

# 空气电晕放电发展过程的特征发射光谱分析与放电识别

李彦飞<sup>1,2</sup>, 韩冬<sup>1,2\*</sup>, 邱宗甲<sup>1</sup>, 李康<sup>1</sup>, 赵义焜<sup>1,2</sup>, 万留杰<sup>1,2</sup>, 张国强<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190  
2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 局部空气放电是导致高压输变电设备绝缘劣化的重要因素。空气放电中丰富的发射光谱信息与放电特征存在直接映射关系。采用针-板电极模拟了空气电晕放电的发展过程, 并检测了放电由弱变强过程中的“紫外-可见光-近红外”波段在 200~980 nm 范围内的发射光谱。放电初期的发射光谱主要由氮气分子 N<sub>2</sub> 的带状光谱组成, 分别为 N<sub>2</sub> 第二正带系(second positive system, SPS)和 N<sub>2</sub> 第一正带系(first positive system, FPS)。放电程度加深后, 发生能级跃迁的粒子种类更加丰富, 由此产生了带状光谱与线状光谱相互交叠的复杂谱线, 光谱范围也由放电初期的 280~460 nm 扩展至 200~980 nm。放电处于临界击穿时, 发射光谱的强度急剧增加, 强度最高值出现在 500.715 和 777.202 nm 处, 分别对应氮离子 N<sup>+</sup> 和氧原子 O 的辐射谱线, 这意味着微观放电过程再次发生改变。基于空气放电机理分析得到: 放电初期、放电加深、放电极限击穿三个阶段中强度占优的谱峰或谱带分别由 N<sub>2</sub>, NO 与 O 和 N<sup>+</sup> 辐射跃迁所致, 这由放电间隙的能量所决定, 其特征光谱分别为 336.907, 239.687 和 500.715 nm。放电初期, 336.907 nm 处的强度绝对占优, 239.687 和 500.715 nm 处的相对强度极小; 放电程度加深时, 239.687 nm 处的强度占优, 500.715 nm 处的相对强度极小; 临界击穿时, 500.715 nm 处的强度占优, 336.907 nm 处的强度最弱。空气电晕放电的 200~980 nm 光谱范围内, 紫外波段、可见光波段和近红外波段的光子数虽然都随着施加电压的升高而增加, 但各波段光子数的归一化结果表明: 随着放电程度的加深, 紫外波段的光子比例逐渐减小, 可见光波段的光子比例逐渐增加, 近红外波段光子比例变化相对较小。不同放电阶段的“紫外-可见光-近红外”波段的相对光子数分布有较明显的差异, 可以反映放电的发展程度。

**关键词** 空气电晕放电; 发射光谱; 放电过程; 特征谱线

**中图分类号:** TM855 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)09-2956-07

## 引言

输变电设备在制造、安装和运行等过程中, 局部空气放电是引起其绝缘劣化的重要因素之一。放电故障往往伴随产生多种物理和化学现象, 如超声波、放电中心区域的光辐射、电磁波辐射和气体分解等。相应地, 当前的放电故障检测技术主要有超声波法、超高频法、脉冲电流法和分解气体法等, 但这些方法易受到电磁、声等噪声信号影响, 且较难获取放电发展过程的相关物化特征<sup>[1]</sup>。发射光谱法是近些年新兴的检测方法之一, 主要通过检测局部放电产生的光辐射信息建立“发射光谱-局部放电”关系, 进行放电模式识别与诊断。与其他检测技术相比, 发射光谱检测法具有响应速度

快、灵敏度高、抗电磁和声信号干扰能力强<sup>[2]</sup>等优点。随着光学技术的发展, 输变电设备的局部放电发射光谱检测得到了广泛关注<sup>[3]</sup>。

东京电力有限公司 Fujii 等<sup>[4]</sup>检测了空气、SF<sub>6</sub> 电晕放电的发射光谱, 空气放电的光谱主要集中在 300~400 nm 之间; SF<sub>6</sub> 则主要集中在 300~800 nm, 且正极性电晕和负极性电晕的发射光谱有明显不同。清华大学赵文华等<sup>[5]</sup>利用发射光谱法研究了空气尖-板电晕放电中电压和电极间距对不同波长范围内放电光谱幅值的影响。清华大学魏念荣等<sup>[6]</sup>研制的荧光光纤传感器可检测电机定子绝缘损坏的严重程度。武汉大学傅中等<sup>[7]</sup>测量了交流电压下 190~900 nm 范围内空气的电晕放电光谱, 并指出紫外光光电探测设备可通过小于 320 nm 的特征波长来检测电气设备的电晕放电。

收稿日期: 2020-06-27, 修订日期: 2020-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877203)和中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20200012)资助

