

文章编号: 1006-2467(2022)01-0028-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.033

纳秒脉冲放电参数对点火性能的影响

刘静远, 王宁, 赵庆武, 熊勇, 程勇

(山东大学 能源与动力工程学院, 济南 250061)

摘要: 基于定容燃烧弹探究纳秒脉冲放电在不同脉冲电压、不同脉冲间隔下的放电特性, 比较不同放电参数对甲烷/空气混合气点火成功率和着火延迟的影响。研究表明, 减小脉冲间隔, 可以合理利用脉冲之间的耦合作用, 提高放电能量利用率; 增大脉冲电压、脉冲数量和减小脉冲间隔可以扩大甲烷/空气混合气的着火界限; 增大脉冲电压和减小脉冲间隔均可以有效降低着火延迟。

关键词: 纳秒脉冲放电; 脉冲电压; 脉冲间隔; 点火成功率; 着火延迟

中图分类号: TK 437

文献标志码: A

Effect of Nanosecond Pulse Discharge Parameters on Ignition Performance

LIU Jingyuan, WANG Ning, ZHAO Qingwu, XIONG Yong, CHENG Yong

(School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The discharge characteristics of nanosecond pulse discharge at different pulse voltages and different pulse intervals are investigated based on constant volume bomb. The effects of different discharge parameters on the flame success rate and ignition delay of methane/air mixture are compared. The results show that the coupling between pulses can be reasonably utilized and the utilization rate of discharge energy can be improved by decreasing the pulse interval. The ignition limit of methane/air mixture can be enlarged by increasing the pulse voltage, the pulse number, and decreasing the pulse interval. The ignition delay can be reduced by increasing the pulse voltage and decreasing the pulse interval.

Key words: nanosecond pulse discharge; pulse voltage; pulse interval; flame success rate; ignition delay

为了提高内燃机热效率及改善排放性能, 废气再循环(EGR)、稀薄燃烧等技术受到青睐, 但过高的 EGR 率及过量空气系数会造成发动机燃烧循环波动增大、燃烧不稳定, 甚至出现失火现象, 这对点燃式内燃机的点火系统提出了更高的要求。

前人研究结果表明^[1-4], 火花塞点火包括 3 个阶段: 击穿阶段、电弧阶段、辉光阶段。在击穿阶段, 在

高电压作用下气体介质被击穿形成火花通道; 在电弧阶段, 火花通道将转变成一个大电流电弧; 在辉光阶段, 电压电流迅速减小, 但持续时间比前两个阶段长, 点火能量集中在这一阶段释放。以上过程, 从击穿阶段到电弧阶段的过渡会消耗大量能量, 缩短这一阶段, 可有效增加辉光阶段释放的能量。

近几年, 纳秒脉冲放电点火受到了广泛关注。文

收稿日期: 2021-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(51976107), 北京理工大学高效低排放内燃机技术工业和信息化部重点实验室科研基地科技支撑专项计划(2017CX02015)资助项目

作者简介: 刘静远(1997-), 男, 河南省鹤壁市人, 硕士生, 研究方向为内燃机性能测试研究。

通信作者: 程勇, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 13969191197; E-mail: cysgd@sdu.edu.cn.

献[1]研究了丙烷/空气混合气的点火成功率随放电能量、混合气初始压力的变化规律,指出在 $0.3 \times 10^5 \sim 1 \times 10^5$ Pa 范围内,放电能量和混合气初始压力越大,点火成功率越高. 文献[5]应用瞬时冷等离子体技术对甲烷/空气预混气体进行了点火试验,并与电火花点火结果进行了对比,发现瞬时冷等离子体将甲烷预混气体的着火延迟时间缩短了 40%. 文献[6]研究了纳秒脉冲放电对丙烷/空气混合气的点火过程,发现放电脉冲数对点火过程有很大的影响,放电产生的活性物质会加速稀混合气的燃烧,当施加较多的脉冲时,可以显著降低着火延迟. 文献[7]利用脉冲爆震发动机测试平台研究了纳秒放电对点火过程的影响,发现在较高的脉冲频率(>10 kHz)时,多个脉冲会耦合成一个火核,增加了点火火核的尺寸和核中释放的总能量. 文献[8]基于定容燃烧弹的研究发现,利用多组脉冲放电产生的累计效应,可以增大点火成功率. 诸多研究结果表明,纳秒脉冲放电在强化点火方面表现出了突出的优势.

