

纳秒脉冲等离子体电源设计及氨气点燃试验

荣伟新, 胡 勇, 于文斌, 赵霏阳
(山东大学 能源与动力工程学院, 济南 250061)

Design of a Nanosecond Pulsed Plasma Power Supply and Ammonia Ignition Experiment

RONG Weixin, HU Yong, YU Wenbin, ZHAO Feiyang

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

Abstract: To address the challenges of narrow ignition limits and slow laminar flame propagation speed in ammonia combustion, a high-voltage nanosecond pulsed plasma power supply was developed to achieve sustained discharge and ammonia ignition under high-pressure conditions. A dielectric barrier discharge (DBD) spark plug directly applicable to engine cylinders was designed and fabricated herein. Experimental results show that the power supply successfully achieves ammonia ignition in a 0.7 MPa environment. Comparative studies with conventional spark plugs reveal that the DBD spark plug significantly reduces ignition delay time and peak pressure arrival time, while achieving a higher peak combustion pressure. At an initial pressure of 0.7 MPa and an equivalence ratio of 0.9, the time to reach peak combustion pressure is shortened by 19.7%, and the peak combustion pressure is increased by 12.18%.

摘要: 为解决氨气点火极限范围窄和层流火焰传播速度慢的问题,开发了一种高压纳秒脉冲等离子体电源,以实现高压条件下的持续放电及氨气点火。设计和制作了一种可直接用于发动机缸内的介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)火花塞。试验结果表明,该电源在 0.7 MPa 环境下成功实现了氨气点火。与传统火花塞对比研究发现,DBD 火花塞的点火延迟时间和峰值压力到达时间显著缩短,且燃烧峰值压力更高。在 0.7 MPa 初始压力下,当量比为 0.9 时,燃烧峰值压力时间缩短 19.7%,燃烧峰值压力提升 12.18%。

关键词: 氨气;纳秒脉冲放电;动力机械工程;等离子体

Key words: ammonia; nanosecond pulse discharge; power mechanical engineering; plasma

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2025.03.006

中图分类号: TK401

0 概述

近年来,为应对温室气体减排的迫切需求,新型零碳燃料的开发已成为能源领域的研究热点^[1],在

众多候选燃料中,氨(NH_3)和氢(H_2)因其零碳排放特性展现出显著的应用潜力^[2]。虽然氢燃料具有高热值和无碳燃烧的优势,但其高挥发性导致储运过程中存在较大的安全风险^[3],且液态储存需要超低

第二十七届中国科协年会学术论文

收稿日期: 2025-04-01

修回日期: 2025-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52406145);山东省自然科学基金项目(ZR2022QE268)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (52406145); Shandong Province Natural Science Youth Fund (ZR2022QE268)

作者简介: 荣伟新(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为等离子体助燃,E-mail: wxrong@mail.sdu.edu.cn;

于文斌(通信作者),E-mail: wbyu@sdu.edu.cn。

温(20 K)或超高压(70 MPa)条件,这些技术瓶颈严重制约了其规模化应用^[4]。相较而言,氨燃料在储运安全性方面具有显著优势。其在常温条件下仅需1 MPa压力即可实现液化^[5],储存和运输难度小。并且氨作为一种常见的化工燃料,其加工和运输技术已相对成熟^[6]。在内燃机领域,NH₃具有较好的抗爆性,允许发动机在更高的压缩比下运行从而提升热效率^[7]。但是,NH₃作为燃料存在着很大的缺点,主要是可燃极限范围较窄^[8]和层流火焰传播速率低^[9]。

在过去的几十年中,非平衡等离子体已被证实可以改善发动机性能,扩大燃料的点火极限,增强燃烧稳定性及降低排放^[10]。非平衡等离子体可从热效应、活性化学效应和输运效应三个方面促进燃料的燃烧过程^[11]。

