

基于激波管的等离子体辅助甲烷点火

沈双晏^{1,2}, 金星¹, 邓同晔¹, 张鹏¹

(1. 航天工程大学 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416;

2. 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘 要: 在激波管实验系统的基础上, 设计了等离子体放电单元, 开展了等离子体对甲烷点火延迟时间影响的研究。测量了等离子体放电时的伏安特性曲线。测量了甲烷自点火延迟时间、持续放电条件下的点火延迟时间以及放电后断电下的点火延迟时间。对甲烷点火过程中的化学反应路径进行了分析。结果表明: 等离子体放电电压与电流并不呈现相同的变化趋势, 放电过程中气体电阻不断发生变化。很少的放电能量(小于4J)即可有效减少甲烷的点火延迟时间, 在关闭电源后, 放电产生的粒子依然可以在一定程度降低甲烷点火延迟时间。在低温或高温点火条件下等离子体对甲烷点火延迟时间的影响机理基本相同。点火温度较低(小于1000K), 或者较高(大于1600K)时, 持续放电对甲烷点火延迟的缩短效果更加明显, 可以将甲烷的点火延迟时间缩短1个数量级或1个数量级以上。等离子体对甲烷点火延迟的作用效果是点火温度与等离子体质量摩尔浓度耦合影响的结果。

关 键 词: 激波管; 等离子体; 甲烷; 点火延迟; 辅助点火; 化学反应路径

中图分类号: V21; O539

文献标志码: A

Plasma assisted methane ignition based on shock tube

SHEN Shuangyan^{1,2}, JIN Xing¹, DENG Tongye¹, ZHANG Peng¹

(1. State Key Laboratory of Laser Propulsion and Application,
Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. China Satellite Maritime Tracking and Control Department,
Jiangyin Jiangsu, 214431, China)

Abstract: The plasma discharge unit was designed based on the shock tube experiment system, and the plasma discharge VA characteristic curve was measured. The auto ignition delay, ignition delay with continuous discharge and ignition delay after the discharge shut down were measured. The chemical reaction path in the methane ignition process was analyzed. The results showed that the plasma discharge voltage and current did not present the same change trend. The gas resistance changed continuously in the discharge process. Little discharge energy (less than 4J) can effectively reduce the methane ignition delay. The particles produced during the discharge could reduce the methane ignition delay in a certain degree after the power was shut down. The influence mechanism of plasma assisted methane ignition under the low or high ignition temperature condition was basically the same. The effects of continuous discharge were more apparent to reduce the methane ignition delay time when the ignition temperature was relatively low (less than 1000K) or high (greater than 1600K).

收稿日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(11372356)

作者简介: 沈双晏(1987—), 男, 博士生, 主要从事等离子体辅助点火与助燃研究。

引用格式: 沈双晏, 金星, 邓同晔, 等. 基于激波管的等离子体辅助甲烷点火[J]. 航空动力学报, 2018, 33(3): 572-580. SHEN Shuangyan, JIN Xing, DENG Tongye, et al. Plasma assisted methane ignition based on shock tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 572-580.

The methane ignition delay could be shortened in an order of magnitude or more than one order of magnitude. It was a result of coupling effect of ignition temperature and plasma concentration act to the methane ignition delay.

Key words: shock tube; plasma; methane; ignition delay; assisted ignition; chemical reaction path

高超声速飞行器由于其极快的飞行速度而受到了许多发达国家的重视^[1]。当飞行器的飞行速度达到高超声速时,冲压发动机中的燃烧达到超燃状态。对于超燃冲压发动机,燃料以超声速流过燃烧室,燃料难以实现混合、点火以及化学能的充分释放。等离子体由于可以同时燃料中增加化学效应与热效应,受到了研究者的广泛关注,被公认为是高效的辅助点火方法,应用前景十分广阔^[2-3]。

目前,国内外研究者对等离子体辅助点火进行了实验及理论研究。美国南加州大学的 Gundersen^[4]在密闭容器内安装电晕和电弧放电电极,用电晕和电弧放电点燃反应物,通过测量压力计算点火延迟时间。由实验结果可知电晕放电和电弧同时放电效果最好,电晕放电次之,电弧放电最差。莫斯科物理技术研究所的 Kosarev 等人^[5-7]在激波管末端通过纳秒脉冲放电的方式加入等离子体,研究了等离子体对碳氢燃料点火延迟时间的影响,研究表明,通过这种方式加入等离子体可将多种碳氢燃料的点火延迟时间缩短一个数量级。在实验研究的基础上,研究小组根据实验结果提出了 $C_k H_{2k+2} : O_2 : Ar (k=1\sim 5)$ 混合气体的放电机理,并提出了 37 个重要的反应式^[8-9]。Drexel 大学的 Wu 等人^[10-11]基于纳秒脉冲辉光放电,在不同燃料和当量比情况下,研究了不同初始温度条件下 OH 质量摩尔浓度随时间的变化。研究者认为,随着温度的不同,会产生一些新的链增殖/分支反应,并且,OH 的衰减速率也会发生变化。

