

基于等离子体的新型燃烧室头部工作特性实验研究^{*}

陈朝¹, 于锦禄¹, 张磊¹, 蒋陆昀¹, 蒋永健², 胡雅骥¹

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 陆军航空兵研究所, 北京 101121)

摘要: 目前战斗机和无人机的航空发动机均面临着高空点火性能不足的困难, 急需解决该问题以提高发动机性能。设计了一种基于三维旋转滑动弧的航空发动机新型燃烧室头部, 该头部可以在保持原有燃烧室结构不变的基础上, 实现对燃烧室的点火和助燃。进行了新型燃烧室头部的放电特性实验, 分析了稳定电弧滑动(A-G)模式和击穿伴随滑动(B-G)模式两种放电模式的特点。探究了两种放电模式对振动温度的影响, 以及空气流量和电压对OH, O₂, O₃, NO四种粒子光谱发射强度的影响。结果表明, B-G模式电弧的放电功率更大, 达到84W, 放电模式对振动温度的影响取决于空气流量和电压的变化, 而光谱发射强度则是A-G模式大于B-G模式。

关键词: 三维旋转滑动弧; 等离子体; 燃烧室头部; 放电模式; 光谱特性; 振动温度

中图分类号: V232 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2020) 12-2766-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200052

Experimental Study on Working Characteristics of New Combustion Chamber Head Based on Plasma

CHEN Zhao¹, YU Jin-lu¹, ZHANG Lei¹, JIANG Lu-yun¹, JIANG Yong-jian², HU Ya-ji¹

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

2. Army Aviation Research Institute, Beijing 101121, China)

Abstract: At present, the aero-engines of fighters and unmanned aerial vehicles are facing the difficulty of insufficient ignition performance at high altitude. It is urgent to solve this problem to improve the engine performance. A new type of combustor head for aero-engine based on three-dimensional rotating gliding arc is designed, which can realize ignition and combustion-supporting of the combustion chamber on the basis of keeping the original combustion chamber structure unchanged. Experiments on the discharge characteristics of the new combustion chamber head were carried out, and two discharge modes, Steady Arc Gliding (A-G) mode and Breakdown Gliding (B-G) mode, were analyzed. The effects of two discharge modes on vibration temperature and the effects of air flow and voltage on the spectral emission intensity of OH, O₂, O₃ and NO particles were studied. The results show that the discharge power of B-G mode arc is higher, reaching 84 W. The influence of discharge mode on vibration temperature depends on the variation of air flow and voltage, while the spectral emission intensity is higher in A-G mode than in B-G mode.

^{*} 收稿日期: 2020-02-04; 修订日期: 2020-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (91741112; 51776223)。

作者简介: 陈朝, 硕士生, 研究领域为航空发动机等离子体点火助燃。E-mail: chen_zhao5@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: 陈朝, 于锦禄, 张磊, 等. 基于等离子体的新型燃烧室头部工作特性实验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(12): 2766-2773. (CHEN Zhao, YU Jin-lu, ZHANG Lei, et al. Experimental Study on Working Characteristics of New Combustion Chamber Head Based on Plasma[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(12): 2766-2773.)

Key words: Three-dimensional rotating gliding arc; Plasma; Combustion chamber head; Discharge mode; Spectral characteristics; Vibration temperature

1 引言

在航空发动机的燃烧室中,燃料通过燃烧反应将储存的化学能转化为内能,再经过热力循环产生推力。在战斗机和军用无人机中,当前燃烧室高空熄火、高空点火和点火包线远小于飞行包线等问题还严重制约着航空发动机的性能提升。利用等离子体进行强化燃烧是一个行之有效的办法,它可以从点火和助燃两个方面实现强化燃烧的效果。在点火方面,通过气体放电产生大量等离子体,利用其温升效应、化学效应和气动效应^[1-2]的综合影响来点燃燃气混合气。在助燃方面,等离子体改善燃烧效果实质是通过放电时产生的高能电子与燃油分子之间的撞击,将高碳链分子打断为低碳链分子,并激发大量活性粒子,产生链锁反应,大大提高燃烧的反应速率和燃烧效率^[3-4]。

