



·高电压及脉冲功率技术·

大气压空气针-水结构脉冲气-液放电特性研究*

刘亚魁, 周子凯, 王 森, 方 志

(南京工业大学 电气工程与控制科学学院, 南京 211816)

摘 要: 利用纳秒脉冲电源激励大气压空气中针-水结构气液放电, 研究了不同脉冲参数下的放电特性、等离子体特性和活化水中活性粒子浓度的变化规律。结果表明, 在一个脉冲周期内放电分为 3 个阶段, 其中发生在脉冲持续时间内和下降沿的两次放电较强, 上升沿的放电较弱。当脉冲电压增大时, 放电电流、平均功率、发光强度和发射光谱强度均逐渐增大; 当频率增大时, 放电电流几乎不变, 但是功率显著增大, 放电发光强度和发射光谱强度均增大。电压上升沿时间的增大则会减弱放电强度, 相应的放电发光强度和发射光谱强度均减弱。而电压下降沿的增大则会增强放电, 发光强度和发射光谱强度增大。当脉冲电压、频率和下降沿时间增大, H_2O_2 , NO_2^- 和 NO_3^- 浓度逐渐增大; 而电压上升沿时间增大会导致 3 种活性粒子浓度逐渐降低。

关键词: 纳秒脉冲; 气液放电; 大气压空气; 放电特性

中图分类号: TM89, O531

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210020

Research on the characteristics of atmospheric pressure air pulse gas-liquid discharge using a needle-water electrode

Liu Yawei, Zhou Zikai, Wang Sen, Fang Zhi

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: In this paper, a nanosecond pulse power supply is employed to excite the gas-liquid discharge in atmospheric air, and the discharge characteristics, plasma characteristics and the composition of activated water under different pulse parameters are studied. The results show that the discharge consists of three stages in one pulse period, among which the two discharges that occur during the pulse duration and the falling edge are stronger, and the discharge on the rising edge is weaker. When the pulse voltage increases, the discharge current, average power, luminous intensity and spectra intensity all gradually increase. When the frequency increases, the discharge current is almost unchanged, but the power increases significantly, the discharge luminous and spectra intensity also increase. The increase of the voltage rising edge time will weaken the discharge intensity, and the corresponding luminous intensity and spectra intensity will be weakened. The increase of the voltage falling edge enhances the discharge, and the luminous intensity and emission spectra intensity increase. When the pulse voltage, frequency and falling edge time increase, the concentration of H_2O_2 , NO_2^- and NO_3^- gradually increases. The increase of the rising edge time results in the decrease of the three active species concentrations. These results are helpful to understand the mechanisms of gas-liquid discharge characteristics under different conditions, so as to control plasma and solution activity, which will promote further practical application of nanosecond pulse gas-liquid discharge.

Key words: nanosecond pulse; gas-liquid discharge; atmospheric air; discharge characteristics

近年来, 非平衡等离子体在生物医学、农业和环境保护等领域有着广泛的应用^[1-4]。等离子体通常与液体接触, 有些甚至要穿过液体才能与被处理物发生作用, 这也使得等离子体-液体相互作用的研究越来越受到关注^[5-6]。气液放电作为等离子体-液体相互作用形式的一种, 可在气相和液相产生丰富的反应性活性粒子。在气液放电应

* 收稿日期: 2021-01-18; 修订日期: 2021-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51907088)

作者简介: 刘亚魁(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事气液放电等离子体诊断及应用研究。

通信作者: 王 森(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事气液放电等离子体诊断及应用研究。

用中,等离子体活化水中的羟基、过氧化氢和臭氧等活性氧基团和硝酸根、亚硝酸根等活性氮基团是其高反应活性的主要来源^[7-8]。此外,活性氧基团和活性氮基团的协同作用可以进一步提高等离子体活化水的反应活性^[9]。气液放电溶液中活性粒子主要由等离子体中的活性粒子与水发生二次化学反应生成,因此,放电等离子体特性对于气液放电的应用效果有着重要影响,调控等离子体特性有利于理解溶液中活性粒子的生成过程,推动气液放电的实际应用。

在气液放电中,液相的加入使得气液放电过程更加复杂,尤其是由于静电力、离子风等引起的液面变形会影响放电的稳定性,导致放电模式转变,从而影响放电等离子体特性。为了抑制放电不稳定性的发生,通常采用纳秒脉冲电源驱动气液放电。由于纳秒脉冲的持续时间极短,放电在不稳定性发生前结束。此外,纳秒脉冲电压由于具有快速上升沿,其产生的折合电场强度较高,自由电子可以获得极大的加速,放电产生的等离子体具有更高的活性^[10-11]。因此,纳秒脉冲气液放电已经成为等离子体-液体相互作用领域的研究热点^[12-13]。虽然已有一些研究涉及了纳秒脉冲气液放电特性影响因素,但目前气液放电研究中,全面系统研究纳秒脉冲电源参数对放电特性的影响较少,无法综合给出放电的影响因素,限制了气液放电的推广应用。本文利用纳秒脉冲电源驱动针-水结构气液放电,在大气压空气中获得了稳定的放电,研究了不同脉冲参数下气液放电的电学特性、等离子体特性,讨论了各脉冲参数对放电特性的影响机制。

