

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240991

# 金属异物影响的高压放电粒子仿真及 放电光谱特性

吴佩遥<sup>1</sup> 裴少通<sup>1</sup> 刘勇<sup>2</sup> 刘云鹏<sup>1</sup> 韩旭<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室 保定 071003

2. 国网衡水供电公司 衡水 053000)

**摘要** 金属异物在多种电力设备中均可能引起放电现象,为实现对金属异物引起放电现象的多光谱精确监测,必须深入理解其对放电光辐射的影响机制。该文通过试验分析了金属异物对高压放电全波段光辐射的影响特性,并结合仿真进一步分析了金属异物对日盲紫外波段光辐射的影响机理。首先,搭建含金属异物的高压放电试验平台,利用紫外相机和高速相机捕获放电图像,并利用光谱仪测得放电发射光谱;其次,通过分析放电光谱,确定产生日盲紫外波段光辐射的粒子跃迁主要为 $N_2(A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+)$ 和 $NO-\gamma(A^2\Sigma^+(v') \rightarrow X^2\Pi(v''))$ ;然后,构建二维等离子体仿真模型,计算在不同数量大金属颗粒和不同质量金属屑影响下放电过程中 $NO(A^2\Sigma^+)$ 与 $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ 的粒子数密度,并将其与测得光谱进行对比。通过试验可知,金属异物对放电产生光辐射的促进作用具有波段的选择性,其中紫外和可见光波段的反应更为灵敏;结合仿真分析可知,金属异物通过引起放电区域内电场的畸变促进粒子的激发与电离,使 $NO(A^2\Sigma^+)$ 与 $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ 粒子数密度增加,导致放电产生的日盲紫外波段光辐射增强。在该文试验条件下,放电产生的紫外、可见光、红外波段光辐射强度比值近似为一稳定值,约为1.1:1:0.25。

**关键词:** 金属异物 发射光谱 粒子仿真 等离子体 日盲紫外波段光辐射

**中图分类号:** TM853; O461; O432.1+1

## 0 引言

电力设备在运输和安装过程中,难免会由于摩擦和碰撞产生金属异物,如大金属颗粒或金属屑等,其往往会成为诱发电力设备放电的一个关键因素,进而导致设备故障或损坏。具体而言,金属屑可能附着在绝缘子表面,降低其绝缘性能,导致局部放电;大金属颗粒或金属屑可能在断路器或气体绝缘开关设备中诱发局部或贯穿性放电<sup>[1-4]</sup>,进而影响设备的正常工作。因此,精确地监测由金属异物引发的放电现象对降低电力设备的故障风险具有重要意义。为了实现这一目标,深入探究金属异物对高压放电的影响必不可少。

近年来,国内外学者针对金属异物对高压放电

的影响进行了大量的研究,包括采用有限元仿真方法对存在金属异物的盆式绝缘子表面电场分布进行仿真分析<sup>[5-8]</sup>;制作芯棒-护套内部金属异物人工缺陷的绝缘子,并开展工频耐压红外测试分析其红外特征<sup>[9]</sup>;用X射线激励电缆终端金属颗粒缺陷引发局部放电<sup>[10]</sup>;研究流动状态下含金属微粒变压器油的击穿特性<sup>[11]</sup>;设计微纳金属粉尘弥散浓度的光探测系统,获得不同粒径粉尘弥散浓度与仪器输出电压之间的定量关系与特征函数<sup>[12]</sup>。然而,这些研究多聚焦于宏观层面,并未深入微观粒子层面分析金属异物对放电的影响机制。此外,虽然金属异物的运动特性及其对放电行为的影响已有较广泛的实验和仿真研究<sup>[13-17]</sup>,但对于金属异物对放电产生光辐射的影响尚未进行深入探讨。郑莹莹等<sup>[18]</sup>通过综合应用超声波局部放电检测、特高频局部放电检测以及成分分析等技术手段,实现了电力设备的带电检测和综合诊断。然而,这些技术可能会受到环境噪

声和其他电磁干扰的影响,在一定程度上限制了诊断的准确性。

多光谱检测技术因其灵敏度高、非接触和放电定位准确等特点,在多种设备监测手段中显现出了独特的优势。尤其是对 240~280 nm 日盲紫外波段光辐射的放电检测,其具有抗太阳背景噪声干扰的特点,近年来已在电力设备外绝缘放电检测中得到广泛应用<sup>[19]</sup>。然而,目前仍然缺少对金属异物影响高压放电光辐射机理的研究。因此,深入分析金属异物对高压放电光辐射的影响机制,可为后续实现对金属异物放电现象的精确多光谱监测提供理论基础,对于确保电力设备的安全运行和提高电力系统的可靠性具有重要的理论和实际意义。

理论上,通过分析放电光谱可以得知放电过程中粒子的激发与能级跃迁<sup>[19]</sup>,进而从微观角度分析金属异物对高压放电光辐射的影响机理。放电过程中,高能级激发态粒子通过能级跃迁返回至基态或能量较低的激发态,释放出特定频率的光子<sup>[20]</sup>,进而可通过光谱仪观测得到各波段光辐射强度,以进行进一步分析。

综上所述,本文通过试验与仿真深入探讨了金属异物对高压放电 200~1 000 nm 全波段光辐射的影响特性以及对 240~280 nm 日盲紫外波段光辐射的影响机理。首先,依托搭建的放电试验平台,采用紫外相机和高速相机捕捉放电图像,同时采用光谱仪精确测量放电过程中日盲紫外波段以及全波段的光谱数据;其次,对测得光谱进行详细分析,确定产生日盲紫外波段光辐射的主要粒子为  $N_2$  和  $NO$  的激发态粒子;进一步地,构建二维仿真模型,模拟不同数量的大金属颗粒和不同质量的金属屑对放电发射光辐射的影响,仿真得到的  $N_2$  和  $NO$  激发态粒子数密度与试验中测得的放电日盲紫外波段光辐射的强度相对应;最后,结合仿真与试验结果,揭示金属异物对放电光辐射的影响机制。

## 1 金属异物影响的高压放电试验

### 1.1 试验平台

本文采用针-板模型进行金属异物影响的高压放电试验。针电极采用铁针,长为 510 mm,直径为 1.72 mm,尖部直径为 0.8 mm。板电极为铜板,直径为 15 cm,厚度为 3 mm。金属异物材质为铝,规格分为两种,分别为尺寸为 8 mm×8 mm×8 mm 近似圆柱体的大金属颗粒和直径为 0.1~1 mm 的金属屑,放置于板电极上。金属异物布置方式如图 1 所示。

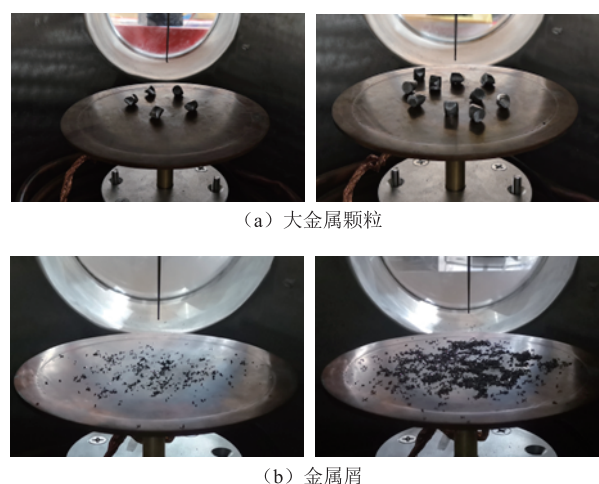
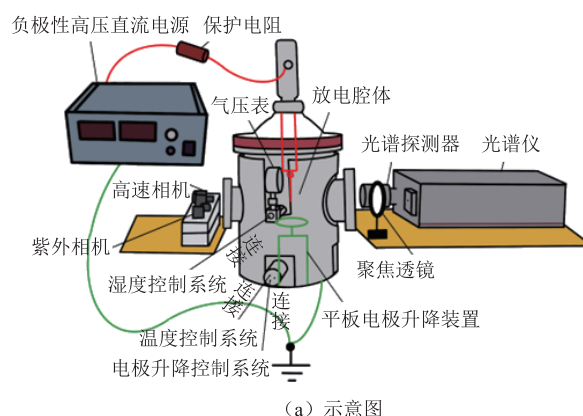


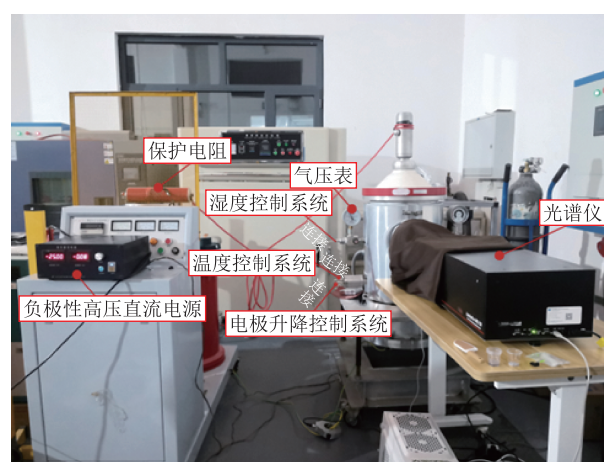
图 1 金属异物布置方式

Fig.1 Metallic foreign object arrangement method

搭建金属异物影响的高压放电试验平台如图 2 所示。其包括电源装置、放电腔体、环境因素控制系统、光学测量系统。



(a) 示意图



(b) 实物图

图 2 金属异物影响的高压放电试验平台

Fig.2 High-voltage discharge test rigs affected by metallic foreign object

电源装置为东文高压电源(天津)股份有限公司生产的 DW-N503-1ACDF0 负极性高压直流电源,

其额定电压为 $-50\text{ kV}$ ，经过 $10\text{ k}\Omega$ 保护电阻连接至放电装置高压端，可为气罐高压端提供所需电压等级的负极性直流电压。

