

双模式放电中 DBD 放电参数对甲烷滑动弧火焰光谱及活性粒子的影响分析

裴欢¹, 陈雷^{1*}, 王思远², 杨昆¹, 宋鹏²

1. 沈阳航空航天大学航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136

2. 大连民族大学机电工程学院, 辽宁 大连 116605

摘要 对未燃烧的可燃混合气体进行 DBD 放电, 放电后会产生大量的活性粒子, 这些活性粒子可以辅助气体燃烧, 达到提高燃料燃烧利用率等目的。以 DBD 激励氩气、甲烷、空气产生的自由基(CH 基和 OH 基)等强化燃烧的关键活性粒子为探索对象, 研究 DBD 放电激励甲烷对滑动弧火焰的影响。为此, 采用自主设计的 DBD-滑动弧双模式等离子体激励器, 利用同轴介质阻挡放电结构对氩气、甲烷、空气混合气进行放电激励, 将激励后的氩气、甲烷、空气混合气通入滑动弧端进行点火。固定氩气流量不变, 调整空气流量为 $4.76 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 并加入甲烷 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 保证进气通道内氩气与空气-甲烷的气体体积流量比达到 $\text{Ar} : (\text{CH}_4 + \text{Air}) = 1 : 30$, 其中空气、甲烷这两种气体达到了化学燃烧当量比 $\varphi = 1$, 氩气、甲烷、甲烷混合气体能够实现均匀而稳定的放电并燃烧。DBD 段放电电压在 $15 \sim 20 \text{ kV}$ 范围变化, 放电频率在 $6 \sim 10 \text{ kHz}$ 范围变化, 滑动弧段的电压和频率分别保持 4 kV 与 10 kHz 恒定, 通过改变 DBD 段放电电压和放电频率, 用高速光纤光谱仪检测滑动弧火焰中自由基种类及其光谱强度, 分析放电参数激励甲烷对火焰中自由基(CH 基和 OH 基)的影响。结果表明, DBD 段放电电压及放电频率的增加可以促进火焰内部的偶联反应发生, 可有效提升甲烷滑动弧火焰内部的活性粒子含量, 其中 OH 基团、CH 基团在燃烧链式化学反应进程中发挥着较为重要的作用。甲烷经过 DBD 激励后, 随放电电压和频率的增加, 火焰中 OH 基、CH 基等主要活性粒子都随之增加。DBD 放电后, 活性粒子的光谱强度增大, 特征谱线比单模式更加明显; 甲烷经过 DBD 激励后, 火焰组成发生了变化, 滑动弧段出口处甲烷燃烧反应更加充分, 火焰温度越高越容易产生 OH 基。与单模式滑动弧相比, 双模式放电可有效促进火焰内部的链式化学反应进程, 促进燃料燃烧。

关键词 双模式放电; 滑动弧放电; 介质阻挡放电; 火焰光谱; 等离子体

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2007-06

引言

等离子体强化燃烧是近十几年迅速发展起来的新型燃烧理论及技术手段^[1], 其基本原理是采用放电技术激发气体分子形成活性粒子, 通过提高反应体系活性、提高反应物温度、强化可燃气体流场传热传质的强度等因素实现燃烧强化^[2]。在众多的放电方式中, 介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)和滑动弧放电(gliding arc discharge, GAD)是两种较为常用的放电方法。DBD 可利用放电产生的活性自由基促进燃烧, 进而达到改善燃料燃烧特性的目的^[3], 是非

平衡等离子体助燃的有效手段。GAD 是在高压电场激励下电极与金属壁面最窄处产生电弧通道, 电弧被气流驱动着沿气流方向向前方滑动的一种放电形式^[4], 滑动弧放电过程可以产生大量的高能电子、活性基团, 可以提高化学反应速率^[5]、加快化学反应程度。丁玉柱^[6]等通过发射光谱法测量分析甲烷电离产生的 CH 基团可以促进甲烷燃烧。

