

预燃式等离子体射流点火器工作特性实验研究^{*}

蒋陆昀¹, 于锦禄¹, 蒋永健², 黄丹青³, 王思博¹, 陈朝¹, 胡雅骥¹

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 陆航研究所, 北京 101121;

3. 中国人民解放军95965部队, 河北 衡水 253800)

摘要: 为解决发动机点火包线小于飞行包线的实际问题, 提升射流能量及射流稳定性, 设计了一种预燃式等离子体射流点火器, 实验研究了放电特性和射流特性。结果表明, 预燃式等离子体射流点火器与空气等离子体射流点火器相比, 在提升射流能量降低电源功率方面有着较大的优势, 电流相同时通入甲烷在较大流量时可减小驱动电源功率, 总流量为44L/min时, 减幅可达14.99%; 同时预燃式等离子体射流较空气等离子体射流稳定, 且射流长度增加, 扩大了点火面积, 有利于点火。

关键词: 等离子体; 射流; 点火器; 放电; 功率特性; 射流特性

中图分类号: V233.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 12-2798-10

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200026

Experimental Investigation on Working Characteristics of Pre-Combustion Plasma Jet Ignitor

JIANG Lu-yun¹, YU Jin-lu¹, JIANG Yong-jian², HUANG Dan-qing³, WANG Si-bo¹, CHEN Zhao¹, HU Ya-ji¹

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

2. Institute of Army Aviation, Beijing 101121, China;

3. 95965 Armed Forces, Hengshui 253800, China)

Abstract: In order to solve the practical problem that the ignition envelope of the engine is narrower than the flight envelope and improve the jet energy and stability, a kind of pre-combustion plasma jet ignitor was designed. The discharge characteristics and jet characteristics were investigated experimentally. The results show that compared with the air plasma jet ignitor, the pre-combustion plasma jet ignitor has a greater advantage in improving the jet energy and reducing the power supply. When the current is the same, the driving power can be reduced when methane is introduced in a large flow rate. When the total flow rate is 44L/min, the reduction can reach 14.99%. At the same time, the pre-combustion plasma jet is more stable than the air plasma jet, and the increase of jet length enlarges ignition area, which is beneficial to ignition.

Key words: Plasma; Jet; Ignitor; Discharge; Power characteristics; Jet characteristics

1 引言

等离子体是介于固态、液态、气态以外的第四

态,是光子、电子、基态分子、激发态分子、正离子、负离子组成的粒子团^[1]。等离子体射流能量高,富含活性粒子^[2],适用于航空发动机点火^[3-4],能够拓展点火

^{*} 收稿日期: 2020-01-14; 修订日期: 2020-04-16。

基金项目: 国家自然科学基金 (51776223; 91741112)。

作者简介: 蒋陆昀, 硕士生, 研究领域为航空发动机等离子体点火助燃。E-mail: holmejly@163.com

通讯作者: 于锦禄, 博士, 副教授, 研究领域为航空发动机等离子体点火助燃。E-mail: yujinlu1@163.com

引用格式: 蒋陆昀, 于锦禄, 蒋永健, 等. 预燃式等离子体射流点火器工作特性实验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(12):2798-2807. (JIANG Lu-yun, YU Jin-lu, JIANG Yong-jian, et al. Experimental Investigation on Working Characteristics of Pre-Combustion Plasma Jet Ignitor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(12):2798-2807.)

边界、缩短点火延迟时间^[5],近年来成为研究热点^[6-7],国内外均对其进行了大量研究。

国外对于包括等离子体射流在内的等离子体点火技术进行了较为全面的研究,从点火机理到燃烧室模型试验,均取得了较丰富的成果。Wagner等^[8]提出了等离子体射流能量密度的概念,并对等离子体辅助点火机理、火焰特点进行了大量研究,指出等离子体能够显著加快燃料的链式反应,改变常规点火燃烧化学反应路径。文献[9-10]针对等离子体对燃烧的影响作用进行了大量的基础性研究,指出等离子体点火主要通过热效应、输运效应以及动力效应三个方面加快化学反应,缩短点火时间。文献[11]以氢气为燃料,建立了横向来流下的等离子体点火燃烧模型,结果发现等离子体对于氢气点火有重要意义。Mikhailov等^[12]基于航空发动机加力燃烧室,研究了 $0\sim 22\text{km}$, $0.22 < Ma < 2.4$ 下的等离子体点火特性,结果表明,使用等离子体点火系统后,加力燃烧室在整个高度范围内均可以实现点火,点火成功率显著提升。文献[13]以甲烷作为燃料,研究了超声速条件下放电介质对等离子体点火的影响特点,发现在点火区域,提高激发态粒子浓度能显著加快化学反应速率。

国内在近些年来对等离子体射流点火的研究日益增多,文献[14]对等离子体激励甲烷燃烧的过程进行了化学动力学分析,发现加入等离子体可以有效地缩短点火延迟时间、提高温升上限。李钢等^[15-16]总结了俄罗斯将等离子体应用于点火和助燃的研究成果,提出了利用旋流器搭配等离子体射流调控燃烧的方案,指出在旋流的作用下,等离子体激励区的火焰会发生旋转,且在较大的等离子体诱导速度下助燃效果更好。文献[17]使用低温等离子体对甲烷射流进行了助燃实验,结果表明在等离子体射流的作用下,甲烷火焰偏转程度较小,熄火边界得到扩大。赵兵兵等^[18-19]对等离子体射流的动态过程进行了分析,发现等离子体射流处于不稳定状态,射流以及射流核状态受点火器结构、气流等影响较大。黄丹青等^[20]提出了一种新型等离子体射流点火器,并进行了初步研究,研究表明,新型点火器可以增加射流刚度,同时产生大量的CH, CN等活性粒子。

为提升射流能量及射流稳定性,本文设计一种燃料中通的预燃式等离子体射流点火器,对预燃式等离子体射流点火器的放电特性和射流特性进行研究,探索新型预燃式等离子体射流点火器的放电规律及射流变化规律,为发展新型点火技术,拓宽发动

机点火包线奠定基础。

2 实验装置与实验方法

2.1 等离子体射流点火器设计与工作原理

自主设计的预燃式等离子体射流点火器如图1所示,主要由绝缘套、绝缘管、衬套、阴极、螺杆、阳极、壳体、旋流器、陶瓷管等组成。其中绝缘材料以及旋流器均使用聚四氟乙烯,点火器外壳使用304不锈钢,阳极采用75%钨铜合金。