针对NH₃的可燃范围窄、火焰传播速度慢的问题,等离子体是改善这一现状的有效手段,有助于推进氨气在燃料领域的应用。

国内外研究者对纳秒脉冲产生等离子体电源开展了很多研究。文献[12]中对碳化硅SiC金属氧化物半导体场效应管(metal oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET)栅极控制回路进行设计优化,并将其应用于超快导通型SiC MOSFET,实现了导通时间的显著缩短,之后制作出了一款使用超快导通型SiC MOSFET控制的纳秒脉冲电路,可实现10 kV的纳秒脉冲输出,脉冲上升沿时间可达27 ns。文献[13]中设计了一款基于射频MOSFET的高重复频率脉冲电路,使用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)和光纤触发每一级放电管,试验结果显示电源在1 k Ω 纯阻性负载上输出频率可达1 MHz,输出电压为1.1 kV。文献[14]中结合单极性Marx电路和脉冲变压器原理,设计制造出了高压纳秒脉冲电源,其输出性能可达电压21 kV、频率16 kHz,整机效率高于80%。文献[15]中基于脉冲变压器和磁压缩原理,制造出了一款可实现10 kV、16 kHz的纳秒脉冲电源,在定容弹内点燃了甲烷与空气的混合物,试验结果显示提高纳秒脉冲重复频率可有效缩短点火延迟时间。目前针对纳秒脉冲电源的研究,因应用领域不同而呈现出不同走向。就氨气点火这一特定方向而言,氨气本身点火能量偏高,当涉及较高压力环境时,现有的纳秒脉冲电源性能难以适配,无法满足点燃氨气的实际需求。

国外针对纳秒脉冲电源性能的研究较少,并且更关注于在原理结构上的创新。例如,文献[16]研

究中努力减少电路中的元器件数量,在电路不连续导电的情况下,其拓扑在产生双极性脉冲的同时减少了传递损耗,进而提升了电路的传递效率,但制造出的样机性能较低,输出电压为1 kV。文献[17]中采用了无需脉冲变压器的设计方案,显著降低了电路的复杂程度,通过利用电路中的电感和介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)中的固有电容进行谐振升压,实现了系统参数的协同利用,最终实现在15 kHz的频率下输出电压12 kV峰值的纳秒脉冲。

由于DBD型火花塞应用潜力大,近年来研究者们对其展开了较多研究。文献[18]中在快速压缩膨胀机上使用12 kV、9.5 kHz的正弦交流电搭载DBD型火花塞进行助燃,结果显示加入DBD型火花塞后,汽油燃烧时的震荡幅度减少,其爆震指数下降了约71%,有望减少内燃机中的爆震。文献[19]中使用40 kHz、35 kV的正弦交流电压驱动DBD火花塞在快速压缩膨胀机中点燃甲烷和空气的混合气,初始进气压力为0.15~0.20 MPa,结果表明DBD火花塞的点火延迟时间较普通火花塞更长,并未起到良好的效果。文献[20]中在定容弹中进行0~0.50 MPa初始环境压力下,DBD型火花塞点燃甲烷/空气混合物的试验研究,结果表明等离子体放电丝和放电流光会随着初始环境压力的增加而减少,在脉冲频率为910 kHz时出现了最小点火能量,高于或低于此频率都会导致点火能量的增加。但是,目前的研究对于DBD型火花塞直接点燃氨气的研究较少,且电极的击穿机制会随着初始压力的增加发生巨大变化^[21],因此有必要展开DBD火花塞点燃氨气的研究,并且尽可能提高点燃初始压力。

等离子体是物质的第四态,其中包含许多高能电子、离子和自由基。在纳秒脉冲放电过程中,会产生活性自由基(OH、O、H)和离子(O₂⁺、N₂⁺),可以加速或产生新的化学反应链^[22]。文献[23]中研究发现在纳秒脉冲放电过程中会发生电子的碰撞、解离和电离过程,与此同时激发态、自由基和电极均呈指数级增长,在等离子体点燃氨气的过程中,与OH有关的反应,如 $H+O_2=O+OH$, $NH_2+NO=NNH+OH$ 和 $NH+O_2=NO+OH$ 反应对NH₃燃烧有较大的促进作用。文献[24]等离子体点燃氨气的动力学研究中发现,电子碰撞激发与电子激发的原子和分子(N₂(B)、N₂(C)和O(1D))的快速弛豫淬灭相结合,其促进了燃料初始燃烧。文献[25]中在定容弹中进行了微波辅助等离子体点火的试验研究,结果表明在初始环境压力为0.1 MPa下,微波辅助等离

子体点火可使稀燃点火极限由当量比为 0.6 扩展到 0.5,并且微波辅助等离子体点火后的火焰速度提升了 20%。总之,非平衡等离子体已被证明可以改善燃烧及加速燃料燃烧过程。

