

阳极通道长度对等离子体射流点火器 特性影响的实验研究*

戴文峰¹, 何立明¹, 张华磊¹, 陈高成¹, 赵子晨¹, 祁文涛²

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 解放军94973部队, 浙江 杭州 310000)

摘要: 为进一步优化等离子体射流点火器的结构, 提高点火器的工作性能, 在自主设计的等离子体点火实验系统的基础上, 开展了阳极通道长度对等离子体射流点火器特性影响的实验研究, 选取的阳极通道长度为3mm, 5mm和7mm。获得了等离子体射流点火器的放电特性、光谱特性、射流特性和点火特性。结果表明: 增大阳极通道长度能够抑制电弧分流的幅度, 减小电极的烧蚀面积, 但提高了击穿电压, 使引弧更加困难; 随着阳极通道长度的增大, 氮分子离子的转动温度和振动温度分别呈现出先升高后降低和先降低后升高的变化趋势; 煤油/空气混合气的点火延迟时间随阳极通道长度的增加, 呈现出先减小后增大的变化趋势, 余气系数为1.43时, 阳极通道长度5mm时的点火延迟时间为14.4ms, 相对于阳极通道长度3mm, 7mm下的点火延迟时间分别减小了21.1%, 12.1%。

关键词: 等离子体射流点火; 阳极通道长度; 放电特性; 光谱特性; 点火延迟

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 07-1568-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2018.07.016

Experimental Investigation for Effects of Anode Channel Length on Characteristics of Plasma Jet Igniter

DAI Wen-feng¹, HE Li-ming¹, ZHANG Hua-lei¹, CHEN Gao-cheng¹, ZHAO Zi-chen¹, QI Wen-tao²

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

2. Chinese People's Liberation Army with Number of 94973, Hangzhou 310000, China)

Abstract: For optimizing the structure of plasma jet igniter and improving its performance, the effect of anode channel length, including discharge characteristic, spectrum characteristic, jet characteristic and ignition characteristic, were studied experimentally on the basis of the self-designed plasma ignition experimental system. The selected anode channel length is 3mm, 5mm and 7mm. The results indicate that with the increasing of the anode channel length the magnitude of the arc shunting is suppressed, the ablation area of the electrode is reduced, but the elongation of anode channel will lead to breakdown voltage increase, and the arc ignition process will be more difficult. With the increasing of anode channel length, rotational temperature of nitrogen molecular ions is rising firstly and then decreasing, while vibrational temperature shows the opposite trend. And the ignition delay time of kerosene/air mixture shows the trend of decreasing firstly and then increasing. When excess air coefficient is 1.43, the ignition delay time of 5mm anode channel length is 14.4ms. Compared with the 3mm and 7mm anode channel length, the ignition delay time is reduced by 21.1% and 12.1%, respectively.

Key words: Plasma jet ignition; Anode channel length; Discharge characteristic; Spectrum characteristic; Ignition delay

* 收稿日期: 2017-10-18; 修订日期: 2017-12-04。

基金项目: 国家自然科学基金 (51436008)。

通讯作者: 戴文峰, 男, 硕士生, 研究领域为等离子体点火与助燃。E-mail: 593810732@qq.com

1 引言

等离子体射流点火的基本原理是在电极间导入工作介质气体后,在驱动电源的作用下,产生电弧放电,由于放电产生在很小的受限空间内,电弧放电产生的高温会加热工作介质,形成高温、高速的等离子体射流来点燃混合气的。等离子体射流点火具有点火能量大、火舌穿透力强、点火延迟时间短等特点,能较大提高发动机在恶劣工作条件下的点火可靠性和燃烧稳定性,是航空航天动力领域极有前途的高能点火技术^[1]。

燃烧室等离子体点火技术研究主要集中在等离子体点火器参数测试与诊断、可燃混合气等离子体点火特性两个方面。等离子体点火器工作特性是基础和关键,其性能直接决定了等离子体激励的性能。等离子体点火器特性主要包括放电(电压、电流等)、温度、速度、化学等特性。提升可燃混合气的燃烧性能是实施等离子体点火的最终目的,体现等离子体点火的技术优势和特点,主要包括扩大点火边界、缩短点火延迟时间、减小最小点火能量、提高火焰传播速度等。国内外学者围绕等离子体点火器特性、等离子体激励下可燃混合气的燃烧特性等方面进行了大量的研究工作。