华中科技大学的夏胜国等人^[12]经过研究指出,等离子体中的活性原子及基团是促进化学反应,加速燃烧的原因。空军工程大学的王峰等人^[13-14]构建了放电阶段的等离子体生成模型,计算了约化场强对等离子体粒子的影响,并且得到了放电过程中等离子体质量摩尔浓度随着时间的演化过程。北京大学的郭鹏等人^[15-16]通过数值模拟的方法研究了等离子体放电过程中产生的 NO_x 以及 O_3 对甲烷空气点火延迟时间的影响。装备学院的张鹏等人^[17]基于零维计算模型,研究

了放电阶段等离子体的质量摩尔浓度及生成速度,并基于 GRI-3.0 反应机理,研究了等离子体对甲烷点火延迟的影响。

本文构建了基于激波管的等离子体辅助碳氢燃料点火实验系统,测量了典型放电情况下的伏安特性曲线。测量了在自点火、持续放电以及放电后断电的条件下甲烷的点火延迟时间。通过对实验结果以及化学反应路径的分析,得到了等离子体对甲烷点火延迟的影响规律。

1 实验

1.1 实验系统

实验系统由激波管实验系统、控制系统、等离子体生成系统以及数据采集系统组成。如图 1 所示为实验系统示意图。本文采用激波管实验系统作为测量甲烷点火延迟时间,控制系统用以控制激波管系统的中各进气以及开关阀门。通过高频高压电源输入电能,在测量点火延迟的区域生成等离子体。实验数据通过印刷电路板(PCB)压力传感器以及光电倍增管(PMT)采集,采集后通过示波器进行存储及显示。

图 1 中,实验中的放电电源为南京苏曼电子有限公司生产的,型号为 CTP-2000K。电源的频率范围为 1~100 kHz,频率可调范围为 30%,输出电压为 0~30 kV,电源的输出效率约为 75%。

传感器为 PIEZOTRONICS 公司的 111A24 型,响应时间小于 1.5 μs ,灵敏度为 0.73 mV/kPa,误差为 $\pm 10\%$,分辨率为 0.14 kPa,采样率不小于 400 kHz,可以研究 μs 时间量级的压力变化。

实验中测量低压段以及混气罐压力的真空计为 INFICON 公司的 CDG045D 型,该真空计的测量范围为 0~1000 Torr(0~133.3 kPa)。在该量程范围内,测量误差最大为读数的 0.15%。

示波器为泰克 DPO7104C。该示波器为四通道,所有通道提供 1 GHz 带宽和 5 GS/s 实时采样频率,其中一个通道可达 20 GS/s。

如图 2 所示为介质阻挡放电单元,放电单元主要由压盖底座、压盖、基座、压块、堵头和铜制螺

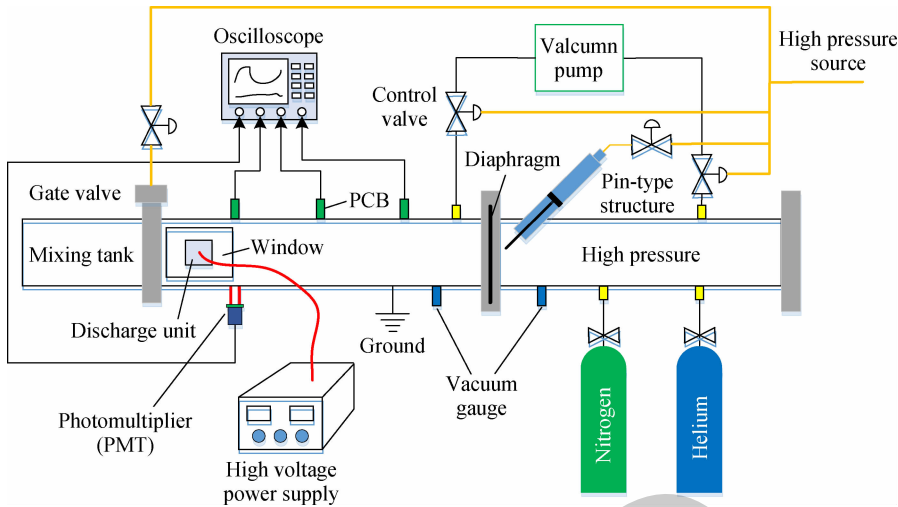


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

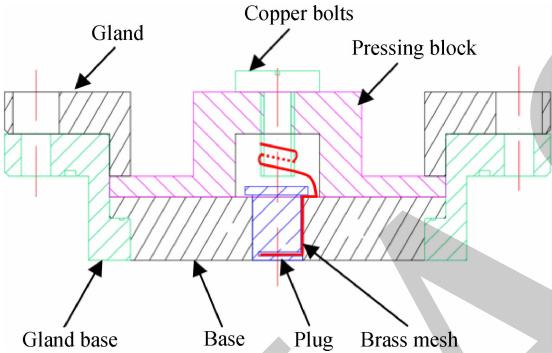


图 2 放电单元

Fig. 2 Discharge unit

栓组成。其中,压盖底座和压盖主要是起到了固定和密封的作用,将介质阻挡放电单元与激波管管体进行连接与密封。基座、压块和堵头的材料均为聚四氟乙烯,其原因是聚四氟乙烯有良好的绝缘性能,并且是一种优质的介质阻挡放电材料^[18-19]。

