21:79(确保与空气中的 O_2 分压一致)向容弹内配置过量空气系数为 1.2、1.4、1.6 的 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 混合气,其他与充入 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 时步骤一致。

2 结果与分析

2.1 火焰传播图像

图 3 是初始压力分别为 0.1、0.3、0.5 MPa,过量空气系数分别为 1.2、1.4、1.6 时,未加载电压以及加载电压有效值为 5 kV、频率为 15 kHz 的高频交流电场所对应的 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 火焰传播纹影图像。由图 3 可知:相较于未加载电场,加载高频交流电场后,火焰在加载电场的水平方向明显被拉长,并且火焰面的面积逐渐增大;随初始压力增大,火焰传播速度减小,火焰面褶皱逐渐增多,火焰不稳定性增强,电场对火焰的促进作用减弱;随着气体逐渐变稀,火焰传播速度减小,相同时间火焰半径逐渐减小,电场对火焰的拉伸促进作用逐渐降低。

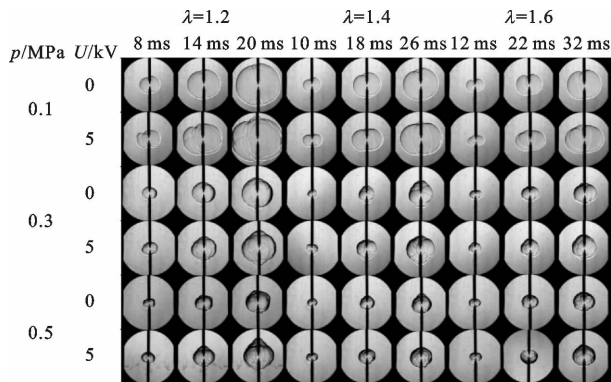


图 3 高频交流电场下 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 火焰传播纹影图像

图 4 为在初始压力 0.1 MPa,过量空气系数分别为 1.2、1.4、1.6 下,未加载电压以及加载电压有效值为 5 kV、频率为 15 kHz 的高频交流电场所对应的 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 火焰传播纹影图像。由图 4 可知:当过量空气系数为 1.2 时,加载电场后对火焰的影响作用非常小,火焰的形态几乎没有变化;随着过量空气系数的增大,加载电场后火焰传播速度明显增大,火焰在水平方向明显被拉伸。

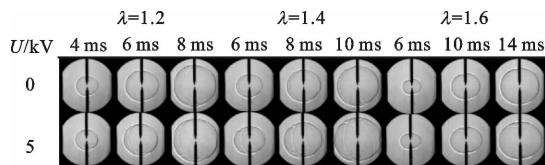


图 4 高频交流电场下 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 火焰传播纹影图像

2.2 火焰传播特性

2.2.1 火焰传播距离 本文定义火焰传播距离为火焰前锋面两侧到容弹中心距离 L_f 、 L_b 的平均值,即 $L = (L_f + L_b)/2$ 。为了避免其他因素对火焰传播造成影响,本文的火焰传播距离范围为 6~25 mm^[12]。

图 5 为不同初始压力下,过量空气系数分别为 1.2、1.4、1.6 时未加载电场以及加载电压有效值为 5 kV、频率为 15 kHz 的高频交流电场所对应的 $\text{CH}_4/\text{空气}$ 火焰传播距离随时间的变化。由图 5 可知:无论是否施加高频交流电场,火焰传播距离随时间基本呈线性变化,相较于未施加电场,加载电场后 $L-t$ 曲线的斜率变大;当过量空气系数一定时,随着初始压力的增大, $L-t$ 曲线的斜率逐渐变小,电场对火焰传播距离的影响作用逐渐变小;初始压力的改变对 $L-t$ 曲线斜率的影响远大于是否施加电场的影响,在初始压力一定时,随着过量空气系数的增大,加载电场后对应的 $L-t$ 曲线斜率的变化率减小。这说明混合气越稀,高频交流电场对火焰的促进作用越小。

