

文章编号:1000-8055(2012)09-1974-05

等离子体助燃对燃烧产物影响的实验

赵兵兵¹, 张 鹏², 何立明¹, 杜宏亮¹

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038;

2. 空军工程大学 理学院, 西安 710051)

摘 要: 采用介质阻挡放电在燃烧实验段中产生等离子体,进行了等离子体助燃条件下丙烷/空气混合气燃烧过程影响因素及其规律的实验研究.测量了空气、丙烷/空气混合气介质阻挡放电的光谱特性.通过烟气分析仪测量燃烧产物成份,得到了燃烧产物中 O_2 、CO 体积分数随时间的变化.研究了激励器放电电压、空气流量、丙烷流量对燃烧产物的影响.实验结果表明:等离子体助燃时, O_2 和 CO 体积分数变化速率增大;稳定燃烧后 O_2 和 CO 体积分数小于常规燃烧的,燃烧效率提高;减小放电电压,增大空气、丙烷流量,等离子体助燃的效果减弱.

关 键 词: 等离子体; 助燃; 介质阻挡放电; 燃烧产物; 发射光谱

中图分类号: V231. 2

文献标志码: A

Experiments of plasma assisted combustion's effect on combustion products

ZHAO Bing-bing¹, ZHANG Peng², HE Li-ming¹, DU Hong-liang¹(1. Engineering Institute of Aeronautics and Astronautics,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Experiments of plasma assisted combustion (PAC) in propane-air mixtures were conducted. The plasma was produced by dielectric barrier discharges (DBD), and the emission spectrums of air and propane-air mixture were tested respectively. The variation of O_2 and CO volume fractions with time was measured using the gas analyzer. The effect of discharge voltage, air flow and propane flow on combustion products were analyzed and discussed. The results show that in PAC, the variation rates of O_2 and CO volume fractions increase compared to that in normal combustion, and the combustion efficiency enhances in stable combustion due to the decrease of O_2 and CO volume fractions; increasing air flow and propane flow and decreasing discharge voltage can weaken the effects of PAC.

Key words: plasma; assisted combustion; dielectric barrier discharges;
combustion product; emission spectrum

随着航空飞行器飞行包线的扩展,提高发动机在整个飞行包线内起动的可靠性、燃烧的稳定性及燃烧效率显得越来越重要.但在燃烧领域中,可燃混合气或燃料的稳定与完全燃烧一直是非常

具有挑战性的问题.等离子体助燃是航空动力学领域的一种燃烧强化新技术.等离子体内存在大量的氧原子、氢原子、氢氧基等活性粒子,可以加快反应速率,减少燃烧过程特征时间,使燃料燃烧

收稿日期:2011-11-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120921.1251.008.html>

基金项目:国家自然科学基金(51106179)

作者简介:赵兵兵(1984—),男,河北邢台人,博士生,主要从事推进系统气动热力理论与工程、等离子体技术研究.

更加充分,减少有害气体的排放;另外,等离子体放电过程能对流场产生扰动,增强气流的湍流脉动度,增加火焰前锋与新鲜混合气的接触面积,增大火焰的传播速度,增强燃烧的稳定性.由于等离子体助燃具有以上优势,国内外学者对此技术进行了大量的研究. Klimov 等^[1-6]对等离子体助燃进行了大量的实验研究. Stage 等^[7]进行了介质阻挡放电强化丙烷/空气混合气燃烧的实验,表明介质阻挡放电能明显改变火焰形态. Pilla 等^[8]进行了贫燃预混混合气的纳秒脉冲等离子体助燃实验. 兰宇丹等^[9]计算了活性粒子(O, H)和活性基(OH)在不同当量比下对参与燃烧的组分以及温度和压力的影响.

本文采用介质阻挡放电在燃烧实验段中产生等离子体,对等离子体助燃条件下丙烷/空气混合气的燃烧过程进行了实验研究,分别测量空气、丙烷/空气混合气介质阻挡放电的光谱特性,通过烟气成份分析仪测量燃烧产物成份,研究放电电压、空气流量、丙烷流量对燃烧产物的影响.

