

非热等离子体对甲烷扩散火焰影响的实验研究

李 腾 魏小林 覃建果

(中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要 设计了同轴套管式非热等离子体作用于甲烷扩散火焰的燃烧器, 研究了非热等离子体影响甲烷扩散火焰的基本现象。通过调节甲烷和空气流量的大小, 重点研究了非热等离子体对火焰推举高度的影响以及同轴射流对火焰稳定性的影响。实验研究表明, 非热等离子体的存在对甲烷扩散火焰的脱火流量, 火焰高度、稳定特性都有很大的影响。非热等离子体中的活性成分具有一定的寿命, 当火焰根部距离非热等离子体产生的位置达到或超过活性成分在寿命期内可以移动的距离时, 非热等离子对火焰的影响减弱或消失。

关键词 非热等离子体; 扩散火焰; 推举火焰; 燃烧稳定性

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2013)03-0572-04

Experimental Study on the Effect of Non-Thermal Plasma on Methane Diffusion Flame

LI Teng WEI Xiao-Lin Qin Jian-Guo

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Beijing 100190, China)

Abstract A diffusion flame burner consisted of two coaxial tubes is designed and applied to study the effect of non-thermal plasma on methane diffusion flame. The basic phenomenon of the methane diffusion flame under dielectric barrier discharge assistance was observed. By adjusting the flow rate of the methane and air, the lifted height of the methane flame and flame stabilization assisted by non-thermal plasma were studied in detail. Experimental studies have shown that, the presence of non-thermal plasma has a great impact on the critical blow-off mass flow rate, flame lifted height, and flame stability characteristics. The active matters generated by dielectric barrier discharge have a limited life. When the position of the root of the flame is far away from the non-thermal plasma zone or exceeds the moving distance of the active matters in the life period, the effect of non-thermal plasma on methane diffusion flame will weaken or even disappear.

Key words non-thermal plasma; diffusion flame; lifted flame; flame stabilization

0 引 言

非热等离子体又称为非平衡等离子体。非热等离子体中的电子温度远高于气体温度, 典型非热等离子体的电子温度约 1~10 电子伏特 (eV), 1 eV 相当于 10000°C; 但非热等离子体的宏观气体温度一般小于 1000°C, 甚至仅较室温略高一点。这些特点让非热等离子体技术可以在不用全部加热气体的状况下, 就可生成高能量的电子并加以利用。目前非热等离子体技术已用于氮氧化物控制、挥发性有机物氧化、臭味气体分解、温室效应气体转化及辅助燃烧等方面^[1-4]。非热等离子体作用于气体燃烧时, 在放电区中生成大量电子、原子、自由基、与亚稳态活性粒子, 这些活性成分到达燃烧区后, 将加快链式

反应速率, 大大增强燃料的氧化反应速度, 从而提高燃烧速率, 达到稳定、完全燃烧的效果。

国内外针对非热等离子体强化烷烃类气体燃烧的实验已开展了很多研究工作, 文献 [5] 报道了纳秒脉冲的介质阻挡放电 (DBD) 可以将预混气临界火焰吹熄速度提高两倍, 在放电能量不足燃烧器功率 1% 的情况下可以保证稀态燃烧而不需要降低流速。文献 [6] 报道了对于甲烷扩散火焰, DBD 有效降低了火焰长度, 减小推举距离, 火焰稳定性增强。实验研究中采用的电极布置结构包括双套管同轴式电极结构^[7-9]、线管同轴式电极结构^[6]、线板式电极结构等。同轴式放电结构由于可以作为射流火焰燃烧器,

收稿日期: 2012-12-26; **修订日期:** 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (No.51006115)

作者简介: 李 腾 (1978-), 男, 助研, 主要从事清洁燃烧与等离子体应用研究, E-mail: liteng@imech.ac.cn.