铜网内嵌于可替换聚四氟乙烯堵头内部,经堵头与聚四氟乙烯基座的缝隙中伸出,与铜质螺栓相连。铜质螺栓外接高压电源,当电源通电,达到一定电压时,即击穿空气产生放电现象。铜制螺栓、铜网为放电阳极,放电阴极为放电单元对面的激波管管壁。其中堵头为可更换,当多次长时间放电,介质阻挡绝缘层受到烧蚀时可进行替换。

1.2 实验过程

实验进行时,首先在激波管末段的混气罐中完成对实验气体的充分预混。装入膜片将激波管高压段隔开,将激波管的低压段与高压段抽真空。高压段中充入氦气与氮气作为驱动气体,

关闭高低压段抽气控制阀后打开分隔混气罐与低压段的闸阀,完成实验气体的加注。随后关闭闸阀,将低压段抽到实验压力后关闭抽气控制阀。此时,打开放电电源,通过放电单元对实验段中的混合气体进行放电,产生高能电子及活性粒子。当放电稳定后,打开针刺机构的控制阀后完成破膜,示波器记录了 PCB 压力传感器采集的压力信号,以及 PMT 采集的点火光信号。而开启电源-达到稳定放电-完成破膜这个时间间隔约为 1 s。

2 验结果与讨论

2.1 放电过程分析

如图 3 所示即为加工的放电单元安装后,在实验工况下的典型的放电图片。由于受限于激波管观察窗口的尺寸,加入的铜网面积较小,因此难以产生大面积的均匀放电。但是,从图中看到,其



图 3 典型放电图片

Fig. 3 Typical discharge image

放电现象极为明显,在激波管的末端,即实验区域可以产生大量的高能电子及活性粒子。

如图 4 所示为放电过程中的典型伏安特性曲

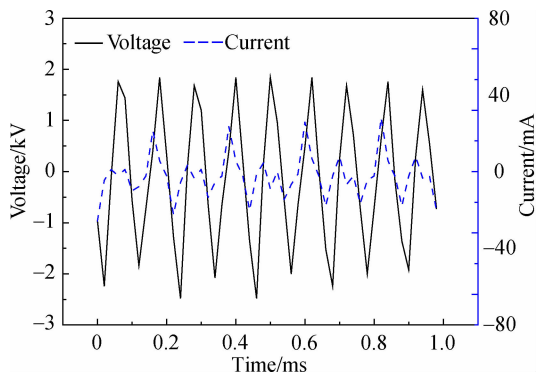


图 4 典型放电伏安特性曲线

Fig. 4 Typical discharge volt-ampere characteristics curve. 可以看到,放电电压与电流随放电时间呈现周期变化。然而,电流的变化并不与电压保持同

步的变化趋势。放电单元中,激发气体的电阻变化,放电电极等效电容等影响因素均会对放电过程的伏安特性造成影响。

通过测得的放电电压与电流相乘并对时间进行积分,可以得到放电输入放电单元的放电功率。经计算可得,在等离子体辅助点火的实验工况下,输入放电单元的功率一般为 W 量级。

2.2 实验条件

通常将激波管高低压段初始状态称为 4 区与 1 区。实验利用激波管破膜后反射激波在低压段形成了高温高压的 5 区,利用 5 区的高温高压对燃料实现点火^[20]。在较为理想的实验条件下,五区的实验时间一般可以持续十几个毫秒,满足测量燃料点火延迟时间的要求。

激波管实验区域 5 区的温度和压力可以通过激波运行的理论公式推导获得,如下公式所示:

$$\frac{p_5}{p_1} = \frac{[2\gamma_1 Ma_s^2 - (\gamma_1 - 1)] [(3\gamma_1 - 1) Ma_s^2 - 2(\gamma_1 - 1)]}{(\gamma_1 + 1) [(\gamma_1 - 1) Ma_s^2 + 2]}$$
 (1)

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{[2(\gamma_1 - 1) Ma_s^2 - (\gamma_1 - 3)] [(3\gamma_1 - 1) Ma_s^2 - 2(\gamma_1 - 1)]}{(\gamma_1 + 1)^2 Ma_s^2}$$
 (2)

式中 p_5 与 T_5 为实验区域 5 区的压力和温度, p_1 与 T_1 为低压段的初始压力与初始温度, γ_1 为低压段混合气体的气体绝热指数, Ma_s 为入射激波马赫数,可通过 PCB 采集的压力信号进行计算。

如图 5 所示为典型实验中点火延迟时间判断标准。4 通道显示的是光电倍增管 PMT 采集的光信号,3 通道为 PCB 压力传感器测量的压力信号,其测量位置位于同一剖面。如图 5 所示,燃料的点火延迟时间为 4 通道光信号变化曲线斜率最大值处的切线与初始光信号水平直线的交点,距

离 3 通道测量反射激波到达时刻的时间间隔。该点火延迟时间测量的判断标准也是国内外研究者常用的判断标准^[21]。

在混气罐中混合的实验气体为甲烷、氧气与氩气。各气体的体积分数如下:甲烷为 16.67%,氧气为 33.33%,氩气为 50%。

当通过放电加入等离子体时,尽量控制电源的输入功率为 4~5 W,从开启电源-达到稳定放电-完成破膜这个时间间隔约为 1 s。

2.3 点火延迟测量结果与讨论

如表 1 所示为实验条件与结果,包括了点火温度与点火压力,点火延迟时间,以及在等离子体放电条件下输入放电单元的能量(按照电源输入功率的 75%,放电时间 1 s 计算)。

