等离子体点火技术在脉冲爆震发动机中的应用研究现状

于锦禄*，王思博，黄丹青，蒋陆昀，程行远，何立明
空军工程大学 航空工程学院， 陕西 西安 710038

摘 要：等离子体点火技术是航空航天动力领域研究前沿。本文概括了等离子体点火研究背景和基本原理，总结了国内外等离子体点火技术在脉冲爆震发动机中的应用研究现状，指出脉冲爆震发动机中利用等离子体点火具有诸多优势，如点火能量大、能有效缩短点火延迟时间、提高 DDT 特性等。在此基础上，本文分析了应用于脉冲爆震发动机的等离子体点火驱动电源、等离子体点火器以及两种典型等离子体点火方案。最后针对等离子体点火技术在脉冲爆震发动机中的应用研究现状，对其发展方向进行了展望。

关键词：等离子体点火；脉冲爆震发动机；放电特性；等离子体电源；点火方案

中图分类号：TG156 **文献标识码**：A DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.10.001

等离子体是由带电的正离子、负离子、自由基和各种活性基团组成的集合体，属于物质的第四态。等离子体中存在的带电粒子，与电场和磁场相互耦合，因此，等离子体与固体、液体或气体有本质的区别[1,2]。在航空领域中等离子体除了具有隐身、增强气流流动稳定性的作用外，还可在燃烧室中点火助燃。等离子体可以通过其热效应、输运效应以及动力学效应来加速燃烧室内的化学反应，在不同的介质、温度、压力等条件下起主要作用的促进效应不同[3,4]。利用等离子体进行点火，已经引起了世界各国研究人员极大的兴趣。

脉冲爆震发动机（Pulse Detonation Engine，PDE）是一种利用脉冲式爆震波生成的高温、高压燃气来产生推力的新概念发动机[5]。脉冲爆震发动机具有结构简单、重量轻、高推重比、高燃烧效率等优点[6]。针对爆震波的快速可靠起爆、尺寸的缩短和频率的提高等决定脉冲爆震发动机发展的关键问题，近年来研究表明利用等离子体点火能够有效地起爆脉冲爆震发动机，同时可以明显地缩短爆燃到爆震（Deflagration to Detonation Transition，DDT）的距离和时间，并具有更高的起爆成功率[7,8]。将等离子体点火技术应用于脉冲爆震发动机中，对提高脉冲爆震发动机多项性能指标有较大作用。

为准确把握国内外等离子体点火技术在脉冲爆震发动机中的研究进展，引起更多国内外学者对该技术的关注，加快推进等离子体点火技术在脉冲爆震发动机中的应用，本文对该技术目前的应用研究现状进行研究分析。

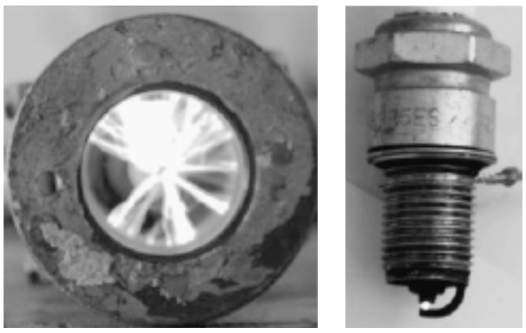
1 等离子体点火的基本原理

等离子体点火是利用放电形成局部高温区域，并激发大量的活性粒子，实现快速地点燃可燃混合气或者是强化燃烧的进程[9]，常见的等离子体点火有等离子体射流点火、电晕等离子体点火、瞬态等离子体点火等。等离子体点火的机理主要表现为三种效应：热效应、化学效应和气动效应[10,11]。热效应是指放电击穿放电介质，加热放电介质使其温度迅速上升。化学效应是指等离子体放电过程中，电子与空气/燃料分子发生碰撞，大分子碳氢燃料被电离成活化能很小的带电活性粒子，空气中的氧气和氮气分子被电离成氧化性更强的活性粒子，从而加速化学连锁反应。气动效应是指等离子体放电的过程会对流场产生扰动，一方面增强燃烧室内气流

收稿日期：2018-08-26； 退修日期：2018-09-17； 录用日期：2018-09-20
* 通信作者 . Tel.：15291199887 E-mail：yujinlu1@163.com
引用格式：Yu Jinlu, Wang Sibo, Huang Danqing, et al. Application and research status of plasma ignition technology in pulse detonation engine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(10): 01-10. 于锦禄，王思博，黄丹青，等．等离子体点火技术在脉冲爆震发动机中的应用研究现状[J]．航空科学技术，2018，29(10)：01-10.

湍流脉动度，利于等离子体流和燃烧室气流掺混；另一方面有利于等离子体在混合气中的定向迁移，从而扩大了火焰焰锋面积，显著增大火焰传播速度，增强燃烧稳定性。等离子体点火相较于传统电火花点火，其优点为：

（1）点火区域大。如图 1 所示[12]，传统的电火花点火通常为点对点的点火方式，而等离子体点火的点火区域可以是一个面，甚至是一个三维空间。大量的点火流注可以实现多点同时点火，能够有效地增强等离子体点火的可靠性。



（a）瞬态等离子体点火　（b）火花塞点火

图 1　瞬态等离子体点火和火花塞点火的放电照片对比

Fig.1　Comparison of transient plasma ignition and spark plug ignition discharge photos

（2）点火延迟时间短。等离子体点火比电火花点火的点火能量大，可以迅速提高点火区域周围的可燃混合气温度，使可燃混合气快速达到燃烧反应条件，缩短点火延迟时间。

（3）点火能量利用率高。传统电火花点火只有少部分电能转化为点火能量，大量的电能被用来发光和加热电极，而等离子体点火所消耗的电能大都用于点火，从而提高了点火能量利用率。