作者简介: 李彦飞, 1995 年生, 中国科学院电工研究所硕士研究生 e-mail: liyf@mail.iee.ac.cn

\* 通讯作者 e-mail: donghan@mail.iee.ac.cn

奥波莱工业大学 Koziol 等<sup>[8]</sup>的研究结果表明电极几何形状不同,相应的空气放电发射光谱具有较大差异。西安交通大学韩旭涛等<sup>[9]</sup>结合荧光光纤和 GIS (Gas Insulated Switchgear) 内置特高频传感器,检测了 GIS 内部导杆尖刺缺陷和悬浮缺陷的光信号和特高频信号;发现荧光光纤法的灵敏度不低甚至高于特高频法。重庆大学唐炬等<sup>[10]</sup>利用荧光光纤传感系统检测了变压器油局部放电,结果表明光测法与超高频法的检测结果得到的脉冲具有相同的数量和相位分布。西安交通大学任明等<sup>[11]</sup>研究了 SF<sub>6</sub> 气体中不同放电类型下的光谱分布以及光脉冲在三个光谱波段内的统计特性,提出了一种适用于局部放电识别的三角聚类方法。上述研究多集中在不同介质、放电类型、检测方法等的发射光谱对比方面。实际上,光辐射信息中包含着放电基本物理过程的物理化学参数,能够反映局部放电的严重程度<sup>[1,6]</sup>,更有助于加深对绝缘系统中放电发生和发展机理的认识<sup>[12]</sup>。日本名古屋大学 Yoshida 等<sup>[12]</sup>经检测后发现 SF<sub>6</sub> 局部放电发展过程中三个瞬间的条纹图像及其发射光谱在 560 nm 以上的波长范围内有明显差异。然而,空气介质从局部放电起始到临界击穿过程中的发射光谱变化规律鲜有报道。

电晕放电多由导体上的尖端或突起所致,可视为典型的局部放电形式。长时间的电晕放电将引起绝缘老化,甚至导致设备在正常运行电压下发生击穿。本文模拟了尖-板电极的电晕放电实验,检测了从起始电晕放电-放电程度加深-临界击穿过程中的“紫外-可见-近红外”波段的发射光谱。一方面,结合空气放电机理,通过发射光谱的谱线与特定分子、原子、离子的能级跃迁的关系,分析了放电发展过程中激发辐射的粒子(包括原子、离子、分子和基团等)的主导谱线或谱带及其形成机理。另一方面,统计分析了放电发展不同阶段的光子总数及光子分布规律,由此提出了可表征放电发展阶段的发射光谱特征量。

## 1 实验部分

### 1.1 装置和条件

图 1 为实验装置结构示意图。实验电源经接触式调压器后接入工频试验变压器。其中,接触式调压器的额定电压为 380 V,型号为 TEDGC-15;工频试验变压器的额定电压为 0.38 kV/150 kV,额定电流为 30.5 A/0.1 A,型号为 YDTW-15/150。为避免外界光干扰,实验系统已与外部光源隔离。实验室环境温度约为 19 °C,空气相对湿度为 10%。

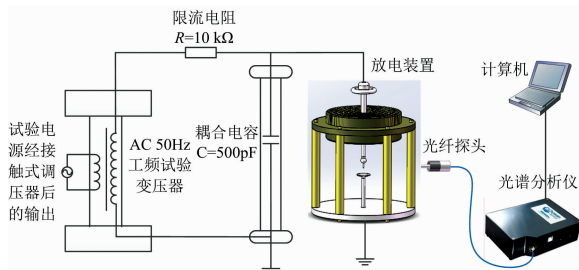


图 1 实验装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental platform

采用针-板电极结构模拟电气设备的电晕放电缺陷。针电极为直径 3 mm 的不锈钢针,针尖锋利圆润;板电极为直径 100 mm 的铜板。工频交流电压施加在针电极上,板电极接地。

放电产生的光信号采用海洋光学型号为 QE65000 的光谱仪来采集,光谱波长检测范围为 200~980 nm。光谱仪的积分时间如果设置太短,不易从背景噪声中识别提取有效信号;设置太长则会降低设备响应速度。为此,本文折中取积分时间为 3 000 ms。光谱仪的石英光纤头装有连接器,与针电极尖端等高且水平距离为 20 cm。

### 1.2 放电发展阶段的主导谱带及其成因

本文设置了 5 个施加电压(12, 13.5, 14.8, 16 和 16.9 kV),电极间距为 22.5 mm,平均电场强度分别为 5.33, 6, 6.58, 7.11 和 7.51 kV·cm<sup>-1</sup>。文献<sup>[13]</sup>指出,空气间隙不超过 10 cm 时,棒-板气隙在正极性下的直流平均击穿场强约为 7.5 kV·cm<sup>-1</sup>,且工频交流电压击穿电压的峰值与正极性直流击穿电压相近<sup>[13]</sup>。根据临界平均击穿场强,将 12, 13.5 和 14.8 kV 的电晕放电归为放电初期;16 kV 的电晕放电对应于放电程度加深阶段;16.9 kV 已达到临界击穿场强,视为放电临界击穿阶段。图 2 为 5 个施加电压下的电场强度仿真图。

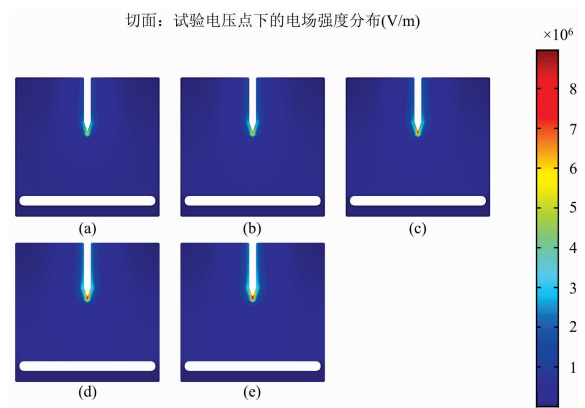


图 2 5 个施加电压下的电场强度仿真图

(a):  $U=12$  kV; (b):  $U=13.5$  kV; (c):  $U=14.8$  kV;  
(d):  $U=16$  kV; (e):  $U=16.9$  kV