综上所述,目前已有研究中的纳秒脉冲电源可能存在频率或者电压不符合发动机缸内点燃氨气的问题,且之前针对于 DBD 型火花塞的研究大多集中于含碳燃料,且局限于较低初始环境压力下。而氨气点火能量高,并且随着初始环境压力的增加,其点火所需能量随之增加,因此开发设计一款符合发动机缸内点燃氨气的纳秒脉冲电源是必要的。在本研究中,针对氨气点火能量较高的问题,通过融合全桥电路、谐振理论、脉冲变压器原理及磁压缩理论,创新性地通过控制输出频率与谐振电路的谐振,成功实现了 25 kV 电压、120 kHz 频率的双极性脉冲稳定输出,并可实现电压和频率的大范围调节,这一输出性能在当前同类研究中达到了较高水准。经试验验证,本研究中的纳秒脉冲电源能够在 0.7 MPa 的初始压力条件下点燃氨气,可为氨燃料在发动机工况下的实际应用提供有力支持。

1 双极性纳秒脉冲等离子体电源设计

1.1 系统整体设计

图 1 为纳秒脉冲电路的整体设计图。使用 5 V 直流电源给单片机供电,将控制代码写进单片机中,单片机产生脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM),之后再通过绝缘栅双极型晶体管(insulated

gate bipolar transistor, IGBT)驱动电路升压,产生正向 15 V、负向 5 V 的 PWM 控制波,控制逆变转化电路中的 IGBT 通断。使用 350 V 的中压直流电源供电,中压直流电源通过逆变转化电路变为双极性脉冲后,再通过脉冲变压器和磁压缩模块变为双极性纳秒脉冲,最终输出到负载端。

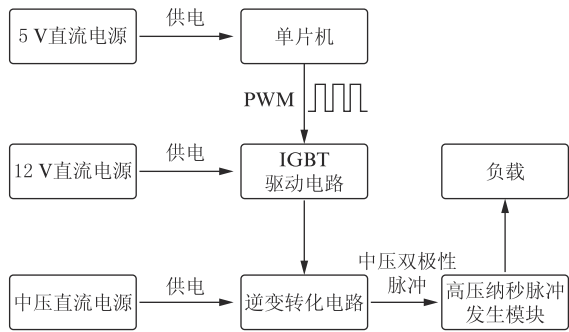


图 1 双极性脉冲电源整体设计图

Figure 1 Schematic diagram of the bipolar pulse power supply

1.2 纳秒脉冲电路原理

图 2 为放电正极性放电阶段的电流路径,该双极性脉冲电源的正极性放电过程通过精确控制绝缘栅双极晶体管(IGBT)的通断时序实现。当控制信号触发 IGBT1 与 IGBT4 导通同时 IGBT2 和 IGBT3 保持关断时,直流母线电压通过全桥逆变电路形成正极性输出。反之,通过切换 IGBT2、IGBT3 导通与 IGBT1、IGBT4 关断,即可实现负极性输出。图中,DC 为直流电源(direct current),MS 为磁开关(magnetic switch),C1~C4 为电容,L1、L2 为电感,R1 为电阻。

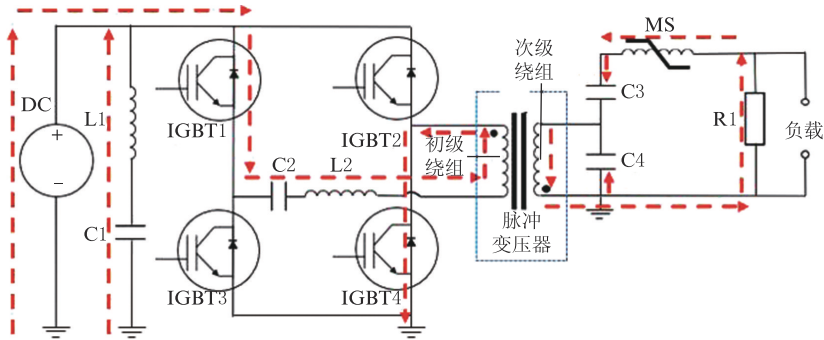


图 2 双极性脉冲电源的正极性脉冲输出时的放电电流路径

Figure 2 Discharge current path during positive-polarity pulse output of the bipolar pulse power supply

在逆变转换阶段,DC 的电流、电容 C1 和电感 L1 储存的电流依次流经储能电容 C2 和电感 L2。其中电路中的电容和电感构成串联谐振回路。当逆变器输出频率与该回路的固有谐振频率匹配时,可通过谐振升压原理实现电压的提升。串联谐振电路频率公式如式(1)所示。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