（4）可燃混合气转化为活化粒子进行燃烧反应，极大地减少中间产物的生成，使燃烧反应更加完全，提高了燃料利用率，并大大减少有害物质的排放。

（5）点火能量可以更好地与可燃混合气耦合。点火区域的大分子碳氢燃料被电离成活化能小的活性粒子，使可燃混合气的化学反应速率更快、反应时间更短，同时达到点火的效果。

2 脉冲爆震发动机中的等离子体点火技术

理论研究表明脉冲爆震发动机有诸多的优点，经过国内外研究人员多年的研究，已经取得了巨大的成就。但截至目前，仍有许多技术难点问题制约着脉冲爆震发动机的工程应用。如爆震波的快速可靠起爆、尺寸的缩短和爆震频率的提高、高爆震频率下阀门的快速响应、快速填充及掺混、各系统之间的匹配、系统的可靠性等。

2.1 等离子体点火技术在脉冲爆震发动机中的研究现状

等离子体点火要应用于脉冲爆震发动机，需要适应爆震发动机的工作特点，即点火也应该是脉冲式的。常用的等离子体射流点火（火炬点火），因其响应速度较慢不适合直接用于脉冲爆震发动机的点火。因此，脉冲爆震发动机中使用的等离子体点火器，一般为相应较快的脉冲式点火器。

针对直管型脉冲爆震发动机的 DDT 距离和时间长的问题，从 2003 年开始，俄罗斯 Starikovskii[13, 14] 在对等离子体点火和脉冲爆震发动机深入分析的基础上，提出利用等离子体点火技术起爆脉冲爆震发动机，以解决制约脉冲爆震发动机应用的各种问题，如爆震发动机的点火延迟时间、爆震室的长度、起爆成功率等问题。

2004 年，美国南加州大学的 Wang[15] 和美国海军研究生院的 Sinibaldi 等也开展了相应的研究工作，他们使用的点火方式为纳秒脉冲放电点火，称之为瞬态等离子体点火（Transient Plasma Ignition，TPI）。研究表明，瞬态等离子体点火可以大幅地缩短 DDT 的距离和时间，而且起爆成功率也有所提高。初步的试验表明，在初始温度 280~430K、压力 101.33~607.95kPa 范围内，点火延迟时间和 DDT 的转换时间都显著降低。

美国空军实验室的 John Hoke 和 J. Corrigan[16] 等在四管脉冲爆震发动机上研究了瞬态等离子体点火，其中一个爆震管使用火花塞点火，另外三个管采用瞬态等离子体点火，电源采用的是 30kV 的直流电源。

美国俄亥俄大学的 Andrew Naples[17] 等对比研究了分别使用汽车火花塞点火器和等离子体点火器，分别在以航空汽油、乙烯和氢气为燃料时，起爆脉冲爆震发动机。研究结果表明，利用等离子体点火器点火，大约缩短了 50% 的 DDT 距离和 30% 的时间，同时 C–J 爆震波的速度也有所提高。

2012 年，普林斯顿大学的 Andrey Starikovskiy[18] 综述了等离子体点火在脉冲爆震发动机起爆方面的研究成果。首先分析了等离子体强化点火的基本机理，从点火的角度分析了等离子体放电过程中的能量转化；然后就等离子体点火技术在脉冲爆震发动机中的控制应用进行了讨论。文章最后指出，等离子体点火技术在高速燃烧、贫油燃烧控制和爆震发动机等领域都会具有很好的应用前景。

2009—2014 年，南京理工大学翁春生[19, 20] 课题组通过数值仿真的方法，研究了等离子体射流对脉冲爆震发动机快速起爆的影响。

2013 年开始，北京大学郑殿峰[21] 课题组与北京动力机械研究所高超声速冲压发动机技术重点实验室的张义宁等合作，创新性地利用交流低温介质阻挡放电等离子体成功进行了脉冲爆震发动机点火，由于之前的研究结果往往认为介质阻挡放电等离子体的温度较低，可用于助燃，但不利于点火。他们成功地设计了一种等离子体电源，并且成功触发了以气态乙炔 / 空气的爆震，结果表明采用交流驱动低温等离子体点火触发爆震是可行的。2016 北京大学郑殿峰[22] 课题组设计了双管试验系统，并比较了非热平衡态等离子体和火花塞在空气 / 乙炔混合物中点火的试验特性。试验结果表明，与电火花塞点火相比，采用等离子体点火使 DDT 时间缩短了一半，大幅度提高了火焰和爆震波的形成和传播速度，提高了爆震波的性能。

表 1 为多个实验室通过对比等离子体点火和电火花点火两种不同点火方式，以及对比不同频率、不同脉宽的等离子体点火器在脉冲爆震发动机中点火试验得出的结果。从表中可以看出，与电火花点火相比，利用等离子体点火明显缩短了点火延迟时间，提高了 DDT 特性。利用等离子体点火器在相同试验条件下点火时，脉宽的大小对点火延迟时间影响不大，但是相比于脉宽较大的点火器，所需要的点火能量较小，部分点火装置所需能量小于电火花点火能量。

表 1　两种不同点火方式在脉冲爆震发动机中的试验结果

Table 1　Test results of two different ignition modes in a pulse detonation engine

