

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.03.015

等离子体点火器设计及其放电特性研究

于锦禄¹ 何立明¹ 丁未¹ 张倩¹ 胡雅骥² 李晓庆³

(1. 空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038;2. 空军装备部,北京,100843;

3. 中国人民解放军 94590 部队,潍坊,261053)

摘要:基于等离子体放电理论,设计了 3 种不同形式的等离子体点火器:环形等离子体点火器、碟形等离子体点火器和圆柱等离子体点火器。对于不同的等离子体点火器,研究了在电源激励形式、电压、气体压力变化时的点火器放电特性,并将等离子体点火器与普通火花塞点火器的点火进行了对比分析。结果表明:设计的 3 种等离子体点火器能够有效地产生等离子体放电流注;随着放电环境的空气气压的逐渐升高,等离子体点火器的临界放电电压不断增大;在低气压时,击穿阈值电压随气压增加呈线性上升,基本符合帕邢定律的放电公式,在高气压时,放电阈值电压会偏离帕邢定律。

关键词:等离子体点火;火花塞点火;放电特性;阈值电压

中图分类号:V233.4 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2016)03-0396-06

Design of Plasma Igniter and Research on Discharge Characteristics

Yu Jinlu¹, He Liming¹, Ding Wei¹, Zhang Qian¹, Hu Yaji², Li Xiaoqing³

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China;

2. Equipment Department of Air Force, Beijing, 100843, China;

3. 94590 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Weifang, 261053, China)

Abstract: Based on the plasma discharge theory, three different forms of plasma igniters are designed, i. e. toroidal plasma igniter, disc and cylindrical plasma igniters. For different plasma igniters, the discharge characteristics of the igniters are investigated under the different forms of excitation power, voltage and gas pressure. The plasma igniters are compared with spark ignition. The results show that the plasma discharge stream can be produced by the plasma igniters. The discharge threshold voltage increases with the increasing air pressure. At low pressure, the discharge threshold voltage increases with the increasing pressure linearly, which is in accordance with the Paschen law. At high pressure, the discharge threshold voltage will deviate from the Paschen law.

Key words: plasma ignition; spark ignition; discharge characteristics; threshold voltage

等离子体是物质存在的第四态,是由部分电子被剥夺后的带电正粒子、负粒子、自由基和各种活性基团组成的集合体^[1-2],也被称为“电浆体”。自

1879 年克鲁克斯发现等离子体以来,至今等离子体理论得到了充分的发展。以气体放电和电弧放电为基础的等离子体技术也得到了广泛的应用。

基金项目:国家自然科学基金(51436008,51106179)资助项目。

收稿日期:2016-03-05;**修订日期:**2016-04-06

通信作者:于锦禄,男,讲师,E-mail:yujinlu1@163.com。

引用格式: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]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(3): 396-401.

例如在等离子体切割、等离子体表面处理、等离子体喷涂、等离子体显示以及在医疗等行业也都得到了广泛的应用。在航空航天领域,等离子体技术也得到了充分发展和应用,例如利用等离子体技术隐身、等离子体推进、等离子体扩稳、等离子体增升和等离子体点火等。

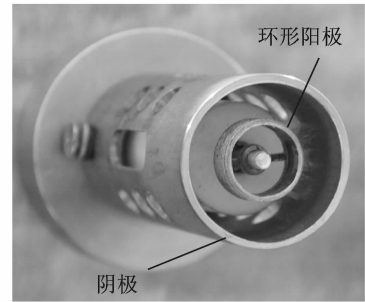
等离子体点火是利用高能脉冲产生高能放电,形成局部高温区域,并激发大量的活性粒子,实现快速的点燃可燃混合气。等离子体点火能克服传统电火花放电的许多不足,其优点为:点火区域大、点火能量可以更好地与气体混合物耦合,点火区域的大分子碳氢燃料被电离成活化能小的活性粒子,使混合气的化学反应速率更快,点火延迟时间更短,点火成功率高^[3]。

