

放电参数对 NH_3 /空气混合气纳秒脉冲 多通道点火特性的影响

熊 勇¹, 田 杰¹, 程 勇¹, 赵庆武²

(1. 山东大学 能源与动力工程学院, 济南 250061; 2. 萨里大学 机械工程科学学院, 英国 吉尔福德 GU27XH)

摘 要: 基于定容燃烧弹, 研究了 NH_3 /空气混合气中放电脉冲间隔和放电脉冲数对纳秒脉冲沿面介质阻挡放电 (nSDBD) 的放电特性和点火特性的影响规律。放电特性测试表明: nSDBD 可以产生多个独立分布的放电丝, 扩大了等离子体的范围; 放电脉冲间隔为 50 μs 时, 30 个放电脉冲能激发约 12 个放电丝, 其长度约 14 mm。点火特性测试表明: nSDBD 实现了空间多点点火效果; 脉冲间隔为 50 μs 时, 180 个放电脉冲产生了 6 个环绕顶部电极的初始火核; NH_3 /空气混合气中, 初始火核出现了消散的现象, 使初始火核数量与稳定燃烧的火核数量不一致; 随着脉冲间隔或脉冲数的增加, 初始火核面积增大, 并且稳定火核的数量从 1 个逐渐增加至 6 个, 这有效缩短了 NH_3 /空气混合气的着火延迟, 缩短量可达 30 ms, 约 55%; 脉冲间隔和脉冲数的调整可以有效控制 NH_3 /空气混合气的燃烧相位。

关键词: 动力机械工程; 沿面介质阻挡放电; 纳秒脉冲; 多通道点火

中图分类号: TK411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)12-3783-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240382

Effect of discharge parameters on nanosecond pulse multi-channel ignition characteristics of NH_3 /air mixture

XIONG Yong¹, TIAN Jie¹, CHENG Yong¹, ZHAO Qing-wu²

(1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. School of Mechanical Engineering Sciences, University of Surrey, Guildford GU27XH, UK)

Abstract: The effect of discharge pulse interval and number on the discharge and ignition characteristics of nanosecond pulse surface dielectric barrier discharge (nSDBD) in NH_3 /air mixture was studied. The experiment is conducted in a constant volume combustion chamber. Discharge characteristic tests show that nSDBD can generate multiple independently distributed discharge filaments, expanding the range of plasma. When using 30 pulse numbers with a pulse interval of 50 μs , at least 12 discharge filaments are excited, with filament lengths exceeding 14 mm. The ignition characteristic test shows that nSDBD has achieved spatial multi-point ignition. When the pulse interval is 50 μs , 180 discharge pulses generate 6

收稿日期: 2024-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51976107, 52376118).

作者简介: 熊勇 (1992-), 男, 博士研究生. 研究方向: 等离子体辅助燃烧. E-mail: 1193613299@qq.com

通信作者: 程勇 (1963-), 教授, 博士. 研究方向: 内燃机工作过程测试及控制技术, 等离子体辅助燃烧.

E-mail: cysgd@sdu.edu.cn

initial flame kernels surrounding the top electrode. In the NH_3/air mixture, there is a phenomenon of initial flame kernels dissipating, resulting in a discrepancy between the number of initial flame kernels and the number of stable combustion flame kernels. As the pulse interval or pulse number increases, the area of the initial flame kernels increases, and the number of stable flame kernels gradually increases from 1 to 6. This effectively shortens the ignition delay of NH_3/air mixture, with a reduction of up to 30 ms, approximately 55%. The adjustment of pulse interval and pulse number can effectively control the combustion phase of NH_3/air mixture.

Key words: power mechanical engineering; surface dielectric barrier discharge; nanosecond pulsed; multi-channel ignition

0 引言

内燃机的节能减排主要聚焦于两条路线^[1,2]:

①优化传统燃料内燃机的效率和降低其排放;②使用零碳燃料替代传统燃料。零碳燃料中,氨气是最佳的氢载体,具有较高的氢质量比重^[3],且氨气在常温下的液化压力仅为 0.8 MPa^[4],因此,氨气具有较好的应用前景。但氨气的最小点火能量高^[5]且燃烧速度慢^[6],这使得其燃烧稳定性较差。为了提高氨气的燃烧稳定性,需要实现氨气的可靠点火并加快其燃烧速率。以往的研究表明^[7-9],初始火核面积对火成功率有较大影响;增加初始火核面积并促进初始火核的发展将有利于提高点火稳定性及燃烧速率。

火花点火产生的等离子体主要通过热效应点燃混合气。等离子体的范围直接决定了初始火核的面积及分布。多电极点火^[10]、高能点火^[11]、微波谐振点火^[12,13]、微波辅助点火^[14]、射频点火^[15]等技术在扩大等离子体体积方面具有一定的效果,进而提升了点火效果,促进了燃烧过程。但是,这些技术所生成的等离子体仍然受限于靠近电极区域,限制了点火效果的进一步提升。

纳秒脉冲介质阻挡放电通过在电极上施加上升沿在纳秒量级的脉冲电压,在纳秒时间尺度内可以形成很高的电场,其产生的电离波能形成大范围分布的放电通道^[16]。Stepanyan 等^[17]在 0.1~0.6 MPa 气压下发现了纳秒脉冲沿面介质阻挡放电(Surface dielectric barrier discharge, nSDBD)从弥散形态转变为丝状放电的多流注形态,且随着气压的升高,放电形态更容易发生转变。这两种放电形态产生的放电丝都沿着绝缘介质表面向外发展,可以扩大等离子体的分布范围,因此,具有空间点火且增加点火面积的潜力。Anokhin 等^[18]在 0.06~0.1 MPa 气压条件下研究了 nSDBD 点

火过程,实验发现在环形电极的边缘处 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{空气}$ 混合气被同时引燃。Boumehdi 等^[19]在快速压缩机中研究了较高气压下的 nSDBD 点火过程,发现在压缩压力为 1.47 MPa、温度为 972 K 情况下, nSDBD 可以使点火延迟从 130 ms 缩短到 10 ms。