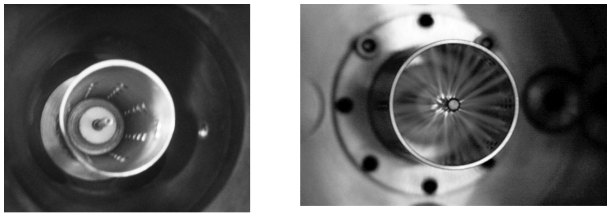
研究单位	点火方式	峰值电压	脉宽 /ns	工作介质	点火延迟时间 /ms	DDT 特性	点火能量 /mJ	参考文献
美国海军研究生院、南加州大学	等离子体点火	90kV	85	C_2H_4+ 空气	约 1.65	能够产生 DDT，同样条件下，电火花塞点火不能产生 DDT	800	23
		60kV 约 175A	12	C_2H_4+ 空气	约 1.75		80	
美国海军研究生院、南加州大学	等离子体点火	85kV	50	C_2H_4+ 空气	2		300	15
	电火花点火			C_2H_4+ 空气	8		200	
美国海军研究生院	等离子体点火	70kV	50	C_2H_4+ 空气	2.75	与电火花点火相比，等离子体点火 DDT 距离缩短 17%（170mm），时间缩短 41%（6.15ms）	650	24
	电火花点火			C_2H_4+ 空气				
美国海军研究生院、南加州大学	等离子体点火	70~100kV 450~600A	50~100	C_2H_4+ 空气	1.7		500~3000	25
美国空军实验室、南加州大学	等离子体点火	52~66kV	100	航空汽油 + 空气	6	2.25ms	670	26
	电火花点火			航空汽油 + 空气	10	1.7ms	115	
北京大学	等离子体点火	0~40kV	30	C_2H_4+ 空气		2.5ms	200	22
	电火花点火			C_2H_4+ 空气		5ms	500	

2.2 不同放电方式的等离子体点火器

在脉冲爆震发动机研究领域，大多数研究者研究工作是建立在普通电火花点火起爆的基础上，而应用等离子体点火的情况不多。下面是几种不同的等离子体点火方式，分别是电晕放电等离子体点火器、电弧放电等离子体点火器和介质阻挡放电等离子体点火器。

（1）电晕等离子体点火器

电晕等离子体点火是利用高压纳秒脉冲电源，直接击穿在阴阳极之间混合气的点火形式，又被称为纳秒脉冲等离子体点火。电晕等离子体点火结构与直接击穿混合气的等离子体点火形式相类似，只是由于外部的电源形式不同，纳秒脉冲电源的放电时间极短，击穿的流注没有来得及形成电弧，形成的是电晕放电。美国海军研究生院与南加州大学研制的电晕放电点火的照片如图 2 所示[27]。



(a) 安装在脉冲爆震发动机中的等离子体点火器　(b) 南加州大学的电晕等离子体点火

图 2　美国海军研究生院与南加州大学研制的等离子体点火器及其在脉冲爆震发动机中的安装

Fig.2　Plasma igniter developed by the US Naval Postgraduate and the University of Southern California and its installation in a pulse detonation engine

为了减小点火器的体积，南加州大学的 Daniel R. Singleton[28] 等设计了小型的瞬态等离子体点火器，并在美国海军研究生院的爆震发动机试验台上进行了试验研究。其结构如图 3 所示，其中左上图为 12ns 的瞬态等离子体点火器，左下图为 85ns 的瞬态等离子体点火器，右图为 12ns 的瞬态等离子体点火器。

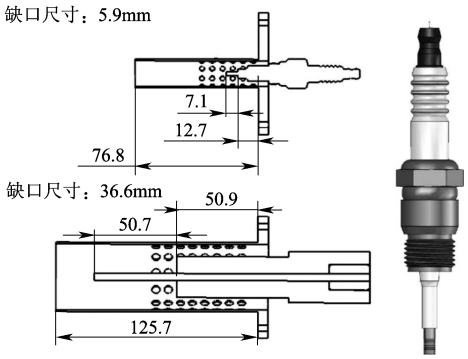


图 3　南加州大学研制的小型等离子体点火器

Fig.3　Small plasma igniter developed by the University of Southern California

美国空军实验室研制的等离子体点火器[10] 如图 4 所示。

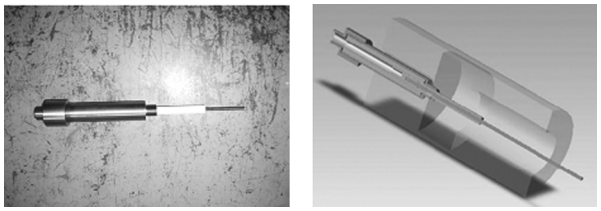
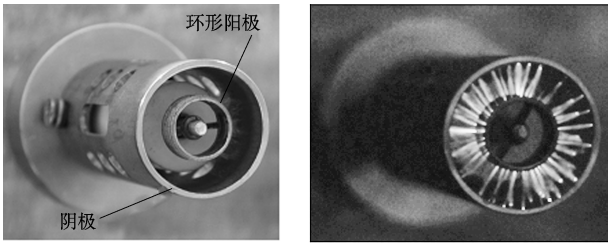


图 4　美国空军实验室研制的用于脉冲爆震发动机的等离子体点火器

Fig.4　Plasma igniter for a pulse detonation engine developed by the US Air Force Laboratory

为降低瞬态等离子体点火器对电源的要求，本文提出了一种基于环形放电的瞬态等离子体点火器。研制的环形阳极等离子体点火器和其产生的电晕放电照片如图 5 所示[29]。环形阳极等离子体点火器由环形阳极、阴极和绝缘套等组成。环形阳极内部为空心，空心的内部通道可以流通混合气，外部为螺纹表面。该结构的等离子体点火器应用于脉冲爆震发动机点火，可直接把爆震管当作阴极使用[30]。



(a) 环形等离子体点火器　(b) 环形等离子体点火器放电照片

图 5　环形阳极等离子体点火器

Fig.5　The ring anode plasma igniter

当使用基于电晕放电的等离子体点火器时，中心阳极连接高压电源，可以将爆震管作为阴极接地。通电时，在中心阳极与阴极之间产生大量的流注放电，形成局部高温区域，并激发大量的活性粒子，实现快速的点燃可燃混合气。纳秒脉冲等离子体点火能克服传统电火花放电的许多不足，其优点为：点火区域大、时间极短，点火能量可以更好地与气体混合物耦合，点火区域的大分子碳氢燃料被电离成活化能小的活性粒子，使混合气的化学反应速率更快，反应时间短，点火成功率高[31]。

