

# 三维旋转滑动弧等离子体助燃激励器的光谱特性实验

何立明, 张 达, 陈 一, 雷健平, 张 磊, 张圣武, 朱春昶, 杨兴魁

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 为研究不同射流流量和放电电压下三维旋转滑动弧等离子体助燃激励器的光谱特性规律,对 3 种不同几何结构的电极,在大气压下进行了交流滑动弧放电等离子体的光谱信号测量。结果表明:当流量和电压越大时,三维旋转滑动弧放电等离子体的振动温度越高,即振动激发强度越强。同时,比较 A、B、C 3 种滑动弧放电等离子体电极结构的光谱特性后发现,A 型电极在滑动弧放电过程中产生的等离子体的振动温度最高,最有利于激发产生等离子体。综合考虑以上几种因素发现,流量对振动温度的影响最为明显,流量越大,OH、O<sub>2</sub> 和 O 等粒子的相对发射强度也越强。例如,在  $U_0=120\text{ V}$  下,当  $Q=40\text{ g/min}$  时 O 的平均相对发射强度约为 1 800 a. u. unit,当流量增大到  $Q=100\text{ g/min}$  时,O 的平均相对发射强度为 2 800 a. u. unit。

**关键词** 三维旋转滑动弧等离子体;助燃激励器;光谱特性;振动温度

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.04.001

**中图分类号** V231.2<sup>+</sup>6 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)04-0001-06

## An Experiment of Spectral Characteristics on Plasma-assisted Combustion with 3D Rotating Gliding Arc Discharge

HE Liming, ZHANG Da, CHEN Yi, LEI Jianping, ZHANG Lei, ZHANG Shengwu,  
ZHU Chunchang, YANG Xingkui

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038,  
China)

**Abstract:** In view of studying the spectral characteristic laws of plasma-assisted combustion with 3D rotating gliding arc discharge under different jet flow and voltages, three kinds of electrodes (A, B, C) with different geometrical structures are investigated upon its spectral signals of gliding arc discharge plasma alternating current under atmospheric pressure. The results demonstrate that the vibrational temperatures become higher with increase of jet flow and voltage, that is, vibrational excitation intensity becomes fiercer during discharging. Simultaneously, compared with the gliding arc discharge plasma spectral characteristics of another two electrodes, A with higher vibrational temperature of plasma during discharging is the best one to actuate the plasma. In consideration of factors mentioned above, the influence of flow rates on the vibrational temperature is the most obvious. The larger the flow rate triggers, and the stronger the relative emission intensity of particles such as OH, O<sub>2</sub> and O. For instance, the average emission intensity

**收稿日期:** 2016-12-31

**基金项目:** 国家自然科学基金(51436008,51106179)

**作者简介:** 何立明(1959—),男,浙江上虞人,教授,博士生导师,主要从事飞机推进系统气动热力理论与工程、新型燃烧室冷却技术和等离子体点火助燃技术研究。E-mail:heliming369@163.com

**引用格式:** 何立明,张达,陈一,等. 三维旋转滑动弧等离子体助燃激励器的光谱特性实验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(4):1-6. HE Liming, ZHANG Da, CHEN Yi, et al. An Experiment of Spectral Characteristics on Plasma-assisted Combustion with 3D Rotating Gliding Arc Discharge [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(4): 1-6.

of O is about 1 800 a. u. unit under 40 g/min ( $U_0=120$ ), and as the flow increases to 100 g/min, the average emission intensity of O enlarges to 2 800 a. u. unit.

**Key words:** 3D rotating gliding arc discharge plasma; assisted combustion actuator; spectral characteristic; vibrational temperature