1 实验系统

等离子体助燃实验系统主要包括:助燃实验段、助燃激励电源、助燃激励器、测量系统等.

助燃实验段是进行等离子体助燃实验的平台,主要包括助燃激励器安装孔、观测窗、点火器安装孔、火焰稳定器和压力传感器安装孔,以及烟气分析仪探针安装孔.实验段总长 950 mm,燃烧段尺寸 320 mm×50 mm×20 mm.助燃实验段如图 1 所示.

助燃激励电源为中频双高压差分电源,差分输出电压峰-峰值为 0~60 kV,输出频率 5~25 kHz 连续可调,最大输出功率点在 10 kHz 左右,输出功率为 1 kW.

等离子体助燃激励器由上下 2 个水平安装在实验台上的电极组成,气体放电在两块电极间产生.绝缘介质层采用厚度为 1 mm 的陶瓷基板,放电间隙距离为 20 mm.助燃激励器的具体结构参考文献^[10].

助燃激励器的电压、电流分别采用 Tektronix 公司的高压探针 P6015A 和电流组合探针 TC-PA300+TCP312 测量,通过 DPO4014 示波器进行显示和保存;光谱测量采用 Ocean Optics 公司的 4 通道光谱仪;燃烧产物通过 Testo350 便携式烟气分析仪测量;高速 CCD(charge coupled device)相机帧为 1000 Hz,分辨率 128×128 像素.

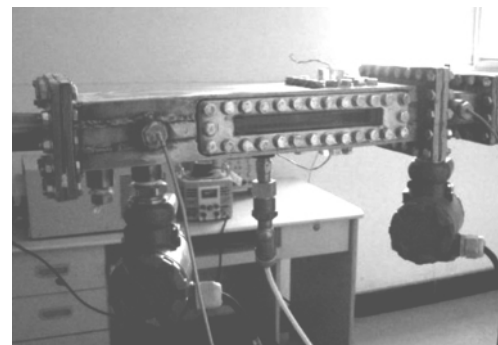
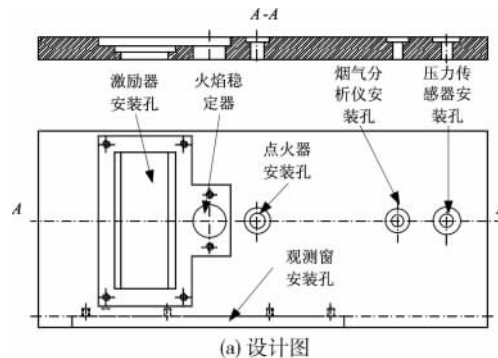


图 1 等离子体助燃实验段

Fig. 1 PAC(plasma assisted combustion) tester

2 实验结果及分析

实验以丙烷/空气混合气为燃料,燃烧实验段通入预混混合气后,打开助燃激励电源,利用介质阻挡放电产生等离子体,用电火花点火器点燃混合气.图 2 为丙烷/空气混合气介质阻挡放电的照片.

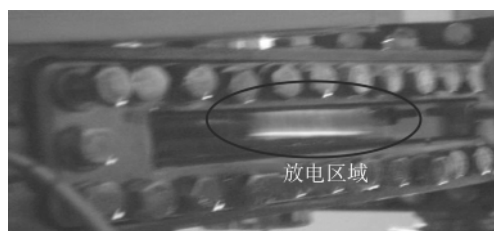


图 2 丙烷/空气混合气介质阻挡放电照片

Fig. 2 Photo of DBD (dielectric barrier discharges) with propane-air mixtures

2.1 介质阻挡放电的光谱特性

在放电电压为 47 kV,频率为 9.8 kHz,空气和丙烷/空气混合气介质阻挡放电的发射光谱分别如图 3、图 4 所示.

