

# 非平衡等离子体对 CH<sub>4</sub>/空气混合物燃烧的影响

杜宏亮, 何立明, 兰宇丹, 王峰

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要** 为了研究非平衡等离子体的助燃作用, 以 CH<sub>4</sub>/空气混合气为燃料, 对单管燃烧器中的燃烧过程进行了数值研究。在 3 种电离度条件下, 分析了非平衡等离子体中起主要作用的活性粒子(O, H)和活性基(OH)对 CH<sub>4</sub>/空气混合气燃烧的影响。计算结果发现, 与传统燃烧技术相比, 等离子体可以提供燃烧开始的自由基, 加快连锁反应的进行, 从而提高燃烧温度、降低污染物排放, 等离子体助燃技术还可以改善燃烧室出口流场(包括温度场和速度场)的分布。

**关键词** 非平衡等离子体; 活性粒子; 燃烧特性; 数值研究

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.03.003

**中图分类号** V231; V439<sup>+</sup>.2 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)03-0011-04

等离子体的应用是航空领域的一项新技术。目前通过实验方法所产生的等离子体大都是热力学非平衡等离子体(non-thermal equilibrium plasma), 也称冷等离子体, 其内部电子温度可达上万 K, 而离子及气体温度却接近常温, 这对化学反应十分有利<sup>[1-2]</sup>; 一方面, 电子具有足够高的能量使反应物分子激发、离解和电离; 另一方面, 反应体系又可保持低温, 使反应体系能耗减少, 节约资源<sup>[3]</sup>。

自 1983 年 Inomata 等<sup>[4]</sup>发现非平衡等离子体可提高点火性能、增加火焰传播速度、提高燃烧效率和减少污染物排放等优势以来, 等离子体辅助燃烧技术的研究日益发展。2003 年, A. Klimov, V. Brovkin, V. Bityurin<sup>[5]</sup>利用等离子体发生器形成了稳定的等离子体, 进行了内部助燃试验(让 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 通过电极的内部), 并对实验结果进行分析, 实验结果表明等离子体助燃可使 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 在高速气流中稳定燃烧, 具有较高的燃烧稳定性。文献[6]计算了初始温度对 O<sub>2</sub> 等离子体形成过程的影响。

在烷烃和空气混合气电离产生的非平衡等离子体活性粒子中, H, O 原子和活性基 OH 对燃烧影响起主要作用<sup>[7]</sup>。本文以 CH<sub>4</sub> 和空气的混合气为研究对象, 计算了随着其电离程度的不同, 等离子体助燃对燃烧产物、燃烧温度以及燃烧室出口流场的影响, 并对等离子体助燃机理进行了分析。

## 1 等离子体助燃的数值计算

### 1.1 计算模型

#### 1.1.1 化学动力学过程

CH<sub>4</sub> 与 O<sub>2</sub> 的燃烧过程复杂, 燃烧产物包括 CH<sub>4</sub>、CH<sub>3</sub>、CH<sub>2</sub>、CH、CH<sub>2</sub>O、HCO、CO<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>、H、O<sub>2</sub>、O、OH、N<sub>2</sub>、HO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 等 17 种物质, 燃烧过程由 58 基元反应方程构成。将包含这些方程和物质热力学参数的 ChemKin 文件引入 CFD 软件即可进行燃烧计算。具体反应方程式及热力学参数见参考文献[8]。

采用有限速率化学反应模型,  $N$  种化学组分,  $N_R$  个基元反应的一般表达式为:

$$\sum_{i \in \text{react}} a_i A_i \xrightleftharpoons[k_r]{k_f} \sum_{j \in \text{prod}} b_j B_j \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2010-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776100)

作者简介: 杜宏亮(1984-), 男, 安徽颍上人, 博士生, 主要从事等离子体动力学与燃烧技术研究。

E-mail: duhongliang1984@163.com

式中  $A_i$  和  $B_j$  分别为化学反应的反应物和产物,而  $a_i$  和  $b_j$  分别为组分  $ij$  的化学当量系数,总反应速率为:

$$\omega = k_f \prod_{i_{\text{react}}} n_i^{a_i} - k_r \prod_{j_{\text{prod}}} n_j^{b_j} \quad (2)$$

式中  $k_f$  为正向反应速率系数, $k_r$  为反向反应速率系数,可由 Arrhenius 公式计算得到:

$$k_f = AT^n \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (3)$$

式中: $A$  为指前因子; $n$  为无因次温度指数; $E$  为反应活化能; $R$  为通用气体常数; $T$  为介质温度。在计算模型中,式(1)中的组分浓度变化率为:

$$\left(\frac{dn}{dt}\right)_{\text{chem}} = (b_j - a_i) \omega \quad (4)$$

等离子体密度的发展可用以下简化方程<sup>[9]</sup>描述:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = (v_i - v_a - \alpha_r n_e) + D \nabla^2 n_e - \mathbf{V} \cdot \nabla n_e \quad (5)$$