Klimov等^[5]研究结果显示等离子体可以有效地拓宽点火和熄火边界。Rousso等^[6]的研究结果表明,等离子体激发产生的自由基可以增强燃料低温条件下的燃烧效果。在数值模拟方面的结果也表明,等离子体的加入可以提高燃烧室化学反应速率,提高燃烧区的反应温度^[7]。北京大学的郭鹏等^[8]的数值模拟结果表明,等离子体中所包含的O、NO和O₃等活性粒子能够明显地促进燃料的点火,并缩短点火延迟时间。等离子体点火助燃技术应用于航空发动机燃烧室的研究已经历了较长的发展时期,自20世纪80年代至今,英国RR燃料加注公司、美国GE公司、APT公司、普林斯顿大学、俄罗斯高温物理研究所等研究单位将等离子技术用于燃烧室的点火、助燃及燃料雾化等。国内主要有中国科学院、哈尔滨工业大学以及西北工业大学等单位进行等离子体在航空发动机应用方面的相关研究。在上述的研究工作中,等离子体在点火和助燃两个方面的研究是分开的,未有见将此两种优势结合起来的应用案例,因此等离子体的强化燃烧效果仍受到一定的局限。

于锦禄等^[9]提出一种三维旋转滑动弧等离子体强化燃烧激励器的方案,本文在此基础上,创新性地设计了一种基于三维旋转滑动弧等离子体的燃烧室头部,此新型燃烧室头部可以在保持航空发动机燃烧室现有结构不变的基础上,合理设置内外电极构成三维旋转滑动弧燃烧室头部。该燃烧室头部可以

实现将点火和助燃集于一体化,将等离子体在两个方面的优势充分发挥,更加高效地实现航空发动机的强化燃烧效果。为探究新型燃烧室头部的工作特性,本文对其放电特性和光谱特性进行实验研究,为进一步探究滑动弧放电过程中等离子体动力学及其点火与助燃机理奠定基础。

2 实验系统与测量方法

2.1 实验系统

光谱特性实验系统的实验装置主要有基于等离子体的新型燃烧室头部、光谱仪、示波器、等离子体电源、计算机及实验电路、管路等。实验中采用苏曼等离子科技的CTP-2000K毫秒脉冲等离子体电源(输出电压峰-峰值最高为60kV,电源功率500W)作为滑动弧等离子体激励电源,并通过调压器调节电压。空气压缩机为实验提供气源,通过电磁流量阀准确调控供给实验段的气体流量。用Avantes四通道光谱分析仪采集放电过程中的发射光谱数据,计算机将采集到的光谱数据进行显示和处理。示波器型号为Tektronix 4104B,用于采集放电过程中的电压电流波形。整个实验系统的示意图如图1所示。

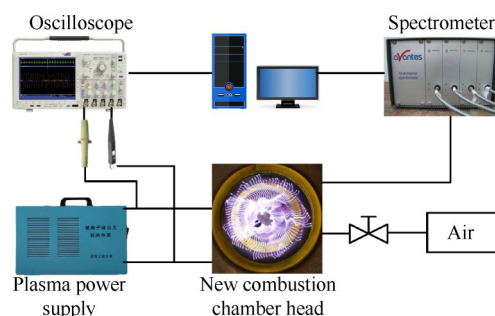


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

2.2 燃烧室头部设计

新型燃烧室头部结构原理图如图2所示。该燃烧室头部采用两级轴流式旋流器进气方式。放电方案采用燃油喷嘴与文氏管之间放电的形式,其中文氏管接高压,喷嘴接地。实验时,燃油喷嘴与文氏管之间随电压增大发生击穿,形成电弧。同时,流经一级旋流器的气流变为旋转气流,推动电弧两端分别在燃油喷嘴与文氏管内壁之间的扩散通道中滑动并绕喷嘴旋转,形成三维旋转滑动弧。新型燃烧室头部的实物图如图3所示。