Fig. 2 Simulations of electric field intensity at five voltages

(a):  $U=12$  kV; (b):  $U=13.5$  kV; (c):  $U=14.8$  kV;  
(d):  $U=16$  kV; (e):  $U=16.9$  kV

#### 1.2.1 放电初期

对放电装置从零开始施加电压,当电压升高到 12 kV 时,光谱分析仪开始接收到幅值较为明显的发射光谱。放电初期的平均场强虽低于临界击穿场强,但大曲率针尖区域的局部场强达到了 60~70 kV·cm<sup>-1</sup>,如图 2(a)所示,在空气中足以引起碰撞电离、电晕放电等现象。图 3 为施加电压为 12, 13.5 和 14.8 kV 时电晕放电发射光谱。

由图 3 可知,该阶段的发射光谱主要由氮气分子 N<sub>2</sub> 的带状光谱组成,分别为 N<sub>2</sub> 第二正带系(second positive system, SPS)和 N<sub>2</sub> 第一正带系(first positive system, FPS)。光谱强度随施加电压的增大而增强,也即对应的活性粒子数量

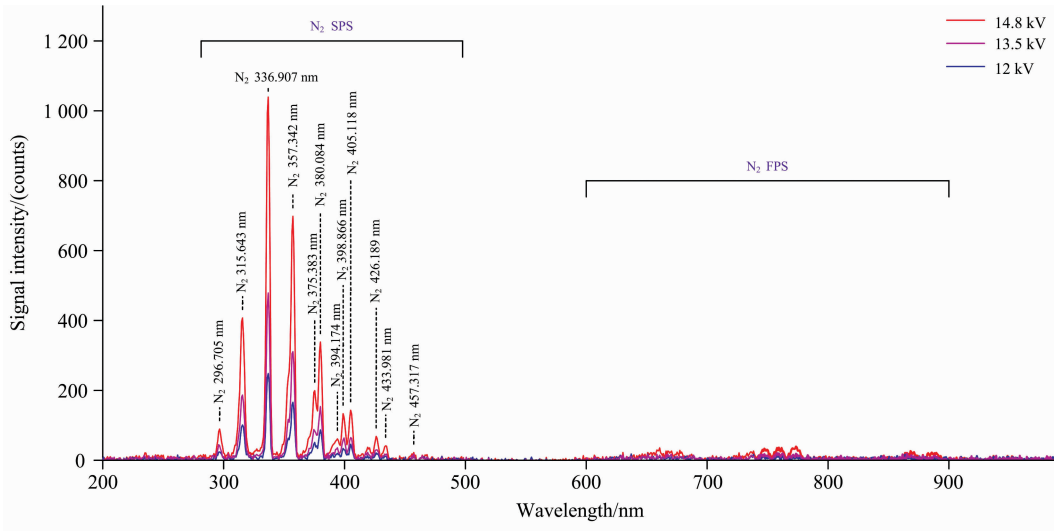


图 3 放电初期的发射光谱  
Fig. 3 Emission spectrum in the early stage of discharge

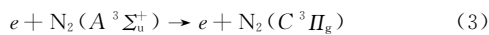
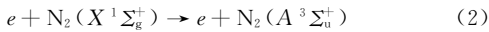
在增加。

在早期的空气放电中, 由于电极间输入的电场能量相对较小, 由氮气分子  $N_2(C^3\Pi_g)$  向  $N_2(B^3\Pi_g)$  跃迁产生的第二正带系(SPS)是发射光谱中最强、最清晰的谱带, 光谱范围为 280~460 nm, 主要分布在紫外波段。 $N_2$  的第二正带系(SPS)光谱所反映的辐射跃迁过程为

$$N_2(C^2\Pi_g) = N_2(B^3\Pi_g) + h\nu \quad (1)$$

跃迁概率  $A = (2.4 - 2.7) \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  [15]。

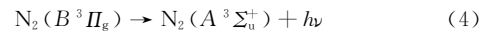
$N_2(C^3\Pi_g)$  和  $N_2(B^3\Pi_g)$  是  $N_2$  常见的两个激发态。 $N_2(C^3\Pi_g)$  的能级较高(11.0 eV), 而放电初期电子获得的能量不足, 因此  $N_2(C^3\Pi_g)$  无法直接激发产生, 主要通过如下电子逐级激发的途径来生成 [14]。



其中  $N_2(X^1\Sigma_g^+)$  为  $N_2$  基态, 反应式(2)和式(3)分别需要 6.17 和 4.9 eV 的能量。如果电子获得的能量大于等于最大