由图 3 可知,空气介质阻挡放电产生氮气第二正带系 $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$ 和氮分子离子态的第一负带系 $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+)$ 的谱线,放电中碰撞过程以电子为主,电子在电场的作用下加速运动

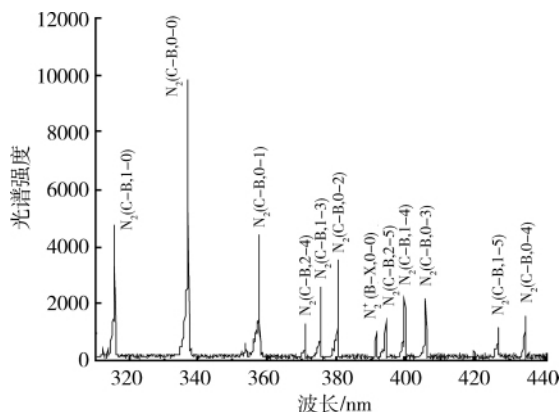


图 3 空气介质阻挡放电发射光谱

Fig. 3 Air DBD emission spectrum

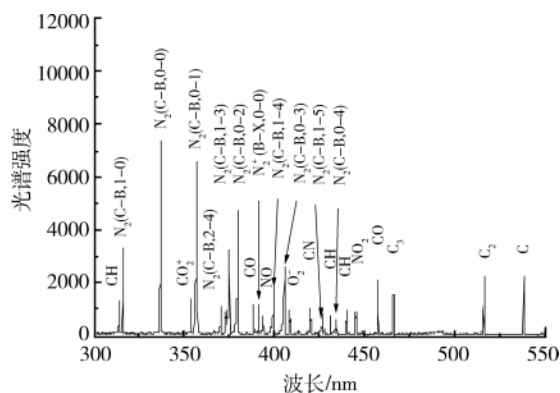


图 4 丙烷/空气混合气介质阻挡放电发射光谱

Fig. 4 Propane/air mixture DBD emission spectrum

形成高能电子,高能电子与基态原子、分子碰撞,产生激发态分子、原子以及离子态粒子。

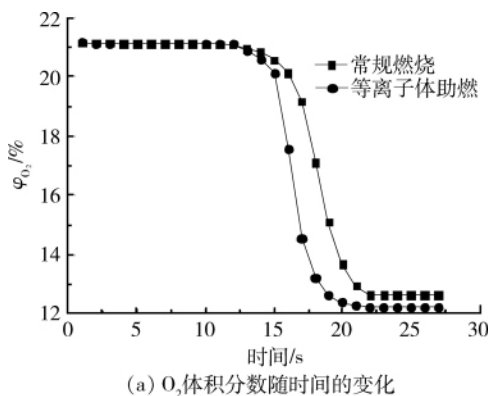
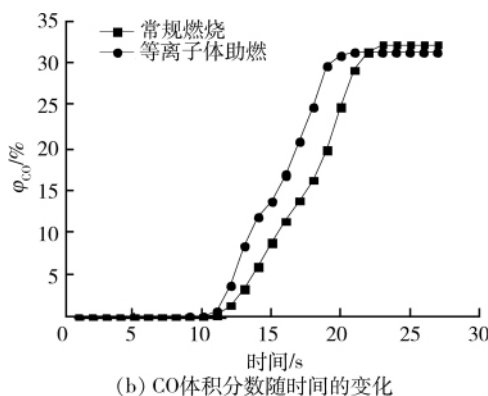


由图 4 可知,丙烷/空气混合气介质阻挡放电中出现了 $C, C_2, C_3, CH, CO, NO, NO_2, CN$ 等粒子的谱线。由链支反应机理^[11]可知,放电中产生了大量的 CH, O, OH 和 H 等活性粒子。

2.2 燃烧产物随时间的变化

在放电电压为 47 kV,频率为 9.8 kHz,空气流量为 7 m³/h,丙烷流量为 1 m³/h 的条件下,常规燃烧和等离子体助燃时, O_2 和 CO 体积分数随时间的变化如图 5 所示。

由图 5(a)可知,在常规燃烧和等离子体助燃时, O_2 体积分数随时间变化趋势一致,都是逐渐减小并趋于稳定。等离子体助燃时, O_2 体积分数减小的速率更快,并且燃烧稳定后 O_2 体积分数小于常规燃烧的。在图 5(b)中,常规燃烧和等离子体助燃时, CO 的体积分数随时间逐渐增大,最终趋于稳定。等离子体助燃时, CO 体积分数增大