Ainan Bao等^[2~4]进行了以甲烷、乙烯等与空气混合气的等离子体点火实验,利用光谱仪测量了等离子体点火器产生的发射光谱。实验结果表明,在等离子体射流中H、O、OH等粒子在等离子体强化燃料燃烧的化学反应中起主导作用,能够显著减小油气混合气的点火延迟时间。JianBang Liu等^[5~8]以甲烷、丙烷为燃料与空气进行混合,分别利用电火花点火与等离子体点火两种方式点燃可燃混合气体。研究表明,由于等离子体点火过程中更容易形成火焰高温核心区域,产生的等离子体射流中包含更多对化学反应起促进作用的活性粒子,因此以等离子体点火方式对可燃混合气进行点火过程中所产生的上升时间、点火延迟时间以及峰值压力比电火花点火过程要小得多。国内方面,何立明教授^[9~14]研究团队对等离子体强化燃烧做了大量开创性工作,主要分为两部分,一是等离子体时空演化特性的研究,研究了不同电压、频率放电空间各粒子浓度的演化规律;二是等离子体强化燃烧的实验研究。初步提出了等离子体强化燃烧的宏观作用机理,即热效应、化学效应、气动效应,填补了国内在等离子体强化燃烧领域的空白。

在等离子体射流点火器的设计中,阳极的结构参数对点火器的性能有着重要影响,如射流穿透深度、射流温度等。为进一步优化等离子体射流点火器的结构、提高点火器的工作性能,加深对等离子体点火器射流与气流之间相互作用的认识,本文开展了阳极结构形式(阳极通道长度)对等离子体射流点火器特性影响的实验研究,获得了不同阳极通道长度对等离子体点火器的放电特性、光谱特性、射流特性和点火特性的影响规律。

2 实验系统

2.1 点火实验系统

等离子体射流点火实验系统主要由供气系统、供油系统、参数测试系统、点火系统和实验燃烧室五个子系统组成,其示意图如图1所示。

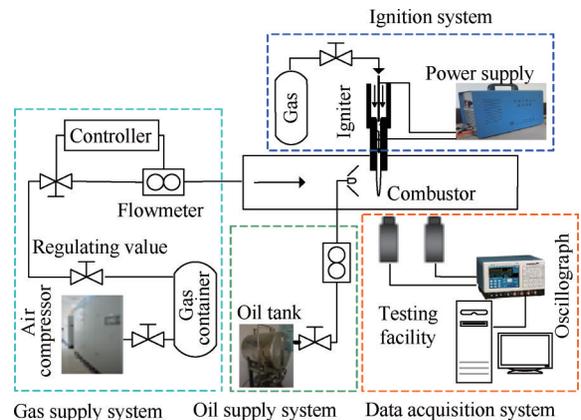


Fig. 1 Schematic of plasma jet ignition system

供气系统由单螺杆式空气压缩机(OGFD-42.8/8B, 42.8m³/min)向储气罐提供压缩气体,通过电动调节阀(ZDLP 16)和内锥流量计(DYNZ16-8001E12)组合进行空气流量的控制,利用差压变送器、压力变送器、温度变送器组合测量空气体积流量。供油系统由柱塞泵、油滤、燃油流量计、离心式喷嘴及连接管路等组成,最大供油量 70L/min,燃油流量由KRACHT 齿轮流量计进行测量,燃油喷嘴为离心式喷嘴,喷雾锥角为 60°。点火系统主要包括等离子体点火驱动电源、等离子体点火器、气瓶及质量流量控制器。

参数测试系统主要包括电压电流探针、示波器、光谱仪、光电倍增管、高速 CCD 组成。电压、电流信号分别由高压探针 Tektronix P6015A、Tektronix TCP0030 进行测量,并由 Tektronix DPO4104B 四通道数字荧光示波器记录和保存。发射光谱信息由 Avantes AvaSpec-ULS2048-4-USB2 四通道光纤光谱

仪测量。采用两个距离 150mm 的 Zolix PMTH-S1 CR131 型光电倍增管获得等离子体点火器的点火延迟特性,其中一个光电倍增管利用氧原子滤波片记录点火起始时刻,另一个光电倍增管利用甲基滤波片记录点火过程完成时刻。

实验燃烧室主要由燃油管路接口、点火器安装座、锥形火焰稳定器、离心式喷油嘴、前后观察窗等组成,内径为 100mm,长度为 545mm。点火系统通过点火器安装座与实验燃烧室连接,示意图如图 2 所示。

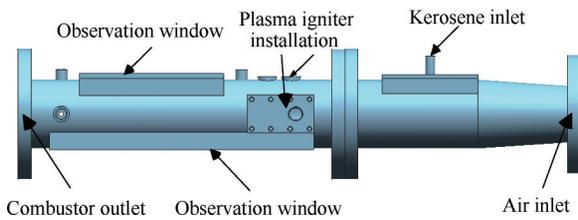


Fig. 2 Schematic of experimental combustion chamber

2.2 等离子体射流点火器

本文采用非转移弧式直流电弧等离子体射流点火器,点火器的电极结构示意图如图 3 所示。等离子体射流点火器电极的主要特征参数为阴极直径、旋流孔切角、阳极压缩角、阳极通道长度、阳极通道直径、阳极扩张段角、阳极扩张段长度等。本文主要研究阳极通道长度对等离子体射流点火器特性的影响,选取的阳极通道长度分别为 3mm, 5mm, 7mm, 其他参数固定,其中阴极直径 2mm,旋流器旋切角 30° , 阳极压缩角为 45° , 阳极通道直径为 4mm, 阳极扩张角 60° , 扩展段长度 2mm。

