# 直流电压等离子体点火器点火特性研究

## 王 峰,何立明,兰宇丹,杜宏亮

空军工程大学工程学院,陕西西安 710038

摘 要 使用自行设计的等离子体点火装置,对极间电流随进口氩气压力的变化规律以及不同进口氩气压 力和工作电流条件下等离子体点火器出口射流特性进行了实验研究。利用四通道 CCD 光谱仪测量了点火器 出口处的发射光谱特征,并计算了等离子体的电子温度。结果表明,极间电流随进口氩气压力的增大而逐渐 减小,等离子体点火器的射流长度随进口氩气流量的增大先增大后减小,随工作电流的增大而增大,等离子 体点火器的工作电流随进口氩气流量的增大而减小,随电源输出电流增大而增大,等离子体射流的电子温 度随氩气流量的增大而降低,随工作电流的增大而升高。所得结果对等离子体点火系统在航空发动机的实 际应用具有一定的指导意义和参考价值。

关键词 等离子体;极间电流;射流长度;电特性;光谱特征;电子温度 中图分类号:O536 文献标识码:A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)09-2503-05

## 引 言

等离子体点火技术是基于等离子体的高速射流所固有的 理化特征发展起来的一种高效点火技术,与常规火花点火器 采用的热能机理相比,它是依靠高温等离子体的高速射流效 应(核心温度达到 5 000 K), 当等离子体以高速射流方式喷 射到燃烧介质中时,会产生化学和气动双重效应,从而快速 点燃可燃混合气,它具有点火能量大、火舌穿透力强等优 点,有利于提高在恶劣工作条件下(特别是高空)发动机再次 起动的可靠性和实现航空发动机高速燃烧器的点火(包括冲 压喷气发动机高超声速燃烧器点火)[1-3]。2003 年俄罗斯科学 研究院高温研究所利用等离子体发生器形成了稳定的等离子 体,进行了等离子体点火实验<sup>[4]</sup>,结果表明,等离子体点火 可以有效提高点燃可燃混合气的可靠性; 2007 年美国南加里 福尼亚南方大学 Liu 等进行了脉冲爆震发动机等离子体点火 实验<sup>[5]</sup>,实验结果表明,等离子体点火可以减小起爆时间, 增加重复频率, 缩短爆燃到爆震的延迟时间, 达到原来的 1/  $2\sim 1/9$ : 2008 年 Aleksandrov 等<sup>[6]</sup> 研究分析了等离子体点火 的动力学机理,结果表明等离子体点火可以减少可燃混合物 的点火延迟时间; 2009年美国俄亥俄州立大学机械工程系非 平衡热力学实验室在宽范围脉冲频率和当量比下测量了等离 子体激励预混乙烯-空气流的点火延迟时间[7],结果表明等 离子体产生的活性粒子参加链锁反应能减少点火延迟时间两

个数量级,点火温度降低到 300 K; 2009 年美国斯坦福大学 机械工程系 Kim 小组<sup>[8]</sup>研究了五种不同火焰结构下的纳秒 脉冲放电帮助火焰稳定,结果表明对于超音速氢气射流横向 结构,点火延迟时间在纳秒脉冲放电时的稳定穴内下降了 50%。近年来,等离子体点火技术等方面的研究得到了国内 和国外研究者的广泛关注<sup>[9,10]</sup>,深入研究等离子体点火器特 性、研制出高效可靠的等离子体点火系统对于等离子体点火 技术的工程实际应用具有十分重要作用。

## 1 等离子体点火实验装置

本文等离子体点火实验所采用的实验系统示意图如图 1 所示,主要由等离子体点火器、等离子体点火驱动电源、供 气系统、测量设备等组成。

等离子体点火驱动电源是自行研制的,即采用机载电源 (24 V)供电,设计高电压、大直流组合电源,包括高频高压 脉冲输出(3 kV)和大电流直流输出(40 A)两种输出通道,其 中输出的高压脉冲用于引弧放电,大电流直流电源用于放电 后维持等离子弧。在无工作介质条件下,打开等离子体点火 电源开关,启动等离子体点火器,测量得到了等离子体点火 电源输出的高频高压脉冲,如图 2 所示,其峰-峰值电压为 3 kV。

等离子体点火器的基本工作原理是:当工作介质(氩气) 通过阴、阳两电极间时,等离子体点火驱动电源产生高频高

收稿日期: 2010-04-27,修订日期: 2010-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50776100)资助

