

甲烷掺氢诱导末端混合气电离一维机理模型研究

王泽¹, 徐杰¹, 黄国钊¹, 董光宇¹
(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

One-dimensional mechanism model of end-gas ionization induced by Hydrogen-enriched compressed natural gas

Wang Ze¹, Xu Jie¹, Huang Guozhao¹, Dong Guangyu¹
(1. Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: Natural gas is widely regarded as an alternative fuel to gasoline because of its high thermal efficiency and fewer polluting emissions. But its combustion will produce a lot of CO₂ emissions, it is difficult to meet the low-carbon requirements. Hydrogen is an ideal fuel for pollution-free combustion, but the volume calorific value of hydrogen is low, and the technology for large-scale use of hydrogen is not mature. Doping hydrogen in natural gas will become one of the most feasible solutions for the transition from fossil energy utilization to hydrogen energy utilization. In order to study the formation mechanism of ion current in hydrocarbon flame more accurately and from a more essential perspective, this paper develops a one-dimensional flame/electromagnetic multi-physical field coupling transient reaction flow solver based on MATLAB platform. The combustion process of methane terminal mixture under different hydrogen ratio was simulated.

摘要: 天然气由于有较高热效率和较少的污染排放, 被普遍认为是一种汽油的替代燃料。但其燃烧会产生排放大量的 CO₂, 难以满足低碳要求。氢气是无污染燃烧的理想燃料, 然而氢气的体积热值较低, 大规模使用氢气的技术并不成熟。在天然气中掺杂氢气将成为化石能源利用向氢能利用过渡的最可行的解决方案之一, 本文为了更准确的和从更本质的角度研究碳氢火焰中离子电流的形成机理, 基于 MATLAB 平台开发了一维火焰/电磁多物理场耦合的瞬态反应流求解器, 对不同掺氢比下甲烷末端混合气燃烧的过程进行了仿真。

关键词: 离子电流; 数值模拟; 甲烷掺氢; 末端混合气自燃

Key words: ion current; numerical modeling; hydrogen-enriched compressed natural gas; spontaneous combustion of end-gas

中图分类号: TK44417+.5

0 概述

随着汽车保有量的增加, 我国面临着环保与能源安全的压力, 需要不断寻找能提高发动机热效率同时降低有害物质排放的方法[1]。天然气由于有较高热效率、良好的安全性和经济性, 被普遍认为是一种优质的替代燃料。虽然天然气是一种清洁能源, 但其燃烧会产生排放大量的 CO₂, 难以满足低碳要求。燃烧产生的碳氢化合物、臭氧等污染物在光合作用作用下易形成有机溶胶, 成为雾霾的重要来源。相比之下氢气的燃烧产物仅为水, 在所有气体燃料

中, 氢气是无污染燃烧的理想燃料。然而氢气的体积热值较低, 大规模使用氢气的技术并不成熟, 目前的氢气设备和应用也不匹配, 故以氢气作为燃料仍存在一定困难[2,3]。

氢混合燃烧因其燃烧效率高、清洁“无碳”等特点而成为当前研究热点[4]。在天然气中掺杂氢气将成为化石能源利用向氢能利用过渡的最可行的解决方案之一, 氢燃料具有高的火焰传播速度, 火焰速度的提升可以拓宽贫燃料的可燃范围, 增加反应区强度从而降低 CO 的排放[5-7]。不仅缓解了气体

短缺,而且大大减少了NO的排放等污染物,为氢能的大规模利用提供了技术储备。Meziane等人[8]研究了天然气和氢气混合燃料的燃烧,发现将天然气与氢气混合会减少一氧化碳排放。周磊等[9]研究了不同工况下加氢能量比对天然气发动机缸内燃烧过程的影响,试验结果表明加氢可以提高最高爆发压力和压力升高率并使其对应曲轴转角位置提前。董永超等[10]在火花点火天然气发动机上进行了不同掺氢比和EGR率下的性能和排放特性试验,研究结果表明:最佳点火提前角随着EGR率的增大而提前,随着掺氢比的增加而推迟。