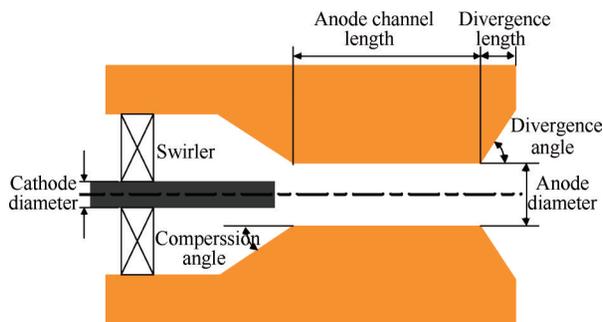


Fig. 3 Schematic of air plasma jet igniter

3 实验结果分析

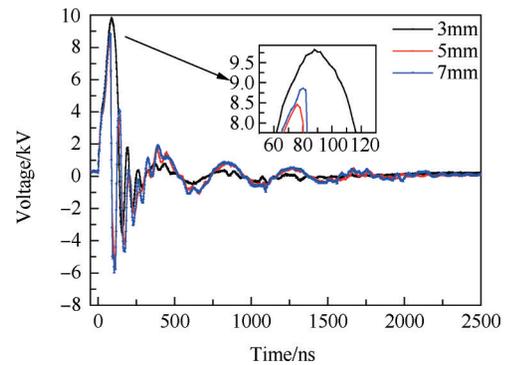
3.1 等离子体点火器的放电特性

放电特性是等离子体点火器最重要的特性之一,也是点火器射流中最重要的参数。根据点火器工作特点,本文分两个过程对其进行研究。一是气

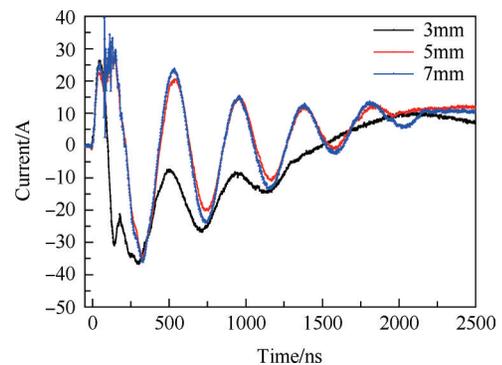
体击穿过程,即工作介质气体被阴阳极间高频、高压脉冲击穿形成电弧放电过程;二是维持电弧过程,即点火器驱动电源维持电弧放电过程。

3.1.1 阳极通道长度对气体击穿过程的影响

等离子体点火器的驱动电源输出电流为 30A,工作介质流量为 55.0g/min 时,在不同的阳极通道长度下,工作介质气体击穿过程中的电压、电流波形如图 4 所示。



(a) Waveform of breakdown voltage



(b) Waveform of breakdown current

Fig. 4 Electrical signal waveform of gas breakdown process

由图 4 可知,在不同阳极通道长度的情况下,起弧瞬间后的 76~88ns 之内,击穿电压、电流达到各自相应的峰值。阳极通道长度为 5mm 时,击穿电压上升最快,上升时间为 76ns,阳极通道长度为 3mm 时,击穿电压上升最慢,上升时间为 88ns,此后击穿电压、电流开始震荡衰减;阳极通道长度越长,击穿过程中的电压、电流震荡越剧烈,振动幅值越大,对电极的烧蚀程度越大。

图 5 所示为气体击穿过程的特征值(击穿电压(a)、电流峰值(b)和击穿过程稳定时间(c))随阳极通道长度的变化。

由图 5(a)、(b)可以知,随着阳极通道长度的不断增加,击穿电压、电流峰值呈现先减小后增大的变化趋势,不同阳极通道长度下的击穿电压峰值相差 400~1400V,击穿电流峰值相差 3~4A;从图 5(c)中

可以看出,击穿过程的稳定时间随阳极通道长度的增大而增大,不同阳极通道长度下的击穿时间相差200~700ns。由此可得,阳极通道长度为5mm时,最容易起弧,即该尺寸的等离子射流点火器对点火驱动电源的击穿性能要求最低。