现有研究大多采用高电压的单个放电脉冲方式,因此,无法方便地调整放电能量和等离子体特性。为了便于 nSDBD 在内燃机点火控制中的应用,Zhao 等^[20]提出采用高频纳秒脉冲驱动 SDBD,通过调整脉冲数可以方便地控制总放电能量和等离子体特性。他们在定容燃烧弹中研究了高频 nSDBD 点火过程,在 0.1 MPa 气压下,发现高频 nSDBD 可以在 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{空气}$ 混合气中产生环绕中心电极的 8 个初始火核,通过调整放电脉冲数和放电间隔可以方便地调整初始火核数和初始火核半径。高频 nSDBD 可以空间点火的优势有望加快氨气的燃烧速度。但是,针对 $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气中的高频 nSDBD 多通道点火过程研究较少。 NH_3 的点火特性与碳氢燃料相差较大,高频 nSDBD 在 $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气中的点火助燃效果需要进一步研究;放电参数对其燃烧参数的影响规律需要进一步明确。

本文在定容燃烧弹中维持初始条件(空燃比、气压、温度)恒定的前提下,研究了 $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气中放电间隔和放电脉冲数对高频 nSDBD 能量特性和形态的影响,以及对高频 nSDBD 点火助燃效果的影响。

1 试验方案及数据处理方法

1.1 试验装置

搭建了一套定容燃烧弹装置,图 1 为该装置的示意图。两个内径为 40 mm 的圆柱体相交形成的容积作为定容燃烧弹的燃烧室,体积约

90 mL。NH₃/空气混合气的浓度根据分压定律在预混罐中进行配制。定容弹弹体的温度通过加热塞及温控仪控制在(363±0.2)K。自制的^[21]脉冲电源和SDBD电极组成高频nSDBD发生系统。其中,脉冲电源产生的高电压脉冲的上升沿和半高宽都在纳秒量级,放电频率最高可以达到20 kHz,放电电压最高18 kV。SDBD电极由顶部电极、绝缘介质板和掩埋电极组成,如图1(b)所示。顶部电极和掩埋电极采用35 mm的铜箔,绝缘介质板采用1 mm厚度的FR-4 PCB板。顶部电极接脉冲电源正极,掩埋电极接电源负极,SDBD电极安装在定容弹后端面。通过Tektronix P6015A 高压探头和Pearson 2877 电流传感器配合示波器分别测量放电电压和电流。燃烧压力通过Kistler 6045B 缸压传感器配合Kistler 5064D 电荷放大器测量。采用Phantom VEO710 高速相机拍摄放电及燃烧图像。采用单片机控制系统同步触发脉冲电源、示波器及高速相机。

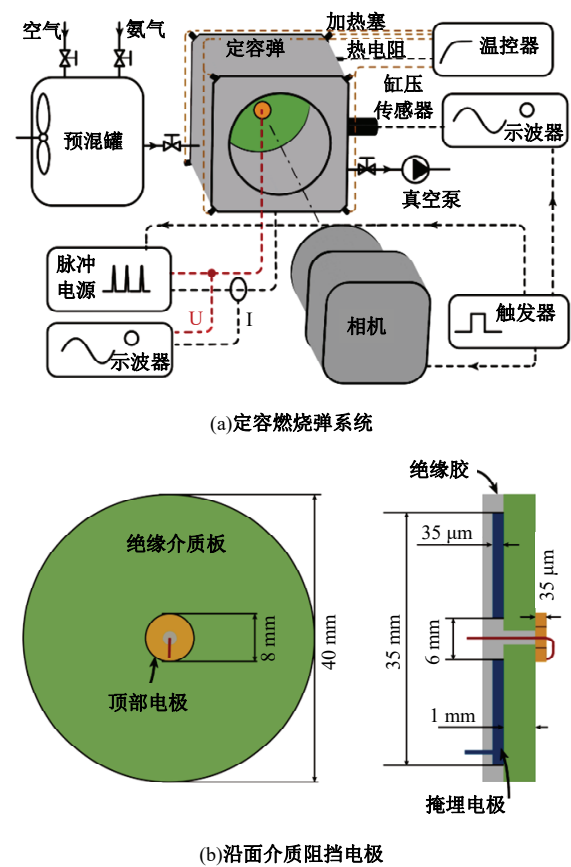


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup schematic

1.2 试验方案与数据处理

本文主要研究NH₃/空气混合气中放电参数对高频nSDBD放电特性和点火特性的影响。放

电特性试验:放电脉冲幅值维持在15 kV左右,混合气的初始气压为0.1 MPa、初始温度为363 K、当量比为 $\phi=1$,分别研究脉冲间隔(Pulse interval, PI)和脉冲数(Pulse number, PN)对放电形态和放电能量特性的影响规律。点火试验:维持上述初始条件不变,分别研究PI和PN对点火过程、初始火核当量半径和燃烧参数的影响。放电试验和点火试验均在NH₃/空气混合气中进行。试验方案如表1所示。

表1 纳秒脉冲多流注放电及点火特性试验方案
Table 1 Experimental plan for nanosecond pulse multi-channel discharge and ignition characteristics

方案	PI/ μ s	PN	ϕ
放电	50, 60, 70	120	1.0
试验	50	100, 110, 140, 160, 180	1.0
点火	50	100~210	1.0
试验	60	100~200	1.0
	70	100~180	1.0

电压和电流的测量探头及同轴电缆会造成测量信号传输延迟,使测得的电压、电流信号存在数个纳秒的时间差^[22]。由于纳秒脉冲放电的时间尺度在几百纳秒,单个放电脉冲的能量一般在几毫焦左右,所以数个纳秒的时间差会使计算的放电能量出现较大的偏差,需要对测得的电压电流数据进行同步处理。本文采用的同步方法如下:用高压脉冲电源激励高压陶瓷电容,根据式(1)计算流过电容的电流:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$
 (1)