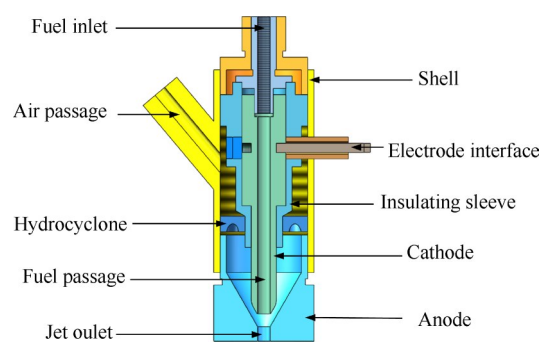


Fig. 1 Pre-combustion plasma ignitor

本文所设计的点火器使用空气/甲烷混合气作为放电介质,即在空气等离子体射流点火器的基础上加入燃料,产生预燃式等离子体射流进行点火。预燃式等离子体射流点火器能够利用燃料燃烧时释放的大量能量,在提高射流刚度的同时,进一步提高射流的能量密度,降低等离子体点火器工作所需电功率。点火器采用燃料中通结构,为减轻电极烧蚀,设计了环管型阴极/旋流器的结构,阴极中间插入陶瓷管作为燃料通道,陶瓷管出口直径 0.4mm 。燃料从点火器中间的燃料通道经过。燃料通道出口很小,一方面可以防止火焰回流,另一方面使得燃料射出速度较快,在点火器出口燃烧,更有利于点火,同时保护点火器内部不被烧蚀。环管型阴极端部为环形,阴极处的电弧根部可以在旋流的作用下滑动,避免电弧始终停留在阴极端部的固定位置,烧蚀阴极。同时阴极中间的燃料和外围的空气均对阴极产生一定的冷却作用,能有效减轻电极的烧蚀情况。

点火器工作时,空气从点火器侧壁面的空气入口进入点火器,经过旋流器产生旋流,同时甲烷从阴极铜管内的燃料通道射出,和空气射流初步混合,在阳极收敛段被电离产生电离区,从阳极出口射出,形成高能预燃式等离子体射流,进而点燃燃烧室内的可燃气。

2.2 实验装置

等离子体点火器射流特性实验系统由供气系统、测试系统以及供电系统组成,如图2所示。供气系统中由甲烷气瓶提供甲烷,由空气储存罐提供空气,通过两台D08-1F型流量显示仪和流量调节阀控制甲烷和空气流量。供电系统中点火器电源为空军工程大学自行研制的直流等离子体射流点火驱动电源。测试系统中示波器为Tektronix 4104B型示波器,电压信号使用Tektronix P6015A高压探针探测,电流信号使用Tektronix TCP0030交/直两用电压探针进行测量;使用索尼A6300数码相机和高速CCD相机同步捕捉点火器射流和电弧形态。

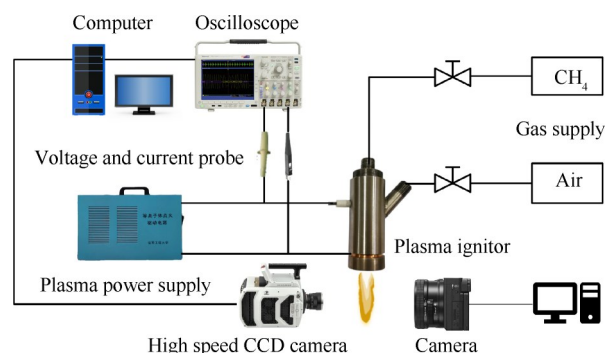


Fig. 2 Experimental system of ignitor characteristics

2.3 实验方法与实验原理

本文采用控制变量法进行对比实验,分别对空气等离子体射流点火器和预燃式等离子体射流点火器的放电特性以及射流特性进行研究实验。为保证实验结果的可靠性,实验前先通气,待气流稳定再放电进行后续的数据测量读取。

放电特性包括放电功率特性和放电稳定性。放电功率特性指点火器工作时的驱动电源功率特性,是预燃式等离子体点火器的重要特性之一,研究其放电功率特性对点火系统小型化、实用化有重要意义。本文研究了电流 I ,流量 W ,甲烷 CH_4 对预燃式等离子体射流点火器放电功率特性的影响规律。

放电过程中击穿阶段时间很短,对总功率影响较小,而蓄压阶段电流 $I=0$,此时驱动电源功率为0,因此选取稳弧阶段功率作为电弧工作功率,即驱动电源功率 $\bar{P}$,用以分析点火器放电功率特性。通过MATLAB计算电源平均驱动功率 $\bar{P}$,其定义为

$$\bar{P} = \overline{U_1 \times I_1} \quad (1)$$

式中 U_1, I_1 为点火器稳定工作时的瞬时电压和瞬时电流。由于放电具有一定的随机性,但相同工况下的稳弧阶段的电压电流波动较小,故为降低误差,

相同工况下进行5次测量,计算出平均功率作为该工况下的驱动电源功率。

在研究电流、流量及甲烷对放电功率的影响规律时,对于空气等离子体射流点火器,在驱动电流 $I=20, 25, 30\text{A}$ 时,燃料通道和空气通道共通入 $W=16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44\text{L/min}$ 的空气,其中燃料通道固定通入空气 $W_{\text{air}}=4\text{L/min}$,方便与预燃式等离子体射流点火器进行对比。对于预燃式等离子体射流点火器,提供 $I=25\text{A}$ 的驱动电流,燃料通道固定通入甲烷 $W_{\text{CH}_4}=4\text{L/min}$,其中 $W=W_{\text{air}}+W_{\text{CH}_4}$, $W, W_{\text{air}}, W_{\text{CH}_4}$ 分别为总流量、空气流量和甲烷流量。