是采用最多的一种电极布置方式。但从目前的研究来看, 非热等离子体作用于燃烧的详细机理还不明确, 特别是电场产生的物理效应和活性成分产生的化学效应对燃烧的影响通常耦合在一起, 因此不同的研究者对非热等离子体作用于燃烧时的火焰现象产生了不同的解释^[7-9]。本文针对非热等离子体作用于甲烷扩散火焰时的燃烧现象, 开展了实验研究, 并分析了火焰变化的特性。

在已开展的采用同轴 DBD 强化燃烧的实验研究中, 采用类似文献 [9] 的结构, 即外套管比中心套管高, 放电在套管间产生, 经过放电区的气体与未经过放电区的气体在中心套管前混合并在出口燃烧。通过调节外部电极的位置和套管相对位置可以进行放电对强化燃烧效果影响的研究, 但是也有研究者分析认为实验中的回火是受电场影响的一种现象, 而非等离子体活化燃料, 并加速燃烧速度的结果; 实验中的燃烧强化是由于边缘电场促进了燃气和氧化剂的混合传质过程^[7-8]。还有一类研究则是放电作用在内套管内^[6], 这种放电主要是作用在燃料上。

1 实验装置

为了研究介质阻挡放电对甲烷扩散火焰的影响, 本文设计了如图 1 所示的实验系统, 由于管口平齐, 并且电极在管口下方, 减弱了电场对混合的影响; 同时采用了较小的内管直径, 空气与燃料形成了同轴射流的结构, 可以产生较稳定的火焰抬升, 有利于研究放电产生的非热等离子体对火焰稳定性的影响。在实验中考察了电极对放电的影响, 进一步通过分别调节空气和甲烷流量的办法, 分别在有无等离子体作用下观察了火焰的抬升、驻留、吹熄等形态变化, 初步研究了非热等离子体对火焰稳定性的影响。如图 1 所示, 整个实验装置包括配气单元、非热等离子体发生器、高频高压等离子体电源和测量仪器等。配气单元由高纯甲烷气瓶 (99.99%)、空压机气源、减压阀、质量流量控制器等组成, 可以满足较大范围配气调节需要, 甲烷流量的变化范围为 0~800 mL/min, 根据具体流量的变化, 其控制精度为流量计读数的 2.5%~10%。非热等离子体发生器为双套管结构, 其内层中心套筒为刚玉材质, 管外径为 1 mm, 内径为 0.6 mm 外层套管为石英材质, 管内径为 10 mm, 外径为 13 mm, 可以在高频高压电场的作用下, 形成介质阻挡放电。两管口径上端面平齐, 其中刚玉管内置外径为 0.3 mm 漆包铜线, 石英管外覆盖有 10 mm 高度的金属胶带 (材质为高密度的不锈钢

细丝网)。铜线和丝网胶带上端处都距离管口上端面 8 mm 左右。高频高压等离子体电源采用高压线圈和容性负载谐振产生高压, 电压峰值可达到 30 kV, 调节频率发生谐振时可以形成等离子体放电。实验中通过数码相机尼康 D90 拍摄火焰图片并通过 7 通道光纤光谱仪检测等离子体放电和火焰光谱分布。