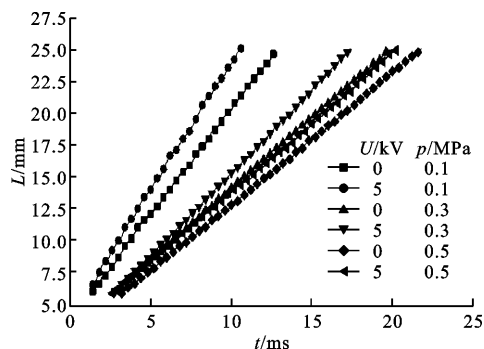
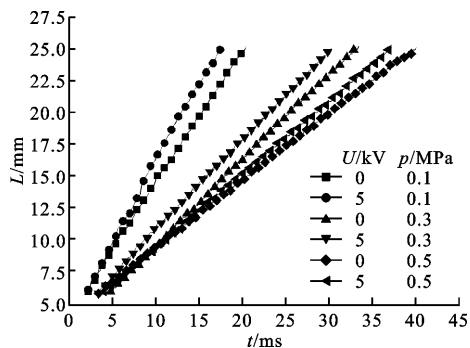
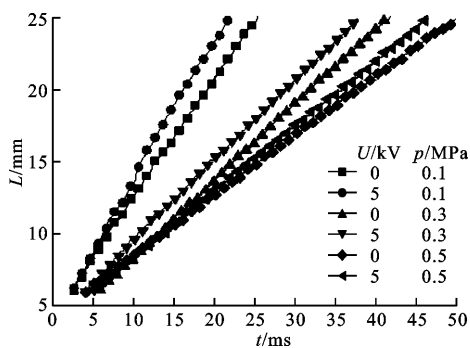
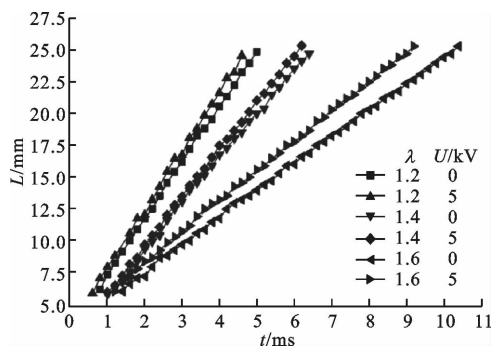
(a) $\lambda = 1.2$ (b) $\lambda = 1.4$ (c) $\lambda = 1.6$ 图5 高频交流电场下 CH_4 /空气火焰传播距离随时间的变化

图6为在初始压力为0.1 MPa,过量空气系数分别为1.2、1.4、1.6下,未加载电场以及加载电压有效值为5 kV、频率为15 kHz的高频交流电场所对应的 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 火焰传播距离随时间的变化。

由图6可知:当过量空气系数为1.2时,相比于未施加电场,加载电场后的 $L-t$ 曲线斜率变化较小,说明电场对火焰几乎没有任何作用;随着过量空气系数的增大,加载电场对火焰传播距离的影响作用非常显著,当过量空气系数为1.6时,加载电场后 $L-t$ 曲线的斜率明显大于未加载电场的情况,且变化趋势与 CH_4 /空气相接近。由此说明,随着 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 混合气变稀,电场对其火焰传播的促进作用

图6 高频交流电场下 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 火焰传播距离随时间的变化

越明显,同时其加载电场后火焰传播距离的增大量与加载电场后 CH_4 /空气对应的火焰传播距离增大量逐渐相接近。

2.2.2 平均火焰传播速度 由于本文研究的火焰传播距离范围为6~25 mm,所以定义火焰从6 mm传播到25 mm的距离与所对应时间的比值为平均火焰传播速度 $\bar{S}_L$ 。