表 1 中 T_5 为实验区域 5 区的温度, p_5 为实验区域 5 区的压力, τ 为点火延迟时间, ϕ 为当量比。

实验分为 3 组,第 1 组为未加入等离子体,测量在实验设定的气体组分、压力以及当量比条件下的甲烷自点火延迟时间。第 2 组在实验过程中持续放电,整个放电过程大约持续 1 s,测量在持续放电的条件下甲烷点火延迟时间。第 3 组为完成放电后关闭电源测量甲烷的点火延迟时间。具

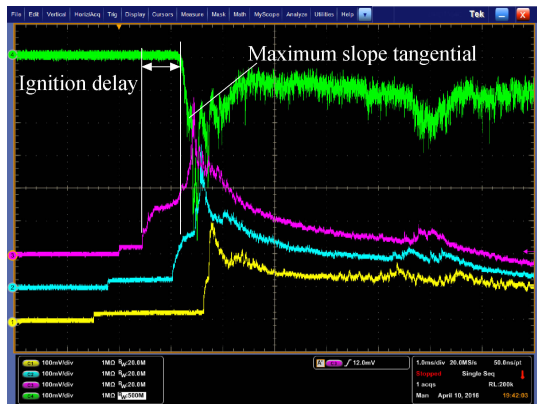


图 5 点火延迟时间判断标准

Fig. 5 Judgment standard of ignition delay time

体实验中,放电持续约 1 s 后将电源关闭,在关闭电源后,完成破膜。从关闭电源到完成实验,时间

约为 0.5 s。

放电过程中产生了多种活性粒子,在持续放电的条件下,由于电场的持续存在,各种活性粒子不断生成和淬灭,大部分活性粒子在 ms 量级之内便会处于平衡状态^[22]。第 2 组实验便是为了研究在放电过程中粒子处于平衡状态下,活性粒子对甲烷点火延迟时间的影响。

在停止放电以后,由于失去了电场的持续激励,存在时间较短的粒子会迅速淬灭,生成稳定的粒子,而一些较为稳定的粒子会存在较长一段的时间。第 3 组实验是为了研究这些存在时间较长的粒子对甲烷点火延迟时间的影响。

在等离子体中,同时存在多种类型的活性粒子,在确定的压力下,不同活性粒子的存在时间有很大的差异^[23]。对于第 2 组实验,持续放电条件下,实验的混合气体中同时存在了受激发稳定粒子、自由基及亚稳定粒子、激发态粒子、电子和离子等多种活性粒子。而对于第 3 组实验,活性粒子中的电子、离子、激发态粒子以及部分的亚稳定粒子均已发生了淬灭。存在的活性粒子主要为稳定粒子 O₃,以及极少量的自由基及亚稳定粒子。

通常情况下,点火延时与温度、压力、当量比、燃料及氧化剂质量摩尔浓度等参数满足 Arrhenius 形式的关系^[24]

$$\tau = A(m_{\text{fuel}})^{\alpha}(m_{\text{O}_2})^{\beta}(m_{\text{m}})^{\theta}\exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

式中 A 为指前因子; m_{fuel} 、 m_{O_2} 、 m_{m} 分别为燃料、氧化剂、稀释气体(如氩气、氮气)的摩尔质量浓度; α 、 β 、 θ 为影响因子; E 为活化能; R 为普适气体常数; T 为点火温度。

式(3)可进一步简化为

$$\tau = Ap^{\alpha}\phi^{\beta}X_{\text{O}_2}^{\theta}\exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

式中 p 为压力, ϕ 为当量比, X_{O_2} 为氧气的摩尔百分数。

由于实验的气体组分的当量比以及各组分的摩尔百分数之比是确定的,因此,可以对式(4)进行进一步的简化

$$\tau = Ap^{\alpha}\exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

将式(5)两边取对数可以发现,点火延迟时间的对数与 $1/T$ 呈现线性关系。

如表 1 所示,实际的实验中,点火压力均在 200 kPa 附近,研究者在实际问题的研究中,当点火压力相差较小时,一般认为压力对点火延迟时间的对数与温度倒数之间拟合线性关系的影响可