1 实验装置及方法

本实验采用的实验装置和放电特性诊断平台如图1所示,主要包括气液放电反应器、高压纳秒脉冲电源、电学诊断系统和光学诊断系统。高压纳秒脉冲电源输出电压幅值、频率等参数均可调,在本实验中电压幅值 $U_p=6\sim 10\text{ kV}$ 可调,频率 $f=200\sim 1000\text{ Hz}$,电压上升沿 t_r 和下降沿时间 $t_f=50\sim 250\text{ ns}$,脉冲宽度固定为 1000 ns 。气液放电反应器采用针-水结构,其中曲率半径为 0.1 mm 的不锈钢针电极固定在液面上方 5 mm 处,并与高压纳秒脉冲电源连接。容器内盛有 30 mL 去离子水,并在其中放置金属板作为接地电极。

利用发射光谱法测量气液放电等离子体特性,测量设备为光谱仪(Ocean optic HR4000CG),其波长分辨率为 0.7 nm ,光纤探头固定在离针尖水平距离 3 cm 处。采用CanonEOS 6D相机拍摄放电的发光图像。纳秒脉冲气液放电的电学诊断通过测量脉冲电压和放电电流获得,采用的设备包括电压探头(Tektronix P6015A, $1:1000$)、电流线圈(Pearson 4100)和数字示波器(Tektronix,TDS2014, 200 MHz)。放电的平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t)dt \quad (1)$$

式中: P 为一个周期内的平均功率; T 为脉冲周期; $U(t)$ 和 $I(t)$ 分别为电压和电流的瞬时值。

溶液中活性粒子过氧化氢(H_2O_2)、亚硝酸根(NO_2^-)、硝酸根(NO_3^-)的浓度是基于化学探针的方法并通过紫外可见分光光度计(Jinghua, UV1800)测量得到。 H_2O_2 浓度测量采用钛盐光度法, H_2O_2 在酸性条件下可以与硫酸钛反应生成稳定的橘色产物,通过测量其在 407 nm 处的吸收强度计算得到 H_2O_2 的浓度。采用Griess-Saltzman方法测量溶液中 NO_2^- 的浓度,在该方法中,N-(1-萘基)-乙二胺二盐酸盐和氨磺酰胺在磷酸参与的条件与 NO_2^- 反应,生成品红色的偶氮染料,在反应物混合 20 min 后测量,其吸收峰为 540 nm 。 NO_3^- 的浓度通过2,6-二甲基苯酚分光光度法测量,其中2,6-二薄荷基苯酚与硫酸和磷酸的混合物中的 NO_3^- 反应, 5 min 后将形成橙色,并在 324 nm 下测量其吸收峰强度。 H_2O_2 , NO_2^- 和 NO_3^- 的检出限分别为 $50, 5$ 和 $60\text{ }\mu\text{g/L}$ 。

2 结果与讨论

2.1 脉冲参数对电学特性的影响

图2给出了大气压空气中脉冲气液放电典型电压电流波形图,脉冲电压为 10 kV ,频率 600 Hz ,上升沿和下降沿时间分别为 50 ns ,脉冲宽度 1000 ns 。从图2中可以看出,在一个脉冲周期内发生了3次放电,分别发生在脉冲

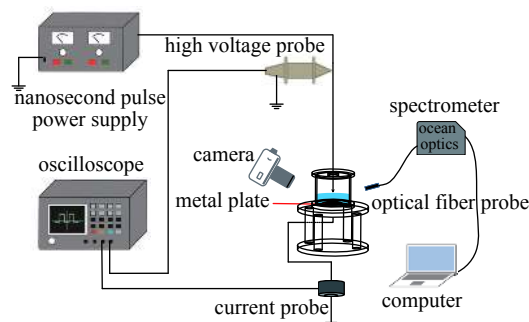


Fig. 1 Experimental setup of nanosecond pulse gas-liquid discharge in atmospheric air

图1 大气压空气脉冲气-液放电实验平台

电压上升沿(阶段1)、脉冲电压持续时间内(阶段2)和脉冲电压下降沿(阶段3),表明该气液放电与常规的气相放电有着明显的不同。阶段1的放电电流较小,峰值电流仅为2 A,持续时间(电流峰的半高宽)约为20 ns,为流注放电模式;阶段2的放电持续时间(电流峰的半高宽)较长(约为500 ns),电流峰值8.3 A,为火花放电模式,在这个阶段中,随着电流的增加,脉冲电压略微下降;阶段3为反向放电,电流幅值约为7 A,持续时间(电流峰的半高宽)为30 ns,为流注放电模式。

各个阶段放电产生的原因有所不同。在纳秒脉冲气液放电中,阶段1的放电是由于快速变化的脉冲电压产生的高场强导致的气体击穿,在该放电的瞬间,气隙的阻抗减小,导致脉冲电压略微降低。此后脉冲电压继续升至设定值,使得气体间隙的场强达到击穿电压,发生阶段2的放电,该放电是类似于直流感电,在该阶段中电压随着时间的增加而逐渐降低,这是由于阶段2的电流较大,导致气隙上的分压和功率较大,而电源的输出功率无法维持气隙消耗,因此电压略微降低。在阶段1和2的过程中,电荷在气体间隙和液面逐渐积累,形成了与外加电场反向的电场^[14],在脉冲电压下降沿处,外加电场逐渐减小,阶段2的放电熄灭,当外加电场小于空间电荷的反向电场后,总电场是由反向电场主导的,随着外加电场的逐步减小,反向的总电场大于击穿电场后即发生反向放电。

