

直流电场对甲烷/氨/空气预混层流火焰的影响

郭致成, 高忠权, 鲍彦同, 杜增晖, 李钰潼, 张灏, 卢夔然

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了初步探究直流电场对氨/碳氢混合燃料燃烧特性的影响,在定容燃烧弹台架上开展正、负直流电场对甲烷/氨/空气预混层流火焰传播特性影响的研究。实验分为两部分:在常温常压条件下,保持过量空气系数不变,改变甲烷/氨混合气中氨的掺混比,对不同配比的甲烷/氨/空气混合气分别加载正、负直流电场;保持氨在甲烷/氨混合气中的掺混比不变,对不同过量空气系数的甲烷/氨/空气混合气分别加载正、负直流电场。实验处理后得到各工况下火焰传播发展图像、平均火焰传播速度、速度提高率、完全燃烧时间和完全燃烧时间提前率。结果表明:负直流电场比正直流电场促进火焰传播效果略强,负直流电场对火焰的拉伸近似为圆角矩形而正直流电场近似为梭形,且拉伸效果随氨的掺混比增加以及过量空气系数的增大而增强;正、负直流电场能够加快火焰传播速度,缩短完全燃烧时间,且促进效果随着电压增大而增加;两种电场的促进效果都会随着氨掺混比增加和过量空气系数的增大而增强。本实验说明,高压直流电场对促进氨/碳氢混合燃料的稀薄燃烧有明显提升作用。

关键词: 甲烷;氨;预混火焰;直流电场;燃烧特性;稀燃

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202110019 **文章编号:** 0253-987X(2021)10-0164-10



OSID 码

Influence of DC Electric Field on Methane/Ammonia/Air Premixed Laminar Flame

GUO Zhicheng, GAO Zhongquan, BAO Yantong, DU Zenghui,

LI Yutong, ZHANG Hao, LU Jueran

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

Abstract: In order to explore the influence of DC electric field on combustion characteristics of ammonia/hydrocarbon mixed fuel, the influence of positive or negative DC electric field on flame propagation characteristics of methane/ammonia/air premixed laminar flow is studied on a constant volume combustion bomb bench. The experiment is divided into two parts: under normal temperature and pressure, the excess air coefficient is kept constant, the mixing ratio of ammonia in methane/ammonia mixture is changed, and the methane/ammonia/air mixture with different proportions is loaded with positive or negative direct current fields, respectively; the mixing ratio of ammonia in methane/ammonia mixture is kept constant, and the methane/ammonia/air mixtures with different excess air coefficients are loaded with positive or negative DC electric fields, respectively. After processing the experimental results, the flame propagation development image, the average flame propagation speed, the speed improvement rate, the

收稿日期: 2021-03-25。 作者简介: 郭致成(1998—),男,硕士生;高忠权(通信作者),男,副教授。 基金项目: 液体火箭发动机技术重点实验室资助项目;西安市科技计划资助项目(20KYPT0001-11-3)。

网络出版时间: 2021-05-31

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210531.1530.007.html>

complete combustion time and the complete combustion time advance rate are obtained under various conditions. The results show that the promotion effect of negative DC electric field is slightly stronger than that of positive DC electric field. The stretching effect of negative DC electric field on flame is approximately a rounded rectangle, while that of positive DC electric field is approximately fusiform, and the stretching effect increases with the increase of the ammonia mixing ratio and the excess air coefficient. The positive or negative DC electric fields can accelerate flame propagation speed and shorten the complete combustion time, and the promotion effect increases with the increase of voltage value. On the other hand, the promotion effects of both electric fields will increase with the increase of ammonia mixing ratio and excess air coefficient. This experiment shows that the high voltage DC electric field can obviously promote the lean combustion of ammonia/hydrocarbon fuel mixture.

Keywords: methane; ammonia; premixed flame; direct current field; combustion characteristics; lean burning

随着人类社会的发展,化石燃料作为当前主要的能量来源在全球范围内得到了广泛的应用,但与此同时也造成了比较严重的能源紧缺与环境污染问题。为了减少碳排放,缓解全球变暖问题,人类对于无碳能源的研究力度也在不断加大。氨作为一种富氢无碳能源,可以视作清洁能源载体,同时氨的能量密度大,成本低,相比氢更加安全且容易运输,这些优势使得氨可以作为一种前景乐观的替代能源^[1-2]。虽然氨存在腐蚀性和毒性,但只要正确处理使用便是安全的。目前氨已经在工业上得到广泛使用,而且 Valera-Medina 等人在整合了前人对于氨的研究成果之后,认为氨在发电和储能方面前景广阔,具有较大的发展潜力^[3]。

与常规的碳氢燃料相比,纯氨存在层流燃烧速度慢、热值低、点火能量要求高以及可燃极限范围窄的问题,但有关研究发现将氨与传统碳氢燃料相互掺混后燃烧会改善纯氨燃烧与排放性能^[4]。Kurata 等通过研究氨/甲烷混合燃料对燃气轮机发电机组性能的影响效果,发现甲烷的掺入改善了燃烧稳定性,使得功率范围增大,提高了燃烧效率和热效率^[5]。周梅等在锅炉燃烧系统中进行了氨/丙烷混合燃料燃烧排放特性的实验,发现在富燃料燃烧条件下,丙烷掺混氨不仅能够减少 CO_2 排放,还能够大幅度降低 NO 和 CO 的排放^[6]。除了与碳氢燃料混合燃烧使用,Tamura 等也将氨与煤粉、煤油等混合利用并尝试应用在燃煤锅炉和燃气轮机上,运行结果也表明掺混氨有利于减少碳排放^[7]。将氨作为动力应用在内燃机上的研究也取得了一定的进展。利用氨与煤气混合燃料作为动力的公共汽车已经在