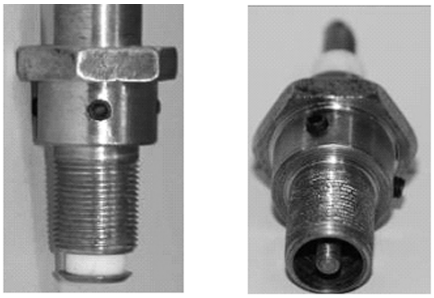
(2) 电弧放电等离子体点火器

本文根据等离子体气体放电的基本理论，在充分借鉴国外最新研究成果的基础上，结合项目组前期的研究基础，设计了两种用于脉冲爆震发动机的等离子体点火器：碟形等离子体点火器和圆柱等离子体点火器。

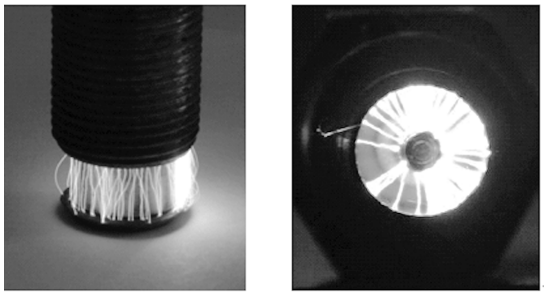
碟形等离子体点火器[32] 的特点是阳极为碟形，碟形阳极边缘为尖端，更有利于放电。外壳体为阴极并接地。碟形等离子体点火器具有与普通火花塞点火器相同的螺纹接口，同时也可以安装在内燃机上进行点火试验。

圆柱等离子体点火器的特点是阳极为中心的圆柱，阳极前端为螺纹表面，螺纹表面更有利于产生尖端放电。外壳体为阴极并接地。

设计的两种等离子体点火器的放电效果照片如图 6 所示。从图中可以看出，等离子体点火器在放电过程中会出现大量的放电电弧流注，与火花塞相比这种电弧属于拉长的电弧。从图中可以看出，大量的放电流注使得点火能量与混合气充分耦合，在点火流注与混合气的耦合过程中，会把大分子的混合气电离成更容易进行化学反应的小分子或者带电离子，因此，可在较大范围内快速点着可燃混合气。



(a) 碟形与圆柱等离子体点火器



(b) 碟形与圆柱等离子体点火器放电

图 6 碟形与圆柱等离子体点火器结构及放电照片

Fig.6 Disc and cylindrical plasma igniter structure and discharge photo

(3) 介质阻挡放电等离子体点火器

北京大学郑殿峰等[21]研制的基于介质阻挡放电等离子体点火器如图 7 所示。点火器采用同轴结构，电极间采用陶瓷阻挡介质，放电间隙为 4mm，高压电极安装在爆震管头部中心处，低压电极与爆震管连接。低压电极内表面光滑，目的是产生均匀的流注放电。

图 7 北京大学研制的基于介质阻挡放电等离子体点火器

Fig.7 Dielectric barrier discharge plasma igniter developed by Peking University

2.3 等离子体点火驱动电源

不同的等离子体点火器和点火方式，需要搭配不同的点火电源。现有用于脉冲爆震发动机点火研究的电源可以归结为三类，分别是纳秒脉冲等离子体电源、基于电弧放电等离子体点火器的等离子体电源、基于介质阻挡放电点火的低温等离子体电源。

(1) 纳秒脉冲等离子体电源

纳秒脉冲等离子体点火的关键是要有纳秒脉冲电源，目前制造相关电源成本较高，且主要停留在试验阶段。2005 年，美国南加州大学的 Wang Fei 等[33]研究了基于伪火花开关的脉冲等离子体电源，该技术的电源能够制造出体积更小的等离子体电源。与美国海军研究生院和空军实验室的合作研究表明，使用该电源的等离子体点火器能够大幅提高脉冲爆震发动机的 DDT 性能。

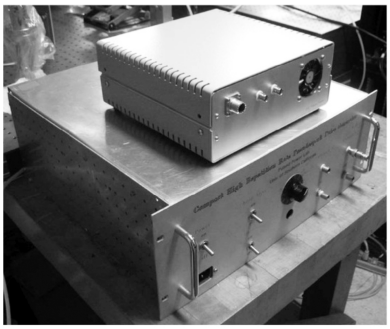
2009 年，美国海军研究生院的 Sinibaldi、Brophy 等[28]研制出了尺寸小巧的等离子体电源，新型小型化的等离子体电源能够产生脉冲峰值 60kV、脉宽 12ns 的高压脉冲，更适合在航空器上安装，电源如图 8 所示。新型的脉宽 12ns 电源与之前的脉宽 85ns 等离子体电源在脉冲爆震发动机上进行了对比试验研究，获得了点火延迟时间。结果表明，除了混合气在很小当量比条件下，脉宽 12ns 电源的点火延迟时间较长之外，在其他混合气当量比条件下，脉宽 12ns 电源的点火延迟时间与脉宽 85ns 电源的点火延迟时间相差不大。但是脉宽 12ns 电源的能量消耗为 80mJ，而脉宽 85ns 电源的能量消耗为 800mJ，脉宽 12ns 电源消耗的能量明显减少。

2011 年，美国南加州大学的 Singleton[34]等研究了紧凑的等离子体电源，在定容反应器中对比了电源的点火特性。研究结果表明，对于两种不同的等离子体电源：脉宽 54ns 伪火花开关式和脉宽 12ns 磁压缩式，与传统的电火花相比较，在很宽广的混合气当量比条件下等离子体点火缩短了 1/2 的点火延迟时间。而脉宽 54ns 伪火花开关式电源消耗的能量为 365mJ，脉宽 12ns 磁压缩式电源消耗的能量为 75mJ。