在目前的等离子体强化燃烧研究工作中, 研究对象多为单一放电方式。如果在电弧放电前先设法激励气体产生活性粒子, 并且活性粒子作为反应物进行二次电弧放电, 则有望对电弧放电的点火过程起到额外的强化作用。而目前, 采用这种“双模式放电”的等离子体强化燃烧的相关研究尚未见

收稿日期: 2021-06-11, 修订日期: 2021-09-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51409158, 51509035), 航空动力基金项目(6141B090540)资助

作者简介: 裴欢, 1997 年生, 沈阳航空航天大学航空发动机学院硕士研究生 e-mail: 523032518@qq.com

* 通讯作者 e-mail: yuruntianqi@163.com

报道。

基于此,本研究结合自主设计的双模式放电等离子体激励器,采用原子发射光谱法,对甲烷-空气-氩气混合气体的强化燃烧火焰进行了测量。在众多活性粒子中,CH基是CH₄裂解的重要的中间产物,同时CH基也是CH₄大分子化合物离解成为小分子化合物的重要标志,自身化学性质也很活泼,能与许多活性基发生化学反应,其分布能显示出燃烧的反应程度;OH自由基的增加能够促进链式反应的发生,从而加快整个反应速率^[7]。因此,本文重点分析放电参数对火焰中CH基和OH基的影响规律。

1 实验部分

1.1 试验系统

采用的试验系统如图1所示,主要由双模式等离子体放电激励器、CTP-2000K微秒脉冲型低温等离子体电源和滑动弧电源、示波器、单反相机、光谱仪和计算机组成。自主设计的双模式放电等离子体放电激励器由紫铜针状电极、紫铜柱状电极、聚四氟乙烯外壳、金属外壳等组成,该点火器的主体包含DBD放电段和GAD放电段两部分:DBD放电段主要是柱状电极和聚四氟绝缘件,实现介质阻挡放电的过程中产生大量的活性粒子,对燃烧产生辅助作用;GAD放电段主要是由一个金属空腔结构与中心针状电极组成,金属空腔结构为该点火器的金属外壳,电弧放电产生的高温电弧会将燃料点燃。试验过程中采用南京苏曼公司产的CTP-2000K微秒脉冲型低温等离子体电源和滑动弧电源为电极供电,微秒脉冲型低温等离子体电源放电电流电阻采样阻值为50Ω,电压、电流及放电频率等参数由德科技的DSO-X3012T型数字型示波器来采集;氩气(纯度为99.99%)、空气、甲烷分别由气瓶供给;火焰的光谱信息由海洋光学MX2500+8八通道光纤式光谱仪采集,其光纤探头固定在离火焰中部轴向10mm的位置,采集到的光谱信息通过软件保存在计算机中。

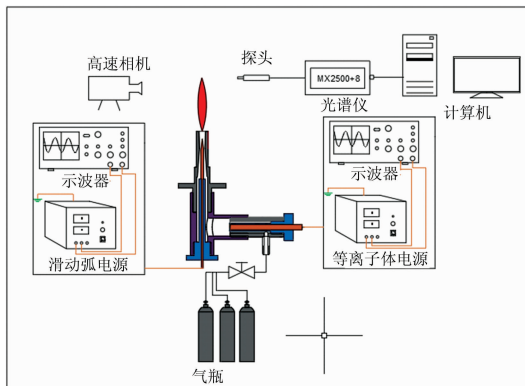


图1 试验装置及测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device and measurement system

1.2 试验工况

根据潘宁效应所知,氩气是惰性气体不参加化学反应。

电离过程中亚稳态的氩原子与分子撞击而发生的离化效应,有利于帮助甲烷的电离,容易使得C—H键断裂。故在甲烷/空气混合气中掺混氩气促进电离,并进行滑动弧点火,对光谱仪采集的光谱图进行分析。在相同输入功率下,通过气瓶输入气体,固定氩气流量不变,调整空气流量为 $4.76 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,并加入甲烷 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,保证氩气与空气-甲烷的气体体积流量比达到 $\text{Ar} : (\text{CH}_4 + \text{Air}) = 1 : 30$,并保持当量比 $\phi = 1$ 。控制DBD段放电电压和放电频率分别在15~20 kV和6~10 kHz范围内变化,GAD段的电压和频率分别保持4 kV与10 kHz恒定,通过不同放电参数下的火焰光谱进行分析,判断其对火焰的影响。表1所示为本试验具体工况。