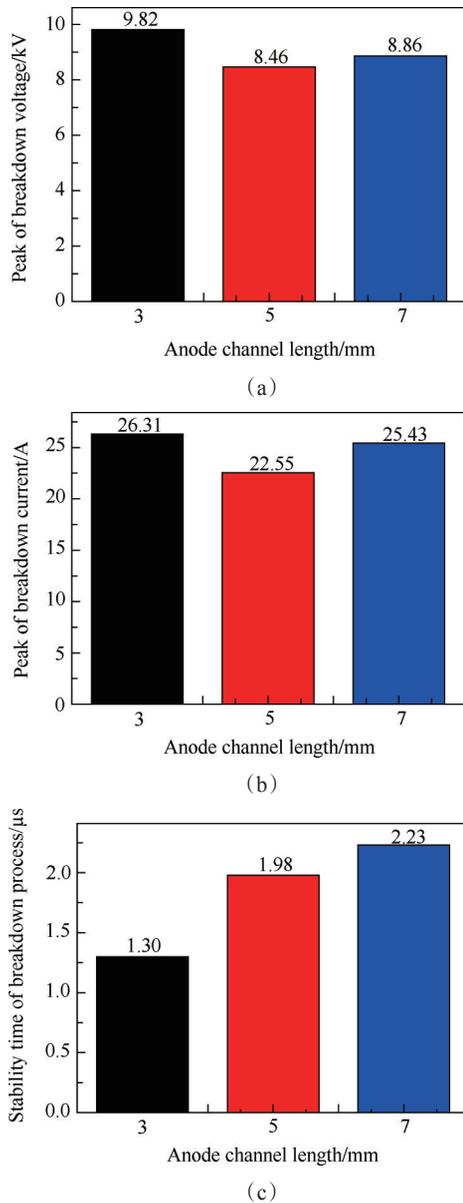


Fig. 5 Characteristic value of gas breakdown process

3.1.2 阳极通道长度对维持电弧过程的影响

等离子体点火器的驱动电源输出电流为30A,工作介质流量为55.0g/min,不同阳极通道长度下维持电弧过程的电弧电压、电流波形如图6所示。

由图6可知,随着阳极通道长度的增加,电压(电流)陡降(陡升)的频率增大、幅度减小,这说明大尺度分流的频率是随阳极通道长度的增加而增加的,幅度呈现减小趋势;电压信号的频谱分析表明,阳极通道长度越长,高频段电压脉动在稳定射流过程中

所占的比例更大,通道长度为3mm,5mm和7mm时,所对应的大尺度分流周期分别约为0.21~0.53ms,0.14~1.08ms和0.13~1.32ms。这是因为本文所设计的等离子体点火器射流采用拉长电弧方式,电弧通过阳极通道喷射到弧室外,在电弧通过阳极通道的过程中,通道越长,电弧在阳极通道部分越长。而电场强度沿电弧发展的轴线方向的分布为常量,电弧电位随电弧长的的增加而增大,因此,在长的阳极通道中,电弧更容易发生大尺度分流。