为了研究脉冲参数对气液放电电学特性的影响,图3给出了3个阶段的电流和一个周期内的平均功率随脉冲参数的变化。图3(a)的结果表明,随着脉冲电压增大,3个阶段的电流幅值和平均功率均增大,主要是由于随着脉冲电压增大,气隙间的电场强度增大,阶段1和2的放电电流增大,并且在这2个阶段中液面积累的电荷也增多,

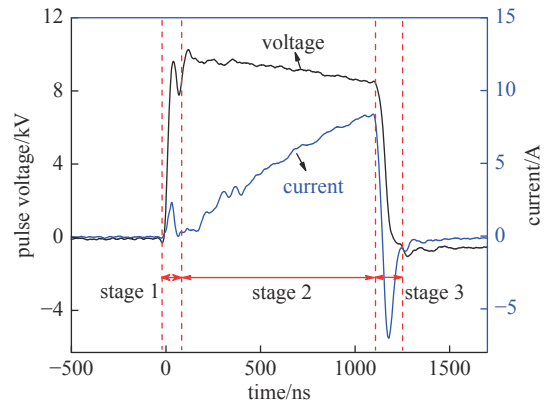


Fig. 2 Typical waveforms of pulse voltage and discharge current in the pulse gas-liquid discharge

图2 脉冲气液放电典型电压电流波形图

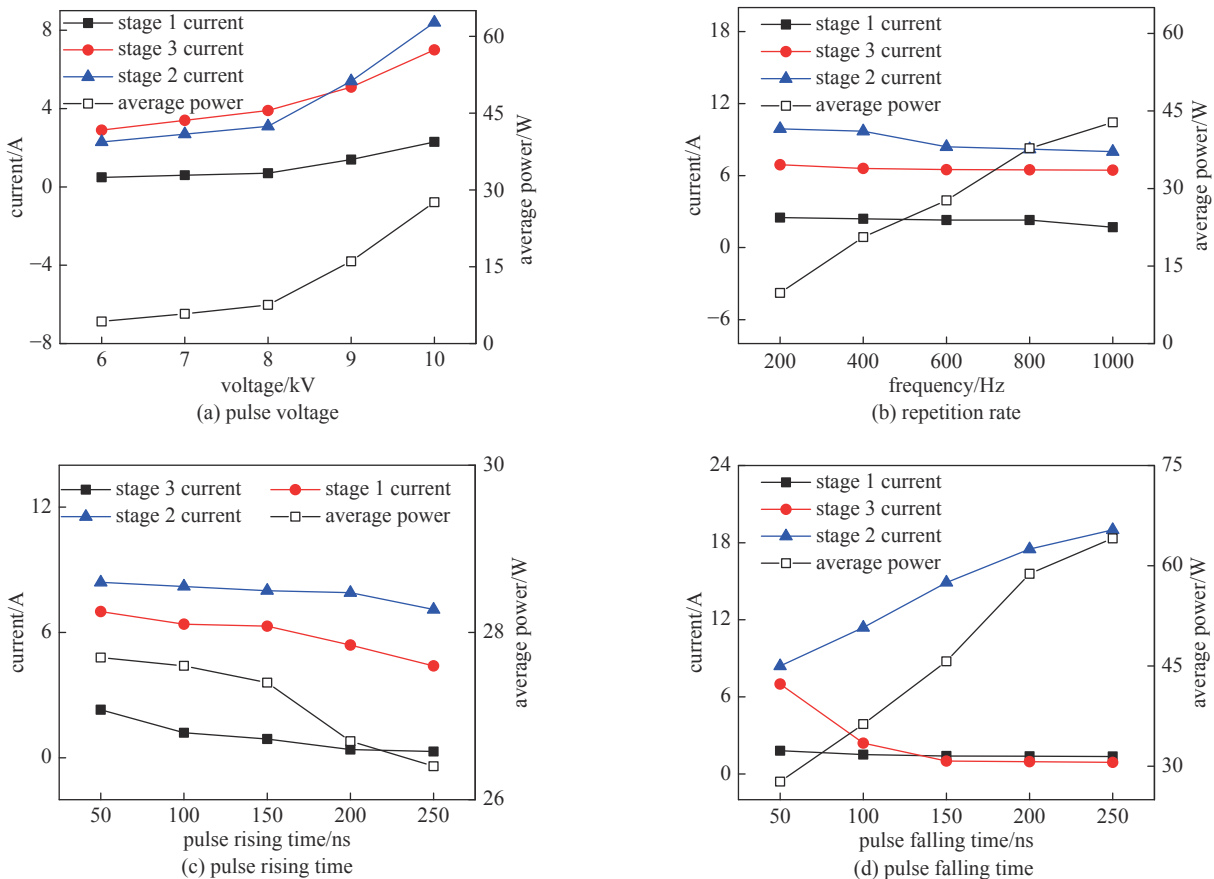


Fig. 3 Variation of discharge current and average power with pulse parameters

图3 放电电流和平均功率随脉冲参数的变化

使脉冲电压下降沿结束后的反向电场增大,从而阶段3的电流也随着脉冲电压的增大而增大,相应的放电的平均功率也随着脉冲电压的增大而增大。当脉冲频率增大时,3个阶段的放电电流几乎保持不变,这是因为当脉冲频率增大时,电压幅值保持不变,因而电场强度基本保持不变,电流基本不随脉冲频率变化。根据式(1)可知,频率增大会使平均功率增大。图3(c)的结果表明,当电压上升沿时间增大时,3个阶段的电流和平均功率均呈现减小的趋势。上升沿时间的增大导致气隙的电场强度减小,从而使阶段1和2的放电减弱,电流减小,液面积累的电荷也随之减小,导致反向电场减小,使得阶段3的放电减弱,因此放电电流也减小。随着下降沿的增大,阶段1的电流基本不变,阶段2的电流以及放电平均功率逐渐增大,阶段3的电流逐渐减小。下降沿时间的增大并不影响上升沿处的电场强度,因此阶段1的电流基本保持不变,而下降沿时间的增大减弱了下降沿处的电场,因此阶段3的电流逐渐减小。由于阶段2的放电在整个周期中占主导,由电流结果可知随着下降沿时间的增大,阶段2的电流增大,所以一个周期内的平均功率增大。