式中:C为高压陶瓷电容的容值; u_c 为测得的电容电压。

将电容两端测得的电压作为输入,根据式(1)获得理论计算电流值。然后,将计算电流值与测得的电流信号进行对比,获得计算电流与测得电流的时间差,如图2所示。本文所用测试系统电压滞后电流约2 ns,后文的测试结果及能量计算都采用这一时间差进行校正。

根据式(2)将电压、电流信号乘积值进行积分求得脉冲放电能量 E_p :

$$E_p = \int_0^t u \cdot i dt$$
 (2)

将高速相机拍摄的彩色图像转换为灰度图可以提高火核的辨识度,如图3所示。采用Python opencv 图像处理库中的Canny算子对火焰轮廓进

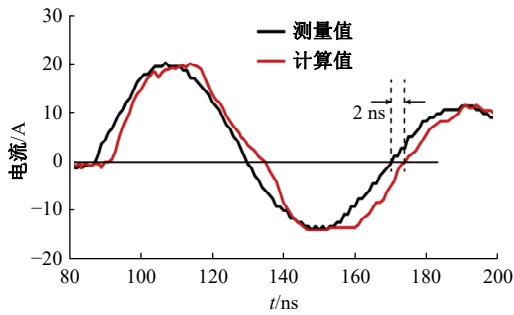


图2 电容充放电电流的测量值与计算值对比

Fig. 2 Comparison between measured and calculated values of capacitor charging and discharging currents

行识别,如图3(c)所示,轮廓识别效果较好。由图3可知,高频nSDBD点火的火焰形状与传统火花塞点火的球形火焰差别较大,能同时形成多个不规则形状的火核,且不同工况下的总体火焰面积差别很大。为了讨论不同工况下的燃烧速度,将多个火核的总火焰面积对应的当量半径 R_f 作为评价指标。 R_f 根据式(3)以火焰图像识别的面积进行计算:

$$R_f = \sqrt{\frac{S_{f_pix}}{\pi} \cdot \frac{L_{ref}}{L_{pix}}} \quad (3)$$

式中: S_{f_pix} 为火焰轮廓包围的像素面积; L_{ref} 和 L_{pix} 分别为参照物的物理尺寸及对应像素值。

选取定容燃烧弹40 mm的内径作为参照物,其对应的像素约570个。Canny算子识别火焰轮廓产生的误差为1个像素点^[23],对应的实际误差约0.07 mm。计算的初始火核当量半径最小在1.5 mm左右,因此,Canny算子识别火焰轮廓产生的最大相对误差为4.7%。

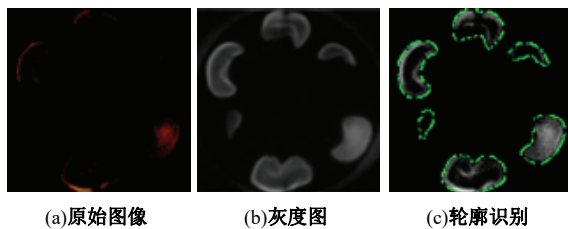


图3 图像处理流程

Fig. 3 Image processing workflow

利用测得的压力数据,根据式(4)和式(5)计算出代表性放热率(Representative heat release rate, RHRR)及归一化累计放热(Normalized cumulative heat release, NCHR)^[14]:

$$RHRR = \frac{dP_{in-chamber}}{dt} \quad (4)$$

$$NCHR = \frac{\int_{t_0}^t RHRR dt}{\int_{t_0}^{t_{peak}} RHRR dt} \quad (5)$$

式中: $P_{in-chamber}$ 为燃烧压力值; t_0 为脉冲放电触发时刻; t_{peak} 为压力到达峰值的时刻。

将NCHR从0%到10%所对应的时间长度定义为FDT(Flame development time);将NCHR从10%到90%所对应的时间长度定义为FRT(Flame rise time)^[14],如图4所示。每个工况点进行3次试验,据此得到FDT及FRT的平均值与标准偏差^[21]。

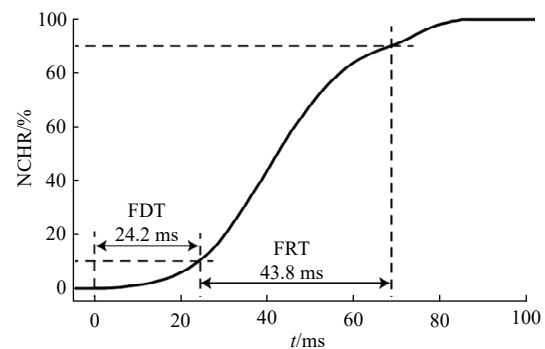


图4 燃烧过程特征参数FDT与FRT (PI=50 μs, PN=180, 初始压力0.1 MPa, $\phi=1.0$)

Fig. 4 Characteristic parameters of the combustion process: FDT and FRT (PI=50 μs, PN=180, initial pressure of 0.1 MPa, $\phi=1.0$)

2 试验结果分析

2.1 NH₃/空气混合气中高频nSDBD的放电特性

图5为NH₃/空气混合气中高频nSDBD多流注放电图像,相机拍摄参数为666 FPS,曝光时间为1 501 μs。相比于单个放电脉冲激励SDBD产生的准均匀弥散放电模式,高频nSDBD产生的放电丝数量更少且更加集中,这有利于单个放电通道的能量累计。多个放电丝从顶部电极的边缘沿着绝缘介质表面向外发展,其中亮度较高的10个放电丝长度相近,沿圆周分布均匀。亮度较高的放电丝长度几乎覆盖整个绝缘介质表面,其尖端向外发展的同时生出多个分枝。

图6为NH₃/空气混合气中高频nSDBD单个脉冲的放电丝发展过程,高速相机拍摄参数为20 000 FPS,单张照片曝光时间为50 μs。从图6中可以看出第1个脉冲能产生多达22个长度较短的放电丝,随着脉冲数的增加,单个放电丝的长

