

## 大气压空气滑动弧等离子体发射光谱诊断

杨 昆, 陈 雷\*, 程凡翀, 裴 欢, 刘桂铭, 王保怀, 曾 文

沈阳航空航天大学航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136

**摘 要** 为了解 Ar 添加对空气滑动弧等离子体的影响, 在放电频率  $f=10$  kHz、空气流量  $q_{\text{Air}}=15$  L·min<sup>-1</sup>、1 atm 下进行了 Ar 体积流量  $q_{\text{Ar}}$  对空气-Ar 滑动弧放电的影响试验研究, 重点分析了不同  $q_{\text{Ar}}$  及调压器电压  $U_{\text{调}}$  下空气等离子体的活性粒子种类、电子密度及振动温度。结果表明, 滑动弧等离子体区的主要活性粒子为 OH、N<sub>2</sub> 的第二正带系、H $\alpha$ 、O 原子、Ar I 及 Ar II 原子, 其中 O 原子及 Ar I、Ar II 原子的相对光谱强度明显较强; 随着  $q_{\text{Ar}}$  的增大, O(777.4 nm) 的相对光谱强度先缓慢增长、再快速增大到极大值、随后缓慢减小并趋于稳定, O(777.4 nm) 的相对光谱强度在 1 580~6 650 a. u. 之间变化; 随  $U_{\text{调}}$  增大, O(777.4 nm) 的相对光谱强度增大, 且电压对其影响受  $q_{\text{Ar}}$  的影响: 在高  $q_{\text{Ar}}$  (4~6 L·min<sup>-1</sup>) 工况下, O(777.4 nm) 的相对光谱强度变化趋势较大; Ar 的加入使 OH(313.4 nm) 相对光谱强度有明显增加, OH(313.4 nm) 相对光谱强度在 235~311 a. u. 之间变化; 随着  $q_{\text{Ar}}$  的增大, OH(313.4 nm) 相对光谱强度先增大再减小并趋于稳定。在较低  $U_{\text{调}}$  (100 V) 工况下, OH(313.4 nm) 的相对光谱强度随  $q_{\text{Ar}}$  变化不明显; 而随着  $U_{\text{调}}$  增大, OH(313.4 nm) 的相对光谱强度随  $q_{\text{Ar}}$  变化明显: 在低  $q_{\text{Ar}}$  (0~4 L·min<sup>-1</sup>) 工况下, OH(313.4 nm) 的相对光谱强度随  $q_{\text{Ar}}$  增大而明显增大。利用 H $\alpha$  谱线做高斯拟合进行电子密度分析计算, 得到电子密度在  $1.15\sim 2.04\times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> 之间。空气流量一定, Ar 的加入能显著增加电子密度: 在  $q_{\text{Ar}}$  为 0~4 L·min<sup>-1</sup> 工况下, 电子密度增长趋势明显, 随着  $q_{\text{Ar}}$  的继续增大, 在较低  $U_{\text{调}}$  (100~120 V) 工况下, 电子密度先增大再减小并趋于稳定; 在较高  $U_{\text{调}}$  (140~160 V) 工况下, 电子密度先增大再缓慢增大并趋于稳定。 $U_{\text{调}}$  变化也会对电子密度造成影响, 电子密度随  $U_{\text{调}}$  增大而增大, 且随  $U_{\text{调}}$  增大, 电子密度增长趋势变快。

**关键词** 滑动弧放电; 发射光谱法; 振动温度; 电子密度; OH; O

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)10-3006-06

### 引 言

滑动弧放电等离子体是高速气体来流在电极间隙最窄处放电击穿产生电弧的一种周期性等离子体放电方式。在放电过程中, 电弧在高速气流的推动下沿着电极滑动, 直至达到极限(电场提供的能量不足以维持电弧的热量耗散)后熄灭, 并重新在电极间隙最窄处产生新电弧。滑动弧等离子体具有较低宏观气体温度、较高电子密度及电子温度的特点, 因此被国内外研究者广泛研究并实际应用。自 Czernichowski 开创性的将滑动弧等离子体应用于 H<sub>2</sub>S 的降解以来, 滑动弧等离子体在燃料重整制氢<sup>[1]</sup>、点火助燃<sup>[2]</sup>、废水处理<sup>[3]</sup>等领域得到广泛应用。张若兵等<sup>[4]</sup>探究了电极结构对二维滑动弧等离子体尺寸的影响, 发现电极张角和电极长度对等离子体