为了直观展示脉冲参数对放电的影响,图4给出了不同条件下的气液放电的发光图像,其中相机的曝光时间均设置为1/100 s。在不同的电源参数条件下放电均呈现丝状形貌,放电在气隙中呈现为较强的流注通道,发展到液面上发生分叉,形成树枝状的通道。不同参数对气液放电图像的影响略有不同。脉冲电压为6 kV时,放电强度较弱,放电在液面上的面积较小(见图4(a)),随着脉冲电压增大,放电在液面上的面积显著增大,电流细丝更加密集,该现象也说明了随着电压的增大放电强度越来越强,与电压电流特性以及发射光谱特性的结果相符合。当脉冲频率增加时(见图4(b)),放电发光图像与电压变化时类似,即在较低的脉冲频率下,发光强度较弱,面积较小,随着脉冲频率增大,放电发光强度和面积逐渐增大。虽然脉冲频率的增大并不能使单次放电强度增大,但在相同的时间(拍摄图像的曝光时间)内放电次数增多,因而发光强度随着频率的增大而增强。而电压上升沿和下降沿时间变化时,发光图像的变化不明显(见图4(c)和图4(d))。

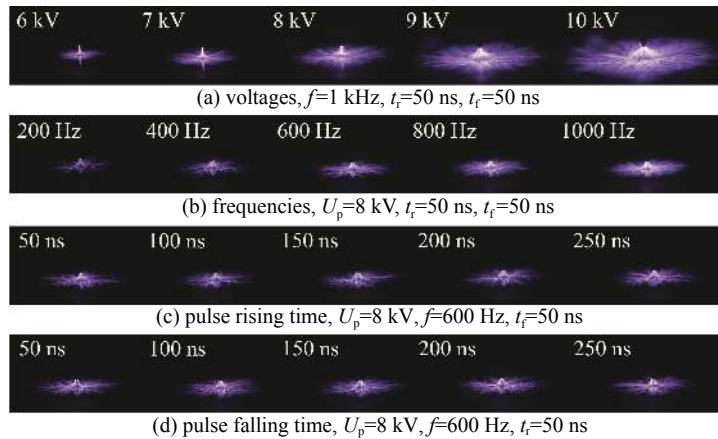


Fig.4 Discharge images with different pulse parameters (t_r is rising time, t_f is falling time)

图 4 不同脉冲参数下的放电图像

2.2 脉冲参数对等离子体特性的影响

脉冲气液放电典型的发射光谱如图5所示,放电条件为脉冲电压10 kV,频率600 Hz,上升沿和下降沿50 ns。从图5可以看出,发射光谱主要由激发态氮分子第二正带系 $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g, v', v'')$, $H_\alpha(n=3 \rightarrow n=2, 656 \text{ nm})$, $N(3p^4S^\circ \rightarrow 3s^4P, 746 \text{ nm})$ 和 $O(3p^5P \rightarrow 3s^5S, 777 \text{ nm})$ 。在脉冲气液放电中,电子在高折合电场中获得极大加速,其电子能量在2~20 eV。高能电子与氮分子的碰撞激发过程,产生激发态 $N_2(C)$ (式(2))。由于 $N_2(C)$ 能级能量较高,式(2)并不是产生 $N_2(C)$ 的主要反应。电子与基态氮分子的逐级激发是产生 $N_2(C)$ 的重要过程,如式(3)~式(5)^[12-15]。