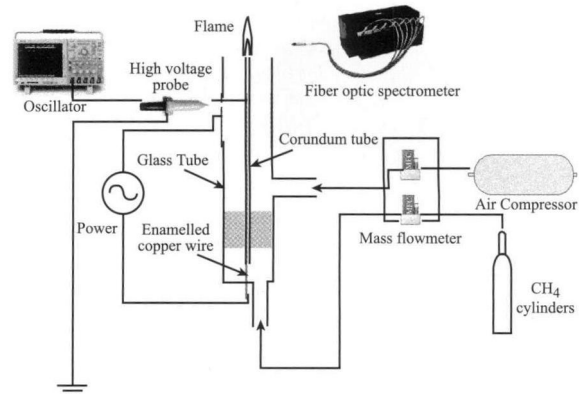


图 1 实验系统简图

Fig. 1 Experimental system diagram

2 实验结果与分析

2.1 高压电极布置方式对放电的影响

对于毛细管, 如果采用 Ar 气等惰性气体为介质, 采用 DBD 电极布置方式或单电极很容易产生毛细管射流放电现象。唐井峰等进行了这种冷射流对甲烷扩散火焰影响的研究^[10], 研究发现射流等离子体的存在能改变火焰状态, 减弱了火焰状态对路径的依赖特性。我们在实验中通过在毛细刚玉管内通 Ar 也可以产生微细的冷等离子体射流 (如图 2(a) 所示), 甚至可在上游惰性气体管道内形成几十厘米的丝状放电现象。从图 2(a) 可以看到, 放电通道主要发生在中心电极前的空管段内, 因此这种射流主要是流注放电形成的。通过在外管道通甲烷气可以研究此种放电对甲烷扩散火焰形态的影响。对比图 2(a)、(b), 可以发现, 产生的 Ar 冷等离子射流会导致中心管流速较大的增加, 从而产生较强的引射效应, 使得火焰根部收缩, 燃烧充分, 析碳现象减少。

当毛细刚玉管内为甲烷气体时, 采用单电极结构, 10 kV 条件下观察到等离子体射流的现象非常微弱。这可能是甲烷气的电离能较高, 不易发生放电。如果采用外部电极接地, 则会在合适的条件下形成介质阻挡放电。根据图 1 可知, 此时介质阻挡放电主要发生在外部空气管内, 但由于内部电极和刚玉管非紧密接触, 因此高频高压条件下, 毛细刚玉管内可能也会发生放电。

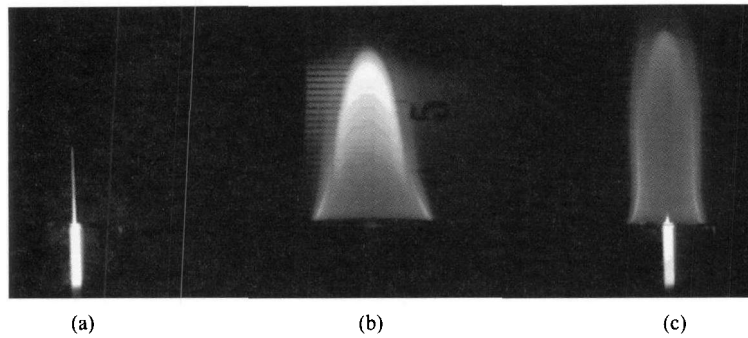


图 2 氩气射流对火焰形态的影响

Fig. 2 Photographs of the flame under Ar cold plasma jet assistance

(a) 氩气冷等离子体射流 (b) 中心为氩气射流, 外部为甲烷燃气的扩散火焰 (c) 中心为冷等离子体射流, 外部为甲烷燃气的扩散火焰, 其中 (b)、(c) 流量条件相同
 (a) Ar cold plasma jet (b) Ar jet inside, methane diffusion flame outside (c) Ar cold plasma jet inside, methane diffusion flame outside, (b), (c) have same flow rate conditions

2.2 介质阻挡放电条件下等离子对火焰稳定性的影响

作为对比, 首先进行了无放电条件下火焰抬升现象的实验。实验发现, 在适当条件下, 较容易形成稳定的火焰抬升, 火焰抬升高度随燃料平均流速变化的图片和数据分别如图 3(a)、(b) 所示。