比利时成功运营^[8];通过氨与氢/汽油/柴油等共燃的研究,表明在实际动力系统中使用氨混合物具有良好的潜力^[9]。

为了促进燃料燃烧,提高火焰传播速度与燃烧效率,近年来也兴起了许多助燃技术,电场辅助燃烧技术便是其中之一。电场辅助燃烧技术在降低排放量、提高燃烧效率、增强火焰稳定性方面具有一定的优势,故受到了国内外研究者广泛而深入的研究^[10]。杜增晖等在高初始压力下研究了外加交流电场对甲烷/空气预混火焰燃烧的影响,发现低频条件下,随着频率升高,火焰传播速率增大率和最高燃烧压力增高率降低;高频条件下,随着频率升高,火焰传播速率增大率与最高燃烧压力增高率均提高^[11]。侯俊才等通过研究不同初始压力条件下,加载负直流电场对甲烷/空气预混火焰的影响,结果表明,加载电压后火焰传播速率明显提高,电压增大提高程度越大,初始压力越大,其提高程度越明显,电场对火焰的促进效果越好^[12]。Won 等通过对丙烷射流火焰施加电场,结果表明交流电场会拓宽火焰附着的稳定极限,且电压越高、频率越低其效果越好^[13]。但目前对于电场辅助燃烧技术的探索主要集中于电场对传统碳氢燃料燃烧的研究,关于氨与碳氢混合燃料在电场作用下火焰传播情况的研究却相对较少。本文在常温 298 K,常压 1 个标准大气压下,利用定容燃烧弹平台探究了直流电场对甲烷/氨/空气预混火焰燃烧特性的影响。重点分析了加载直流电场后,混合气预混火焰的火焰发展情况、平均火焰传播速度和完全燃烧时间。本文研究成果将为氨的研究和利用提供一定的数据及理论基础。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

本文实验装置如图 1 所示。实验装置由定容燃烧弹、高压电源、进气与排气系统、纹影与高速摄像系统、点火系统以及压力信号采集系统组成。

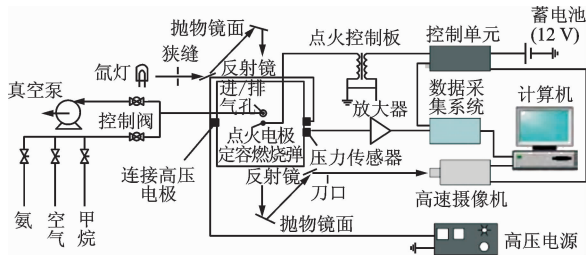


图 1 实验装置图
Fig. 1 An experimental setup diagram

定容燃烧弹为 260 mm×260 mm×315 mm 长方体,其横截面为正方形,材质为 45 钢。燃烧弹内有一圆柱形空腔,直径为 140 mm,高度为 180 mm。容弹内腔表面覆盖有 5 mm 厚的聚四氟乙烯绝缘套。高抗冲石英玻璃安装在容弹前后两面,玻璃规格为直径 190 mm,厚度 60 mm。玻璃外侧为密封容弹体盖板,盖板中心开有直径为 130 mm 的圆孔,此圆孔为容弹纹影系统提供光路。

点火电极对称安装在容弹内,间距为 2 mm,电极由 45 钢制成,直径为 2 mm,尖端锥角为 30°。加载高压直流电源的网状电极水平安装在容弹左右两侧,网状电极为镂空圆盘,外径为 60 mm,材质为 45 钢,网格规格为 8.5 mm×8.5 mm,网格的分割线厚度为 0.8 mm,电极厚度为 3 mm,两电极相距 70 mm。网状电极通过钢棒与高压直流电源相连。定容燃烧弹及其相关装置如图 2 所示。

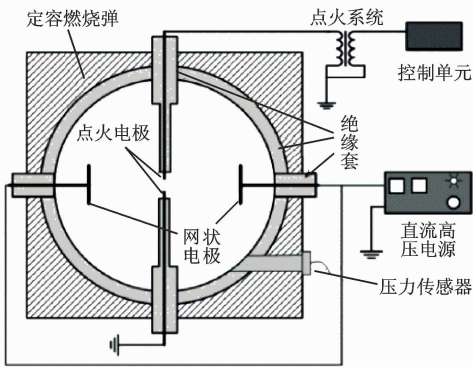


图 2 定容燃烧弹及其相关装置
Fig. 2 Constant volume incendiary bomb and its related device

数据采集系统记录燃烧过程中的压力数据,纹影系统采集定容燃烧弹内混合气的预混层流火焰燃烧图像。实验中所用到的仪器如表 1 所示。

表 1 实验所用仪器

Table 1 Instruments used in the experiment			
实验仪器	型号	参数	取值
高速摄像机	Redlake HG-100K	帧率/fps	5 000
压力传感器	Kistler7061B 压电式	压力/MPa	0~25
电荷放大器	Kistler5011 型	电荷/pC	±10~ ±999 000
数据采集仪	日本横河 DL750	采样频率/kHz	20

1.2 实验方法

实验分为两部分:第一部分是保持过量空气系数 λ 为 1.2 不变,对氨的掺混比 α 为 10%、20% 和 30% 的甲烷/氨/空气混合气加载电压为 ±5、±10 kV 的直流电场;第二部分是在 α 为 20% 的条件下,对 λ 为 1.0、1.2 和 1.4 的混合气加载电压为 ±5、±10 kV 的直流电场。在这两部分实验中都相对应开展了不加载直流电场的实验加以对照。甲烷/氨/空气混合气的化学计量燃烧反应如式(1)所示^[14]。

$$(1-\alpha)\text{CH}_4 + \alpha\text{NH}_3 + (2-0.75\alpha)\text{O}_2 = (1-\alpha)\text{CO}_2 + \alpha\text{NO} + (2-0.5\alpha)\text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

