

脉冲爆震发动机点火离子催化效应数值模拟

母云涛¹, 王玉清², 李立翰², 郑殿峰¹, 张会强³

(1. 北京大学 工学院, 北京 100871;

2. 中国航天科工集团公司 北京动力机械研究所, 北京 100074;

3. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 利用气体电离理论推导出氢气-空气混合气体电离后组成成分, 理论分析混合气体中活性基团对燃烧速率及剧烈程度的催化作用, 以及不同点火能量、活性基团浓度对缓燃转爆震(DDT)过程的影响. 结合氢气-空气燃烧 23 步化学反应动力学机制, 采用 FLUENT 软件对不同工况下的 DDT 过程进行模拟, 与理论分析结果对比. 结果表明: 等效点火温度为 2000~2500 K 时, 活性基团的加入, 可提高燃烧速率, DDT 时间可缩短 11.70%~21.08%, DDT 距离可缩短 3.32%~8.08%, DDT 时间和 DDT 距离的改变幅度随点火温度的升高而增大. 点火能量较高时应该考虑气体电离效应.

关 键 词: 脉冲爆震发动机; 点火; 气体电离; 活性基团; 催化效应

中图分类号: V43

文献标志码: A

Numerical simulation for ion catalytic effect in ignition process of pulse detonation engine

MU Yun-tao¹, WANG Yu-qing², LI Li-han²,

ZHENG Dian-feng¹, ZHANG Hui-qiang³

(1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Beijing Power Machinery Research Institute,

China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100074, China;

3. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The gas composition was derived using the theory of gas ionization after hydrogen-air mixed gas ionization, the catalysis effect of active group on combustion rate and intensity was found out with the theoretical analysis, and the influences on deflagration to detonation transition (DDT) process in different ignition energies and different concentrations of active group were analyzed. Fully considering the hydrogen-air combustion reaction 23-step kinetics mechanism, the numerical simulation method was used to study DDT process in different cases by FLUENT, and the theoretical analysis was verified. Results show that when the equivalent ignition temperature is in the range of 2000 K to 2500 K, the reactive group in the process of ignition can increase the combustion rate; DDT time can be shortened by 11.70%—21.08%, DDT distance can be shortened by 3.32%—8.08%. With increase of DDT time and DDT distance, the ignition temperature increases. Gas ionization effect should be considered if ignition energy is high.

Key words: pulse detonation engine; ignition; ionization of gas; active group;

catalytic effect

脉冲爆震发动机 (pulse detonation engine, PDE) 是利用间歇式爆震波产生高温、高压燃气获取推力的动力装置, 具有结构简单、质量少、推质比高、比冲大、效率高等特点, 正日益成为世界各国航空航天及兵器学术界的研究重点^[1]. 目前成熟的 PDE 点火起爆方式有火花塞点火、预爆震点火、爆震转移点火等, 不同的点火方式使 DDT 过程的距离和时间不同, 其主要通过实验方法比较不同点火方式对 DDT 的影响^[2-4]. 在数值模拟方面, Aleksandrov 等^[5]通过对碳氢燃料高压纳秒放电点火进行数值模拟, 研究了等离子体点火发生的机理; Kosarev 等^[6]用数值方法研究了碳氢混合气体点火动力学, 探讨了放电参数与气体密度的关系; 于陆军、李辉煌、钟诚文、彭振等^[7-10]通过商业计算软件或自编程序对 PDE 工作时的内外流场、喷管构型、点火起爆特性进行了研究, 分析了各种参数变化对 DDT 距离和 DDT 时间的影响; 西北工业大学严传俊教授团队在 PDE 数值模拟领域也做了大量工作并取得较多成果^[11-12]. 上述研究主要采用 FLUENT 软件或时空守恒元与求解元 (CE/SE) 方法进行模拟, 点火区采用等效高温区域来代替点火器, 没有考虑气体电离过程或活性基团对燃烧的影响. 本文主要研究燃气在点火区部分电离后产生的活性基团对 DDT 过程的影响, 并与没有活性基团的工况进行比较.