非平衡等离子体具能量利用率高、对化学反应有良好选择性等优点,近年来得到国内外学者的广泛关注,已被应用于医学<sup>[1]</sup>、化工<sup>[2-4]</sup>、环境<sup>[5-6]</sup>等领域。Starikovskii 的研究表明,非平衡等离子体可以大幅提高燃烧效率<sup>[7]</sup>。Klimov 等<sup>[8]</sup>研究表明,等离子体助燃效果明显,可有效扩展燃烧极限。研究表明<sup>[9-13]</sup>,非平衡等离子体产生过程中释放的大量活性粒子、自由基等,能有效改善燃烧,加速燃烧反应的进行。滑动弧放电作为产生非平衡等离子体的一种方法,具有电极结构简单,温度调节范围广,能量利用率高等优点,其在激励燃烧反应方面具有独特的优势<sup>[14]</sup>。目前国内外在滑动弧放电应用方面已经做了大量的工作,但在理论方面研究较少,目前对放电特性和光谱特性等方面的研究仍处于探索阶段<sup>[15-17]</sup>。倪明江等<sup>[18]</sup>在对空气滑动弧放电等离子体光谱特性的研究中发现了氧原子的谱线和 OH ( $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ ) 谱带,这些活性粒子正是提高燃烧效率、促进燃烧反应进行的关键。

何立明等<sup>[14]</sup>进行了二维滑动弧放电等离子体的放电特性实验研究。探索了流量、电压和电极结构等因素对二维滑动弧放电等离子体助燃激励器特性的影响。但是,二维滑动弧放电等离子体助燃激励器的电极结构尺寸较大,仍然不利于施加到现有的航空发动机燃烧室上,而且二维滑动弧放电等离子体助燃激励器的放电功率有限,即激发产生等离子体的能力不足以用于真实的航空发动机燃烧室的助燃,所以需要设计一种新型的能应用于航空发动机的三维滑动弧放电等离子体助燃激励器。

## 1 实验设备

图 1 为光谱特性实验系统的示意图。实验装置包括三维旋转滑动弧放电等离子体助燃激励器、电源、气源及管路等。滑动弧放电等离子体激励电源为南京苏曼等离子科技有限公司生产的毫秒脉冲电源;由空气压缩机提供所需射流(额定压力为 2.5 MPa,容积流量为 0.6 m<sup>3</sup>/min),利用 Avantes 四通道光谱分析仪和三维数字坐标架位移机构采集光谱信号。

三维旋转滑动弧放电等离子体助燃激励器由不锈钢材料加工而成,见图 2。其结构包括阳极外壳、

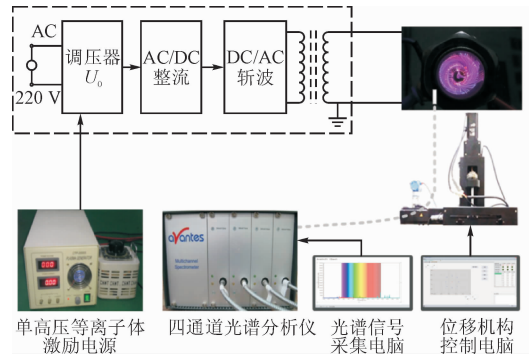


图 1 滑动弧放电等离子体的光谱特性实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental set-up of gliding arc discharge plasma spectral characteristics

阴极中心电极、进气口、旋流器等。

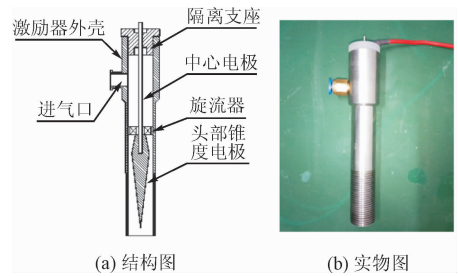


图 2 三维旋转滑动弧放电结构及实物图

Fig. 2 Real structure and product chart of 3D rotating gliding arc discharge

本文设计了 3 种不同结构参数的电极,见图 3。夹角为  $\theta$ ,最小放电间距为  $d$ 。激励器上部安装有进气口,电极根部安装有轴流式旋流器。

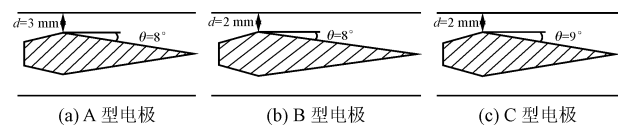


图 3 三维旋转滑动弧放电的电极结构示意图

Fig. 3 Schematic of the electrode structures of 3D rotating gliding arc discharge