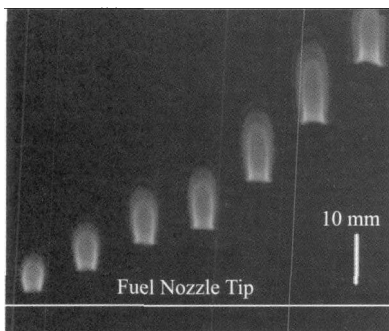


图 3(a) 无等离子体产生时火焰的抬升现象

Fig. 3(a) Photographs of lifted flames without plasma

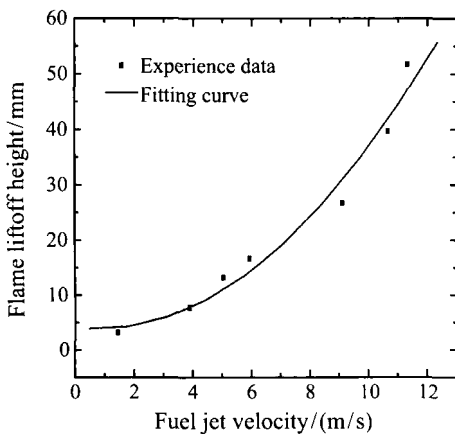


图 3(b) 火焰的抬升高度与燃料平均流速的关系

Fig. 3(b) Measurements of the flame lift-off height as a function of fuel jet velocity

图 3(a) 中所示的各火焰顺序与图 3(b) 的实验数据点对应, 空气的流速保持为 0.211 m/s 不变, 实验中不断增加甲烷的流速。在此条件下, 推举火焰被吹灭时甲烷的流速为 13 m/s。

当 DBD 保持峰峰电压 10 kV, 等离子体电源功率基本不变的条件下, 实验中发现火焰明显吸附在刚玉管喷嘴处 (如图 4 所示), 逐步增大甲烷流量, 没有观察到火焰抬升现象, 这说明 DBD 产生的非平衡等离子体对于燃烧产生了明显的强化作用, 使得燃烧更为稳定和充分; 在空气流速维持 0.211 m/s 不变的条件下, 火焰失稳熄灭时甲烷流速为 20.6 m/s。这时没有观察到如图 3 所示的火焰稳定抬升驻留现象, 这是因为甲烷流速更高时, 假设火焰抬升至距喷嘴较高的位置, 这时由于非热等离子体产生的活化成分只能在喷嘴附近存在, 远离喷嘴后其浓度将大大下降, 从而导致火焰在甲烷流速大于最大吹熄流速 (13 m/s, 见图 3) 的条件下无法稳定形成抬升现象, 所以导致火焰熄灭。

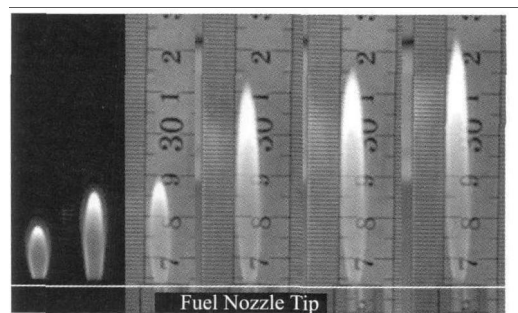


图 4 DBD 条件下, 扩散火焰吸附在刚玉管喷嘴处的实验现象 (空气流速为 0.21 m/s, 按图示从左至右各火焰对应甲烷流速为 6 m/s, 9.1 m/s, 10.7 m/s, 17 m/s, 18.3 m/s, 20 m/s)

Fig. 4 Photographs of nozzle-attached flames under dielectric barrier discharge assistance (all air flow velocity are 0.21 m/s, and corresponding methane flow velocity is 6 m/s, 9.1 m/s, 10.7 m/s, 17 m/s, 18.3 m/s, 20 m/s)

2.3 改变空气流速条件下非热等离子体对火焰稳定性的影响

为了进一步研究非热等离子体对火焰稳定性的影响, 可以固定甲烷流量, 逐步增大空气流速, 得到火焰失稳吹熄时的临界空气速度, 此速度越高则意味着火焰稳定性越强。图 5 所示为实验得到的临界失稳空气速度与甲烷流速的数据图, 从图中可以看到, 甲烷流速增大, 对应的临界空气流速则减小, 这说明射流火焰的稳定性变差; 而存在非热等离子体作用时, 同等甲烷流速条件下, 火焰失稳吹熄时的临界空气速度较没有等离子体作用时提高超过一倍, 这说明在有非热等离子体作用时, 火焰稳定性得到了增强。