激发态 H 原子主要由电子碰撞解离水分子产生, 由于激发态 H ($n=3$) 的能级能量较高 (~ 12.08 eV), 电子与 H_2O 的解离激发过程通常是分步完成, 其反应式如式(6)、式(7)所示。激发态氮原子 $N(3p)$ 由电子与氮分子的碰撞解离和激发过程产生, 其生成过程如式(8)、式(9)所示^[12]。此外, 电子与 H_2O 的碰撞解离过程也会产生 O 原子(式(10)), 基态 O 原子被电子激发至高能态 O ($3p^5P$) (式(11))。值得注意的是, 虽然 OH(A) 的能级能量只有 5 eV, 由 H_2O 解离产生的基态 OH(X) 可以被电子激发, 但发射光谱中并没有检测到 OH(A \rightarrow X) 的谱线, 主要是由于在氮气和空气蒸气的氛围中, 激发态 OH(A) 被 N_2 和 H_2O 快速淬灭。除了上述高能自由电子产生各种活性粒子外, 等离子体中还存在 $N_2(A)$ 等亚稳态粒子, 其能级能量约为 6.17 eV, 可使 H_2O 解离产生, 该过程也是产生 H 和 OH 的重要反应(式(12))^[12]。



脉冲参数对等离子体中激发态活性粒子发射光谱强度的影响如图 6 所示。当脉冲电压、频率和下降沿增大时, $N_2(C-B)$, H_α 和 O 777 nm 的光谱强度均逐渐增大, 而当脉冲上升沿增大时, H_α 和 O 777 nm 的谱线强度逐渐减小, $N_2(C-B)$ 的谱线强度先保持不变后逐渐减小。发射光谱随脉冲参数的变化趋势与电流变化相符合。当脉冲电压增大时, 约化场强 E/N (E 是电场强度, N 是粒子数密度, E/N 正比于 dU/dt) 增大, 根据 Einstein 方程 $kT_e/e = D_e/\mu_e$ 可获得电子平均能量 T_e ^[16], 其中 k 是玻耳兹曼常数, D_e 是电子迁移常数, μ_e 是电子迁移率, 由于 D_e/μ_e 正比于 E/N , 电子平均能量也与 E/N 成正比, 因此当约化场强增大时, 电子平均能量也增大。此外, 约化场强的增大有利于自由电子密度增大。根据上述 3 种活性粒子的生成反应过程可知, 电子是影响其生成的主要因素, 当电子密度和平均能量增大时, 电子与基态粒子碰撞激发的概率增大, 使生成的激发态 $N_2(C)$, $H(n=3)$ 和 $O(3p^5P)$ 的密度增大, 从而导致发射光谱强度随着电压的增大而增大。当脉冲重复频率增大时, 在相同时间内放电次数增多, 产生的高能电子密度增大, 使产生的激发态活性粒子数密度增大, 因此, $N_2(C-B)$, H_α 和 O 777 nm 的发射光谱强度随着脉冲频率的增大而增大。当上升沿时间增大时, 阶段 1 和阶段 2 的电流减小导致放电减弱, 产生的电子密度和平均能量降低, 因此 $N_2(C-B)$, H_α 和 O 777 nm 的发射光谱强度逐渐减小。当下降沿时间增大时, 虽然阶段 3 的电流减小, 但阶段 2 的电流峰值增大, 且阶段 2 的放电在一个周期内占主导, 因此, 电子密度和平均能量随着下降沿时间的增大而增大, $N_2(C-B)$, H_α 和 O 777 nm 的发射光谱强度逐渐增大。

2.3 脉冲参数对液相活性粒子浓度的影响

气液放电中, 等离子体与液体相互作用使得产生的活性粒子传质进入液体中, 在其中发生进一步的化学反应, 生成具有较高化学活性的等离子体活化液体。为了探究本实验中气液放电对液体性质的影响, 测量了溶液中 H_2O_2 , NO_2^- 和 NO_3^- 的浓度。溶液中活性粒子的能量产率为^[17]

$$Y_e = 6 \times 10^2 \times C_t V / (Pt) \quad (13)$$

式中: Y_e 是活性粒子的能量产率(单位: $g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$); C_t 是 t 时刻活性粒子的浓度(单位: g/mL); V 是溶液体积(单位: mL); P 是放电平均功率(单位: W); t 是处理时间(单位: min)。根据式(13)计算得到, 在电压 10 kV、频率 600 Hz、

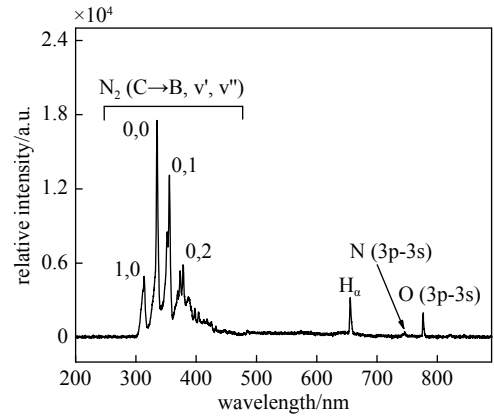


Fig. 5 Typical emission spectra of pulsed gas-liquid discharge ($U_p=10$ kV, $f=600$ Hz, $t_r=50$ ns, $t_f=50$ ns)

图 5 脉冲气液放电典型发射光谱图(脉冲电压 $U_p=10$ kV, 频率 $f=600$ Hz, 上升沿时间 $t_r=50$ ns, 下降沿时间 $t_f=50$ ns)