1 电离气体组分预估

如图 1 所示, PDE 单次点火起爆时, 头部点火器产生局部高温点燃混合气体, 高温混合气体粒子碰撞加剧以致部分粒子电离. 气体粒子的电离度与本身温度紧密相关, 由于不同点火方式产生的局部点火区温度不同, 从而不同点火方式产生的气体温度也不同. 电离的混合气体中内存在多种组分, 各组分之间的转化时刻在进行, 气体粒子的存在极不稳定, 使研究难度很大, 因而常采用简化代替电离区的方法来达到研究目的. 一般情况下, 当温度小于 5 000 K 时, 氢气、氧气、氮气都有部分被电离, 但电离度、离子浓度非常小, 在这温度范围内气体分子主要是被电离成原子^[13]. 本文为方便分析, 忽略了各组分中的电子、一次和二次电离离子, 只考虑气体电离成原子再参与燃烧的情况, 并先假设各组分在热电离结束后才开始发生化学反应.

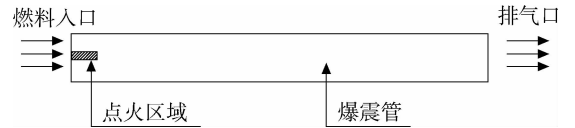


图 1 爆震管及点火区域示意简图
Fig. 1 Schematic of detonation tube and ignition section

假设空气由体积分数为 76% 的氮气和 23% 的氧气组成, PDE 燃料为氢气-空气混合气体. 用 c_{a2}^* , c_{a2} , c_a 分别表示气体电离前浓度、电离后分子浓度、电离后原子浓度, a2 是指双原子分子, a 代表单原子分子. 双原子分子在高温下的电离反应的平衡方程^[14]可表示为

$$\frac{c_a^2}{c_{a2}} = \frac{(\pi k T)^{3/2}}{N h^3 p^0} \left(\frac{2 \theta_1}{T} \right)_{a2(g)} (1 - e^{-\theta_2/T})_{a2(g)} \frac{(g_0)_{a(g)}^2}{(g_0)_{a2(g)}} e^{(-\Delta \varepsilon / T)} \quad (1)$$

式(1)中 h, k, N, p, T 分别表示普朗克常数、波尔兹曼常数、阿伏伽德罗常量、压力、温度, g 代表物质状态为气态, θ_1, θ_2 分别表示转动特征温度和振动特征温度. 反应中物质原子总量守恒, 有如下方程:

$$2c_{a2} + c_a = 2c_{a2}^* \quad (2)$$

假设电离度 $L = c_a / (2 \cdot c_{a2})$. 设标准大气压为 1.0×10^5 Pa, 代入各种气体状态参数, 编程求出 L 随 T 的变化规律, 如图 2 所示.

由图 2 可知, 对于同一种气体组分, 电离度会随着气体压强的增加而降低. 对于所有的气体, 其

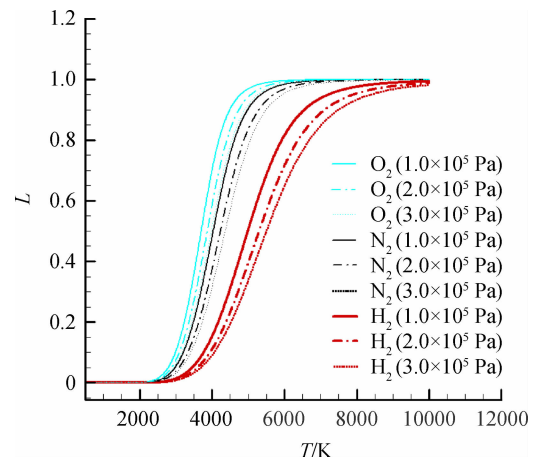


图 2 不同压强下各组分气体电离度随温度变化关系
Fig. 2 Ionization degree of each component changes with temperature in different pressure

电离度会随温度的上升而提高,越高的点火能量就意味着点火时有更多的气体被电离,反应初期就会有更多的活性基团参与反应.本文中重点研究在 2000~2500 K 情况下的气体电离情况.