影响纳秒脉冲放电能量的因素有很多,以往的研究大多通过改变放电脉冲数调节放电总能量,但脉冲电压、脉冲间隔也会影响放电总能量及后续的火焰传播过程. 本文在定容燃烧弹中,以甲烷/空气混合气为介质,研究了点火成功率和着火延迟随纳秒脉冲发生器的最高输出电压、放电脉冲间隔的变化,可为纳秒脉冲放电在改善内燃机点火性能的研究上提供试验基础.

1 试验装置及试验过程

试验装置示意图如图 1 所示. 空气气泵、甲烷气瓶用于为混合气瓶提供预设当量比的混合气,混合气依据道尔顿分压定律配制. 首先,根据预定当量比向混合气瓶充入指定压力的甲烷气体,压力值由压力传感器 1(MIK P300,精度为 0.25%FS(FS 为满量程)),量程为 $-0.1 \sim 1$ MPa)监测,然后充入空气至目标压力. 混合气瓶内置电磁搅拌器,用于将混合气搅拌均匀,混合气瓶内的混合气通过电磁阀充入定容燃烧弹;燃烧弹内径为 4 cm、长度为 2 cm. 用压力传感器 2 (AVL QC32C,精度为 0.25%FS,量程为 $-0.1 \sim 1$ MPa)测量并控制燃烧弹内混合气压力;脉冲电源为自主设计开发,基于脉冲变压器和磁压缩技术,以大电容储能提高脉冲重复频率,用谐振充电减小电容充电时间. 根据充放电时间匹配磁开关并利用其磁饱和特性产生陡上升沿脉冲,产生的脉冲电压上升时间约为 20 ns、半高宽约为 50 ns、幅值为 10 kV 以上,脉冲频率为 16 kHz 时能保证较

好的幅值一致性^[9];火花塞间隙为 1 mm;放电时的电流、电压分别采用电流传感器(Pearson2877)、高压探头(Tektronic P6015A)及示波器(Tektronic DPO2014)测量,示波器最高采样频率为 100 MHz. 燃烧弹内的压力采用压力传感器 2 和示波器进行采集. 放电及燃烧图像采用 Phantom VEO710 高速照相机记录,通过单片机控制系统对脉冲电源、示波器及高速照相机进行同步触发.

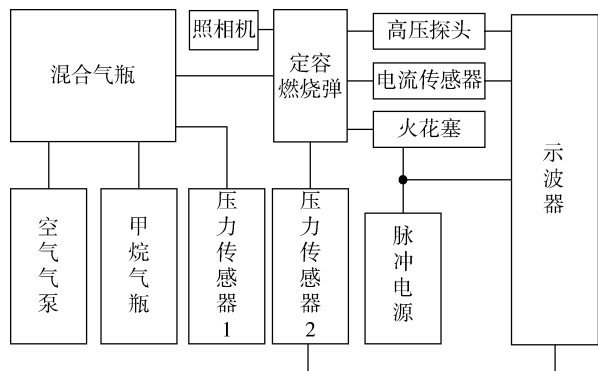


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

试验时,过量空气系数在 $0.8 \sim 1.7$ 范围内调节,试验初始压力固定为 0.1 MPa,混合气初始温度及燃烧弹壁面温度为室温,约为 298 K.

2 纳秒脉冲放电特性及放电能量

由文献[10]可知,测量到的总电流 I_{tot} 由电极间电容容值变化反映的位移电流 I_{disp} 和实际带电粒子定向移动反映的传导电流 I_{cond} 组成,如下式所示:

$$I_{\text{tot}} = I_{\text{disp}} + I_{\text{cond}} \quad (1)$$

$$I_{\text{disp}} = C \frac{dU}{dt} \quad (2)$$

式中: C 为电极间隙电容的写法; U 为电极间电压; t 为时间.

在实际测量中,由于探头及传输电缆的传输延迟,采集到的电流和电压数据在相位上会产生偏移,本文所用测试系统该偏移约为 8 ns. 电极间的电容则是通过将 $C \frac{dU}{dt}$ 的振幅与总电流 I_{tot} 的振幅匹配来确定的,通过计算得到 $C=9.4$ pF^[1].

由式(1)和(2)可得:

$$I_{\text{cond}} = I_{\text{tot}} - C \frac{dU}{dt} \quad (3)$$

由于在甲烷/空气混合气中,甲烷占比较小,对分子密度影响较小,本文在应用中,以在大气中放电得到的电流值代替在甲烷/空气混合气中放电时的电流值作为 I_{tot} .