放电腔体气罐密闭，外部顶端连接负极性高压电源，两侧设有观察窗，为厚度约为 $1.5\text{ cm}$ 、直径约为 $22\text{ cm}$ 的石英玻璃，下端前后均有BNC(bayonet nut connector)接口，温湿度探头、电极距离调节装置均通过BNC接口与腔体外显示器连接；气罐内部，腔体上端连接针电极，底部设有升降装置，精度为 $0.01\text{ mm}$ ，升降装置上端连接板电极，由此可精确控制针-板间距。

环境因素控制系统包括温度、湿度控制。由于试验环境温度较低，因此无需冷却装置。加热装置为气罐外壁覆盖的加热板，加热板连接温度控制装置。自制温度控制装置有手动、自动两种模式。手动模式为持续给加热板供电，加热板持续加热气罐；自动模式为设置所需温度与容差，当温度探头检测到温度超过容差时，自动给加热板供电。自制湿度控制装置通过控制阀门开关手动调节加湿和除湿两种模式。

光学测量系统如图3所示，包括光谱测量、放电紫外图像采集、放电过程高速图像采集装置。光谱测量采用普林斯顿仪器公司的Spectropro HRS-750光谱仪，光谱探测器为普林斯顿仪器公司生产的PIX1024-BUV-SF-Q-F-A，其对于日盲紫外波段入射光的量子效率为 $53\%\sim 68\%$ ，并采用与光谱仪及光谱探测器配套的LightField软件在计算机上控制光谱仪采集光谱。光谱测量光路示意图如图3a所

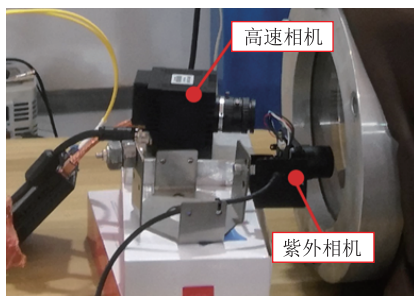
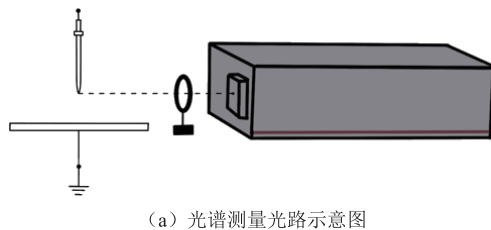


图3 光学测量系统

Fig.3 Optical measuring systems

示，将聚焦透镜置于观察窗前，放电产生的光辐射经由聚焦透镜直接聚焦至光谱仪狭缝处，避免光纤对光辐射信号的衰减。放电紫外图像与高速图像采集装置为常州玻色科技有限公司生产的紫外相机与深圳市明视威科技有限公司生产的MS-XG51GM-T高速相机，如图3b所示。

## 1.2 试验方法

试验过程中严格控制试验环境，用99%遮光布对试验平台进行遮光处理。加热板连接温度控制装置，设定温度为 $5^\circ\text{C}$ ，容差为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。相对湿度控制为 $55\%$ ，波动范围为 $\pm 5\%$ 。试验过程中腔体内温湿度在容差范围内保持不变。为保证放电产生的光辐射进入狭缝中，设置光谱仪狭缝为 $2\text{ mm}$ 。光谱仪光栅为 $600\text{ g/mm}$ 。由于放电产生的日盲紫外波段光辐射过于微弱，若曝光时间不足会被噪声淹没，为保证较好的信噪比，设置每次采集日盲紫外波段光谱曝光时间为 $2\text{ min}$ 。由于放电产生 $300\sim 400\text{ nm}$ 波段的光辐射较强，如果同样采用 $2\text{ min}$ 曝光时间会造成过曝，在光谱波峰处出现“削顶”的现象，经过多次尝试后设置每次采集全波段光谱的曝光时间为 $100\text{ ms}$ 。保持高压端电压为直流 $-25\text{ kV}$ ，用光谱仪采集不同数量金属异物的放电光谱，高速相机拍摄放电过程的高速图像，紫外相机拍摄放电紫外图像。

## 1.3 产生日盲紫外波段光辐射的粒子跃迁

通过放电试验测得的无金属异物时的日盲紫外波段放电光谱如图4所示。

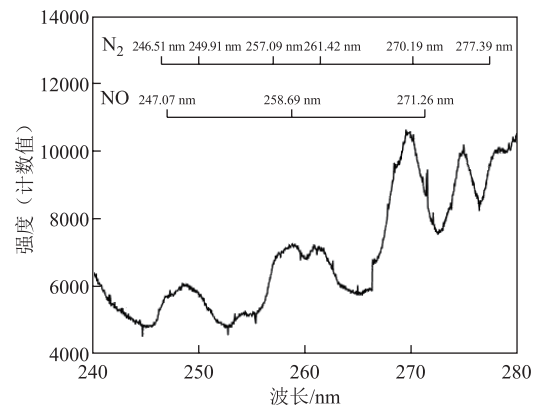


图4 日盲紫外波段放电光谱

Fig.4 Sun-blind ultraviolet band discharge spectra

将试验测得的特征光谱与文献[21-24]中不同粒子跃迁产生的特征谱线作对比，可以得到放电时产生日盲紫外波段光辐射的粒子跃迁种类见表1。表1中， $\text{N}_2(X^1\Sigma_g^+)$ 与 $\text{NO}(X^2\Pi)$ 分别为 $\text{N}_2$ 与 $\text{NO}$ 的基态粒子， $v'$ 为粒子跃迁前的振动能级， $v''$ 为粒子跃迁后的振动能级<sup>[19]</sup>。

表 1 放电时产生日盲紫外波段光谱的粒子跃迁

Tab.1 Particle jumps that produce day-blind ultraviolet band spectra during discharge

跃迁粒子	能级跃迁	波长/nm	振动能级 ( $v' \rightarrow v''$ )
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (A <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> → X <sup>1</sup> Σ <sub>g</sub> <sup>+</sup> )	246.51	0→4
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (A <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> → X <sup>1</sup> Σ <sub>g</sub> <sup>+</sup> )	249.91	1→5
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (A <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> → X <sup>1</sup> Σ <sub>g</sub> <sup>+</sup> )	257.09	2→6
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (A <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> → X <sup>1</sup> Σ <sub>g</sub> <sup>+</sup> )	261.42	0→5
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (A <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> → X <sup>1</sup> Σ <sub>g</sub> <sup>+</sup> )	270.19	2→7
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (A <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup> → X <sup>1</sup> Σ <sub>g</sub> <sup>+</sup> )	277.39	0→6
NO	NO-γ(A <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup> (v') → X <sup>2</sup> Π(v''))	247.07	0→2
NO	NO-γ(A <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup> (v') → X <sup>2</sup> Π(v''))	258.69	0→3
NO	NO-γ(A <sup>2</sup> Σ <sup>+</sup> (v') → X <sup>2</sup> Π(v''))	271.26	0→4

由表 1 可知, 放电时产生日盲紫外波段光谱的粒子跃迁主要为 N<sub>2</sub> 的 Vegard-Kaplan 带系 N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup> → X<sup>1</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup>) 和 NO 的 γ 带系 NO-γ(A<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>(v') → X<sup>2</sup>Π(v''))。

## 2 金属异物影响的高压放电仿真

为了对试验现象进行深入分析, 本文采用 COMSOL Multiphysics 6.1 仿真软件中的等离子体模块和静电模块构建二维金属异物影响的高压放电仿真模型, 计算不同数量大金属颗粒和不同质量金属屑影响下, 放电产生 N<sub>2</sub>(X<sup>1</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup>) 与 NO(X<sup>2</sup>Π) 的粒子数密度, 并认为其大小应与放电产生日盲紫外波段光辐射的强弱相对应, 进而分析金属异物对放电产生日盲紫外波段光辐射的影响机理。

### 2.1 几何结构

依据文献[25]对放电模型进行等比例缩小, 不影响仿真结果。为节约计算成本, 本文对金属异物进行 10:1 缩小后, 构建金属异物影响的高压放电二维仿真模型。仿真模型几何结构及网格划分如图 5 所示, 对网格进行了一定的设置以提高仿真的稳定性与收敛性。图 5 左侧为无金属异物的仿真结构,