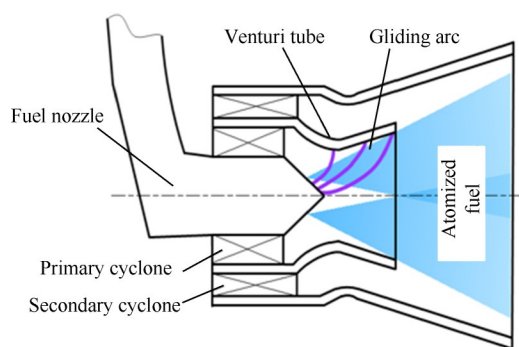


Fig. 2 Structure of three-dimensional rotating gliding arc combustion chamber

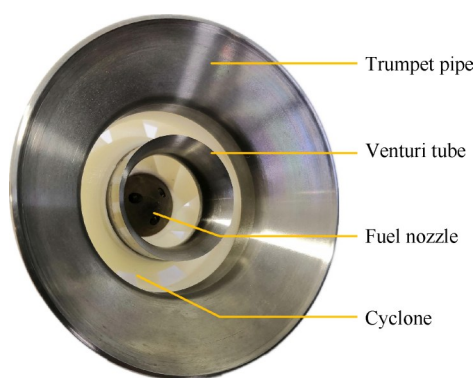


Fig. 3 Structure of combustion chamber head

2.3 光谱数据采集

滑动弧等离子体放电时会产生高激发态的粒子,这些粒子在向较低激发态跃迁时会辐射出不同波长的光子,形成发射光谱。因此,通过测量发射光谱的信息即可确定放电过程中激发态粒子的种类及强度。实验过程中,光纤探头正对燃烧室头部放电区域放置,固定位置以保证所测光谱强度数据的可靠性,并通过改变光纤探头的位置获取不同放电区域的光谱信号,对所得结果取平均值,以提高实验的准确度。图4为新型燃烧室头部放电状态下的图像。

本实验研究了4种调压器电压(40V, 80V, 120V, 160V)和4种空气流量(300L/min, 600L/min, 900L/min, 1200L/min)共16种工况下的发射光谱。光谱仪中采集到的数据绘制成如图5所示的发射光谱图(数据来源于1200L/min, 80V工况),从图中可以看出,发射光谱主要集中在200nm~900nm内,包括NO, N₂分子, N, O^[10]等的分子/原子谱线。在200nm~300nm内可观察到NO-γ带系,表明放电过程中可产生一定数量的NO活性粒子。在300nm~500nm内主要是氮气第二正带系N₂(C³Π_u-B³Π_g)的分子谱线,可以观察到该范围内光谱强度相对较高,表明处于该状态的激发态N₂分子含量较多,处于500nm~800nm内的则是氮气

的第一正带系N₂(B³Π_g-A³Σ_u⁺),处于该状态的N₂分子含量与氮气第二正带系相当。同时,在500.1nm, 777.5nm等处存在N原子和O原子的谱线。由于空气中含有少量的水蒸汽,发射光谱中会不可避免地出现OH粒子的谱带。

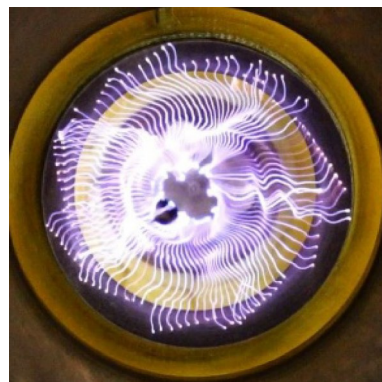


Fig. 4 Discharge image of combustion chamber head

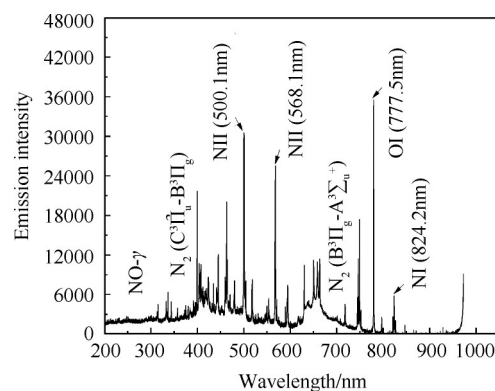
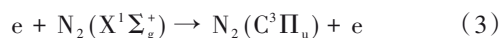


Fig. 5 Emission spectrum of plasma discharge

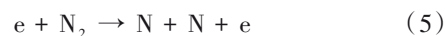
NO的激发态粒子主要是由N₂, O₂分子在高压放电过程中产生的^[11]



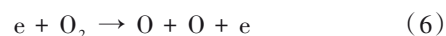
氮气分子主要通过电子碰撞激发产生^[12]



氮原子主要通过电子碰撞分解产生^[13]



氧原子主要通过电子碰撞分解产生^[14]



2.4 振动温度计算方法

振动温度是衡量等离子体振动激发强度的重要参数,对振动温度的研究是深入探究等离子体强化燃烧机理的有效手段之一。本文对氮气分子第二正

带系 $N_2(C^3\Pi_u-B^3\Pi_g)$ 的发射谱线进行分析^[15],采用玻尔兹曼图解法计算得到了各工况下的振动温度 T_v 。

双原子分子发射光谱振动谱带的谱线强度为

$$I_{\nu'\nu''} = h\nu_{\nu'\nu''} A_{\nu'\nu''} N_{\nu'} \quad (7)$$

式中 ν', ν'' 为振动能级; h 为普朗克常数; c 为光速; A 为跃迁几率; N 为分子布居数。

由分子光谱学理论得到上态振动能量

$$E_{\nu'} = w_e(\nu' + \frac{1}{2}) - w_e x_e(\nu' + \frac{1}{2})^2 + w_e y_e(\nu' + \frac{1}{2})^3 + \dots \quad (8)$$