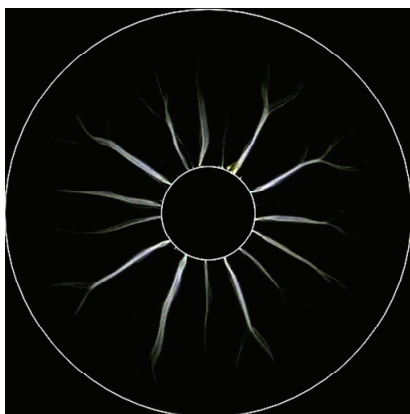


图5 NH₃/空气混合气中高频重复 nSDBD 多流注放电图像 (PI=50 μs, PN=30)

Fig. 5 High-frequency repetitive nSDBD multi-filament discharge images in NH₃/air mixture (PI=50 μs, PN=30)

度逐渐增加且亮度逐渐提高,放电丝的数量逐渐减少。当脉冲数达到9个后,放电丝的数量和长度趋于稳定。这表明NH₃/空气混合气中,持续的放电脉冲能够增强后续的放电过程。产生这种现象的主要原因是放电的记忆效应,前一个放电脉冲释放的热量和产生的活性粒子及电荷有较长的弛豫时间,当脉冲间隔小于其弛豫时间时,后续的脉冲将得到增强。

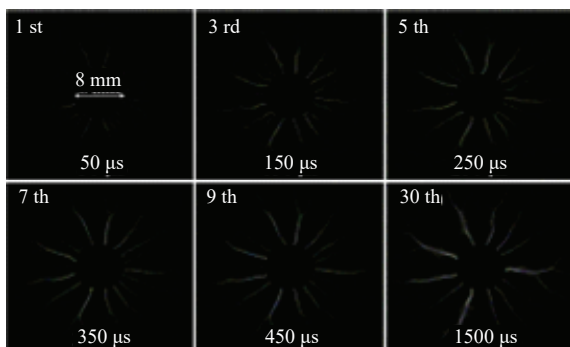


图6 高频nSDBD单个脉冲放电丝发展图像 (PI=50 μs, PN=40, NH₃/空气混合气中)

Fig. 6 Images of the development of single-pulse discharge filaments in high-frequency nSDBD (PI=50 μs, PN=40, in NH₃/air mixture)

放电丝的数量及长度对火核的形成有较大的影响,图7和图8分别显示了不同脉冲间隔下放电丝的长度和数量随放电脉冲数变化的图像。在图7中,不同脉冲间隔下放电丝的长度都随着脉冲数的增加而增加,当脉冲数达到10左右时,放电丝长度趋于稳定。当PI=50 μs和60 μs时,放电丝的增长速度和稳定长度差别不大,这说明在

NH₃/空气混合气中较小的脉冲间隔差别对放电的记忆效应影响不明显。当PI达到70 μs时,放电丝长度的增长速率和稳定长度都低于PI=50和60 μs,脉冲间隔增大到一定程度后,放电的记忆效应开始减弱。在图8中,不同脉冲间隔下放电丝的数量都随着脉冲数的增加先减少,然后趋于稳定,放电丝的数量最后稳定在12个左右。

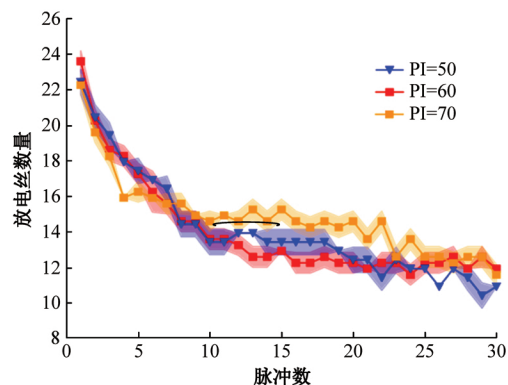


图7 高频nSDBD放电丝数量随放电脉冲的变化 (PI=50 μs, NH₃/空气混合气中)

Fig. 7 Variation of filament count with discharge pulses in high-frequency nSDBD (PI=50 μs, in NH₃/air mixture)

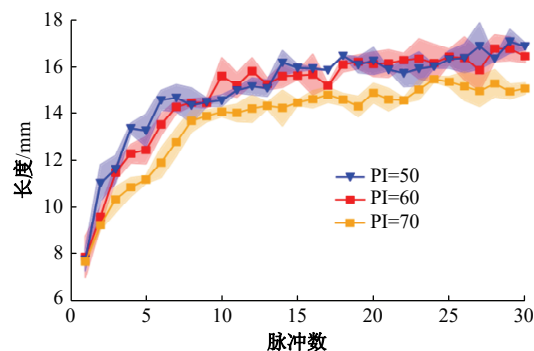


图8 高频nSDBD放电丝长度随放电脉冲数的变化 (PI=50 μs, NH₃/空气混合气中)

Fig. 8 Variation of discharge filament length with the number of discharge pulses in high-frequency nSDBD (PI=50 μs, in NH₃/air mixture)

图9为高频nSDBD 30个脉冲的电压、电流和能量曲线。随着脉冲数的增加,放电能量逐渐累积,放电电压在第5个脉冲后趋于稳定。图10为高频nSDBD单个脉冲的电压、电流、功率和能量典型波形。由图10可见,在脉冲电压的上升沿和下降沿都有放电电流,这说明两个阶段都发生了放电。在上升沿阶段:电压驱动整个放电过程,电流随着电压的升高而增大,电流与电压波形方向相同。下降沿阶段:上升沿放电阶段在绝缘介质表面留下的

残余电荷在电压下降时引起第二次放电,电流与电压波形方向相反^[24]。电流峰值绝对值接近 20 A,放电瞬时功率峰值接近 80 kW。SDBD 是容性负载,而电容的充放电过程不产生有效功。因此,能量波形达到峰值(约 8 mJ)后有一段下降过程,最终能量稳定在 7 mJ 左右。根据电压波形,选取放电持续时间为 200 ns,计算放电的平均功率约为 35 kW,有效平均电流值约为 2.3 A,远高于常规火花放电的辉光电流(约 100 mA)^[25]。