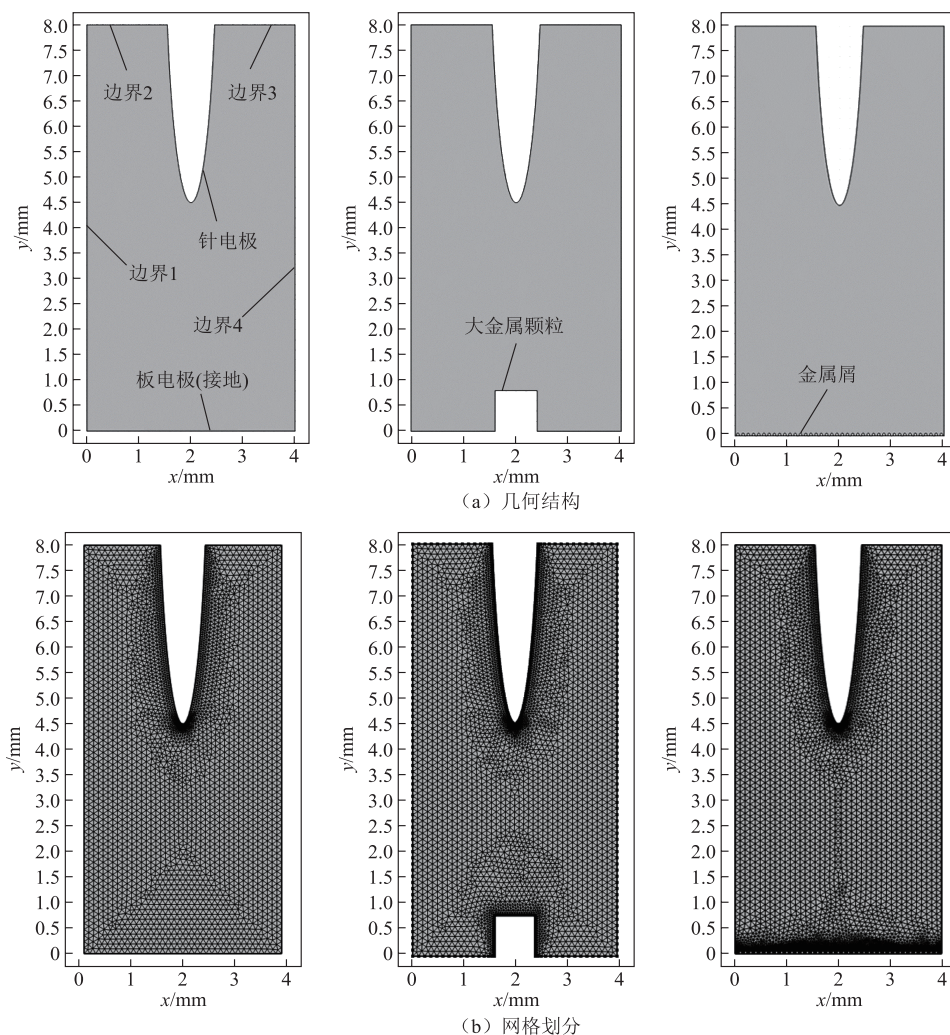


图 5 仿真模型几何结构及网格划分

Fig.5 Simulation model geometry and meshing

中间为有1颗大金属颗粒的情况,右侧为有少量金属屑的情况。在模型针电极及金属异物附近等易发生放电的位置设置网格为极细化,在不易发生放电的周边区域设置网格为细化。

## 2.2 控制方程

金属异物影响的高压放电模型由等离子体模块与静电模块组成,通过电子传输方程、电子能量传输方程、多组分扩散方程、泊松方程描述。

### 2.2.1 电子传输方程

电子输运通常由玻耳兹曼方程描述。电子连续性方程与电子通量方程分别表示为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e - (\mathbf{u} \cdot \nabla) n_e \quad (1)$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot \mathbf{E}) n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (2)$$

式中,  $n_e$  为电子数密度,  $\text{m}^{-3}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $\Gamma_e$  为电子通量,表示单位时间内穿过单位面积的电子流量,  $1/(\text{m}^2/\text{s})$ ;  $R_e$  为电子源项,表示化学反应产生电子的净速率,如电离或复合反应,  $1/(\text{m}^3/\text{s})$ ;  $\mathbf{u}$  为中性流体速度向量,  $\text{m/s}$ ;  $\mu_e$  为电子迁移率,表示单位电场下电子的运动速率,  $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ;  $\mathbf{E}$  为电场强度,  $\text{V/m}$ ;  $D_e$  为电子扩散率,表示电子在等离子体中由于浓度梯度引起的扩散效应,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

电子扩散率计算公式为

$$D_e = \mu_e \frac{k_B T_e}{q} \quad (3)$$

式中,  $T_e$  为电子温度,  $\text{K}$ ;  $q$  为电子电荷量,  $\text{C}$ ;  $k_B$  为玻耳兹曼常数,  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

假设存在  $M$  个有助于电子密度增长或衰减的化学反应,电子源项表达式为

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e \quad (4)$$

式中,  $x_j$  为反应  $j$  目标物种的摩尔分数;  $k_j$  为反应  $j$  的速率系数,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $N_n$  为总中性粒子数密度,  $\text{m}^{-3}$ 。

速率系数  $k_j$  通过式 (5) 从横截面数据计算。

$$k_j = \gamma \int_0^{\infty} \varepsilon \sigma_j(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5)$$

式中,  $\gamma$  为碰撞效率因子,  $\gamma = (2q/m_e)^{1/2}$ , 其中  $m_e$  为电子质量,  $m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $\varepsilon$  为电子能量,  $\text{eV}$ ;  $\sigma_j$  为碰撞截面,  $\text{m}^2$ ;  $f$  为电子能量分布函数 (Electron Energy Distribution Function, EEDF)。

### 2.2.2 电子能量传输方程

电子能量传输方程为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e + \mathbf{E} \cdot \Gamma_e = R_e - (\mathbf{u} \cdot \nabla) n_e + \frac{Q + Q_{\text{gen}}}{q} \quad (6)$$

$$\Gamma_e = (-\mu_e \cdot \mathbf{E}) n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (7)$$

式中,  $n_e$  为电子能量密度,  $\text{V/m}^3$ ;  $\Gamma_e$  为电子能量通量,  $1/(\text{m}^2/\text{s})$ ;  $R_e$  为由于非弹性碰撞引起的能量损失或增益,  $\text{eV}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $Q$  为外部热源,  $\text{W/m}^3$ ;  $Q_{\text{gen}}$  为广义热源,  $\text{W/m}^3$ ;  $\mu_e$  为能量迁移率,  $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ;  $D_e$  为能量扩散率,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

能量迁移率和能量扩散率计算式为

$$\mu_e = \frac{5}{3} \mu_e \quad (8)$$

$$D_e = \mu_e T_e \quad (9)$$

$$T_e = \frac{2\bar{\varepsilon}}{3k_B} \quad (10)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{n_e}{n_e} \quad (11)$$

式中,  $\bar{\varepsilon}$  为平均电子能量,  $\text{eV}$ 。

### 2.2.3 多组分扩散方程

多组分扩散方程为

$$\rho \frac{\partial w_k}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{j}_k + R_k \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{j}_k$  为扩散通量矢量,表示第  $k$  种组分的扩散速率和方向,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $R_k$  为物种  $k$  的速率表达式,表示第  $k$  种组分参与反应的速率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $\rho$  为混合物的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $w_k$  为第  $k$  种物质的质量分数。

扩散通量矢量计算式为

$$\mathbf{j}_k = \rho w_k \mathbf{v}_k \quad (13)$$

式中,  $\mathbf{v}_k$  为物种  $k$  的多组分扩散速度,  $\text{m/s}$ 。

### 2.2.4 泊松方程

泊松方程为

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}) = \rho_q \quad (14)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (15)$$

式中,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ;  $\varepsilon_r$  为相对介电常数;  $\rho_q$  为电荷密度,  $\text{C}/\text{m}^3$ ;  $\varphi$  为电势,  $\text{V}$ 。

## 2.3 化学反应方程

由于空气中某些气体的碰撞截面数据尚不明确,本文仿真模型只考虑空气的主要成分  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$  以及放电腔体中的  $\text{H}_2\text{O}$ 。由于  $\text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u)$  退激为  $\text{N}_2(\text{B}^3\Pi_g)$  后,会很快退激为  $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+)$  [22,26],  $\text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u)$

与  $N_2(B^3\Pi_g)$  的跃迁反应会改变  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  的数量, 进而影响放电紫外光谱, 因此将  $N_2(C^3\Pi_u)$  与  $N_2(B^3\Pi_g)$  反应加入仿真模型中。仿真模型中考虑 25 种粒子参与反应, 具体见表 2。

表 2 仿真模型中参与反应的粒子种类

Tab.2 Types of particles involved in the reaction in the simulation model

正离子	中性粒子	负离子	激发态粒子	电子
$N_2^+, O_2^+, NO^+, O_2^+ \cdot N_2, H_2O^+, OH^+$	$N_2, O_2, N, O, NO, O_3, H_2O, OH, H, H_2$	$O^-, O_2^-, H^-, OH^-$	$N_2(A^3\Sigma_u^+), N_2(B^3\Pi_g), N_2(C^3\Pi_u), NO(A^2\Sigma^+)$	$e$

根据参考文献[26-34], 表 3 总结了本模型中考虑的 37 种化学反应, 包括碰撞电离反应、碰撞激发反应、弹性碰撞反应、电子附着反应、正离子转化反应、负离子转化反应、中性粒子间反应、复合反应、淬灭反应。表 3 中, 单体反应的速率系数单位为  $s^{-1}$ ; 二体反应的速率系数单位为  $m^3/s$ ; 三体反应的速率系数单位为  $m^6/s$ ;  $T_g$  为气体温度, K。

表 3 仿真模型中发生的化学反应

Tab.3 Chemical reactions occurring in the simulation model

序号	反应	速率系数	$\Delta\epsilon/eV$
碰撞电离反应			
R1	$e + O_2 \rightarrow O_2^+ + e + e$	$f_1(\epsilon)$	12.1
R2	$e + N_2 \rightarrow N_2^+ + e + e$	$f_2(\epsilon)$	15.6
R3	$e + H_2O \rightarrow OH^+ + H + e + e$	$f_3(\epsilon)$	18.12
R4	$e + H_2O \rightarrow H_2O^+ + e + e$	$f_4(\epsilon)$	13.5
碰撞激发反应			
R5	$e + N_2 \rightarrow e + N_2(A^3\Sigma_u^+)$	$f_5(\epsilon)$	6.2
R6	$e + N_2 \rightarrow e + N_2(B^3\Pi_g)$	$f_6(\epsilon)$	7.4
R7	$e + N_2 \rightarrow e + N_2(C^3\Pi_u)$	$f_7(\epsilon)$	11.0
R8	$e + NO \rightarrow e + NO(A^2\Sigma^+)$	$f_8(\epsilon)$	5.48
弹性碰撞反应			
R9	$e + O_2 \rightarrow e + O_2$	$f_9(\epsilon)$	—
R10	$e + N_2 \rightarrow e + N_2$	$f_{10}(\epsilon)$	—
R11	$e + H_2O \rightarrow e + H_2O$	$f_{11}(\epsilon)$	—
电子附着反应			
R12	$e + O_2 \rightarrow O^- + O$	$f_{12}(\epsilon)$	—
R13	$e + NO \rightarrow O^- + N$	$f_{13}(\epsilon)$	—
R14	$e + H_2O \rightarrow H^- + OH$	$f_{14}(\epsilon)$	—
R15	$e + H_2O \rightarrow OH^- + H$	$f_{15}(\epsilon)$	—
R16	$e + O_2 + O_2 \rightarrow O_2^- + O_2$	$2 \times 10^{-41}(300/T_e)$	—

(续)