式中,对氮分子而言,振动常数 $w_e=2035.1\text{cm}^{-1}$, $w_e x_e=17.08\text{cm}^{-1}$,第三项及后面的项相比前两项可忽略不计。

上态分子布居数为玻尔兹曼分布,有如下关系

$$N_{\nu'} = N_0 e^{-E_{\nu'}/kT_v} \quad (9)$$

式中 T_v 为振动温度。

联立式(7)~(9)可得

$$\ln B = C - \frac{E_{\nu'}}{kT_v} \quad (10)$$

式中 $B = I_{\nu'\nu''}/(\nu_{\nu'\nu''} A_{\nu'\nu''})$, C 为常数, $k=8.61769 \times 10^{-5}\text{eV}$ 。

以 $\ln B$ 作为因变量, $E_{\nu'}$ 作为自变量,绘制 $\ln B \sim E_{\nu'}$ 拟合直线图,根据该直线斜率求出振动温度 T_v 。

3 结果与讨论

3.1 燃烧室头部放电模式分析

放电过程中采集到的波形数据如图6所示,根据不同的放电特点,可分为两种放电模式:稳定电弧滑动(A-G)模式和击穿伴随滑动(B-G)模式^[16]。

在A-G模式中,如图6(a)所示,在约3ms的时间范围内,电压波形呈现出正弦波的特点,电流随着电压的交变变化也呈现出正弦波的特点。在40.6ms~42.8ms时间内,电压的幅值逐渐增大,在增大至6kV后瞬间减小至4kV,至此本周期结束进入下一个电压变化周期。在一个周期内,电弧经历从生成、发展到最终熄灭的整个过程。电弧从最小间距处击穿空气而产生,出现一个较大的电流(40.6ms时刻),而后电弧在气流推动下旋转滑动,电弧逐渐被拉长,两电极之间电阻增大,导致电压幅值逐渐增大,当电源功率不足以维持电弧时,电弧熄灭,并从最小间距处重新击穿产生(42.8ms时刻)。为进一步分析电压电流波形细节,选取图6(a)中双实线范围内0.4ms的波形进行放大,得到图6(c)所示波形,观察到电压电流类似

正弦波的特点,表明在一个周期内电弧处于稳定滑动状态,因此将该模式命名为稳定电弧滑动(A-G)模式。

在B-G模式中,同样选取3ms范围内的波形进行分析,与前者不同的是,电压和电流未呈现出正弦波的特点,电流呈现出单向击穿的规律。选取双实线范围内0.4ms的波形得到图6(d)的波形。在每一个交变周期内,均出现了明显的电压降,电压从8kV附近瞬间降为0kV,同时伴随击穿电流的产生,电流值为3~4A。在此模式下,在每一个电压变化的周期内均会发生空气击穿现象,产生一个新的电弧,而不是处于滑动状态中的电弧,因此该模式命名为击穿伴随滑动(B-G)模式。

需要说明的是,在不同的空气流量以及调压器电压的实验工况下,A-G和B-G放电模式是共存的,但是随着调压器电压的增大和空气流量的减小,电弧放电模式逐渐由以B-G模式为主导转变为以A-G模式为主导。

根据电压电流数据计算得到了放电过程的瞬时功率及200ms内的能量,如图7所示。在A-G模式中,放电电弧瞬时功率峰值为2.6kW,放电能量为12.5J,计算得平均功率为62.5W。在B-G模式中,放电电弧瞬时功率峰值为5.1kW,放电过程能量为16.8J,计算可得平均功率为84W。显然B-G模式中放电过程能量大于A-G模式,分析可知,在B-G模式中,每一次放电的电弧都是击穿空气产生的新的电弧,击穿空气需要的能量较高,而A-G模式下电源能量中有一部分用于维持电弧的发展,因此所需的能量较小。

3.2 空气流量和调压器电压对振动温度的影响

振动温度可以反映出等离子体放电过程中活性粒子的激发强度。计算得出的等离子体振动温度,会受到电压、空气流量等工况的影响。图8是振动温度随空气流量和电压的变化情况。可以看出,在调压器电压为80V,120V和160V工况下,随着空气流量的增加,振动温度均呈现出减小的趋势。而当调压器电压为40V时,振动温度的变化则呈现出增加的趋势。对比电压对振动温度的影响可以得知,在调压器电压为40V时振动温度最大,其次分别是160V,120V和80V。