离子电流技术作为一种可靠的准确的发动机燃烧参数检测方法,越来越得到研究人员的重视。然而由于离子电流的形成涉及到化学反应、电场、流场等多方面因素的影响,其机理甚为复杂,目前尚仅能针对失火及爆震等现象进行初步定性检测。研究人员只能通过大量的实验,以统计学的方法来获得离子电流信号与燃烧状态的匹配规律,大大增加检测系统标定的时间与成本。同时,离子电流与燃烧边界条件呈现高度非线性关系,利用少量的实验样本,通过数值拟合或外推的方法拓展检测范围显然也是不合适的[11-14]。

针对目前离子电流相关研究主要基于实验观测,很少有关于离子电流形成的机理研究与预测模型研究的问题。本文为了更准确的和从更本质的角度研究碳氢火焰中离子电流的形成机理,着眼于电磁学、化学以及动力学,耦合了N-S方程、阿伦尼乌斯公式和电场泊松方程等方程,基于MATLAB平台开发了一维火焰/电磁多物理场耦合的瞬态反应流求解器,能够实现燃烧过程进行仿真,并在外加电场下对火焰中带电粒子的动力学进行分析。并在此基础上研究了甲烷掺氢气体在末端混合气自燃时的离子生成与输运状况。

1 一维求解器开发

1.1 控制方程

在SOURCE求解器中,为了描述燃烧时压力对波动与压力波对火焰生成与传播对影响,程序将对瞬态可压缩流体的N-S方程组进行求解。主要涉及到流体的连续性、动量守恒和能量守恒三大方程,在求解这三条方程时,将混合物视作一个整体进行研究,考察混合流体的密度、速度、温度,并不考虑各组分之间的分布与流动差异,故还需补充一条组分输运方程对这些缺失的信息进行补充。此外,

为了描述混合气中的带电粒子和电场的交互作用,还需将静电场泊松方程耦合到求解器中。

由于连续性方程没有源项,借助爱因斯坦求和惯例(Einstein's summation convention),三维方程可以很容易地退化为一维情形。式中 ρ 为混合气的密度。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

对于动量方程(2),由于在SOURCE求解器中考虑的是一维情形,故不存在湍流。其中 μ_{mix} 为混合气的平均粘度, $\rho_{q,mix}$ 为混合气的电荷密度,国际单位制量纲为 $C \cdot m^{-3}$, E 为当地的电场强度。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = \frac{\partial(\frac{4}{3}\mu_{mix}\frac{\partial u}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho_{q,mix}E \quad (2)$$

三维情形下的组分输运方程与连续性方程有着类似的形式,将三维组分输运方程改写为爱因斯坦记号形式,得到一维退化结果,如公式(3)所示,式中 ρ 为混合气的总密度, Y_α 指代某一种组分 α 的当地质量分数。 $\rho D_{\alpha,mix}\frac{\partial Y_\alpha}{\partial x}$ 为组分 α 空间浓度分布不均而引起的质量扩散现象,可由菲克定律进行定量描述; $\rho Y_\alpha \mu_\alpha \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ 是例如 e^- 与 H_3O^+ 等带电组分受到当地电势梯度的作用而引起的迁移现象。 ω_α 为组分输运方程的源项,代表了燃烧化学反应中组分 α 的产生或消耗,在SOURCE程序中,根据有限速率法进行计算。

$$\frac{\partial(\rho Y_\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Y_\alpha u)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{\alpha,mix} \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x} + \rho Y_\alpha \mu_\alpha \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = \omega_\alpha \quad (3)$$

能量方程在SOURCE程序中是最为复杂的,其包含了流体力学本身的压力-动能-内能的能量转化,还包括了组分输运引起的传质和电场对带电组分的做功。如式(4)所示,式中 H 表示混合气比内能与比动能之和, λ_{mix} 是混合气的导热系数, $\frac{dQ}{dt}$ 为化学反应提供/消耗的热量。

$$\frac{\partial(\rho H + \rho Hu)}{\partial t} = \frac{\partial(\frac{4}{3}u\mu_{mix}\frac{\partial u}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial(pu)}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda_{mix}\frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \frac{dQ}{dt} - \frac{\partial(\sum_{\alpha=1}^{N_s} h_\alpha(\rho D_{\alpha,mix}\frac{\partial Y_\alpha}{\partial x} + \rho Y_\alpha \mu_\alpha \frac{\partial \varphi}{\partial x}))}{\partial x} + \rho_{mix}^q \cdot Eu \quad (4)$$