序号	反应	速率系数	$\Delta\epsilon/eV$
正离子转化反应			
R17	$O_2^+ + N \rightarrow NO^+ + O$	$1.2 \times 10^{-16}$	—
R18	$N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$	$1.04 \times 10^{-15} T_g^{-0.5}$	—
R19	$N_2^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + N_2$	$2.3 \times 10^{-15}$	—
R20	$H_2O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + H_2O$	$4.3 \times 10^{-16}$	—
R21	$O_2^+ + N_2 + N_2 \rightarrow O_2^+ \cdot N_2 + N_2$	$8.1 \times 10^{-38} T_g^{-2}$	—
R22	$O_2^+ \cdot N_2 + N_2 \rightarrow O_2^+ + N_2 + N_2$	$14.8 T_g^{-5.3} \exp(-2357/T_g)$	—
负离子转化反应			
R23	$H^- + H_2O \rightarrow OH^- + H_2$	$3.8 \times 10^{-15}$	—
中性粒子间反应			
R24	$O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O_2$	$3.4 \times 10^{-46}(300/T_g)^{1.2}$	—
R25	$O + O_2 + N_2 \rightarrow O_3 + N_2$	$3.4 \times 10^{-46}(300/T_g)^{1.2}$	—
复合反应			
R26	$O_2^+ + e \rightarrow O + O$	$2 \times 10^{-13}(300/T_e)$	—
R27	$O_2^+ + O^- \rightarrow O_2 + O$	$2 \times 10^{-13}(300/T_e)^{0.5}$	—
R28	$e + N_2^+ \rightarrow N + N$	$2.8 \times 10^{-13}(300/T_e)^{0.5}$	—
R29	$e + e + N_2^+ \rightarrow N_2 + e$	$1 \times 10^{-31}(T_g/T_e)^{4.5}$	—
R30	$e + N_2^+ + N_2 \rightarrow N_2 + N_2$	$3.12 \times 10^{-35} T_e^{-1.5}$	—
R31	$O_2^+ + O_2^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2$	$2 \times 10^{-37}(300/T_g)^{2.5}$	—
R32	$O_2^+ + O_2^- + N_2 \rightarrow O_2 + O_2 + N_2$	$2 \times 10^{-37}(300/T_g)^{2.5}$	—
淬灭反应			
R33	$N_2(A^3\Sigma_u^+) + O_2 \rightarrow N_2 + O + O$	$2.54 \times 10^{-18}$	—
R34	$N_2(B^3\Pi_g) + N_2 \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+) + N_2$	$5 \times 10^{-17}$	—
R35	$N_2(C^3\Pi_u) + N_2 \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + N_2$	$1 \times 10^{-17}$	—
R36	$N_2(A^3\Sigma_u^+) + H_2O \rightarrow H_2 + N + NO$	$1 \times 10^{-16}$	—
R37	$NO + N_2(A^3\Sigma_u^+) \rightarrow NO(A^3\Sigma^+) + N_2$	$6.6 \times 10^{-17}$	—

### 2.4 初始值与边界条件

设置温度为  $5^\circ C$ , 相对湿度为 55%, 气压为 1 atm ( $1 \text{ atm} = 101.3 \text{ kPa}$ )。等离子体初始电子数密度为  $1 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ , 初始电势为 0 V。本文使用 LXCat 数据库<sup>[35-36]</sup>原始截面数据计算电子碰撞反应的速率系数。

设置泊松方程边界条件, 即边界 1~4 为零电荷, 边界上电位移场的法向分量设置为零, 有

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (16)$$

式中,  $\mathbf{n}$  为边界法向量, 指向边界外部的方向;  $\mathbf{D}$  为电位移矢量,  $C/m^2$ 。

设置电子传输方程边界条件, 即电子出入口区域边界 1~4 为绝缘, 电子和电子能量通量的法向分量为零, 有

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_e = 0 \quad (17)$$

$$-n \cdot \Gamma_e = 0 \quad (18)$$

设置等离子体与针电极接触表面为金属接触，针电极电压为-25 kV。

设置板电极及金属颗粒表面为接地，电压  $V=0$ 。

设置等离子体与针电极及板电极接触的表面的区域为壁，电子在随机运动过程中因与壁碰撞而减少，因二次电子发射而增加。壁处电子通量的法向分量与电子能量通量的法向分量的方程为

$$n \cdot \Gamma_e = \frac{1-r_e}{1+r_e} \cdot \frac{1}{2} v_{e,th} n_e - [\sum \gamma_i (\Gamma_i \cdot n) + \Gamma_t \cdot n] \quad (19)$$

$$n \cdot \Gamma_e = \frac{1-r_e}{1+r_e} \cdot \frac{5}{6} v_{e,th} n_e - [\sum \gamma_i \varepsilon_i (\Gamma_i \cdot n) + \varepsilon_{avg} (\Gamma_t \cdot n)] \quad (20)$$

式中， $r_e$ 为反射系数（通常为0）； $v_{e,th}$ 为电子热速度，m/s； $\gamma_i$ 为第*i*种正离子的二次电子发射系数，设置二次电子发射系数为0.01； $\Gamma_i$ 为第*i*种正离子在壁处的离子通量，1/(m<sup>2</sup>·s)； $\Gamma_t$ 为热发射通量，1/(m<sup>2</sup>·s)； $\varepsilon_i$ 为第*i*种二次电子的平均能量，eV； $\varepsilon_{avg}$ 为热发射电子的平均能量，eV。

电子热速度计算式为

$$v_{e,th} = \sqrt{\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}} \quad (21)$$

### 3 结果分析

分析试验测得的200~1 000 nm全波段光谱与高速相机测得的放电过程图片可以得出金属异物对不同波段光辐射的影响特性。由1.3节可知，产生日盲紫外波段光辐射的主要跃迁粒子为NO(A<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>)与N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>)，进一步仿真得到NO(A<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>)与N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>)的粒子数密度，其应与试验测得的日盲紫外波段光辐射强度相对应。通过仿真可以分析金属异物对NO(A<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>)与N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>)粒子数密度的影响，即对放电产生日盲紫外波段光辐射的影响机理。

#### 3.1 金属异物对全波段光辐射的影响特性

##### 3.1.1 大金属颗粒对全波段光辐射的影响特性

保持放电腔体内温度、湿度、气压等环境因素不变，改变大金属颗粒数量，分别于板电极上放置0、5、10颗金属颗粒，使用高速相机得到放电过程图像如图6所示。

由图6可知，随着大金属颗粒数量的增加，针电极尖端与金属颗粒间形成电弧的能力逐渐增强。具体而言，无金属颗粒时仅在针尖处观察到模糊光

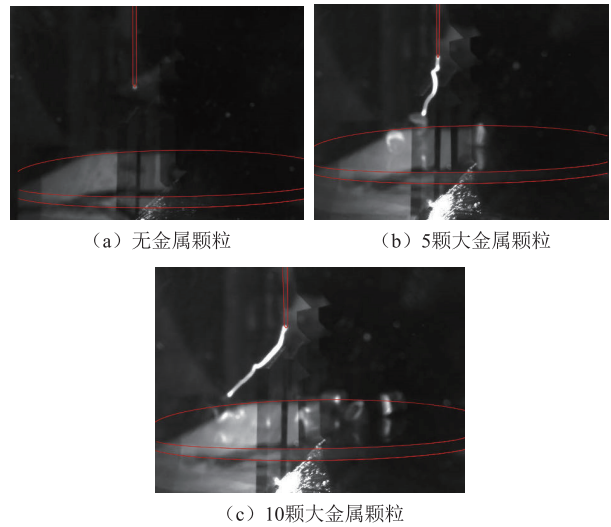


图6 大金属颗粒影响的高压放电高速图像

Fig.6 High-speed images of high-voltage discharges affected by large metal particles

斑；当大金属颗粒数量增至5颗时，尖端与附近金属颗粒间偶尔形成电弧；增至10颗时，尖端与较远距离的金属颗粒间形成电弧。这是由于金属颗粒的存在导致其周围局部电场增强，放电区域内的电子在自由行程中积累的能量增加，促进了粒子的激发与电离，产生了更多被电离的气体分子，形成一连串的电离区域，促进了电弧的形成。

各波段光辐射强度随大金属颗粒数量增加的变化如图7所示。其中，各波段数据是根据文献[37]将200~354 nm、381~675 nm、737~1 000 nm分别划分为紫外、可见光、红外波段，并对光谱仪测得的各波段光辐射强度进行积分得到。

由图7可知，不同波段光辐射强度存在明显差

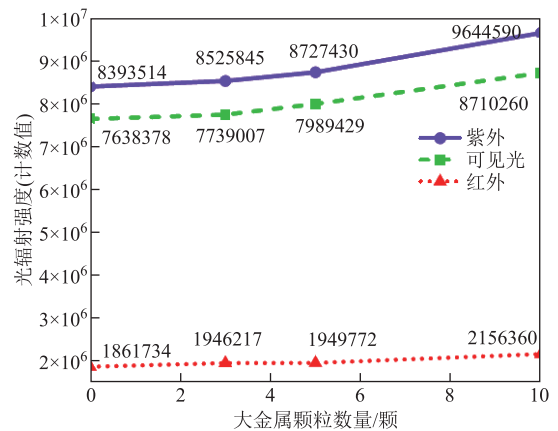


图7 紫外、可见光、红外波段光辐射强度与大金属颗粒数量的关系

Fig.7 Relationship between the intensity of optical radiation in the ultraviolet, visible and infrared bands and the number of large metal particles

异, 紫外波段光辐射强度最高, 可见光波段次之, 红外波段光辐射强度明显低于其他两个波段。随着大金属颗粒数量的增加, 三个波段的光辐射强度均呈上升趋势, 其中紫外与可见光波段增长更为显著, 红外波段增长相对平缓。这说明金属颗粒对产生光辐射的促进作用具有波段的选择性, 其中紫外和可见光波段的反应更为灵敏。因此, 用紫外、可见光检测技术对金属异物放电现象进行检测更为有效。

### 3.1.2 金属屑对全波段光辐射的影响特性

保持放电腔体温度、湿度、气压等环境因素不变, 改变金属屑质量, 分别于板电极上放置 0 g、0.1 g、0.6 g 金属屑, 使用高速相机得到放电过程图像如图 8 所示。