实验时,阳极与单高压电源连接,阴极接地。当两电极间的电压达到击穿电压后,在该结构的两电极最小间隙处发生击穿,形成电弧。同时气流在旋流器的作用下形成旋向气流,旋向气流推动电弧旋转着向易燃激励器出口处滑动,形成三维空间放电等离子体区域。

图 4 为三位旋转滑动弧放电等离子体助燃激励器工作时的效果图。

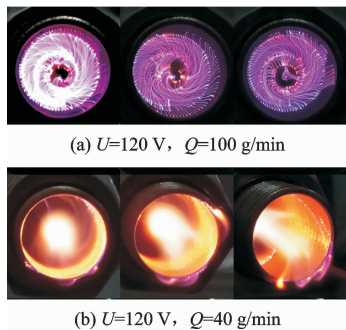


图 4 三维旋转滑动弧放电等离子体助燃激励器的放电效果图

Fig. 4 The effect picture of the fuel actuator using 3D rotating gliding arc discharge plasma

## 2 光谱数据的采集及处理

### 2.1 光谱数据采集

三维旋转滑动弧放电过程中产生的等离子体的发射光谱信号由光谱分析仪采集,通过数控三维坐标位移系统对滑动弧面进行采集点扫描,并对 8 个采集点的数据取平均值,得到有利于强化燃烧的激发态粒子的相对发射强度。图 5 为光谱采集轨迹示意图。

滑动弧放电产生等离子体的过程中振动激发过程十分活跃,会生成许多振动态粒子。这些振动态粒子携带的能量较高,与其他分子发生反应就会生成等离子体强化燃烧激励所需要的自由基与化学活性粒子。

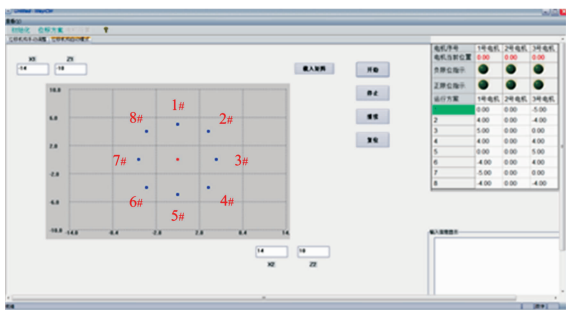


图 5 光谱采集轨迹

Fig. 5 Collection of spectrum tracks

在电压  $U_0$  为 60 V,射流流量  $Q$  为 60 g/min 时,三维旋转滑动弧等离子体放电的典型发射光谱如图 6 所示。从图中可以找到有利于强化燃烧的激发粒子,如 OH(314 nm)、 $O_2$ (337 nm)、O(777.4 nm)等。

### 2.2 振动温度的计算

振动温度是表征等离子体振动激发强度的重要

参数之一,本文对氮分子第二正带系( $C^3 \Pi_u \rightarrow B^3 \Pi_g$ )的 3 组顺序带组进行采集,并采用较为通用的玻尔兹曼图解法计算等离子体的振温度  $T_v$ 。

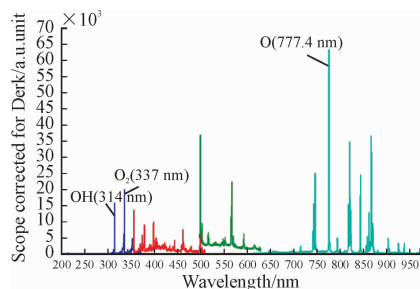


图 6 三维旋转滑动弧放电等离子体的典型发射光谱

Fig. 6 Typical plasma emission spectrum of 3D gliding arc discharge

为减小三维旋转滑动弧放电等离子体助燃激励器周向不均匀的误差,将 8 个周向上采样点计算得到的结果取算术平均值,得到平均振动温度。

双原子分子发射光谱振动谱带的谱线强度为:

$$I_{v'v''} = hc\nu_{v'v''} p_{v'} \quad (1)$$

由分子光谱学理论可知,上态振动能量为:

$$E_{v'} = \omega_e \left( v' + \frac{1}{2} \right) - \omega_e x_e \left( v' + \frac{1}{2} \right)^2 + \omega_e y_e \left( v' + \frac{1}{2} \right)^3 + \dots \quad (2)$$