当脉冲电压为 7.4 kV、脉冲持续时间为 20 ns 时,在空气中放电时的实测总电流、计算得到的位移电流和传导电流如图 2 所示.其中: I 为电流.由图 2 可知,最大传导电流约为 51 A.

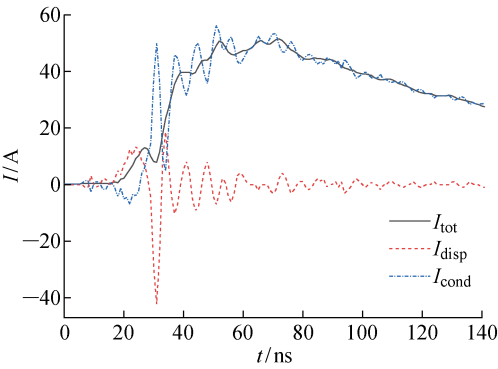


图 2 I_{tot} 、 I_{disp} 和 I_{cond} 的对比

Fig. 2 Comparison of I_{tot} , I_{disp} , and I_{cond}

依据实测电极电压和计算得到的传导电流,得到电极的放电功率.将功率对脉冲持续时间积分,可以得到脉冲放电释放到等离子体中的能量:

$$E' = \int I_{\text{cond}} U dt \tag{4}$$

电极电压和传导电流和释放能量随时间的变化过程如图 3 所示.由图 3 可知,纳秒脉冲放电过程可分为 3 个阶段:击穿阶段、电弧阶段和辉光阶段.

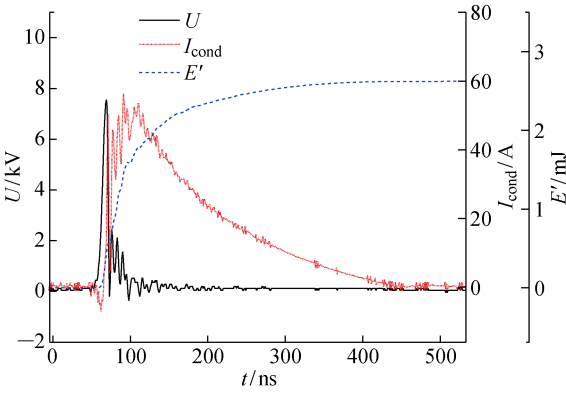


图 3 电极电压、传导电流和释放能量随时间的变化

Fig. 3 Electrode voltage, conduction current, and released energy versus time

击穿阶段,放电开始到刚形成气体通道的过程,脉冲电压升高到约为 7.8 kV 时,电极间隙中的混合气被击穿,形成很窄的气体通道;电弧阶段,气体通道为电流通道所取代的过程,电压迅速降低到一定值,随后震荡衰减,电流迅速增大到峰值 51 A,电极间气体通道转化为电流通道,电流通道形成电弧的中心高温区,一般认为在电弧阶段开始出现火焰传播;辉光阶段,电流通道形成到放电过程结束,

电流由峰值震荡衰减,产生较多热量,绝大部分点火能量在此时放出^[1-2].

脉冲电压 U_a 是脉冲电源施加到电极的总电压,放电过程中脉冲电压与电极间击穿电压 U_b 、击穿电流 I_b 随时间变化的趋势如图 4 所示.由图 4 可知,发生击穿时,击穿电压为 7.2 kV,击穿电压不能直接控制,通过改变脉冲电压幅值,改变电极间击穿电流,实现对放电能量的调控.图 5 统计了不同脉冲电压时在空气中的击穿电流和放电释放的能量.当脉冲电压为 7.1 kV 时,击穿电流为 47.8 A,释放能量为 1.8 mJ;当脉冲输出电压为 10.4 kV 时,击穿电流为 80.3 A,释放能量为 3.6 mJ.