值 6.17 eV, 便可产生  $N_2(C^3\Pi_g)$  激发态, 出现辐射跃迁(1)。

$N_2$  的第一正带系(FPS)光谱所反映的辐射跃迁过程为



跃迁概率  $A = (0.8 - 2.5) \times 10^5 \text{ s}^{-1}$  [15]。

第一正带系的跃迁概率比第二正带系小 2~3 个数量级, 因此在强度上较小。

### 1. 2. 2 放电程度加深阶段

当施加电压升高至 16 kV 时, 针尖处的局部场强最大值已达  $80 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 放电进一步增强。此时放电机理发生了变化, 发生能级跃迁的粒子种类更加丰富, 由此产生了带状光谱与线状光谱相互交叠的复杂谱线, 光谱范围也由放电初期的 280~460nm 扩展至 200~980 nm。这一阶段的发射光谱如图 4 所示。其中分子辐射的带状光谱范围标注在光谱上方, 谱带中强峰所在位置由向下箭头标注; 原子或离子辐射的线状光谱标注于对应谱峰顶点附近。

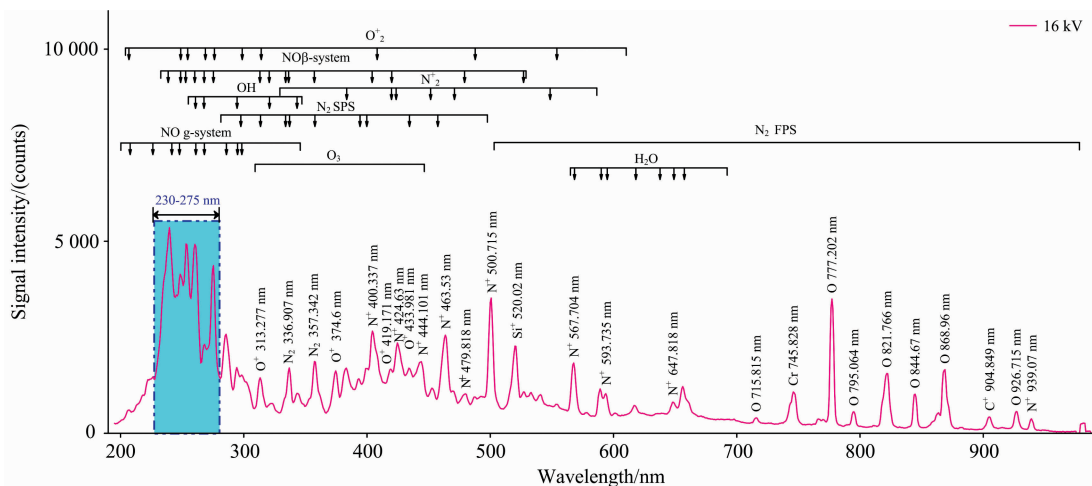
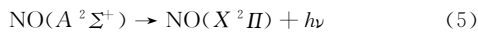


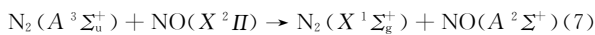
图 4 放电加深 ( $U = 16 \text{ kV}$ ) 阶段的发射光谱  
Fig. 4 Emission spectrum of the discharge with deeper degree ( $U = 16 \text{ kV}$ )

多原子体系每个电子能级上有多个振动能级且每个振动能级上包含多个转动能级，一对电子能级之间的跃迁则包含了不同振动、转动能级的跃迁，从而形成了多条谱线密集在一起的带状光谱。这一阶段的带状光谱主要由  $N_2$ 、 $O_3$  和  $NO$  等分子和  $O_2^+$  和  $N_2^+$  等分子离子以及自由基( $OH \cdot$ )辐射产生。线状光谱的出现意味着放电间隙中中性分子发生了解离与电离，主要由空气解离或电离产生的氮原子  $N$ 、氮离子  $N^+$ 、氧原子  $O$ 、氧离子  $O^+$  以及不锈钢电极材料中包含的元素( $Si$ ,  $Cr$ ,  $C^+$ )能级跃迁产生。

230~275 nm 波段范围内的谱带强度较放电初期大幅增加，该波段由  $NO$  分子辐射产生，为该阶段强度最显著的谱带。 $NO$  分子的发射光谱主要是激发态的  $NO(A^2\Sigma^+)$  向基态  $NO(X^2\Pi)$  跃迁时产生，即



其中  $NO(A^2\Sigma^+)$  主要由下面的碰撞反应生成<sup>[16]</sup>



由如上反应可知，在基态和激发态  $NO$  的生成过程中， $N_2$  的亚稳态  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  起着很重要的作用。实际上  $NO(A$

$^2\Sigma^+$ ) 的浓度由  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  的浓度决定，电子对  $NO(X^2\Pi)$  的直接激发作用很小<sup>[16]</sup>。

$N_2(A^3\Sigma_u^+)$  通常可由电子撞击  $N_2$  分子生成，也可以通过更高激发态  $N_2(C^3\Pi_g)$ 、 $N_2(B^3\Pi_g)$  的猝灭或跃迁而产生<sup>[15]</sup>。当电压升至 16 kV 时，电极间电场强度的增强导致电子数量和电子能量增大，促进了反应(2)的发生，因此  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  的浓度升高。另一方面，电压升高后部分  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  可能会生成更高激发态  $N_2(C^3\Pi_g)$  和  $N_2(B^3\Pi_g)$ ，但与此同时逆向过程也会发生，而且  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  是  $N_2$  常见激发态中寿命最长(约 2 s)的。以上两方面导致  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  数量的骤升，进而又促进了  $NO(A^2\Sigma^+)$  的生成，从而出现明显的  $NO(A^2\Sigma^+)$  辐射跃迁的发射光谱。