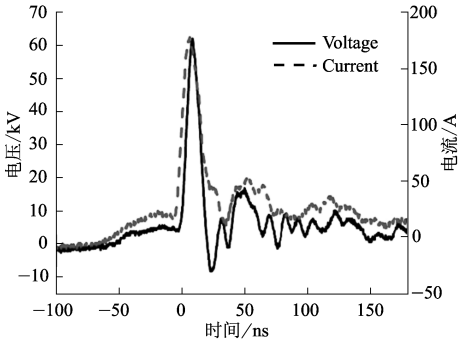
目前公开的文献中用于脉冲爆震发动机的等离子体点火电源的峰值电压和脉宽见表 1。

(2) 基于电弧放电等离子体点火器的等离子体电源

作者曾在空气流量为 0.0115kg/s、供油量为 7.6L/h、当量比为 1.95、进气压力为 101.33kPa 条件下，采用毫秒脉冲等离子体电源，使用碟形和圆柱等离子体点火器成功起爆爆震发动机，在点火频率不变情况下，随着空流量的增大，爆震波峰值和点火起爆时间都会增大；随着当量比不断增大，爆震波峰值压力也逐渐降低，点火起爆时间也会相应缩短。毫秒脉冲等离子体电源 CTP-2000K 由南京苏曼公司设计生产，如图 9 所示。该电源为单高压等离子体电源，输出电压为 0~30kV，输出电压的脉冲频率为 10~1000Hz，占空比手动可调节，电源功率为 1000W。



(a) 纳秒脉冲等离子体电源



(b) 60kV−12ns纳秒脉冲电源的伏安特性曲线

图 8 南加州大学研制的纳秒脉冲等离子体电源及放电特性

Fig.8 Nanosecond pulsed plasma power supply and discharge characteristics developed by the University of Southern California

图 9 CTP-2000K 毫秒脉冲等离子体电源

Fig.9 CTP-2000K millisecond pulse plasma power supply

(3) 基于介质阻挡放电点火的低温等离子体电源

北京大学郑殿峰[22] 利用交流介质阻挡放电低温等离子体起爆爆震，低温等离子体电源交流电中心频率为 30kHz，输出电压为 0~40kV，通过同步控制器，实现等离子体电源的单次放电时间为 0.2ms，0.3ms，0.4ms 和 0.5ms，频率为 0.1~100Hz。当低温等离子体点火器单次放电时间为 0.5ms 时[35]，单次放电能量为 0.2mJ 左右。低温等离子体电源和控制器如图 10 所示。

纳秒脉冲等离子体电源点火范围大、能量利用率高，用于脉冲爆震发动机能有效地提高其多项性能。从现有的试验结果中可以看出，利用纳秒脉冲等离子体电源来点火，其脉宽越小，点火消耗能量越少，但是其对点火延迟时间影响较小。但是现有的纳秒脉冲等离子体电源，体积较大，生产制造成本较高，工程应用还有较大难度。因此，小脉宽、小型化、低成本的纳秒脉冲等离子体电源将是未来纳秒脉冲等离子体电源的发展方向。此外，在目前脉冲爆震发动机技术不够成熟的条件下，毫秒级别的等离子体电源成本较低，是试验研究阶段较好的选择。

图 10 低温等离子体电源和控制器

Fig.10 Low temperature plasma power supply and controller

2.4 等离子体点火的典型实施方案

根据直管形脉冲爆震发动机的结构特点，其点火的实施位置一般在封闭端或爆震室的前端。

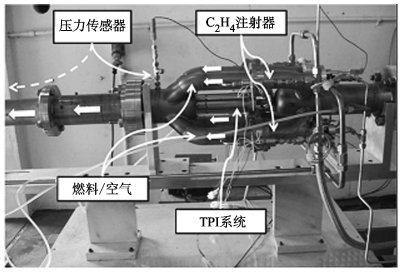
(1) 封闭端点火实施方案

根据脉冲爆震发动机的工作原理，点火的一端为封闭端，这样有利于形成完整的爆震循环，同时形成较强的反射波，增大发动机的推力。

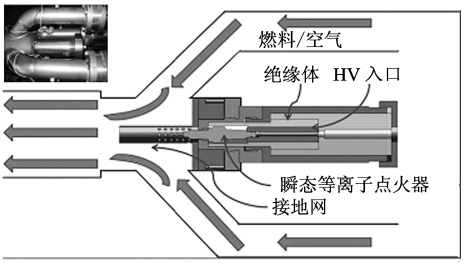
美国海军研究生院的研究方案中点火器位于封闭端，如图 11 所示[20]。空气和燃料分别从上下两侧的通入 PDE 管道来进行燃烧。高速动态压力传感器被安装在 TPI 系统中，用于测量不同位置的燃烧段的压力上升，并确定点火延迟时间。

美国空军实验室的瞬态等离子体点火起爆脉冲爆震发动机的布置方案如图 12 所示[18]，采用的是封闭端点火方式。该点火器位于 PDE 管的顶部封闭端，且位于圆形管道的中心位置。1 为爆震管底部，2 为绝缘材料，3 为金属点击，4 为放电点火范围。

北京大学也采用了封闭端的点火方式，如图 13 所示[21]。点火器为同轴结构，电极间采用陶瓷阻挡介质，放电间隙为 4mm，高压电极安装在爆震管头部中心处，低压电极与爆震管连接。低压电极内表面光滑，目的是产生均匀的流注放电。低温等离子体点火器安装在爆震管 1 头部，爆震管 1 出口用膜片密封。先开启真空泵，将系统抽至一定的真空，填充气体燃料分压力份额，再填充剩余空气。开启循环泵，使混气均匀。关闭相应的阀门，在触发低温等离子体电源同时，采集系统采集数据。