放电稳定性由点火器工作中电弧存在时间、周期、放电占空比等特征体现,直接反应了电弧和射流稳定性。在本实验中随机选取稳弧阶段中的200ms时间长度作为采样段,为更好地描述放电稳定性,定义平均稳弧时间 t_{aw} 和平均占空比 d_a ,分别如式(2)和式(3)所示。

$$t_{\text{aw}} = t_w / n \quad (2)$$

$$d_a = t_w / t \quad (3)$$

式中 t_w 为采样段稳弧总时间, n 为采样段击穿总次数, t_c 为采样段电弧存在总时间, t 为采样段总时间。因为电弧击穿过程很短,为 μs 量级,所以忽略电弧击穿过程,有 $t_w \approx t_c$ 。和电源工作占空比不同, d_a 表示电弧存在时间和总工作时间的相对大小。 d_a 越大,电弧存在时间相对更长,电弧断裂后能迅速再次击穿, t_{aw} 越长,电弧相对更加稳定。本实验所使用的直流电源为恒定电流输出,驱动电流稳弧阶段的电流满足 $15\text{A} < I < 35\text{A}$,用以区分不同放电阶段。

等离子体射流点火通过高温高速气流点燃燃烧室内的混合气,射流长度反映了等离子体射流工作面积,工作环境相同时,射流的长度增加,航空发动机燃烧室内混合气与高温等离子体的接触及反应范围扩大,点燃混合气的可靠性和成功率增加。依托搭建的基本工作特性实验系统,研究等离子体射流点火器的射流长度 H ,电弧高度 h ,射流颜色在不同工况条件下的特点,分析直流电源驱动电流 I ,空气流量 W_{air} 对等离子体射流影响规律。

在数码相机拍摄的图片中,定义点火器出口平面至射流上端水平面之间的垂直距离为射流长度,用 H 表示,如图3(a)所示。为使射流外沿轮廓清晰,拍摄时背景设为黑色。由于等离子体火炬随放电动态变化,在进行射流长度的数值分析时,为了降低误差,选取图片时采取多时刻平均法测量,即在相同工

况下,共取30张射流较为稳定的时刻,取射流平均长度作为该工况的射流长度。在进行图片对比分析时,取长度和平均射流长度相近的图片分析该工况下的射流特点。

在高速CCD相机拍摄的图片中,定义点火器出口平面至电弧上端水平面之间的垂直距离为电弧高度,用 h 表示,如图3(b)所示。电弧高度 h 反映了射流核心区域大小。电弧高度测量方式与射流长度类似,取30个电弧较为稳定的时刻,量取电弧平均高度作为该工况下的电弧高度 h ,但选取的时间点在量取射流长度所选取的时间点附近,尽可能地保证电弧与射流同步。

为与空气等离子体射流点火器进行区分,预燃式等离子体射流点火器的射流长度定义为 H_c ,电弧高度定义为 h_c 。

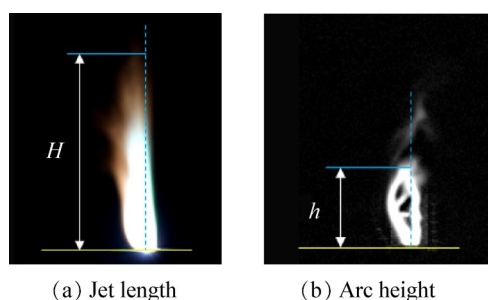


Fig. 3 Definition of jet characteristic parameters

3 结果与讨论

3.1 预燃式等离子体点火器放电特性研究

放电特性是等离子体点火器重要特性之一,能够反映点火器工作稳定性、电压电流变化等特征。本文研究了直流电源驱动下,点火器工作时的放电特性随直流电源驱动电流 I ,空气流量 W_{air} 的变化规律,分析了点火器放电稳定性和放电功率特性,并与加入甲烷时的工况进行对比,为开展点火器优化设计和工程实用化奠定基础。

3.1.1 预燃式等离子体点火器放电功率特性研究

为探究电流、流量及甲烷对放电功率的影响规律,以稳弧阶段的功率作为电源平均驱动功率,对不同流量、不同电流、同流量下是否加入甲烷的多种工况进行计算,得到等离子体射流点火器的放电功率特性,如图4所示。从图中可以看出,在未加入甲烷时,相同电流下,等离子体射流点火器的驱动电源功率 P_s 的总体变化趋势为随空气流量 W_{air} 的增加而增加。这是因为气流流速上升,带电粒子流速快,介质

击穿难度增加,稳弧能力下降,所需驱动电源功率上升。在相同空气流量下,电压主要和放电介质有关,故提升驱动电流 I 后,驱动电源功率 P_s 与电流有一个相似的上升趋势。在 $I=30\text{A}$ 时,与 $I=20\text{A}$ 和 $I=25\text{A}$ 相比,曲线呈现出一个起伏增加的趋势,虽然有波动,但是驱动电源功率 P_s 均大于同流量下其它电流下的驱动电源功率,符合客观规律。驱动电流增大时,电弧电流也增大,电弧分流、射流脉动均会影响驱动电源功率,从而造成曲线的起伏变化,具体作用机理需要进一步的实验研究。

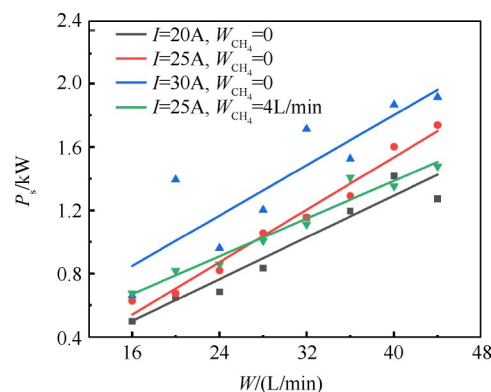


Fig. 4 Discharge power characteristics of plasma jet ignitor

驱动电流 $I=25\text{A}$,总流量 W 一定时,点火器内通入4L/min甲烷后,驱动电源功率 P_s 整体上随着总流量 W 的增加仍呈上升趋势。在总流量 $W \leq 24\text{L/min}$ 时,预燃式等离子体射流点火器的驱动电源功率 P_s 比驱动电流 $I=25\text{A}$ 时的空气等离子体射流略高,但是总流量 $W \geq 28\text{L/min}$ 后,预燃式等离子体射流点火器的驱动电源功率与无甲烷时的驱动电源功率相比整体呈下降趋势。驱动电流 $I=25\text{A}$,甲烷流量 $W_{\text{CH}_4}=4\text{L/min}$,空气流量 $W_{\text{air}}=40\text{L/min}$ 时,驱动功率与驱动电流 $I=25\text{A}$,空气流量 $W_{\text{air}}=44\text{L/min}$ 时的驱动功率相比有一个较大幅度的下降,降低了14.99%。