### 1.2.3 放电临界击穿阶段

施加电压继续升高至 16.9 kV 时，针尖处的局部电场强度接近  $85 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，平均击穿场强已达临界击穿场强。此时放电呈现不稳定现象，相应地，发射光谱整体强度随时间有间歇性的波动。图 5 中的两组曲线对应 16.9 kV 下不同时刻捕捉到的发射光谱图，两组曲线轮廓相近，强度却相差一倍左右。

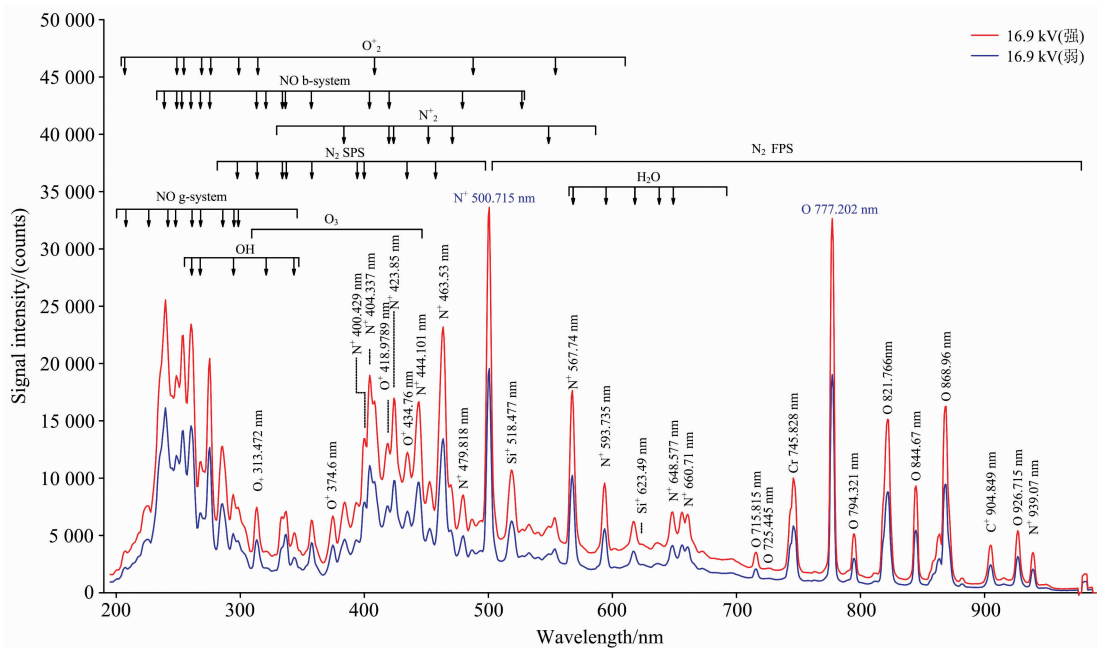


图 5 放电临界击穿阶段 ( $U=16.9 \text{ kV}$ ) 的发射光谱图

Fig. 5 Emission spectrum of the critical breakdown stage of discharge ( $U=16.9 \text{ kV}$ )

该阶段的发射光谱强度急剧增加，且强度最高值出现在 500.715 和 777.202 nm 处，分别对应氮离子  $N^+$  (500.732 nm<sup>[17]</sup>) 和氧原子  $O$  (777.417 nm<sup>[17]</sup>) 的辐射谱线，这意味着微观放电过程再次发生改变。

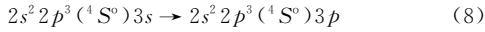
500.715 nm 处的谱峰在放电后期很强，与 777.202 nm 处氧原子产生的谱峰强度接近，是一个值得关注的特征峰。经查询文献，铜板电极中的铜原子和铜离子均没有 500 nm 附近发射光谱线；不锈钢针电极包含的元素虽然比较混杂，但我们在铝针电极放电实验的谱线中也检测到了 500.715 nm 的谱线，由此可排除电极材料的影响。根据文献<sup>[17]</sup>，

$N^+$  在 500.715 nm 附近有 500.148, 500.515, 500.732 和 501.062 nm 等谱线。因此初步判定该谱线由  $N^+$  辐射产生。这表明，在临界击穿条件下，高能态的  $N^+$  粒子数量相对较大。

此外，根据文献<sup>[15]</sup>， $O_2$  放电产生的所有活性物种中，能量由高到低依次是氧正离子  $O^+$  (大于 22 eV)、氧分子离子  $O_2^+$  (11~25 eV)、氧原子  $O$  (9.15~15.78 eV)、激发态氧分子  $O_2^*$  (1~6 eV) 和氧原子  $O$  (4.190 和 1.967 eV)<sup>[16]</sup>。然而，高气态气体放电时一般难以观测到氧气的分子光谱<sup>[18]</sup>。氧分子离解产生的两个能量最低的激发态氧原子  $O(^1S)$

(4.190 eV)和  $O(^1D)$ (1.967 eV), 由于存在时间长, 分别为  $1.783 \times 10^4$  和  $4.13 \times 10^5$  s, 比较稳定<sup>[15]</sup>, 也较难观测。