化学源项通过有限速率法进行计算。由于绝大多数基元反应都是可逆反应,故需要求出基元反应的正逆反应速度。正反应速率 $K_{f,j}$ 由阿伦尼乌斯公式确定,如式(5)所示,式中 A_j , β_j , E_j 分别是机理文件中所给出的系数数据。

$$K_{f,j} = A_j T^{\beta_j} \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) \quad (5)$$

1.2 带电组分输运机理

电场和带电粒子的质量分数是互相影响的：一方面电场通过动量方程源项影响混合气的流动速度，通过能量方程的源项加热混合气，通过组分输运方程的迁移通量影响组分在混合气体体系中的内部扩散；同时，流场内的带电粒子浓度分布，即电荷分布，能通过静电场泊松方程影响空间的电场强度。因此静电场泊松方程是构建火焰离子电流机理的关键方程之一。将三维泊松方程改写为爱因斯坦记号形式，即式(6)所示。

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial x} = -\frac{\rho_a}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

中性组分几乎不受外电场影响，其迁移率可设为零，中性组分间的扩散系数由动力学理论的 Champman-Engskog 公式得到，即式(7)。式中 M_α 和 M_β 分别为两种组分的摩尔质量， $\sigma(\alpha,\beta)$ 为两种组分的碰撞截面数据， Ω 为扩散碰撞积分，是 L-J 势阱深度的拟合函数。

$$D_{\alpha,\beta} = \frac{3}{16} \sqrt{\frac{2RT}{\pi} \left(\frac{1}{M_\alpha} + \frac{1}{M_\beta} \right)} \frac{1}{N_A \sigma_{\alpha,\beta}^2 \Omega} \quad (7)$$

对于质量较大的带电组分的扩散系数分析时，如阳离子 H_3O^+ 和阴离子 O_2^- ，近似认为它们的扩散系数与它们未发生电离前的中性组分相近。对于电子组分的输运系数则有不同。相比于阳离子，电子的质量极微，荷质比约大 3~4 个数量级，因此其在电场中的迁移速度远快于其它组分。Bisetti 等人 [15] 提出采用热动力学平衡假设 (Kinetic Equilibrium Theory, KET) 方法进行计算，如式(8)所示，式中 m_e 是单个电子的质量， p 和 T 是混合气的当地压力和温度。 δm 是电子和混合气各分子的平均有效碰撞截面，是一个关于电子能级的函数的积分中值。

$$D_{e^-} = \sqrt{\frac{8k_B^3 T^3}{9e^3 \pi m_e p \delta m}} \quad (8)$$

1.3 化学反应机理

在本研究中，为开发出高效的甲烷/氢气火焰多场耦合模型，基于 GRI 3.0 反应机理进行了机理简化 [16]。由于甲烷燃烧的 GRI 3.0 反应机理并不包含离子组分，为了在流场中模拟重要带电组分的分布，需要相应的离子反应机理。由 WARNATZ 等 [17] 的研究可以得到一个适用于甲烷燃烧的关键离子反应机理，然而，这里出现的问题是离子加入离子反应后是否会对原中性组分的反应造成影响。为达到分析化学反应叠加效应的目的，考虑使用 Chemkin Pro 软件的反应路径分析功能解决这一问题。

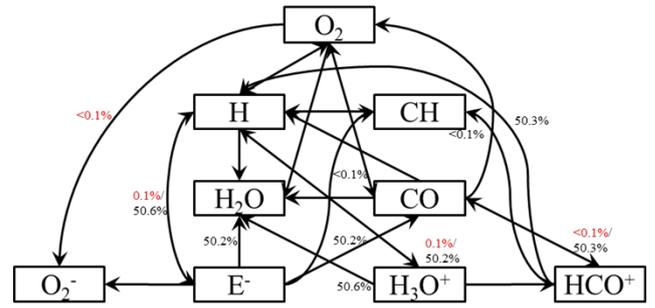


图 1 2700K 时的化学反应路径图 (部分)

图 1 展示了 0 维等容封闭反应器模型下当量比甲烷-空气混合物在燃烧后期 (2700K) 的反应路径图的一部分。其中，离子反应已与 GRI 3.0 简化机理相耦合，所有离子组分的直接上游反应物与直接下游生成物所图 1 所示，箭头表示反应的方向。另外，图中的百分数表示该路径的反应速率占该路径中反应物净产率的比例，红字表示生成离子的方向，黑字表示消耗离子的方向，而离子组分之间的反应路径不加展示。如 H 与 E⁻ 之间的箭头边的数字 “0.1%/50.6%”，意为在所有生成或消耗 H 的反应中有 0.1% 的 H 选择该路径而生成 E⁻，而在所有生成或消耗 E⁻ 的反应中有 50.6% 的 E⁻ 最终生成了 H。