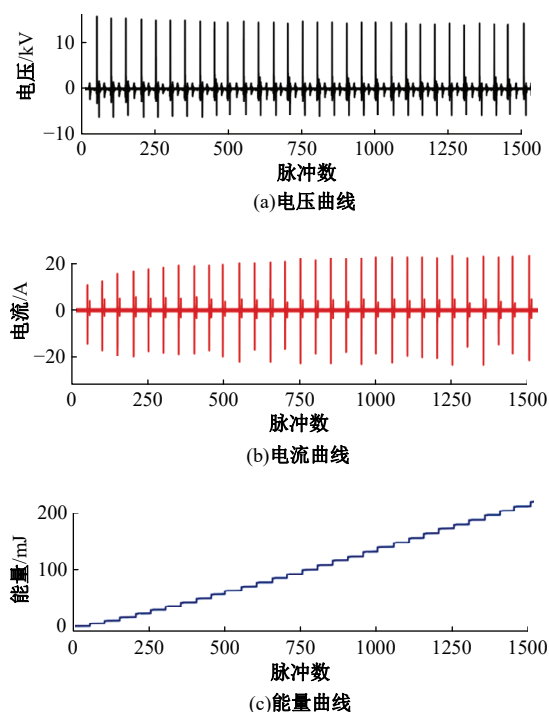


图 9 高频 nSDBD 电压、电流和能量曲线 ($PI=50 \mu s$, $PN=30$, NH_3 /空气混合气中)

Fig. 9 Voltage, current, and energy curves of high-frequency nSDBD ($PI=50 \mu s$, $PN=30$, in NH_3 /air mixture)

图 11 为高频 nSDBD 单脉冲放电能量随脉冲数的变化规律。如图 11 所示,随着脉冲数的增加单个放电脉冲能量先逐渐增大,然后趋于稳定。 $PI=50 \mu s$ 时,单个放电脉冲能量的初始值约为 4.3 mJ,单个脉冲放电能量稳定后约为 8 mJ,单个脉冲放电能量增加了 1.8 倍。随着 PI 的增加,放电记忆效应减弱,单个脉冲放电能量的增长速率降低,单个脉冲放电能量稳定后的值降低。 $PI=75 \mu s$ 时,单个脉冲放电能量稳定阶段约 6.2 mJ。

图 12 为高频 nSDBD 累计能量特性。如图 12 所示, $PI=50 \mu s$ 时,高频 nSDBD 在 1.5 ms 的时间内释放了约 210 mJ; $PI=70 \mu s$ 时,30 个脉冲在

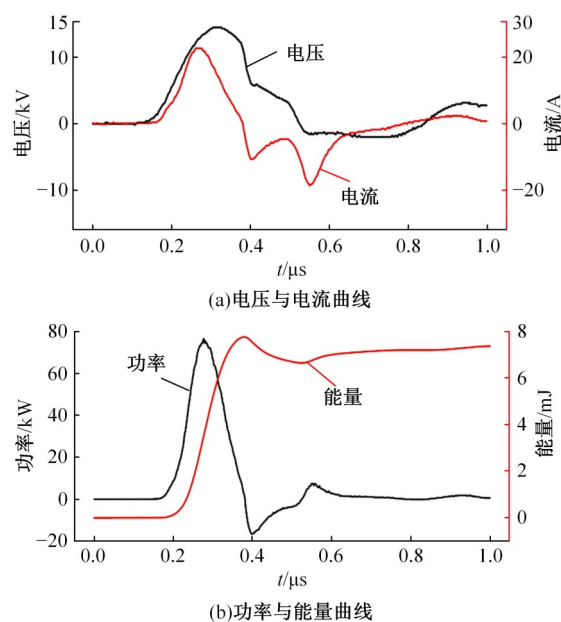


图 10 高频 nSDBD 单个脉冲电压、电流、功率和能量典型曲线 ($PI=50 \mu s$, NH_3 /空气混合气中)

Fig. 10 Typical curves of voltage, current, power, and energy for individual pulses in high-frequency nSDBD ($PI=50 \mu s$, in NH_3 /air mixture)

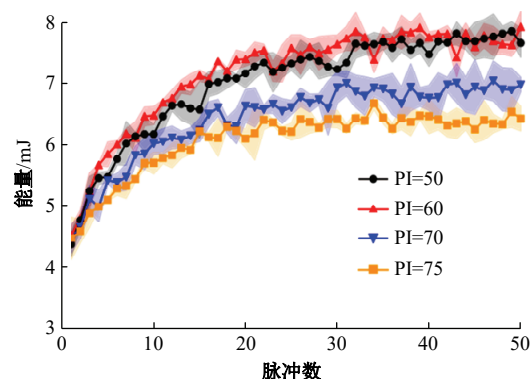


图 11 高频 nSDBD 单脉冲放电能量特性 (NH_3 /空气混合气中)

Fig. 11 Energy characteristics of single-pulse discharge in high-frequency nSDBD (in NH_3 /air mixture)

2.1 ms 时间内仅释放了约 180 mJ,放电的平均功率明显降低。

2.2 放电参数对 NH_3 /空气混合气点火过程的影响

图 13 是 NH_3 /空气混合气中不同脉冲间隔下高频 nSDBD 的火核发展过程,高速相机拍摄参数 2 500 FPS,每张照片的曝光时间为 0.4 ms,高速相机在高频 nSDBD 第 1 个放电脉冲开始时刻被触发。 $PI=50/60/70 \mu s$ 时,在放电结束时刻都形成了环绕顶部电极分布的多个初始火核。 NH_3 /空气混合气的初始火核距离顶部电极边缘

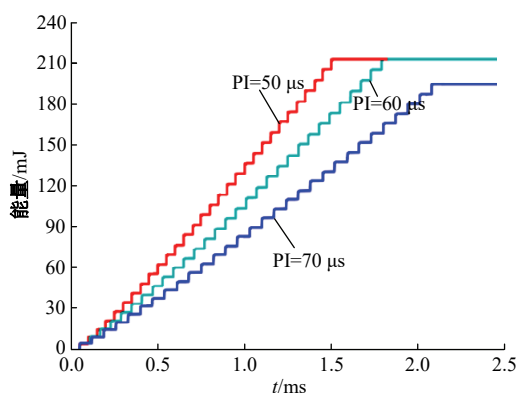


图 12 高频 nSDBD 累计能量特性 (PN=30, NH₃/空气混合气中)