表1 DBD激励甲烷滑动弧火焰试验工况

Table 1 Test condition of activated methane gliding arc flame of DBD

工作参数	取值范围
放电电压/kV	15~20
放电频率/kHz	6~10
当量比	1.0
掺混比	1:30
掺混气体	氩气

1.3 方法

采用高速摄影法+发射光谱法的检测方法对甲烷燃烧火焰进行诊断,重点研究火焰的特征光谱及活性粒子随放电参数的变化趋势。火焰中会有较多处于高能级的分子发生跃迁过程,而不同分子进行跃迁过程时产生的特征谱线波长是不同的^[8]。由于火焰中部的光谱信息最强,因此在试验时如图2所示沿火焰高度方向将火焰三等分,并以火焰中部为测量点对火焰发射光谱进行采集,为了避免实验偶然性,每个测量点均采集五次取平均值。

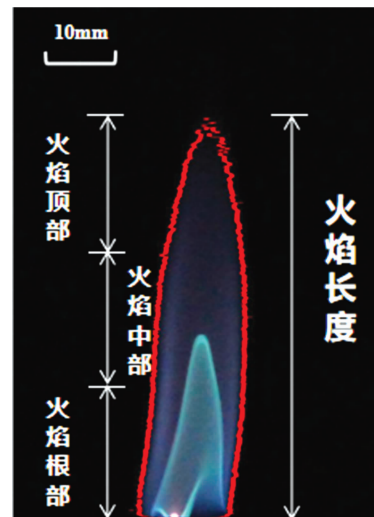


图2 火焰结构划分方法

Fig. 2 Flame structure division method

2 结果与讨论

2.1 火焰特征谱线分析

图3所示为双模式放电的特征谱线图，图4为不同种类活性基的特征谱线，其中图4(a)为OH基团特征谱线，图4(b)为CH基团特征谱线。图3中DBD段的放电频率为10 kHz、