通过上面小节对放电模式的分析可知,不同的实验工况下电弧的放电模式不同,因此导致振动温度变化存在差异。调压器电压为40V时,放电模式为B-G模式,该模式中电弧消耗的能量更大,电离空气

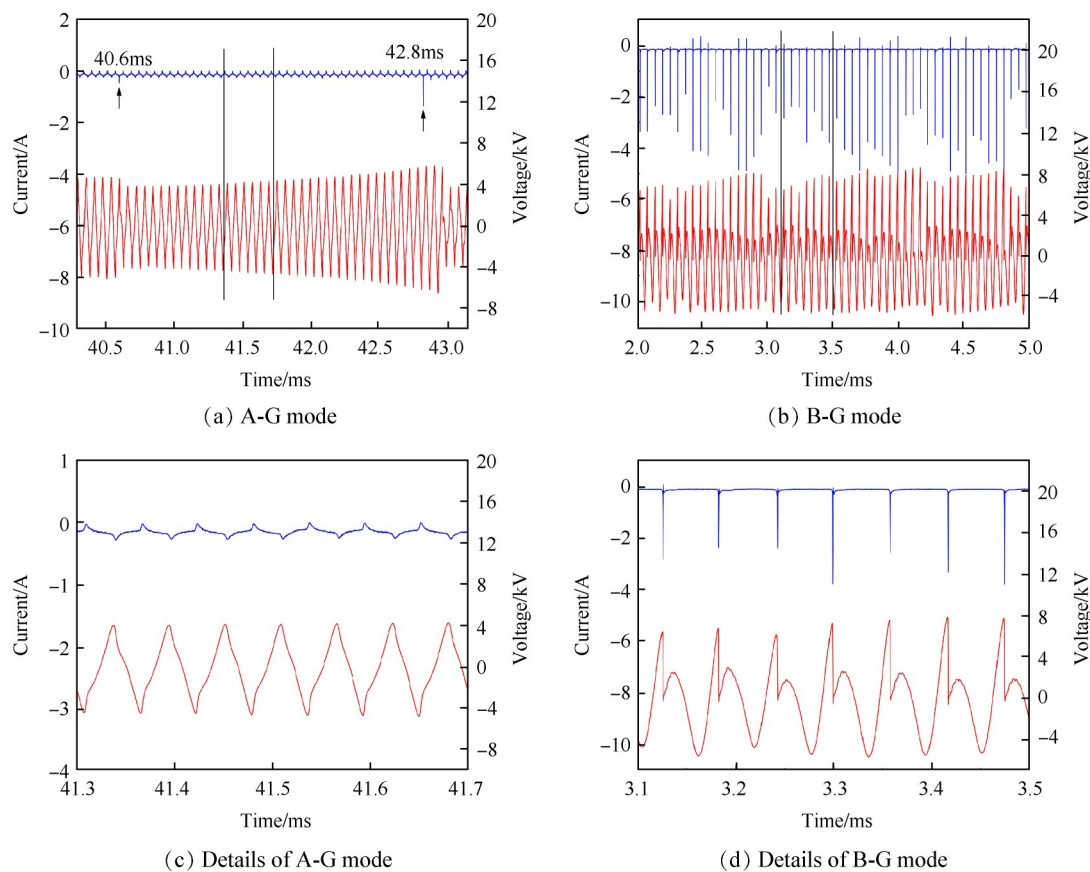


Fig. 6 Waveform of discharge voltage and current in combustion chamber head

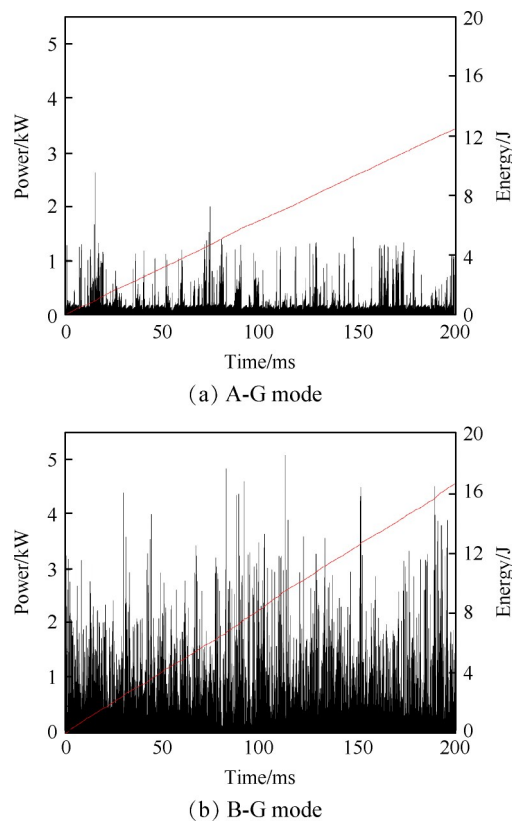


Fig. 7 Instantaneous power and energy diagram of combustion chamber head discharge