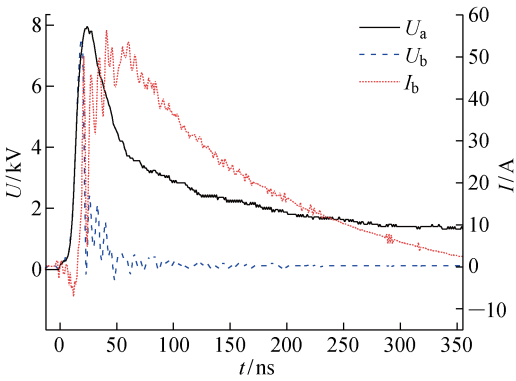


图 4 脉冲电压、击穿电压和击穿电流的关系

Fig. 4 Relationship between pulse voltage, breakdown voltage, and breakdown current

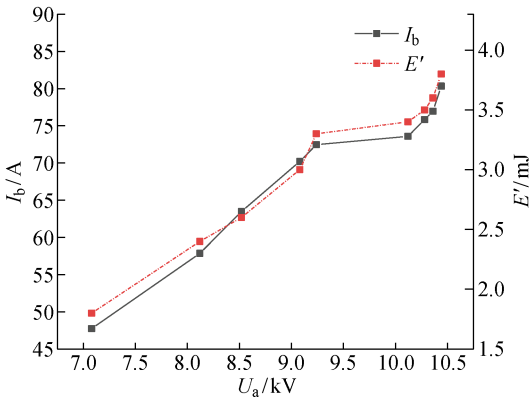


图 5 脉冲电压与击穿电流和放电释放能量的关系

Fig. 5 Relationship between pulse voltage, breakdown current, and discharge energy

当脉冲电压为 10.4 kV、脉冲持续时间为 20 ns、脉冲间隔为 60 μ s 时,在空气中连续放电时的击穿电压和总电流波形如图 6 所示.由图 6 可知,当采用多脉冲放电时,击穿电压、电流值与单个脉冲放电时不同,第 1 个击穿电压值较高,但电流值较低,从第 2 个脉冲开始,击穿电压、电流趋近平稳,但相比第 1

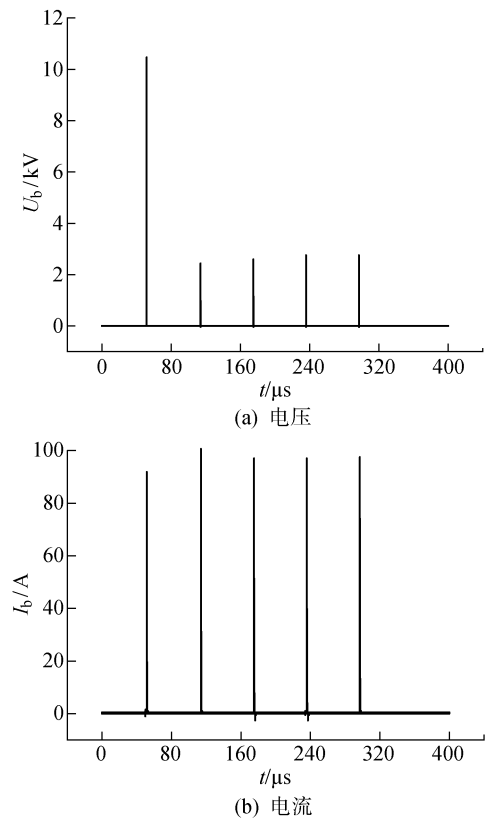


图 6 多脉冲击穿电压、击穿电流随时间的变化
Fig. 6 Multi-pulse breakdown voltage and breakdown current versus time

个脉冲,击穿电压有所降低,击穿电流有所增加。
脉冲电压设置为 10.4 kV,脉冲持续时间设置为 20 ns,第 1 个脉冲能量为 3.6 mJ。改变脉冲间隔,统计了第 2 个脉冲击穿电压 U_b 和释放能量 E' 随脉冲间隔 Δt 的变化情况,如图 7 所示。当脉冲间隔由 60 μs 逐渐增大时,第 2 次脉冲击穿电压从 2.7 kV 逐渐增大,最大击穿电压出现在脉冲间隔为 140 μs 时,达到 5.5 kV。继续增大放电脉冲间隔,击

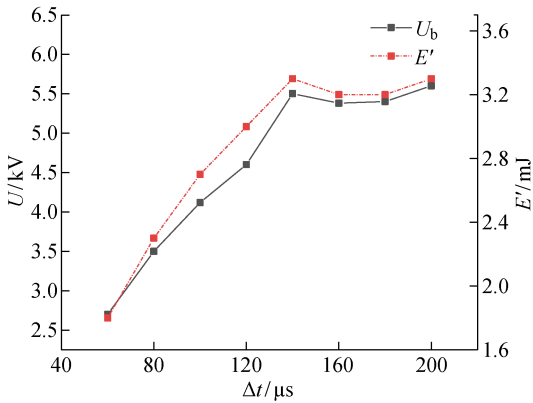


图 7 第 2 个脉冲电压及能量随脉冲间隔的变化
Fig. 7 Voltage and energy of the second pulse versus pulse interval