通过计算,得到了不同初始压力,过量空气系数分别为1.2、1.4、1.6下,未加载电场以及加载电压有效值为5 kV、频率为15 kHz的高频交流电场所对应的 CH_4 /空气平均火焰传播速度 $\bar{S}_L$ 及其增大率 $\Delta\bar{S}_L$,如表1所示。由表1可知:加载高频交流电场后,平均火焰传播速度有较明显的提高;在过量空气系数一定时,随着初始压力的增大,平均火焰传播速度逐渐减小,平均火焰传播速度增大率逐渐减小;在初始压力一定时,随着过量空气系数的增大,平均火焰传播速度减小,平均火焰传播速度增大率逐渐减小。

表2为在0.1 MPa,过量空气系数分别为1.2、1.4、1.6下,未加载电场以及加载电压有效值为5 kV、频率为15 kHz的高频交流电场所对应的 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 平均火焰传播速度 $\bar{S}_L$ 及其增大率 $\Delta\bar{S}_L$ 。

由表2可知:当过量空气系数较小时,相比于未施加电场,加载电场后的平均火焰传播速度增大率较小,说明电场对火焰的促进作用比较小,与同工况下电场对 CH_4 /空气的影响程度相差较大;随着过量空气系数的增大,平均火焰传播速度增大率逐渐增大,与同工况下电场对 CH_4 /空气的影响程度逐渐接近,当过量空气系数为1.6时,加载电场后 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 的平均火焰传播速度增大率为13.02%,而 CH_4 /空气的平均火焰传播速度增大率为13.51%,两者已经非常接近。由此说明,随着过量空气系数的增大,混合气变稀,电场对 CH_4 /空气

表 1 加载高频交流电场下 CH₄/空气的 $\bar{S}_L$ 和 $\Delta\bar{S}_L$

λ	p/MPa	U/kV	$\bar{S}_L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta\bar{S}_L/\%$
1.2	0.1	0	1.65	24.24
		5	2.05	
	0.3	0	1.12	16.96
		5	1.31	
	0.5	0	0.91	12.09
		5	1.02	
1.4	0.1	0	1.05	16.19
		5	1.22	
	0.3	0	0.67	11.94
		5	0.75	
	0.5	0	0.52	9.62
		5	0.57	
1.6	0.1	0	0.74	13.51
		5	0.84	
	0.3	0	0.45	11.11
		5	0.50	
	0.5	0	0.43	9.30
		5	0.47	

表 2 加载高频交流电场下 CH₄/O₂/Ar 的 $\bar{S}_L$ 和 $\Delta\bar{S}_L$

λ	U/kV	$\bar{S}_L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta\bar{S}_L/\%$
1.2	0	4.48	4.91
	5	4.70	
1.4	0	3.54	6.21
	5	3.76	
1.6	0	2.15	13.02
	5	2.43	

与 CH₄/O₂/Ar 火焰的促进作用逐渐趋于相同。

由于层流燃烧速率与初始压力的关系为 $S_L \propto p^{(n-2)/2}$ ($n \leq 2$ 为反应级数),加载电场后火焰传播速度随压力的变化与未加载电场时相类似^[13],所以对平均火焰传播速度随压力的变化进行拟合,获得在不同过量空气系数下平均火焰传播速度随初始压力变化的曲线如图 7 所示。拟合公式为

$$\bar{S}_{L1.2-0} = 0.71p^{-0.36} \tag{1}$$
$$\bar{S}_{L1.2-5} = 0.77p^{-0.42} \tag{2}$$
$$\bar{S}_{L1.4-0} = 0.39p^{-0.43} \tag{3}$$
$$\bar{S}_{L1.4-5} = 0.42p^{-0.46} \tag{4}$$
$$\bar{S}_{L1.6-0} = 0.31p^{-0.37} \tag{5}$$
$$\bar{S}_{L1.6-5} = 0.33p^{-0.40} \tag{6}$$