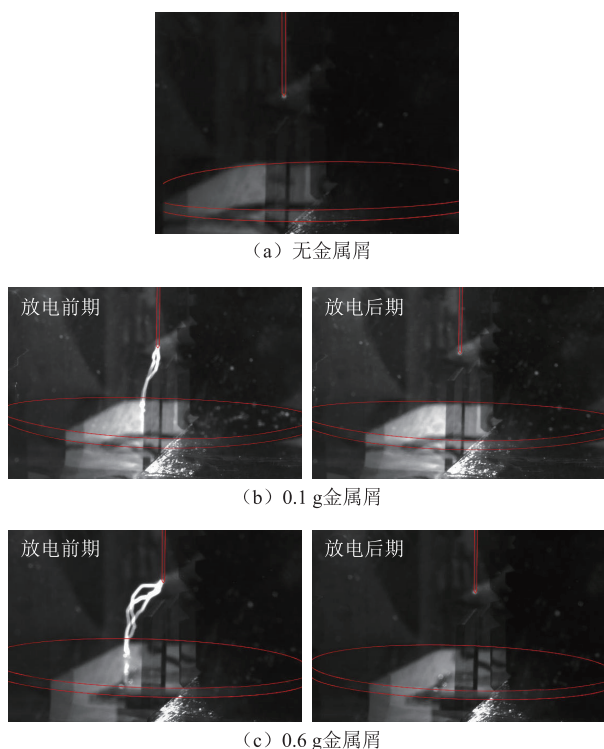


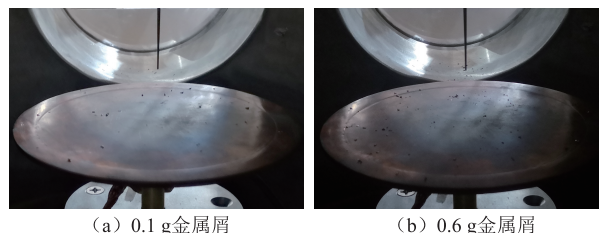
图 8 金属屑影响的高压放电高速图像

Fig.8 High-voltage discharge high-speed image affected by metal chips

由图 8 可知, 金属屑在放电前期对产生电弧的影响与大金属颗粒相似, 随着金属屑质量的增加, 针电极尖端与金属屑间形成电弧的能力逐渐增强。但与大金属颗粒不同的是, 金属屑影响的高压放电中出现了单根电弧较细但多根电弧同时存在的情况, 如图 8c 所示。这是由于金属屑在板电极上分布更为分散, 导致电场在更多位点上局部增强, 形成了多条放电通路, 但由于金属屑尺寸较小, 这种增强效应不如大金属颗粒剧烈, 因此单根电弧较细。

加压后期板电极上金属屑分布情况如图 9 所

示。试验中, 无论板电极上金属屑质量为 0 g、0.1 g 或 0.6 g, 电弧在一段时间后均不再出现, 其原因可由图 8、图 9 综合分析得到。在加压过程中, 板电极上的金属屑会向外扩散且偶有金属屑起跳, 最终掉出板电极, 因此放电后期板电极中心区域的金属屑几乎完全消失, 只在外围区域有少量残留。这一变化会导致加压后期的放电状况趋于一致, 即电弧活动显著减少直至消失。



(a) 0.1 g 金属屑 (b) 0.6 g 金属屑

图 9 加压后期板电极上金属屑分布情况

Fig.9 Distribution of metal chips on the plate electrode after pressurization

各波段光辐射强度与金属屑质量的关系如图 10 所示。结合图 7 与图 10 可知, 在本次试验环境下, 放电产生紫外、可见光、红外波段光辐射强度之比近似为一稳定值, 约为 1.1:1:0.25。这说明产生紫外、可见光、红外波段光辐射的化学反应间的比例关系几乎不受金属异物的影响。但与大金属颗粒相比, 金属屑引起的光辐射强度增长曲线相对平缓, 这说明金属屑对放电光辐射强度的增强作用相对较弱。

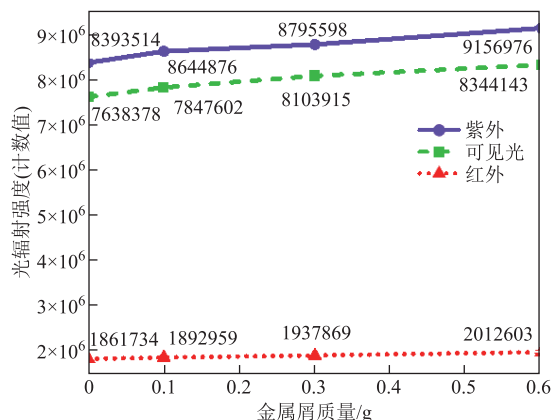


图 10 紫外、可见光、红外波段光辐射强度与金属屑质量的关系

Fig.10 Relationship between the intensity of optical radiation in the ultraviolet, visible and infrared bands and the quality of metal chips

## 3.2 金属异物对日盲紫外波段光辐射的影响机理

### 3.2.1 大金属颗粒对日盲紫外波段光辐射的影响机理

使用紫外相机采集大金属颗粒影响高压放电

的紫外图像如图 11 所示。随着大金属颗粒数量的增加，针电极尖端处光斑外围的电弧变密变长，但光斑中心区域亮度与大小几乎不变。同时，金属颗粒周围也出现了紫外光斑，此光斑的数量与总面积随着大金属颗粒数量的增加而增加，这是大金属颗粒的存在引起了其周围电场的局部增强所导致。

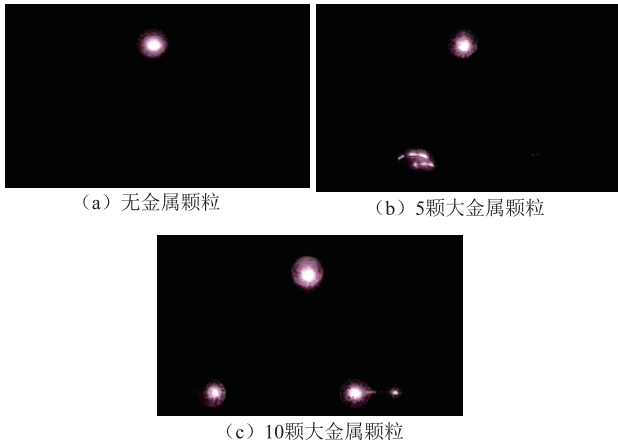


图 11 大金属颗粒影响的高压放电紫外图像

Fig.11 UV image of high voltage discharge influenced by large metal particles

使用光谱仪测得大金属颗粒影响高压放电的日盲紫外波段光谱如图 12 所示；通过仿真模型计算  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  与  $NO(A^2\Sigma^+)$  产生速率，得到不同数量大金属颗粒影响下， $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  与  $NO(A^2\Sigma^+)$  产生速率最大值见表 4。由图 12 与表 4 可知，随着大金属颗粒数量的增加，光谱曲线幅值增大， $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  与  $NO(A^2\Sigma^+)$  产生速率最大值增大，这说明大金属颗粒数量增加会导致放电区域内化学反应速率增加；但光谱形状基本不变，这说明大金属颗粒数量不影响放电区域内化学反应的种类与相互间的比例关系。

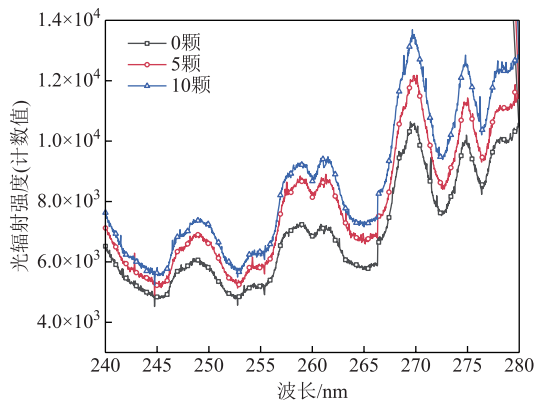


图 12 大金属颗粒影响的高压放电日盲紫外波段光谱  
Fig.12 Sun-blind ultraviolet band spectra of high-voltage discharges influenced by large metal particles

表 4  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  与  $NO(A^2\Sigma^+)$  产生速率最大值  
Tab.4  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  and  $NO(A^2\Sigma^+)$  production rate maxima

大金属颗粒数量	$N_2(A^3\Sigma_u^+)/[mol/(m^3\cdot s)]$	$NO(A^2\Sigma^+)/[mol/(m^3\cdot s)]$
0	$5.25\times 10^3$	$4.92\times 10^{-5}$
1	$8.05\times 10^3$	$8.51\times 10^{-5}$
2	$1.15\times 10^4$	$1.13\times 10^{-4}$
3	$1.42\times 10^4$	$1.36\times 10^{-4}$

为进一步分析大金属颗粒对日盲紫外波段光辐射的影响机理，本文仿真计算了不同数量大金属颗粒影响下放电区域中  $NO(A^2\Sigma^+)$  与  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  的粒子数密度。减少仿真中金属颗粒的数量可以节约计算成本与计算时间，且同样可以分析金属颗粒对日盲紫外波段光辐射的影响机理，因此本文仿真了金属颗粒数量为 0、1、2、3 时的放电过程，得到放电区域内电场分布如图 13 所示， $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  与  $NO(A^2\Sigma^+)$  粒子数密度的空间分布如图 14 所示。