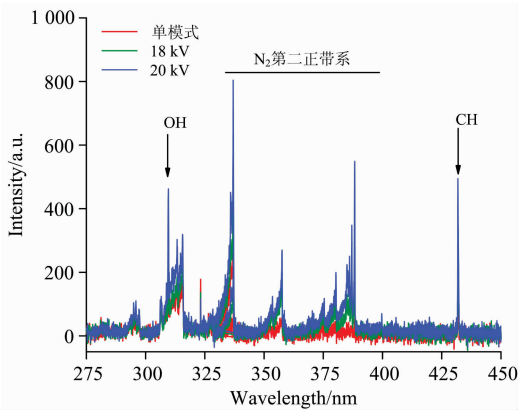


图3 双模式放电的特征谱线图

Fig. 3 Characteristic spectral line diagram of dual-mode discharge

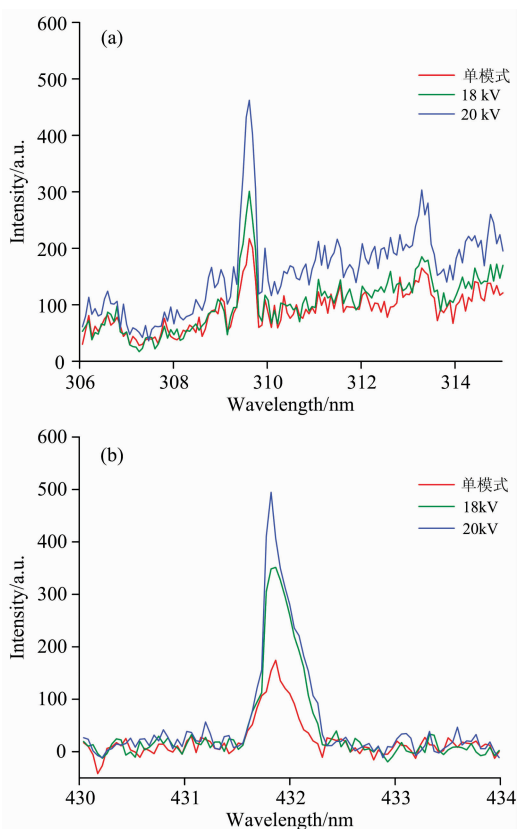


图4 双模式放电情况下不同活性基对应的火焰谱线图

(a): OH基团特征谱线; (b): CH基团特征谱线

Fig. 4 Flame line diagram for different active bases in dual-mode discharge

(a): OH; (b): CH

放电电压分别为0, 18和20 kV, 放电电压为0 kV时对应单GAD放电点火。

如图3和图4所示, DBD激励甲烷滑动弧火焰光谱中主要有OH基团、 N_2 第二正带系 N_2 SPS(second positive system, SPS)系列谱线^[9]、甲烷脱氢后产生的CH基团^[10]。这些自由基是反应的中间产物, 能够促进化学反应的进行, 提高反应速率。单GAD点火的火焰光谱中得到的活性基谱线的相对光谱强度很低, DBD放电后, 自由基的相对光谱强度都出现增长。

图4(a)为OH基团的光谱, 主要分布在306~315 nm之间, 图4(b)为CH基团的光谱, 甲烷脱氢后产生的CH基团分布在430~435 nm区间范围。如图所示, 双模式放电的光谱强度明显强于单模式放电; 随着放电电压的增大, OH基和CH基的光谱强度随之增大。DBD放电后, 这些自由基光谱强度得到了明显的提高, 说明放电加大了自由基的产生, 可以促进GAD的火焰反应程度。

2.2 电压-电流波形

由于不同放电电压条件下的电流-电压波形图的结构十分类似, 因此仅给出如图5所示的15 kV的波形图。

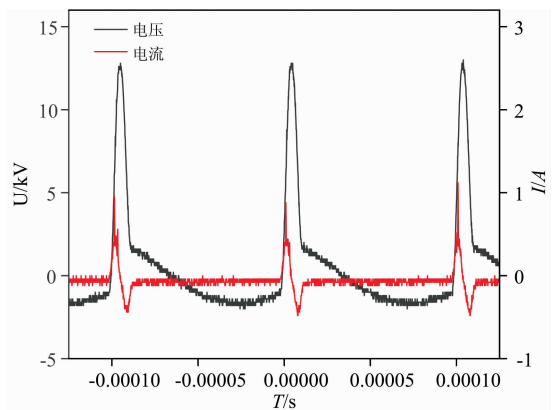


图5 微秒脉冲电源放电电压和电流波形图

Fig. 5 Waveform diagram of discharge voltage and current of microsecond pulse power supply

如图5所示, 在每个放电周期内, 电压上升沿及下降沿上均可发现一个剧烈的电流脉冲, 上升沿放电完全后开始下一轮的放电。由于同轴内外电极不对称, 导致放电电流的脉冲丝数量在上下周期是不一致的, 而且放电由内电极向外电极运动时更容易发生。放电过程中脉冲下降沿的反向电流峰一直低于正向电流峰, 随着电压升高, 反向电流峰越来越明显, 峰值逐渐增大^[11]。

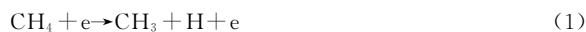
2.3 放电参数对火焰光谱活性粒子的影响

2.3.1 放电参数对CH基团的影响

CH基是甲烷裂解的重要的中间产物, 同时CH基也是 CH_4 大分子化合物分解成为小分子化合物的重要标志, 自身化学性质也很活泼, 能与许多活性基发生化学反应。因此, 火焰中CH基的分布可以表示燃烧程度, 也可以体现DBD激励甲烷对火焰燃烧的辅助作用。