式(2)等号右端第 3 项及后面各项相比前 2 项要小得多,计算中可以忽略不计。

当等离子体处于局部热平衡状态时,上态分子布居数符合玻尔兹曼分布,满足如下关系:

$$N_{v'} = N_0 e^{-E_{v'}/kT_v} \quad (3)$$

联立式(1)、(2)、(3),得:

$$\ln \frac{I_{v'v''}}{\nu_{v'v''} p_{v'v''}} = C - \frac{E_{v'}}{kT_v} \quad (4)$$

式中:  $C$  为常数;  $k=8.617\ 689 \times 10^{-5}$  eV/K。

计算  $B$ :

$$B = I_{v'v''} / (\nu_{v'v''} p_{v'v''}) \quad (5)$$

以  $\ln B$  作为因变量,振动能量  $E_v$  作为自变量,绘制出  $\ln B \sim E_v$  直线并求出该直线的斜率,进而从斜率求出振动温度  $T_v$ 。为了减小计算误差,本文选取氮气分子第二正带系( $C^3 \Pi_u \rightarrow B^3 \Pi_g$ )的 3 组顺序带组:

$$\begin{aligned} \Delta v_1 &= -1(0-1, 1-2, 2-3) \\ \Delta v_2 &= -2(0-2, 1-3, 2-4) \\ \Delta v_3 &= -3(0-3, 1-4, 2-5) \end{aligned} \quad (6)$$

用式(6)分别计算振动温度,再求 3 个振动温度的平均值作为等离子体的振动温度。

### 3 三维旋转滑动弧放电等离子体助燃激励器的光谱特性分析

#### 3.1 电极结构、电压、流量对振动温度的影响

##### 3.1.1 电极结构对振动温度的影响分析

图7为3种电极在 $Q=100\text{ g/min}$ 下产生的等离子体平均振动温度,由图可见A型和B型电极的结果比较接近,在 $U_0=100\text{ V}$ 时的平均振动温度约为 $3\ 800\text{ K}$ ;在 $U_0=120\text{ V}$ 时的平均振动温度约为 $3\ 900\text{ K}$ 。而对C型电极在 $U_0=100\text{ V}$ 时的平均振动温度约为 $3\ 700\text{ K}$ ;在 $U_0=120\text{ V}$ 时平均振动温度约为 $3\ 750\text{ K}$ 。A、B型电极优于C型电极。综合分析发现,在其它条件相同时,最小间距 $d$ 越大,夹角越小时,电弧放电产生等离子体的效果越好。因此,在以后的研究中,以A型电极为基础进行进一步的实验研究。

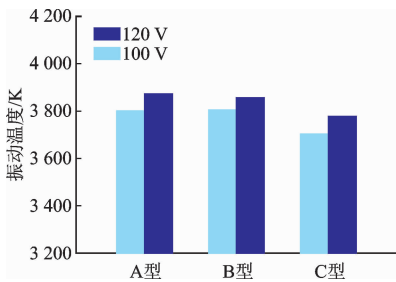


图7 3种电极在 $Q=100\text{ g/min}$ 下产生的等离子体平均振动温度

Fig. 7 Average vibrational temperature of plasma in three electrodes during 100 g/min

##### 3.1.2 流量对振动温度的影响分析

图8为A型电极在 $U_0=100\text{ V}$ 和 $U_0=120\text{ V}$ 下电弧放电产生的等离子体平均振动温度,由图可见在两种电压下都呈现出相同的特点,即平均振动温度随着空气流量的增大而增高。在 $U_0=100\text{ V}$ 下,当 $Q=40\text{ g/min}$ 时平均振动温度约为 $3\ 450\text{ K}$ ,当流量增大到 $Q=100\text{ g/min}$ 时,平均振动温度增高到 $3\ 850\text{ K}$ ;在 $U_0=120\text{ V}$ 下,当 $Q=40\text{ g/min}$ 时平均振动温度约为 $3\ 500\text{ K}$ ,当流量增大到 $Q=100\text{ g/min}$ 时,平均振动温度增高到 $3\ 800\text{ K}$ 。