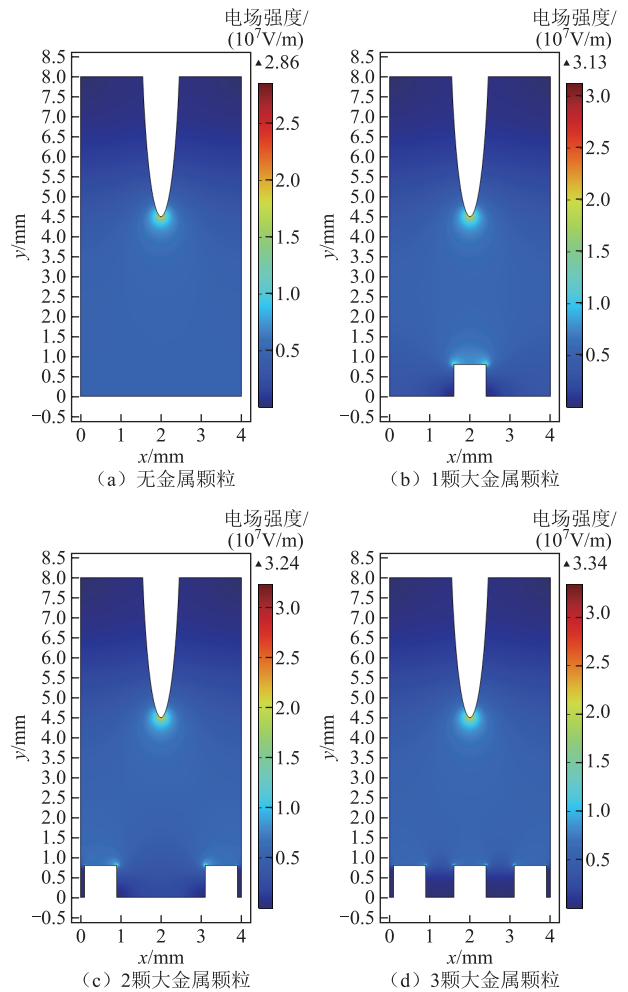
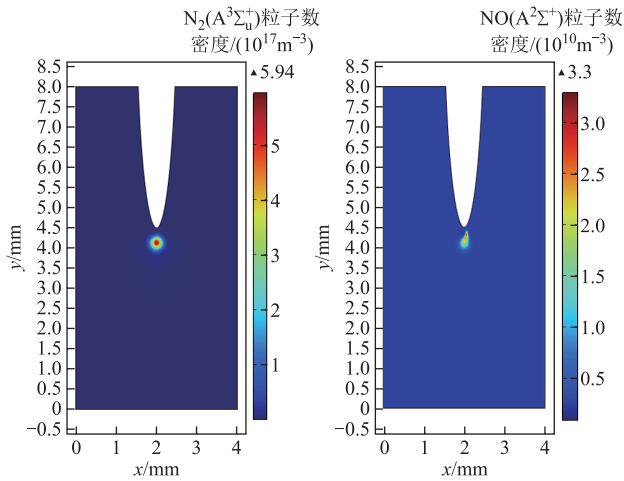


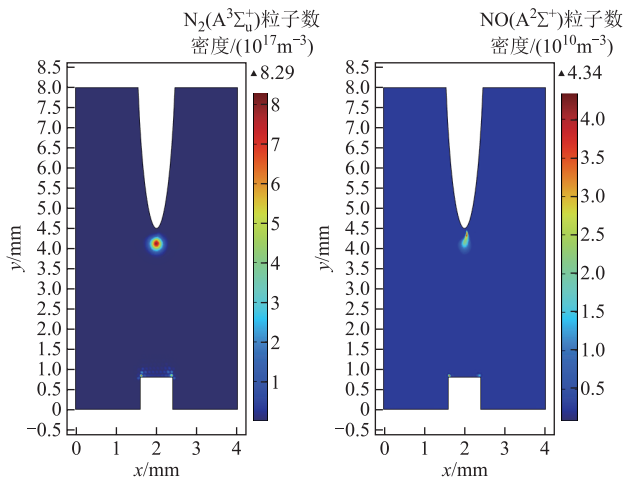
图 13 大金属颗粒影响的高压放电区域内电场分布  
Fig.13 Electric field distribution in a high-voltage discharge region influenced by large metal particles

由图 13 可知,随着大金属颗粒数量的增加,放电区域内电场强度逐渐增强,且金属颗粒附近出现明显电场畸变。

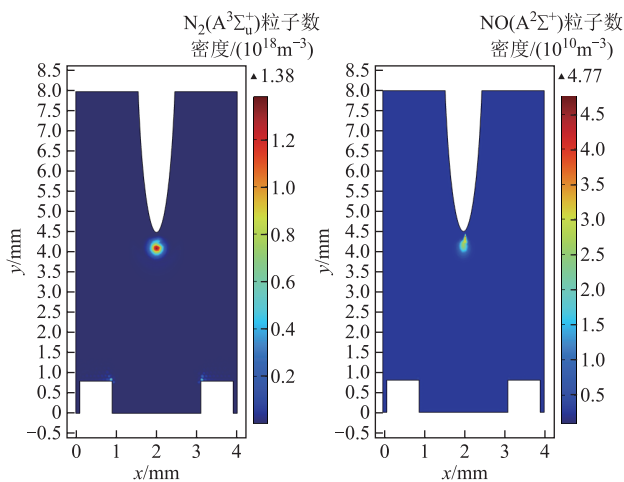
由图 14 可知,随着大金属颗粒数量的增加,放电区域中  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  与  $NO(A^2\Sigma^+)$  的粒子数密度最大值逐渐增加。分析其原因,当板电极上存在大金属颗粒时,金属颗粒可看作与板电极等电位,相当于



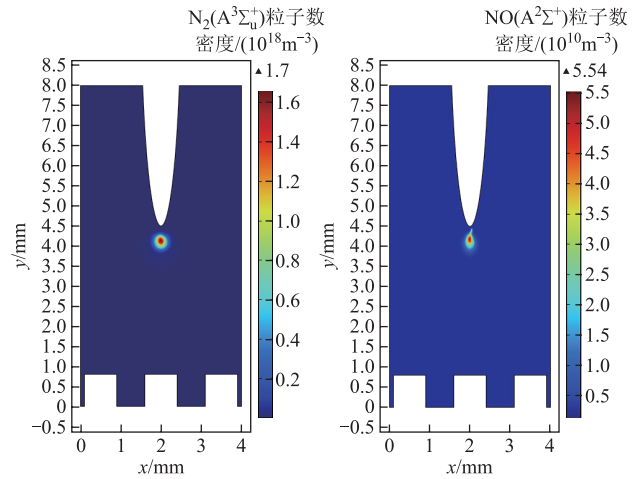
(a) 无金属颗粒



(b) 1颗大金属颗粒



(c) 2颗大金属颗粒



(d) 3颗大金属颗粒

图 14 大金属颗粒影响的高压放电粒子数密度空间分布

Fig.14 Spatial distribution of particle number density in high-voltage discharges influenced by large metal particles

缩短了正负电极间的距离,造成针-板电极间电场增强;此外,金属颗粒的不规则几何形状使其周围电场局部增强,加剧了电场的均匀性。进而使得电子在自由行程中积累的能量增强,促进了粒子的激发与电离,产生了更多的  $NO(A^2\Sigma^+)$  与  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  粒子。

据此可分析大金属颗粒对放电产生日盲紫外波段光辐射的影响机理。大金属颗粒的存在增强了放电区域内电场的均匀度,使得起晕电压降低,更易产生光子<sup>[38]</sup>;同时,大金属颗粒的存在增强了放电区域内的电场强度,促进了粒子激发和电离所需的高能电子的产生。这些高能电子与  $N_2$ 、 $NO$  气体分子碰撞时,有更大的概率激发气体分子跃迁至激发态,使得放电区域内产生的  $NO(A^2\Sigma^+)$  与  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  增加,其退激释放出的日盲紫外波段光子增加。这与试验中得到的结果一致,即随着大金属颗粒数量的增加,放电产生日盲紫外波段光辐射强度增强。

### 3.2.2 金属屑对日盲紫外波段光辐射的影响机理

使用紫外相机采集金属屑影响的高压放电紫外图像如图 15 所示。由图 15 可知,金属屑的存在促进了电弧的形成与发展,但对针电极尖端处的光斑形态、大小几乎没有影响。此外,随着金属屑质量的增加,板电极上也出现了极小的紫外光斑,如图 15c 所示,这是由于金属屑引起了周围电场的局部增强,但金属屑尺寸较小,对电场的增强作用有限,因此光斑面积小且亮度较弱。

利用光谱仪测得金属屑影响的高压放电日盲紫外波段光谱如图 16 所示。由图 16 可知,随着金属屑质量的增加,光辐射强度略有增强但并不明显,

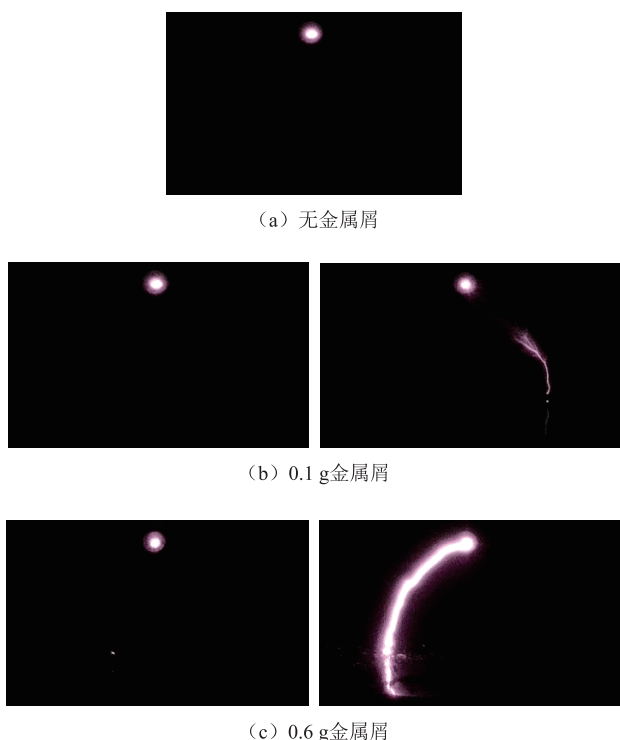


图 15 金属屑影响的高压放电紫外图像

Fig.15 Ultraviolet image of high voltage discharge influenced by metal chips

这是由于放电后期板电极上金属屑的残留量都极少，其对放电产生光辐射的影响微乎其微；而测得的日盲紫外波段光谱是光谱仪曝光 2 min 得到的，其中包括放电前期与放电后期，因此测得日盲紫外波段光辐射的增强并不明显。