拟合后相关性系数的平均值为 0.977,说明施加高

频交流电场后火焰传播速度随初始压力的变化关系与未施加高频交流电场时相类似。

由图 7 可知:无论 λ 为何值,火焰平均传播速度随初始压力的变化趋势一致;施加高频交流电场后,火焰平均传播速度随初始压力的变化曲线上移, λ 越小,曲线上移幅度越大,说明电场对火焰传播的促进作用逐渐增大。

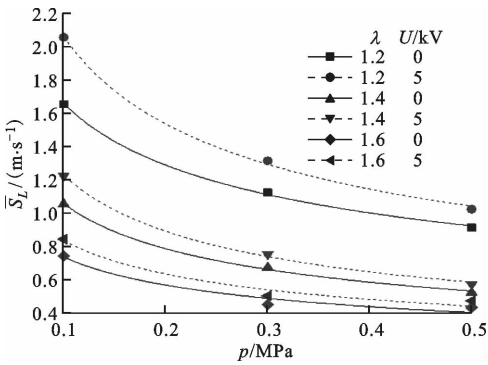


图 7 加载高频交流电场下 CH₄/空气的平均火焰传播速度随压力的变化

图 8 为在不同初始压力和过量空气系数下,CH₄/空气预混火焰加载高频交流电场后平均火焰传播速度增大率的变化及其对应的拟合曲线。由图 8 可知:随着初始压力的增大,平均火焰传播速度增大率逐渐减小,说明高频交流电场对火焰的促进作用逐渐降低;随着气体逐渐变稀,平均火焰传播速度增大率逐渐减小,高频交流电场对火焰的促进作用逐渐降低。

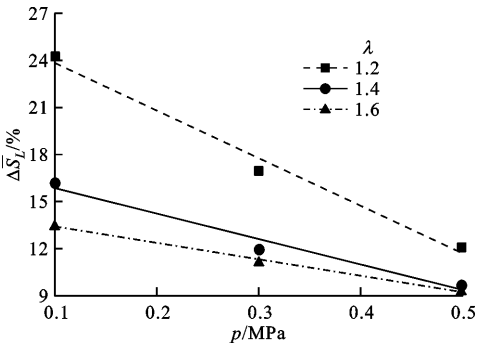


图 8 加载高频交流电场下 CH₄/空气的平均火焰传播速度增大率随压力的变化

图 9 为在初始压力 0.1 MPa 下加载高频交流电场后 CH₄/空气和 CH₄/O₂/Ar 的平均火焰传播速度增大率随过量空气系数的变化。由图 9 可知:随着过量空气系数的增加,CH₄/空气的平均火焰传播速度增大率逐渐减小,CH₄/O₂/Ar 的平均火焰传播速度增大率逐渐增大。为了明确两者的变化关系,分别将两者进行多项式拟合。由拟合曲线可知,

随着过量空气系数的增加,混合气逐渐变稀,两者变化趋势逐渐趋向统一,当 $\lambda=1.6$ 时,两者曲线接近重合。

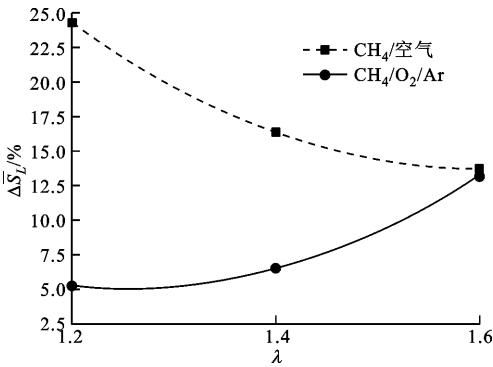


图9 加载高频交流电场下CH₄/空气和CH₄/O₂/Ar的平均火焰传播速度增大率随过量空气系数的变化

3 高频交流电场助燃机理分析

3.1 高频交流电场对CH₄/空气预混火焰作用机理

目前研究认为,高频交流电场对火焰的影响主要是电化学效应的作用,加载高频交流电场后,火焰中的电子在高频交流电场的作用下成为高速高能电子,这些电子与甲烷空气混合气中的分子发生碰撞使得分子分离。由于在大量研究中高频交流电场电压有效值较低且间距较大,提供的能量远不能使得加速的电子碰撞分子使其分离,但是这些能量足以使得分子发生振动激发。振动激发后的中性分子可以将能量传递给甲烷空气预混火焰中参与反应的其他粒子,促进一些反应的自由基的生成,加快后续链式反应的反应速度,从而影响整个燃烧过程。