2 模型及数值方法

2.1 物理化学模型

PDE 周期性工作时,每个周期内存在吸气、爆震、传播、排气 4 个过程.第 1,4 过程的物理化学变化相对简单,但是第 2,3 过程变化机理相当复杂,这是因为点火后,预混气体经过短暂的化学诱导时间后,就开始缓慢反应,反应后气体温度上升,体积膨胀,然后产生一系列压缩波.压缩波朝空间各个方向传播,当部分压缩波运动至推力壁时会发生反射,再逆向传播.由于燃烧后的气体温度较高,因此反射回来的压缩波波速较快.当其逐渐追上最初向前传播的压缩波并叠加后,压力就会不断提高.随着燃烧进行,气体温度持续上升,高温区域不断扩大,反射后的压缩波波速不断提高.到达一定时刻后,大量压缩波叠加形成激波间断,激波后的气体压力突增,反应越来越剧烈,最后激波和燃烧耦合在一起,形成爆震波.爆震波

形成后,气体通过燃烧不断给激波提供能量来提高其压力和速度,而激波则用来触发燃烧,缩短化学反应的感应时间.燃烧爆震过程产生复杂的激波、湍流、膨胀波、电离、燃烧等物理化学过程很难作出精确的模拟,而本文主要研究 PDE 达到稳定工作状态后的一次完整 DDT 过程,故在选用物理模型时只考虑主要因素,并作如下假设:

- 1) PDE 金属壁面经高温高压燃气加热后,其自身温度与近壁面燃气温度相差已不大,可以认为壁面绝热,与外界大气无热交换.
- 2) 假设爆震管内的氢气与空气已均匀混合,各组分的扩散系数相同,温度为常温且为理想气体.
- 3) 不考虑热辐射的影响.
- 4) 假设爆震管为轴对称结构,没有考虑扰流片的作用.

由于气体部分电离后,活性基团会在化学反应中起到催化剂的作用,燃烧过程中 H, O, OH, NO 等生成物不断参与反应的同时,又在不断生成.因此化学反应必须考虑详细的反应机理,故采用 chemkin 引入化学反应机制,链反应中共考虑 11 种组分,共 23 个反应方程^[15],具体反应机理如表 1 所示.

表 1 氢气-空气化学反应模型
Table 1 Hydrogen-air chemical recation model

序号	化学反应	<i>A</i>	<i>n</i>	<i>E_a</i>
1	H ₂ +O ₂ =2OH	1.70×10 ¹³	0	47 780
2	OH+H ₂ =H ₂ O+H	1.17×10 ⁹	1.3	3 626
3	O+OH=O ₂ +H	4.00×10 ¹⁴	-0.5	0
4	O+H ₂ =OH+H	5.06×10 ⁴	2.7	6 290
5	H+O ₂ +M=HO ₂ +M	3.61×10 ¹⁷	-0.7	0
6	OH+HO ₂ =H ₂ O+O ₂	7.50×10 ¹²	0	0
7	H+HO ₂ =2OH	1.40×10 ¹⁴	0	1 073
8	O+HO ₂ =O ₂ +OH	1.40×10 ¹³	0	1 073
9	2OH=O+H ₂ O	6.00×10 ⁸	1.3	0
10	H+H+M=H ₂ +M	1.00×10 ¹³	-1.0	0
11	H+H+H ₂ =H ₂ +H ₂	9.20×10 ¹⁶	-0.6	0
12	H+H+H ₂ O=H ₂ +H ₂ O	6.00×10 ¹⁹	-1.3	0
13	H+OH+M=H ₂ O+M	1.60×10 ²²	-2.0	0
14	H+O+M=OH+M	6.20×10 ¹⁶	-0.6	0
15	O+O+M=O ₂ +M	1.89×10 ¹³	0	-1 788
16	H+HO ₂ =H ₂ +O ₂	1.25×10 ¹³	0	0
17	HO ₂ +HO ₂ =H ₂ O ₂ +O ₂	2.00×10 ¹²	0	0