的宽度和长度有明显影响; 何立明等<sup>[5]</sup>验证了滑动弧放电有 A-G 和 B-G 两种放电模式, 且两种模式占比受放电电压和电极几何结构影响; 钟犁等<sup>[6]</sup>探究了进气量、放电间隙对二维滑动弧的放电电压等物理参数的影响, 并对放电的平衡特性进行了定量分析, 发现 10~35 L·min<sup>-1</sup> 的中等流量条件适用于气体处理; 张浩等<sup>[7]</sup>研究了进气流量和 CH<sub>4</sub>/Ar 掺混比对甲烷裂解制氢影响, 发现旋转滑动弧可以在较高 CH<sub>4</sub> 处理量下获得较高 CH<sub>4</sub> 转化率。Wu 等<sup>[8]</sup>通过发射光谱法研究了气体流速对大气压下 Ar/N<sub>2</sub> 旋转滑动弧等离子体振动温度的影响, 发现振动温度在气体流速 2~16 L·min<sup>-1</sup> 工况下先增大后减小, 在 12 L·min<sup>-1</sup> 时达到最大。

滑动弧等离子体在点火助燃<sup>[9-10]</sup>、燃油雾化<sup>[11]</sup>等方面的应用日益增多; 目前国内外对滑动弧理论研究多采用惰性气体作为工作气体, 与点火助燃及燃油雾化的实际工作气体并

收稿日期: 2021-08-05, 修订日期: 2021-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409158, 51676132)资助

作者简介: 杨 昆, 1991 年生, 沈阳航空航天大学航空发动机学院硕士研究生 e-mail: 1129186994@qq.com

\* 通讯作者 e-mail: yuruntianqi@163.com

不一致。本文通过对空气滑动弧等离子体进行光谱诊断,研究 Ar 体积流量  $q_{Ar}$ 、调压器电压  $U_{调}$  对空气滑动弧等离子体的振动温度、电子密度及产生的 OH 及 O 的相对光谱强度的影响,为空气滑动弧等离子体在点火助燃、燃油雾化等领域的应用提供帮助。空气滑动弧等离子体能在较低能耗下促进化学反应活性,必将在点火助燃、燃油雾化方面应用占据一席之地,使其实现广泛应用成为一种可能。

## 1 实验部分

### 1.1 装置

图 1 所示为本试验的试验系统图。放电装置为本课题组自主研制的滑动弧激励器,由两片紫铜刀形电极、聚四氟乙烯绝缘罩、聚四氟乙烯喷嘴、聚四氟乙烯进气管组成,紫铜电极厚 10 mm,总长 100 mm,发展段(电极上电弧产生且滑动的电极弧段)长 75 mm、弧度  $60^\circ$ ,与聚四氟乙烯绝缘罩通过螺纹连接,可调节放电间隙,两电极分别与等离子体电源高压、接地端相连。聚四氟乙烯进气管内径 6 mm,壁厚 2 mm,与聚四氟乙烯绝缘罩通过螺纹连接,可调节进气管与电极最窄间隙的距离。

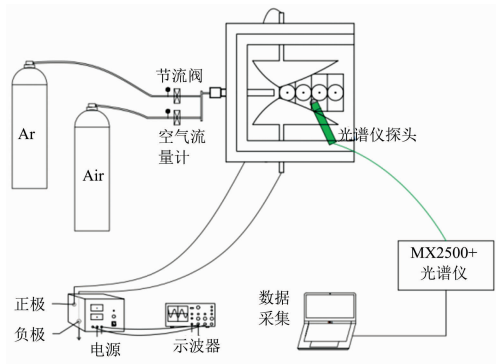


图 1 试验器及测试系统图

Fig. 1 Figure of tester and test system

试验中采用 CTP-2000K 交流等离子体电源供电;采用 Tronix-TDS1002 数字型示波器监控放电电压及输入频率;试验载气分别由纯度 99.99% 的空气及 Ar 瓶提供,空气和 Ar 经各自气体管路通入后预混再通入试验器进行滑动弧等离子体放电;光谱信息由海洋光学 MX2500+ 多通道光谱仪采集,每一工况光谱信息均采集 10 次后取平均值。

### 1.2 光谱诊断方法

#### 1.2.1 试验工况

本研究中,光谱测量采用发射光谱法。试验中固定  $q_{Air} = 15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $f = 10 \text{ kHz}$  不变,两电极最窄处间隙固定为 8 mm,进气管距离电极最窄处为 10 mm,为能在光谱仪采集范围内清晰采集光谱信息,光纤探头固定在距滑动弧放电区域垂直高度 10 mm 位置处。空气击穿电场远大于 Ar 的,加入 Ar 后产生的潘宁电离效应能促进空气电离,为探究 Ar 添加对空气滑动弧等离子体的影响,改变  $q_{Ar}$  及  $U_{调}$  进行发射光谱诊断。