在现有的研究中认为e-N₂碰撞,通过激发传递将能量传递给O₂,即电子碰撞氮气分子的振动激发起主导作用^[14]。但是,Bisetti等认为电子不仅可以碰撞氮气使其发生振动激发,还可以碰撞H₂O、CO₂、CO等燃烧产物使其发生振动激发,然后通过激发传递将能量传递给O₂。特别是在氮气含量较少的情况下,振动能量之间的交换主要是燃烧产物和氧气^[15]。

表3为常见各分子基态到各个激发态的对应的能级要求。由表3可知:O₂的振动激发能是最低的,只有0.19~0.75 eV,要明显小于N₂的振动激发能0.291~2.35 eV,以及CO、CO₂的振动激发能0.266~2.5 eV、0.083~2.5 eV。正是因为燃烧过程中N₂、CO、CO₂这几大主要分子的激发能级高于O₂,因此才出现了当能量高于激发需求时也会被激

发,然后通过激发传递,将能量传递给O₂。另一方面,由文献^[15]可知,在所有振动激发中,O₂的直接振动激发是最不频繁的过程,因此氧气分子的振动激发需要激发态的氮和燃烧产物的碰撞激发,从而促进链支化反应 $\text{H}+\text{O}_2\rightarrow\text{OH}+\text{O}^{[16]}$ 。

表3 常见分子从基态到各激发态对应的能级需求

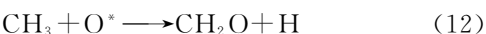
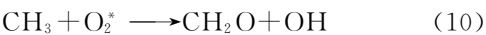
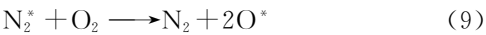
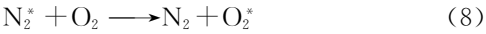
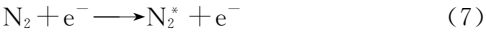
分子	激发过程	描述
N ₂	振动激发	存在 8 个振动激发态,能级分布从 0.291 至 2.35 eV
	电子激发	从基态至三体和单体的激发态的能量分别为 6.71 和 17.3 eV
O ₂	振动激发	存在 4 个振动激发态,能级分布从 0.19 至 0.75 eV
O ₂	电子激发	临界电子激发能量小于 4.5 eV 或单态激发能级为 0.977 eV
O ₂	冲击解离	激发能量至少 6 eV,将 O ₂ 轰击成两个氧原子
H ₂ O	振动激发	存在 2 个振动激发态,能级分别为 0.2 和 0.43 eV
H ₂ O	冲击解离	两种形式,能级分别为 7 和 13 eV,形成 H、OH 和 O、H ₂
CO ₂	振动激发	存在 8 个振动激发态,能级分布从 0.083 至 2.5 eV
CO ₂	电子激发	存在 2 个电子激发态,能级分别为 7 和 10.5 eV
CO	振动激发	存在 10 个振动激发态,能级分布从 0.266 至 2.5 eV
CO	电子激发	能级分布从 6.22 至 10.6 eV