Fig. 12 Accumulated energy characteristics of high-frequency nSDBD (PN=30, in NH₃/air mixture)

较远,这与 Zhao 等^[20]在 C₃H₈/空气混合气中初始火核靠近顶部电极边缘分布的情况相差较大。主要原因是高频 nSDBD 会产生沿绝缘介质表面向外的气流扰动,形成的初始火核被气流向外推动,由于 NH₃/空气混合气的最小点火能量大且燃烧速度慢,放电促进初始火核沿放电丝方向发展的速度低于气流将火核向外推动的速度,因此,初始火核逐渐偏离顶部电极边缘。比较 PI=50 μs 和 PI=60 μs 时,随着脉冲间隔增大,放电结束时刻的初始火核面积相差较小,PI=60 μs 时总体火核面积稍大。当 PI=70 μs 时,由于放电间隔较大,放电的记忆效应减弱,放电促进初始火核的增长效果变弱,所以放电结束时刻的初始火核面积急剧缩小。放电结束后,PI=50 μs 和 PI=70 μs 工况下初始火核面积出现了逐渐减小的情况,甚至初始火核逐渐消失,而 PI=60 μs 时,初始火核面积基本没有出现减小的趋势。造成这种现象主要有两个方面的原因:第一个是 NH₃/空气混合气的燃烧速度慢,当初始火核较小时,燃烧放热速率低于火焰向外的传热速率,火核难以维持;第二个原因是放电会形成向外的气流扰动,当脉冲间隔较小时,形成的气流强度较大,加快了火核的传热速率,甚至将火核吹灭。因此,放电结束后的稳定火核数量随着脉冲间隔的增大呈现先增大后减小的趋势,PI=50 μs 有 2 个稳定火核,PI=60 μs 有 5 个稳定火核,PI=70 μs 仅有 1 个稳定火核。因此,对于 NH₃/空气混合气,高频 nSDBD 的放电间隔对初始火核的分布及火核的发展有显著影响。

图 14 为不同放电脉冲数下火核的发展过程。PI=50 μs 时,100 个脉冲能产生 4 个初始火核,形

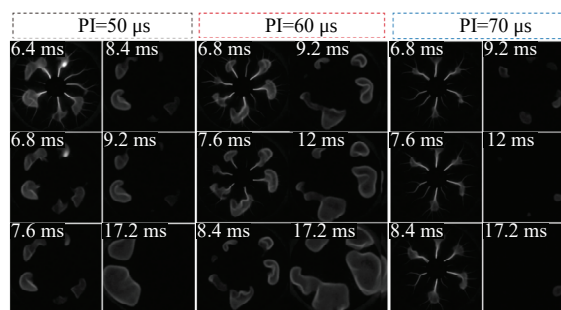


图 13 不同脉冲间隔下火核的发展过程 (PN=120, NH₃/空气混合气中)

Fig. 13 Development process of kernels under different pulse intervals (PN=120, in NH₃/air mixture)

成 1 个稳定火核;110 个脉冲时,稳定火核数量增加到 2 个;进一步增加放电脉冲数至 180,能形成 6 个稳定火核。

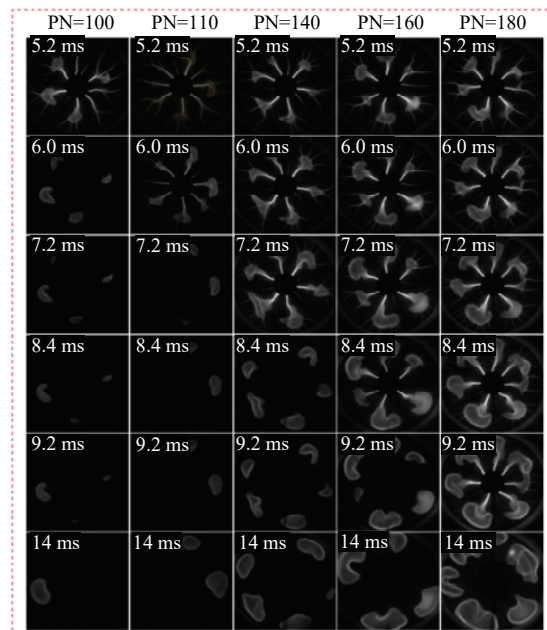


图 14 不同脉冲数下火核的发展过程 (PI=50 μs, NH₃/空气混合气中)

Fig. 14 Development process of kernels under different pulse numbers (PI=50 μs, in NH₃/air mixture)

图 15 对比了 NH₃/空气混合气中不同放电间隔下火核半径的变化规律。PI=50/70 μs 时,由于初始火核前期的消散,火核半径出现了先减小后增加的趋势,这与火核发展图像相对应。PI=50 μs 火核半径前期下降速度比 PI=70 μs 慢,这是因为 PI=50 μs 形成的初始火核比 PI=70 μs 大,单个初始火核的放热速率较大。PI=60 μs 时,火核半径前期下降趋势不明显,火核半径随着时间的延长逐渐增大。由于 PI=60 μs 的稳定火

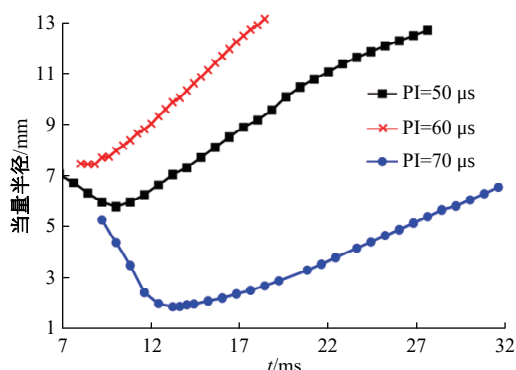


图 15 不同脉冲间隔下火核半径的发展过程 (PN=120, $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气中)