Leonov 等人^[4]对丝电弧等离子体强化超声速燃烧进行了大量的研究,他们的研究表明,利用多电极产生的丝状等离子体电弧可以快速点燃混合气,缩短点火延迟时间。Tardiveau 等人^[5]研究了针板结构的放电流注分支的形成过程,并且估算了脉冲电压供电时的流注速度。Nudnova 等人^[6]研究了在不同压力条件下等离子体点火流注的形成过程。Robert 等人^[7]实验研究了在大气压条件下等离子体枪形成的等离子体流注,分析了电压、脉冲极性和重复频率等对放电流注的影响。Zhu 等人^[8]研究了在大气压条件下的滑动弧放电特性,滑动弧是通过交流电产生的,通过电流电压测试设备测量得到了在等离子体电弧滑动过程中电流电压的峰值变化过程。等离子体点火技术在动力领域的应用非常广泛,可用于内燃机的点火^[9]、航空发动机的点火^[10]、脉冲爆震发动机的点火^[11]、超燃冲压发动机的点火^[12]等,应用等离子体点火技术可以提高发动机的整体性能,所以等离子体点火技术是极具研究价值的新型点火技术。总体来说,国外研究等离子体点火技术及其应用的单位较多,如美国南加利福尼亚州立大学^[9,11]、美国海军研究生院^[13]、俄亥俄州立大学^[14]、普林斯顿大学^[15]、斯坦福大学^[16]、美国空军实验室^[14]、辛辛那提大学^[14]和俄罗斯莫斯科物理技术研究院^[17],还有日本、韩国、法国等国家。

1 等离子体点火器设计

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^[10,18],结合项目组前期的研究基础,设计了 3 种不同形式的等离子体点火器:环形等离子体点火器、碟形等离子体点火

器和圆柱等离子体点火器。3 种等离子体点火器的实物照片如图 1 所示。



(a) Toroidal plasma igniter



(b) Disc plasma igniter



(c) Cylindrical plasma igniter

图 1 设计的 3 种等离子体点火器

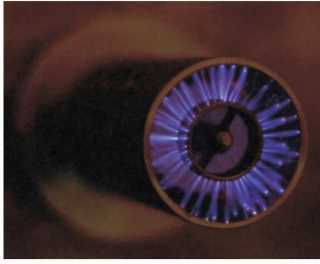
Fig. 1 Three plasma igniters

环形等离子体点火器由环形阳极、阴极和绝缘套等组成。阳极为环形(中空管状)薄壁结构,薄壁结构使电荷集中在阳极表面。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^[19]。

碟形等离子体点火器主要由碟形阳极、连接杆和绝缘套筒等组成。碟形阳极边缘为尖端,尖端更有利于放电,外筒与连接杆之间为绝缘层。碟形等离子体点火器具有与普通火花塞点火器具有相同的螺纹接口。同时还可以安装在内燃机上进行点火试验^[20]。

圆柱等离子体点火器由中心圆柱阳极、阴极外筒和绝缘套筒等组成。阳极前端为螺纹表面,螺纹表面更有利于产生尖端放电。

设计的 3 种等离子体点火器的放电效果照片如图 2 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流注,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) Toroidal plasma igniter



(b) Disc plasma igniter



(c) Cylindrical plasma igniter

图2 3种等离子体点火器的放电效果照片

Fig.2 Discharge photoes of three plasma igniters

2 等离子体点火器的放电特性

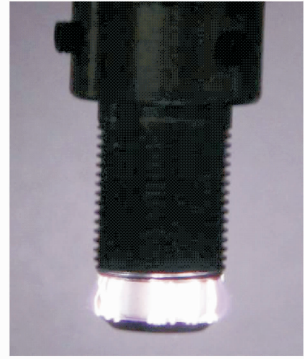
2.1 碟形等离子体点火器放电特性

分别进行了碟形等离子体点火器在纳秒电源和微秒电源条件下的放电试验,放电照片和电压曲线如图3所示。

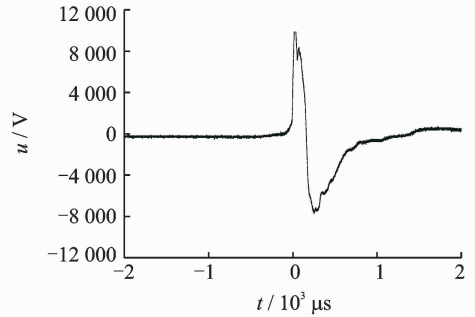
从图3中可以看出,在碟形等离子体点火器放电时,阴极和阳极之间会产生大量丝状发光流注,流注均匀分布在阴阳极之间的圆柱面上。由气体放电的基本理论可知,气体放电的形式与电极的形状、极间距离、气压以及外电路特性有关,对于曲率半径很小的电极,即在非均匀电场中,击穿将引起丝状(刷状)放电。碟形阳极的碟形尖端就构成了曲率半径很小的电极,与阴极套筒底面形成了非均匀电场。当放电空间电场强度足够大时,电子在漂移运动过程中,从电场获得足够高的能量,具有高能电子与气体粒子发生非弹性碰撞,使之激发或电离,从而使空间产生新的离子和电子。碰撞过程中产生的电子呈几何数增长,形成电子雪崩,表现为流注通道,形成丝状放电,如图3所示。从电压曲线可以得到,纳秒电源下的碟形等离子体放电电压值为9.88 kV,微秒电源下的碟形等离子体放电电压峰-峰值为5.56 kV。同时,在纳秒电源下放电过程阴阳极之间的流注比在微秒电源下放电过程的流注更细,分布更密集。