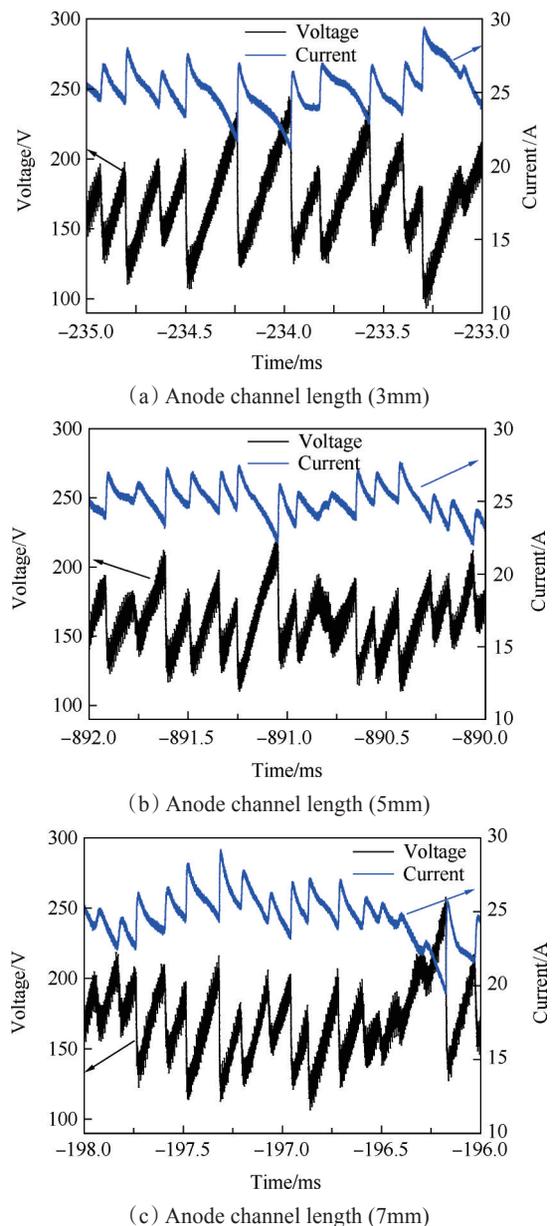


Fig. 6 Waveform of electric signals under different anode channel length

图7所示为不同阳极通道长度的情况下,维持电弧过程中,电弧电压均值随工作介质流量的变化趋势。

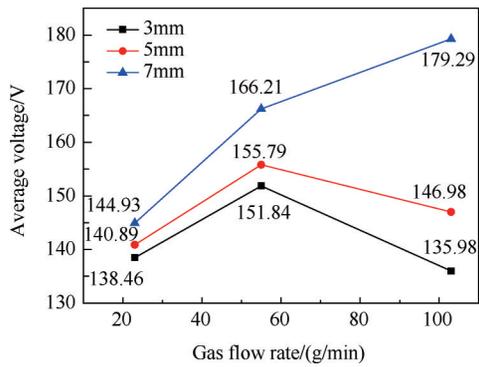


Fig. 7 Average voltage varying with gas flow rate

由图7可知,当阳极通道长度为7mm时,电弧电压均值随工作介质流量的增大而增大,而当阳极通道长度为3mm和5mm时,电弧电压均值随工作介质流量的增大呈现出先增大后减小的变化趋势。这是因为工作介质流量对电弧具有双重作用,即当工作介质流量小于某“临界值”时,有助于电弧从阳极喷口喷出,但超过该临界值时,会加大对电弧的扰动,促进电弧分流的发生,而增大阳极通道长度,可以提高通道壁的稳弧能力^[15]。电弧电压均值能够反映电弧的平均长度,因此其均值随工作介质流量的增大呈现出先增大后减小的趋势。从图7中还可以看出,不同阳极通道长度间的电压均值差别随工作介质流量的增大而增大。

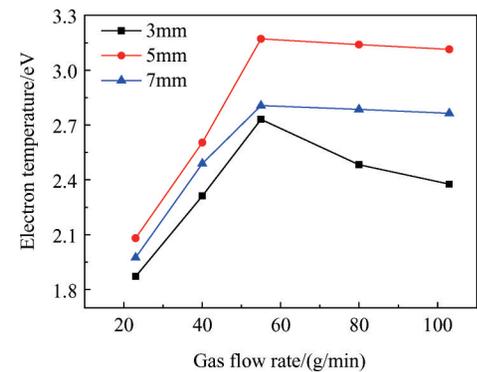
3.1.3 等离子体点火器的光谱特性

在实验过程中,保持以下参数不变:等离子体点火驱动电源输出电流为30A,光谱仪积分时间为1.05ms,探头光斑直径为4.5mm。采集点火射流轴线方向距喷口10mm处的发射光谱信息。在上述实验条件下,测量不同阳极通道长度的等离子体射流点火器在不同工作介质流量下的点火射流发射光谱信息,根据光谱信息计算出点火射流的电子温度、振动温度、转动温度,研究点火器结构形式对其影响规律。详细的计算方法可以参考文献[11]。

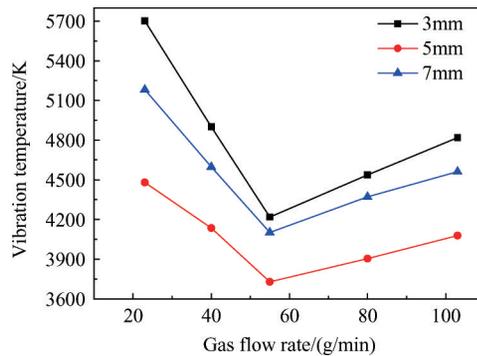
图8所示为不同阳极通道长度下等离子体射流中的电子温度、振动温度、转动温度随工作介质流量的变化曲线。

由图8(a)可知,随着工作介质流量的增大,不同阳极通道长度下的电子温度均呈现出先迅速上升又缓慢下降的变化趋势,当工作介质流量为55.0g/min时,电子温度达到最高值,阳极通道长度由小到大,其电子温度分别为2.73eV,3.17eV和2.81eV;保持工作介质流量不变,电子温度随阳极通道长度的增大,先升高后降低,并且工作介质流量以55.0g/min为分

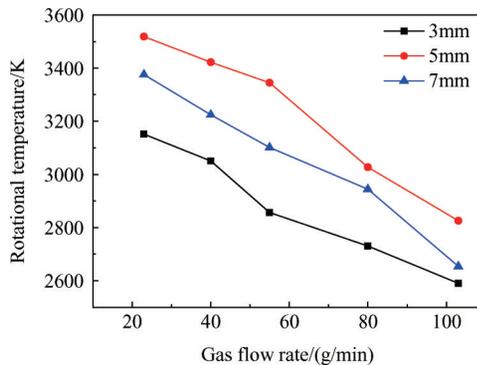
界线,小于该值时,不同阳极通道长度之间的电子温度差别较小,大于该值时,差别较大。通道长度越长,一方面导致工作介质气体被加热的时间增长,射流温度会上升,另一方面由对不同通道长度维持电弧过程电信号分析可知,通道越长,电弧分流的频率越高,即点火射流脉动频率越高,导致点火射流卷吸冷空气量越多,降低了点火射流的温度。因此,在这两个相互制约因素的影响下,导致电子温度随通道长度增大,出现先增大后减小的变化。