在驱动电流相同时,等离子体驱动电源功率主要受介质种类和气流状态影响,空气成分以 O_2 和 N_2 为主,将分子电离需要破坏分子之间的化学键,破坏甲烷分子单个C—H需要的能量小于氧气中的 $\text{O}=\text{O}$ 和氮气中的 $\text{N} \equiv \text{N}$,同时甲烷在等离子体的作用下点燃并燃烧,其燃烧过程中释放的化学能也能促进化学键的断裂,因此总流量一定时,电离甲烷/空气混合气所需驱动功率更小,但是点燃甲烷需要消耗一定功率,引起驱动功率一定程度上的增加。甲烷燃烧的反应式为

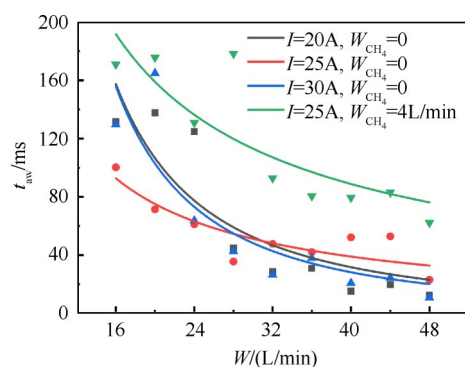


甲烷与氧气的化学计量数之比为 1:2, 空气中氧气约占 20%, 4L 甲烷需要 40L 空气才能完全燃烧。在空气流量较小时, 甲烷/空气混合气处于贫氧状态, 甲烷燃烧不够充分, 甲烷电离燃烧对放电的影响小于点燃甲烷对放电的影响。当 $W \leq 24 \text{ L/min}$ 时, 同等驱动电流下, 预燃式等离子射流点火器的驱动电源功率大于空气等离子体射流点火器的驱动电源功率。随着空气流量增加, 由于点火器射流出口直径小, 气流流速快, 一定程度上增加了电离难度。但是总流量增加, 空气中氧气含量增多, 可提供甲烷完全燃烧所需氧气, 甲烷燃烧更充分, 产生大量活性粒子, 利于放电稳弧。且在较大流量时, 甲烷电离燃烧带来的效应更加显著, 故与同等流量下的空气等离子体射流点火器相比 P_s 降低。

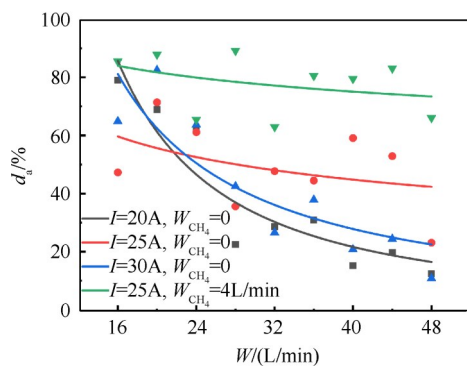
3.1.2 预燃式等离子体点火器放电稳定性研究

对不同流量 ($W=16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48 \text{ L/min}$)、不同电流 ($I=20, 25, 30 \text{ A}$)、同流量下是否加入甲烷的多种工况进行计算, 得到这三个因素对平均占空比 d_a 和平均稳弧时间 t_{aw} 的影响规律, 如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 驱动电流 I 对放电稳定性影响



(a) Variation characteristics of t_{aw}



(b) Change characteristics of d_a

Fig. 5 Influence law of flow rate, current and methane on the average discharge duty cycle and the average arc stabilization time

较小, 放电介质和流量对其影响较大。对于空气等离子体射流点火器来说, 随着总流量 W 增加, 平均稳弧时间 t_{aw} 和平均占空比 d_a 均减小, 放电稳定性降低。其中, 平均稳弧时间 t_{aw} 从 120ms 左右降低到 20ms 左右, 平均占空比 d_a 从 60% 左右降低到 10% 左右, 说明空气等离子体射流点火器的放电稳定性受气流影响较大, 导致射流稳弧能力下降。

对于预燃式等离子体射流点火器来说, 随着总流量 W 增加, 电弧同样受到气流影响, 平均稳弧时间 t_{aw} 整体上呈下降趋势, 从 170ms 左右降低到 60ms 左右, 平均占空比 d_a 整体上下降幅度不大, 集中在 60%~90%, 说明气流同样影响预燃式等离子体射流点火器的平均稳弧时间, 而对平均占空比影响不大。气流流量增大, 流速加快, 电弧在两电极间的运动速度也加快, 导致击穿频率增加, 故引起平均稳弧时间的减小。与空气等离子体射流点火器相比, 通入 4L/min 甲烷后, 预燃式等离子体射流点火器的平均稳弧时间 t_{aw} 以及平均占空比 d_a 明显上升, 说明甲烷在维持电弧稳定方面起到一个积极的作用, 这与甲烷电离燃烧产生大量活性粒子利于放电有关。

从图 5 可以发现, 部分曲线变化较为剧烈, 这和实验中的不可控因素有关: (1) 点火器烧蚀, 在直流条件下, 因为电弧的高温作用, 随着使用时间的增长, 钨铜合金的阳极和铜制的阴极均产生烧蚀, 这对放电间隙和电极形状产生一定影响。(2) 点火器出口流场变化大, 气流经过旋流器之后, 经过较小的放电间隙, 从点火器出口射出后为随机的湍流, 对电弧的形成发展产生影响。(3) 甲烷燃烧的不稳定性, 甲烷在点火器内电离燃烧, 由于和空气的掺混以及燃烧本身的不确定性, 对实验结果产生影响。实验中通过扩大流量变化区间以及增加数据点间隔, 来减弱供气不稳定及不可控因素带来的随机性影响。虽然局部数据点存在波动, 但总体的趋势是明显的, 即随着流量增加放电稳定性减弱, 加入甲烷后放电稳定性增强。

3.2 等离子体点火器射流特性研究

3.2.1 空气等离子体点火器射流特性研究

放电介质为空气时, 空气等离子体射流点火器的射流长度 H 随空气流量 W_{air} 变化的趋势如图 6 所示。从图中可以看出, 随着空气流量 W_{air} 的增加, 射流长度 H 整体上呈减小趋势。靠近点火器出口高亮区域呈现亮白色, 而射流外围为黄色, 由于射流外围远离电弧区域, 电离作用大大减弱, 因此此区域为活性粒子衰减区域, 衰减过程中释放能量, 呈现黄色^[21]。