图6所示为CH基光谱强度随电压及频率的变化。从图

中可以看出,单模式放电时 CH 基的相对光谱强度较低, DBD 放电后 CH 基升高,同时随着电压及频率的升高,火焰中 CH 基的相对光谱强度均明显增大,这说明随着放电参数的增大甲烷的电离程度也更加明显。甲烷离解生成 CH 基的方程式如下^[12]



从式(1)一(3)可以看出, CH₄ 分子的 C—H 键的断裂主因是其与高能电子及活性基团之间的非弹性碰撞。当放电电压较低时,电子平均动能较低, CH₄ 分子与电子发生非弹性碰撞程度低,故低电压时 CH 基团的相对光谱强度相对较低。随着电压和频率的逐渐增大,电子平均动能增大, CH₄ 分子与电子发生非弹性碰撞程度不断增大, DBD 段产生的活性粒子数增加,所以 CH 基团的相对光谱强度升高。随峰值电压的增大放电区域内的场强随之增大, DBD 放电段等离子体内高能电子在电场的作用下具有更高能量,活性粒子从激发态退激到基态的数目也随之增大,放电区内生成的高能电子数目变多。CH₄ 裂解的程度越大,生成的 CH 基越多,火焰中 CH 基的光谱强度也越高。

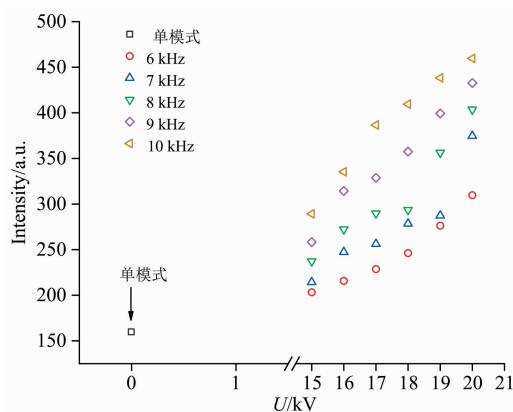


图 6 CH 基光谱强度随电压及频率的变化趋势
Fig. 6 Changes of spectral intensity of CH base with voltage and frequency

2.3.2 放电参数对 OH 基团的影响

OH 基是燃料燃烧过程中重要的中间体^[13], 主要分布在火焰前锋和产物区。根据链式反应原理, 活性基的含量可以促进反应的进行, 加快整个反应速率。通过对 OH 基分布特征的分析, 可以得到甲烷燃烧的化学反应速率信息。

图 7 为火焰中 OH 基光谱强度随电压及频率的变化趋势。如图 7 所示, 单模式时 OH 基团的相对光谱强度较低, DBD 放电后 OH 基团相对光谱强度升高, 随放电电压和放电频率的增长, 其表现整体增长的变化趋势, 放电电压升高时,

OH 基团逐渐增加, 出口的火焰燃烧反应更加充分, 较高的火焰温度利于 OH 生成。电压为 15 kV 时, 此时甲烷燃烧不完全, 较低的温度不利于燃烧过程生成 OH。而随着电压和频率升高, 活性粒子增多, 甲烷与空气混合更加充分, 火焰温度也逐渐升高, 促进了链式反应中 OH 生成, 有效促进火焰内部的链式化学反应进程。

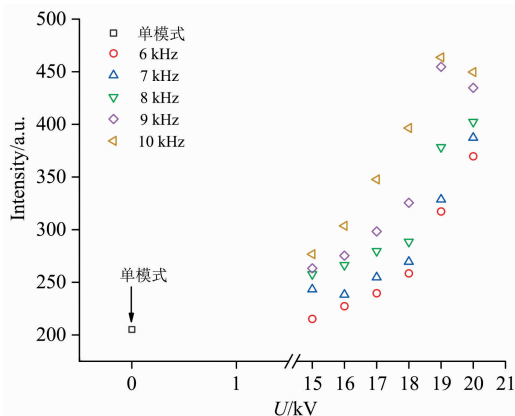


图 7 OH 基光谱强度随电压及频率的变化趋势
Fig. 7 Changes of spectral intensity of OH base with voltage and frequency