产生的振动态高能粒子更多,因此具有更高的振动温度。空气流量增加时,空气击穿消耗的能量更多,因此在一定范围内,有更多的能量用于电离空气,产生高能粒子,因此调压器电压为40V,空气流量增加时振动温度有一定程度增加。在调压器电压为80V,120V和160V时,放电模式处于A-G模式,电弧保持稳定滑动状态,调压器电压的增大使得电源提供的能量更多,用于激发电离高能粒子的能量就越多,振动温度随之增大。空气流量增加时,空气流动对处于稳定滑动状态下的电弧具有能量耗散作用,因此振动温度随空气流量增大而减小。

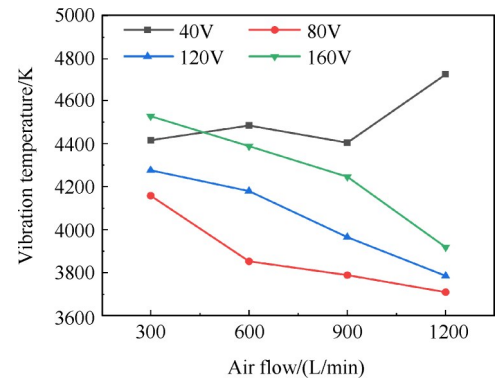


Fig. 8 Variation of vibration temperature with air flow

3.3 空气流量和调压器电压对光谱强度的影响

为研究电压和空气流量对等离子体光谱强度的影响,选取波长在620nm~720nm内的粒子,对其光谱强度进行综合分析。如图9(a)所示,在空气流量为600L/min时,调压器电压为40V,120V和160V工况下的光谱强度基本持平,而调压器电压为80V工况下的光谱强度大于以上三个工况下的光谱强度。而在空气流量为900L/min时,调压器电压为80V工况下的激发强度保持最大,其余依次是120V,160V,40V。

通过对比分析图9(a),(b)中的光谱数据可知,调压器电压和空气流量都会对光谱发射强度产生影

响,随着实验工况的变化,光谱强度也随之发生变化。在空气流量为600L/min和900L/min时,80V调压器电压的工况下都表现出最大的光谱强度,表明80V电压更有利于激发活性粒子。同时,空气流量增加时,光谱强度发射峰的峰值也随之增加。

为研究空气流量和调压器电压对特殊粒子光谱强度的影响,选取OH(314nm),O₂(337nm),O₃(328nm)和NO(334.87nm)^[17]四种有助燃效果的活性粒子进行分析。图10为OH,O₂,O₃和NO粒子的光谱强度在不同电压和空气流量工况下的变化。