随着空气流量增加,黄色外围射流逐渐变小,呈现出上尖下宽的水滴状。当空气流量 $W_{\text{air}} > 44 \text{ L/min}$ 时,射流由于旋流效应和电弧的加热作用,湍流程度加剧,轴向以及径向速度分量增加,与周围空气掺混更加迅速,粒子冷却耗散加剧,黄色外围几乎消失。

空气等离子体射流点火器的电弧高度 h 随空气流量 W_{air} 变化的趋势如图7所示。从图6和图7中可以发现,空气等离子体射流点火器的射流长度的变化趋势与电弧高度变化趋势总体上一致,均呈现减小的趋势。这是由于空气等离子体射流中的能量主要来自电弧放电,介质流量一定时,射流长度取决于电弧能量的大小,射流长度与电弧高度变化规律一致。

射流长度和电弧高度随空气流量的变化规律如图8所示,从图8(a)可以看出随着电源驱动电流 I 的增加,射流长度 H 有较为明显的增加,并且随着空气流量增加有一个趋同趋势,说明电流对射流长度有

着较为明显的正向作用,且在空气流量较小时作用较大。当空气流量较大时,在气流的作用下,射流的能量耗散速度加快,与大气中的空气掺混作用增强,电流对射流增长的作用减弱,故在较大空气流量时,射流长度趋同。

从图8(b)可以看出,随着驱动电流 I 的增加,电弧高度 h 略微增大,但不如射流长度区别明显,且随着空气流量的增加,电弧高度有一定的波动,但整体上有减小的趋势。直流射流电弧存在电弧大尺度分流现象,由气动力和电磁力共同决定^[22]。电流增加时,维持电弧的能力得到增强,同时电弧的大尺度分流也增强,故电弧高度的增加效应一定程度上被削弱,造成电弧高度随电流增加的变化不是很明显。电弧在气流的作用下会向外拉伸,同时气流对电弧有冷却作用,会加快放电通路内活性粒子衰减速率以及带电粒子的耗散,反而不利于电弧的发展。气流对电弧促进作用与冷却作用的相对强度会影响射