续表				
序号	化学反应	A	n	E_a
18	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{M} = \text{OH} + \text{OH} + \text{M}$	1.30×10^{17}	0	45 500
19	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} = \text{HO}_2 + \text{H}_2$	1.60×10^{12}	0	3 800
20	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2$	1.00×10^{13}	0	1 800
21	$\text{O} + \text{N}_2 = \text{NO} + \text{N}$	1.40×10^{14}	0	75 800
22	$\text{N} + \text{O}_2 = \text{NO} + \text{O}$	6.40×10^9	1.0	6 280
23	$\text{OH} + \text{N} = \text{NO} + \text{H}$	4.00×10^{13}	0	0

注:反应速率 $k_r = A \times T^n \times \exp[-E_a/(RT)]$, A, n, E_a, R 分别为指前因子、温度指数、反应活化能、气体常数. 各反应方程的第 3 体增强系数为(5) $\text{H}_2\text{O} = 18.6$, $\text{H}_2 = 2.86$, $\text{N}_2 = 1.26$; (10) $\text{H}_2\text{O} = 0$, $\text{H}_2 = 0$; (13) $\text{H}_2\text{O} = 5.0$.

2.2 数学模型

在二维轴对称条件下,气体燃烧的控制方程为^[16-17]

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial r} + \frac{1}{r}S_g = S_c \tag{3}$$

其中

$$U = \begin{bmatrix} \rho_i \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho_i u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (E + p)u \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho_i v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (E + p)v \end{bmatrix},$$
$$S_g = \begin{bmatrix} \rho_i v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (E + p)v \end{bmatrix}, S_c = \begin{bmatrix} \omega_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中 ρ_i 为第 i 组分气体的密度,混合气体的密度可表示为 $\rho = \sum \rho_i$, u, v 为 x, r 方向上的速度, E 为单位体积气体的总能量, ω_i 为 i 组分的单位体积的质量生成率.

2.3 数值方法

PDE 的 DDT 过程存在激波、膨胀波等系列变化过程,湍流效果明显,流体质量、动量、能量及化学反应中各种参数高度耦合,计算时需要较高的精度,因此湍流模型选用 $k-\epsilon$ 模型,湍流化学反应模型采用 Laminar Finite-Rate 模型,采用二维轴对称 N-S 方程,采用 PISO (pressure implicit split operator) 算法进行求解,空间离散格式选用 2 阶迎风格式,计算时采用商业计算软件 FLU-ENT 进行模拟.

3 分析与探讨

3.1 计算及结果分析

爆震管长为 300 mm,内径为 10 mm,采用均

匀结构网格将计算域划分为 150 000 个网格,网格在长宽方向上分布为 3 000 个 $\times$ 50 个,该网格状况能很好地符合文献[18]中作者对 DDT 数值模拟时网格尺度的研究结果. 由于一般化学反应时间尺度在 $10^{-8} \sim 10^2$ s 之间,因此计算初期时间步长取 5×10^{-9} s,爆震波形成后时间步长控制在 1×10^{-8} s. 不考虑扰流片的影响,对爆震管整体进行初始化,在化学恰当比下,氢气与空气的质量比为 1 : 34.34,空气中氧气与氮气质量比为 1 : 3.29. 初始压力 $p_0 = 1.0 \times 10^5$ Pa,初始温度 $T_0 = 300$ K. 壁面设为绝热、无滑移边界条件. 出口压力设为 1.0×10^5 Pa. 在头部中心位置处设置点火区域来代替点火器工作时所生成的高温区,点火区域长为 5 mm,直径为 5 mm. 选用 3 个温度进行计算:2000,2200,2500 K,在这 3 种温度下各组分电离程度如表 2 所示. 2000 A,2000 B,2200 A,2200 B,2500 A,2500 B 共 6 个工况代号中用数字表示点火温度,用字母 A、B 代表有、无气体电离效应,若考虑气体电离效应,则在计算时会加入热电离时产生的活性基团浓度.