图10(a)可以看出,OH粒子的光谱强度随调压

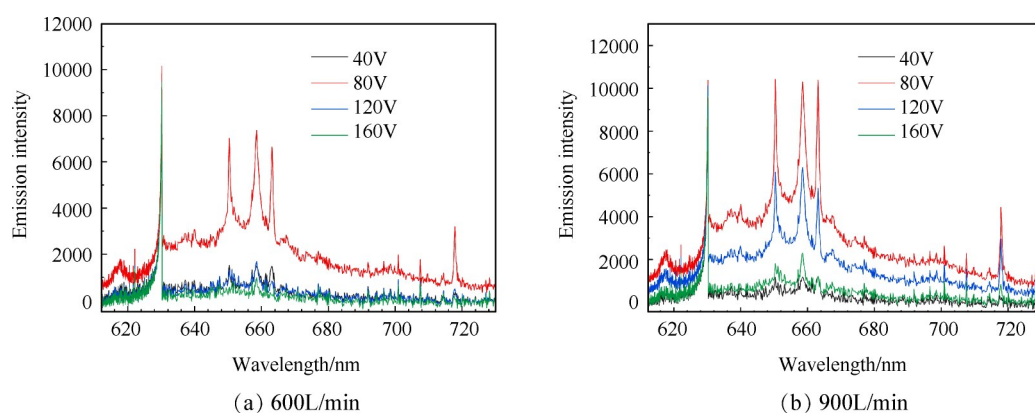


Fig. 9 Spectral intensity

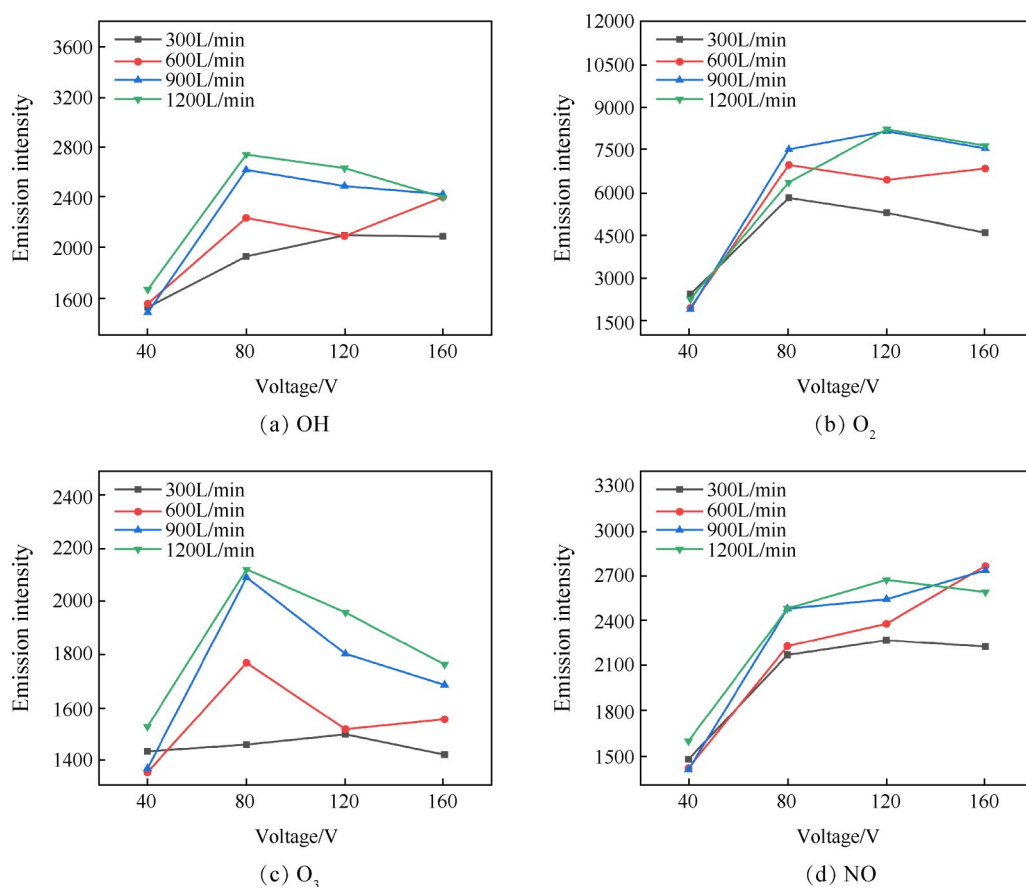


Fig. 10 Spectral intensity of particles

器电压的增大呈现出先增大后减小的规律,在调压器电压 80V 时取得最大值。空气流量为 300L/min 时的最大值出现在调压器电压 120V 时,之后略微下降,但其光谱强度始终大于 40V 工况下的光谱强度。而随着空气流量的增加,粒子光谱强度则呈现出逐渐增大的规律。在调压器电压 80V 时,空气流量 1200L/min 时,光谱强度有最大值,其相对光谱强度为 2739.25。

图 10(b)为 O_2 粒子光谱强度随电压变化,在调压器电压为 40V~80V 工况时,光谱强度出现突增,其平均数值约为 4500。随着电压继续增加,光谱强度出现不同程度的小幅下降。随着空气流量的增加,发射强度有一定程度的增大。

从图 10(c)中 O_3 的光谱强度可看出,在空气流量为 600L/min, 900L/min 和 1200L/min 时, O_3 粒子光谱强度随电压增大呈现出先增大后减小的规律。但在空气流量为 300L/min 时, O_3 粒子光谱强度随电压增大幅度较小。在调压器电压为 80V, 气流量为 1200L/min 时, O_3 粒子光谱强度达到最大值 2121.25。这与 OH 粒子达到发射强度最大值时的工况相同。

在图 10(d)中, NO 粒子在调压器电压为 40V~80V 时光谱发射强度的增幅较大,增长幅度约为 800。之后,随着电压的增大, NO 粒子光谱强度随之出现小幅度的增加,最大值为 2765.6。