作者简介:王 峰,1983年生,空军工程大学工程学院博士研究生

e-mail: wangfeng198311@163.com



Fig. 1 Schematic of ignition experiment system



of plasma ignition power

压放电击穿工作介质,同时产生温度很高的等离子体弧,并 以很高的速度从点火器出口喷出,穿透并深入到燃烧室可燃 混合气中,迅速点燃可燃气体。等离子体点火器也是自行设 计的,其阴极与阳极采用既可耐高温、腐蚀又具有良好导电 性能的钨铜合金制作而成,等离子体点火器最外层采用绝缘 介质胶木进行绝缘,等离子体点火器内层采用耐高温材料氧 化铝陶瓷进行绝缘。

2 等离子体点火实验结果与分析

等离子体点火实验采用惰性气体氩气作为工作介质,这 样既可以保护等离子体点火器阴阳电极,又可以防止出现电 极放电不稳定现象和使用寿命缩短等问题。等离子体点火器 两电极间的电流和电压使用组合探针(包括高压探针和电流 探针)进行测量,并将测到的结果连接到数字示波器中进行 记录,等离子体点火器出口处的光谱特征使用 Ocean Optics 公司生产的四通道 CCD 光谱仪测量,等离子体射流特征采 用相机拍照记录。

#### 2.1 等离子体点火器的射流特性

当改变等离子体点火器进口氩气压力时,对等离子体点 火器极间电流进行了测量,得到了等离子体点火器的极间电 流随进口氩气压力的变化规律如图 3 所示。



Fig. 3 Interelectrode current vs. inlet Ar pressure

由图 3 可以看出,极间电流随进口氩气压力的增大而逐 渐减小,当压力由 0.5 atm 增至 4.5 atm 时,极间电流由 18 A 降低至 8.6 A。进口氩气压力继续增大,极间电流的变化 率增大,当压力达到 5 个大气压左右时,极间电流变为零, 等离子弧最终被吹断。

电极被击穿时的等离子弧相当于一个电阻,等离子弧长 度越长,相当于极间电阻的长度越长,电阻的阻值就越大, 在维持电压不变的情况下,电流就会逐渐变小。当进口氩气 压力增大时,等离子体点火器出口的气流速度会相应增大, 此时的等离子弧遇到高速气流会变弯曲,气流速度越高,等 离子弧弯曲度越高,等离子弧长度越大,电流就会变小。当 等离子弧弯曲度达到极限时,继续增大进口氩气压力,等离 子弧最终将被吹断,两电极之间出现断路,从而出现电流为 零的情况。另外从图3还可以看出,在等离子弧被吹断之前, 随着进口氩气压力增大极间电流的变化率增大,说明在高进 口氩气压力状态下氩气流速增大,导致点火器内等离子弧所 受的应力增大,等离子弧长度增长,造成极间电阻更大,而 且极间电阻是随气氩气流量增加非线性增大的,进口氩气压 力越大极间电阻阻值增大的越多。

图 4 给出的是不同工作电流条件下等离子体点火器射流 长度随进口氩气流量的变化规律。



Fig. 4 Jet length of plasma ignitor vs. Ar flowrate

从图 4 可以看到, 点火器出口的射流长度在不同工作电

流条件下随进口氩气流量的增大先增大后减小,等离子体点 火器的射流长度大约在进口氩气流量为 250 L・h<sup>-1</sup>时达到 最大值。而随着工作电流的增大,射流长度不断增大,在进 口氩气流量大于 250 L・h<sup>-1</sup>时,点火器出口射流长度的增幅 逐渐减小。这是由于当增大点火器进口氩气流量时,其出口 的等离子体射流速度就会增大,等离子体射流长度也会随之 增长。当进口氩气的流量超过一定程度时,通过等离子体弧 的氩气流热效率会急剧降低,进口氩气流甚至可能将电弧吹 断,致使等离子体点火器出口的射流长度急剧缩短。而随着 工作电流的增加,等离子体弧功率增大,电弧对通过的氩气 流加热功率增加,氩气流能量增大,其中有一部分能量转化 为点火器出口射流的动能<sup>[11,12]</sup>,导致点火器出口的等离子体 射流速度不断增大,射流长度不断增长,其照片如图 5 所示。





Fig 5 Pictures of jet length of plasma ignitor with different inlet Ar flowrate and working current