当电压达到 19 kV, 放电频率达到 9 kHz 时, OH 基呈现下降趋势, 此时高压电极上会附着大量高速电子, 在 DBD 放电段介质层上形成反向电场, 内部反向电场与外部电场之间相互抵消, 导致总电场内部场强降低, 高能电子获得的能量发生损耗, 不利于 OH 基的产生。

3 结论

利用自主设计的 DBD-滑动弧双模式等离子体激励器对掺混体积流量比为 1 : 30 的氩气/甲烷/空气混合气进行点火, 通过发射光谱法和电化学诊断法对燃烧火焰进行检测, 主要得出以下结论:

(1) 单一 GAD 点火得到的火焰光谱中活性粒子的特征谱线相对光谱强度很低; DBD 放电后, 活性粒子的光谱强度增大, 特征谱线更加明显。

(2) DBD 段放电电压及放电频率的增大可有效提升火焰内部的活性粒子含量, 甲烷经过 DBD 激励后, 随放电电压和频率的增加, 火焰中 OH 基、CH 基等主要活性粒子都随之增加。

(3) DBD 激励甲烷后, 滑动弧段出口处甲烷燃烧反应更加充分, 火焰温度越高越容易产生 OH 基, 双模式放电与单模式 GAD 相比, 可有效促进火焰内部的链式化学反应进程, 促进燃料燃烧。

References

- [1] YU Jin-lu, HUANG Dan-qing, WANG Si-bo, et al(于锦禄, 黄丹青, 王思博, 等). Aeroengine(航空发动机), 2018, 44(3): 12.
- [2] WU Yun-ke, YANG Qian, WANG Hui-ru(吴云柯, 杨谦, 王慧汝, 等). Aerospace Power(航空动力), 2020, (3): 62.
- [3] NIE Wan-sheng, ZHOU Si-yin, CHE Xue-ke(聂万胜, 周思引, 车学科). High Voltage Engineering(高电压技术), 2017, 43(6): 1749.
- [4] LEI Jian-ping, HE Li-ming, CHEN Yi, et al(雷健平, 何立明, 陈一, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2020, 69(19): 195203.
- [5] LIU Xiong, HE Li-ming, DAI Wen-feng, et al(刘雄, 何立明, 戴文峰, 等). Journal of Propulsion Technology(推进技术), 2020, 41(7): 1550.
- [6] DING Yu-zhu, XIA Sheng-guo, WANG Qiong-fang, et al(丁玉柱, 夏胜国, 王琼芳, 等). Proceedings of the CSEE(中国电机工程学报), 2011, 31(31): 204.
- [7] Yang Z, Yu X, Peng J, et al. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 81: 209.
- [8] PENG Zhi-min, DING Yan-jun, ZHAI Xiao-dong(彭志敏, 丁艳军, 翟晓东). Acta Physica Sinica(物理学报), 2011, 60(10): 104702.
- [9] ZHAO Meng-ran, ZHU Xiao-lei, TIAN Zheng-lin, et al(赵梦然, 朱小磊, 田正林, 等). Energy Engineering(能源工程), 2020, (1): 34.
- [10] LI Zheng-kai, CHEN Lei, YANG Cong, et al(李政楷, 陈雷, 杨聪, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2021, 41(5): 1398.
- [11] ZHOU Yang, JIANG Hui, ZHANG Cheng, et al(周杨, 姜慧, 章程, 等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2014, 40(10): 3091.
- [12] XU Feng, ZHU Li-hua, LI Chuang(徐锋, 朱丽华, 李创). Chinese Journal of Luminescence(发光学报), 2017, 38(3): 372.
- [13] JIANG Xin-sheng, YU Bin-bin, XU Jian-nan, et al(蒋新生, 余彬彬, 徐建楠, 等). CIESC Journal(化工学报), 2020, 71(11): 5352.