2.2 圆柱等离子体点火器放电特性

分别进行了圆柱等离子体点火器在纳秒电源



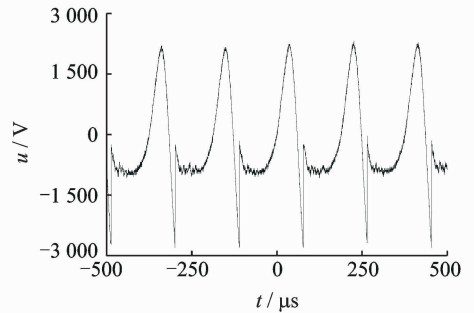
(a) Discharge photo of disc plasma igniter(Nanosecond power)



(b) Voltage of disc plasma igniter(Nanosecond power)



(c) Discharge photo of disc plasma igniter(Microsecond power)



(d) Voltage of disc plasma igniter(Microsecond power)

图3 碟形等离子体点火器的放电试验

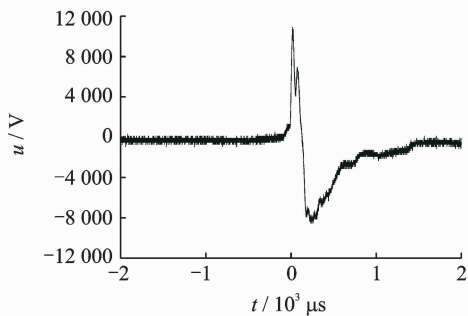
Fig.3 Discharge experiment of disc plasma igniter

和微秒电源下的放电试验,放电图片和电压曲线如图4所示。

从图4中可以看出,在圆柱等离子体点火器放电时,阴极和阳极之间会产生大量丝状发光流注,流注均匀分布在阴阳极之间的环形区域。圆柱阳



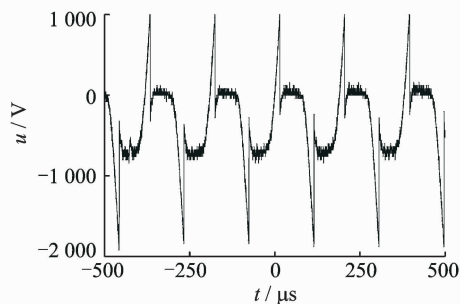
(a) Discharge photo of disc plasma igniter(Nanosecond power)



(b) Voltage of disc plasma igniter(Nanosecond power)



(c) Discharge photo of disc plasma igniter(Microsecond power)



(d) Voltage of disc plasma igniter(Microsecond power)

图 4 圆柱等离子体点火器的放电特性试验

Fig. 4 Discharge experiment of cylindrical plasma igniter

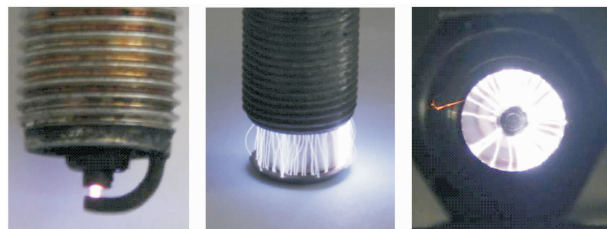
极的螺纹表面尖端构成了曲率半径很小的电极, 与阴极套筒的内表面形成了非均匀电场, 击穿引起刷状放电。另外, 在纳秒电源下放电过程阴阳极之间的流注较在微秒电源下放电过程的流注更细, 分布更密集。由电压曲线可以得到纳秒电源下的圆柱等离子体放电阈值电压为 10.9 kV, 微秒电源下的圆柱等离子体放电阈值电压峰-峰值为 3.04 kV。

从碟形等离子体点火器和圆柱等离子体点火

器的放电过程可以看到, 等离子体点火器点火区域有大量的流注, 电子碰撞裂解会出现在流注通道中, 分子发生电离反应生成的等离子体活性大幅提高, 在混合气中极易发生燃烧反应, 扩大可燃极限。研究表明, 大量的点火流注使得点火的余气系数范围显著增大, 点火特性和燃烧特性得到增强, 特别是改善贫油条件下的点火特性具有明显效果。