### 2.2 等离子体点火器的电特性

不同等离子体点火驱动电源输出电流条件下,随着进口 氩气流量的增大,等离子体点火器工作电流的变化规律如图 6 所示。

从图 6 可以看出,等离子体点火器的工作电流随进口氩 气流量的增大而减小,随着等离子体点火驱动电源输出电流 的增大而增大。

当增大等离子体点火器进口氩气流量时,点火器阴阳两 电极间的工作电流会逐渐减小,使得对等离子弧的加热功率 也不断减小,这是因为随进口氩气流量逐渐增大,等离子体 弧柱受到氩气流的冷却作用会增强,其压缩程度也会随之增 大,导致等离子弧截面变小,同时点火器的阳极斑点会移向 喷嘴的下方<sup>[13]</sup>,增长了等离子弧的长度,增大了两电极之间 的间隙电阻,而等离子体点火器阴阳两电极间维弧电压保持 不变,致使工作电流减小,等离子弧的加热功率降低。



Fig 6 Working current vs. Ar flowrate

当增大等离子体点火驱动电源输出电流,等离子体点火 器的工作电流会随之增大,这是因为增大驱动电源的输出电 流,输出功率会随之增大,而等离子体点火器阴阳两电极之 间的维弧电压保持不变,那么等离子体点火器的工作电流就 会升高,等离子弧的加热功率会增大。

2.3 等离子体射流的光谱特征

图 7 给出的是进口氩气流量为 100 L • h<sup>-1</sup>, 工作电流为 10.3 A 时, 等离子体点火器出口处测得的等离子体射流光 谱特征。



Fig 7 Jet optical spectrum at the exit of ignitor

在局部热平衡条件下,放电等离子体中电子动能分布应 近似满足波耳兹曼分布规律,碰撞激发至各能级的粒子数亦 满足此分布规律<sup>[14]</sup>,即

$$\frac{N_m}{N_n} = \frac{g_m}{g_n} \exp\left(-\frac{E_m - E_n}{kT_e}\right) \tag{1}$$

式中: $N_m$ 和 $N_n$ 为相应m和n能级的粒子数密度; $g_m$ 和 $g_n$ 为相应m和n能级的统计权重; $E_m$ 和 $E_n$ 为相应m和n能级的能量。在等离子体电子温度测量中,选取属于同一元素的原子或离子的跃迁谱线,其谱线强度<sup>[14-15]</sup>为

$$I = NAh_{\nu} \tag{2}$$

式中: $\nu$ 为能级间的跃迁频率;h为普朗克常数;A为跃迁概

率,联立式(1)和(2)可得<sup>[14]</sup>

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT_e}\right)$$
(3)

式中: 下标 1 和 2 分别表示第一与第二条谱线;  $\lambda$  是波长, 则 由式(3)可得电子温度计算公式

$$T_{\rm e} = \frac{E_1 - E_2}{k \left( \ln \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} - \ln \frac{I_1}{I_2} \right)} \tag{4}$$

因此,根据等离子体点火实验利用光谱仪测到的等离子 体点火器出口处射流光谱特征,等离子体的电子温度可以通 过式(4)计算得到。图 8 给出了不同等离子体点火器进口氩 气流量条件下,点火器出口射流的电子温度随工作电流的变 化关系。



Fig. 8 Jet electron temperature vs. working current

由图 8 可以知道,随着进口氩气流量的增大,等离子体 点火器出口射流的电子温度不断降低,而随着工作电流的增 大,等离子体射流的电子温度不断升高。

当进口氩气流量的不断增大时,等离子体点火器出口射 流的电子温度不断降低,这是由于随着进口氩气流量的增

### References

大,点火器的等离子弧的热功率会下降,同时会降低点火器 出口等离子体射流的温度,由于粒子的光谱强度与其温度成 正比例关系<sup>[16]</sup>,从而使得射流的光谱强度减弱,不同谱线间 的相对强度也随之减弱,由式(4)可知电子温度也随之降低。

而当工作电流不断增大时,等离子体点火器出口射流的 电子温度不断升高,这是由于等离子弧的维弧电压保持不 变,随着工作电流的增大,等离子弧的加热功率增大,对通 过其间的氩气流加热增强,使得氩气流能量增大,等离子体 点火器出口射流温度升高,光谱强度增强,不同谱线间的相 对强度也增强,所以电子温度也随之升高。

## 3 结 论

本文通过对极间电流随进口氩气压力的变化以及不同参 数条件下等离子体点火器的射流特性、电特性以及射流光谱 特征的实验研究,得到如下结论:

(1)随着进口氩气压力的增大,等离子弧弯曲度增大, 等离子弧长度增长,极间电流逐渐减小,但其变化率不断增 大,当压力达到5个大气压左右时,等离子弧被吹断,极间 电流变为零。