本次实验的配气通过式(1)来进行,其中 α 为氨在氨/甲烷可燃混合气中所占的掺混比。根据道尔顿分压定律,通过压力变送器将混合气充入容弹,静置 3 min,待气体混合均匀后,打开电源加载直流电场并点火。

2 结果与分析

2.1 电场模拟

本文利用 Ansoft Maxwell 15.0 软件对加载直流电压分别为 ±5、±10 kV 时,容弹内部的电场强度分布情况进行了数值模拟,得到水平轴线方向上点火电极到网状电极之间的电场强度分布情况,其中点火电极所在位置为 0、网状电极为 35,如图 3 所示。由图 3 可知,在同一电压下,正、负直流电场的场强大小及分布基本相同,且在点火电极和网状电极附近,场强变化梯度变大,电压增大,变化梯度也随之增大。这就导致了火焰发展在点火电极和网状电极附近受电场影响更加明显,火焰变化更加剧烈,故中间段火焰发展相对稳定。

2.2 火焰传播图像

在过量空气系数 λ 为 1.2 时,甲烷/氨/空气预

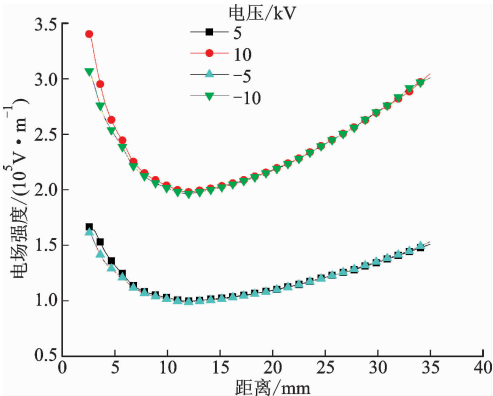


图 3 水平轴线方向场强分布

Fig. 3 Field strength distribution in horizontal axis direction

混火焰在未加载电场(0 kV)以及加载±5、±10 kV 条件下的传播过程如图 4 所示。由于不同氨掺混比下的火焰传播规律基本一致,故只采用掺混 20% 氨时火焰的传播发展情况进行示意。由图 4 可以看出,正、负直流电场对于甲烷/氨/空气预混火焰传播都有一定程度的促进作用,并且主要体现在水平方向。通过比较传播图像中同一时间水平方向上火焰半径的大小发现,负直流电场对于火焰的促进作用要略强于正直流电场。同时正、负直流电场对于火焰形状都具备一定的拉伸作用,随着电压升高,拉伸作用更加明显。

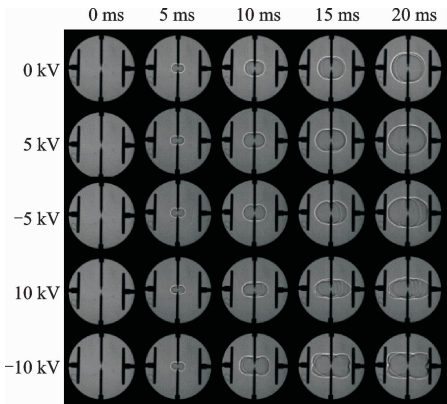
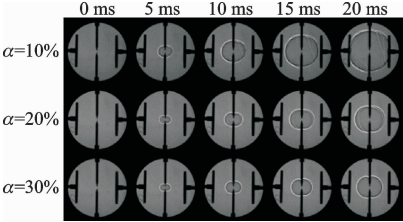


图 4 不同电场作用下火焰发展纹影

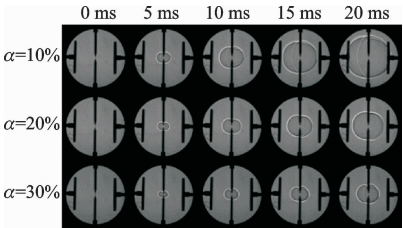
Fig. 4 Schlieren of flame development under different electric fields

随着氨掺混比的增加,直流电场对甲烷/氨/空气预混火焰的拉伸作用越明显,如图 5a~c 所示。当保持掺混比为 20% 时,不同过量空气系数($\lambda=1.0、1.2、1.4$)的甲烷/氨/空气预混火焰在 10、-10 kV 下的传播图像如图 5d~f 所示。可以发现随着过量空气系数的增大,正、负直流电场对于甲烷/氨/空气预混火焰的拉伸作用更加明显。

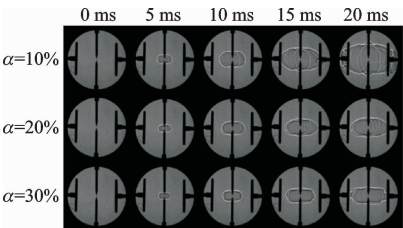
当未加载电场时,预混火焰呈现比较规律的准球形传播,但加载直流电场后,火焰形状在传播过程中开始发生趋势性变化。加载正直流电场后,火焰在水平方向得到明显的促进作用,且促进作用沿竖直方向自中心向两端不断减弱,这使得整体火焰在传播过程中其外沿逐渐发展为梭形。加载负直流电场后,竖直方向无明显变化,水平方向上的促进和拉伸程度沿竖直方向变化不明显,这使得预混火焰在