#### 1.2.2 电子密度的计算

电子密度表征等离子体电离度强弱,较常用的计算方法是谱线展宽测量法<sup>[12-13]</sup>,可以用 H 谱线也可用非 H 谱线计算,H 原子谱线与电子密度满足式(1)

$$\frac{\Delta\lambda_{1/2}}{0.549} = \left(\frac{10^{17}}{N_e}\right)^{1.4713} \quad (1)$$

式(1)中, $\Delta\lambda_{1/2}$ 为谱线线宽, $N_e$ 即为电子密度。

高斯函数表达式为

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{c}} \quad (2)$$

对式(2)积分可得高斯曲线的峰面积

$$S = \int f(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} ae^{-\frac{(x-b)^2}{c}} dx = ac\sqrt{\pi} \quad (3)$$

由式(2)可得谱线线宽

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2c\sqrt{\ln 2} \quad (4)$$

联立式(3)和式(4)解得

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2c(\sqrt{\ln 2}/\sqrt{\pi})(S/a) \quad (5)$$

本文选用  $H_\alpha$  (656.3 nm) 谱线进行高斯拟合可得峰面积  $S$  及谱线高度  $a$ ,代入式(5)即可求出  $\Delta\lambda_{1/2}$ ,由式(1)即可求得电子密度。

#### 1.2.3 振动温度的计算

振动温度是反映等离子体放电过程中能量运输的重要参数之一,目前常用计算方法为 Boltzmann 图法。当等离子体处于 LTE 时,上态分子数满足 Boltzmann 分布

$$KT_v(\ln N_0 - \ln N_v) = E_v \quad (6)$$

$N_2$  分子的谱线强度为

$$\frac{I_{v'v''}}{hc} = \nu_{v'} A_{v'v''} N_{v'} \quad (7)$$

分子上态振动能量为

$$E_{v'} = \omega_e(v' + 0.5) + \omega_e x_e(v' + 0.5)^2 + \omega_e y_e(v' + 0.5)^3 + \dots \quad (8)$$

式(8)中等式右边第三项后的各项很小,计算时可略去,联立式(6)、式(7)和(8)可得

$$\ln \frac{I_{v'v''}}{A_{v'v''} \nu_{v'} N_{v'}} = C - \frac{E_{v'}}{KT_v} \quad (9)$$

式(9)中, $v'$ 和 $v''$ 分别为上态振动量子数和下态振动量子数, $K$ 为 Boltzmann 常数,从式(9)可以看出  $E_{v'}$  与  $\ln \frac{I_{v'v''}}{A_{v'v''} \nu_{v'} N_{v'}}$  呈线性关系,斜率即为  $-\frac{1}{KT_v}$ ,即可算出振动温度  $T_v$ 。

本文中选用分布在 300~450 nm 间的  $N_2$  分子第二正带系三组振动带序共 8 条谱线进行线性拟合得到斜率再计算出振动温度  $T_v$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 特征谱线分析

图 2 所示为  $U_{调} = 120 \text{ V}$ ,  $q_{Ar} = 0 \sim 4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  工况下滑动弧放电等离子体特征谱线。如图 2 所示,当  $q_{Ar} = 0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  时,空气滑动弧等离子体中的活性粒子主要有波长分布在 306~315 nm 间的 OH ( $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ ) 谱带,330~450 nm 间的  $N_2$  ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ) 第二正带系,  $H_\alpha$  (656.3 nm) 及光

谱强度较强的波长 777.4 nm 的  $O(3P^5P^0 \rightarrow 3S^5S^0)$  及波长 844.6 nm 的  $O(3P^3P \rightarrow 3S^3S^0)$ 。其中  $OH(A^2\Sigma^- \rightarrow X^2II)$  及  $H_a(656.3 \text{ nm})$  产生是因为空气中存在的微量水被电离。当  $q_{Ar} = 4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  时,  $O(3P^5P^0 \rightarrow 3S^5S^0)$ ,  $O(3P^3P \rightarrow 3S^3S^0)$ ,  $OH(A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2II)$  相对光谱强度显著增大, 且增加了谱线分布在 680~900 nm 间的 Ar I 和 Ar II 原子。这表明加入 Ar 能有效帮助空气滑动弧放电。究其原因, Ar 的加入促进了潘宁解离效应, 增加了中性气体分子与自由电子的碰撞频率, 从而提高空气解离。