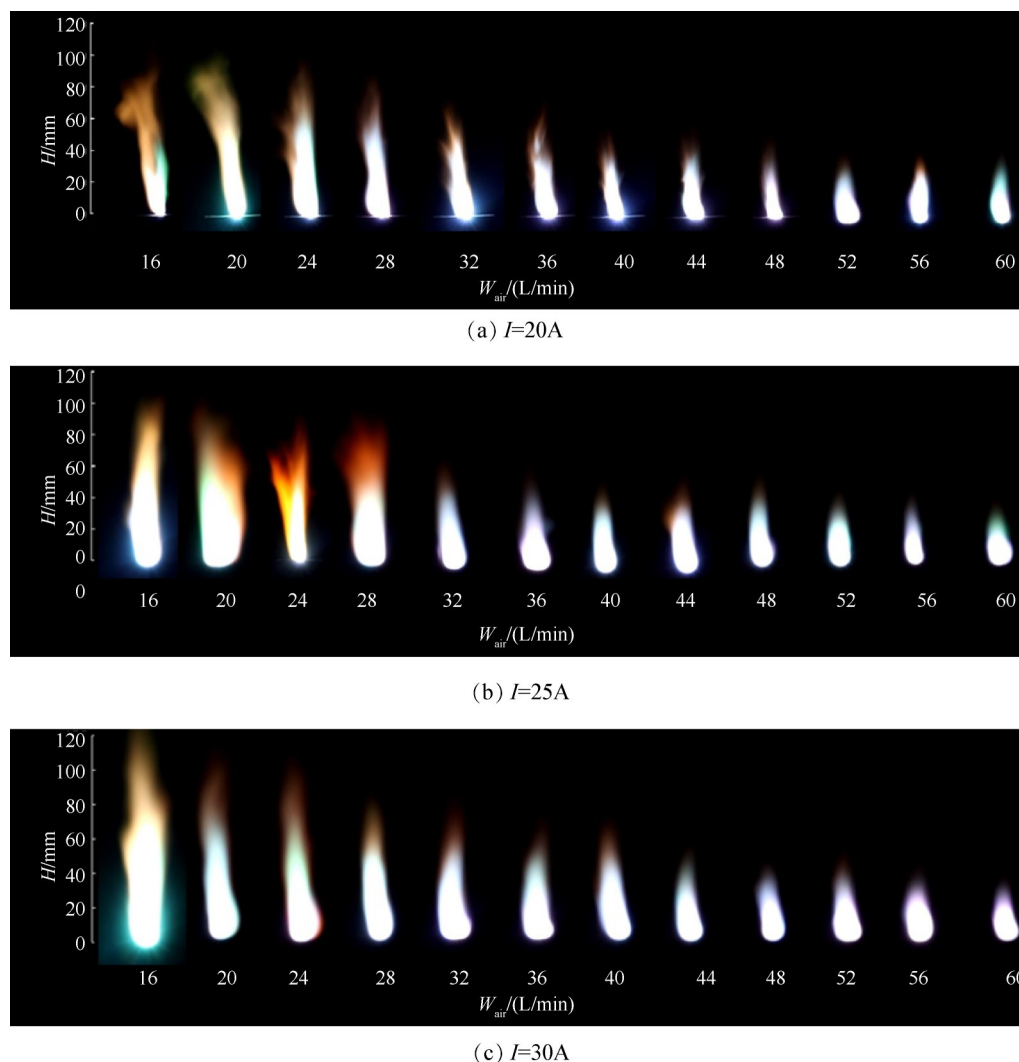


Fig. 6 Characteristics of jet length changing with air flow

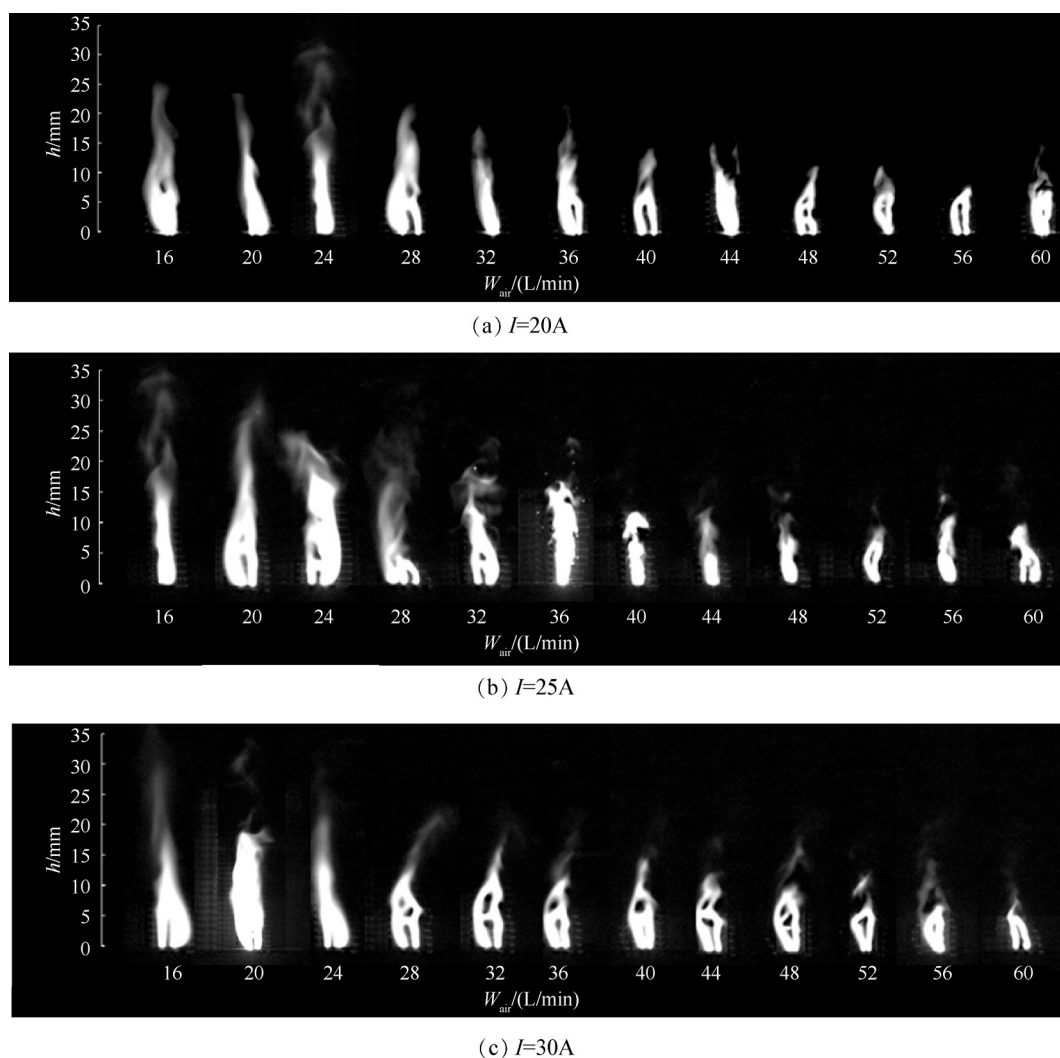


Fig. 7 Characteristics of arc height changing with air flow

流长度 H 与电弧高度 h , 促进作用大于冷却作用时, 射流长度与电弧高度随空气流量增加而增加, 反之则降低, 故随着空气流量增加, 电弧高度呈波动变化, 但总体上来说气流对电弧的冷却作用大于拉伸作用, 从而随着流量增加, 电弧高度整体上呈下降趋势。

空气等离子体射流点火的能量主要来自于放电产生的电弧, 从电弧区沿着射流外缘温度迅速降低, 能量由内向外衰减较快。空气等离子体射流点火核心区域是电弧区, 为了反映等离子体射流衰减速率以及电弧区与射流的相对大小, 引入弧流比 C , 表示电弧高度和射流长度的相对关系, 定义为

$$C = h/H \quad (5)$$

式中 h 为电弧高度, H 为射流长度。 C 越大, 射流的外围等离子体区域越小; C 越小, 射流中的电弧所占比列越小, 说明尾流区域衰减较慢。

弧流比 C 随空气流量、点火器驱动电流的变化特

性如图 9 所示, 三种不同驱动电流 ($I=20\text{A}, 25\text{A}, 30\text{A}$) 下, 射流的弧流比随空气流量的增加整体上呈上升趋势, 结合图 7 的射流特性, 说明空气流量越大, 其射流外围的等离子体尾流越小, 等离子体耗散衰减越快, 射流更加“紧凑”。因此在选择点火器点火工况时, 要注意射流长度 H , 弧流比 C 的合理选取, 保证电弧和等离子体共同发挥最大效应。

3.2.2 预燃式等离子体点火器射流特性研究

本实验中使用甲烷作为点火器预燃燃料, 在空气等离子体射流点火器的基础上加入甲烷, 产生预燃式等离子体射流, 通过甲烷燃烧释放的化学能进一步增加射流能量, 在射流总能量一定时能够降低所需驱动电源功率。在实验中保持甲烷流量 $W_{\text{CH}_4} = 4\text{L/min}$, 空气流量 $W_{\text{air}} = 20\text{L/min}$, 随着驱动电流 I 增加, 预燃式等离子体射流点火器的射流长度 H_c , 电弧高度 h_c 同时增加。甲烷射流外焰范围扩大, 电弧分流现象更加明显, 电弧内部轮廓模糊, 如图 10 所示。预燃