同时,根据文献可知,电场作用下混合气体中电子的平均能量随简化场 E/N (E 为电场强度, N 为气体数密度)的减小不断减小。简化场越小,平均电子能量越小,相比N₂对O₂的碰撞作用,燃烧产物H₂O、CO₂等对O₂的碰撞起主要作用。当平均电子能量较小时,主要是燃烧产物与氧气分子的振动能量交换^[15]。对初始压力为0.1 MPa,过量空气系数为1.2、1.4、1.6的甲烷空气的简化场进行计算,得到 E/N 分别为11.72、11.60、11.50 Td。由此说明,随着甲烷空气的变稀,甲烷空气的简化场逐渐减小,平均电子能量减小,所以随着甲烷空气逐渐变稀,振动能量之间的交换主要是燃烧产物和氧气。

本文通过设置CH₄/空气与CH₄/O₂/Ar的对比实验,发现随着混合气变稀,电场对两种混合气火焰燃烧的影响逐渐趋于相同。由图9可知:当 $\lambda=$

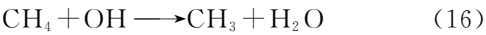
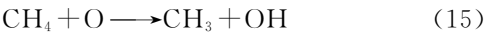
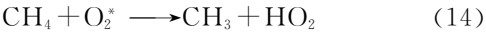
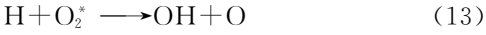
1.6 时,CH₄/空气与 CH₄/O₂/Ar 平均火焰传播速度增大率接近相同,从实验的角度说明了电场在 CH₄/空气稀混合气中的电化学反应主要通过电子与燃烧产物分子的碰撞作用影响火焰燃烧。虽然实验无法保证化学性质相对稳定的 Ar 替代 N₂ 后所有的量保持相同,但是可以看到明显的趋势,在 CH₄/空气稀混合气中 e-N₂ 碰撞在高频交流电场对火焰的影响中作用有限。综上所述,在稀混合气中,电子与燃烧产物分子发生的振动碰撞及其后续的链式反应才是高频交流电场对火焰的主要影响机理。

一般情况下高频交流电场对火焰的主要影响机理仍然为 e-N₂ 碰撞及其后续链式反应,即

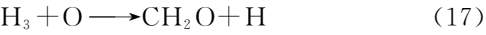


上式生成的活化的 O₂^{*} 会促进大量 O 和 OH 自由基的生成,加快了 O 和 OH 自由基参与的后续链式反应,进而加快了火焰传播速度。

在混合气较稀时,高频交流电场对火焰的影响机理主要为电子与燃烧产物分子的振动碰撞产生激发态的 O₂^{*}, 并发生后续链式反应,即



反应方程式(13)加速了 O 自由基的生成速率,生成大量的 OH 自由基,同时激发态的 O₂^{*} 会加快与 CH₄ 的反应,生成大量甲基 CH₃, 甲基 CH₃ 是甲烷氧化反应的关键组分,它对甲烷这种燃料的特有的氧化特性起作用。尤其是生成甲氧基的反应方程式(17),是甲基 CH₃ 氧化的链分支反应,它的氧化速率决定甲烷的全局化学反应速率,所以经过以下的链式反应加速了甲烷的氧化速率^[17],即



综上所述,通过电子与燃烧产物分子 H₂O、CO₂、CO 发生振动激发碰撞并与 O₂ 作用生成激发态的 O₂^{*}, 促进了甲烷分子的氧化,同时加速了 O 和

OH 自由基的生成速度,使得链式反应迅速进行,从而加快了火焰的燃烧速度。

3.2 不同初始压力下高频交流电场对 CH₄/空气预混火焰的作用机理

由 3.1 小节分析可知,高频交流电场对火焰的影响主要是电化学反应,而这种电化学反应都是基于电子对分子的碰撞,一般情况下主要是 e-N₂ 碰撞起主导作用,当混合气较稀时主要是电子与燃烧产物分子的碰撞起主要作用,由此可知电子的碰撞能量是高频交流电场对火焰作用强弱最重要的影响因素。电场作用下混合气体中电子的能量可用简化场 E/N 来表示^[15,18], E/N 越大,说明电子的平均能量越大,电子的碰撞能量越大。表 4 为在不同过量空气系数和初始压力下,加载电压有效值为 5 kV 的高频交流电场在电压峰值时刻的简化场的计算值,其中波峰时刻电压近似为 7 kV。由表 4 可知,简化场的计算值随压力增大大幅减小。