表 2 3 种温度下各组分电离度			
Table 2 Gas ionization degree of each component in different temperature			
温度/K	O ₂	N ₂	H ₂
2000	0.000 752 1	0.000 373 3	0.000 097 7
2200	0.002 923 2	0.001 462 6	0.000 380 2
2500	0.014 795 6	0.007 495 1	0.001 934 3

在温度为 2 500 K 且不考虑气体电离的工况下,气体在点火后的 DDT 历程如图 3 所示. 可图可知,由于点火延迟及温度原因,在燃烧初期气体的反应较为缓慢,压力上升较慢,燃烧产生的压缩

波运动到爆震管头部壁面时,会产生逆向反射和传播,并在壁面处形成瞬时的压力最大点.随着温度及体积的上升,沿火焰传播方向压缩波不断叠加,压力不断提升,最后形成爆震波.在整个点火起爆过程的初始阶段,爆震管头部会存在瞬时的压力峰值,随后在大多数时间(t)内,压力最大点是存在于火焰传播前锋的压缩波波面上,说明通过监测轴线上所有点的最大压力值变化,来判断燃烧是否已达到爆震状态.

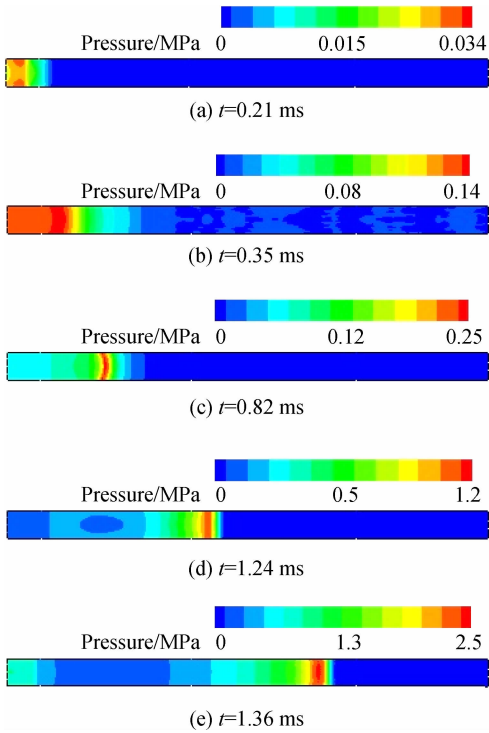


图 3 2500B 工况下 DDT 历程图
Fig. 3 DDT process in case 2500B

计算时对沿对称轴所有点的最大压力值、推力壁所受压力、距爆震管头部壁面 10 mm 以内的空间区域中 H_2O 质量分数进行监控.

计算中所监控的点是一个动态点,它伴随前锋压缩波的传播而前行.在 6 种工况下,各点轴线上最大压力点的压力变化情况如图 4 所示.由图可知,所有监控的压力曲线都会有一个压力突跃过程,此时燃烧已处于爆震状态.对于 2000A, 2000B, 2200A, 2200B, 2500A, 2500B 共 6 种工况,燃气压力达到爆震的时间点分别为: 1.3347×10^{-4} , 1.4816×10^{-4} , 1.2455×10^{-4} , 1.4241×10^{-4} , 1.0739×10^{-4} , 1.3607×10^{-4} ms. 当有活性基团参与反应时,随着温度的升高,DDT 时间分别减少 0.0892×10^{-4} , 0.1716×10^{-4} ms, 无活性基团时,相应缩短的时间为

0.0575×10^{-4} , 0.0855×10^{-4} ms. 在温度为 2000, 2200, 2500 K 的情况下,有电离效应比无电离效应工况中的 DDT 时间分别可缩短 0.1469×10^{-4} , 0.1786×10^{-4} , 0.2868×10^{-4} ms, 缩短的百分比分别为 11.70%, 12.54%, 21.08%. 这说明,同等点火能量条件下,在反应初始条件中加入相应活性基团浓度,可以提高化学反应速率,减小点火延迟时间,缩短 DDT 时间.点火能量越高,点火核心区的温度就越高,点火延迟时间就越短,化学反应的速率就越快.