由此，可以看到从中性组分生成离子组分的反应是极为稀少的事件，大部分的中性组分不倾向于化学电离而更多地是转化为其他中性组分。这样一方面可以解释为何在实验过程中离子电流强度低的现象，其次说明简化后的 GRI 3.0 机理在模拟甲烷燃烧的过程中几乎不受新加入的离子反应的影响，因而离子反应可以简单叠加 (即不需要修正每个中性反应的指前因子、温度因子及活化能)。

最终，一个整合了甲烷燃烧 GRI 3.0 简化机理与简单离子反应机理得以构建，其包括两个部分，主要离子化学反应机理展示如表 1 所示。

表 1 主要离子反应化学机理

| 化学反应 | $A_r (cm^m \cdot mol^n)$ | β | $E_r (kJ/mol)$ |
|-----------------------------------|--------------------------|---------|----------------|
| $CH + O = E^- + HCO^+$ | 2.5×10^{11} | 0 | 14093.5 |
| $HCO^+ + E^- = CO + H$ | 7.4×10^{18} | -0.68 | 0 |
| $HCO^+ + H_2O = H_3O^+ + CO$ | 1.506×10^{18} | 0 | 0 |
| $H_3O^+ + E^- = H_2O + H$ | 2.291×10^{18} | -0.5 | 0 |
| $H_3O^+ + E^- = OH + H + H$ | 7.949×10^{21} | -1.37 | 0 |
| $O_2 + E^- + O = O_2^- + O$ | 3.627×10^{16} | 0 | 0 |
| $O_2 + E^- + O_2 = O_2^- + O_2$ | 1.523×10^{21} | -1 | 1192 |
| $O_2 + E^- + H_2O = O_2^- + H_2O$ | 5.077×10^{18} | 0 | 0 |

1.4 流场推进

1.4.1 时间尺度

在 SOURCE 求解器中存在三种求解的时间尺度，分别是 1) 流动时间尺度，2) 电子响应时间尺度，3) 化学反应时间尺度。一般来说，湍流的时间尺度在 10-5s 和 10-2s 量级之间[84]，在 SOURCE 求解器中，由于不存在湍流模型，故属于层流流动，流动的时间尺度会更大。

典型的火焰等离子体的响应时间可按照(9)进行计算，其中火焰中的 ω_{pe} 取值为 10^9 s。为了能够成功构建出带电粒子形成静电屏蔽的过程，关于电子运动计算的时间步长至少要取 τ_{pe} 的一半，在 SOURCE 求解器中设定为 10^{-9} s量级，这和 XuError! Reference source not found.的工作是相符合的。

$$\tau_{pe} = 2\pi\omega_{pe}^{-1} \quad (9)$$

火焰中化学反应的时间量级通常来时时间尺度跨越很大，小的时间尺度例如 CH₂ 的生成反应的时间尺度在 10^{-10} s，而大的时间尺度例如 NO 的生成反应的时间尺度在 10^{-6} s [84]。

1.4.2 时间内迭代的处理

空间电势由静电场泊松方程(6)进行描述，它独立于时间变量，只和当前空间内的电荷密度有关，该方程是一个标准的“椭圆形”偏微分方程。对电势 ϕ 进行线性二阶离散，泊松方程的离散格式如式(10)所示。

$$\frac{\phi_{i-1} - 2\phi_i + \phi_{i+1}}{(\Delta x)^2} = -\frac{\rho_{qi}}{\epsilon_0} \quad (10)$$

给定边界条件以后，在一个时间步中，采用雅阁比迭代方式，多次迭代逼近求解。

1.4.3 时间推进

为了求解这个多时间尺度的系统，采用具有二阶精度的 Strang 时间算子分裂法对流场进行时间推进。在 Lanser 等人[18]的工作中，已经证明了将时间算子分裂法应用于三个子项的流场推进的可行性。

将控制方程中的各项按照数学性质的不同分为对流项 F，整体扩散项 G₁，组分扩散项 G₂，源项 S，如式(11)所示。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G_1}{\partial x} + \frac{\partial G_2}{\partial x} + S \quad (11)$$