Flame Spectrum and Active Particles Analysis of the Effect of Dielectric Barrier Discharge Induced on Gliding Arc Discharge With the Mixture of Methane-Air-Ar Within A Dual Mode Discharge

PEI Huan¹, CHEN Lei^{1*}, WANG Si-yuan², YANG Kun¹, SONG Peng²

1. Aerospace Engineering Institute, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Dalian Minzu University, Dalian 116605, China

Abstract The discharge of DBD in unburned gaseous fuel or the combustible mixture will produce a lot of active free radicals, which can promote combustion and improve the combustion characteristics of fuel. In this paper, the effect of DBD excited methane on gliding arc flame is studied by using the key active particles (CH and OH) produced by DBD to enhance combustion. Therefore, a self-designed DBD-Gliding arc dual-mode plasma exciter is used to excite argon, methane and air mixture by using a coaxial Dielectric barrier discharge structure. The argon, methane and air mixture after excitation is fed into the gliding arc end for ignition. The volume flow ratio of argon to Air-methane in the inlet passage can reach $Ar : (CH_4 + Air) = 1 : 30$ by adjusting the Airflow rate to $4.76 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ and adding methane to $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, the mixture of argon, methane and methane can be discharged and burned uniformly and stably when the equivalent ratio of chemical combustion is $\phi = 1$. The discharge voltage in the DBD segment varies from 15 to 20 kV, and the discharge frequency varies from 6 to 10 kHz. The voltage and frequency in the gliding arc discharge segment remain constant at 4 kV and 10 kHz, respectively, the type and spectrum intensity of free radicals in gliding arc flame were measured by a high-speed optical fiber spectrometer, and the effect of methane excited by discharge parameters on free radicals (CH and OH) in-flame was analyzed. The results show that the increase of DBD voltage and frequency can promote the coupling reaction in the flame and can effectively increase the content of active particles in the methane gliding arc flame. The OH group and CH group play an important role in the combustion chain reaction. The OH and CH groups in the flame increase with the increase of DBD discharge voltage and frequency. After DBD discharge, the spectrum intensity of the active particles increases, and the characteristic spectrum is more obvious than that of a single-mode. After the methane is excited by DBD, the flame composition changes, and the methane combustion reaction at the exit of the gliding arc is sufficient. The higher the flame temperature, the more likely it to produce an OH group. Compared with the single-mode GAD,

the Double mode discharge can promote the chain chemical reaction process and fuel combustion.

Keywords Dual mode discharge; Gliding arc discharge; Dielectric barrier discharge; Flame spectrum; Plasma

(Received Jun. 11, 2021; accepted Sep. 7, 2021)

* Corresponding author

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告

《光谱学与光谱分析》2023年征订启事

国内邮发代码：82-68

国外发行代码：M905

《光谱学与光谱分析》1981年创刊，国内统一刊号：CN 11-2200/O4，国际标准刊号：ISSN 1000-0593，CODEN 码：GYGFED，国内外公开发行，大 16 开本，332 页，月刊；是中国科协主管，中国光学学会主办，钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版，每期售价 115 元，全年 1380 元。刊登主要内容：激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X 射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊，中国科协优秀科技期刊，中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊，中国科技论文统计源刊，“中国科学引文数据库”，“中国物理文摘”，“中国学术期刊文摘”，同时被国内外的 CJCR, CNKI, CSCD, WJCI, SCI, AA, CA, Ei, AJ, PJK, MEDLINE, Scopus 等文献机构收录。根据中国科学技术信息研究所发布信息，中国科技期刊物理类影响因子、引文量及综合评价总分《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告（广告经营许可证：京海市监广登字 20170260 号）。

《光谱学与光谱分析》的主编为高松院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅，若有漏订者可直接与《光谱学与光谱分析》期刊社联系。

联系地址：北京市海淀区学院南路 76 号（南院），

《光谱学与光谱分析》期刊社

邮政编码：100081

联系电话：010-62181070, 62182998

电子信箱：chnghpxygpfx@vip.sina.com

修改稿专用邮箱：gp2008@vip.sina.com

网 址：<http://www.gpxygpfx.com>