式中: $v_i$  为电离速率; $v_a$  为三体附着率; $\alpha_r$  为复合率; $D$  为相应的扩散系数; $\mathbf{V}$  为气体流动速度; $n_e$  为等离子体密度; $t$  为扩散时间。

### 1.1.2 物理模型及边界条件

圆筒形燃烧器见图 1。空气进口与燃料进口都为速度进口,燃烧器中心宽度为 10 mm 的喷嘴以 60 m/s 注入  $\text{CH}_4$ ,空气从喷嘴周围以 0.5 m/s 注入;进口气流温度均为 300 K;燃烧器出口反压为 101.325 kPa;其余壁面为无滑移和无渗透的绝热壁,近壁区网格采用标准壁面函数法,对称壁面为对称边界条件。为了便于运用最小吉布斯自由能原理进行等离子体助燃的计算,对燃烧过程作如下假设:参加反应的气体为理想气体,其定压比热、焓和熵是温度的多项式;空气由 22%  $\text{O}_2$  和 78%  $\text{N}_2$  组成;燃烧过程为等压绝热过程。

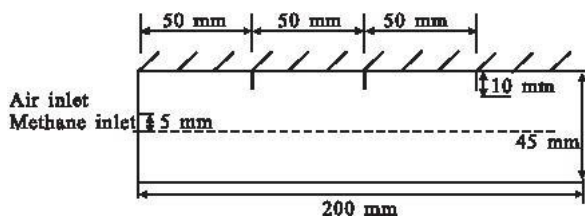


图 1 计算物理模型

Fig. 1 Physical model for computation

燃烧采用有限速率模型,以标准的  $k-\varepsilon$  模型进行紊流模拟。方程应用 Fluent 分离隐式求解器求解,各参数的离散采用二阶迎风差分格式,并实施亚松驰,收敛的判断标准是各物理量相对残差小于  $10^{-5}$ 。

## 1.2 数值计算结果

本文仅从等离子体助燃产生的化学动力学效应的角度研究等离子体在燃烧室燃烧过程中的助燃作用及对燃烧过程的影响,因此计算时仅考虑等离子体助燃中 H、O 原子和活性基 OH 对  $\text{CH}_4$  和空气混合气燃烧的影响,不考虑  $\text{N}_2$  的电离因素。在引入 ChemKin 文件后,分别计算没有电离、 $\text{CH}_4$  和  $\text{O}_2$  电离度为 1% 和 2% 这 3 种情况下的燃烧温度场和速度场,设定初始点火温度为 2 000 K。

### 1.2.1 燃烧器中的温度分布

温度是燃烧性能的重要标志,在 3 种电离度的燃烧条件下,燃烧室中的温度沿轴线的分布情况见图 2。

$\text{CH}_4$  与空气混合以后,在燃烧器进口处开始燃烧,其温度逐渐上升,达到某个最大值。当火焰传播到燃烧器出口时,温度有所下降。随着  $\text{CH}_4$  和  $\text{O}_2$  电离度的增大,温度升高更快,并且温度最高点明显前移,3 种燃烧情况下,温度最高点距离燃料进口分别为 160 mm、89 mm 和 68 mm。同时,燃烧所能达到的最高温度也随着电离度的增大而增大的,没有电离时燃烧温度最大值为 2 373 K,电离度为 1%、2% 时,这一值分别为 2 415.62 K、2 516.15 K。由此可见,电离过程中,等离子体所产生的激发、解离、复合和自由基反应可以降低反应所需的活化能,从而增大了反应速率,使燃烧过程中温度升高较快,这样可以缩短燃烧距离。

### 1.2.2 燃烧器的出口流场

燃烧室出口的温度与速度的大小可以反映燃烧进行的程度:燃烧越充分,放出的热量就越多,不仅使温度升高,还使混合物的动能增加,速度上升。图 3、图 4 分别为出口截面上的温度场与速度场的分布。

没有电离时出口截面温度范围为 1 812.33 - 2 032.08 K,电离度为 1% 时为 1 912.00 - 1 951.23 K,电离度为 2% 时为 1 991.42 - 2 008.39 K。可以看出,相对传统燃烧,等离子体助燃时平均温度是升高的,并且出口截面温度分布更加均匀,这对涡轮的安全工作有重大意义。由图 4 看出,气流速度在出口中心处是最高的,向壁面方向逐渐降低,由于粘性力的作用,壁面上的速度为 0。可见,等离子体助燃一方面使平均速度有