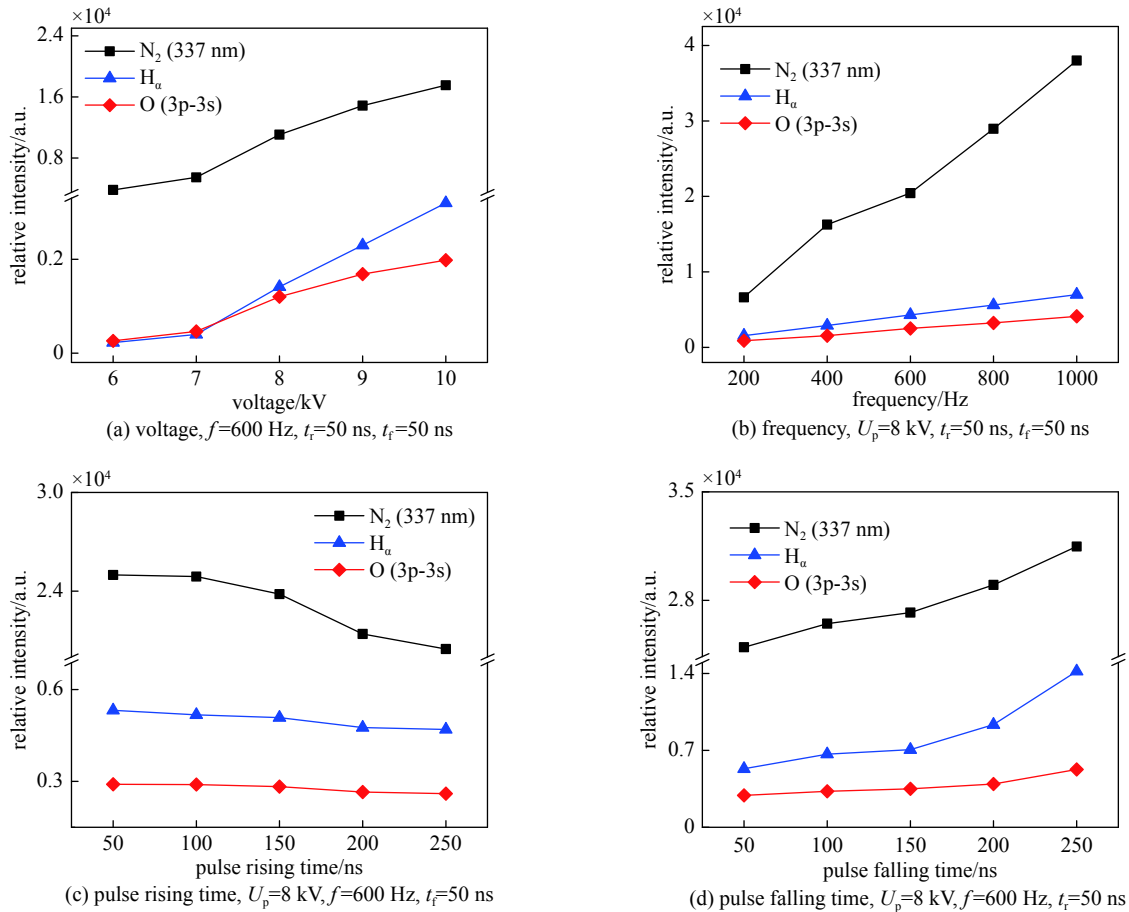


Fig. 6 Variations of emission spectra intensity with pulse parameters

图 6 发射光谱强度随脉冲参数的变化

上升沿和下降沿 50 ns 时, 溶液中 H₂O₂, NO₂⁻和 NO₃⁻的能量产率分别约为 1.04×10^{-2} 、 2.64×10^{-3} 和 6.17×10^{-4} g·kW⁻¹·h⁻¹, 由此可见 H₂O₂ 的能量产率最大, NO₃⁻的能量产率最低。

溶液中 H₂O₂ 主要是通过气液界面和溶液中的 OH 自由基复合过程产生的(式(14)), 此外, 溶液中的过氧化羟基自由基 HO₂ 的复合过程也是产生 H₂O₂ 的途径之一(式(15))^[5, 12]。NO₂⁻和 NO₃⁻主要通过溶液中的 NO_x 与 H₂O 反应生成(式(16)、式(17))^[5, 12, 18]。此外, 由于 HNO₂ 和 HNO₃ 具有较高的亨利系数(分别为 1.15×10^3 和 4.8×10^6)^[19], 气相中生成的 HNO₂ 和 HNO₃ 扩散进入水中也是 NO₂⁻和 NO₃⁻的生成途径之一。



不同脉冲参数下溶液中活性粒子 H₂O₂, NO₂⁻和 NO₃⁻的浓度变化如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 随着脉冲电压、频率和电压下降沿时间增大, 溶液中 H₂O₂, NO₂⁻和 NO₃⁻浓度逐渐增大, 而当电压上升沿时间增大时, 溶液中 H₂O₂, NO₂⁻和 NO₃⁻的浓度逐渐降低。根据前述放电电流和发射光谱强度结果可知, 脉冲电压、频率和电压下降沿时间增大使放电产生的 OH, NO 和 NO₂ 等活性粒子增多, 根据式(14)~式(17)反应可知, 这 3 种活性粒子分别是生成 H₂O₂, NO₂⁻和 NO₃⁻的主要反应物。因此, 溶液中 H₂O₂, NO₂⁻和 NO₃⁻的浓度随着脉冲电压、频率和电压下降沿时间增大而增大。当电压下降沿时间增大时, 放电生成的气相活性粒子 OH, NO 和 NO₂ 减少, 因此溶液中 H₂O₂, NO₂⁻和 NO₃⁻的浓度逐渐降低。