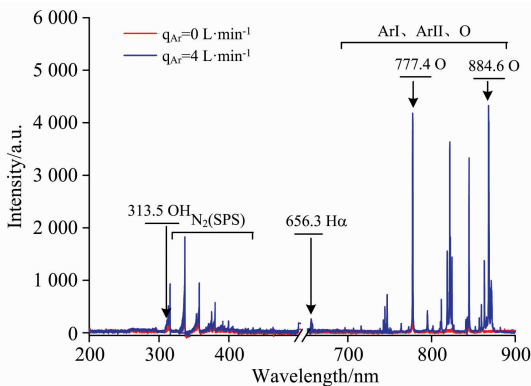


图 2 滑动弧等离子体发射光谱

Fig. 2 The emission spectral of Gliding Arc Plasma

## 2.2 $q_{Ar}$ 、 $U_{调}$ 对 $O(777.4 \text{ nm})$ 光谱发射强度的影响

图 3 为不同  $U_{调}$  下  $q_{Ar}$  对空气滑动弧放电产生  $O(777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度影响。如图 3 所示, 加入 Ar 能增强  $O(777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度,  $O(777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随  $q_{Ar}$  增大先缓慢增长、再快速增大到极大值、随后缓慢减小并趋于稳定。究其原因, 加入 Ar 促进了潘宁解离效应, 使  $O_2$  分子与高能电子碰撞频率增强, 从而解离出更多 O。随  $q_{Ar}$  不断增加, Ar 亚稳态不断增加, 潘宁解离效应增强, 从而使得  $O(777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度急剧增大。而随  $q_{Ar}$  继续增大,  $Ar^+$  激发态粒子对能量消耗增大, 导致高能电子获得能量减小, 从而使得  $O(777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度有少量降低并趋于稳定。从图 3 可看出, 在低  $q_{Ar}$  ( $0 \sim 3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ), 电压对  $O(777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度变化趋势影响较小, 而在高  $q_{Ar}$  ( $4 \sim$

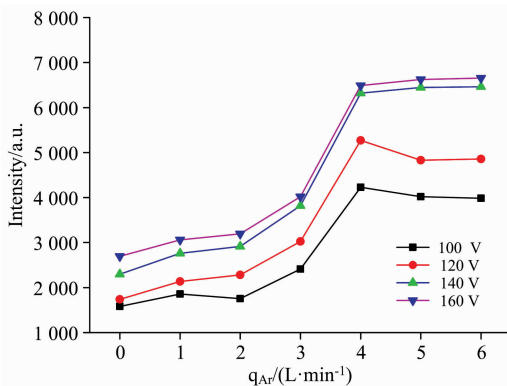


图 3 不同工况下 O 原子相对光谱强度

Fig. 3 The comparison of spectral intensity of O atom under different operating conditions

$6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ), 随  $U_{调}$  增大,  $O(777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度变化趋势有较大变化。可能因为, 在低  $q_{Ar}$ , 气体总量较小, 电极两端向等离子体放电区提供能量充足, 放电空间平均电子能量足以维持高能电子与  $O_2$  发生碰撞的能量提供; 而随  $q_{Ar}$  增加, 电极两端放电空间平均电子能量降低, 导致在  $q_{Ar} = 4 \sim 6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $O(777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随电压变化增大。

## 2.3 $q_{Ar}$ 、 $U_{调}$ 对 $OH(313.4 \text{ nm})$ 光谱发射强度的影响

图 4 为不同电压下  $q_{Ar}$  对空气滑动弧放电等离子体产生  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度影响。从图 4 中可看到, 加入 Ar 使  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度明显增加, 随着  $q_{Ar}$  增大,  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度先增大再减小并趋于稳定。究其原因, 加入 Ar 促进了潘宁解离效应,  $H_2O$  分子与自由电子碰撞几率增大, 从而增大了  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度。随  $q_{Ar}$  增大, Ar 亚稳态与  $Ar^+$  激发态粒子浓度增大, 从而增强了潘宁解离效应及  $H_2O$  分子与  $Ar^+$  激发态粒子的碰撞几率, 使得  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度明显增大。随  $q_{Ar}$  继续增大,  $Ar^+$  激发态粒子对能量消耗增大, 导致高能电子获得能量减小, 使得  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度有少量降低并趋于稳定。从图 4 中还可以看到, 在较低  $U_{调}$  (100 V),  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随  $q_{Ar}$  变化不明显, 这可能因为在低电压时输入能量密度较小, 而  $O_2$  分子及  $Ar^+$  激发态粒子对自由电子的捕捉能力较强, 使得  $H_2O$  分子与自由电子碰撞频率较小。而随电压增大,  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随  $q_{Ar}$  变化明显: 在低  $q_{Ar}$  ( $0 \sim 4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随  $q_{Ar}$  增大而明显增大。这可能因为随着电压增大, 输入能量密度增大, 自由电子平均动能增大, 使得  $H_2O$  分子与自由电子碰撞频率增大; 另一方面, 潘宁解离效应使得  $H_2O$  分子与自由电子碰撞频率增大。从而使得  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度增大。在  $q_{Ar} = 1 \sim 2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随  $q_{Ar}$  变化不明显, 而随电压增大,  $OH(313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随  $q_{Ar}$  增大显著增大。