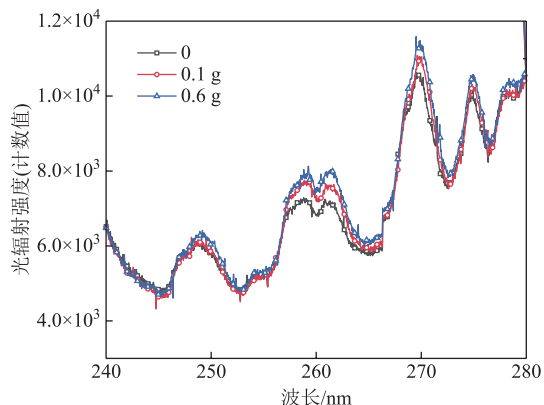


图 16 金属屑影响的高压放电日盲紫外波段光谱  
Fig.16 Sun-blind ultraviolet band spectra of high-pressure discharges influenced by metal chips

为进一步分析金属屑对日盲紫外波段光辐射的影响机理，本文仿真计算了无金属屑、少量金属屑、较多金属屑和大量金属屑四种情况下，放电区域中的电场分布情况，如图 17 所示， $\text{NO}(\text{A}^2\Sigma^+)$ 与 $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+)$ 的粒子数密度空间分布如图 18 所示。

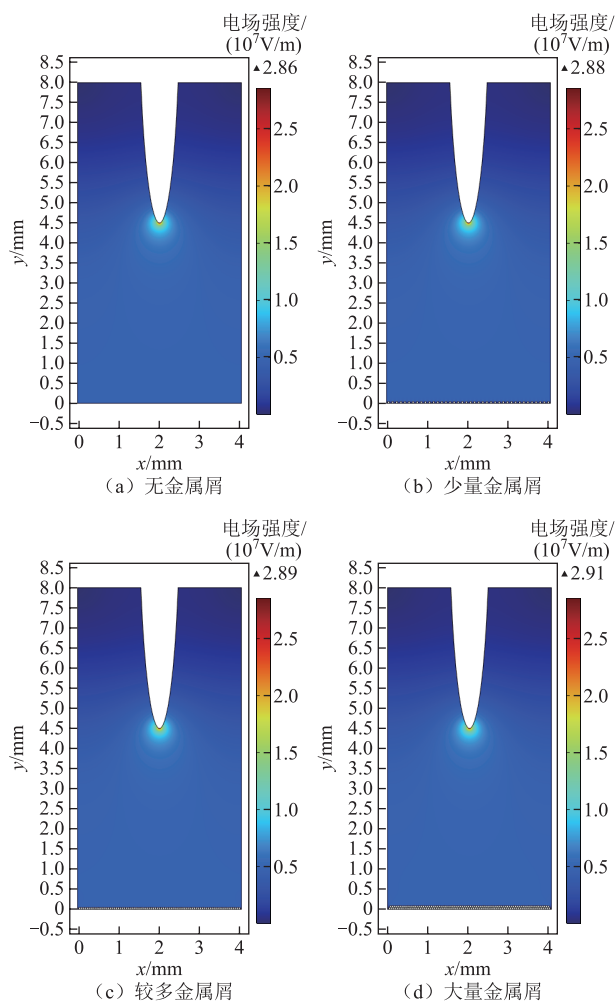
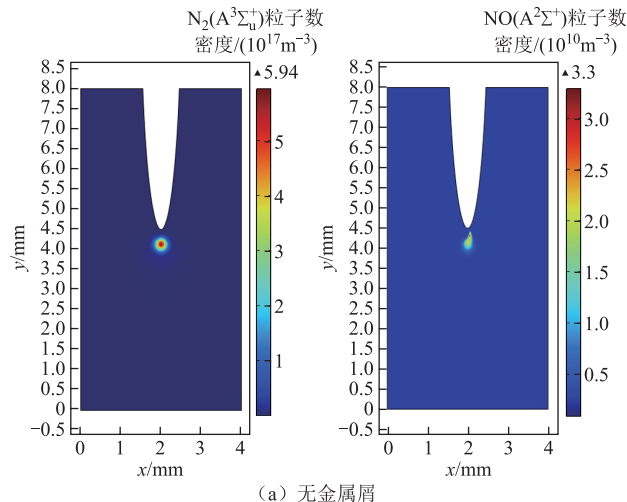


图 17 金属屑影响的高压放电区域内电场分布

Fig.17 Electric field distribution in the region of high-voltage discharge influenced by metal chips

由图 17 可知，随着金属屑的增加，放电区域内电场强度逐渐增强，但金属屑引起的电场畸变较弱，示意图如图 19 所示。

由图 18 可知，随着金属屑的增加，放电区域内 $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+)$ 与 $\text{NO}(\text{A}^2\Sigma^+)$ 的粒子数密度最大值逐渐增



(a) 无金属屑

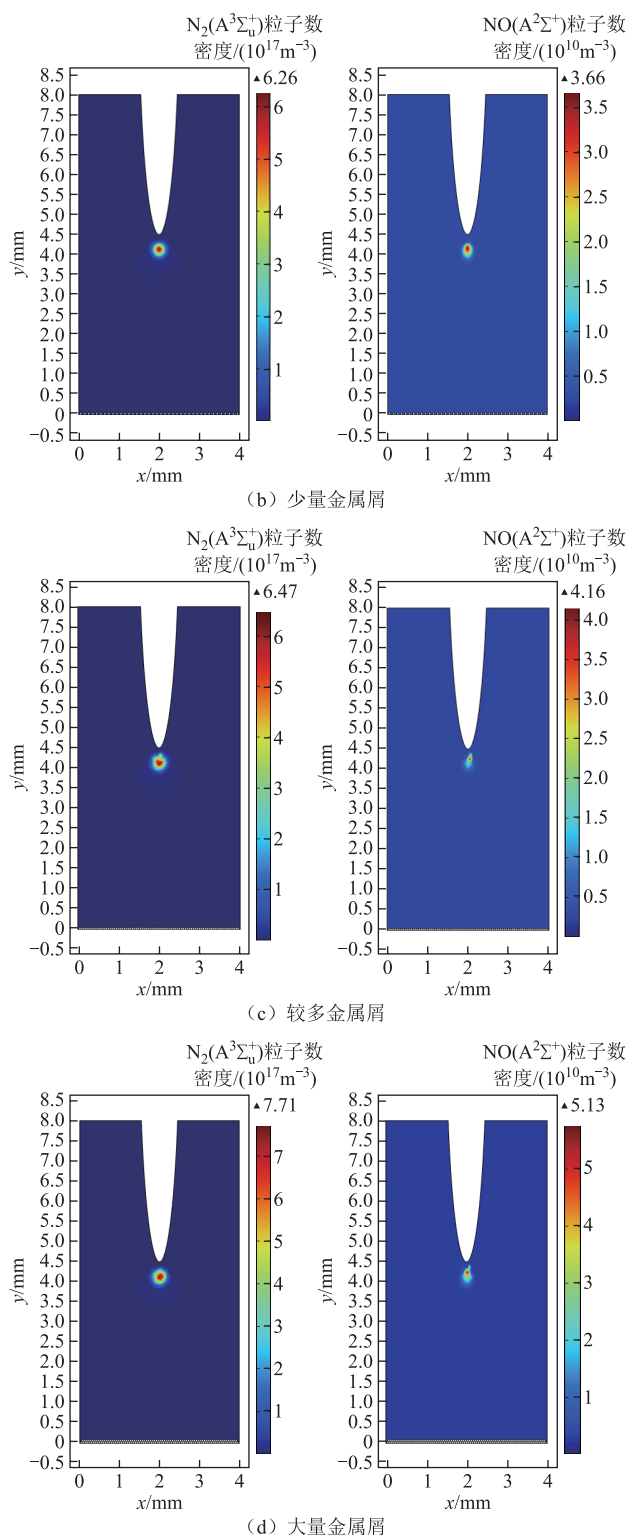


图 18 金属屑影响的高压放电粒子数密度空间分布

Fig.18 Spatial distribution of particle number density in high-voltage discharges influenced by metal chips

加。其原因与大金属颗粒相似，金属屑引起了周围电场的局部增强，促进了粒子的激发与电离，进而产生了更多的  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  与  $NO(A^2\Sigma^+)$ ，其退激产生的日盲紫外波段光辐射强度增强。但金属屑引起的电

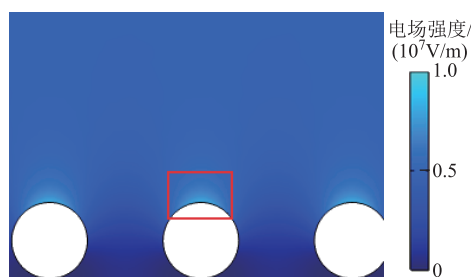


图 19 金属屑引起电场畸变示意图

Fig.19 Metal chips cause electric field distortion

场畸变较弱，因此光辐射强度增强并不明显，与试验测得日盲紫外波段光谱的结果一致。

### 4 结论

本文通过试验分析了金属异物对高压放电全波段光辐射的影响特性，结合仿真进一步分析了其对日盲紫外波段光辐射的影响机理，得出如下结论：

1) 放电产生日盲紫外波段光辐射的粒子跃迁主要为  $N_2(A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+)$  和  $NO-\gamma(A^2\Sigma^+(v') \rightarrow X^2\Pi(v''))$ 。金属异物通过增加放电区域内电场的强度与不均匀度，促进粒子的激发与电离，从而产生了更多的  $NO(A^2\Sigma^+)$  与  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  粒子，进而促进了日盲紫外波段光辐射的增强。

2) 金属异物的增加会促进放电产生全波段光辐射的增强，但这种促进具有波段的选择性，其中紫外和可见光波段的反应更为灵敏。因此，用紫外、可见光检测技术对金属异物放电现象进行检测会更为有效。

3) 金属异物的增加会引起日盲紫外波段光谱曲线幅值增大，即放电区域内化学反应的速率增加；但光谱形状基本不变，即不影响放电区域内化学反应的种类与相互间的比例关系。

4) 在本文试验环境下，放电产生的紫外、可见光、红外波段光辐射强度比值近似为一稳定值，约为 1.1:1:0.25。

本文的研究方法与结果适用于金属异物影响的空气中的放电现象。在该工作的基础上，未来将进一步研究金属异物在  $SF_6$  及其替代气体中对放电的影响情况。

### 参考文献

[1] 马飞越, 倪辉, 牛勃, 等. 252 kV GIS 隔离开关异物缺陷检测及仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 42-48.  
Ma Feiyue, Ni Hui, Niu Bo, et al. Detection and