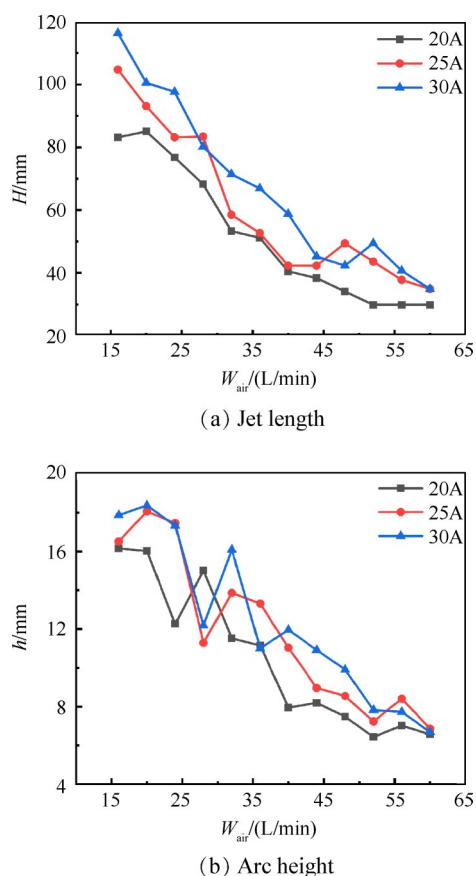


Fig. 8 Characteristics of jet changing with air flow

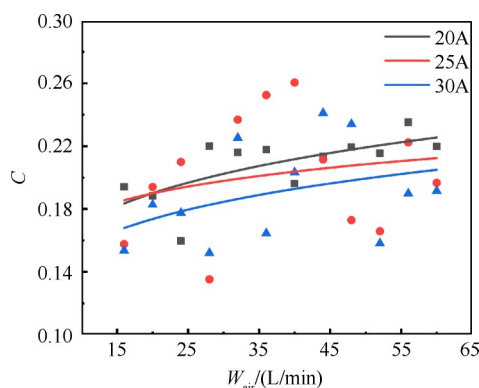


Fig. 9 Variation of arc jet ratio of plasma jet with air flow

式等离子体射流点火器的电弧相对空气等离子体射流点火器有所缩短,电弧高度 $h_c < 10mm$, 范围小于预燃式等离子体射流点火器的射流高亮区域。

直流电源输出电流增加,驱动功率上升,电弧能量增加,电离区域扩大,维持电弧能力增强,电弧长度增加。在点火器内通入甲烷后,除电离反应外,还存在甲烷燃烧反应。甲烷/空气初步预混后被电离,产生大量高能活性粒子,流场为湍流状态,大大促进了粒子掺混,甲烷燃烧得到强化,强烈释放光和热,在预燃式等离子体射流点火器的射流根部产生一个较大的高亮区域。在直流等离子体电源的驱动下,

由于电弧对阴极有烧蚀作用,部分铜元素以二价铜的形式混入射流,发生绿色焰色反应,这有效说明了预燃式等离子体射流点火器的射流外围即为甲烷燃烧的火焰边缘。射流尾焰外围甲烷剧烈燃烧,射流温度从中间的电弧区域到尾焰边缘均为高温区域,有效点火面积相对于空气等离子体射流点火器大大增加。

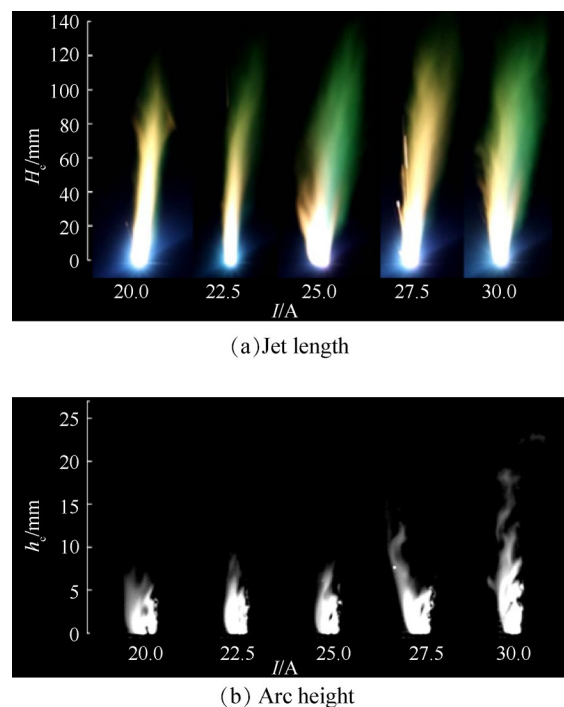


Fig. 10 Schematic diagram of jet changing with current

随着输出电流增加,预燃式等离子体射流点火器的射流长度 H_c 和电弧高度 h_c 随着电流的增加呈现出增长趋势,如图 11 中的 (a) 和 (b) 所示。因为电流增加,电离产生的活性粒子能量增加,电弧范围增大,高度上升。甲烷和空气流量一定,电弧高度上升,电离区域变大,射流长度增加。预燃式等离子体射流点火器较空气等离子体射流点火器的射流长度显著增加,射流范围更大。驱动电流 $I=25A$ 时,空气流量 $W_{air}=24L/min$ 比空气流量 $W_{air}=20L/min$ 时的空气等离子体射流长度缩短 8.2mm,而甲烷流量 $W_{CH_4}=4L/min$,空气流量 $W_{air}=20L/min$ 时的预燃式等离子体射流比空气流量 $W_{air}=20L/min$ 时的空气等离子体射流长度增加了 34.9mm,比空气流量 $W_{air}=24L/min$ 时的空气等离子体射流长度增加 43.1mm,据此可以看出,甲烷对射流影响大于空气对射流的影响,甲烷燃烧能显著增加射流范围,扩大高能等离子体区域。

以甲烷/空气混合气作为工作介质时,点火器射

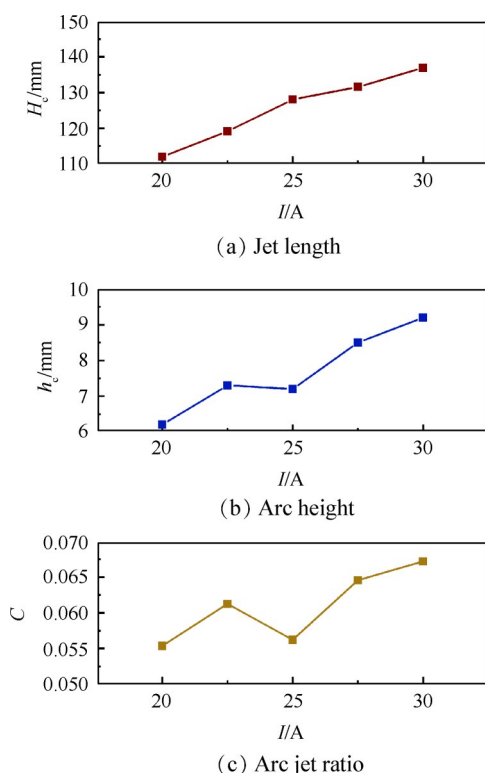


Fig. 11 Characteristics of jet length, arc height, and arc jet ratio changing with output current

流弧流比 C 随驱动电流 I 的变化趋势如图 11(c) 所示。可以看出,随着驱动电流 I 上升,放电能量增大,电离区域扩大,电弧更长,弧流比 C 整体上也呈增加趋势。虽然尾流区能量耗散加快,但是电弧长度增加,电弧带来的热效应增强,故适当提高等离子体点火驱动电源输出电流 I ,能有效扩大等离子体射流点火器电弧区范围,进一步提升点火器工作效率。