##### 3.1.3 电压对振动温度的影响分析

对比图7和图8可以发现,电压也会对等离子体振动温度产生影响。由图8可知,在 $Q=40\text{ g/min}$ 工况下, $U_0=100\text{ V}$ 时平均振动温度高于 $U_0=120\text{ V}$ 时的情况;而当 $Q$ 在 $60\text{ g/min}\sim 100\text{ g/min}$ 的工况下, $U_0=120\text{ V}$ 时的平均振动温度随着流量的增大而升高的更快,高于 $U_0=100\text{ V}$ 时的平均振动温度。

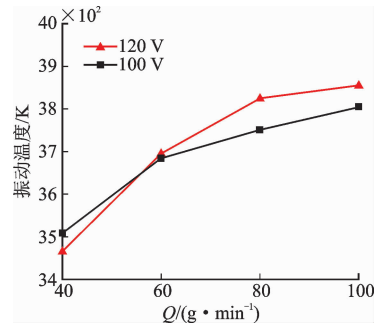


图8 A型电极的平均振动温度随空气流量的变化

Fig. 8 Average vibrational temperature of A type electrode with the air flow changing

通过研究电极结构、电压、空气流量对振动温度的影响。发现电极结构、电压、空气流量对等离子体平均振动温度均有明显影响。最小间距 $d$ 越大,夹角越小时,激发产生等离子体的效果越好。电压越大,空气流量越大时,平均振动温度越高。通过定量比较各个因素的影响效果,发现空气流量对平均振动温度的影响最为显著。

#### 3.2 空气流量对三维旋转滑动弧放电等离子体激发态粒子的相对发射强度的影响分析

通过上文的分析发现,空气流量对滑动弧放电等离子体的光谱特性影响比较显著。下面着重分析空气流量对激发态物质的相对发射强度的影响,以A型电极为例,重点选取了以下3种活性粒子对燃烧最为有利的激发态物质加以分析,分别为OH( $314\text{ nm}$ )、 $\text{O}_2$ ( $337\text{ nm}$ )和O( $777.4\text{ nm}$ )。

##### 3.2.1 空气流量对OH相对发射强度的影响分析

图9为A型电极的OH( $314\text{ nm}$ )平均相对发射强度,发现随着空气流量的增大,OH平均相对发射强度也逐渐增大。

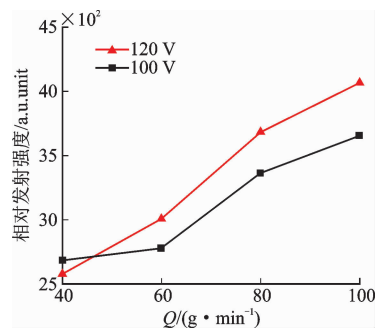


图9 A型电极OH( $314\text{ nm}$ )相对发射强度随空气流量的变化

Fig. 9 OH( $314\text{ nm}$ ) relative emission intensity of A type electrode with air flow changing

$U_0=100\text{ V}$ , $Q=40\text{ g/min}$ 时OH平均相对发射强度约为 $2\ 700\text{ a. u. unit}$ ,当空气流量增大到 $Q=100\text{ g/min}$ 时,结果约为 $3\ 700\text{ a. u. unit}$ ;在 $U_0=120$

V下,当 $Q=40\text{ g/min}$ 时OH平均相对发射强度约为2600 a. u. unit,当空气流量增大到 $Q=100\text{ g/min}$ 时,结果约为4100 a. u. unit。从总体上看, $U_0=120\text{ V}$ 下的OH的激发效果要好于 $U_0=100\text{ V}$ 的情况。

### 3.2.2 空气流量对 $\text{O}_2$ 相对发射强度的影响分析

图10为A型电极的 $\text{O}_2(337\text{ nm})$ 平均相对发射强度,发现随着空气流量的增大, $\text{O}_2$ 平均相对发射强度也逐渐增大。

在 $U_0=100\text{ V}$ 下,当 $Q=40\text{ g/min}$ 时 $\text{O}_2$ 平均相对发射强度约为17500 a. u. unit,当流量增大到 $Q=100\text{ g/min}$ 时,结果约为25800 a. u. unit;在 $U_0=120\text{ V}$ 下,当 $Q=40\text{ g/min}$ 时 $\text{O}_2$ 平均相对发射强度约为19500 a. u. unit,当流量增大到 $Q=100\text{ g/min}$ 时,结果约为26000 a. u. unit。总体看, $U_0=120\text{ V}$ 下的 $\text{O}_2$ 的激发效果好于 $U_0=100\text{ V}$ 时的情况。