(a) O_2 体积分数随时间的变化(b) CO 体积分数随时间的变化图 5 O_2 和 CO 体积分数随时间的变化Fig. 5 Variations of volume fraction of O_2 and CO with time

的速率更快,燃烧稳定后 CO 的体积分数小于常规燃烧的。

由 2.1 节知,等离子体助燃时,混合气放电产生大量 CH, O, OH 和 H 等活性粒子,可减小化学反应的活化能,加速碳氢燃料的燃烧反应过程^[12-13]。本实验中,由于介质阻挡放电产生了活性粒子,化学反应速率提高, O_2, CO 体积分数变化速率也因此提高;参与反应的 O_2 量增加,提高了混合气的燃烧效率,导致燃烧稳定后产物中 O_2 的含量减少;作为燃烧中间产物的 CO 的量减少,燃料燃烧更加充分。

2.3 放电电压对燃烧产物的影响

在放电电压分别为 47 kV, 59 kV, 频率为 9.8 kHz,丙烷流量为 2 m³/h 的条件下,常规燃烧和等离子体助燃时,燃烧产物中 O_2 和 CO 体积分数随空气流量的变化如图 6 所示。

由图 6 可知,放电电压为 59 kV 时,燃烧产物中 O_2 和 CO 体积分数均小于放电电压为 49 kV 时。随着放电电压升高,绝缘介质层表面累积的电荷量增加,内建电场强度增大。由于气体的电离截面是由电子能量决定的^[14],而电子能量取决于放

电电压,所以气体电离率随放电电压的增大而增大.放电电压增大,气体电离率增大,介质阻挡放电产生的活性粒子数增多,参与反应的 O_2 量增大,燃烧效率提高,燃烧中间产物 CO 的量减小,燃料燃烧更加充分,等离子体助燃效果更为明显,但这种优势随空气流量的增大而逐渐减弱.

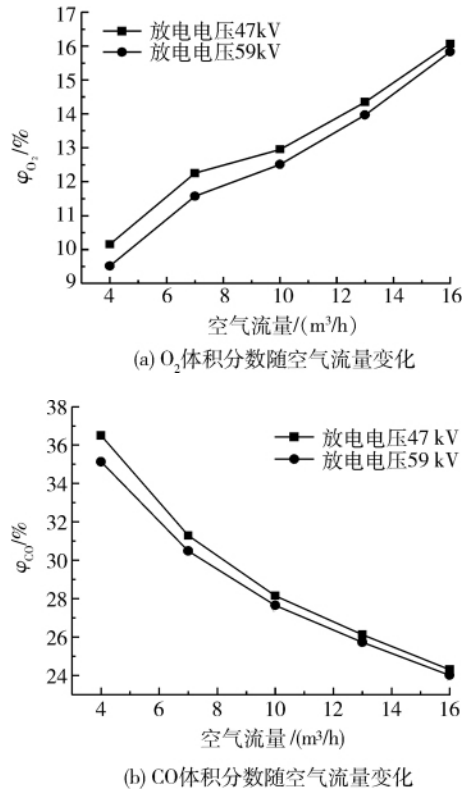


图6 放电电压分别为47 kV, 59 kV时燃烧产物随空气流量的变化

Fig. 6 Variation of combustion products with air flow rates at discharge voltages of 47 kV and 59 kV

2.4 空气流量对燃烧产物的影响

在放电电压为47 kV,频率为9.8 kHz,丙烷流量 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,常规燃烧和等离子体助燃时,燃烧产物中 O_2 和 CO 体积分数随进口空气流量的变化如图7所示.

由图7(a)可见,随着空气流量的增大,燃烧产物中 O_2 的体积分数逐渐增大.等离子体助燃时, O_2 体积分数小于常规燃烧的,而且随着空气流量的增大,两种情况下 O_2 体积分数之间的差值减小.由图7(b)可知,随着空气流量的增大,燃烧产物中 CO 的体积分数逐渐减小;等离子体助燃时, CO 体积分数小于常规燃烧的,而且随着空气流量的增大,两种情况下 CO 体积分数之间的差值减小.