穿电压维持在 5.5 kV 左右。而从放电所消耗的总能量来看,当脉冲间隔为 60 μs 时,第 2 个脉冲释放了 1.8 mJ 的能量,当脉冲间隔增大为 140 μs 以上时,第 2 个脉冲释放的能量在 3.3 mJ 左右。

出现这种现象的原因是因为相继脉冲作用效果存在耦合,前一次放电在电极间产生大量的高温活性物质,使下次放电时更容易发生击穿。但随脉冲间隔时间增长,第 2 个脉冲击穿电压增大,是由于高温状态活性物质向周围扩散导致密度降低,需要更高的电压击穿电极间的气体。

3 纳秒脉冲放电参数对点火性能影响的试验研究

在燃烧弹内充入甲烷/空气混合气,初始压力为 1×10^5 Pa 温度为室温,过量空气系数范围为 0.8~1.7,以点火成功率和着火延迟为评价参数,探究了脉冲持续时间为 20 ns,不同脉冲电压、不同脉冲间隔下纳秒脉冲放电参数对点火性能的影响。

3.1 放电参数对点火成功率的影响

点火成功率 P 定义为点火成功次数与试验总次数 S 之比。通过高速相机观察点火过程,以形成火核,并顺序点燃周围混合气,火焰传播扩散至整个燃烧室为点火成功。为保证数据的有效性,需要统计足够次数的试验。放电参数保持不变,重复进行试验,得到的点火成功率随试验次数增加的变化趋势如图 8 所示。由图 8 可知,当试验次数达到 30 次以上时,点火成功率统计值逐渐稳定。在后续试验中,点火成功率均采用 30 次的测试结果进行统计。

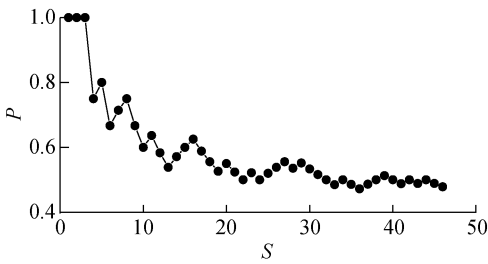


图 8 点火成功率与试验次数的关系
Fig. 8 Flame success rate versus number of tests

图 9 显示了点火成功率与脉冲间隔的关系,试验中脉冲电压为 10.4 kV,放电脉冲数为 100,设过量空气系数为 ϕ 。由图 9 可以看到,过量空气系数 ϕ 在 0.8~1.4 之间时,点火成功率为 100%;当混合气浓度偏离此范围时,点火成功率随放电脉冲间隔的增大近似呈线性降低。过量空气系数为 0.8、1.5、1.6,脉冲间隔设置为 60 μs 时,点火成功率可维持

在 100%，当脉冲间隔大于 120 μs 时，采用纳秒脉冲放电难以着火。这主要是因为随着脉冲间隔的延长，脉冲之间的耦合作用降低，单个脉冲释放的能量难以形成有足够能量的火核，使点火成功率降低。

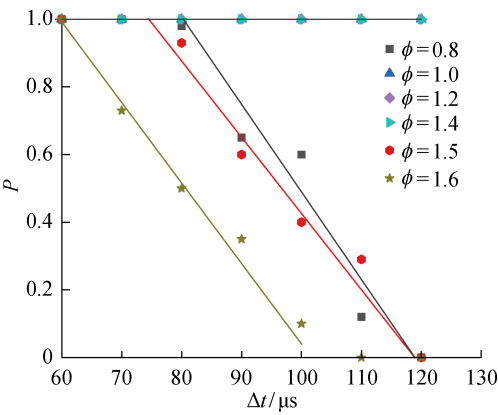


图 9 点火成功率随放电脉冲间隔的变化
Fig. 9 Flame success rate versus discharge pulse interval

固定脉冲间隔为 60 μs ，脉冲数为 100，统计得到点火成功率随脉冲电压的变化，如图 10 所示。由图 10 可知，过量空气系数 ϕ 在 0.8~1.5 之间时，点火成功率为 100%。当过量空气系数为 1.6，脉冲电压为 8.3 kV 时，无法点燃混合气，随着脉冲电压的升高，点火成功率升高，脉冲电压达到 10.4 kV 时，点火成功率达 100%。增大过量空气系数至 1.7 时，虽然点火成功率也随脉冲电压的提高逐渐升高，但脉冲电压达到 10.4 kV 时，点火成功率也未达到 100%。