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Plasma jet temperature varying with gas flow rate

由图8(b)可知,不同阳极通道长度下,电弧射流中氮分子的振动温度随着工作介质流量的增大呈现出先降低后升高的变化趋势,其下降速率要大于上升速率,在55.0g/min时,振动温度达到最低点,阳极

通道长度由小到大依次对应的振动温度分别为4217K, 3728K, 4101K; 相同工作介质流量下, 通道长度5mm下的振动温度最低, 3mm的最高。振动温度与该振动激发态上的粒子密度 n_e 有关, 振动激发态上的粒子密度越大, 该激发态的振动温度越高, 而振动激发态粒子数量与等离子体中的电子密度 n_e 有关, 电子密度越高, 振动温度越大。电子温度越低, 电子能量分布更偏向于低能端, 处于低能端的电子数密度相对较高, 导致振动温度较高。图8(a)中点火射流电子温度随阳极通道长度的增大呈现出先增大后减小的变化趋势, 因此, 振动温度呈现出先减小后增大的变化趋势。

由图8(c)可知, 不同阳极通道长度下的电弧等离子体射流中氮分子转动温度均随着工作介质流量的增大而逐渐降低; 在相同工作介质流量下, 转动温度随阳极通道长度的增大, 先增大后减小。因此可知, 阳极通道长度过长或过短都不利于提高点火射流的温度, 在本文研究的阳极通道长度参数中, 阳极通道长度5mm下的点火射流温度能够在各个工作介质流量下始终保持最高。这是因为电弧等离子体中电子温度越高, 与中性粒子发生非弹性碰撞后转移的能量越多, 使平动温度升高, 由于转动态和平动态能够快速达到热平衡, 所以转动温度出现以上的变化趋势。

3.2 阳极通道长度对等离子体射流形态的影响

为获得不同来流作用下的等离子体射流形态, 利用相机记录不同结构形式的等离子体射流点火器在典型燃烧室来流速度下点火射流形态变化过程, 通过对拍摄图像进行处理, 获得不同结构形式和来流速度下的点火射流形态的变化规律。选取等离子体射流点火器工作最初5s内的视频, 并逐帧导出。图9(a)所示为等离子体射流瞬时形态的图像, 从图中可以清晰地看出等离子体射流的亮度与周围气体

存在明显的分界面, 利用Matlab对图像进行边缘检测处理得到射流边界, L 为等离子体点火器喷入实验燃烧室的射流长度。由于等离子体射流形态受来流气动力、电弧分流、弧根跳跃等因素影响, 等离子体点火射流形态呈现出时间上的脉动特性。为使研究更加可靠, 将等离子体点火射流的每帧边界进行叠加, 得到不同图像张数的边界叠加效果图, 如图9(b)所示。将叠加后的图片再进行边界提取, 得到最终的点火射流形态, 如图9(c)所示。

图10所示为不同阳极通道长度的等离子体点火器的点火射流形态随实验燃烧室来流速度的变化情况, 阳极通道长度为3mm, 5mm, 7mm的等离子体射流形态分别对应图中红、绿、蓝三种颜色

由图10可知, 在不同来流速度下, 阳极通道越长, 喷入实验燃烧室中的等离子体射流长度越长, 阳极通道长度为3mm, 5mm, 7mm时, 等离子体射流长度的变化范围分别约为3.5~8.5mm, 4~8.3mm, 7~14mm, 阳极通道长度3mm和5mm下的等离子体射流长度差别相对较小; 等离子体射流倾斜角度和截面面积随着来流速度的增大而增大, 不同阳极通道长度下的等离子体射流倾斜角度基本相同, 这说明阳极通道长度主要影响等离子体射流长度的变化, 对于射流在来流扰动下的抗弯能力影响不大; 当来流速度大于10m/s时, 不同阳极通道长度下的等离子体射流有效长度基本保持不变, 来流对等离子体射流的作用主要体现在改变射流截面面积上, 并且可以看出, 阳极通道长度7mm下的等离子体射流截面面积要明显大于其他两个长度。由此可知, 通过增大阳极通道长度可以提高等离子体射流穿透力, 但会导致射流在有来流的条件下更加分散、射流能量不集中的现象发生。