由帕邢定律可知,放电的击穿电压 V_d ,压强 p 、电极间隙距离 d 之间的函数关系如下:

$$V_d = Bpd \left[\ln(pd) + \ln A / \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right] \quad (1)$$

式中 $A = 1/\lambda_e$, $B = u_i/\lambda_e$, λ_e 为电子的平均自由程; u_i 为气体的电离单位; γ 为离子轰击阴极的二次电子发射系数.

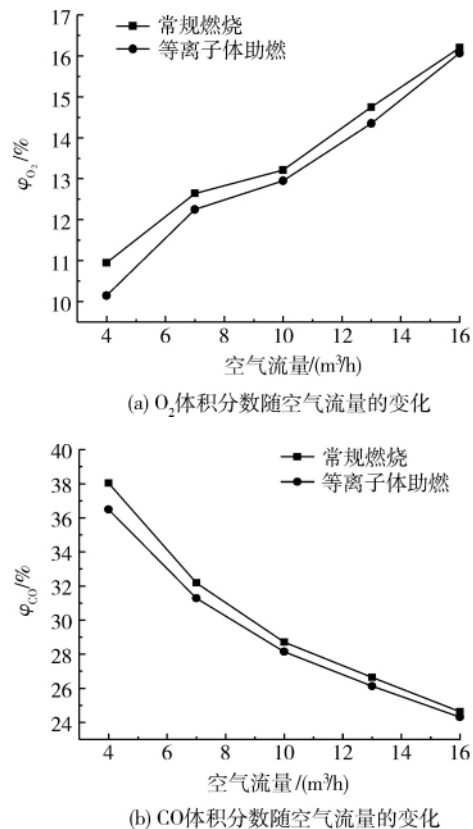


图7 丙烷/空气混合气燃烧产物随空气流量的变化

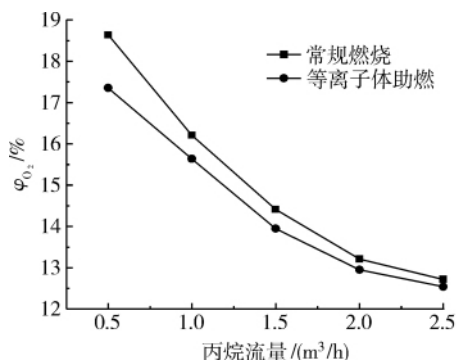
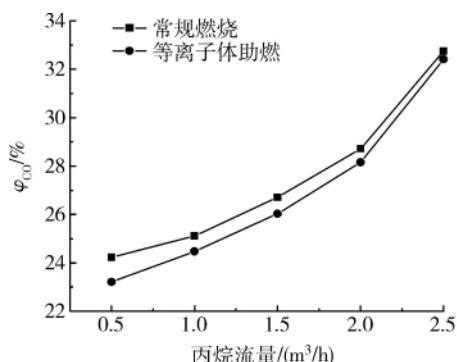
Fig. 7 Variations of combustion products with air flow rates

根据文献[15],气体的放电击穿电压 V_d 在 $p \cdot d > 10 \times 0.133 \text{ Pa} \cdot \text{m}$ 的情况下是增大的.本实验中,随着空气流量增大,燃烧实验段中气体压力增大,放电间隙距离和放电电压不变,气体的击穿电压也增大,混合气放电强度减弱,等离子体助燃的效果也随之减弱.

2.5 丙烷流量对燃烧产物的影响

在放电电压为47 kV,频率为9.8 kHz,空气流量为 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,常规燃烧和等离子体助燃时,燃烧产物中 O_2 和 CO 体积分数随丙烷流量的变化如图8所示.

由图8可知,随着丙烷流量的增大,燃烧所消耗的 O_2 量增加,燃烧产物中 O_2 的体积分数减少, CO 体积分数逐渐增大.