将 $\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x}$ 的时间推进过程记作 $U_{n+1} = \mathbb{F}_{\Delta t}(U_n)$ ，下标 Δt 为该时间推进算子的时间步长，下标 n 和 n + 1 为守恒量 U 的时间步编号。将 $\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial G_1}{\partial x}$ 的时间推进过程记作 $U_{n+1} = \mathbb{G}_1_{\Delta t}(U_n)$ ，将 $\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial G_2}{\partial x}$ 的时

间推进过程记作 $U_{n+1} = \mathbb{G}_2_{\Delta t}(U_n)$ ，将 $\frac{\partial U}{\partial t} = S$ 的时间推进过程记作 $U_{n+1} = \mathbb{S}_{\Delta t}(U_n)$ 。同时静电场泊松方程也可以用一个算子来表示，记作 $\varphi = \mathbb{P}(\rho_{\alpha,q})$ ，只不过静电场泊松方程不是用来时间推进，而是用来调整每一次时间推进造成的空间电位与空间电荷量不匹配的关系，这是进行下一次时间推进操作之前必要的调和操作。在定义完所有的时间算子子项之后，可以按照式(12)进行完整的时间算子分裂法的时间推进。

$$U_{n+1} = \mathbb{S}_{\Delta t/2} \mathbb{P} \mathbb{G}_2_{\Delta t/\xi} \mathbb{P} \mathbb{G}_2_{\Delta t/\xi} \cdots \mathbb{P} \mathbb{G}_2_{\Delta t/\xi} \mathbb{P} \mathbb{G}_2_{\Delta t/\xi} \mathbb{P} \mathbb{S}_{\Delta t/2}(U_n) \quad (12)$$

2 离子电流机理的化学特性验证

根据相关文献可知，燃料混合气从燃烧开始至燃烧结束后的一段时间内，会出现两次离子电流的峰值，第一个称为化学电离峰，是由于燃烧阶段产生的大量中间产物离子，如 H₃O⁺ 和电子所导致的当地带电粒子浓度高峰；第二个离子电流的峰值则被称为热电离峰，是因为在燃烧的后期阶段，高温环境下氮氧化物同样能电离出大量的带电粒子，如 NO⁺ 和电子。

首先进行一个零维的纯化学无流动的案例的计算，如图所示，过量空气系数为 1 的甲烷-空气混合气以 1800K 的初始温度，在 5.0MPa 的环境压力下开始自发燃烧。在 0.547 μ s 时发生了高强放热，温度急速上升到 3341K，在温度急速升高的过程中，H₃O⁺ 的摩尔分数迅速升高到达峰值 1.07×10^{-7} ，然后又迅速下降到低谷值 1.3×10^{-8} ，这就是化学电离峰。在 0.655 μ s 电子浓度到达最低值后，电子的浓度又开始缓步上升，在 0.89 μ s 上升到了 1.53×10^{-8} ，然后保持稳定，这就是热电离峰。从温度剧烈升高完毕到带电粒子浓度最终区域稳定的过程中，H₃O⁺ 的浓度一直在下降，而 NO⁺ 的浓度一直在上升，带电粒子的浓度在燃烧初期由 H₃O⁺ 主导，在燃烧末期由 NO⁺ 主导，前者的主导时期离子浓度峰值高于后者主导的时期，但是后者主导时期的长度却远长于前者主导时期。

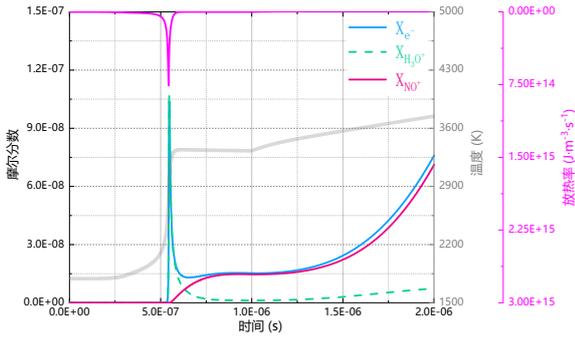


图2 零维化学反应的带电粒子变化

从 $0.6\mu\text{s}$ 火焰到达高温的峰值后，火焰温度一直在缓慢下降。这是因为热电离反应时一个吸热反应，故可推测，当已燃区温度升高时，热电离反应的化学平衡会超正向的方向发展，即离子浓度会进一步提高。于是，从 $1\mu\text{s}$ 起，人为对已燃气进行物理加热，加热功率为 $10^{11}\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从 $1\mu\text{s}$ 后的温度曲线来看，已燃气的温度正在稳步的线性提升。在 $1\mu\text{s}$ 到 $2\mu\text{s}$ 的加热过程中， NO^+ 和电子的浓度以指数级别的速度快速升高，温度提升 400K 的情况下，电子浓度提升为原来的 6 倍有余。