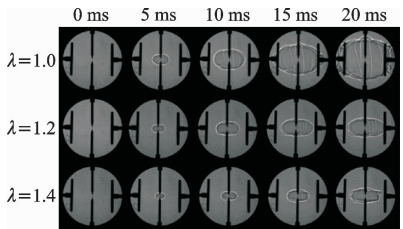
(a)不同氨掺混比,0 kV



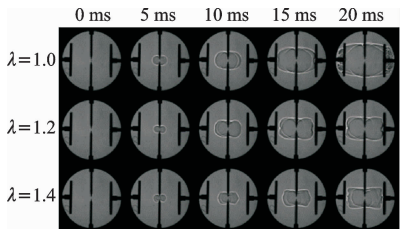
(b)不同氨掺混比,10 kV



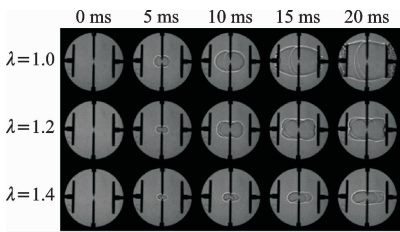
(c)不同氨掺混比,-10 kV



(d)不同过量空气系数,0 kV



(e)不同过量空气系数,10 kV



(f)不同过量空气系数, -10 kV

图 5 部分工况预混火焰在电场作用下的发展情况

Fig. 5 Development of premixed flame under electric field under partial working conditions

传播过程中外沿逐渐发展为圆角矩形。本结论是综合图 4、图 5 中±10 kV 所对应的火焰纹影图像得出的,此时火焰受到的拉伸作用相比±5 kV 时更强,在点火电极和网状电极之间得到充分拉伸,且火焰形状变化趋势更明显。

2.3 火焰传播距离

由于正、负直流电场对于甲烷/氨/空气预混火焰传播的影响主要表现在水平半径方向,故本文主要研究水平方向上火焰的传播情况。定容燃烧弹点火电极到网状电极之间的距离为 35 mm,前期火焰容易受到点火能量的影响,后期火焰则受到定容燃烧弹内温度和压力的影响较明显,因此采用火焰传播距离基本处于 10~25 mm 范围内的数据进行分析。在过量空气系数 $\lambda=1.2$,未加载电场条件下,不同掺混比预混火焰传播距离随时间的变化情况如图 6a 所示。以掺混 20% 氨为例,预混火焰在未加载电压(0 kV)、±5 kV、±10 kV 条件下的火焰传播距离随时间的变化情况如图 6b 所示。从中可以看出火焰传播半径在 10~25 mm 范围内随时间的变化近似成线性变化,而且线性程度较高。

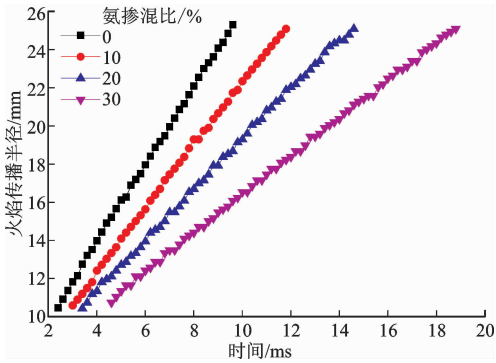
2.4 火焰传播速度

火焰传播半径 10~25 mm 内随时间的变化线性程度较高,这说明在火焰传播过程中速度比较稳定,故采用此过程的平均火焰传播速度表征该工况

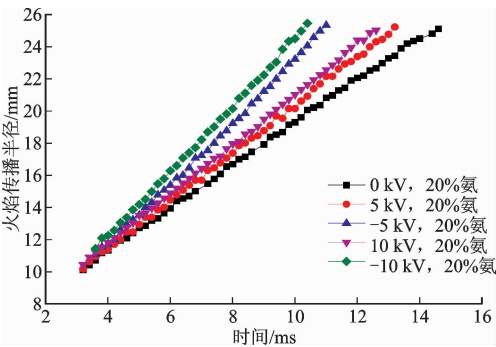
表 2 $\lambda=1.2$ 时不同氨掺混比下的平均火焰传播速度及速度提升率随电压变化情况

Table 2 Variation of average flame propagation speed and speed increase rate with change of voltage under different mixing ratios when $\lambda=1.2$

$\alpha/\%$	0 kV		5 kV		-5 kV		10 kV		-10 kV	
	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$
0	2.035		2.118	4.079	2.234	9.779	2.478	21.769	2.503	22.998
10	1.562		1.795	14.917	1.870	19.718	2.044	30.858	2.160	38.284
20	1.315		1.537	16.882	1.620	23.194	1.897	44.259	1.989	51.255
30	0.990		1.258	27.071	1.295	30.808	1.449	46.343	1.533	54.848



(a)0 kV 下火焰传播距离随时间变化图



(b)各电压下火焰传播距离随时间变化图

图 6 火焰传播距离随时间的变化

Fig. 6 Variation of flame propagation distance changing with time

下的火焰传播速度。通过处理实验数据可得到不同氨掺混比、不同过量空气系数、不同加载电压下的火焰传播速度,如表 2、表 3 所示,表中 φ_v 为速度提升率。

相比于传统的碳氢燃料/空气预混火焰(本文实验以甲烷/空气预混火焰为对照组),掺混氨会使预混火焰的平均火焰传播速度明显降低,随着掺混比增多,火焰传播速度不断减慢。当施加电压相同时,火焰传播速度同样会随着氨掺混比的增加而不断减小,如表 2 和图 7 所示。