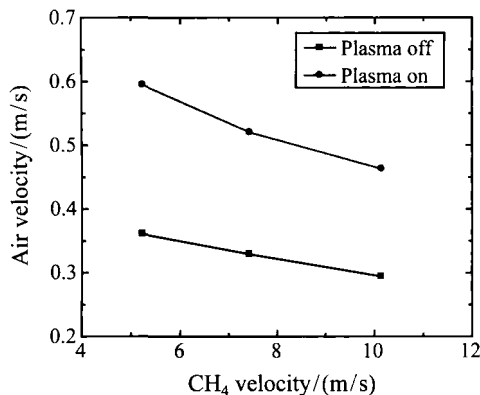


图 5 火焰失稳的临界空气速度与甲烷流速的关系
Fig. 5 Influence of critical air flow velocity on methane flow velocity

3 结 论

通过实验研究发现, DBD 产生的非热等离子体可以极大地增强甲烷扩散火焰的稳定性, 但非热等离子体中的活性成分寿命较短, 因此其影响的距离是有空间限制的, 因此如果采用等离子体强化燃烧时, 等离子体源应尽可能接近火焰。

参 考 文 献

[1] Chang M B, Kushner M J, Rood M J. Removal of SO₂

and Simultaneous Removal of SO₂ and NO From Simulated Flue Gas Streams Using Dielectric Barrier Discharge Plasmas [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1992, 2(4): 565-580

- [2] CHEN H L, Lee H M, CHEN S H, et al. Removal of Volatile Organic Compounds by Single-Stage and Two-Stage Plasma Catalysis Systems: A Review of the Performance Enhancement Mechanisms, Current Status, and Suitable Applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(7): 2216-2227
- [3] ZHOU L M, XUE B, Kogelsehatz U. Nonequilibrium Plasma Reforming of Green House Gases to Synthesis Gas [J]. *Energy and Fuels*, 1998, 12(6): 1191-1199
- [4] Starikovskaia S M. Plasma Assisted Ignition and Combustion [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2006, 39(16): 265-299
- [5] Anikin N B, Mintoussov E I, Pancheshnyi S V, et al. Nonequilibrium Plasmas and its Applications for Combustion and Hypersonic Flow Control [C]// 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA 2003-1053, 2003
- [6] Vincent-Randonnier A, Larigaldie S, Magre P, et al. Plasma Assisted Combustion: Effect of a Coaxial DBD on a Methane Diffusion Flame [J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2007, 16(1): 149-160
- [7] 邹鑫, 夏胜国, 姜春阳, 等. 甲烷燃烧强化实验中电压和频率对火焰的影响 [J]. *高电压技术*, 2009, 35(1): 31-35
ZOU Xin, XIA Shengguo, JIANG Chunyang, et al. Influence of Voltage and Frequency on Combustion Flame in Experimental Combustion Enhancement of Methane [J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(1): 31-35
- [8] 姜春阳, 夏胜国, 邹鑫, 等. 介质阻挡放电边缘电场对甲烷燃烧强化的影响 [J]. *高电压技术*, 2009, 35(1): 26-30
JIANG Chunyang, XIA Shengguo, ZOU Xin, et al. Effects of Edge Electric Field in Dielectric Barrier Discharges on Methane Combustion Enhancement [J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(1): 26-30
- [9] Rosocha L A, Kim Y, Anderson G K, et al. Combustion Enhancement Using Silent Electrical Discharges [J]. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, 2007, 1(1): 8-13
- [10] 唐井峰, 罗长金, 于达仁, 等. 射流等离子体对 CH₄ 扩散火焰状态影响的实验研究 [C]// 第三届全国高超声速科技学术会议. 无锡, CSTM-2010-0024, 2010
TANG Jingfeng, LUO Changjin, YU Daren, et al. Experimental Study on the Effect of Plasma Jet on Methane Diffusion Flame [C]// Third National Hypersonic Technology Conference. Wuxi, CSTM-2010-0024, 2010