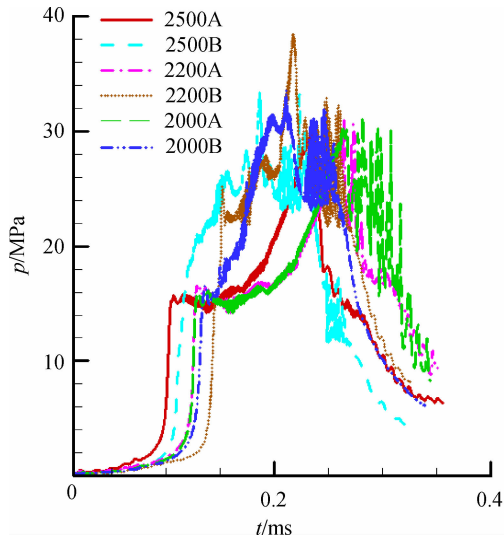


图 4 6 种工况下压力变化图
Fig. 4 Pressue change with time in six cases

图 5 为 2000A, 2000B, 2200A, 2200B, 2500A, 2500B 工况下 DDT 距离,分别为 262, 271, 245, 257, 182, 198 mm. 当有活性基团参与反应时,随着温度的升高,DDT 距离分别缩短 17, 63 mm; 无活性基团参与反应时,DDT 距离分别缩短 14, 59 mm. 在温度为 2000, 2200, 2500 K 的情况下,有电离效应比无电离效应工况中的 DDT 距离则分别缩短 9, 12, 16 mm, 缩短的百分比分别为 3.32%, 4.67%, 8.08%, 这说明活性基团的加入会缩短 DDT 距离,随着温度的升高,活性基团的浓度也越高,燃烧反应速率越快,DDT 距离也越短.

图 6 为 2000A, 2000B, 2200A, 2200B, 2500A, 2500B 工况下推力壁受力情况.平均推力分别为 43, 44, 48, 41, 47, 49 N, 推力的峰值都集中在 80~90 N. 这说明 6 种工况下,有无活性基团的存在对推力大小、峰值及变化规律影响不大,有活性基团存在时,推力的产生时间会稍稍提前.



图 5 6 种工况下 DDT 距离
Fig. 5 DDT distance in six cases

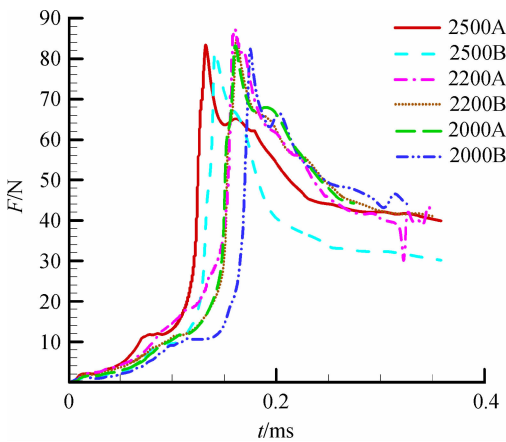


图 6 DDT 过程推力壁受力图
Fig. 6 Force diagram of thrust wall in DDT

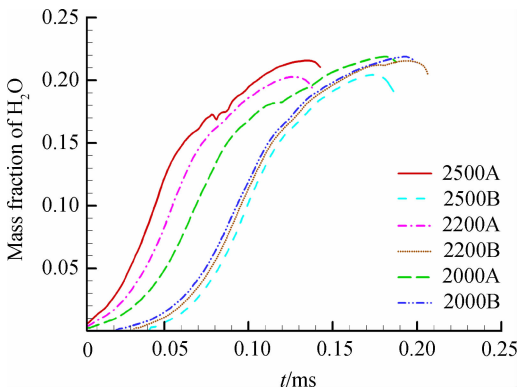


图 7 H₂O 质量分数变化图
Fig. 7 Mass fraction of H₂O changes with time

图 7 为在 2000A, 2000B, 2200A, 2200B, 2500A, 2500B 工况中 H₂O 质量分数随时间变化情况. H₂O 质量分数达到最大值所需时间分别为 1.8021×10^{-4} , 1.9359×10^{-4} , 1.4681×10^{-4} , 1.8045×10^{-4} , 1.3525×10^{-4} , 1.7415×10^{-4} ms. 当有活性基团参与反应时,随着温度的升高, H₂O 质量分数达到最大值的时间分别缩