3.3 阳极通道长度对点火延迟特性的影响

由于没有统一标准^[16]来判断点火过程中燃烧开

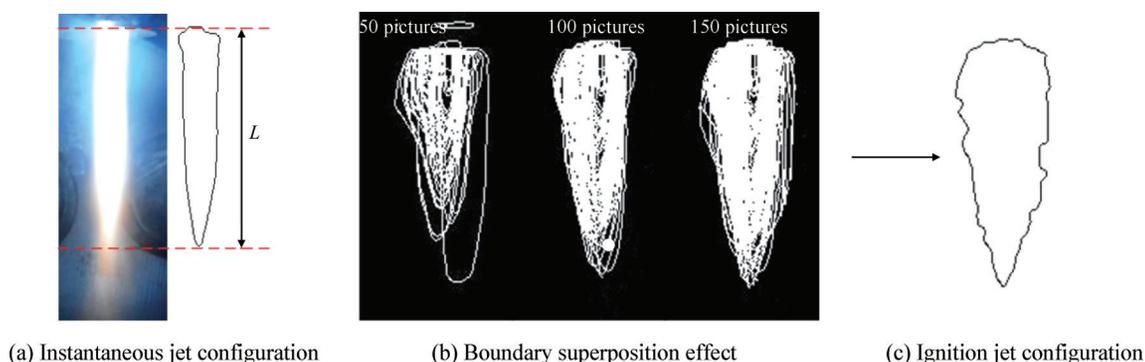


Fig. 9 Procedures of the image processing to determine plasma igniter jet boundary

始的时刻,因此对于点火延迟时间的测量有多种方法。对于条件确定的燃气混合气,点火过程开始后会出现光辐射增强、温度上升等宏观现象,因此本文将等离子体射流点火器开始工作时刻至燃烧实验段中出现明显着火时刻的时间差定义为点火延迟时间,即用光电倍增管测得的氧原子与甲基谱线峰值的时间间隔记为点火延迟时间。

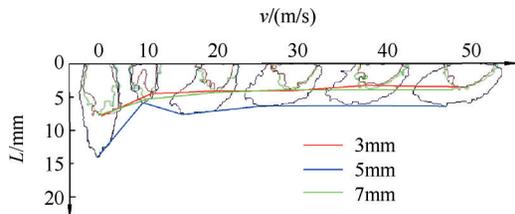


Fig. 10 Configuration of plasma jet varying with the flow velocity

图 11 所示为采用不同阳极通道长度的等离子体点火器进行点火时,煤油/空气混合气的点火延迟时间随余气系数的变化。从图中可以看出,当阳极通道长度一定时,煤油/空气混合气的点火延迟时间随余气系数的增大呈现出先减小后增大的变化趋势;当余气系数保持一定,随着阳极通道长度的增大,煤油/空气混合气的点火延迟时间先减小后增大。余气系数为 1.43 时,点火延迟时间最小,阳极通道长度 5mm 时的点火延迟时间为 14.4ms,相对于阳极通道长度 3mm, 7mm 下的点火延迟时间分别减小了 21.1%, 12.1%;不同阳极通道长度下的煤油/空气点火延迟时间差距随着余气系数的增大而增大。

图 12 所示为余气系数 $\alpha=6.38$ 时,不同阳极通道长度的等离子体点火器工作 6ms 时,煤油/空气混合气的火焰燃烧形态,不同阳极通道长度下的火焰亮度基本相同,但阳极通道长度为 5mm 时,实验燃烧室



Fig. 12 Ignition process of plasma igniter at 6.0ms varying with anode channel length

4 结论

本文开展了阳极通道长度对等离子体射流点火器特性影响的实验研究,得到主要结论如下:

(1) 增大阳极通道长度可以减小电弧分流的幅度和电极的烧蚀面积,减小击穿过程中电流的振荡

中被点燃的可燃混合气所占空间最大,火焰在气流方向和实验燃烧室径向上传播得更远。因此,从煤油/空气混合气燃烧的宏观过程也可以判断出,阳极通道长度为 5mm 时,煤油/空气混合气的点火延迟时间最小。

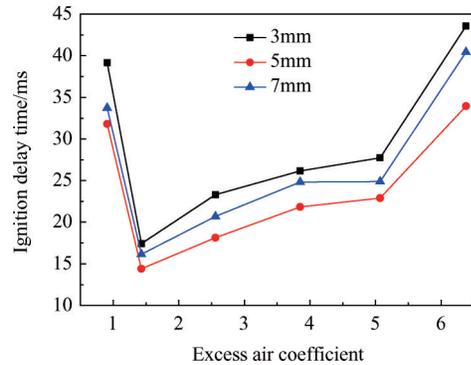


Fig. 11 Ignition delay time of kerosene/air mixture varying with excess air coefficient