由表 2 和图 8a 可知,施加电场后,正、负直流电

表 3 $\alpha=20\%$ 时不同过量空气系数下的平均火焰传播速度及速度提升率随电压变化情况

Table 3 Variation of average flame propagation speed and speed increase rate with change of voltage under different excess air coefficients when $\alpha=20\%$

λ	0 kV		5 kV		-5 kV		10 kV		-10 kV	
	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\varphi_v/\%$
1.0	1.992		2.193	10.090	2.269	13.906	2.429	21.938	2.495	25.251
1.2	1.315		1.537	16.882	1.620	23.194	1.897	44.259	1.989	51.255
1.4	0.722		0.884	22.438	0.956	32.410	1.178	63.158	1.233	70.776

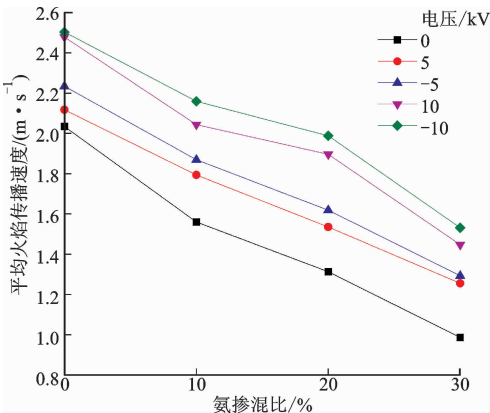
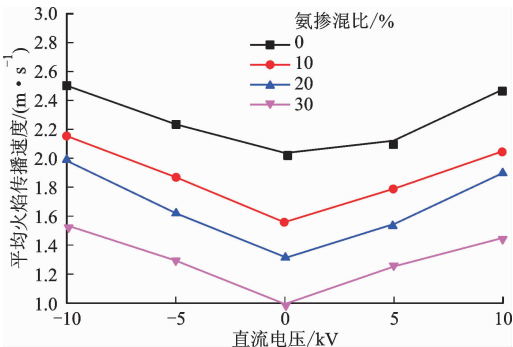


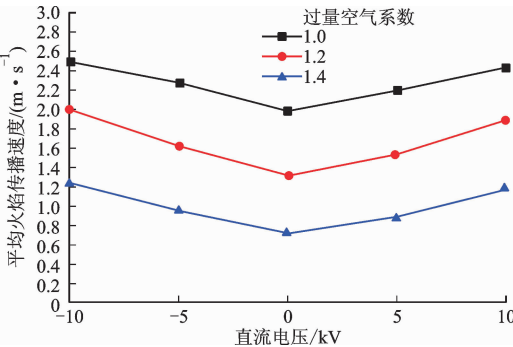
图 7 $\lambda=1.2$ 时平均火焰传播速度随氨掺混比的变化
Fig. 7 Variation of average flame propagation velocity with change of ammonia mixing ratio at $\lambda=1.2$

场对甲烷/氨/空气预混火焰的火焰传播速度都是起到促进作用,且不同掺混比下的火焰传播速度都是随着所加电压的增大而增大。这种促进效果的变化规律也符合在不同过量空气系数条件下的实验结果,如表 3 和图 8b 所示。图 8b 是保持 20% 氨掺混比,过量空气系数 λ 分别为 1.0、1.2、1.4 条件下的实验结果。

由表 2 和图 9a 可以看出,正、负直流电场对于甲烷/氨/空气预混火焰传播速度的促进效果存在差异。在同一掺混比下,负直流电场对火焰传播速度的促进效果要略强于正直流电场;电压一定时,直流电场对甲烷/氨/空气预混火焰的促进效果会随着可燃混合气中氨掺混比的增加而增强。由表 3 和图

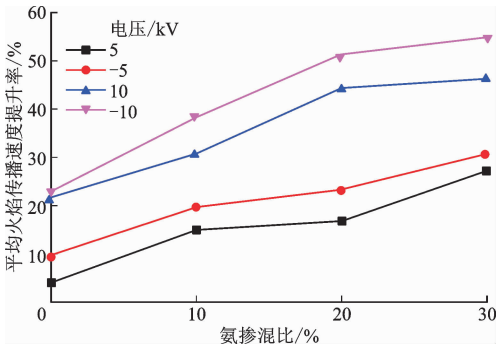


(a) 不同氨掺混比

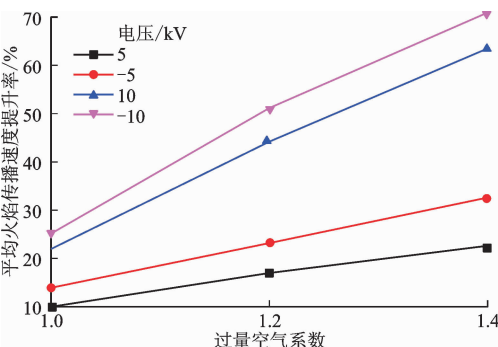


(b) 不同过量空气系数

图 8 平均火焰传播速度随加载电压的变化
Fig. 8 Variation of average flame propagation velocity with change of loaded voltage



(a) 不同氨掺混比



(b) 不同过量空气系数

图 9 平均火焰传播速度提升率的变化
Fig. 9 Variation of increase rate of average flame propagation speed

9b 可以发现,在不同过量空气系数条件下实验结果与现象依然与上述规律吻合,且随着过量空气系数的增大,直流电场的促进效果随之增强,这说明直流电场对甲烷/氨/空气预混火焰稀燃有明显的提高与促进作用。

2.5 完全燃烧时间

完全燃烧时间是指可燃混合气质量燃烧率达到 100%所需的时间,可以表征混合气燃烧情况。本文中质量燃烧率的计算方法依据 Elbe 方程,如式(2)所示^[15]