根据这个特点可知，当燃烧发生爆震时，由于缸内的压力和温度会剧烈震荡，于是温度的震荡将对当地离子浓度产生指数级别的正相关影响，这便是离子电流能在爆震发生时能作为检测手段的一个基本原理。

3 甲烷掺氢末端混合气燃烧模拟

3.1 工况设置

设定计算空间为 0.12m 的一维空间，燃烧室中充入 3.2MPa 的甲烷/氢气混合气，混合的氢气比例分别为 0%、20%、40% 和 60%，混合气的初始温度设置为 900K 。在空间左侧位置进行点火，来模拟末端混合气的自燃现象。左右壁面分别作为外加偏置电压的激励源，用来模拟离子电流检测所施加的外电场，激励电压设置为 2kV 。

3.2 结果与讨论

在右侧壁面设置监测点，得到右侧壁面的温度、压力等变化如下图 3，4，5 所示。

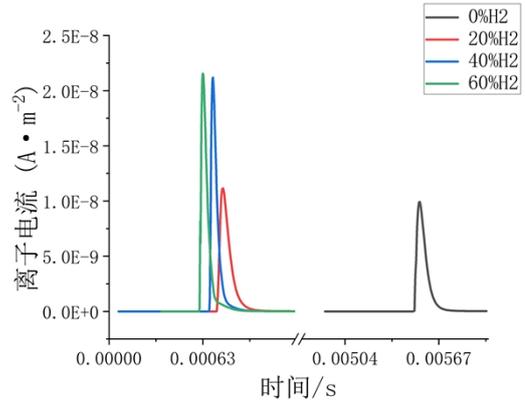


图3 不同配比混合气离子电流变化曲线

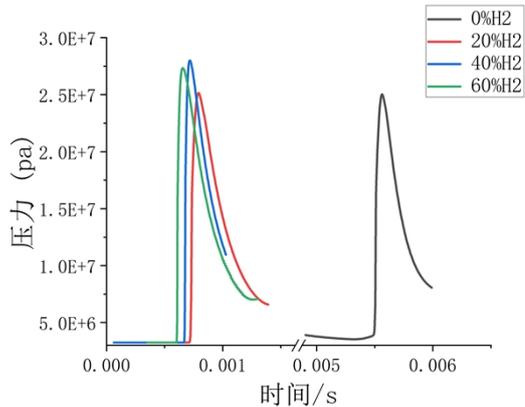


图4 不同配比混合气压力变化曲线

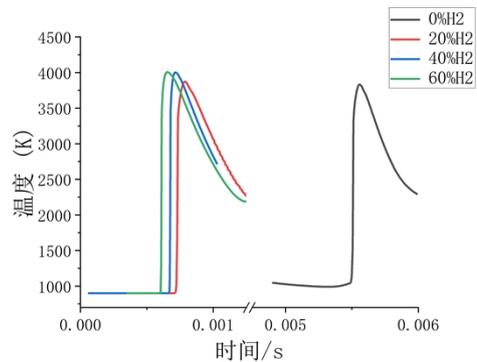
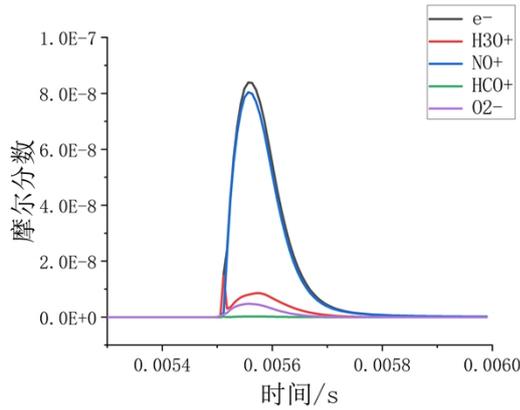