由于电子的能量在放电间隙中呈随机分布, 在电场强度较低时, 激发形成高能态氧原子的电子数量比例较小。当放电间隙的能量达到一定阈值后, 氧元素的发射谱线才占据主导地位, 这主要由  $O(9.15 \sim 15.78$  eV)发生跃迁而辐射产生。在放电发展后期观察到的 777.202 nm 处的光谱线是其中之一, 其跃迁为



## 2 结果与讨论

### 2.1 最大发射光谱强度的分布特征

图 6 为 14.8, 16 和 16.9 kV 下的发射光谱的对比, 分别对应放电初期、放电程度加深、临界击穿三个阶段。放电初期的光谱强度最大值出现在 336.907 nm 处, 对应  $N_2$  的辐射跃迁; 放电程度加深阶段, 光谱强度最大值出现在 239.687 nm 处, 对应 NO 的辐射跃迁; 临界击穿阶段, 光谱强度最大值出现在 500.715 或 777.202 nm 处(两者相差不多), 分别对应  $N^+$  和 O 的辐射跃迁。

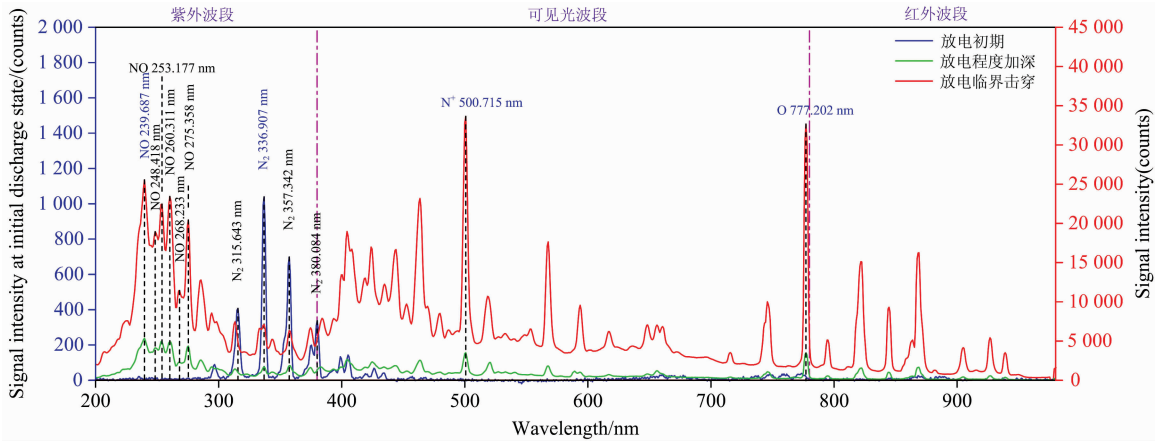


图 6 放电不同阶段光谱对比图

Fig. 6 Spectral comparison of different discharge stages

图 7 为放电不同阶段的光谱强度分量的归一化对比, 即三阶段对应的 336.907, 239.687 和 500.715 nm 处的光谱强度与三者光谱强度总之和之比。239.687, 336.907 和 500.715 nm 这三个特征波长处的光谱相对强度在放电不同阶段有明显差异, 可标识空气放电的严重程度。

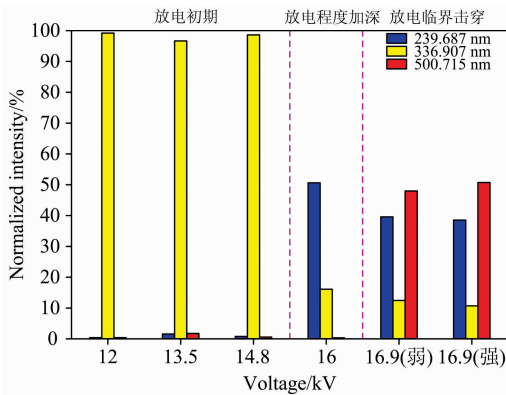


图 7 不同阶段三个特征波长处的归一化光谱强度

Fig. 7 Normalized spectral intensities at three characteristic wavelengths

### 2.2 光子总数变化

图 8 为 200~980 nm 全波段范围内的光子总数随电压变化的折线图。某一波段内的光子数为

$$N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

式(9)中,  $\lambda$  为波长, nm;  $I(\lambda)$  表示波长  $\lambda$  处的光谱强度,  $N$  为从  $\lambda_1$  到  $\lambda_2$  波段内的光子总数。

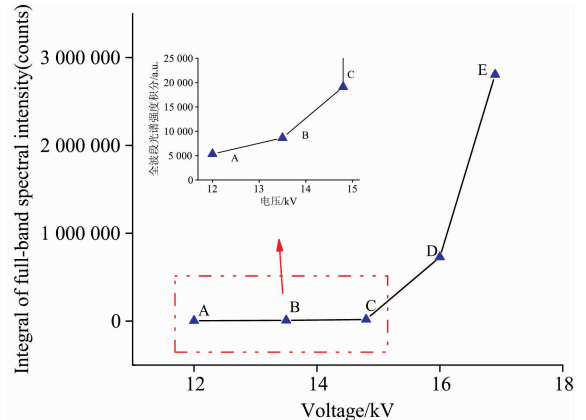


图 8 全波段光子数随电压变化折线图

Fig. 8 Line chart of Full-band photons' number varying with voltage

A 点到 C 点对应于放电初期, 随着电压的升高, 光子总数持续增加, 但增长幅度较缓, 微观参数和放电反应机理并未发生质的变化。电压升至 16 kV 时, 光子总数发生第一次跳变, 数值明显大于放电起始阶段, 且光谱形状发生改变。

