



CSTAM 2009-0039

非平衡等离子体增强超声速燃烧的初步研究

全颖刚，余西龙，陈立红，张新宇

中国科学院高超声速科技中心

中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室

第二届高超声速科技学术会议

2009年11月2-4日 安徽·黄山

非平衡等离子体增强超声速燃烧的初步研究

全颖刚², 余西龙^{1,2}, 陈立红^{1,2}, 张新宇^{1,2}

(1 中国科学院高超声速科技中心 北京海淀区 100190)

(2 中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京海淀区 100190)

摘要 本文对非平衡等离子体作用下的甲烷-空气预混气非完全氧化进行了实验研究。采用介质阻挡放电, 测量了不同放电电压和频率下反应产物温度和 CO 浓度。结果表明: 放电频率对产物中 CO 浓度影响不大, 放电电压对产物中 CO 浓度起主要作用, 电压越高, CO 浓度越高, 表明甲烷转化率越高, 从而对增强燃烧更加有利。

关键词 介质阻挡放电, 非平衡等离子体, 甲烷, 非完全氧化, 超声速燃烧

引言

在超燃冲压发动机中, 超声速气流通过发动机的时间非常短(毫秒量级), 如何实现燃料的快速、充分和稳定燃烧, 是需要解决的一个关键问题。从化学反应的角度来看, 碳氢燃料的燃烧是复杂的链式化学反应过程, 需要经历链发生、链传递和链终止三个阶段, 其中链发生所需时间最长。在反应初期, 体系中只有少量的活性中心, 经过一段时间(点火延迟时间)的积累, 活化中心的数量才足以引发强烈的链式反应。对于大分子的碳氢燃料, 其在燃烧过程中, 首先要裂解成小分子, 然后再进一步燃烧。利用非平衡等离子体来增强燃烧, 是解决这个问题的新思路。

近年来, 利用非平衡等离子体来影响化学反应已经成为一个研究热点。在非平衡等离子体中, 离子温度低, 具有高能量(几个甚至十几个电子伏)的电子是促进化学反应的主要原因, 能够使反应分子激活并生成活性原子、离子和自由基等活性粒子, 为链式反应提供所需的活化中心, 并裂解燃料大分子, 从而缩短点火延迟时间, 增强燃烧[1]。同时, 由于等离子体主体温度可以接近或略高于常温, 就可以避免高温下的副反应, 例如燃料的碳化结焦。研究表明, 在高频、高压放电非平衡等离子体的作用下, 可以实现高速气流中的点火和火焰稳定[2], 火焰的推举高度因等离子体的作用而明

显降低[3][4]。文献[1]中, 采用纳秒脉冲放电, 放电注入系统的能量仅占燃烧放热的0.5%, 而使甲烷火焰吹熄速度提高了一倍以上, 着火延迟时间显著缩短, 说明利用非平衡等离子体来增强燃烧, 可以获得很高的能量利用效率。

1 原理

非平衡等离子化学过程涉及等离子体物理和化学等多学科理论, 具有非平衡、非稳态、非固定和非线性的特点, 涉及的粒子包括电子、离子、光子、自由基、分子和最终微纳米级的固液产物, 既有快速的基元反应, 又有缓慢的对流扩散, 具有明显的时空多尺度效应, 使等离子体过程异常复杂, 目前尚无通用完善的理论[5]。一般根据实验来判断反应所发生的基本过程。

甲烷的非完全氧化反应涉及的基元反应有数百个, 宏观上反应可表示为 $2\text{CH}_4 + \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2 \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO} + 3.76\text{N}_2$ (1) 在等离子体作用下, 最重要的反应类型包括激发、解离、电离、分子与自由基复合、中性粒子与自由基复合等[5]。反应中的一些亚稳态粒子, 如原子氧, 可以起到重要作用, 形成大量自由基[1], 可以显著增强燃烧。与甲烷相比, 反应产物中的 CO 和 H₂ 具有更短的点火延迟时间和更快的火焰传播速度, 对增强燃烧具有