综合以上 OH, O_2 , O_3 和 NO 粒子在不同调压器电压和空气流量工况下的光谱发射强度可知,四种粒子的光谱发射强度在调压器电压为 40V~80V 时,均出现较大程度的增加。而调压器电压为 40V 时,放电模式属于 B-G 模式,表明 B-G 模式下产生的活性粒子数目较少。

4 结 论

本文对新型燃烧室头部的放电模式、光谱发射强度以及振动温度等变化规律进行了研究,得到了如下结论:

(1) 新型燃烧室头部放电中存在 A-G 和 B-G 两种放电模式,调压器电压的增大和空气流量的减小会使 B-G 模式转变为 A-G 模式。B-G 模式下电弧放电能量更大,平均功率为 84W。

(2) 燃烧室头部放电时会激发大量活性粒子,包含丰富的光谱信息,主要有:氮气的第一正带系 $N_2(B^3\Pi_g-A^3\Sigma_u^+)$ 、氮气第二正带系 $N_2(C^3\Pi_u-B^3\Pi_g)$ 、NO- γ 带系以及 N 原子和 O 原子的谱线。

(3) 放电模式对振动温度的变化有较大影响。A-G 模式下,调压器电压增大和空气流量减小都会使振动温度增加,而在 B-G 模式下,空气流量增大会使振动温度有一定程度的增加。

(4) OH, O_2 , O_3 , NO 四种粒子的光谱发射强度也受到放电模式的影响。在调压器电压为 40V 时,光谱发射强度最小。A-G 模式下光谱发射强度大于 B-G 模式下的光谱发射强度。

致 谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] 于锦禄,王思博,何立明,等. 环形等离子体激励器的温升效应[J]. 燃烧科学与技术, 2018, 24(2): 152-157.
- [2] Zhang Hua-lei, He Li-ming, Yu Jin-lu, et al. Investigation of Flame Structure in Plasma-Assisted Turbulent Premixed Methane-Air Flame[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20(2): 1-7.
- [3] 何立明,雷健平,陈 一,等. 大气压交流旋转滑动弧的放电特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3061-3069.
- [4] Starikovskii A Y. Plasma Supported Combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2405-2417.
- [5] Klimov A, Bityurin V, Tolkunov B, et al. Non-Premixed Plasma-Assisted Combustion in High-Speed Airflow[R]. AIAA 2005-599.
- [6] Rousso A, Mao Xing-qian, Chen Qi, et al. Kinetic Studies and Mechanism Development of Plasma Assisted Pentane Combustion[C]. *Dublin: Proceedings of the Combustion Institute*, 2018.
- [7] Zhang Zheng, Che Xue-ke, Li Jin-long, et al. Numerical Study of Non-Equilibrium Plasma Assisted Combustion on Spacecraft Rocket Engine[C]. *Tianjin: International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electrical Engineering*, 2017.
- [8] 郭 鹏,张黄伟,陈 正. 低温等离子体助燃机理研究[C]. 西安:中国力学大会, 2013.
- [9] 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.
- [10] Zhong Hong-tao, Yan Chao, Teng Chu, et al. Kinetic Studies of Excited Singlet Oxygen Atoms $O(^1D)$ Reactions with Fuels in Plasma Assisted Combustion[C]. *Cal-*

- ifornia: AIAA Scitech 2019 Forum, 2019.
- [11] Kossyi I A, Kostinsky A Y, Matveyev A A, et al. Kinetic Scheme of the Non-Equilibrium Discharge in Nitrogen-Oxygen Mixtures[J]. *Plasma Sources, Science and Technology*, 1992, 1(3): 207-220.
- [12] 闻雪晴. 纳秒脉冲放电氩等离子体和电子碰撞氮气第一正带激发截面的理论研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [13] 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.
- [14] Ionin A A, Kochetov I V, Napartovich A P, et al. Physics and Engineering of Singlet Delta Oxygen Production in Low-Temperature Plasma[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(2).
- [15] 董丽芳, 刘峰, 李树锋, 等. 大气压氩气/空气介质阻挡放电中分子振动温度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(5): 802-804.
- [16] 何立明, 陈一, 刘兴建, 等. 大气压交流滑动弧的放电特性[J]. *高电压技术*, 2016, 42(6): 1921-1928.
- [17] Yamamoto T, Yang C L, Beltran M R, et al. Plasma-Assisted Chemical Process for NO_x Control[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, 36(3): 923-927.

(编辑:张贺)