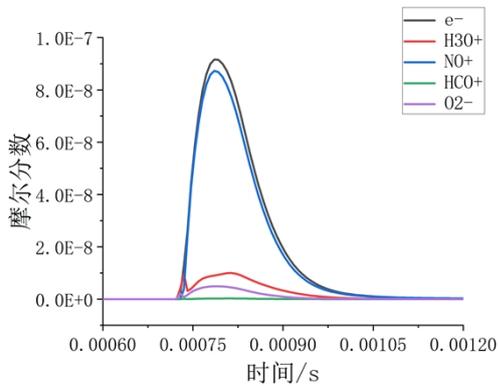
图5 不同配比混合气温度变化曲线

从上面三图中可以看出，添加氢气的混合气火焰传播速度更快，并且随着掺入氢气比例的增加，火焰传播速度会稍微增加。图 2 显示掺 20% H_2 的混合气离子电流与纯 CH_4 气体燃烧的离子电流的曲线峰值相近，而 40% H_2 和 60% H_2 的混合气离子电流曲线峰值要高很多；从图 3 和 4 中可以看到掺 20% H_2 的混合气与纯 CH_4 气体燃烧的右侧壁面压力与温度的曲线峰值相近，而 40% H_2 和 60% H_2 的混合气压力与温度曲线峰值要略高一些。

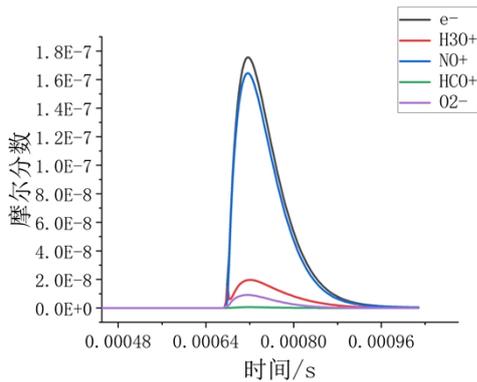
下图5为四种仿真工况下右侧壁面处检测到的带电组分变化的趋势图，从图中对比可以看到，产生的带电离子的基本趋势相似，40%H₂和60%H₂的混合气燃烧产生的带电粒子要多于另外两组，这表明掺入H₂使得离子电流的峰值增加，这与图2所示的趋势一致。



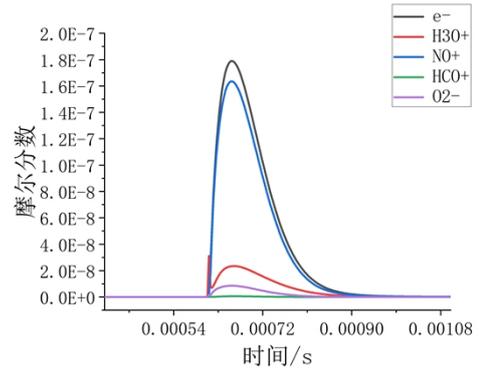
(a) 纯甲烷燃烧



(b) 80%CH₄和20%H₂燃烧



(c) 60%CH₄和40%H₂燃烧



(d) 40%CH₄和60%H₂燃烧

图6 右侧壁面处带电组分的变化趋势图

将图6(a)的带电组分变化趋势放大得到图7，从图7中可以看到5.505ms开始产生带电粒子，最初由于化学电离产生的阳离子主要为H₃O⁺，而从5.51ms开始H₃O⁺开始减少而热电离产生的NO⁺开始增加并占主导。

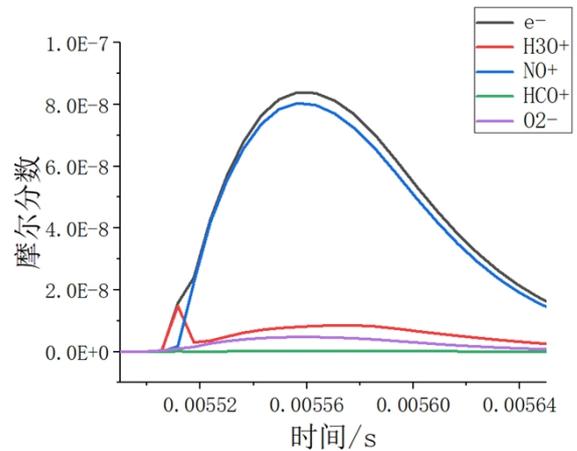


图7 纯甲烷燃烧带电组分变化趋势放大图

4 结论

本文基于MATLAB平台开发了一维火焰/电磁多物理场耦合的求解器，在一维流场中，设置不同比例的甲烷/氢气混合气，混合的氢气比例分别为0、20%、40%和60%，在空间左侧位置进行点火，来模拟末端混合气的自燃现象，通过分析右侧壁面的离子电流、压力温度等曲线，得到以下结论：