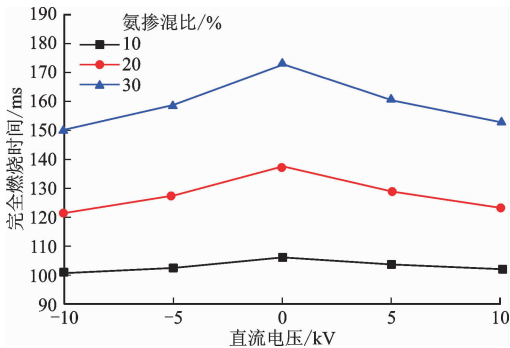
$$M_f(t) = \frac{P(t) - P_i}{P_{\max} - P_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $P(t)$ 为实验过程中采集得到的瞬时火焰燃烧

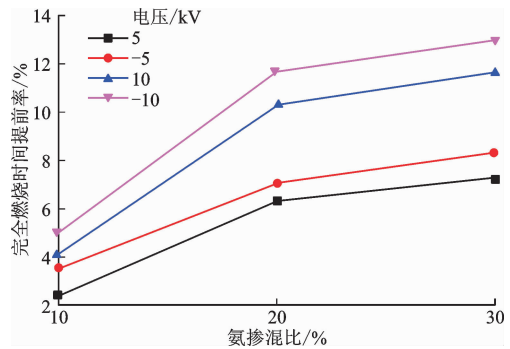
表 4 $\lambda=1.2$ 时不同氨掺混比下完全燃烧时间及时间提前率随电压的变化

Table 4 Variation of complete combustion time and time advance rate with change of voltage under different mixing ratio when $\lambda=1.2$

$\alpha/\%$	0 kV		+5 kV		-5 kV		+10 kV		-10 kV	
	t/ms	$\varphi_t/\%$	t/ms	$\varphi_t/\%$	t/ms	$\varphi_t/\%$	t/ms	$\varphi_t/\%$	t/ms	$\varphi_t/\%$
10	106.2		103.6	2.401	102.4	3.531	101.9	4.048	100.8	5.038
20	137.5		128.8	6.327	127.7	7.090	123.4	10.250	121.4	11.670
30	173.1		160.4	7.281	158.6	8.350	153.0	11.590	150.6	12.970



(a)各工况完全燃烧时间



(b)各工况完全燃烧时间提前率

压力; P_i 是燃烧前的初始压力; $P_{\max}$ 是燃烧过程中的最大压力。各工况下完全燃烧所用时间以及各电压对其所需时间的提前率如表 4 和表 5 所示,表中 φ_t 为时间提前率。

在相同的电场条件下,随着氨掺混比的增加,完全燃烧时间会明显增长。加载直流电场后,完全燃烧所需时间会相应减少,且所需时间随着所加电压的增大而下降;当氨掺混比一定、电场电压绝对值相同时,负直流电场对甲烷/氨/空气预混火焰完全燃烧时间提前的促进效果要稍强于正直流电场;电压一定时,直流电场对促进混合气完全燃烧时间提前的效果会随着氨掺混比的增加而增强,如表 4、图 10 所示。

保持氨掺混比为 20%,改变过量空气系数后发现,随着混合气变稀,直流电压使可燃混合气完全燃烧的时间明显减少;施加电压一定时,随着混合气变稀,直流电场对时间提前率的影响效果也随之增强,这也直接说明直流电压能够有效促进甲烷/氨/空气预混火焰在稀燃条件下的完全燃烧,有利于促进和改善燃烧过程,如表 5 和图 11 所示。

2.6 实验现象成因分析

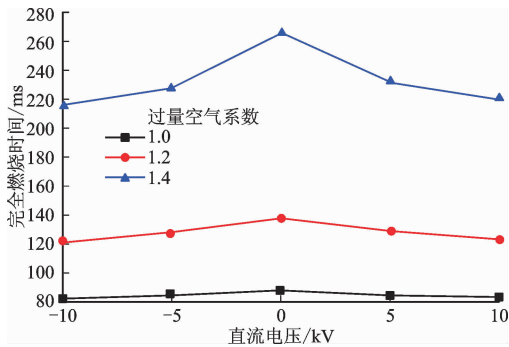
施加高压直流电场后,可燃混合气会进行一定程度的电离过程,生成一部分带电离子;同时由微火焰电学特性理论可知,混合气燃烧后的火焰内部也会进行一定程度的电离过程,部分中性分子也会通过弹性碰撞其他离子或者参与化学反应而成为带电粒子^[16]。因此这两步电离过程会使整个燃烧过程中不仅存在中性分子,还存在诸多带电粒子,这些粒子中既有正离子,也有负离子和电子。这些粒子既可能作为反应物,也可能作为生成产物存在于整个燃烧过程。施加电场以后,在定容燃烧弹内部的带电粒子会在电体积力的作用下运动,促进各种粒子间相互碰撞,电场也在一定程度上提升了粒子的能量,进而促进整体燃烧反应的进行。Prager 对于甲烷/空气预混火焰在电场作用下的研究中发现,甲烷/

图 10 $\lambda=1.2$ 时各工况完全燃烧时间及时间提前率
Fig. 10 Complete combustion time and time advance rate under various working conditions when $\lambda=1.2$