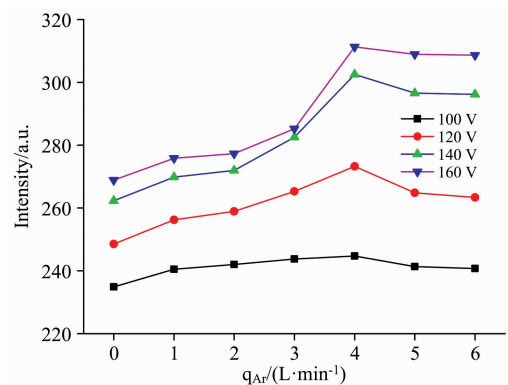


图 4 不同工况下 OH 相对光谱强度

Fig. 4 The comparison of spectral intensity of OH under different operating conditions

## 2.4 $q_{Ar}$ 、 $U_{调}$ 对振动温度的影响

图 5 为不同电压下  $q_{Ar}$  对空气滑动弧放电等离子体振动温度影响。如图 5 所示, 振动温度在 5 400~8 700 K 间变化。保持电压不变, 随  $q_{Ar}$  增大, 振动温度先增大再减小, 在  $q_{Ar}$

$= 3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  时达到极大值。可能因为 Ar 加入使得氩亚稳态与氮分子发生潘宁效应, 氮分子与自由电子碰撞几率增大, 从而氮分子振动激发增强, 使得振动温度增大。而随  $q_{\text{Ar}}$  增加, 一方面, 激发态氩原子相比自由电子获取更多能量, 导致自由电子与氮分子碰撞频率降低; 另一方面, 高振动态激发态氮分子与中性氮分子碰撞频率增大, 造成振动弛豫增强, 导致振动温度到最高值后开始降低。随  $U_{\text{滑}}$  增大, 振动温度增大, 且随  $q_{\text{Ar}}$  增大的增长趋势也随  $U_{\text{滑}}$  增大愈加明显。可能因为随  $U_{\text{滑}}$  增大, 滑动弧等离子体区输入能量密度增大, 自由电子平均动能增大, 基态 N 分子与自由电子非弹性碰撞频率增大, 因此振动温度增大。