(1) 甲烷掺氢气后末端混合气火焰速度加快，压力峰值也会稍有增加，掺氢气后末端混合气自燃更容易引发爆震。

(2) 甲烷掺氢气后离子电流的幅值会增加，其

中掺入 40%氢气的离子电流峰值会相比纯甲烷和 20%氢气的离子电流峰值有明显增加。

(3) 无论哪个掺氢比例下, 仍然有 H_3O^+ 产生, 但是离子电流信号中占主导的是热电离产生的 NO^+ 。

参考文献:

- [1] 陈伊宇, 龙礼文, 黄泰明等. 天然气掺氢燃烧技术研究进展 [J/OL]. 油气储运:1-12[2023-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20230704.1620.004.html>.
- [2] Jin Lu, Zaiguo Fu, Jiang Liu, Weiguo Pan, Influence of air distribution on combustion characteristics of a micro gas turbine fuelled by hydrogen-doped methane, Energy Reports, Volume 8, Supplement 2, 2022, Pages 207-216, ISSN 2352-4847,
- [3] Zhunqing Hu, Zhang Xin, Study on laminar combustion characteristic of low calorific value gas blended with hydrogen in a constant volume combustion bomb, Int J Hydrogen Energy, 44 (1) (2019), pp. 487-493
- [4] Strollo J, Peluso S, O' Connor J. Effect of hydrogen on steady-state and transient combustion instability characteristics[C]. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2020, 84133: V04BT04A034.
- [5] Moliere M. Benefiting from the wide fuel capability of gas turbines: A review of application opportunities[J]. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2002, 36061: 227-238.
- [6] Boushaki T, Dhué Y, Selle L, et al. Effects of hydrogen and steam addition on laminar burning velocity of methane-air premixed flame: experimental and numerical analysis[J]. International journal of hydrogen energy, 2012, 37(11): 9412-9422.
- [7] Schefer R W. Hydrogen enrichment for improved lean flame stability[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(10): 1131-1141.
- [8] Sidahmed Meziane, Bentebbiche Abdelhalim, Numerical study of blended fuel natural gas-hydrogen combustion in rich/quench/lean combustor of a micro gas turbine, Int J Hydrogen Energy, 44 (29) (2019), pp. 15610-15621
- [9] 周磊, 李蓉. 加氢对天然气发动机燃烧影响的试验分析 [J]. 汽车实用技术, 2023, 48(12):114-120. DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2023.012.022.
- [10] 董永超, 马志豪, 王鑫等. 掺氢比和废气再循环率对天然气发动机性能的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(02):30-37+6. DOI:10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2021.02.006.
- [11] LATHER S R, DAS L M. Performance and emission assessment of a multi-cylinder S.I engine using CNG & HCNG as fuels[J]. International journal of hydrogen energy, 2019, 44(38):21181-21192.
- [12] 王利民, 韩义勇, 王志刚, 李楠, 潘家营, 卫海桥. 天然气-汽油双燃料发动机燃烧特性试验研究 [J]. 内燃机工程. 2018, 39(05): 38-44.
- [13] 董光宇, 于水, 张旭升. 基于燃烧离子传感技术的发动机指示转矩实时估计 [J]. 汽车工程. 2008, (07): 592-596.
- [14] 吴筱敏, 汪映, 关勇. 汽油机燃烧和失火离子信号的特征分析 [J]. 燃烧科学与技术. 2004, (04): 341-344.
- [15] Mbark, El, Morsli, et al. Calculation and analysis of the mobility and diffusion coefficient of thermal electrons in methane/air premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2012.
- [16] GRI-MeshTM, PROJECT OVERVIEW. [EB/OL]. University of California, Berkeley. <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/overview.html>
- [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. 2007, 31(1): 1129-1137.
- [18] D Lanser, Verwer J G. Analysis of operator splitting for advection-diffusion-reaction problems from air pollution modelling[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1999, 111(1-2):201-216.