式中, L 为电路中电感; C 为电路中电容。

当通过代码控制 IGBT 的开关频率与串联谐振频率相同时,会提升变压器初级测电压,之后再经过脉冲变压器与磁压缩电路,带来输出电压的大幅度

提升。当 IGBT 开关频率与串联谐振频率相差较大时,此时电路中的总阻抗会增加,导致变压器初级测电压变小,显著影响电源输出。在试验过程中,可以通过谐振电感、谐振电容与频率的相互配合,实现频率和电压输出的数值调节。

试验中通过谐振和 IGBT 将输入的 350 V 直流电压转换为幅值约 700 V 的双极性脉冲,该设计通过调节开关频率实现了高效的电压增大。

随后,脉冲变压器通过电磁耦合将能量传递至磁压缩电路。初始阶段 MS 处于非饱和状态,呈现高阻抗断路特性。通过磁开关设计,使脉冲变压器次级绕组的电压达到磁芯饱和阈值时,磁开关进入饱和状态,此时相当于通路状态,与此同时电容 C4 与脉冲变压器漏感形成高频谐振回路。在谐振过程中,正负交替的正弦电压波形被叠加至负载端。值得注意的是,初始负向电压尖峰会首先作用于磁开关,其伏秒容量迅速累积至磁芯反向饱和阈值,使脉冲变压器发生反向饱和,此时储能电容 C3 开始充电。

随着谐振电压波形由负转正,磁开关退出饱和状态,重新呈现高阻抗特性,储能电容 C3 停止充电。当谐振正向电压幅值达到磁芯正向饱和阈值时,磁开关再次导通,此时 C3 和 C4 的储能通过磁开关同步释放。由于两电容采用串联结构,输出电压达到单电容储能的两倍,实现了二次电压增加。

1.3 纳秒脉冲电路关键参数计算

1.3.1 脉冲变压器设计

脉冲变压器磁芯选择闭合环形磁芯,相较于矩形磁芯,环形磁芯的漏感更少,更容易饱和,可以提高能量传输效率和减少传输时间,并且拥有更优秀的输出特性和抗干扰能力。为避免在能量转移完成前,脉冲变压器提前饱和,因此脉冲变压器的伏秒级应该满足式(2)。

$$\int_0^{t_m} u_{C4}(t) dt \leq B_m N_2 S k_{PT} \quad (2)$$

式中, u_{C4} 为电容 C4 两端电压; t 为充电时间; t_m 为单个脉冲时间; B_m 为材料的最大磁感应强度摆幅; N_2 为脉冲变压器次级绕组; S 为脉冲变压器截面积; k_{PT} 为脉冲变压器磁芯的填充系数。

结合电压 u_{C4} 的表达式(式(3))和再结合能量变化比(式(5)),可以得出式(6)。

$$u_{C4}(t) = \frac{U_{DC} C_0}{n \cdot C_4} (1 - e^{-\alpha t} \cos \omega_1 t) \quad (3)$$

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{2n^2 C_4} \quad (4)$$

$$n_a = \frac{4C_0}{nC_4} \left(1 - \frac{\pi R_s}{4} \sqrt{\frac{C_0}{L_s}} \right) \quad (5)$$

$$S \geq (U_{DC} C_0 / n \cdot C_4) \cdot (N_2 B_m k_{PT})^{-1} \cdot \left\{ t_m + \frac{e^{-\alpha t} [\alpha \cos(\omega_1 t) - \omega_1 \sin(\omega_1 t)]}{\alpha^2 + \omega_1^2} \right\} \quad (6)$$

式中, U_{DC} 为直流输入电压; n 为脉冲变压器变比; ω_1 为电路谐振频率; α 为电路衰减常数; n_a 为能量变化比; R_s 为导线中的杂散电阻; L_s 为杂散电感; C_0 为电路中 C1、C2、C3 和 C4 在变压器初级的等效电容值; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别为 C1、C2、C3、C4 电容的电容值。式(6)即为脉冲变压器的截面积需要满足的条件。

最终选择变压器参数如下:外径为 63 mm,内径为 50 mm,高度为 25 mm,材料为铁基纳米晶。脉冲变压器的绕组选择使用漆包线,在磁芯绕制上选用交错绕制法,这种绕制方法可有效降低磁芯损耗,提升能量传输效率。