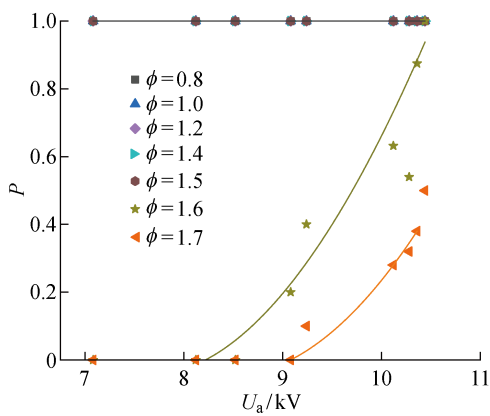


图 10 点火成功率随脉冲电压的变化
Fig. 10 Flame success rate versus pulse voltage

为进一步探究纳秒脉冲放电的点火能力，将放电脉冲间隔固定为 60 μs ，脉冲电压设置为 10.4 kV，在过量空气系数为 1.7、1.8 时，统计了点

火成功率随脉冲数 N 的关系，如图 11 所示。由图 11 可知，在过量空气系数为 1.7 时，将脉冲数增加到 200，点火成功率可达到 100%；过量空气系数为 1.8 时，增加脉冲数，点火成功率也随之升高，表明增大脉冲数可以产生更多的活性物质，进而可以扩大着火界限。

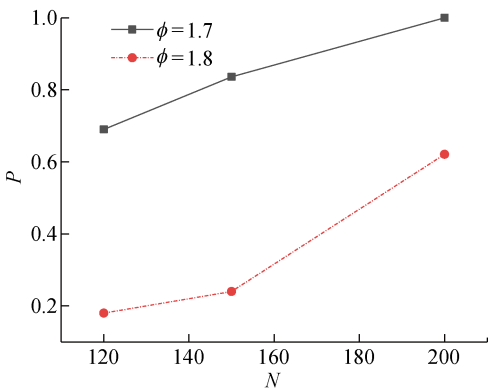


图 11 点火成功率随脉冲数量的变化
Fig. 11 Flame success rate versus number of pulses

3.2 放电参数对着火延迟的影响

根据点火试验中燃烧弹内压力数据，统计了着火延迟随放电参数的变化规律。将累积放热量达到总放热量 10% 的时刻定义为着火开始时刻，即着火延迟期 τ 定义为放电开始至总放热量达 10% 时所需的时间。

定容弹容积固定，混合气燃烧释放的能量，一部分传给工质，使工质内能增加，一部分通过燃烧室壁面散失到环境中，由文献[11]根据热力学第一定律有：

$$Q_B = \Delta E + Q_w \tag{5}$$

式中： Q_B 和 Q_w 分别为混合气燃烧放热量、通过壁面的散热量； ΔE 为工质内能的变化^[10]。

单位时间内混合气的燃烧放热量称为燃烧放热速率，记作 $\frac{dQ_B}{dt}$ ，则有：

$$\frac{dQ_B}{dt} = \frac{d\Delta E}{dt} + \frac{dQ_w}{dt} \tag{6}$$

考虑到：

$$U = c_v m T \tag{7}$$

$$c_v = \frac{R_g}{k - 1} \tag{8}$$

$$m T = \frac{p V}{R_g} \tag{9}$$

由式(7)~(9)可得：

$$U = \frac{p V}{k - 1} \tag{10}$$

将式(10)代入式(6)可得:

$$\frac{dQ_B}{dt} = \frac{V}{k-1} \left(\frac{dp}{dt} - \frac{p}{k-1} \frac{dk}{dt} \right) + KA(T - T_w) \quad (11)$$

式中: m 为燃烧弹中混合气质量; T 为混合气温度; c_v 为混合气定容比热容; R_g 为混合气气体常数; V 为燃烧弹容积; k 为混合气等熵指数; p 为燃烧弹内压力; K 为传热系数; A 为定容弹内表面积; T_w 为燃烧弹壁面温度. 文中计算累积放热量是为了确定放热量至总放热量 10% 时所需的相对时间, 将等熵指数 k 视为常数, 对结果无影响. 则式(11) 在 k 取常数后可简化为

$$\frac{dQ_B}{dt} = \frac{V}{k-1} \frac{dp}{dt} + KA(T - T_w) \quad (12)$$

混合气温度可由理想气体状态方程计算得到:

$$T = \frac{pV}{nR} \quad (13)$$

式中: n 为燃烧弹内混合气的物质的量; R 为通用气体常数, 取为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

燃烧弹容积 V 为 25 mL , 为简化计算, 取 $k = 1.3$, $K = 35 \text{ J/s}$, $n = 1.159 \times 10^{-3} \text{ mol}$, $A = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $T_w = 298 \text{ K}$. 由瞬时放热率对时间积分可得累积放热量 Q_t , 进而确定着火延迟 τ , 如图 12 所示.