Fig. 15 Development process of kernel radius under different pulse intervals (PN=120, in NH_3/air mixture)

核最多且初始火核半径较大,其火核半径的增长速率最大,PI=70 μs 的火核半径增长速率最小。

图 16 为 $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气中不同脉冲数下火核半径的发展过程。PI=50 μs 时,随着脉冲数增加,放电结束时刻的初始火核半径增大,稳定火核数量增加,火核半径前期下降的趋势逐渐消失。随着脉冲数的增加,火核半径的增长速率变化较小。放电脉冲数的增多使初始火核半径急剧增大,PN=180 时,初始火核半径达到 11 mm,PN=100 时初始火核半径仅 5 mm,两种工况的初始火核半径相差 2.2 倍。这说明调节放电脉冲数可以方便地调节 $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气初始火核半径。

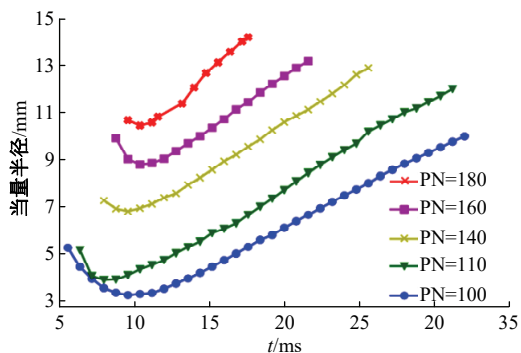


图 16 不同脉冲数下火核半径的发展过程 (PI=50 μs , $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气中)

Fig. 16 Development process of kernel radius under different pulse numbers (PI=50 μs , in NH_3/air mixture)

2.3 放电参数对氨气/空气混合气燃烧参数的影响

图 17 和图 18 显示了 $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气中不同放电参数下燃烧特征参数 FDT 和 FRT 的变化规律。总体上看,放电参数主要对 FDT 有较大的

影响,对 FRT 的影响相对较小。由图 17 可以看出,不同脉冲间隔下 FDT 都随着脉冲数的增加而降低。PI=50 μs 时,PN=100 的 FDT=55 ms,PN=180 的 FDT=25 ms,FDT 减少了 30 ms,缩短了约 55%。当 PI=50 μs 且脉冲数达到 180 时,继续增加脉冲数对 FDT 的影响减小,FDT 的变化较小。根据图 13 可知,当脉冲数小于 180 时,随着脉冲数的增加,形成的初始火核半径增大且稳定火核增多,因此,FDT 下降速度较快;当脉冲数达到 180 时,已经形成了环绕定容燃烧弹边缘一周的初始火核且初始火核半径较大,所有初始火核均能稳定自持,继续增加放电脉冲无法进一步形成新的稳定火核,因此,后续的放电脉冲对 FDT 的影响较小。PN=100 时,PI=60 μs 的 FDT=38 ms,PI=70 μs 的 FDT=79 ms,差别接近 41 ms,缩短了约 52%。由图 13 可知,当脉冲间隔较大时,相同放电脉冲数形成的初始火核半径减小且稳定火核数量减少,因此,当脉冲间隔大于 60 μs 时 FDT 随脉冲间隔的增大而增大。相同脉冲数下,当 PI 小于 60 μs 时,由于随着脉冲间隔增大,放电形成的气流强度减弱且初始火核半径差别较小,FDT 随脉冲间隔的增大而减小。

由图 17 可知,脉冲间隔和脉冲数对 $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气的 FDT 有显著影响。这说明调整高频 nS-DBD 放电参数可以方便地控制 $\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气点火过程。对于燃烧控制而言,结合脉冲间隔和脉冲数两个放电参数,对 FDT 的影响更大,可以扩大放电参数的可调整范围。将脉冲数和脉冲间隔合理组合,有望实现更大范围内 FDT 的精确控制。

由图 18 可知,不同脉冲间隔下 FRT 随放电脉冲数的增加有较小幅度的减小。不同脉冲间隔下

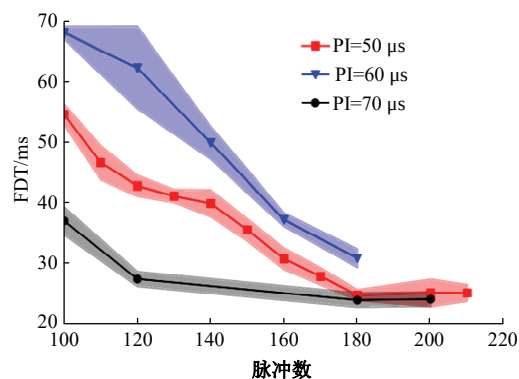


图 17 放电参数对 FDT 的影响 ($\text{NH}_3/\text{空气}$ 混合气中)
Fig. 17 Impact of discharge parameters on FDT (in NH_3/air mixture)

FRT 随脉冲数的增加而减小的速率基本相同。FRT 的缩短相比 FDT 要小很多,整体燃烧速度随着初始火核半径和稳定火核数量的增加而增大。

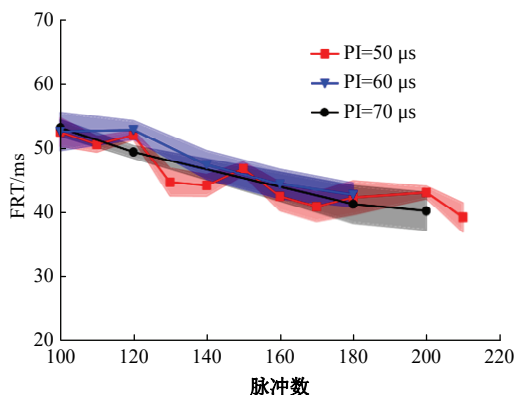


图 18 放电参数对 FRT 的影响(NH₃/空气混合气中)

Fig. 18 Influence of discharge parameters on FRT (in NH₃/air mixture)