1.3.2 磁开关设计

由之前的原理分析可知,电容 C3 和 C4 电压叠加可得到最大电压输出,忽略谐振过程中的能量损耗,则有:

$$\int_0^{t_r} U_{\max} + u_{C4}(t) dt = B_m N_3 S_{MS} k_T \quad (7)$$

式中, t_r 为脉冲上升沿时间; U_{\max} 为脉冲电压峰值; N_3 为磁开关的绕线线圈数量; S_{MS} 为磁开关磁芯的截面积; k_T 为磁开关磁性的填充系数。结合复频域分析,可得出式(8)。

$$B_m N_3 S_{MS} k_T = \frac{4C_0 U_{DC} \sqrt{L_{3s}} (3\pi + 1)}{3\sqrt{C_4} n} \quad (8)$$

式中, L_{3s} 为脉冲变压器在高压侧的杂散电感。

由式(8)可得在磁芯材料和脉冲变压器参数确定的情况下,磁开关的线圈数量与其截面积成反比。最终通过试验确定磁开关的磁芯参数为:外径为 14 mm,内径为 10 mm,高度为 5 mm,绕线 7 匝,磁芯材料为铁基纳米晶。

2 试验设置

氢-空气混合气点火及缸压采集系统如图 3 所示。

点火试验在定容弹中进行。定容弹主体由石英玻璃、法兰、弹体组成。法兰、石英玻璃和弹体之间使用高强度螺栓进行压紧固定,石英玻璃和法兰之间增加聚四氟乙烯垫片来确保密封性。定容弹弹体的周围是由三面石英玻璃和一面用来安装电极的聚

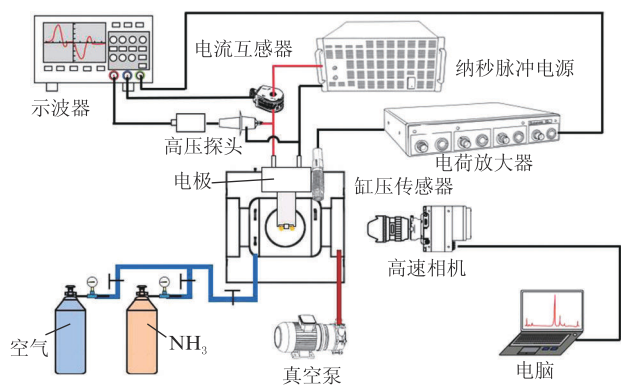


图3 氨-空气混合气点火及缸压采集系统

Figure 3 Ignition and cylinder pressure acquisition system for ammonia-air mixture

四氟乙烯组成,在弹体上留有各种气体的进口管道口和传感器安装口。

图4为本试验使用的DBD火花塞的结构示意图,为清晰展现出陶瓷层与金属丝的相对关系,将左视图简化,如图4(b)所示。本次试验使用的电极是由火花塞改装的介质阻挡放电电极,将火花塞环状螺纹切割,裸露出陶瓷层,在螺纹上使用焊锡增加三条导电金属丝,间隔 120° 。之后在导电金属丝的前方磨薄陶瓷层,以实现更大的放电强度。图5为使用电脑控制高速相机拍摄得到的放电图像。

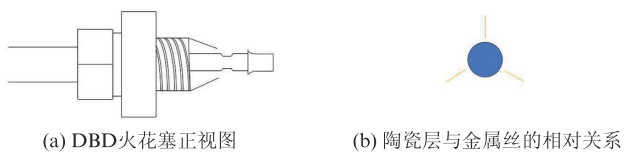


图4 DBD火花塞结构示意图

Figure 4 Schematic diagram of the DBD spark plug

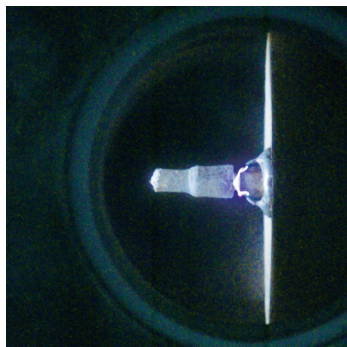


图5 DBD火花塞在常温常压下的放电图像

Figure 5 Discharge image of the DBD spark plug under ambient conditions

试验中的燃烧压力通过 AVL GH15DK 缸压传感器和 AVL 4P3x microIFEM 电荷放大器采集,纳秒脉冲放电电压使用泰克 P6015A 高压探头测得,电流使用皮尔森 2877 电流互感器测得,缸压信号、