一定的提高,另一方面使出口截面速度分布更加均匀,从而提高涡轮的工作能力。

另外,对出口截面 CH<sub>4</sub> 和 CO 的质量分数进行积分,计算可得:没有电离时出口截面 CH<sub>4</sub> 的质量分数为  $7.03e-18$ ,CO 的质量分数为  $2.95e-5$ ;而电离度为 2% 时出口截面 CH<sub>4</sub> 的质量分数为  $3.43e-20$ ,CO 的质量分数为  $7.35e-6$ 。出口处各物质的含量可视为燃烧反应程度的一种表现,等离子体助燃使活性基增加、剩余反应物的量减少、生成物的量增加。这说明等离子体助燃时 CH<sub>4</sub>/空气混合气的燃烧效率明显比正常燃烧时要高。有等离子体助燃的情况下,大部分的区域温度十分均匀,温度梯度很小,参加反应的中间活性体 O、H 的量比传统燃烧时多,而活性中间体具有较小的活化能,燃烧更充分,所以能够生成较少的 CO,排出的污染物少。

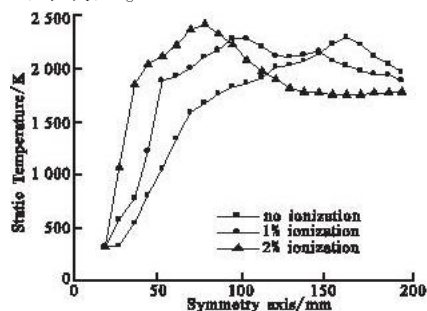


图2 温度沿轴线分布

Fig. 2 Temperature distribution along symmetry axis

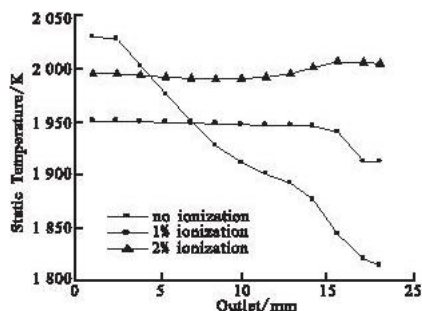


图3 出口温度分布

Fig. 3 Temperature distribution along surface of outlet

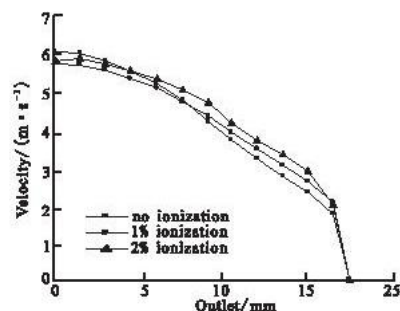


图4 出口速度分布

Fig. 4 Velocity distribution along surface of outlet

## 2 等离子体强化燃烧的理论分析

对于非平衡等离子体来说,开始链式反应的机理是通过电子碰撞激发和裂解分子。即使是比较少量的活性粒子(0.001% - 0.1%)都能够产生链式反应<sup>[10]</sup>。

从物理方面解释,气体的电离包含了4个过程:①电子和分子的弹性碰撞;②电子振动激发分子;③离解;④电离。其中非平衡等离子体中的碰撞行为是至关重要的,其碰撞程度和碰撞频率能够决定等离子体的化学反应和方向。非平衡等离子体碰撞可以分为2类:弹性碰撞和非弹性碰撞。弹性碰撞本身不会改变反应粒子内部的能级状态,而非弹性碰撞可使反应物分子内能增加或能量转移及“形变”,导致分子键松弛、断裂或裂解成自由基,也可能发生电离和解离等过程,从宏观上可观察到反应物分子发生了电击穿,即放电现象,此时含有激活态的反应物粒子,在非平衡等离子体场中的非弹性碰撞可较容易地进行化学反应。

非平衡等离子体热力学非平衡等离子体技术具有产生高能电子的能力,高能电子与燃气的相互作用,发生离解、激发与电离等反应,使外界不用加热就可获得反应所需的能量来激活反应的活性物种<sup>[11]</sup>,可将大分子有机燃料离解成小分子燃料,并产生具有高活化度的自由基和化学物质来促进燃烧。由于等离子体的高温作用,产生了自由活化基以及加速化学反应的碳氧化物。自由活化基的产生使反应速度加快,活化能降低使反应更加易于进行;碳氧化合物的生成使燃烧速度加快。人工方法产生等离子体,改变了传统燃烧以自身的释放能量产生活性自由基和活性物种的化学反应过程,从而影响燃烧系统的化学平衡,使燃烧的化学动力学过程得以加速进行。