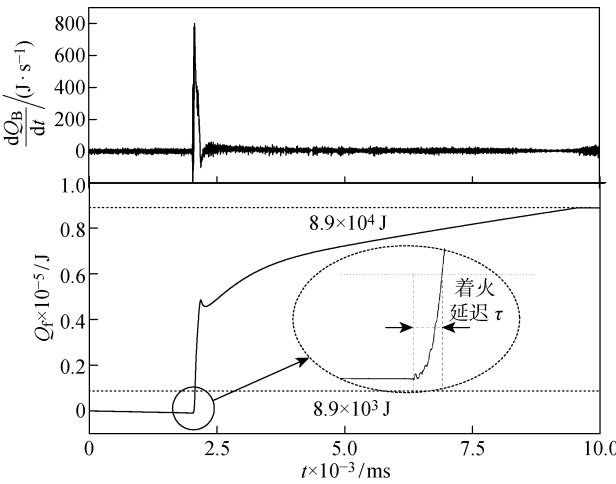


图 12 着火延迟示意图

Fig. 12 Diagram of ignition delay

图 13 统计了着火延迟随脉冲间隔的变化. 由图 13 可知, 随着脉冲间隔的增大, 不同过量空气系数下的着火延迟均有所增加, 表明脉冲间耦合作用减弱, 电极间活性物质保有量相对脉冲间隔较小时减少. 当过量空气系数为 0.8 时, 脉冲间隔为 $60 \mu\text{s}$ 和 $100 \mu\text{s}$ 时着火延迟改变量最大, 为 9.9 ms .

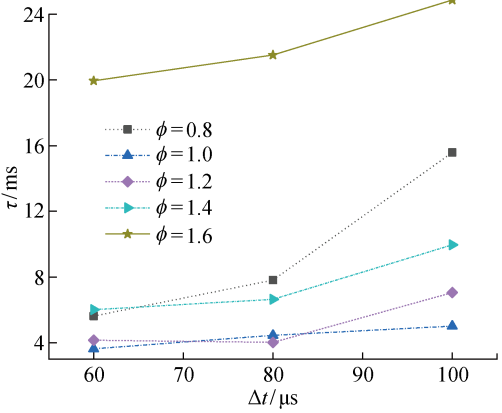


图 13 着火延迟随脉冲间隔的变化

Fig. 13 Ignition delay versus pulse interval

图 14 统计了着火延迟随脉冲电压的变化. 由图 14 可知, 随着脉冲电压的增高, 着火延迟略有缩短. 脉冲输出电压从 7 kV 增大到 10.4 kV , 过量空气系数为 0.8 时, 着火延迟最大缩短量为 2.2 ms ; 在理论空燃比下, 着火延迟的最大缩短量为 0.5 ms ; 在过量空气系数为 1.6 时, 着火延迟的最大缩短量为 5 ms .

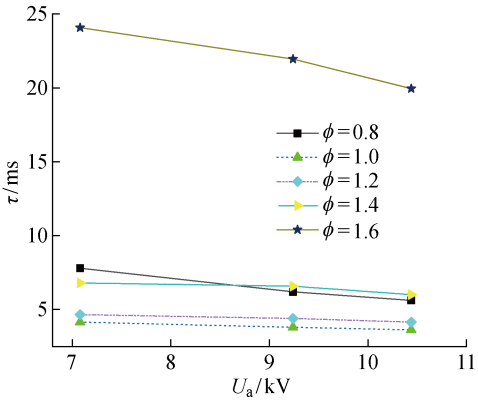


图 14 着火延迟随脉冲电压的变化

Fig. 14 Ignition delay versus pulse voltage

通过上述结果可知, 在混合气浓度偏离理论空燃比时, 增大脉冲电压和减小脉冲间隔均可以有效降低着火延迟. 文献[12]可为此结论提供理论支撑: 高频纳秒脉冲放电对点火性能的影响, 集中在点火初期. 一方面, 重复的脉冲放电在静止燃气中引起湍流现象, 使产生的火核更容易发展; 另一方面, 多组放电会产生更大的热区域, 方便形成更大的初始火核.