放电电压信号和放电电流信号通过鼎阳 SDS1024 X-C 示波器采集。高速相机为 Phantom VEO 710,镜头为图丽 atx-I 100 mm F2.8 FF Macro,图像分辨率为 $512\text{ 像素}\times 512\text{ 像素}$ 。

3 试验结果与讨论

3.1 纳秒脉冲电路输出性能测试

图6为电源样机外观图。脉冲电源通过外部连接线触发单片机,之后单片机发出信号经过驱动电路开通或关断 IGBT,IGBT 按照代码相互配合即可完成脉冲输出。元器件选型如表1所示,IGBT 为核心元器件,因此在选型过程中尽量选择耐压高的型号,保证电源使用寿命。电容 C3 和 C4 工作在脉冲变压器之后,面临着 $1\times 10^4\text{ V}$ 以上的工作电压,因此应选择高压陶瓷电容。在设计过程中,考虑到 IGBT、电容等元器件在高压高频的工况下工作会产生大量的热,热量累积会造成元器件工作性能下降甚至损坏,因此在机箱内加装了用于散热的风扇,机箱前后面做了镂空处理,用于形成散热流道。



图6 纳秒脉冲电源外形图

Figure 6 External view of the nanosecond pulse power supply

表1 关键元器件规格参数

Table 1 Specifications of key components

器件	型号或规格	备注
C2	能承受 800 V 的电压,电容值为 $1\text{ }\mu\text{F}$	聚丙烯薄膜电容
C3、C4	能承受 26 kV 的电压,其电容值为 250 pF	高压陶瓷电容
脉冲变压器	外径为 63 mm,内径为 50 mm,高度为 25 mm	铁基纳米晶磁芯
磁开关	外径为 14 mm,内径为 10 mm,高度为 5 mm	铁基纳米晶磁芯
IGBT	IKW40N120CS6,可承受最高的电压和电流分别为 1.2 kV 和 80 A	—

图7为纳秒脉冲电源搭载火花塞和 DBD 形式火花塞时的放电图像。放电试验为将电极放入定容弹中,在常温常压下触发电源放电,高压探头与电极并联连接,最终放电电压波形呈现在示波器上。由图7可

以看出纳秒脉冲电源的输出频率为 120 kHz, 各个脉冲电压峰值在 23.0 kV~24.8 kV 波动, 符合设计预期。

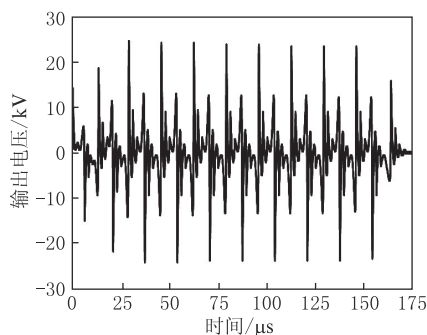


图7 纳秒脉冲电源输出性能图

Figure 7 Output performance characteristics of the nanosecond pulse power supply

3.2 点燃氨气试验

使用此纳秒脉冲电源, 设置相同的放电参数 (25 kV、120 kHz), 分别搭载普通火花塞和改装的 DBD 型火花塞在定容弹内做氨气的点燃试验。试验中使用气瓶向定容弹中先充入氨气, 后充入压缩空气。由于定容弹为定容环境, 根据道尔顿分压定律, 控制充入氨气结束时的压力和充入空气时的压力即可控制当量比。完成配气操作后, 触发电源放电, 点燃后缸压传感器会记录下缸压变化, 之后通过电荷放大器传至示波器中。

在定容弹内开展了 0.1 MPa、0.4 MPa 和 0.7 MPa 初始压力的点火试验。图 8 为普通火花塞和 DBD 型火花塞的燃烧当量比 φ 极限对比图。图 8 中使用星型点的线代表的是 0.8 当量比, 即代表两种电极的稀燃极限都为 0.8。不难看出, 在 0.1 MPa 初始压力下, 普通火花塞无法点燃氨气, 而 DBD 型火花塞可以点燃 0.8~1.0 当量比的氨气; 在 0.4 MPa 初始压力下, 普通火花塞的点火当量比极限为 0.8~1.2, 而 DBD 火花塞的点火当量比极限为 0.8~1.5; 在 0.7 MPa 初始压力下, 普通火花塞的点火当量比极限为 0.8~1.1, 而 DBD 火花塞的点火当量比极限为 0.8~1.5。主要原因是普通火花塞放电产生等离子体的通道狭窄, 并且其结构导致能量较难以扩散到周围的混合气中; 而 DBD 火花塞可在表面形成更大区域的放电, 且可直接覆盖更多混合气。