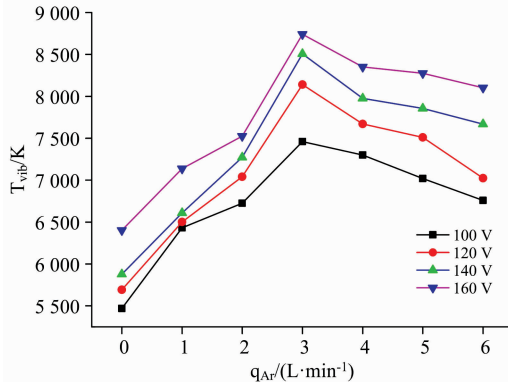


图 5 不同工况下振动温度

Fig. 5 Vibration temperature under different operating conditions

### 2.5 $q_{\text{Ar}}$ 、 $U_{\text{滑}}$ 对电子密度的影响

通过分析  $H_{\alpha}$  (696.3 nm) 谱线的 Stark 展宽, 可计算等离子体电子密度。图 6 为  $q_{\text{Ar}}$  对空气滑动弧放电等离子体电子密度影响, 如图 6 所示, 通入 Ar 能显著增加电子密度, 在  $q_{\text{Ar}} = 0 \sim 4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 电子密度增长趋势明显, 且在  $1.15 \sim 2.04 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  间变化。随  $q_{\text{Ar}}$  继续增大, 在低  $U_{\text{滑}}$  (100 ~ 120 V), 电子密度先增大再减小并趋于稳定; 在高  $U_{\text{滑}}$  (140 ~ 160 V), 电子密度先增大再缓慢增大并趋于稳定。究其原因, 加入 Ar 促进了潘宁电离效应发生, 从而提高电离效率使得电子密度增加。而随  $q_{\text{Ar}}$  增加, 在低  $U_{\text{滑}}$  (100 ~ 120 V), 一方面更多能量被  $\text{Ar}^*$  激发态捕获, 另一方面, 气体密度增大导致电子平均自由程减小。二者共同导致自由电子与基态粒子碰撞频率降低, 使得电子密度减小。在高  $U_{\text{滑}}$  (140 ~ 160 V), 电极两端电压增大, 输入能量密度增大, 被  $\text{Ar}^*$  激发态捕获能量占比变小,  $\text{Ar}^*$  激发态对电子密度产生的抑制作用变小, 因此, 电子密度随  $q_{\text{Ar}}$  增大有少许增大并趋于稳定。从图 6 可看到,  $U_{\text{滑}}$  变化也对电子密度造成影响。随  $U_{\text{滑}}$  增大, 电子密度增大, 且增长趋势更为明显。可能因为, 一方面  $U_{\text{滑}}$  增大导致电场强度增强, 自由电子能获得更多能量而与粒子碰撞频率增大而产生更高密度自由电子。另一方面, 激发态氩原子会捕获一部分能量, 使得在低  $U_{\text{滑}}$ , 电子密度增长受到一定程度抑制; 而随  $U_{\text{滑}}$  增大, 输入能量密度增大,  $\text{Ar}^*$  激发态捕获能量占比变小, 使得电子密度增长趋势随  $U_{\text{滑}}$  增大而增大。

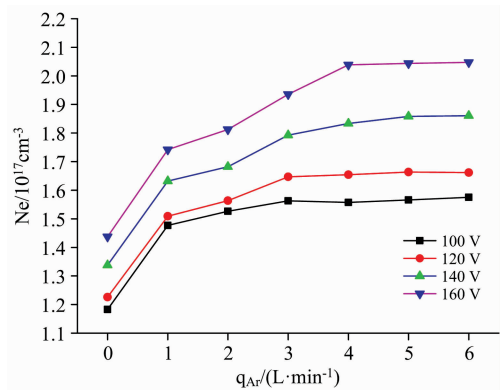


图 6 不同工况下电子密度

Fig. 6 The electron density under different operating conditions

## 3 结 论

在大气压条件下利用刀片电极滑动弧等离子体发生器对空气进行电离, 并对滑动弧等离子体进行光谱特性诊断分析, 探究增加 Ar 和改变电压对空气滑动弧放电等离子体的影响, 结果如下:

(1) 在大气压条件下, 空气滑动弧等离子体中的活性粒子主要有波长分布在 306 ~ 315 nm 间的  $\text{OH} (A^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2 \Pi)$  谱带, 330 ~ 450 nm 间的  $\text{N}_2 (C^3 \Pi_u \rightarrow B^3 \Pi_g)$  第二正带系,  $\text{H}_{\alpha}$  (656.3 nm) 及光谱强度较大的波长 777.4 nm 的  $\text{O} (3P^5 P^0 \rightarrow 3S^5 S^0)$  及波长 844.6 nm 的  $\text{O} (3P^3 P \rightarrow 3S^3 S^0)$ 。当加入 Ar 后, 增加谱线集中在 680 ~ 900 nm 间的 Ar I 和 Ar II 原子, 可以看到, 加入 Ar 能有效帮助空气滑动弧放电。

(2) 空气流量一定, 加入 Ar 能增强  $\text{O} (777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度,  $\text{O} (777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度在 1 580 ~ 6 650 a. u. 间变化。随  $q_{\text{Ar}}$  增大,  $\text{O} (777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度先缓慢增长、再快速增大到极大值、随后缓慢减小并趋于稳定。电压对  $\text{O} (777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度影响受  $q_{\text{Ar}}$  影响: 在低  $q_{\text{Ar}}$  ( $0 \sim 3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ), 电压对  $\text{O} (777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度变化趋势影响较小, 而在高  $q_{\text{Ar}}$  ( $4 \sim 6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ), 随电压增大,  $\text{O} (777.4 \text{ nm})$  相对光谱强度变化趋势有较大变化。