表 1 实验条件与结果

Table 1 Experimental conditions and results

组别	T_5/K	p_s/kPa	ϕ	τ/ms	输出能量/J
1-1	912.6	214.8	0.9994	6.60230	
1-2	972.5	207.5	1.0063	4.79950	
1-3	1037.2	205.9	0.9994	3.15460	
1-4	1111.8	206.1	0.9996	2.08650	
1-5	1180.5	203.4	0.9999	1.69840	
1-6	1236.5	182.4	1.0067	1.99900	
1-7	1244.4	183.4	1.0067	1.32200	
1-8	1294.4	197.3	0.9993	1.29590	
1-9	1309.9	201.3	0.9993	1.3254	
1-10	1397.1	208.7	1.0007	0.90310	
1-11	1489.4	210.4	1.0007	0.58620	
1-12	1587.7	200.6	1.0028	0.68610	
1-13	1787.3	179.3	1.0040	0.42830	
1-14	1839.6	172.9	1.0033	0.38360	
1-15	1961.1	165.3	1.0019	0.26820	
2-1	818.6	208.9	0.9990	1.49150	3.7800
2-2	966.6	203.8	1.0063	1.28370	3.6450
2-3	1117.1	205.5	0.9996	0.84900	3.0000
2-4	1126.7	206.8	1.0000	0.39540	3.6000
2-5	1196.6	205.5	0.9999	0.46580	3.6300
2-6	1255.3	203.9	0.9993	0.43180	3.7500
2-7	1324.4	204.4	1.0007	0.40750	3.9600
2-8	1485.8	208.6	1.0028	0.14630	3.7125
2-9	1555.2	206.3	0.9985	0.03518	3.6000
2-10	1637.8	208.8	1.0040	0.07511	3.7125
2-11	1744.1	201.4	1.0032	0.04438	3.8400
2.12	1806.8	181.9	0.9995	0.02096	3.4125
2-13	2118.5	199.7	0.9998	0.01007	3.7125
2-14	2338.6	187.5	1.0002	0.00401	3.5700
2-15	2693.2	257.9	1.0019	0.00175	3.4125
3-1	1112.2	204.6	0.9988	1.28360	3.3600
3-2	1337.4	206.1	1.0018	0.58310	3.6980
3-3	1651.3	201.9	1.0018	0.27660	3.4800
3-4	1821.7	184.2	0.9995	0.16620	3.3150

以忽略^[8-9,20]。

如图 6 所示为实验条件下甲烷点火延迟时间与点火温度倒数之间的关系。从图中可以看到,第一组实验中,甲烷的自点火延迟时间 τ_1 的对数与 $1000/T_5$ 基本呈现线性关系。 τ_1 可拟合为

$$\tau_1 = 2.1882 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{5216.48}{T_5}\right) \quad (6)$$

第 2 组实验中,持续放电条件下甲烷的点火延迟时间 τ_2 的对数与 $1000/T_5$ 呈现二次函数的关系。 τ_2 可以拟合为

$$\tau_2 = 6.2873 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{25365.85}{T_5} - \frac{10947.38}{T_5^2}\right) \quad (7)$$

由于第 3 组实验关闭电源后进行激波管的破膜,而关闭电源后到实验完成的时间间隔约为 0.5 s,但难以进行定量,因此,进行的实验次数较少,主要目的为验证性实验。从实验结果看,完成放电将电源关闭后的甲烷点火延迟时间 τ_3 的对数与也 $1000/T_5$ 呈现线性关系,并且拟合的直线斜率与第 1 组实验基本相同。

$$\tau_3 = 8.1255 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{5669.15}{T_5}\right) \quad (8)$$

从实验结果可以看到,注入很少的放电能量(小于 4 J)即可有效降低甲烷的点火延迟时间。并且,在关闭电源后,放电产生的存在时间较长的粒子依然可以在一定程度上缩短甲烷的点火延迟时间。

在点火温度 T_5 较低($T_5 < 1000$ K),或者较高($T_5 > 1600$ K)时,放电对甲烷点火延迟的缩短效果更加明显,可以将甲烷的点火延迟时间缩短一个数量级或一个数量级以上。并且,放电可以在一定程度上扩展甲烷的点火温度范围,在更低的温度也可实现甲烷的点火。

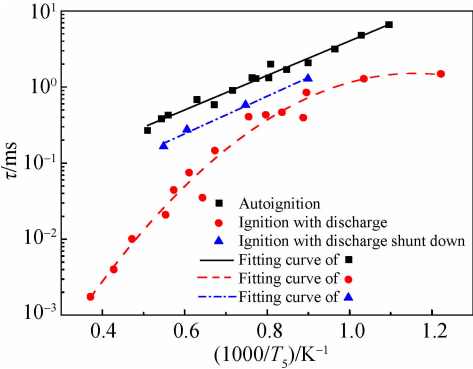


图 6 甲烷点火延迟时间

Fig. 6 Ignition delay time of methane

为说明活性粒子对甲烷点火过程的影响,对实验结果进行进一步的解释,模拟实验零维均质的条件,对 $\text{CH}_4\text{-O}_2\text{-Ar}$ 混合气体的自点火过程进行了化学反应路径分析。

模拟所使用的化学反应机理为国内外研究者较为认可的 GRI-Mech3.0 反应机理。混合气体的组分与实验相同,甲烷为 16.67%,氧气为 33.33%,氩气为 50%。模拟的实验压力为 0.2 MPa(2 atm),与激波管实验点火压力基本相同。

如图 7 所示为在点火温度为 900 K 的低温点火条件下甲烷自点火过程的主要化学反应路径,选定点火过程中的某时刻进行研究,选择初始反应物 CH_4 与反应产物 CO_2 作为研究对象。在点火过程中,主要发生的化学反应为由初始反应物生成中间产物,即如图 7 所示, CH_4 经 OH , H 以及 O 粒子的作用,经过以下基元反应生成了 CH_3 ,完成了第一步中间产物的积累,括号内为基元反应速率