这是因为电压升高导致电极尖端电离过程增强，带电粒子运动速度增大，碰撞电离迅猛发展，进入自持放电阶段。当施加电压为 16.9 kV 时，光子总数呈间歇性的爆发状态，发生第二次跳变，光谱形状再次改变，开始转入流注形式的放电阶段。此后，稍微增加施加电压，空气间隙便可击穿。

### 2.3 光子分布特征

空气电晕放电的 200~980 nm 光谱范围内，200~380 nm 为紫外波段，380~780 nm 为可见光波段，780~980nm 为近红外波段。我们对各波段的光子数进行了归一化处理，即上述三个波段内的光子数与全波段光子总数之比。图 9 为放电不同阶段的发射光谱分段(紫外、可见光、红外波段)的归一化光子数比较。

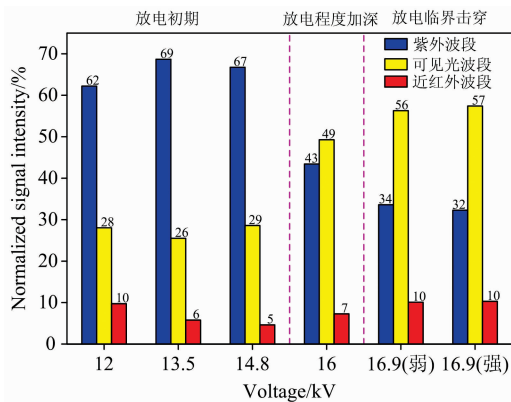


图 9 不同放电阶段在三个波段内的归一化光子数  
Fig. 9 Normalized photons' number in three bands at different discharge stages

三个波段的相对光子数对不同的放电发展阶段具有较好的区分度，差异主要体现在紫外波段和可见光波段，近红外波段的比例差异相对较小。图 10 为降维处理(忽略近红外波段)后，不同放电阶段的光谱在紫外波段和可见光波段积分的占比。放电初期紫外波段的光子数占优，放电临界击穿阶段可见光波段的光子数占优。随着放电程度的加深，在 200~780 nm 范围内，紫外波段的光子比例逐渐减小，可见光波段的光子比例逐渐增加。因此，可通过紫外与可见光范围内的光子分布特征对比判断放电的发展程度。

### References

[ 1 ] TANG Ju, LIU Yong-gang, QIU Yin-jun, et al(唐 炬, 刘永刚, 裘吟君, 等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2012, 38(1): 1.  
 [ 2 ] HAN Xu-tao, LIU Ze-hui, ZHANG Liang, et al(韩旭涛, 刘泽辉, 张 亮, 等). Journal of Xi'an Jiaotong University(西安交通大学学报), 2018, 52(6): 128.  
 [ 3 ] Ren M, Dong M, Liu J. Energies, 2016, 9(3): 152.  
 [ 4 ] Fujii K, Yamada M, Tanaka A, et al. Conf. Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1992, 332.  
 [ 5 ] ZHAO Wen-hua, ZHANG Xu-dong, JIANG Jian-guo, et al(赵文华, 张旭东, 姜建国, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2003, 23(5): 955.  
 [ 6 ] WEI Nian-rong, ZHANG Xu-dong, CAO Hai-xiang, et al(魏念荣, 张旭东, 曹海翔, 等). J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)(清华大学学报·自然科学版), 2002, 42(3): 329.  
 [ 7 ] FU Zhong, CHEN Shi-xiu, CHEN Wei, et al(傅 中, 陈仕修, 陈 伟, 等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2007, 33(7): 92.

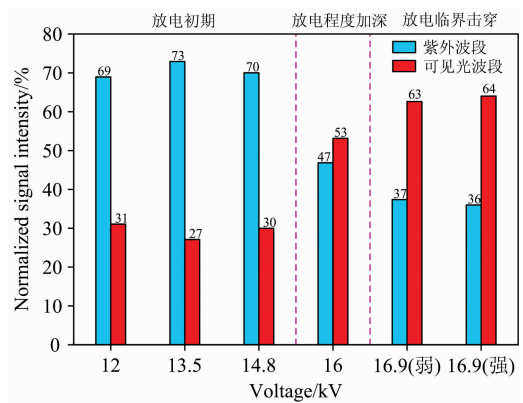


图 10 不同放电阶段在两个波段内的归一化光子数  
Fig. 10 Normalized photons' number in two bands at different discharge stages

### 3 结 论

利用针-板电极实验模拟了空气绝缘电气设备缺陷处放电发展的过程，结合空气放电理论，探究了不同放电阶段发射光谱的特点，并分析了特征发射光谱的形成原因。主要结论如下：

(1)放电发展过程，不同阶段对应的发射光谱有较大差异，可通过发射光谱解读该阶段的主导活性物种。放电初期、放电加深、放电临界击穿三个阶段中强度占优的谱峰或谱带分别由  $N_2$ 、 $NO$  与  $O$  和  $N^+$  辐射跃迁所致，这由放电间隙的能量所决定。