(3) 空气流量一定, Ar 加入使  $\text{OH} (313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度明显增加,  $\text{OH} (313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度在 235 ~ 311 a. u. 间变化。随  $q_{\text{Ar}}$  增大,  $\text{OH} (313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度先增大再减小并趋于稳定。在较低电压 (100 V) 下,  $\text{OH} (313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随  $q_{\text{Ar}}$  变化不明显; 而随电压增大,  $\text{OH} (313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随  $q_{\text{Ar}}$  变化明显, 在低  $q_{\text{Ar}}$  ( $0 \sim 4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $\text{OH} (313.4 \text{ nm})$  相对光谱强度随  $q_{\text{Ar}}$  增大明显增大。

(4) 空气流量一定, 通入 Ar 和增大电压都会使振动温度增大, 振动温度在 5 400 ~ 8 700 K 间变化, 其中振动温度随 Ar 加入显著增大, 且随  $q_{\text{Ar}}$  增大先增大再减小, 在  $q_{\text{Ar}} = 3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  时达到极大值。振动温度随  $U_{\text{滑}}$  增大而增大, 且随  $U_{\text{滑}}$  增大, 振动温度随  $q_{\text{Ar}}$  的增长趋势更明显。

(5) 空气流量一定, 通入 Ar 和增大电压都使电子密度增

大,其中通入 Ar 能显著增加电子密度,在  $q_{Ar}=0\sim 4\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,电子密度增长趋势明显,在  $1.15\sim 2.04\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$  间变化。随  $q_{Ar}$  增大,在低  $U_{reg}$  (100~120 V),电子密度先增

大再减小并趋于稳定,在高  $U_{reg}$  (120~140 V),电子密度先增大、再缓慢增大并趋于稳定。 $U_{reg}$  变化也会影响电子密度:电子密度随  $U_{reg}$  增大而增大,且增长趋势变大。

## References

- [ 1 ] WANG Bao-wei, SUN Qi-mei, YANG Mei-lin, et al(王保伟,孙启梅,杨美琳,等). Chinese Journal of Chemical Engineering(中国化学工程学报), 2014, 22(1): 104.
- [ 2 ] ZHANG Lei, YU Jin-lu, CHEN Yi, et al(张磊,于锦禄,陈一,等). Acta Aeronautica et Astronautica Sinica(航空学报), 2021, 42(3): 275.
- [ 3 ] DU Chang-ming, YAN Jian-hua, LI Xiao-dong, et al(杜长明,严建华,李晓东,等). Proceedings of the CSEE(中国电机工程学报), 2006, (13): 89.
- [ 4 ] ZHANG Ruo-bing, LUO Gang, HUANG Hao-chen, et al(张若兵,罗刚,黄昊晨,等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2019, 45(10): 3357.
- [ 5 ] HE Li-ming, CHEN Yi, LIU Xing-jian, et al(何立明,陈一,刘兴建,等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2016, 42(6): 1921.
- [ 6 ] ZHONG Li, YAN Jian-hua, BO Zheng, et al(钟犁,严建华,薄拯,等). High Voltage Apparatus(高压电器), 2011, 47(1): 80.
- [ 7 ] ZHANG Hao, ZHU Feng-sen, LI Xiao-dong, et al(张浩,朱凤森,李晓东,等). Journal of Fuel Chemistry and Technology(燃料化学学报), 2016, 44(2): 192.
- [ 8 ] Wu A J, Zhang H, Li X D, et al. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(3): 836.
- [ 9 ] LI Ying-hong, WU Yun(李应红,吴云). SCIENTIA SINICA: Technologica(中国科学:技术科学), 2020, 50(10): 1252.
- [10] MA Qing-ming, XIONG Peng-fei, ZHENG Dong, et al(马庆明,熊鹏飞,郑东,等). Journal of Propulsion Technology(推进技术), 2021, 43(3): 298.
- [11] FEI Li, ZHANG Lei, HE Li-ming, et al(费力,张磊,何立明,等). High Voltage Apparatus(高压电器), 2019, 55(7): 127.
- [12] FAN Juan-juan, HUANG Dan, WANG Xin, et al(樊娟娟,黄丹,王鑫,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2014, 34(12): 3183.
- [13] FENG Bo-wen, WANG Ruo-yu, ZHONG Xiao-xia, et al(冯博文,王若愚,钟晓霞,等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2021, 70(9): 095201.