(a) O₂体积分数随空气流量的变化

(b) CO体积分数随空气流量的变化

图 8 丙烷/空气混合气燃烧产物随丙烷流量的变化

Fig. 8 Variations of combustion products with propane flow rates

等离子体助燃时,随着丙烷流量的增大,O₂和CO体积分数相对于常规燃烧时的变化量减小,等离子体助燃效果减弱。

3 结 论

采用介质阻挡放电方法产生等离子体,通过等离子体助燃对丙烷/空气混合气燃烧产物影响的实验研究,得到如下结论:

1) 等离子体助燃时,活性粒子的产生使得化学反应速率提高,O₂、CO体积分数变化速率增大,增加了参与反应的O₂量,混合气的燃烧效率提高,燃烧稳定后产物中O₂的含量减少;作为燃烧中间产物的CO的量减少,燃料燃烧更加充分;

2) 随着放电电压增大,气体电离率增大,介质阻挡放电产生的活性粒子数增多,参与反应的O₂量增大,燃烧中间产物CO的量减小,等离子体助燃效果增强;

3) 随着空气流量、丙烷流量增大,等离子体助燃时,燃烧产物中O₂和CO体积分数相对于常规燃烧的变化量减小,等离子体助燃效果减弱。

参考文献:

- [1] Klimov A, Brovkin V, Bityurin V, et al. Plasma assisted combustion[R]. AIAA 2001-0491, 2001.
- [2] Klimov A, Byturin V, Kuimetsov A, et al. Optimization of plasma assisted combustion[R]. AIAA 2002-2250, 2002.
- [3] Klimov A, Bityurin V, Kuznetsov A, et al. External and internal plasma assisted combustion [R]. AIAA 2003-0698, 2003.
- [4] Klimov A, Bityurin V, Moralev I, et al. Plasma assisted ignition and combustion[R]. AIAA 2005-3428, 2005.
- [5] Klimov A, Bityurin V, Kuznetsov A, et al. Non-premixed plasma assisted combustion in high speed airflow[R]. AIAA 2005-0599, 2005.
- [6] Klimov A, Bitiurin V, Moralev I, et al. Non-premixed plasma assisted combustion in high speed vortex airflow[R]. AIAA 2007-1388, 2007.
- [7] Stange S, Kim Y, Ferreri V, et al. Flame images indicating combustion enhancement by dielectric barrier discharges [J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2005, 33(2): 316-317.
- [8] Pilla G, Galley D, Lacosted D A, et al. Influence of the repetition rate of a nanosecond pulsed discharge on the stabilization of a turbulent lean premixed flame[R]. AIAA 2006-3243, 2006.
- [9] 兰宇丹, 何立明, 郭向阳. 活性粒子对 H₂/Air 混合物燃烧影响的研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 326-330. LAN Yudan, HE Liming, GUO Xiangyang. Study of active particles' influences on combustion of H₂/air mixture[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 326-330. (in Chinese)
- [10] 兰宇丹, 何立明, 丁伟. 高频高压下介质阻挡放电的实验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(8): 21-24. LAN Yudan, HE Liming, DING Wei. Experimental and simulation of reverse-discharges in the dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 21-24 (in Chinese)
- [11] Starikovskii A Y. Plasma supported combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2405-2417.
- [12] Cathey C, Cain J, Hai W, et al. Transient plasma induced production of OH and its effects on ignition in atmospheric CH₄-Air quiescent mixtures[R]. AIAA 2008-0997, 2008.
- [13] Kosarev I N, Mintoussov E I, Starikovskaya S M, et al. Control of combustion and ignition of hydrocarbon-air mixtures by nanosecond pulsed discharges[R]. AIAA 2005-3429, 2005.
- [14] 李雪辰, 尹增谦, 冯德魁, 等. 大气压介质阻挡放电特性研究[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2002, 22(1): 15-17. LI Xuechen, YIN Zengqian, FENG Dekui, et al. Study on the characteristics of dielectric barrier discharge at atmospheric pressure[J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2002, 22(1): 15-17. (in Chinese)
- [15] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.