（a）美国海军研究生院点火实验系统示意图



（b）美国海军研究生院爆震发动机结构示意图

图 11　美国海军研究生院的等离子体点火方案

Fig.11　Plasma ignition schemes of the US Naval Postgraduate School

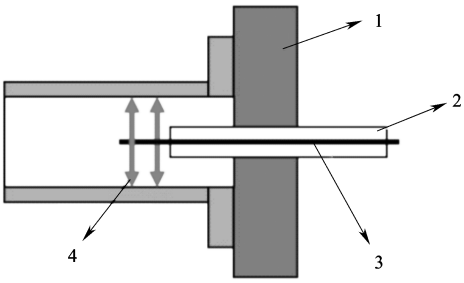


图 12　美国空军实验室的等离子体点火方案

Fig.12　Plasma ignition scheme of the US Air Force Laboratory

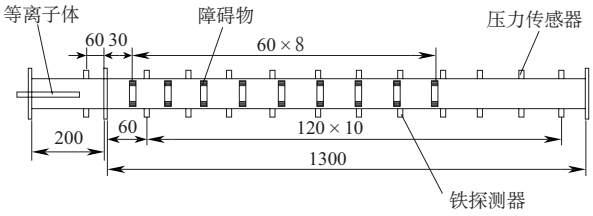


图 13　北京大学的等离子体点火方案

Fig 13　Plasma ignition scheme of Peking University

作者设计的碟形等离子体点火器和圆柱等离子体点火器，采用的是在爆震室的前端点火方案，如图 14 所示[29]。试验系统主要由气路、油路、爆震燃烧室、点火器、电源和测试系统等组成。从示意图中可以看出，环形等离子体点火器安装在爆震管的内部，与爆震管是同心安装，一方面作为点火器，另一方面可以作为爆震管的封闭端。碟形 / 圆柱等离子体点火器和火花塞点火器安装在爆震管的侧面，碟形 / 圆柱等离子体点火器和火花塞点火器具有相同接口，试验时可以相互进行更换。

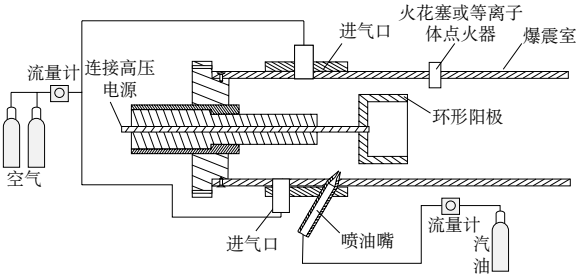


图 14　空军工程大学的等离子体点火器起爆脉冲爆震发动机的方案

Fig.14　Scheme of the plasma igniter detonation pulse detonation engine developed by the Air Force Engineering University

（2）双瞬态等离子体点火方案

美国海军研究生院还采用了双瞬态等离子体点火的方案。该方案使用第二个电极来辅助点火，第二个电极位于爆震室中部靠前的位置，如图 15 所示[36]。此点火方案的关键在于把握好第二个 TPI 电极点火源的触发时间，需要在第一个电极的适当时间延迟触发，从而缩短 DDT 时间。

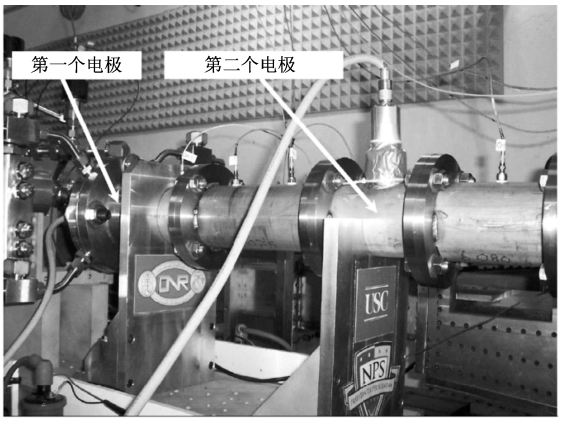


图 15　双瞬态等离子体点火方案

Fig.15　Dual transient plasma ignition scheme

3 结束语

本文介绍了等离子体点火的基本原理，提炼了等离子体点火的优点。介绍了国内外利用等离子体点火起爆脉冲爆震发动机的研究成果，总结了等离子体点火方式和对应的等离子体点火电源。根据等离子体的放电点火原理，将等离子体点火器分为三类：电晕等离子体点火器、电弧放电等离子体点火器和介质阻挡放电等离子体点火器。分析结果表明，相比于普通电火花点火，等离子体点火对提高脉冲爆震发动机起爆性能（如缩短点火延迟时间、缩短 DDT 时间和

距离等）都具有明显的作用，这为将来提高脉冲爆震发动机的各项性能（如缩短脉冲爆震发动机的长度、提高脉冲爆震发动机的推力、工作频率和可靠性）奠定基础。针对等离子体点火技术及其在脉冲爆震发动机中应用的特点，作者认为，今后还需要在如下领域开展更加深入的研究工作。

（1）等离子体点火器工作机理研究

等离子体点火的优势已经得到了广泛认可，但是等离子体点火的详细机理还不是很清楚。例如，等离子体点火的过程中出现的活性粒子成分、不同活性粒子对应的不同反应路径、以及不同活性粒子对促进燃烧的贡献大小等都有待进一步研究。等离子体点火的三种效应已经得到公认，但是三种效应分别如何影响点火和燃烧过程，每种效应的贡献率尚不清楚。由于等离子体点火技术涉及高电压技术、流体力学、化学动力学、燃烧学等多个方向，本身具有较大的复杂性，因此需要加大对等离子体点火机理的研究，对于等离子体点火开展更为细致的基础性理论研究工作。