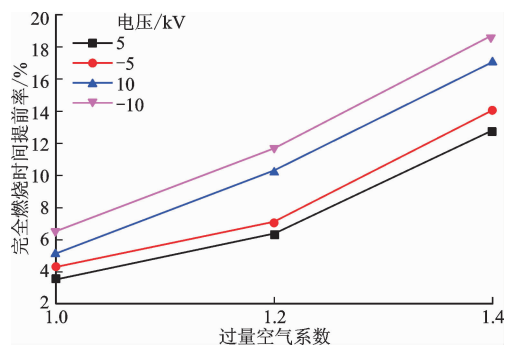
表 5 $\alpha=20\%$ 时不同过量空气系数下完全燃烧时间及时间提前率随电压的变化

Table 5 Variation of complete combustion time and time advance rate with change of voltage under different excess air coefficients at $\alpha=20\%$

λ	0 kV		+5 kV		-5 kV		+10 kV		-10 kV	
	t/ms	$\varphi_t/\%$	t/ms	$\varphi_t/\%$	t/ms	$\varphi_t/\%$	t/ms	$\varphi_t/\%$	t/ms	$\varphi_t/\%$
1.0	87.7		84.6	3.535	83.9	4.333	83.2	5.131	82.0	6.499
1.2	137.5		128.8	6.327	127.7	7.090	123.4	10.250	121.4	11.670
1.4	265.2		231.2	12.821	228.0	14.027	220.2	16.968	215.6	18.703



(a)各工况完全燃烧时间



(b)各工况完全燃烧时间提前率

图 11 20%氨掺混比在不同过量空气系数下完全燃烧时间及时间提前率

Fig. 11 Complete combustion time and time advance rate of 20% ammonia blending under different λ

空气预混火焰中存在 H_3O^+ 、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$ 、 CH_5O^+ 、 CH_3^+ 、 e^- 、 CHO_2^- 、 OH^- 等带电离子^[17], Wójcik 等通过对甲烷/氨混合物中分子、离子的质谱研究发现,甲烷/氨的混合物中存在 NH_4^+ 、 CH_4^+ 、 HN_4NH_3^+ 、 NH_4HN_3^+ 、 CNH_6^+ 、 CNH_4^+ 等诸多离子,并且这些离子浓度会随着甲烷与氨的配比发生相应的变化^[18]。这些存在的带电粒子都会因为高压直流电场的存在而受到电体积力,从而发生一系列的定向加速迁移与加速碰撞等过程,这就形成了离子风效应^[19]。正直流电场会形成负离子风,负直流电场会形成正离子风。离子风效应会受离子浓度、电

场强度以及火焰传播速度的影响。

施加的正、负直流电压增大会促进各种电离过程,同时增大定容燃烧弹内电场强度,这使得带电粒子浓度增加、受力增强,离子风效应发展程度随之增强,粒子间相互碰撞加剧,故甲烷/氨/空气预混火焰的传播速度会加快、完全燃烧时间提前;当掺混氨的比例增加、过量空气系数增大时,甲烷/氨/空气预混火焰燃烧速度减缓,离子风效应能够得到更加充分的时间发展,故在这种情况下,高压直流电场对甲烷/氨/空气预混火焰的促进效果明显,火焰传播速度提高率和完全燃烧时间提前率得到大幅度提升。

甲烷/氨/空气预混火焰形状的改变主要是由于正、负离子风发展过程的不同导致的^[20]: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,且离子风发展程度沿竖直方向自中心向两端逐渐减弱,这就使得预混火焰外缘呈梭形;加载负直流电场后,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,内部和外部涡流的存在使得原本比较规律的圆形火焰外缘逐渐变得方正,最后大致发展成为圆角矩形火焰。

3 结 论

(1)正、负直流电场对甲烷/氨/空气预混火焰传播具有明显的影响,主要体现在水平方向。直流电场的存在会使火焰形状发生趋势性变化,正直流电场会将火焰拉伸成梭形,而负直流电场则近似圆角矩形,这是由正、负离子风形成及发展原因不同造成的。随着混合气变稀、氨的增多,拉伸效果越明显。

(2)氨掺混比上升会明显降低甲烷/氨/空气预混火焰的传播速度,而加载直流电场之后传播速度有明显的提升,且提升效果随着施加电压的增强而增强;同一电压下,负直流电场的促进效果稍强于正直流电场;直流电场对甲烷/氨/空气预混火焰的平均火焰传播速度提升率会随着氨掺混比的增加、混

合气过量空气系数的增加而增加。

(3)加载直流电场会缩短甲烷/氨/空气预混火焰的完全燃烧时间,改善燃烧情况;促进完全燃烧提前效果随施加电压的增大而增强,负电场促进效果稍强于正电场;完全燃烧时间提前率会随着氨掺混比的增加以及过量空气系数的增大而增强,即直流电场可以明显促进甲烷/氨/空气预混火焰在稀燃条件下的燃烧。

参考文献:

- [1] FILIPE RAMOS C, ROCHA R C, OLIVEIRA P M R, et al. Experimental and kinetic modelling investigation on NO, CO and NH₃ emissions from NH₃/CH₄/air premixed flames [J]. *Fuel*, 2019, 254: 115693.
- [2] 陈达, 南李军, 黄宏宇, 等. 氨燃烧及反应机理研究进展 [J]. *化学通报*, 2020, 83(6): 508-515.
CHEN Danan, LI Jun, HUANG Hongyu, et al. research progress of ammonia combustion and reaction mechanism [J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2020, 83(6): 508-515.
- [3] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69: 63-102.
- [4] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(1): 109-133.
- [5] KURATA O, IKI N, MATSUNUMA T, et al. Performances and emission characteristics of NH₃-air and NH₃-CH₄-air combustion gas-turbine power generations [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2016, 36(3): 3351-3359.
- [6] 周梅, 楚育纯, 王兆林, 等. 氨丙烷混合燃料降碳燃烧的排放特性 [J]. *燃烧科学与技术*, 2020, 26(3): 257-264.
ZHOU Mei, CHU Yuchun, WANG Zhaolin, et al. Emission characteristics of ammonia-propane blended fuel for carbon reduction combustion [J]. *Combustion Science and Technology*, 2020, 26(3): 257-264.
- [7] TAMURA M, GOTOU T, ISHII H, et al. Experimental investigation of ammonia combustion in a bench scale 1.2 MW-thermal pulverised coal firing furnace [J]. *Applied Energy*, 2020, 277: 115580.
- [8] ICHIKAWA A, NAITO Y, HAYAKAWA A, et al. Burning velocity and flame structure of CH₄/NH₃/air turbulent premixed flames at high pressure [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(13): 6991-6999.
- [9] XIAO H, VALERA-MEDINA A, BOWEN P J. Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels [J]. *Energy*, 2017, 140(1): 125-135.
- [10] 卢矍然, 高忠权, 何子奇, 等. 直流电场对甲烷/空气预混火焰影响的机理研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(3): 88-96.
LU Jueran, GAO Zhongquan, HE Ziqi, et al. Study on the mechanism of the effect of direct current electric field on methane/air premixed flame [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(3): 88-96.
- [11] 杜增晖, 高忠权, 何子奇, 等. 高初始压力下交流电场对甲烷/空气预混球形火焰燃烧特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(3): 8780-8796.
DU Zenghui, GAO Zhongquan, HE Ziqi, et al. Effect of AC electric field on combustion characteristics of methane/air premixed spherical flame at high initial pressure [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(3): 8780-8796.
- [12] 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. Influence of negative DC electric field on premixed methane/air flame with different initial pressures [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2018, 69(4): 1602-1610.
- [13] 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.
- [14] LIU Shibo, ZOU Chun, SONG Yu, et al. Experimental and numerical study of laminar flame speeds of CH₄/NH₃ mixtures under oxy-fuel combustion [J]. *Energy*, 2019, 175: 250-258.
- [15] 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.
- [16] 王振统. 加氢对甲烷层流火焰正面淬熄状态下电学特性的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 14-17.
- [17] PRAGER J, RIEDEL U, WARNATZ J. Modeling ion chemistry and charged species diffusion in lean methane-oxygen flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2006, 31(1): 1129-1137.
- [18] WÓJCIK L, MARKOWSKI A. Mass spectrometric

study of ion/molecule reaction in methane and ammonia mixtures [J]. Vacuum, 2005, 78(2): 235-240.

[19] 刘杰, 孙天旗, 段浩, 等. 自由电子对直流电场火焰传播的影响 [EB/OL]// 中国内燃机学会燃烧节能净化分会 2014 年学术年会暨先进发动机节能及测试技术论坛论文集. (2015-05-28)[2021-04-02]. <https://d.wanfangdata.com.cn/conference/8466631>.

[20] 孟浩, 杨猛, 何子奇, 等. 正直流电场对球形火焰影响的机理分析 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(7): 68-73.

MENG Hao, YANG Meng, HE Ziqi, et al. Mechanism analysis of the influence of positive DC electric field on spherical flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(7): 68-73.

[本刊相关文献链接]

张灏,高忠权,高煦尧,等. 甲烷/空气预混湍流火焰的离子电流信号特征分析. 2021, 55(5): 10-17. doi: 10. 7652/xjtuxb202105002.

卢夔然,高忠权,潘俊宇. 高频交流电场对预混稀燃火焰影响的机理分析. 2020, 54(5): 9-16, 94. doi: 10. 7652/xjtuxb202005002.

卢夔然,高忠权,何子奇,等. 直流电场对甲烷/空气预混火焰影响的机理研究. 2020, 54(3): 88-96. doi: 10. 7652/xjtuxb

202003011.

杜增晖,高忠权,何子奇,等. 高初始压力下交流电场对甲烷/空气预混球形火焰燃烧特性的影响. 2020, 54(3): 80-87, 96. doi: 10. 7652/xjtuxb202003010.

张烨苗,李倩倩,闫治宇,等. 异辛烷掺混乙醇在高温下层流预混燃烧特性的研究. 2018, 52(7): 74-79, 100. doi: 10. 7652/xjtuxb201807011.

要雅姝,温渡,周屈兰,等. 高温水蒸气氛围中煤燃烧特性研究. 2018, 52(12): 84-92. doi: 10. 7652/xjtuxb201812013.

汪映,白元启,王鹏,等. 高辛烷值组分对正庚烷着火燃烧特性的影响. 2018, 52(11): 30-36, 80. doi: 10. 7652/xjtuxb201811005.

陶子宸,王长安,王鹏乾,等. 半焦富氧燃烧扩散效应研究. 2018, 52(9): 155-161. doi: 10. 7652/xjtuxb201809021.

王振林,李祥晟,庄士超,等. 旋进涡核与火焰面耦合作用对燃烧稳定性影响的数值研究. 2018, 52(7): 60-67. doi: 10. 7652/xjtuxb201807009.

谢萌,马志杰,王全红,等. 聚甲氧基二甲醚及其高比例掺混柴油混合燃料发动机燃烧与排放的试验研究. 2017, 51(3): 32-37, 140. doi: 10. 7652/xjtuxb201703006.

陈立,李祥晟. 低旋流 CH₄/H₂ 火焰的燃烧特性及稳定性机制研究. 2017, 51(1): 72-78. doi: 10. 7652/xjtuxb201701012.

(编辑 亢列梅)