2.3 碟形/圆柱等离子体点火器与火花塞点火器的放电对比

将碟形等离子体点火器和圆柱等离子体点火器与普通火花塞点火器进行对比试验, 对比照片如图 5 所示。从图中可以看出, 火花塞点火器由于结构限制, 其点对点式的放电使得放电点火区域很小。圆柱等离子体点火器和碟形等离子体点火器与传统的火花塞点火器不同, 它的特殊结构使得放电点火区域更大, 阴极和阳极之间会产生大量丝状发光流注, 大范围的点火流注使得点火能量与混合气完全耦合, 可在较大范围内快速点着可燃混合气。



(a) Spark igniter (b) Disc plasma igniter (c) Cylindrical plasma igniter

图 5 等离子体点火与火花塞点火的放电对比

Fig. 5 Comparison between spark igniter and plasma igniters

2.4 气体压力变化对等离子体点火器放电特性的影响

使用设计制作的压力密封试验舱, 以碟形等离子体点火器为研究对象, 进行气体压力变化时的放电试验。试验过程中发现在负压状态下放电现象有较大变化, 呈现由电晕放电向电弧放电转变, 且气体密度小, 相对变化量较大。为得到较为精准的临界放电电压拟合曲线, 在低气压负压试验段采用较高的采样频率, 每 0.005 MPa 记录一个采样点。在正压试验段, 试验现象总体较为相似, 仅在较高的气压条件下才会出现单点火光放电, 将采样频率降低, 每 0.01 MPa 记录一个采样点。试验过程中, 为了保证试验初始条件的一致性, 每次放电后更换密封舱内空气, 避免已产生的等离子体如臭氧等物质影响下次放电。通过反复试验得出初始电

极距离为 3.5 mm 时碟形等离子体点火器的阈值放电电压曲线如图 6 所示。

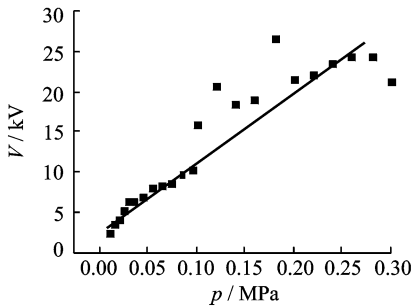


图 6 碟形等离子体点火器阈值放电电压与气压的关系

Fig. 6 Threshold discharge voltage of disc plasma ignition versus pressure

由图 6 可知,随着密封舱内的空气气压的逐渐升高,碟形等离子体点火器的临界放电电压不断增大。这是因为随着空气气压的不断升高,空气分子密度不断加大,对于电极的击穿放电要求有更高的电压来驱动,在负压区由于空气分子稀薄,电极的击穿放电极为容易,由试验可知,气压低于 0.05 MPa 时,会出现偏紫色的预击穿辉光,这是由于空气稀薄,使带电粒子在电极间能够加速到碰撞裂解的所需动能,未击穿时即产生了一定量的激发态等离子体,并放出辉光。此时的放电形式符合汤生火花放电条件

$$\gamma(e^{\alpha l} - 1) = 1 \quad (1)$$

式中: γ 为正离子的表面电离系数; α 为汤生第一电离系数; l 为电极间距离。即假设最初从阴极溢出一个初始电子,该电子在电场力作用下加速的同时不断进行电离碰撞,到达阳极时电子数增至 $e^{\alpha l}$ 个。在这个过程中生成的离子数就相当于从这些电子数中减去一个电子,这些正离子最终都将轰击阴极而导致二次电子逸出。逸出的二次电子继续进行以上反应,快速得到电离通道。使得低气压条件下放电电压较低。根据帕邢定律,击穿电压由气体压强 p 和电极间距离 l 的乘积所决定,并具有最小值。根据击穿电压公式

$$V = \frac{Bpl}{\ln(Apl/\varphi)} \quad (2)$$

式中: V 为电压; A 和 B 为常数; φ 为离子撞击阴极时所发生的电子发射的过程。试验数据取自固定的放电间距,由低压部分可以看出,击穿阈值电压随气压增加呈线性上升,基本符合帕邢定律的放电公式。到达 0.1 MPa 以上的高气压区时,放电阈