表 4 不同 λ 下加载高频交流电场的简化场计算值

<i>p</i> /MPa	<i>E</i> · <i>N</i> ⁻¹ /Td		
	λ=1.2	λ=1.4	λ=1.6
0.1	11.72	11.60	11.50
0.3	3.90	3.86	3.83
0.5	2.73	2.70	2.69

图 10 为不同初始压力下,过量空气系数分别为 1.2、1.4、1.6 时,平均火焰传播速度增大率随简化场的变化。由图 10 可知:在相同过量空气系数下,随着简化场的增大,平均火焰传播速度增大率逐渐增大,两者呈现一定的线性关系,说明不同初始压力下,正是简化场的不同导致高频交流电场对火焰促进作用的不同;在不同过量空气系数下,平均火焰传播速度增大率随简化场的变化趋势大致相同。

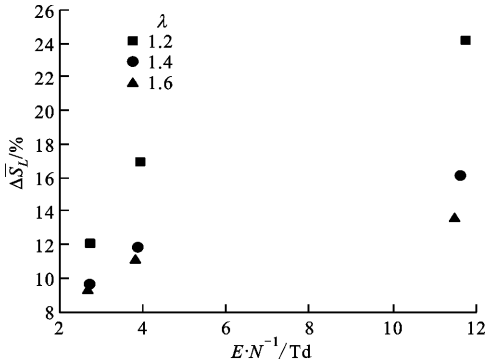


图 10 不同初始压力下平均火焰传播速度增大率随简化场的变化

4 结 论

(1)随初始压力的增大,加载电场对 CH_4 /空气火焰面发展的影响程度变小。随过量空气系数的增大,加载电场后对 CH_4 /空气火焰的拉伸作用逐渐减小,对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 火焰的拉伸作用逐渐增大。

(2)加载电场后, CH_4 /空气的平均火焰传播速度增大率随初始压力的增大而逐渐减小。随过量空气系数的增大, CH_4 /空气的平均火焰传播速度增大率逐渐减小, $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 的平均火焰传播速度增大率逐渐增大,电场对两种混合气火焰燃烧的影响逐渐趋向一致。

(3)一般情况下在 CH_4 /空气预混气中,高频交流电场对火焰燃烧影响的电化学反应中仍然是 e-N_2 的振动激发碰撞及其后续的链式反应占据主导,而在 CH_4 /空气预混稀燃气中,高频交流电场对火焰燃烧影响的电化学反应中是电子与燃烧产物分子的振动激发碰撞及其后续的链式反应占据主导。

(4)电子的碰撞能量是高频交流电场影响火焰燃烧最重要的因素。在不同初始压力下,平均火焰传播速度增大率随着简化场的增大逐渐增大,说明利用简化场来衡量高频交流电场电化学反应的强弱是可行的。

参考文献:

- [1] WANG Y, NATHAN G J, ALWHABI Z T, et al. Effect of a uniform electric field on soot in laminar premixed ethylene/air flames [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(7): 1308-1315.
- [2] VAN DEN BOOM J, KONNOV A 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.
- [3] LI Y M, WANG J H, XIA H, et al. Effect of DC electric field on laminar premixed spherical propagation flame at elevated pressures up to 0.5 MPa [J]. *Combustion Science and Technology*, 2018(11): 1-23.
- [4] DUAN H, LI Z J, WANG B, et al. Experimental study of premixed hydrogen enriched natural gas under an alternating-current (AC) electric field and application of support vector machine (SVM) on electric field assisted combustion [J]. *Fuel*, 2019, 258: 115934.
- [5] 何子奇,高忠权,贾伟东,等. 低频交流电场对甲烷/空气预混火焰影响的机理研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(11): 49-50.