## Emission Spectroscopy Diagnosis of Air Gliding Arc Plasma Under Atmospheric Pressure Condition

YANG Kun, CHEN Lei\*, CHENG Fan-chong, PEI Huan, LIU Gui-ming, WANG Bao-huai, ZENG Wen  
School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

**Abstract** To understand the effect of argon on the air gliding arc plasma, an air gliding arc plasma was generated at a discharge frequency of 10 kHz and an atmospheric pressure with  $q_{Ar}=15\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  to study the effect of Ar volume flow on air-Ar gliding arc discharge. And then focused on the analysis of the active particle species, electron density and vibration temperature of air gliding arc plasma under different Ar volumetric flow rates and voltage of the voltage regulator. The results show that the main active particles in the gliding arc plasma region are OH, the second positive band system of  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_\alpha$ , O atoms, Ar I and Ar II atoms. It is found that the relative spectral intensity of O and Ar I, Ar II atoms is strong. With the increase of Ar volume flow, the relative spectral intensity of O(777.4 nm) increases slowly at first, then quickly increases to a maximum value, then slowly decreases and tends to stabilize, and the relative spectral intensity of O(777.4 nm) varies between 1 580~6 650 a. u. The relative spectral intensity of O(777.4 nm) increases as the voltage of the voltage regulator increases. Moreover, the influence of voltage of the voltage regulator on the relative spectral intensity of O(777.4 nm) is affected by the volume flow of Ar: The relative spectral intensity of O(777.4 nm) changes significantly under high Ar volume flow ( $4\sim 6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ). The addition of Ar significantly increases the relative spectral intensity of OH (313.4 nm), the relative spectral intensity of OH(313.4 nm) varies between 235~311 a. u. As the volume flow of Ar increases, the relative spectral intensity of OH(313.4 nm) first increases and then decreases and tends to stabilize. At a lower voltage (100 V), the relative spectral intensity of OH(313.4 nm) does not change significantly with the volume flow of Ar. As  $U_R$  increases, the relative spectral intensity of OH (313.4 nm)

changes significantly with the volume flow of Ar: at low Ar volume flow ( $0\sim 4\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ), the relative spectral intensity of OH (313.4 nm) increases significantly with the increase of Ar volume flow. A Gaussian fitting is made with the  $H_{\alpha}$  spectral lines to analyse and calculate the electron density. It is found that the electron density is between  $1.15\sim 2.04\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ . Keeping the air flow constant, the addition of Ar can significantly increase the electron density; when  $q_{Ar}$  is  $0\sim 4\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , the electron density has an apparent growth trend. As  $q_{Ar}$  continues to increase, at lower  $U_R$  ( $100\sim 120\text{ V}$ ), the electron density first increases and then decreases and tends to stabilize. At the higher  $U_R$  ( $140\sim 160\text{ V}$ ), the electron density first increases and then slowly increases and tends to stabilize. The change of the  $U_R$  will also affect the electron density. The electron density increases with  $U_R$ , and as the  $U_R$  increases, the electron density growth trend becomes faster.

**Keywords** Gliding arc plasma; Emission spectrometry; Vibration temperature; Electron density; OH; O

(Received Aug. 5, 2021; accepted Oct. 29, 2021)

\* Corresponding author

## 《光谱学与光谱分析》期刊社决定采用 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统

《光谱学与光谱分析》期刊社与汤森路透集团签约,自 2010 年 12 月 1 日起《光谱学与光谱分析》决定采用 Thomson Reuters 旗下的 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统。

- ScholarOne Manuscripts, 该系统不仅能轻松处理稿件,而且能提速科技交流。
- 全球已有 360 多家学会和出版社的 3 800 多种期刊选用了 ScholarOne Manuscripts 系统作为在线投稿、审稿平台,全球拥有超过 1 350 万的注册用户,代表着全球学术期刊在线投审稿的一流水平。
- ScholarOne Manuscripts 与 EndNote, Web of Science 无缝链接和整合;使科研探索、论文评阅和信息传播效率大为提高。
- ScholarOne Manuscripts 是汤森路透科技集团的一个业务部门,拥有丰富的学术期刊业务经验,为学术期刊提供综合管理工作流程系统,使期刊更有效管理投稿、同行评审、加工和发表过程,提高作者心中的专业形象,缩短论文发表时间,削减管理成本,帮助期刊提高科研绩效和实现学术创新。

《光谱学与光谱分析》采用“全球学术期刊首选的在线投稿审稿系统—ScholarOne Manuscripts”,势必对 2010 年 11 月 30 日以前向本刊投稿的作者在查阅稿件信息时,会带来某些不便,在此深表歉意!为了推进本刊的网络化、数字化、国际化进程,以实现与国际先进出版系统对接;为了不断提高期刊质量,加快网络化、数字化建设,加快与国际接轨的进程,希望能得到广大作者、读者们的支持与理解,对您的理解和配合深表感激。这是一件新事物,肯定有不周全、不完善的地方,让我们共同努力,不断改进和完善起来。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2010 年 12 月 1 日