重要意义。通过测量反应中生成的自由基和产物的组分浓度，可以判断对燃烧的增强效果。

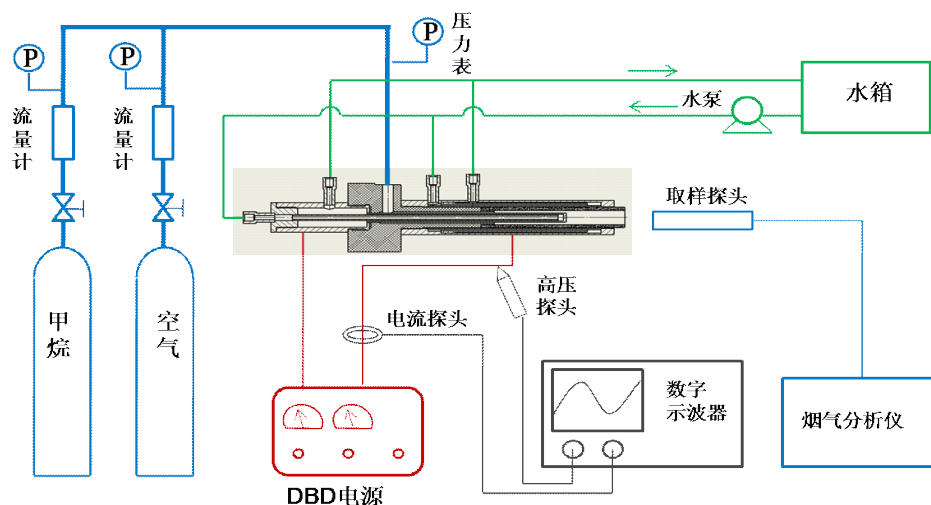


图1 实验系统示意图

本文实验选用介质阻挡放电，因为其非常适合于进行非平衡等离子化学反应，通常可以在 $10^4 \sim 10^6 \text{Pa}$ 范围内工作。电介质使间隙放电

主要通过大体积范围的微通道产生，放电电流由大量微放电组成，放电均匀稳定，可以避免微放电发展成火花或弧光放电，保证化学反应安全平稳进行。

2 实验系统

实验系统如图1所示。等离子发生器采用不锈钢电极，阻挡介质为氧化铝陶瓷，放电空间为环形，轴向长 40mm 。为保证等离子发生器长时间稳定运行，对其内外电极进行循环水冷却。甲烷和空气以一定当量比，经过长度 1.2m 、内径 6mm 的管道充分混合，进入等离子发生器放电区进行非完全氧化反应。放电采用 SARD-0208 型 DBD 电源，输出的高压脉冲近似方波，参数可在 $10 \text{kV} \sim 30 \text{kV}$ （峰-峰值）、 $10 \text{kHz} \sim 50 \text{kHz}$ 、占空比 $10\% \sim 50\%$ 范围内连续调节。放电参数用 Tektronix P6015A 高压探头和 TDS2014B 数字示波器实时记录，反应产物采用 Lano 6500 烟气分析仪进行采样分析。

3 结果分析

实验中， CH_4 流量为 $0.22 \text{ m}^3/\text{h}$ ，空气流量 $0.55 \text{ m}^3/\text{h}$ （对应 20°C ， $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ ），当量比 $\Phi=0.95$ （对应方程式（1）），预混气压力 $P=1 \text{atm}$ ，放电占空比 10% ，环境温度为 15.5°C 。实验中，放电电压和频率是控制变量，放电图像如图2所示。用烟气分析仪沿着反应腔轴线在出口外距离出口截面 10mm 处对反应产物进行采样分析，结果如图3和图4所示。