3 结 论

(1)NH₃/空气混合气中高频 nSDBD 可以产生多个独立的放电丝,形成大面积分布的等离子体。单个放电脉冲的有效平均电流为 2.3 A,平均功率超过 35 kW,放电能量为 7 mJ 左右。随着脉冲数的增加,放电通道的长度和亮度增大,放电丝数量减少,单个脉冲的能量增加。随着脉冲间隔的增大,放电通道的长度缩短,单个脉冲的能量降低。

(2)NH₃/空气混合气中高频 nSDBD 可以形成环绕顶部电极的多个初始火核;放电结束后,初始火核出现消散的情况,甚至出现火核消失。当 PI 小于 60 μs 时,随着脉冲间隔增大,初始火核当量半径几乎不变,稳定火核数量增加;当 PI 大于 60 μs 时,随着脉冲间隔增大,初始火核当量半径减小,稳定火核数量减少;不同脉冲间隔下,随着脉冲数减小,稳定火核数量减少。

(3)放电间隔和放电脉冲数对 FDT 有较大的影响,最大差别为 30 ms,缩短了约 55%;放电参数对 FRT 的影响相对较小。FDT 随着放电脉冲数的增加先减小,然后趋于稳定。相同放电脉冲数下以放电间隔 60 μs 为基准,增加和减少放电间隔都会使 FDT 增加。

参考文献:

[1] 中国内燃机工业协会. 内燃机产业高质量发展规划(2021—2035)(缩略版)[N]. 中国工业报, 2021-12-14

(006).

- [2] 帅石金, 王志, 马骁, 等. 碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(4): 417-439.
- Shuai Shi-jin, Wang Zhi, Ma Xiao, et al. Low carbon and zero carbon technology paths and key technologies of ICEs under the background of carbon neutrality[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2021, 12(4): 417-439.
- [3] Kojima Y. High purity hydrogen generation from ammonia[J]. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 2017, 254: No. 163.
- [4] Valera-Medina A, Xiao H, Owen-Jones M, et al. Ammonia for power[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 69: 63-102.
- [5] Valera-Medina A, Marsh R, Runyon J, et al. Ammonia-methane combustion in tangential swirl burners for gas turbine power generation[J]. Applied Energy, 2017, 185: 1362-1371.
- [6] 周上坤, 杨文俊, 谭厚章, 等. 氨燃烧研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4164-4182.
- Zhou Shang-kun, Yang Wen-jun, Tan Hou-zhang, et al. Research progress of ammonia combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4164-4182.
- [7] Chen Z, Ju Y. Theoretical analysis of the evolution from ignition kernel to flame ball and planar flame[J]. Combustion Theory and Modelling, 2007, 11(3): 427-453.
- [8] Chen Z, Burke M P, Ju Y. Effects of Lewis number and ignition energy on the determination of laminar flame speed using propagating spherical flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 1253-1260.
- [9] Chen Z, Burke M P, Ju Y. On the critical flame radius and minimum ignition energy for spherical flame initiation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1218-1226.
- [10] Zheng M, Chen G Y, Tong J, et al. Spark-based advanced ignition control for future diluted gasoline engines[C]//Ignition Systems for Gasoline Engines: 4th International Conference, Berlin, Germany, 2018: 1-25.
- [11] Lu H, Li L, Liu Y, et al. An ultra-high power ignition system for EGR-diluted GDI engine[C]//Proceedings of SAE-China Congress, Shanghai, China, 2017:197-206.
- [12] Wildfire P E, Nawrocki A J, Pertl F A, et al. Investigation of cold start capability of a Briggs and Strat-

- ton engine using jet a fuel and microwave plasma ignition[C]//SAE Technical Paper, 2009-1057.
- [13] Wang Z, Huang J, Wang Q, et al. Experimental study of microwave resonance plasma ignition of methane-air mixture in a constant volume cylinder[J]. *Combustion and flame*, 2015, 162(6):2561-2568.
- [14] Hwang J, Bae C, Park J, et al. Microwave-assisted plasma ignition in a constant volume combustion chamber[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 167: 86-96.
- [15] Toedter O, Heinz A, Disch C, et al. Comparing visualization of inflammation at transient load steps comparing ignition systems[C]//Ignition Systems for Gasoline Engines, Berlin, Germany, 2017:190-203.
- [16] Qiu J, Zhang C, Liu Z, et al. Propagation of ionization waves in nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in atmospheric air[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2018, 46(6): 1943-1950.
- [17] Stepanyan S A, Starikovskiy A Y, Popov N A, et al. A nanosecond surface dielectric barrier discharge in air at high pressures and different polarities of applied pulses: transition to filamentary mode[J]. *Plasma Sources Sci Technol*, 2014, 23(4):No. 045003.
- [18] Anokhin E M, Kuzmenko D N, Kindysheva S V, et al. Ignition of hydrocarbon: air mixtures by a nanosecond surface dielectric barrier discharge[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2015, 24(4): No. 045014.
- [19] Boumehdi M A, Stepanyan S A, Desgroux P, et al. Ignition of methane-and n-butane-containing mixtures at high pressures by pulsed nanosecond discharge[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(4): 1336-1349.
- [20] Zhao Q, Xiong Y, Yang X, et al. Experimental study on multi-channel ignition of propane-air by transient repetitive nanosecond surface dielectric barrier discharge[J]. *Fuel*, 2022, 324:No. 124723.
- [21] 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 Qing-wu, 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.
- [22] Lin B, Wu Y, Zhang Z, 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.
- [23] Starikovskaia S M. Plasma-assisted ignition and combustion: nanosecond discharges and development of kinetic mechanisms[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(35):No. 353001.
- [24] He K, Pang L, Wang X, et al. A novel method of calculating the energy deposition curve of nanosecond pulsed surface dielectric barrier discharge[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2015, 24(2): No. 025034.
- [25] 陆海峰, 汪阳, 梁敬, 等. 新型两阶段点火系统对稀燃效率的影响[J]. *内燃机学报*, 2017, 35(6): 530-537.
- Lu Hai-feng, Wang Yang, Liang Jing, et al. Effect of innovative two-stage ignition system on lean burn efficiency[J]. *Transactions of CSICE*, 2017, 35(6): 530-537.