值电压会偏离帕邢定律,在低电压下就可以发生绝缘击穿。用汤生理论无法解释这一现象,其关键在于从施加电压到产生火花放电的过度现象,不再是依据汤生理论的离子轰击阴极导致的二次电子逸出,而是阴极电子崩向阳极推进而形成的流注导致最终的击穿。气压进一步增加至 0.2 MPa 以上,由于空气密度较大,多处同时击穿难以实现,一旦出现某点的率先击穿,必使该处的空气间隙中产生较多的等离子体形成指定流路,其他点由于击穿难度大而不会击穿,导致单点的击穿放电现象。同时,由于空气中的水蒸气和杂质等物质也会影响放电击穿电压的值。最终使得在高气压放电时,放电阈值电压会偏离帕邢定律。

3 结 论

本文根据等离子体放电理论,设计了 3 种不同形式的等离子体点火器:环形等离子体点火器、碟形等离子体点火器和圆柱等离子体点火器。对于不同的等离子体点火器,研究了在不同电源激励形式、不同电压、不同气体压力条件下的点火器放电特性,主要结论包括:

(1)设计的 3 种等离子体点火器能够有效地产生等离子体放电流注,等离子体点火器与普通火花塞点火器的点火对比表明,等离子体点火器的特殊结构使得放电点火区域更大,阴极和阳极之间会产生大量丝状发光流注,大范围的点火流注使得点火能量与混合气完全耦合,可在较大范围内快速点着可燃混合气。

(2)得到了碟形等离子体点火器阈值放电电压与气压的关系,随着放电环境的空气气压的逐渐升高,等离子体点火器的临界放电电压不断增大。在低气压时,击穿阈值电压随气压增加呈线性上升,基本符合帕邢定律的放电公式,在高气压时,放电阈值电压会偏离帕邢定律。

参考文献:

- [1] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [2] 葛袁静, 张广秋, 陈强. 等离子体科学技术及其在工业中的应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011.
- [3] Starikovskaia S M, Yu S A. Plasma-assisted ignition and combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 61-110.
- [4] Leonov S, Yarantsev D, Napatovich A, et al. Plas-

- ma-assisted ignition and flame holding in high-speed flow[R]. AIAA-2006-563,2006.
- [5] Tardiveau P, Marode E, Agneray A. Tracking an individual streamer branch among others in a pulsed induced discharge[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(21): 2823-2829.
- [6] Nudnova M M, Pancheshnyi S V, Starikovskii A Y. Non equilibrium plasma formation by high-voltage pulsed nanosecond gas discharge at different pressures[R]. AIAA-2004-0353,2004.
- [7] Robert E, Sarron V, Riès D, et al. Characterization of pulsed atmospheric-pressure plasma streams (PAPS) generated by a plasma gun [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2012, 21 (3): 034017.
- [8] Zhu J, Gao J, Li Z, et al. Sustained diffusive alternating current gliding arc discharge in atmospheric pressure air[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105 (23): 234102.
- [9] Cathey C D, Tao Tang, Taisuke Shiraishi, et al. Nanosecond plasma ignition for improved performance of an internal combustion engine [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(6): 164-1668.
- [10] Matveev I, Matveeva S, Gutsol A. Non-equilibrium plasma igniters and pilots for aerospace application [R]. AIAA-2005-1191,2005.
- [11] Naples A, Tao Sheng, Yu J, et al. Pressure scaling effects on ignition and detonation initiation in a pulse detonation engine[R]. AIAA-2009-1062, 2009.
- [12] Shuzenji K, Tachibana T. Superiority of oxygen as feedstock for a plasma jet igniter in supersonic methane/air streams[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29:875-881.
- [13] Sinibaldi J O, Rodriguez J, Channel B, et al. Investigation of transient plasma ignition for pulse detonation engines[R]. AIAA 2005-3774,2005.
- [14] Busby K, Corrigan J, Yu Shengtao, et al. Effects of corona, spark and surface discharges on ignition delay and deflagration-to-detonation times in pulsed detonation engines[R]. AIAA-2007-1028,2007.
- [15] Ju Y, Sun W. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 48: 21-83.
- [16] Do H, Mungal M C, Cappelli M A. Jet flame ignition in a supersonic crossflow using a pulsed nonequilibrium plasma discharge[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008,36(6):2918-2923.
- [17] Li G, Gutmark E J. Application of transient non-thermal plasma actuator in a swirl-stabilized gas turbine combustor[R]. AIAA-2004-4027,2004.
- [18] Cathey C D, Tao Tang, Taisuke Shiraishi, et al. Nanosecond plasma ignition for improved performance of an internal combustion engine [J]. *IEEE Transactions On Plasma Science*, 2007,35(6):1664-1668.
- [19] 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]. 2015-01-01.
- [20] 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]. 2014-01-01.