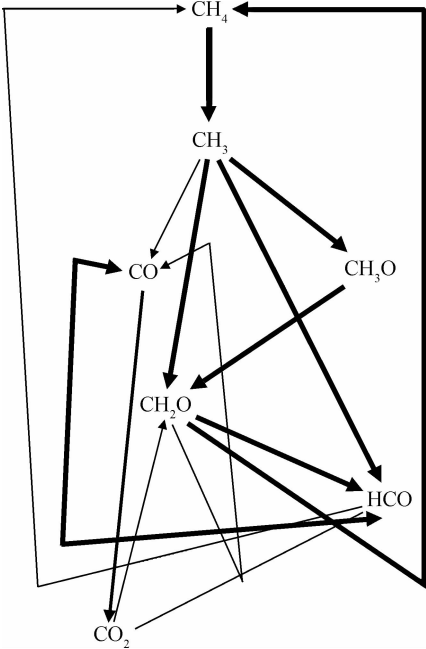
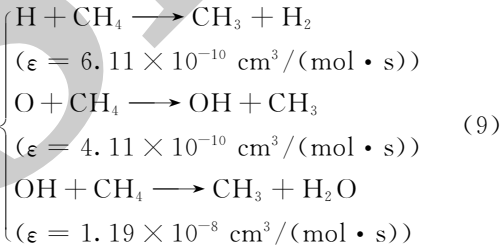
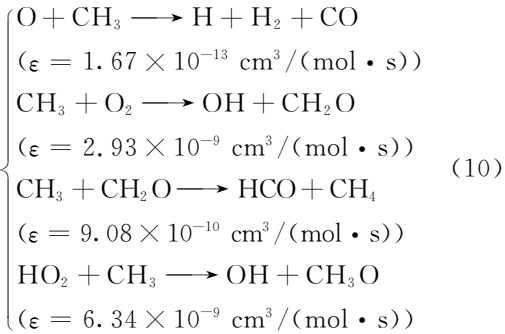


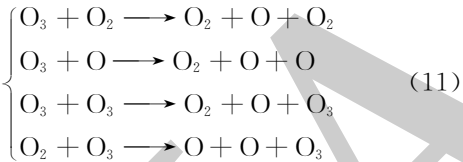
图 7 低温点火条件下甲烷点火过程化学反应路径
Fig. 7 Chemical reaction path of methane ignition process under low temperature ignition condition

生成的第一步中间产物则主要通过以下 5 个反应生成了下一步中间产物 CO、CH₂O、HCO 以及 CH₃O:



在放电条件下,由于可以产生大量的 OH、H、CH₃O 等活性粒子,可大大增加反应物质量摩尔浓度,从而提高化学平衡的反应速度,缩短点火延迟时间。

对于第 3 组实验,完成放电后断电,在实验进行时混合气体中仅存在较为稳定的 O₃ 分子。在甲烷点火过程中,O₃ 会经过如下一些反应解离出 O 以及 O₂,从而可以促进中间产物 CH₃ 的生成,也可以缩短甲烷点火延迟时间:



如图 8 所示为在点火温度为 2 000 K 的高温

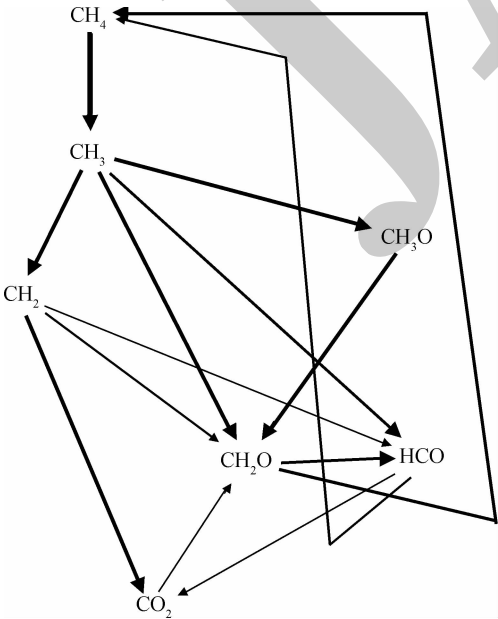
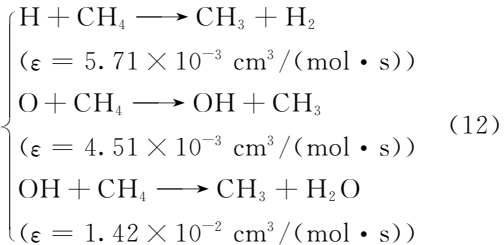


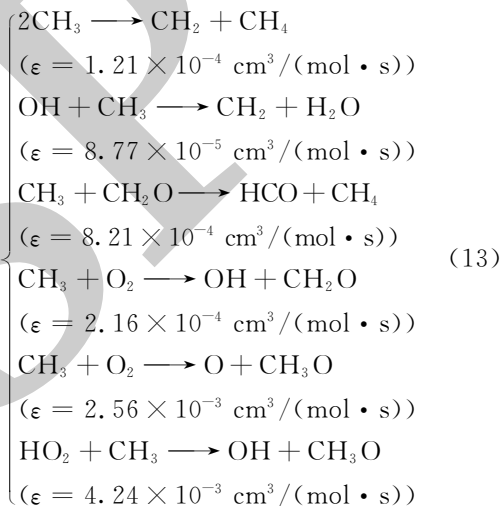
图 8 高温点火条件下甲烷点火过程化学反应路径
Fig. 8 Chemical reaction path of methane ignition process under high temperature ignition condition

点火条件下甲烷点火过程的主要化学反应路径,同样选定点火过程中的某时刻进行研究,选择初始反应物 CH₄ 与反应产物 CO₂ 作为研究对象。

在高温点火条件下,由 CH₄ 生成 CH₃ 主要经以下 3 个正向反应完成:



由 CH₃ 生成下一步的中间产物 CO、CH₂O、HCO、CH₃O 主要由以下几个基元反应完成:



可以看到,高温点火条件下,第 1 步中间产物 CH₃ 的生成途径与低温点火条件下基本相同。第 2 步的 4 种中间产物中,3 种主要的中间产物也与低温条件下的相同,主要区别为其生成中间产物的化学路径略有不同。

在点火过程中,高温点火条件与低温点火条件最大的不同还是其反应速度的差别。因此,可以认为,在低温或者高温点火条件下放电产生的等离子体加快了中间产物的生成速度,从而缩短了甲烷的点火延迟时间,其作用机理基本相同。

前期研究者的研究结论表明,等离子体在低温条件下对燃料点火延迟时间的缩短效果较为明显^[3]。经过上面的化学反应路径分析可以看到,主要原因是在温度较低时,点火过程的基元反应速率相对较小,加入一定量的等离子体可以非常有效地促进基元反应的发生,从而大大加快化学反应的进行。

随着点火温度的升高,在中温点火温度区域 (1 000 K < T₅ < 1 600 K),点火过程的基元反应速

率相对低温时有较大的提高。因此,加入等离子体对于反应速度提升程度不如低温条件下明显。所以,实验结果也显示,在中温点火温度区域($1000\text{ K} < T_5 < 1600\text{ K}$),等离子体对甲烷点火延迟时间的缩短效果不如低温点火温度时明显。

需要注意的是,实验温度越高,激波管低压段的初始压力越小。如表1所示,放电条件下注入实验区域的功率 $3\sim 4\text{ W}$,处于一个相对恒定的区域。当点火温度进一步升高时,实验段的气体相对低温时的质量摩尔浓度要小很多,而气压越低越有利于产生更加明显的放电现象^[25],产生相对质量摩尔浓度更高的等离子体。注入相同的放电功率,混合气体中产生了相对质量摩尔浓度更高的活性粒子,对基元反应的促进效果更加明显。

在中温区域($1000\text{ K} < T_5 < 1600\text{ K}$),相对低温点火温度时,点火温度的提升削弱了等离子体的作用效果。同时,等离子体相对质量摩尔浓度比低温点火温度条件下要高,而这加快了基元反应的进行。从实验结果看,点火温度的提升对等离子体作用的削弱效应更加明显。在该温度区域,等离子体对甲烷点火延迟的缩短效果相对较弱。

在高温区域($T_5 > 2000\text{ K}$),等离子体相对质量摩尔浓度的提高对基元反应的促进效果更加明显。等离子体对甲烷点火延迟的缩短效果与低温条件下一样非常明显。

因此,在实验条件下,等离子体对甲烷点火延迟的影响效果是点火温度与等离子体质量摩尔浓度耦合作用的结果。

在工程应用中,点火环境为 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$,在此气体环境中进行放电,与 Ar 作为稀释气体时相同,会产生大量电子, OH 、 H 、 O 、 CH_3 等活性自由基,及 O_3 等高能分子。同时,还会产生大量氮氧化合物,可大大加快速火过程中的基元反应速率^[22]。

通过本文的研究,测量了等离子体对甲烷点火延迟的缩短效果,揭示了等离子体缩短甲烷点火延迟时间的作用机理以及化学反应路径。本文使用的研究方法 with 所得的结论,可作为等离子体辅助点火应用于实际工程研究的基础。

3 结 论

通过研究,得到以下结论:

1) 等离子体放电时,放电电压基本呈现正弦变化。放电电流也随着放电时间呈现周期变化,

然而并不与电压呈现相应的变化趋势。在放电过程中,放电单元的气体电阻不断发生变化。

2) 注入很少的放电能量(小于 4 J)即可有效降低甲烷的点火延迟时间。在关闭电源后,放电产生的存在时间较长的粒子依然可以在一定程度上缩短甲烷的点火延迟时间。

3) 甲烷的自点火延迟时间的对数 $\lg \tau_1$ 与 $1000/T_5$ 基本呈现线性关系。持续放电条件下甲烷的点火延迟时间的对数 $\lg \tau_2$ 与 $1000/T_5$ 呈现二次函数的关系。放电后将电源关闭后的甲烷点火延迟时间的对数 $\lg \tau_3$ 与也 $1000/T_5$ 呈现线性关系,并且拟合的直线斜率与自点火条件下基本相同。

4) 经过化学反应路径分析可得,在低温或者高温点火条件下放电产生的等离子体对甲烷点火延迟的影响机理基本相同。

5) 点火温度 T_5 较低($T_5 < 1000\text{ K}$),或者较高($T_5 > 1600\text{ K}$)时,放电对甲烷点火延迟的缩短效果更加明显,可以将甲烷的点火延迟时间缩短一个数量级或一个数量级以上。等离子体对甲烷点火延迟的影响效果是点火温度与等离子体浓度耦合作用的结果。

参考文献:

- [1] XU B, SHI Z K. An overview on flight dynamics and control approaches for hypersonic vehicles[J]. Science China, 2015, 58(7): 1-18.
- [2] STARIKOVSKIY A, ALEKSANDROV N. Plasma-assisted ignition and combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 61-110.
- [3] JU Y G, SUN W T. Plasma assisted combustion; dynamics and chemistry[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015, 48(1): 21-83.
- [4] GUNDERSEN M. Energy-efficient transient plasma ignition and combustion[R]. AFOSR, Research Grant No. F49620-01-1-0322, 2004.
- [5] KOSAREV I N, ALEKSANDROV N L, KINDYSHEVA S M, et al. Kinetics of ignition of saturated hydrocarbons by nonequilibrium plasma: CH_4 -containing mixtures[J]. Combustion and Flame, 2008, 154(1): 569-586.
- [6] KOSAREV I N, PAKHOMOV A I, KINDYSHEVA S V, et al. Nanosecond discharge ignition of lean C_2H_2 -containing mixtures[R]. AIAA-2013-1050, 2013.
- [7] KOSAREV I N, PAKHOMOV A I, KINDYSHEVA S V, et al. Nanosecond discharge ignition in acetylene-containing mixtures[J]. Plasma Sources Science Technology, 2013, 22(4): 447-450.
- [8] KOSAREV I N, ALEKSANDROV N L, KINDYSHEVA S V, et al. Kinetic mechanism of plasma-assisted ignition of

- hydrocarbons[J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2008, 41(3):032002.
- [9] KOSAREV I N, ALEKSANDROV N L, KINDYSHEVA S V, et al. Kinetics of saturated hydrocarbons by nonequilibrium plasma: C_2H_6 -to C_5H_{12} -containing mixtures[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(1):221-233.
- [10] WU L, LANE J, CERNANSKY N P, et al. Plasma assisted ignition below self-ignition threshold in methane, ethane, propane and butane-air mixtures[R]. AIAA-2011-1330, 2011.
- [11] WU L, LANE J, CERNANSKY N P, et al. Time resolved PLIF and CFD diagnostics of OH radicals in afterglow of plasma discharge in hydrocarbon mixtures[J]. Bulletin of the American Physical Society, 2011, 39(11):2604-2605.
- [12] 夏胜国, 何俊佳. 非平衡等离子体燃烧强化[J]. 高电压技术, 2007, 33(10):109-113.
- XIA Shengguo, HE Junjia. Non-thermal plasma combustion enhancement[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10):109-113. (in Chinese)
- [13] 王峰, 何立明, 王晟大, 等. 甲烷/空气混合气体放电等离子体动力学机理分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(2):382-387.
- WANG Feng, HE Liming, WANG Shengda, et al. Analysis on plasma kinetic mechanism of methane/air discharge[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2):382-387. (in Chinese)
- [14] 杜宏亮, 何立明, 兰宇丹, 等. 约化场强对氮-氧混合气体放电等离子体演化特性的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(11):449-454.
- DU Hongliang, HE Liming, LAN Yudan, et al. Influence of reduced electric field on the evolution characteristics of plasma under conditions of N_2/O_2 discharge[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(11):449-454. (in Chinese)
- [15] 郭鹏, 陈正. NO_x 对甲烷/空气着火过程的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(5):472-476.
- GUO Peng, CHEN Zheng. Effects of NO_x on the ignition of methane/air mixtures[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(5):472-476. (in Chinese)
- [16] 郭鹏, 陈正. O_3 对甲烷/空气着火过程的影响[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(12):2160-2163.
- GUO Peng, CHEN Zheng. Effects of O_3 on the ignition of CH_4 /air mixtures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(12):2160-2163. (in Chinese)
- [17] 张鹏, 洪延姬, 沈双晏, 等. 等离子体强化点火的动力学分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(7):2125-2132.
- ZHANG P, HONG Y J, SHEN S Y, et al. Kinetic effects on plasma on the ignition process[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7):2125-2132. (in Chinese)
- [18] LI M, LI C R, ZHAN H M, et al. Effect of surface charge trapping on dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(3):031503. 1-031503. 3.
- [19] LI M, LI C R, ZHAN H M, et al. Effect of barrier materials on discharge properties in air at low pressure[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(2):19-23.
- [20] 廖钦. 煤油及其裂解产物自点火现象的初步实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- LIAO Qin. Experimental studies on autoignition phenomena of kerosene and cracked kerosene in a shock tube[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [21] VRIES J D, HALL J M, SIMMONS S L, et al. Ethane ignition and oxidation behind reflected shock waves[J]. Combustion and Flame, 2007, 150(1/2):137-150.
- [22] 沈双晏, 金星, 张鹏. 甲烷-空气混合气体放电等离子体增强点火机理分析[J]. 推进技术, 2015, 36(10):1509-1515.
- SHEN Shuangyan, JIN Xing, ZHANG Peng. Analysis on mechanism of plasma enhanced ignition of methane-air discharge[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(10):1509-1515. (in Chinese)
- [23] OMBRELLO T, WON S H, JU Y G, et al. Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen: Part II effects of $O_2(a^1\Delta_g)$ [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(10):1906-1915.
- [24] DAVIDSON D F, HANSON R K. Interpreting shock tube ignition data[J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2004, 36(9):510-523.
- [25] 张百灵, 王宇天, 李益文, 等. 低气压直流辉光放电数值模拟与实验研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(3):724-730.
- ZHANG Bailing, WANG Yutian, LI Yiwen, et al. Numerical simulation and experimental study for low-pressure direct-current glow discharge[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3):724-730. (in Chinese)

(编辑: 叶 青)