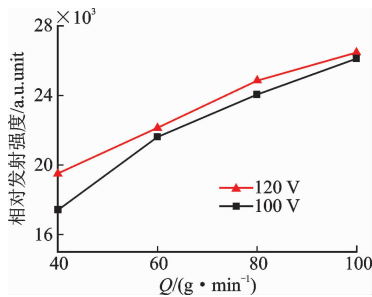


图10 A型电极 $\text{O}_2(337\text{ nm})$ 相对发射强度随空气流量的变化

Fig. 10  $\text{O}_2(337\text{ nm})$  relative emission intensity of A type electrode with air flow changing

### 3.2.3 空气流量对O相对发射强度的影响分析

图11为A型电极的 $\text{O}(777.4\text{ nm})$ 平均相对发射强度,发现随着空气流量的增大,O平均相对发射强度也逐渐增大。

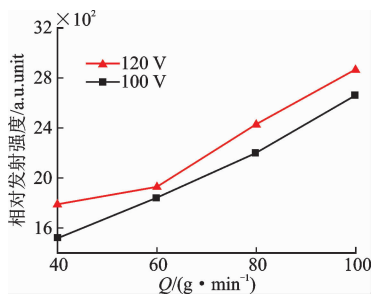


图11 A型电极 $\text{O}(774\text{ nm})$ 相对发射强度随空气流量的变化

Fig. 11 Relative emission intensity of A type electrode with air flow changing

在 $U_0=100\text{ V}$ 下,当 $Q=40\text{ g/min}$ 时O平均相对发射强度约为1500 a. u. unit,当空气流量增大到

$Q=100\text{ g/min}$ 时,结果约为2650 a. u. unit;在 $U_0=120\text{ V}$ 下,当 $Q=40\text{ g/min}$ 时O平均相对发射强度约为1800 a. u. unit,当空气流量增大到 $Q=100\text{ g/min}$ 时,结果约为2800 a. u. unit。总体上看, $U_0=120\text{ V}$ 下O的激发效果好于 $U_0=100\text{ V}$ 。

通过研究空气流量对OH、 $\text{O}_2$ 、O等活性粒子的相对发射强度的影响,发现空气流量对三种活性粒子的相对发射强度均有显著影响,当流量越大时,OH、 $\text{O}_2$ 和O等粒子的相对发射强度也越强。

## 4 结论

1)比较A、B、C3种电极结构的放电产生等离子体光谱特性后发现,A型电极的在电弧放电过程中产生的等离子体振动温度最高,最有利于激发产生等离子体。通过比较A、B、C3种电极结构,发现电极间夹角越小,最小间距越大,产生的等离子体的效果越好。

2)当空气流量和电压越大时,三维旋转滑动弧放电等离子体的振动温度越高,即振动激发强度越强,并且OH、 $\text{O}_2$ 和O等粒子的相对发射强度也越强。对于A型电极在 $U_0=100\text{ V}$ 的情况下,当 $Q=40\text{ g/min}$ 时平均振动温度约为3450 K,当流量增大到 $Q=100\text{ g/min}$ 时,平均振动温度增高到3850 K。

## 参考文献(References):

- [1] 卢新培. 等离子体射流及其医学应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1416-1425.  
LU X P. Plasma Jets and Their Biomedical Application [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1416-1425. (in Chinese)
- [2] 张浩, 朱风森, 李晓东, 等. 滑动弧放电等离子体重整甲烷关键技术分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 2930-2942.  
ZHANG H, ZHU F S, LI X D, et al. Analysis of Critical technology for Gliding Arc Discharge Plasma Assisted Methanereforming [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 2930-2942. (in Chinese)
- [3] YOUNG N C, YANG Y C, YOSHIKAWA K. Hydrogen Generation Frombiogas Reforming Using a Gliding Arc Plasma-Catalyst Reformer [J]. Environment Engineering Science, 2009, 148(3/4): 283-289.
- [4] KUSANO Y, SØRENSEN B F, ANDERSEN T L, et al. Water-Coolednon-Thermal Gliding Arc for Adhesion Improvement Ofglass-Fibre-Reinforced Polyester [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(13): 135203.