点火器内通入甲烷后,弧流比 C 与空气等离子体射流点火器相比明显减小,这是因为在甲烷电离的同时也进行燃烧反应。弧流比 C 的差异来自两个方面,一方面甲烷燃烧的火焰中含有大量小分子中间产物,粒子和电子碰撞概率增加,更易产生带电粒子,活性粒子区域更大,利于形成放电通路,利于稳弧和放电。所以电弧高度降低,电弧内侧边缘模糊,电弧分流明显。另一方面由于燃料通道出口直径小,气流流速大,也一定程度上抑制了电弧的发展,在燃烧的作用下使射流长度增加,所以在通入甲烷后,弧流比 C 减小。

与空气等离子体射流点火器相比,在总流量一定时,虽然预燃式等离子体射流点火器的射流电弧高度降低,高能电弧区域变小,但是同时弧流比减小,等离子体尾流区衰减较慢,另外由于甲烷燃烧的作用,预燃式等离子体射流外围有甲烷燃烧产生的

火焰,因此预燃式等离子体射流点火器的点火范围要比空气等离子体射流点火器大,点火能力比空气等离子体射流点火器强。

4 结 论

本文对预燃式等离子体射流点火器包括放电特性和射流特性在内的特性进行了研究,得到了如下结论:

(1)与空气等离子体射流点火器相比,同等电流下,在总流量 $W \geq 28 L/min$ 时,预燃式等离子体射流点火器的驱动电源功率较无甲烷通入时小,且有差值随流量增大而扩大的趋势。总流量 $W = 44 L/min$ 时,减幅可达 14.99%,这充分表明,甲烷电离燃烧对放电介质击穿的促进作用有利于减小驱动电源功率。

(2)空气等离子体射流点火器和预燃式等离子体射流点火器的平均稳弧时间 t_{aw} 均随着 W 增加而下降,但是预燃式等离子体射流点火器整体 t_{aw} 仍高于空气等离子体射流点火器,说明预燃式等离子体射流点火器可以提高放电的稳定性。

(3)预燃式等离子体点火器的射流长度、电弧高度以及弧流比均随直流驱动电流的增加而增大,说明电流的适当增加有利于射流的发展,可有效提升射流的点火范围。与同等流量下的空气等离子体射流点火器相比,电弧高度减小,但射流长度大大增加,有效提升了预燃式等离子体射流点火器的点火能力。

预燃式等离子体射流点火器与空气等离子体射流点火器相比体现出独特优势,但其详细机理和具体气动过程尚未揭示清楚,需要进行更深层次的研究。

致 谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] 赵 青,刘述章,童洪辉. 等离子体技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 朱可夫 M F,等,编著. 电弧等离子体炬[M]. 陈明周,邱励俭,译. 北京:科学出版社,2016.
- [3] 于锦禄,黄丹青,王思博,等. 等离子体点火与助燃技术在航空发动机上的应用[J]. 航空发动机,2018,44(3): 12-20.
- [4] Andrey Starikovskiy, Nickolay Aleksandrov. Plasma-Assisted Ignition and Combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(4): 61-110.
- [5] 吴 云,李应红. 等离子体流动控制与点火助燃研究进展[J]. 高电压技术,2014,40(7): 2024-2038.

- [6] Kwonse Kim, Dooseuk Choi. Research on the Reaction Progress of Thermodynamic Combustion Based on Arc and Jet Plasma Energies Using Experimental and Analytical Methods[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(4): 1869–1878.
- [7] 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.
- [8] Wagner, Timothy C, O'brien, et al. Plasma Torch Igniter for Scramjets [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1989, 5(5): 548–554.
- [9] Ju Yiguang, Lefkowitz J K, Reuter C B, et al. Plasma Assisted Low Temperature Combustion [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2016, 36(1): 85–105.
- [10] Ju Yiguang, Sun Wenting. Plasma Assisted Combustion: New Combustion Technology and Kinetic Studies [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(3): 529–532.
- [11] Luca Massa, Jonathan Freund. A Model for Plasma-Combustion Coupling and Its Effect on the Ignition of a Dielectric-Barrier Discharge Actuated Hydrogen Jet[R]. *AIAA* 2017–0391.
- [12] Mikhailov V V, Lebedev V V, Mukhin A N. Application of a Plasma Ignition System to Ignite Kerosene-Air Mixture in the GTE Afterburner in a Wide Range of Its Start up Conditions[J]. *Russian Aeronautics*, 2010, 53(3): 349–352.
- [13] Shuzenji, Kiyotaka, Tachibana. Advantage of Using Oxygen as Plasma Jet Feedstock for Methane/Air Ignition[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2012, 21(5): 908–913.
- [14] WANG Si-bo, YU Jin-lu, CHENG Wei-da, et al. Chemical Kinetic Analysis of Plasma Excited Methane Combustion [J]. *Chemical Physics Letters*, 2019, 730: 399–406.
- [15] 杨凌元, 李 钢, 赵丽娜, 等. 等离子体助燃旋流扩散火焰的光谱分析[J]. *工程热物理学报*, 2014, 36(2): 396–400.
- [16] 李 钢, 李 华, 杨凌元, 等. 俄罗斯等离子体点火和辅助燃烧研究进展[J]. *科技导报*, 2012, 30(17): 66–72.
- [17] WU Wen-wei, NI Guo-hua, GUO Qi-jia, et al. Characteristics of Plasma-Assisted Jet Flame and Its Application to Cross-Flow Methane-Air Combustion [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(12): 2952–2959.
- [18] 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.
- [19] 赵兵兵, 何立明, 沈 英, 等. 直流电弧等离子体点火器化学效应研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(5): 1171–1174.
- [20] 黄丹青, 于锦禄, 王思博, 等. 预燃式等离子体射流点火器特性实验研究[J]. *高电压技术*, 2018, 44(9): 3068–3075.
- [21] 刘鹏飞, 何立明, 祁文涛, 等. 航空等离子体点火器的射流特性[J]. *高电压技术*, 2016, 43(3): 836–842.
- [22] 赵文华, 沈 岩, 田 阔. 等离子体喷枪中的射流脉动控制[J]. *材料保护*, 2004, 37(9): 39–41.

(编辑:史亚红)