短 0.1156, 0.3340 ms, 无活性基团参与反应时, 相应缩短的时间分别为 0.0630, 0.1314 ms. 在温度为 2000, 2200, 2500 K 的情况下, 有电离效应比无电离效应工况中的化学反应速率会更快, 监控区内 H₂O 达到最大值的时间分别缩短了 0.1338, 0.3364, 0.3890 ms, 时间缩短的百分比为 6.91%, 18.64%, 22.34%. 这说明在点火初期, 活性基团能提高化学反应速率, 点火温度越高, 活性基团对燃烧的催化作用而越明显. 上述结果与图 3 所监控的压力发展规律相似, 从而证实用 H₂O 质量分数变化规律来描述燃烧由缓燃到爆震过程是可行的.

3.2 分析讨论

在对 PDE 点火起爆数值模拟的过程中, 当充分考虑真实气体电离效应和气体燃烧化学反应动力学机理时, 采用 23 步方程参与计算模拟, 混合气体的 DDT 距离、DDT 时间、发动机推力以及初期化学反应速率都会有一定的变化. 这种变化是良性的, 有利于减小数值模拟误差, 使结果更加真实. Vaagsaether 等^[19] 做氢气-空气燃烧爆震研究的过程中, 研究了爆震波到达爆震管轴向上 6 个不同位置的时间. Vaagsaether 等在数值模拟时将火花塞简化成一个热源, 采用的氢气-氧气两步化学反应动力学机理进行计算, 最后计算到的结果比实现场实验监控所获结果晚 2 ms. 根据本文思路, 若考虑到气体真实电离效应, 在反应初始条件中加入相应活性基团浓度, 采用更完整的氢气-氧气燃烧化学反应动力学机理进行计算, 爆震波到达的时间应会提前. 经过理论分析, 认为计算时考虑真实气体电离效应的方法更具科学性, 更加与实验结果相匹配, 但由于所加入的活性基团浓度比较低, 对缓燃转爆震的时间影响尺度还比较小, 通过实验验证的难度较大. 另外本文在研究中对气体电离过程、点火机理、物理化学模型等因素都做了近似或简化处理, 这样处理对计算结果可能会造成一定误差, 因此需进一步探索更科学的计算方法.

在本文研究中, 由于热核尺寸较小, 气体电离度不高, 加入微量活性基团后对 DDT 距离和 DDT 时间的影响十分有限, 而采用大体积低温等离子体点火时, 反应初期气体电离度相当大. 采用火花塞点火时, 火焰是从小火焰微团逐步发展的, 当其达到与低温等离子体相同体积的热核时, 所需时间较长. 假设两者同时点火, 低温等离子体燃烧延迟时间较短, 火焰扩散快, 气体 DDT 距离和

DDT 时间都将会大幅度缩短,这为下一步低温等离子体点火研究奠定了理论基础。

4 结 论

1) 采用低点火能量,气体电离程度低,微量活性基团对反应影响不明显,采用高能量点火时则应考虑气体电离效应。

2) 有活性基团参加反应可缩短 DDT 距离和 DDT 时间,能显著提高点火初期燃烧速率。

3) 点火能量的小范围改变以及活性基团加入反应对推力大小的影响有限。

参考文献:

- [1] 严传俊,何立明,范玮,等.脉冲爆震发动机的研究与发展[J].航空动力学报,2001,16(3):212-217.
YAN Chuanjun, HE Liming, FAN Wei, et al. Research and development of pulse detonation engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 212-217. (in Chinese)
- [2] 黄希桥,严传俊,张群,等.两相脉冲爆震发动机模型试验研究[J].推进技术,2001,22(2):108-110.
HUANG Xiqiao, YAN Chuanjun, ZHANG Qun, et al. Experimental study on two-phase pulse detonation engine model [J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(2): 108-110. (in Chinese)
- [3] 严传俊,范玮.新概念脉冲爆震发动机的探索性研究[J].自然科学进展,2002,12(10):1021-1022.
YAN Chuanjun, FAN Wei. The new concept of pulse detonation engine exploratory study [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(10): 1021-1022. (in Chinese)
- [4] 何小民,王家骅.气动阀式两相脉冲爆震发动机研究[J].航空学报,2004,25(6):529-531.
HE Xiaomin, WANG Jiahua. Investigation on the aerov-alve two phase pulse detonation engine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(6): 529-531. (in Chinese)
- [5] Aleksandrov N L, Kindysheva S V, Kosarev I N. Mechanism of ignition by non-equilibrium plasma [J]. Combustion and Flame, 2009, 32(1): 205-212.
- [6] Kosarev I N, Aleksandrov N L, Kindysheva S V, et al. Kinetics of ignition of saturated hydrocarbons by nonequilibrium plasma: C_2H_6 -to C_5H_{12} -containing mixtures [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(1): 221-223.
- [7] 于陆军,范宝春,归明月,等.脉冲爆震发动机外流场数值模拟及实验[J].推进技术,2008,29(4):426-429.
YU Lujun, FAN Baochun, GUI Mingyue, et al. Computational and experimental studies on the external flow field of pulse detonation engines [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(4): 426-429. (in Chinese)
- [8] 李辉煌,杨基明,徐立功.脉冲爆震发动机喷管流动的数值模拟[J].推进技术,2004,25(6):553-556.
LI Huihuang, YANG Jiming, XU Ligong. A numerical simulation on the nozzle flow of pulse detonation engine

- [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6): 553-556. (in Chinese)
- [9] 钟诚文,刘建文,赵书苗,等.多循环脉冲爆震发动机流场数值研究[J].爆炸与冲击,2005,27(6):535-539.
ZHONG Chengwen, LIU Jianwen, ZHAO Shumiao, et al. Cyclic pulse detonation engine flow field numerical study [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 27(6): 535-539. (in Chinese)
- [10] 彭振.等离子体点火对脉冲爆震发动机两相爆轰过程影响的研究[D].南京:南京理工大学,2011.
PENG Zhen. The studies of effect of plasma ignition on two-phase detonation in pulse detonation engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] 熊姘,严传俊,王治武,等.脉冲爆震发动机尾焰温度测量与数值模拟[J].工程热物理学报,2009,29(2):335-338.
XIONG Cha, YAN Chuanjun, WANG Zhiwu, et al. Experiments and simulation of pulsed detonation engine plume [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 29(2): 335-338. (in Chinese)
- [12] 李牧,严传俊.脉冲爆震发动机引射模态数值模拟和验证[J].航空动力学报,2005,20(4):646-648.
LI Mu, YAN Chuanjun. Numerical simulation and validation of pulse detonation engine on ejector mode [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 646-648. (in Chinese)
- [13] 陈熙.高温电离气体的传热与流动[M].北京:科学出版社,1993.
- [14] 于婷婷.连续弧等离子点火器喷嘴电弧数值模拟分析[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
YU Tingting. The numerical simulation analysis for plasma ignition with continuous arc [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [15] 李建中,王家骅,王春,等.共用尾喷管多管脉冲爆震发动机数值模拟研究[J].空气动力学报,2008,26(1):96-100.
LI Jianzhong, WANG Jiahua, WANG Chun, et al. Numerical investigation of multi-tube pulse detonation engine with common nozzle [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(1): 96-100. (in Chinese)
- [16] 张宇.脉冲爆震发动机 DDT 过程数值模拟研究[D].南京:南京理工大学,2009.
ZHANG Yu. The numerical simulation analysis for DDT [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [17] 左克罗 M J,霍夫曼 J D. 气体动力学:上[M].王汝诵,吴宗真,吴宗善,等,译.北京:国防工业出版社,1984.
- [18] ZHANG Guitian, Jiang Y T, Foo H S, et al. First steps for the development and testing of a pulse detonation engine for UAV application [R]. AIAA 2008-2681, 2008.
- [19] Vaagsaether K, knudsen V, Bjerketvedt D. Simulation of flame acceleration and DDT in H_2 -air mixture with a flux limiter centered method [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2186-2191.