（2）等离子体点火在脉冲爆震发动机领域应用研究

脉冲爆震发动机使用的近似于定容循环具有较高的热循环效率，外加其结构简单、低成本，让脉冲爆震发动机在未来空天推进领域具有广阔的应用前景。但作为一种新型的动力形式，现有脉冲爆震发动机在爆震的起爆、控制、保持、系统匹配工作等方面，都存在一定的不足。利用等离子体点火方式起爆脉冲爆震发动机在研究阶段展现了良好性能，但仍处于试验探索阶段，想要工程应用还存在诸多问题。如能够应用于脉冲爆震发动机的实用化小型高性能的等离子体点火电源依然是这一领域的短板。因此，今后应该在等离子体点火驱动电源的小型化、轻型化上多下功夫，开展针对性的攻关。

（3）研究手段方法，应该注重试验与仿真结合

本文总结的国内外研究成果大部分通过试验得出，从公开文献来看，对于多物理场耦合的等离子体点火仿真研究较少。通过试验能够较为直观观察试验现象和试验结果，得到的数据较为真实。而数值仿真，在解释等离子体点火的物理、化学机理，影响因素和变化规律等方面，具有十分重要的意义。因此，在今后研究中，应该注意试验与仿真相结合。

AST

参考文献

[1] 陈佳洱.等离子体物理学 [M].北京：科学出版社，1994.
Chen Jiaer. Plasma physics[M]. Beijing：Science Press，1994.（in Chinese）

[2] Roth J R. Industrial plasma engineering ：principles[M].London ：Institute of Physics，1995.

[3] Yiguang Ju，Joseph K，Lefkowit Z，et al. New combustion technology and kinetic studies[C]// AIAA SciTech 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting，2015.

[4] Yiguang Ju，Wenting Sun. Plasma assisted combustion：New combustion technology and kinetic studies[J]. Combustion and Flame，2015，162（3）：529–532.

[5] 严传俊，范玮 . 脉冲爆震发动机原理及关键技术 [M].西安：西北工业大学出版社，2005.
Yan Chuanjun，Fan Wei. Pulse detonation engine principle and key technology[M].Xi’an：Northwestern Polytechnical University Press，2005.（in Chinese）

[6] 严传俊，范玮，黄希桥，等 . 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）：1021–1025.
Yan Chuanjun，Fan Wei，Huang Xiqiao，et al. Exploratory study on new concept pulse detonation engine [J]. Progress in Natural Science，2002，12（10）：1021–1025.（in Chinese）

[7] Cathey C D，Tang Tao，Shiraishi T，et al. Nanosecond plasma ignition for improved performance of an internal combustion engine[J].IEEE Transactions on Plasma Science，2007，35（6）：1664–1667.

[8] Cathey C，Wang Fei，Tang Tao. Transient plasma ignition for delay reduction in pulse detonation engiens[R]. AIAA2007–443，2007.

[9] 李志华，刘顺隆，郑洪涛，等 . 电弧等离子体点火器湍流燃烧流场传热与流动数值模拟 [J]. 汽轮机技术，2006，48（3）：187–189.
Li Zhihua，Liu Shunlong，Zheng Hongtao，et al. Numerical simulation of heat transfer and flow in turbulent combustion flow field of arc plasma igniter[J]. Turbine Technology，2006，48（3）：187–189.（in Chinese）

[10] 何立明，祁文涛，赵兵兵 . 空气等离子体射流动态过程分析 [J]. 高电压技术，2015，41（6）：2030–2036.
He Liming，Qi Wentao，Zhao Bingbing. Analysis of the dynamic process of air plasma jet[J].High Voltage Engineering，2015，41（6）：2030–2036.（in Chinese）

[11] Lu Jin，Li Yu，He Ming. Numerical investigations on the nanosecond pulse discharge process of disk–shape plasma

igniter[J].International Journal of Turbo and Jet Engines，2015，32（1）：97-103.

[12] 于锦禄，何立明，丁未，等．瞬态等离子体点火和火花塞点火起爆过程的对比研究[J]. 推进技术，2013，34（11）：1575-1579.
Yu Jinlu，He Liming，Ding Wei，et al. Comparative investigation on detonation initiation process of transient plasma ignition and spark ignition[J].Journal of Propulsion Technology，2013，34（11）：1575-1579.（in Chinese）

[13] Starikovskii A Y. Deflagration-to-detonation control by non-equilibrium gas discharges and its applications for pulsed detonation Engine[C]// 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit，2003.

[14] Zhukov V P，Starikovskii A Y. Deflagration-to-detonation control by non-equilibrium gas discharges and its applications for pulsed detonation Engine[C]// AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit，2005.

[15] Wang F，Jiang C，Kuthi A，et al. Transient plasma ignition of hydrocarbon-air mixtures in pulse detonation engines[C]// 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit，Reno，Nevada，2004.

[16] Cathey C，Wang Fei，Tang Tao. Transient plasma ignition for delay reduction in pulse detonation engines[R].AIAA-2007-443，2007.

[17] Naples A，Tao Sheng，John Y，et al. Pressure scaling effects on ignition and detonation initiation in a pulse detonation engine[C]// 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition，Florida，Orlando，2009.

[18] Starikovskiy A，Aleksandrov N，Rakitin A. Plasma-assisted ignition and deflagration-to-detonation transition[C]// 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition，Nashville，Tennessee，2012.