图2 实验放电图像

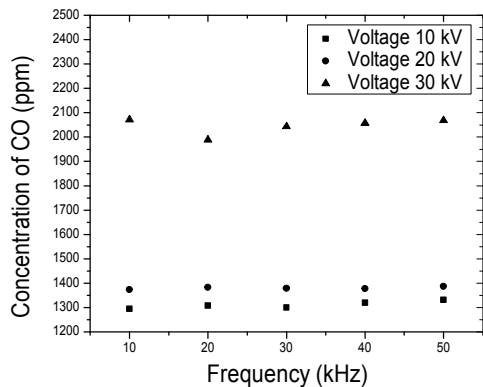


图3 出口CO浓度与电压、频率的关系

由图3可以看到，甲烷非完全氧化反应的CO产率对放电电压敏感，电压越高，产率越高。这是因为在反应的活化阶段，等离子中的高能电子起了决定作用。有部分高能电子的能量超过甲烷的第一解离能（4eV[3]），可以有效解离活化反应物，促进期望的反应进行。由于阻挡介质的存在，甲烷承受的电场强度可以超过它的介质强度[5]。电压越高，对应的电场强度越大，被激发的电子获得更高的能量，从而有利于反应的进行，表现为CO产率提高。

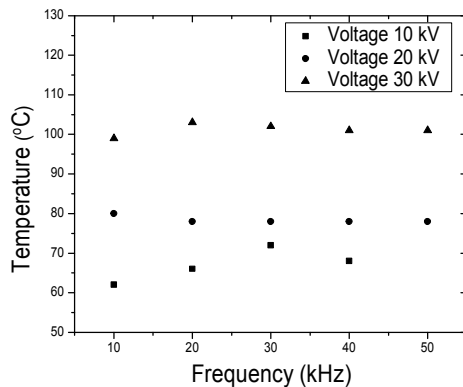


图4 出口温度与电压、频率的关系

从图4可以看出，反应产物的温度随着电压升高而升高。这是因为电压升高，对应电源输出功率增大，热效应增强，同时从图3可知此时甲烷转化率提高，而反应方程式（1）是放热反应，也会导致反应产物温度升高。但总体来看，产物温度较低。另外，频率越高，对应单位时间内激励出更多的高能电子，理论上应该使甲烷转化率提高，但从图3和图4中可以看出频率对反应的影响并不明显，对此现象的解释尚需更进一步的研究。

4 结论

利用介质阻挡放电，可以使甲烷-空气预混气在接近常温下进行非完全氧化反应，生成含CO、H₂和自由基的混合物，从而增强燃烧。反应产物中CO含量对放电电压敏感。提高放电电压，可以使等离子体中的电子具有更高的能量，有利于促进反应，提高甲烷转化率。

致谢

感谢国家自然科学基金（10525212）和（10772188）的资助。

参考文献

- 1 A.Yu.starikovskii et al. Plasma assisted combustion. Pure and Applied Chemistry, 2006, 78: 1265~1298
- 2 Ainan Bao, Yurii G.Utkin et al. Ignition of Ethylene-Air and Methane-Air Flows by Low-Temperature Repetitively Pulsed Nanosecond Discharge Plasma. IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 35, NO.6, 2007
- 3 Axel Vincent-Randonnier et al. Plasma assisted combustion: effect of a coaxial DBD on a methane diffusion flame. Plasma Sources Science and Technology, 2007, 16: 149~160
- 4 Rosocha et al. Combustion Enhancement Using Silent Electrical Discharges. International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, Vol.1, No.1, 2007

PRELIMINARY RESEARCH ON NON-EQUILIBRIUM PLASMA ASSISTED SUPERSONIC COMBUSTION

TONG Yinggang² YU Xilong^{1,2} CHEN Lihong^{1,2} ZHANG Xinyu^{1,2}

(1 Hypersonic Research Center CAS, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

(2 Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS , No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract The effect of dielectric barrier discharge non-equilibrium plasma on partial oxidation of atmospheric pressure premixed methane-air mixture was experimentally investigated. The peak-to-peak voltage and frequency of discharge were varied respectively and the concentration of CO in products was measured. The results show that higher discharge voltage leads to higher CO production, while frequency of discharge has little impact on CO production.

Key words dielectric barrier discharge, non-equilibrium plasma, methane, partial oxidation, supersonic combustion