## 3 结束语

非平衡等离子体带有高能量、高电子温度的化学场可将反应物分子激活,降低了燃料的活化能。根据以上不同电离度下 CH<sub>4</sub> 和空气混合气放电产生的非平衡等离子体助燃的动力学模型,通过计算与分析,可以得出以下结论:①等离子体可以提供燃烧开始的自由基,加快连锁反应的进行,提高燃烧温度;②等离子体中的 H、O 和 OH 可增大化学反应速率常数,提高燃烧速率;③与传统燃烧技术相比,等离子体助燃可以改善燃烧器出口流场(包括温度场和速度场)的分布;④等离子体助燃可以使燃料燃烧更加充分,降低污染物的排放。

## 参考文献:

- [1] 李应红, 吴云, 宋慧敏, 等. 大气压等离子体流动控制实验[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(3):1-3.  
LI Yinghong, WU Yun, SONG Huimin, et al. Preliminary experimental investigation of atmosphere plasma flow control technology[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2006, 7(3):1-3. (in Chinese)
- [2] 安治水, 李益文, 李应红, 等. 非对称等离子体激励器的电场仿真[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007, 8(2):49-51.  
AN Zhiyong, LI Yiwen, LI Yinghong, et al. Study of the interference mitigation for ultra-wideband communication system[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2007, 8(2):49-51. (in Chinese)
- [3] 郭向阳, 何立明, 兰宇丹, 等. 基于化学平衡的等离子体助燃计算与分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007, 8(6):8-11  
GUO Xiangyang, HE Liming, LAN Yudan, et al. Calculation and analysis of plasma assisted combustion based on chemical equilibrium[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2007, 8(6):8-11. (in Chinese)
- [4] Inomata T, Okazaki S, Moriwaki T, et al. The application of silent electric discharges to propagating flames[J]. Combustion and flame, 1983, 50:361-363.
- [5] Klimov A. Non-premixed plasma-assisted combustion in high-speed airflow[R]. AIAA 2005-0599.
- [6] 王峰, 何立明, 兰宇丹, 等. 初始温度对 O<sub>2</sub> 等离子体形成过程的影响[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(2):21-23.  
WANG Feng, HE Liming, LAN Yudan, et al. The influence of initial temperature on the formation process of O<sub>2</sub> Plasma[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(2):21-23. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] Sy Stange, Yongho Kim, Vincent Ferreri, et al. Flame images indicating combustion enhancement by dielectric barrier discharges[J]. IEEE transactions on plasma science, 2005, 33(2):316-317.
- [9] Jagers H C, Engel Von A. The effect of electric fields on the burning velocity of various flames[J]. Combustion flame, 1971, 16:275-285.
- [10] 郭向阳, 何立明, 兰宇丹. 非平衡等离子体对燃烧影响的研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(6):148-151.  
GUO Xiangyang, HE Liming, LAN Yudan. Study on effect of non-thermal equilibrium plasma on combustion[J]. Journal of projectiles, rockets, missiles and guidance, 2008, 28(6):148-151. (in Chinese)
- [11] 汤洁, 段忆翔, 赵卫, 等. 介质阻挡放电等离子体增强引擎燃烧技术的初步研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(3):733-738.  
TANG Jie, DUAN Yixiang, ZHAO Wei, et al. Study of dielectric barrier discharge nonequilibrium plasma-assisted combustion for more efficient engine[J]. High voltage engineering, 2010, 36(3):733-738. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

## Influence of Non-thermal Equilibrium Plasma on Combustion Characteristics of Methane/Air

DU Hong-liang, HE Li-ming, LAN Yu-dan, WANG Feng

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The new intensified combustion technology by using non-thermal equilibrium plasma in aero propulsion field causes more and more attention. Aimed at the study of the effect of plasma assisted combustion, the combustion characteristics of methane/air with active particle (O and H) and active group (OH) in non-thermal equilibrium plasma in firebox is investigated by numerical analysis. The result shows that plasma assisted combustion can greatly enhance flaming temperature by providing more free radicals and accelerating chain reaction, meliorate the temperature distributions and velocity distributions of the surface of outlet. By this plasma assisted combustion technique, the combustion efficiency can be increased and the discharge of pollutant decreased.

**Key words:** plasma assisted combustion; active particle; combustion characteristics; numerical analysis