[19] 彭振，翁春生．等离子体点火对燃烧转爆轰影响的数值计算[J]. 燃烧科学与技术，2011，17（1）：84-89.
Peng Zhen，Weng Chunsheng. Numerical calculation of effect plasma ignition on DDT[J].Journal of Combustion Science and Technology，2011，17（1）：84-89.（in Chinese）

[20] 彭振，翁春生．等离子点火对 PDE 一维两相爆轰影响的数值计算[J]. 火炮发射与控制学报，2009（2）：77-80.
Peng Zhen，Weng Chunsheng. Numerical calculation of influence of plasma ignition on PDE one-dimensional two-phase detonation[J].Journal of Gun Launch & Control，2009（2）：77-80.（in Chinese）

[21] 郑殿峰，张义宁，郑日恒，等．交流驱动低温等离子体点火触发爆震可行性研究[J]. 推进技术，2014，35（8）：1146-1152.
Zheng Dianfeng，Zhang Yining，Zheng Riheng，et al. Investigation on feasibility of ignition and detonation trigger by low temperature plasma based on AC drive[J]. Journal of Propulsion Technology，2014，35（8）：1146-1152.（in Chinese）

[22] Zheng Dianfeng. The advantages of non-thermal plasma for detonation initiation compared with spark plug[J]. Plasma Science and Technology，2016，18（2）：162-167.

[23] Daniel R，Sinibaldi S，András K，et al. Compact pulsed-power system for transient plasma ignition[J]. IEEE Transactions on Plasma Science，2009，37（12）：2275-2279.

[24] Singleton D R，Kuthi A，Sanders J M. Low energy compact power modulators for transient plasma ignition[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2011，18（4）：148-154.

[25] Hackard C N．Ignition characteristics for transient plasma ignition of ethylene/air and JP-10/air mixtures in a pulse detonation engine[D]. CA，USA：Naval Postgraduate School，Monterey，2007.

[26] Busby K，Corrigan J，Yu S T，et al. Effects of corona，spark and surface discharges on ignition delay and deflagration-to-detonation times in pulsed detonation engines[C]// 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit，Reno，Nevada，2007.

[27] Singleton D，Pendleton S J，Gundersen M A. The role of non-thermal transient plasma for enhanced flame ignition in C2H4–air[J]. Journal of Physics D：Applied Physics，2011，44：022001.

[28] Daniel R，Singleton S，András K，et al. Compact pulsed-power system for transient plasma ignition[J]. IEEE Transactions on Plasma Science，2009，37（12）：2275-2279.

[29] 于锦禄，何立明，丁未，等．等离子体点火器设计及其放电特性研究[J]. 南京航空航天大学学报，2016，48（3）：396-401.
Yu Jinlu，He Liming，Ding Wei，et al. Design of plasma igniter and research on discharge characteristics[J]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2016，48（3）：396-401.（in Chinese）

[30] 于锦禄，何立明，丁未 . 一种基于环形放电的瞬态等离子体点火器：中国，ZL201210376733.6[P].2015.
Yu Jinlu，He Liming，Ding Wei. A ring-discharge-based transient plasma igniter：China，ZL201210376733.6 [P]. 2015.（in Chinese）

[31] Starikovskiy N A. Plasma-assisted ignition and combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science，2013，39（1）：61-110.

[32] 于锦禄，何立明，丁未 . 用于内燃机燃烧室的瞬态等离子体点火器：中国，ZL201320339282.9[P].2014.
Yu Jinlu，He Liming，Ding Wei. Transient plasma igniter for internal combustion engine combustion chamber：China，ZL201320339282.9 [P]. 2014.（in Chinese）

[33] Wang F，Cathey C，Kuthi A，et al. Pseudospark-based power modulator technology for transient plasma ignition[C]// Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International Power Modulator Symposium，2006.

[34] Singleton D R，Kuthi A，Sanders J M. Low energy compact power modulators for transient plasma ignition[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2011，18（4）：148-154.

[35] 郑殿峰 . 低温等离子体点火乙炔空气爆震特性试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报，2015，47（11）：15-21.
Zheng Dianfeng. Experimental research on detonation combustion of acetylene/air mixture igniting by low-temperature plasma[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2015，47（11）：15-21.（in Chinese）

[36] Joel Rodriguez. Investigation of transient plasma ignition for a pulse detonation engine [D]. Monterey，CA，USA：Naval Postgraduate School，2005.

作者简介

于锦禄（1981- ）男，博士，副教授。主要研究方向：推进系统气动热力理论以及等离子体点火助燃方面研究。
Tel：15291199887 E-mail：yujinlu1@163.com
王思博（1993- ）男，硕士。主要研究方向：等离子体点火技术以及气动理论的研究。
黄丹青（1994- ）男，硕士。主要研究方向：等离子体点火技术以及气动理论的研究。
蒋陆昀（1996- ）男，硕士。主要研究方向：等离子体助燃技术以及气动理论的研究。
程行远（1995- ）男，学士。主要研究方向：航空发动机维修保障方面研究。
何立明（1959- ）男，博士，教授。主要研究方向：等离子体点火与助燃技术、燃烧室新型室壁结构及冷却技术、脉冲爆震发动机关键技术等相关研究。

Application and Research Status of Plasma Ignition Technology in Pulse Detonation Engine

Yu Jinlu*，Wang Sibo，Huang Danqing，Jiang Luyun，Cheng Xingyuan，He Lingming
Engineering College of Aeronautics , Air Force Engineering University, Xi'an 710038,China

Abstract: Plasma ignition technology is the research frontier in aviation and aerospace energy field. In this paper，the background and basic principles of the plasma ignition research were discussed，the application and research status of plasma ignition technology in pulse detonation engine at home and abroad was summarized，and the advantages of plasma ignition in pulse detonation engine were introduced. That is，the ignition energy is large，the ignition delay time can be significantly shortened，and the DDT characteristics can be improved. On this basis，different type of plasma powers，plasma igniters and two kinds of plasma ignition schemes were introduced. Finally，the application and development of plasma ignition technology in pulse detonation engine were prospected.

Key Words: plasma ignition；pulse detonation engine；discharge characteristic；plasma powers；ignition scheme

Received: 2018-08-26； **Revised:** 2018-09-17； **Accepted:** 2018-09-20

***Corresponding author.Tel.:** 15291199887 **E-mail:** yujinlu1@163.com