值得注意的是, 在相同实验条件下 NO₂⁻的浓度高于 NO₃⁻的浓度, 可能的原因解释如下。根据反应式(16)和式(17)可知, NO 和 NO₂ 分别是生成 NO₂⁻和 NO₃⁻的主要反应物, 而 NO₂ 主要是通过 NO 与氧化剂反应生成的, 因此,

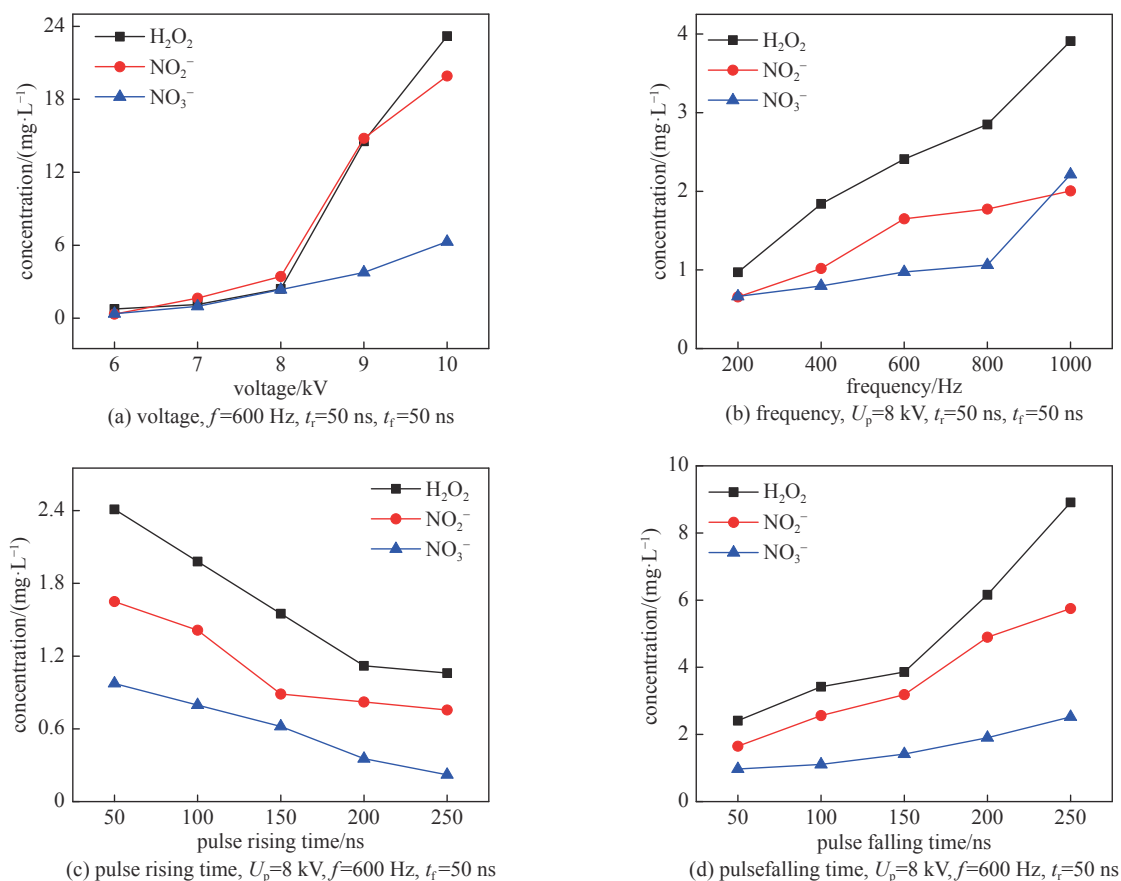


Fig. 7 The concentration with pulse parameters

图7 溶液中活性粒子浓度随脉冲参数的变化

NO_2 的浓度总是小于 NO 浓度。此外, HNO_2 生成速率比 HNO_3 生成速率高出一个数量级^[20], 综合上述两方面原因, 溶液中 NO_2 的浓度高于 NO_3 的浓度。

3 结论

本文利用纳秒脉冲电源驱动大气压针-水结构气液放电, 研究了不同脉冲电压、频率、上升沿和下降沿时间下的气液放电特性及溶液中活性粒子浓度的变化规律, 并讨论了各脉冲参数对气液放电特性的影响机制。实验结果表明, 在一个周期内发生3次放电, 放电在气隙空间内呈现丝状模式, 并在液面上以树枝结构发展。随着脉冲电压的增大, 放电电流、平均功率、发光强度和激发态活性粒子光谱强度均逐渐增大, 随着频率的增大, 放电电流几乎不变, 但是功率显著增大, 放电发光强度和激发态活性粒子发射光谱强度均增大。电压上升沿时间的增大则会减弱放电强度, 相应的放电发光强度和发射光谱强度均减弱。而电压下降沿的增大则会增强放电, 发光强度和发射光谱强度增大。此外, 本文还测量了气液放电后溶液中 H_2O_2 , NO_2^- 和 NO_3^- 活性粒子浓度, 在相同条件下, H_2O_2 浓度高于 NO_2^- 和 NO_3^- 的浓度。随着脉冲电压、频率和下降沿时间的增大, 3种活性粒子浓度逐渐增大; 而随着电压上升沿时间的增大, 3种活性粒子浓度逐渐降低。