- HE Ziqi, GAO Zhongquan, JIA Weidong, et al. Mechanism analysis of the effect of low-frequency AC electric field on CH_4 /air premixed flame [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(11): 49-50.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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 [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.
- [9] 李腾,王京,魏小林,等. 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, et al. The phenomenon analysis of high voltage electric field to premixed inverted methane flame [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(10): 2097-2101.
- [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] 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.
- [12] 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: 302-11.
- [13] 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*, 2017, 69(4): 1602-1610.

(下转第 94 页)

- Mechanics, 1969, 36(4): 711-714.
- [18] WANG Hui, GUO Liejin. Experimental investigation on pressure drop and heat transfer in metal foam filled tubes under convective boundary condition [J]. Chemical Engineering Science, 2016, 155: 438-448.
- [19] ERGUN S. Fluid flow through packed columns [J]. Chem Eng Prog, 1952, 48(2): 89-94.
- [20] DIETRICH B, SCHABEL W, KIND M, et al. Pressure drop measurements of ceramic sponges; determining the hydraulic diameter [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(16): 3633-3640.
- [21] HUU T T, LACROIX M, HUU C P, et al. Towards a more realistic modeling of solid foam; use of the pentagonal dodecahedron geometry [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(24): 5131-5142.
- [22] 杨肖虎, 邝九杰, 白佳希, 等. 高孔隙率通孔金属泡沫有效导热系数的实验和理论研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 79-84.
- YANG Xiaohu, KUANG Jiuji, BAI Jiaxi, et al. Experimental and analytic investigations for effective thermal conductivity in high porosity metallic foams [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 79-84.

(编辑 武红江)

(上接第 16 页)

- 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, 2017, 69(4): 1602-1610.
- [14] SHEBEKO Y N. Effect of an ac electric field on normal combustion rate of organic compounds in air [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 1982, 18(4): 427-429.
- [15] BISETTI F, EL MORSLI M. Kinetic parameters, collision rates, energy exchanges and transport coefficients of non-thermal electrons in premixed flames at sub-breakdown electric field strengths [J]. Combustion Theory and Modelling, 2014, 18(1): 148-184.
- [16] STARIKOVSKII A Y. Plasma supported combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2405-2417.
- [17] 蒋德明, 陈长佑, 杨嘉林, 等. 高等车用内燃机原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 59-65.
- [18] 殷燕. 氧气、氮气及其混合气体直流放电的蒙特卡罗模拟 [D]. 保定: 河北大学, 2003: 28-29.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 77 页)

- [18] 卓蒙蒙, 张晓光, 姬程鹏, 等. 基于小波降噪与分形理论的滚动轴承故障诊断 [J]. 轴承, 2011, 6: 35-37.
- ZHUO Mengmeng, ZHANG Xiaoguang, JI Chengpeng, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on wavelet de-noising and fractal theory [J]. Bearing, 2011, 6: 35-37.
- [19] 夏均忠, 于明奇, 白云川, 等. 基于改进信息图与MOMEDA的滚动轴承故障特征提取 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(4): 26-32.
- XIA Junzhong, YU Mingqi, BAI Yunchuan, et al. Fault feature extraction of rolling bearing based on improved information graph and MOMEDA [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(4): 26-32.
- [20] WANG Zhijian, WANG Junyuan, ZHAO Zhifang, et al. A novel method for multi-fault feature extraction of a gearbox under strong background noise [J]. Entropy, 2018, 20(1): 10-26.
- [21] 唐贵基, 王晓龙. 参数优化变分模态分解方法在滚动轴承早期故障诊断中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 73-81.
- TANG Guiji, WANG Xiaolong. Parameter optimized variational mode decomposition method with application to incipient fault diagnosis of rolling bearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5): 73-81.

(编辑 武红江)