- [5] DU C M, SHI T H, SUN Y W, et al. Decolorization of Acid Orange 7 Solution by Gas-Liquid Gliding Arc Discharge Plasma [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 154(1): 1192-1197.
- [6] 张路路, 杜长明, 谭中兴, 等. 滑动弧放电等离子体在废水处理领域的研究 [J]. *环境工程*, 2009, 27: 105-109.  
ZHAGN L L, DU C M, TAN Z X, et al. Progress Inapplications of Gliding Arc Discharge Plasma to Wastewatertreatment [J]. *Environmental Engineering*, 2009, 27: 105-109. (in Chinese)
- [7] STARIKOVSKII Y. Plasma Supported Combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30: 2405-2417.
- [8] KLIMOV A, BITIURIN V, MORALEV I, et al. Non-Premixed Plasma Assisted Combustion in High Speed Vortex Airflow [R]. AIAA, 2007.
- [9] 夏胜国, 何俊佳. 非平衡等离子体燃烧强化 [J]. *高电压技术*, 2007, 33(10): 109-115.  
XIA S G, HE J J. Non-Thermal Plasma Combustion Enhancement [J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(10): 109-115. (in Chinese)
- [10] 赵兵兵, 何立明, 兰宇丹, 等. 等离子体射流点火器点火特性的实验研究 [J]. *高电压技术*, 2013, 39(7): 1687-1691.  
ZHAO B B, HE L M, LAN Y D, et al. Experimental Investigation of Igniting Characteristics of Plasma Jet Igniter [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(7): 1687-1691. (in Chinese)
- [11] 靳宝林, 郑永成. 航空发动机等离子体流点火技术探讨 [J]. *航空发动机*, 2002, 22(4): 51-56.  
JIN B L, ZHENG Y C. Investigation of Plasma Jet Ignitionin Aircraft Engine [J]. *Aeroengine*, 2002, 22(4): 51-56. (in Chinese)
- [12] 李平, 穆海宝, 喻琳, 等. 低温等离子体辅助燃烧的研究进展、关键问题及望 [J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 2073-2083.  
LI P, MU H B, YU L, et al. Progress, Key Problems and Prospect on Low Temperature Plasma Assisted Combustion [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 2073-2083. (in Chinese)
- [13] PILLA G, GALLEY D, LACOSTED D A, et al. Influence of the Repetition Rate of a Nanosecond Pulsed Discharge on the Stabilization of a Turbulentlean Premixed Flame [R]. AIAA 2006-3243.
- [14] 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.  
HE L M, CHEN Y, LIU X J, et al. Characteristic of Atmospheric Pressure AC Gliding Arc Discharge [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(6): 1921-1928. (in Chinese)
- [15] 杜长明, 乔良, 王静, 等. 新型滑动弧放电等离子体的特性 [J]. *高电压技术*, 2010, 36(4): 1016-1020.  
DU C M, QIAO L, WANG J, et al. Characteristic of Novel Gliding Arc Discharge Plasma [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(4): 1016-1020. (in Chinese)
- [16] 陆胜勇, 孙晓明, 杜长明, 等. 基于 Laval 喷管的滑动电弧放电等离子体发生器及其工作特性分析 [J]. *高电压技术*, 2012, 38(5): 1059-1064.  
LU S Y, SUN X M, DU C M, et al. Gliding Arc-plasma Generator Based on Laval Nozzle and Its Characteristics [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(5): 1059-1064. (in Chinese)
- [17] 汪宇, 李晓东, 余量, 等. 滑动弧低温等离子体放电特性的数值模拟研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(3): 1-8.  
WANG Y, LI X D, YU L, et al. Numerical Simulation Study on Characteristics of Gliding Arc Discharge [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(1): 1-8. (in Chinese)
- [18] 倪明江, 余量, 李晓东, 等. 大气压直流滑动弧等离子体工作特性研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(1): 1-8.  
LI M J, YU L, LI X D, et al. The Study on The characteristics of AC Gliding Arc Plasma under Atmospheric [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(1): 1-8. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)