参考文献:

- [1] 梅丹华, 方志, 邵涛. 大气压低温等离子体特性与应用研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1339-1358. (Mei Danhua, Fang Zhi, Shao Tao. Recent progress on characteristics and applications of atmospheric pressure low temperature plasmas[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1339-1358)
- [2] 戴栋, 宁文军, 邵涛. 大气压低温等离子体的研究现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 1-9. (Dai Dong, Ning Wenjun, Shao Tao. A review on the state of art and future trends of atmospheric pressure low temperature plasmas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 1-9)
- [3] 孔刚玉, 刘定新. 气体等离子体与水溶液的相互作用研究——意义、挑战与新进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 2956-2965. (Kong Gangyu, Liu Dingxin. Researches on the interaction between gas plasmas and aqueous solutions: significance, challenges and new progresses[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 2956-2965)
- [4] 侯世英, 曾鹏, 刘坤, 等. 单介质与双介质结构介质阻挡放电水处理性能的比较[J]. 高电压技术, 2012, 38(7): 1562-1567. (Hou Shiyong, Zeng Peng, Liu Kun, et al. Comparison of water treatment performance employ dielectric barrier discharge in single and double dielectric structure[J]. High Voltage Engineering,

2012, 38(7): 1562-1567)

- [5] Zhou Renwu, Zhou Rusen, Wang Peiyu, et al. Plasma-activated water: generation, origin of reactive species and biological applications[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 303001.
- [6] Bradu C, Kutasi K, Magureanu M, et al. Reactive nitrogen species in plasma-activated water: generation, chemistry and application in agriculture[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 223001.
- [7] Hoeben W F L M, van Ooij P P, Schram D C, et al. On the possibilities of straightforward characterization of plasma activated water[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2019, 39(3): 597-626.
- [8] Zhou Renwu, Zhou Rusen, Wang Peiyu, et al. Microplasma bubbles: reactive vehicles for biofilm dispersal[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(23): 20660-20669.
- [9] Hefny M M, Pattyn C, Lukes P, et al. Atmospheric plasma generates oxygen atoms as oxidizing species in aqueous solutions[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49: 404002.
- [10] 顾建伟, 章程, 王瑞雪, 等. 不同条件下大气压脉冲弥散放电特性[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015023. (Gu Jianwei, Zhang Cheng, Wang Ruixue, et al. Characteristics of pulsed diffuse discharges under different conditions in atmospheric air[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015023)
- [11] 姜慧, 章程, 邵涛, 等. 纳秒脉冲表面介质阻挡放电特性实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(3): 592-596. (Jiang Hui, Zhang Cheng, Shao Tao, et al. Experimental study on characteristics of nanosecond-pulse surface dielectric barrier discharge[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 592-596)
- [12] Wang Sen, Yang Dezheng, Zhou Rusen, et al. Mode transition and plasma characteristics of nanosecond pulse gas-liquid discharge: effect of grounding configuration[J]. *Plasma Processes and Polymer*, 2020, 17: 1900146.
- [13] 王琪, 王萌, 王珏, 等. 纳秒脉冲下变压器油两相流注放电仿真研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 025011. (Wang Qi, Wang Meng, Wang Jue, et al. Two-phase streamer characteristics in transformer oil under nanosecond impulses voltages[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 025011)
- [14] Brandt S, Schütz A, Klute F D, et al. Dielectric barrier discharges applied for optical spectrometry[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2016, 123: 6-32.
- [15] Zhang Shuai, Wang Wenchun, Jiang Pengchao, et al. Comparison of atmospheric air plasmas excited by high-voltage nanosecond pulsed discharge and sinusoidal alternating current discharge[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114: 163301.
- [16] Shao Tao, Long Kaihua, Zhang Cheng, et al. Experimental study on repetitive unipolar nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41: 215203.
- [17] Zhou Xiongfeng, Liang Jianping, Zhao Zilu, et al. Ultra-high synergetic intensity for humic acid removal by coupling bubble discharge with activated carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123626.
- [18] Wandell R J, Wang Huihui, Bulusu R K M, et al. Formation of nitrogen oxides by nanosecond pulsed plasma discharges in gas-liquid reactors[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2019, 39(3): 643-666.
- [19] Zhou Xiongfeng, Wang Wenchun, Yang Dezheng, et al. Controlling of reactive species in atmospheric Ar bubble discharge by adding N_2/O_2^a [J]. *Plasma Processes and Polymer*, 2019, 16: 1800124.
- [20] Bulusu R K M, Wandell R J, Gallan R O, et al. Nitric oxide scavenging of hydroxyl radicals in a nanosecond pulsed plasma discharge gas-liquid reactor[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52: 504002.