4 结论

基于定容燃烧弹探究了纳秒脉冲放电参数对甲烷/空气混合气点火及燃烧的影响, 主要结论如下.

(1) 纳秒脉冲放电的连续脉冲之间存在耦合作用,这种耦合作用的效果随脉冲间隔增大而逐渐减弱. 试验中,在脉冲间隔到 $140\ \mu\text{s}$ 时,耦合作用的效果可以忽略不计. 可以充分利用脉冲间耦合关系,相对减少击穿阶段消耗的能量,提高放电能量利用率.

(2) 脉冲持续时间不变,增大脉冲电压、脉冲数量和减小脉冲间隔可以扩大甲烷/空气混合气的着火界限,提高点火成功率.

(3) 脉冲持续时间不变,增大脉冲电压和减小脉冲间隔均可以有效降低着火延迟.

参考文献:

- [1] LIN B X, WU Y, ZHANG Z B, *et al.* Multi-channel nanosecond discharge plasma ignition of premixed propane/air under normal and sub-atmospheric pressures[J]. **Combustion and Flame**, 2017, 182: 102-113.
- [2] MALY R, VOGEL M. Initiation and propagation of flame fronts in lean CH_4 -air mixtures by the three modes of the ignition spark[J]. **Symposium (International) on Combustion**, 1979, 17(1): 821-831.
- [3] ZIEGLER G F W, WAGNER E P, MALY R R. Ignition of lean methane-air mixtures by high pressure glow and ARC discharges[J]. **Symposium (International) on Combustion**, 1985, 20(1): 1817-1824.
- [4] MODIEN R M, CHECKEL M D, DALE J D. The effect of enhanced ignition systems on early flame development in quiescent and turbulent conditions[C]// **SAE Technical Paper Series, 400 Commonwealth Drive**. Warrendale, PA, United States: SAE International, 1991: 910564.
- [5] LIU J B, WANG F, LEE L, *et al.* Effect of discharge energy and cavity geometry on flame ignition by transient plasma[C]// **42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**. Reston, Virginia, USA: AIAA, 2004.
- [6] PANCHESHNYI S V, LACOSTE D A, BOURDON A, *et al.* Ignition of propane-air mixtures by a repetitively pulsed nanosecond discharge[J]. **IEEE Transactions on Plasma Science**, 2006, 34(6): 2478-2487.
- [7] LEFKOWITZ J K, GUO P, OMBRELLO T, *et al.* Schlieren imaging and pulsed detonation engine testing of ignition by a nanosecond repetitively pulsed discharge[J]. **Combustion and Flame**, 2015, 162(6): 2496-2507.
- [8] LOVASCIO S, HAYASHI J, STEPANYAN S, *et al.* Cumulative effect of successive nanosecond repetitively pulsed discharges on the ignition of lean mixtures[J]. **Proceedings of the Combustion Institute**, 2019, 37(4): 5553-5560.
- [9] 赵庆武, 程勇, 杨雪, 等. 高重频纳秒脉冲放电点火系统设计[J]. **吉林大学学报(工学版)**, 2021, 51(2): 414-421.
- ZHAO Qingwu, CHENG Yong, YANG Xue, *et al.* A high-frequency nanosecond-pulsed ignition system for plasma assisted ignition and combustion[J]. **Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)**, 2021, 51(2): 414-421.
- [10] PAI D, LACOSTE D A, LAUX C O. Images of nanosecond repetitively pulsed plasmas in preheated air at atmospheric pressure[J]. **IEEE Transactions on Plasma Science**, 2008, 36(4): 974-975.
- [11] 王建昕, 帅石金. 汽车发动机原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 34-39.
- WANG Jianxin, SHUAI Shijin. Automotive engine fundamentals [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 34-39.
- [12] 林冰轩, 吴云, 金迪, 等. 低气压下多通道纳秒脉冲等离子体点火特性研究[J]. **工程热物理学报**, 2018, 39(9): 2048-2055.
- LIN Bingxuan, WU Yun, JIN Di, *et al.* Characteristic of multi-channel nanosecond discharge plasma ignition under sub-atmospheric pressures[J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2018, 39(9): 2048-2055.

(本文编辑:石易文)