图 9 所示为 0.7 MPa 初始压力下, 当量比为 0.9~1.1 情况下的缸压对比情况, 其缸压曲线为重复 3 次试验的平均值。由于燃烧峰值压力和燃烧峰值压力时间是本次试验主要对比参数, 因此绘制出了其重复试验误差图, 如图 10 所示。由误差图可看

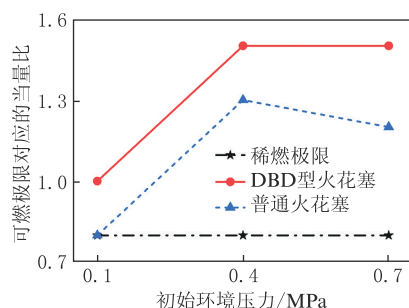


图8 普通火花塞与DBD火花塞燃烧极限对比

Figure 8 Comparison of flammability limits between conventional spark plug and DBD spark plug

出, 试验的重复性并不会影响最后的对比结果。由图 9 可以看出, 在各个当量比下, DBD 型火花塞的点火延迟期和燃烧峰值压力时刻都快于普通火花塞, 并且燃烧峰值压力在各个当量比下也都高于普通火花塞。在 0.7 MPa 初始压力下 $\varphi=0.9$ 时, 燃烧峰值压力时间缩短 19.7%, 燃烧峰值压力提升 12.18%。主要原因是由于 DBD 式火花塞的放电面积相比传统火花塞更大, 这一现象可由图 5 观察到。DBD 型火花塞在陶瓷表面形成了多个放电丝, 而传统火花塞由于结构影响只能形成单点式放电, 因此 DBD 型火花塞可以形成两个或三个火核, 并且火核的大小相较于传统火花塞的也更大; 除此之外, 纳秒脉冲放电可以对周围的流场进行扰动, 这在一定程度上加快了初始火核的传播, DBD 火花塞的构造决定了其在陶瓷周围放电, 更大的放电暴露于混合气中, 其可以形成更大流场扰动, 因此其点火延迟期和燃烧峰值压力时刻都快于普通火花塞。DBD 火花塞点火的峰值压力高于普通火花塞, 主要原因是因为 DBD 点火可以形成更大面积的放电, 形成了更多的自由基, 这些自由基促进燃料更充分地燃烧, 使得 DBD 火花塞点火的燃烧峰值压力更高。

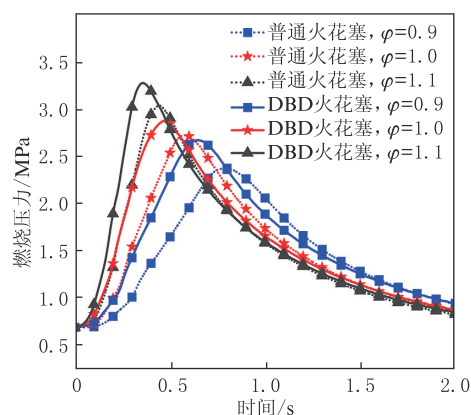


图9 普通火花塞与DBD火花塞燃烧压力曲线对比

Figure 9 Comparison of combustion pressure curves between conventional spark plug and DBD spark plug

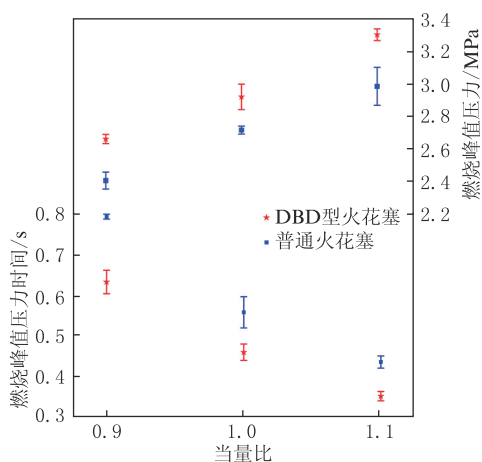


图10 燃烧峰值压力及燃烧峰值压力时间重复试验误差图

Figure 10 Error diagrams of repeated experiments at peak combustion pressures and peak combustion pressure timings