(2)放电初期的光谱强度最大值出现在 336.907 nm 处；放电程度加深阶段的光谱强度最大值出现在 239.687 nm 处；临界击穿阶段的光谱强最大值出现在 500.715 或 777.202 nm 处。这三个或四个特征波长处的相对光强对不同放电阶段具有良好的区分度。

(3)不同放电阶段的“紫外-可见光-近红外”波段的相对光子数分布有较明显的差异，可以反映放电的发展程度。放电特征参数与发射光谱强度、光子总数、光子分布等参数的关联性将作为下一步的研究重点，以期建立定量的放电识别判据。

- [ 8 ] Koziol M, Nagi L. Proceedings of the 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD), 2018.
- [ 9 ] HAN Xu-tao, LIU Ze-hui, LI Jun-hao, et al(韩旭涛, 刘泽辉, 李军浩, 等). Proceedings of the CSEE(中国电机工程学报), 2018, 38(22): 6760.
- [10] TANG Ju, OUYANG You-peng, FAN Min, et al(唐 炬, 欧阳有鹏, 范 敏, 等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2011, 37(5): 1129.
- [11] Ren M, Song B, Zhuang T, et al. ISA Transactions, 2018, 75: 247.
- [12] Yoshida S, Kojima H, Hayakawa N, et al. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2008, 1: 365.
- [13] ZHAO Zhi-da(赵智大). High Voltage Technique(高电压技术). Beijing: China Electric Power Press(北京: 中国电力出版社), 1999: 35.
- [14] Brandenburg R, Maiorov V A, Yu B G, et al. Journal of Physics D Applied Physics, 2005, 38(13): 2187.
- [15] XIE Wei-jie(谢维杰). Doctoral Dissertation(博士论文). Shanghai Jiao Tong University(上海交通大学), 2008.
- [16] Dilecce G, Ambrico P, Benedictis S D. Plasma Sources Science and Technology, 2007, 16: 511.
- [17] Sansonetti J E, Martin W C. Journal of Physical Chemical Reference Data, 2005, 34(4): 1559.
- [18] Slanger T G, Copeland R A. Chemical Reviews, 2003, 103(12): 4731.

## Characteristic Emission Spectrum Analysis and Discharge Identification on the Development Process of Air Corona Discharge

LI Yan-fei<sup>1, 2</sup>, HAN Dong<sup>1, 2\*</sup>, QIU Zong-jia<sup>1</sup>, LI Kang<sup>1</sup>, ZHAO Yi-kun<sup>1, 2</sup>, WAN Liu-jie<sup>1, 2</sup>, ZHANG Guo-qiang<sup>1, 2</sup>

1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Partial discharge of air is an important factor causing insulation deterioration of high voltage electrical equipment. The emission spectrum information in air discharge has close relationship with the discharge characteristics. In this paper, the development process of air corona discharge was simulated by needle-plate electrode, and the emission spectra in 200~980 nm wavelength range of “ultraviolet-visible-near infrared” band were detected. The emission spectrum at the initial discharge stage is mainly composed of the band spectrum of nitrogen molecule  $N_2$ , which are the second positive band system (Second Positive System, SPS) and the first positive band system (First Positive System, FPS) of  $N_2$  respectively. With the deepening of the discharge degree, the kinds of particles that undergo energy level transitions become more abundant, resulting in complex spectral lines that overlap with the band spectrum and the linear spectrum. Moreover, the spectral range is extended from 280~460 to 200~980 nm. When the discharge is at a critical breakdown, the intensity of the emission spectrum increases sharply, and the highest intensity values appear at 500.715 and 777.202 nm, respectively corresponding to the spectrum of nitrogen ions  $N^+$  and oxygen atoms O. Based on the air discharge mechanism, it is found that the dominant peaks or bands at the three stages of initial discharge, discharge deepening and critical breakdown are caused by the radiative transitions of  $N_2$ , NO, O and  $N^+$ , which are determined by the discharge energy. The characteristic spectrum wavelengths at the three discharge stages are 336.907, 239.687 and 500.715 nm, respectively. At the initial discharge stage, the intensity at 336.907 nm is absolutely dominant, and the relative intensity at 239.687 and 500.715 nm is very small. When the discharge degree is deepened, the intensity at 239.687 nm is dominant, and the relative intensity at 500.715 nm is the smallest. At the critical breakdown stage, the strength at 500.715 nm is dominant, and the strength at 336.907 nm is the weakest. In the 200~980 nm spectrum range of air corona discharge, although the photon number of the ultraviolet band (UV), visible band and near infrared band increases with the increase of the applied voltage, the normalized photon number of each band show that with the deepening of the discharge degree, the photon proportion in the ultraviolet band decreases while increasing gradually in the visible band, and the change of photon ratio in near infrared band is relatively small. There are obvious differences in the relative photon number distribution in the “UV-visible-near infrared” bands at different discharge stages, which can reflect the development of the discharge.

**Keywords** Air corona discharge; Optical emission spectroscopy; Discharge process; Characteristic spectrum wavelength

\* Corresponding author

(Received Jun. 27, 2020; accepted Dec. 11, 2020)