(2)在不同工作电流条件下,随着进口氩气流量的增大, 等离子体点火器的射流长度先增大后减小,射流长度在进口 氩气流量为 250 L·h<sup>-1</sup>时达到最大值,而随着工作电流的增 大,射流长度不断增大,射流长度在进口氩气流量大于 250 L·h<sup>-1</sup>时增幅减小。

(3)等离子体点火器的工作电流随着进口氩气流量的增 大不断减小,随着电源输出电流的增大不断增大。

(4)等离子体射流的电子温度随等离子体点火器工作电流的增大不断升高,随等离子体点火器进口氩气流量的增大不断降低。

- [1] Rodney Meyer, Bryan McEldowney, Naveen Chintala, et al. Experimental Studies of Plasma Assisted Ignition and MHD Supersonic Flow Control. AIAA, 2003-0873.
- [2] Williams S, Popovic S, Vuskovic L, et al. Model and Igniter Development for Plasma Assisted Combustion. AIAA, 2004-1012.
- [3] Igor Matveev, Svetlana Matveeva. Non-Equilibrium Plasma Igniters and Pilots for Aerospace Application. AIAA, 2005-1191.
- [4] Bozhenkov S M, Starikovskaia S M, Sechenov V A, et al. Combustible Mixtures Ignition in a Wide Pressure Range Nanosecond High-Voltage Discharge Ignition. AIAA, 2003-876.
- [5] Liu Jianbang, Ronney Paul D, Wang Fei, et al. Transient Plasma Ignition for Lean Burn Applications. AIAA, 2003-877.
- [6] Aleksandrov N L, Ivanov G V, Kindusheva S V. Kinetics of Plasma Assisted Ignition at Elevated Temperatures: Experiments and Modelling. AIAA, 2008-1363.
- [7] Jose O Sinibaldi, Joel Rodriguez, Brent Channel, et al. Investigation of Transient Plasma Ignition for Pulse Detonation Engines. AIAA, 2005-3774.
- [8] Timothy Ombrello, Sang Hee Won, Yiguang, et al. Ju Lifted Flame Speed Enhancement by Plasma Excitation of Oxygen. AIAA, 2009-0689.
- [9] Klimov A, Bityurin V, Moralev I, et al. Plasma Assisted Ignition and Combustion. AIAA, 2005-3428.
- [10] Igor Matveev, Svetlana Matveev, Evgeniy Kirchuk. Non-Thermal Plasma Igniter for High Speed Flows. AIAA, 2009-1556.
- [11] Pan W X, Zhang W H, Zhang W H, et al. Plasma Chem. Plasma Process., 2001, 21(1): 23.
- [12] PAN Wen-xia, MENG Xian, WU Cheng-kang(潘文霞, 孟 显, 吴承康). Journal of Engineering Thermophysics(工程热物理学报), 2005, 26(4): 677.

2506

[13] WANG Feng-hua, JIN Zhi-jian, ZHU Zi-shu(王丰华, 金之俭, 朱子述). High Voltage Apparatus(高压电器), 2005, 41(4): 241.

[14] Griem H R. Plasma spectroscopy. New York: Mc Graw-Hill, 1964.

[15] Lochte-Holthreven W. Plasma Diagnostics. Amester-Dam. North-Holland, 1968.

[16] REN Qing-lei, LIN Qi(任庆磊,林 麒). Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory(光谱实验室), 2007, 24(5): 839.

# Study of Ignition Characteristic of DC Voltage Plasma Ignitor

WANG Feng, HE Li-ming, LAN Yu-dan, DU Hong-liang

The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

**Abstract** The changing law between interelectrode current, discharge characteristic and jet characteristic of plasma ignitor under different inlet Ar pressure and working current was researched by adopting self-made plasma ignitor. Still, four channels CCD spectrometer was adopted to measure the spectrum characteristic at the exit of ignitor and electron temperature of plasma was calculated according to the spectrum characteristic. The results show that the interelectrode current gradually reduced with rising inlet Ar pressure; The jet length of plasma ignitor firstly increased then reduced with rising inlet Ar flowrate, and also increased with rising working current; The working current of plasma ignitor jet increased with rising working current and reduced with rising Ar flowrate. The research results are of certain guidance meanings and reference values for the practical application of plasma ignition system in aeroengine.

Keywords Plasma; Interelectrode current; Jet length; Electricity characteristic; Spectrum characteristic; Electron temperature

(Received Apr. 27, 2010; accepted Jul. 20, 2010)