4 结论

(1) 基于全桥逆变电路、谐振理论和磁压缩理论设计开发的双极性纳秒脉冲电源,可实现最高 120 kHz、25 kV 的双极性纳秒脉冲输出,这一输出性能在当前同类研究中达到了较高水准。

(2) 相较于普通火花塞,此纳秒脉冲电源搭载 DBD 火花塞可实现较大面积放电,形成了多个放电丝。点燃氨气的燃烧曲线表明,其较大面积的放电促进了氨气的燃烧。

(3) 此纳秒脉冲电源使用相同的放电参数,搭载 DBD 火花塞和传统火花塞在定容弹内进行氨气点火试验,结果显示在各个压力下,DBD 火花塞的燃烧极限都宽于普通火花塞。在 0.7 MPa 初始压力下点燃气体的,DBD 火花塞的点火延迟时间和燃烧峰值压力都早于普通火花塞,并且燃烧峰值压力更高。试验结果表明,DBD 式火花塞点火效果优于普通火花塞。

参考文献:

[1] GROSS C W, KONG S C. Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia - DME mixtures[J]. Fuel, 2013,103:1069 - 1079.

[2] LIU H F, AMPAH J D, ZHAO Y, et al. A perspective on the overarching role of hydrogen, ammonia, and methanol carbon-neutral fuels towards net zero emission in the next three decades [J/OL]. Energies, 2022, 16(1): 280 (2022-12-27) [2025-03-10]. DOI:10.3390/en16010280.

[3] LAN R, IRVINE J T S, TAO S W. Ammonia and related chemicals as potential indirect hydrogen storage materials [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37(2):1482 -

1494.

[4] EBERLE U, FELDERHOFF M, SCHUETH F. Chemical and physical solutions for hydrogen storage [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2009,48(36):6608 - 6630.

[5] HAAR L, GALLAGHER J S. Thermodynamic properties of ammonia[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1978,7(3):635 - 792.

[6] MERCEDES G H. Update on potential of biofuels for shipping [J]. Policy Commons, 2022,10(3):45 - 60.

[7] 刘海峰,宋腾达,黄志雄,等. 氨/柴油燃烧模型构建及低速机性能优化[J]. 内燃机学报,2023,41(5):395 - 403.

LIU H F, SONG T D, HUANG Z X, et al. Simulation on chemical kinetic mechanism and performance optimization of ammonia-diesel dual fuel low-speed engine[J]. Transactions of CSICE, 2023,41(5):395 - 403.

[8] WISEMAN S, RIETH M, GRUBER A, et al. A comparison of the blow-out behavior of turbulent premixed ammonia/hydrogen/nitrogen-air and methane-air flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021,38(2):2869 - 2876.

[9] 刘海峰,王冠月,文铭升,等. 喷油压力和进气温度对氨/正十二烷双燃料发动机燃烧稳定性影响研究[J]. 燃烧科学与技术, 2024,30(1):1 - 8.

LIU H F, WANG G Y, WEN M S, et al. Influence of injection pressure and intake temperature on combustion stability of ammonia/*n*-dodecane dual-fuel engine [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2024,30(1):1 - 8.

[10] BECHANE Y, FIORINA B. Numerical analysis of turbulent flame enhancement by nanosecond repetitively pulsed plasma discharges[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(4):5465 - 5476.

[11] JU Y G, SUN W T. Plasma assisted combustion: dynamics and chemistry[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015,48:21 - 83.

[12] 王亿明,王凌云,张东东,等. 具有快前沿的 10 kV 纳秒级脉冲电源的研制[J]. 强激光与粒子束,2025,37(3):5 - 16.

WANG Y M, WANG L Y, ZHANG D D, et al. Development of 10 kV nanosecond pulse power supply with fast leading edge[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2025,37(3):5 - 16.

[13] 丁凯,饶俊峰. MHz 高压脉冲电源的研究[J]. 电子科技,2024, 37(2):69 - 75.

DING K, RAO J F. Research on MHz high voltage pulse power supply[J]. Electronic Science and Technology, 2024,37 (2):69 - 75.

[14] 朱振宇,卞伟杰,吴淑群,等. 轻质高频高压纳秒脉冲电源研制 [J]. 电力电子技术,2021,55(10):34 - 38.

ZHU Z Y, BIAN W J, WU S Q, et al. Design of lightweight, high frequency and high voltage nanosecond pulse power supply [J]. Power Electronics, 2021,55(10):34 - 38.

[15] 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 Q W, CHENG Y, YANG X, 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.

(下转第 68 页)