由不同阳极通道长度点火器的光谱特性可知,通道长度 5mm 下的电子温度和转动温度最高, 3mm 下的最低,另外,由不同阳极通道长度下的点火射流形态随流速的变化可知,阳极通道长度 3mm 和 5mm 下的等离子体点火射流长度和截面面积基本相同,但均小于阳极通道长度 7mm 下的等离子体点火射流长度和截面面积。基于以上原因,使得通道长度 5mm 下的点火射流的温度最高、点火能量最集中,所以该长度下的点火延迟时间最小。虽然通道 7mm 下的点火射流截面面积最大,但其电子温度和转动温度较通道长度 3mm 的高,点火射流的穿透深度也大,因此弥补了因射流形态分散而降低点火射流能量密度和温度的缺点,从而使得阳极通道长度 7mm 时的煤油/空气混合气的点火延迟时间小于通道长度 3mm 的。

幅度和缩短击穿过程的时间,但却提高了击穿电压,使引弧过程更加困难。

(2) 等离子体点火射流的电子温度和氮分子离子的转动温度随着阳极通道长度的增大呈现出先升高后降低的变化趋势,氮分子的振动温度随着阳极通道长度的增大呈现出先降低后升高的变化趋势。

(3)增加阳极通道长度可以提高点火射流的穿透能力,但会导致点火射流在有来流的条件下更加分散,点火能量不集中;煤油/空气混合气的点火延迟时间随阳极通道长度的增加,呈现出先减小后增大的变化趋势。余气系数为1.43时,点火延迟时间最小,阳极通道长度5mm时的点火延迟时间为14.4ms,相对于阳极通道长度3mm,7mm下的点火延迟时间分别减小了21.1%,12.1%。

阳极通道长度对于等离子体射流点火器的特性有着重要的影响,当然阳极压缩角、阳极直径等参数也对电弧和射流的形态以及特性有着不同程度的影响,在后续的研究工作中会继续加深对阳极结构的研究,不断优化阳极结构,改善点火器的工作性能。

参考文献:

- [1] 何立明,刘兴建,赵兵兵,等. 等离子体强化燃烧的目前研究进展[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1537-1551.
- [2] Ainan Bao, Guofeng Lou, Munetake Nishihara, et al. On the Mechanism of Ignition of Premixed CO-Air and Hydrocarbon-Air Flows by Nonequilibrium RF Plasma [R]. *AIAA* 2005-1197.
- [3] Guofeng Lou, Ainan Bao, Munetake Nishihara, et al. Ignition of Premixed Hydrocarbon-Air Flows by Repetively Pulsed, Nanosecond Pulse Duration Plasma [R]. *AIAA* 2006-1215.
- [4] Ainan Bao, Yurii G Utkin, Saurabh Keshav, et al. Methanol and Ethanol Ignition by Repetively Pulsed, Nanosecond Pulse Duration Plasma [R]. *AIAA* 2007-1387.
- [5] JianBang Liu, Paul D Ronney, Fei Wang, et al. Transient Plasma Ignition for Lean Burn Applications [R]. *AIAA* 2003-877.
- [6] Jianbang Liu, Fei Wang, Long C Lee, et al. Effect of Fuel Type on Flame Ignition by Transient Plasma Discharges [R]. *AIAA* 2004-837.
- [7] Jianbang Liu, Fei Wang, Long C Lee, et al. Effect of Discharge Energy and Cavity Geometry on Flame Ignition by Transient Plasma [R]. *AIAA* 2004-1011.
- [8] Charles Cathey, Fei Wang, Tao Tang, et al. Transient Plasma Ignition for Delay Reduction in Pulse Detonation Engines [R]. *AIAA* 2007-443.
- [9] 丁伟,何立明,兰宇丹. 壁电荷对介质阻挡放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 456-460.
- [10] 何立明,祁文涛,赵兵兵,等. 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.
- [11] 何立明,陈高成,赵兵兵,等. 空气等离子体射流点火器的光谱特性实验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 2874-2879.
- [12] 祁文涛,何立明,赵兵兵,等. 空气等离子体射流点火器特性实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(11): 2107-2113. (QI Wen-tao, HE Li-ming, ZHAO Bing-bing, et al. Analysis of the Dynamic Process of Air Plasma Jet [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(11): 2107-2113.)
- [13] 杜宏亮,何立明,丁伟,等. 氩气/空气等离子体助燃激励器的实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 293-296.
- [14] 赵兵兵,张鹏,何立明,等. 等离子体助燃对燃烧产物影响的实验[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1974-1979.
- [15] Morris J C, Rudis R P, Yos J M. Measurements of Electrical and Thermal Conductivity of Hydrogen, Nitrogen and Argon at High Temperature [J]. *Physics of Fluids*, 1970, 13(3): 608-617.
- [16] 张鹏,洪延姬,段立伟,等. 等离子体对碳氢燃料点火延迟时间影响的研究进展[J]. 机电产品开发与创新, 2012, 25(4): 1-3.

(编辑:张荣莉)