- simulation analysis of foreign body defects in 252 kV GIS disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 42-48.
- [2] 可翀, 刘星伟, 李威, 等. 500 kV GIS 断路器灭弧室放电分析与处理[J]. 高压电器, 2023, 59(8): 173-179.  
Ke Chong, Liu Xingwei, Li Wei, et al. Analysis and treatment of discharge in interrupter of 500 kV GIS circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 173-179.
- [3] 刘佳鑫, 毕海涛, 郎业兴, 等. GIS 自由颗粒放电缺陷的联合检测与分析[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 175-180.  
Liu Jiaxin, Bi Haitao, Lang Yexing, et al. Joint detection and analysis for free particle discharge defect in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 175-180.
- [4] 林岑, 邱炜, 周波, 等. 一起 110 kV GIS 设备自由金属颗粒放电缺陷及解体分析案例[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 214-220.  
Lin Cen, Qiu Wei, Zhou Bo, et al. Discharge defect of free metal particle of 110 kV GIS equipment and its disassembly analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 214-220.
- [5] 高锵源. 110kV 盆式绝缘子金属缺陷局部放电研究与优化[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2016.  
Gao Qiangyuan. The research and optimization of metal defect partial discharge in 110kV basin-type insulator[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2016.
- [6] 张建勋, 卞宏志, 黄明祥, 等. 500kV GIS 盆式绝缘子沿面微小颗粒放电研究[J]. 科技通报, 2022, 38(3): 31-36.  
Zhang Jianxun, Bian Hongzhi, Huang Mingxiang, et al. Study on surface micro particle discharge of the 500kV GIS basin-type insulator[J]. Bulletin of Science and Technology, 2022, 38(3): 31-36.
- [7] 沙伟燕, 罗艳, 马鹏欢, 等. 不同金属微粒缺陷下 GIS 盆式绝缘子表面放电与电场特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(9): 89-93.  
Sha Weiyang, Luo Yan, Ma Penghuan, et al. Study on surface discharge and electric field characteristics of GIS basin insulator with different metal particle defects[J]. Insulating Materials, 2023, 56(9): 89-93.
- [8] 苏楠. 特高压 GIS 盆式绝缘子内部缺陷及沿面放电特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.  
Su Nan. Study on internal defects and surface discharge characteristics of basin insulator in UHV GIS[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [9] 李特, 王少华, 叶金标, 等. 含人工缺陷复合绝缘子红外特征试验研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(4): 94-100.  
Li Te, Wang Shaohua, Ye Jinbiao, et al. Study on infrared spectra characteristics of composite insulator with artificial defects[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(4): 94-100.
- [10] 郑书生, 孔举, 戴敏婷, 等. X 射线激励 XLPE 电缆终端金属颗粒局部放电的研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 913-927.  
Zheng Shusheng, Kong Ju, Dai Minting, et al. Study on partial discharge of metal particles in XLPE cable terminal excited by X-ray[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 913-927.
- [11] 姚雨杭, 陶霏韬, 于梦悦, 等. 含自由金属微粒流动变压器油的直流击穿特性[J]. 电工技术学报, 2023, 38(增刊 1): 157-167.  
Yao Yuhang, Tao Xiantao, Yu Mengyue, et al. DC breakdown characteristics of flowing transformer oil contaminated by metallic particles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(S1): 157-167.
- [12] 王媛, 杨睿成, 苏宝亮, 等. 直流 GIS/GIL 内微纳粉尘弥散浓度分布特性及对气隙击穿强度的影响[J]. 电工技术学报, 2025, 40(5): 1601-1613.  
Wang Yuan, Yang Ruicheng, Su Baoliang, et al. Characterization of diffuse concentration distribution of micron-nano dust in DC GIS/GIL and the effect on air gap breakdown strength[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1601-1613.
- [13] 李杰, 李晓昂, 吕玉芳, 等. 正弦振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动特性[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4580-4589, 4597.  
Li Jie, Li Xiaoang, Lü Yufang, et al. Motion characteristics of free metal particles in GIS under sinusoidal vibration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4580-4589, 4597.
- [14] 李星, 刘卫东, 许渊, 等. 冲击振动下 GIS 内金属

- 颗粒运动及其诱发沿面闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2838-2848.
- Li Xing, Liu Weidong, Xu Yuan, et al. Movement behavior of metal particles and its induced insulator flashover characteristics under impact vibration in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2838-2848.
- [15] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 交流 GIS 绝缘子表面亚毫米级金属颗粒的运动和局部放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4315-4324, 4334.
- Xu Yuan, Liu Weidong, Chen Weijiang, et al. Motion characteristics and partial discharge characteristics of submillimeter metal particles on the surface of AC GIS spacer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4315-4324, 4334.
- [16] 马宏忠, 王立宪, 戴锋. GIL 中金属颗粒污染物运动行为与放电特性研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(3): 49-58.
- Ma Hongzhong, Wang Lixian, Dai Feng. Motion behavior and discharge characteristics of metal particles in GIL[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(3): 49-58.
- [17] 张宁, 王鹏, 刘智捷, 等. 流-电耦合场中金属颗粒群的荷电计算及影响因素研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5534-5544.
- Zhang Ning, Wang Peng, Liu Zhijie, et al. Study on the charge calculation and influencing factors of metal particle groups in fluid-electric coupling field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5534-5544.
- [18] 郑莹莹, 吕俊涛, 周大洲, 等. GIS 设备金属颗粒放电的带电检测方法[J]. 山东电力技术, 2018, 45(11): 15-18.
- Zheng Yingying, Lü Juntao, Zhou Dazhou, et al. Live detection method for metal particle discharge in GIS equipment[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(11): 15-18.
- [19] 李泳霖, 黄世龙, 刘云鹏, 等. 考虑湿度气压影响的瓷绝缘子沿面类辉光放电仿真及其紫外光谱特性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1956-1969.
- Li Yonglin, Huang Shilong, Liu Yunpeng, et al. Simulation and ultraviolet spectral characteristics of glow-like discharge along the surface of porcelain insulators considering the influences of the humidity and atmospheric pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1956-1969.
- [20] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [21] Rahman A, Yalin A P, Surla V, et al. Absolute UV and VUV emission in the 110-400 nm region from 13.56 MHz driven hollow slot microplasmas operating in open air[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2004, 13(3): 537-547.
- [22] Piper L G, Cowles L M, Rawlins W T. State-to-state excitation of  $\text{NO}(A^2\Sigma^+, v'=0, 1, 2)$  by  $\text{N}_2(A^3\Sigma^+, v'=0, 1, 2)$ [J]. The Journal of Chemical Physics, 1986, 85(6): 3369-3378.
- [23] Grum F, Costa L F. Spectral emission of corona discharges[J]. Applied Optics, 1976, 15(1): 76-79.
- [24] Setser D W, Stedman D H, Coxon J A. Chemical applications of metastable argon atoms. IV. excitation and relaxation of triplet states of  $\text{N}_2$ [J]. The Journal of Chemical Physics, 1970, 53(3): 1004-1020.
- [25] 付洋洋, 罗海云, 邹晓兵, 等. 棒-板电极下缩比气隙辉光放电相似性的仿真研究[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 288-295.
- Fu Yangyang, Luo Haiyun, Zou Xiaobing, et al. Simulation on similarity law of glow discharge in scale-down gaps of rod-plane electrode configuration [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(9): 288-295.
- [26] Reuter S, von Woedtke T, Weltmann K D. The kINPen: a review on physics and chemistry of the atmospheric pressure plasma jet and its applications [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(23): 233001.
- [27] Kozlov K V, Brandenburg R, Wagner H E, et al. Investigation of the filamentary and diffuse mode of barrier discharges in  $\text{N}_2/\text{O}_2$  mixtures at atmospheric pressure by cross-correlation spectroscopy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(4): 518-529.
- [28] Wang Lanbo, Chen She, Wang Feng. Kinetic modelling of atmospheric pressure corona discharges in humid air[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2019, 39(5): 1291-1315.
- [29] Gherardi N, Gouda G, Gat E, et al. Transition from glow silent discharge to micro-discharges in nitrogen gas[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2000, 9(3): 340-346.

- [30] Kossyi I A, Yu Kostinsky A, Matveyev A A, et al. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 1992, 1(3): 207-220.
- [31] He Wei, Liu Xinghua, Yang Fan, et al. Numerical simulation of direct current glow discharge in air with experimental validation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(2R): 026001.
- [32] Zhu Yifei, Starikovskaia S. Fast gas heating of nanosecond pulsed surface dielectric barrier discharge: spatial distribution and fractional contribution from kinetics[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2018, 27(12): 124007.
- [33] Sakiyama Y, Graves D B, Chang H W, et al. Plasma chemistry model of surface microdischarge in humid air and dynamics of reactive neutral species[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2012, 45(42): 425201.
- [34] 廖瑞金, 刘康淋, 伍飞飞, 等. 棒-板电极直流负电晕放电过程中重粒子特性的仿真研究[J]. *高电压技术*, 2014, 40(4): 965-971.
- Liao Ruijin, Liu Kanglin, Wu Feifei, et al. Simulative study on characteristic of heavy particles in negative bar-plate DC corona discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(4): 965-971.
- [35] Itikawa Database[DB/OL]. (2016-09-16)[2024-05-28]. [www.lxcat.net/Itikawa](http://www.lxcat.net/Itikawa).
- [36] IST-Lisbon Database[DB/OL]. (2018-06-29)[2024-05-28]. [www.lxcat.net/IST-Lisbon](http://www.lxcat.net/IST-Lisbon).
- [37] Ren Ming, Dong Ming, Liu Jialin. Statistical analysis of partial discharges in SF<sub>6</sub> gas via optical detection in various spectral ranges[J]. *Energies*, 2016, 9(3): 152.
- [38] 谢梁, 花广如, 崔云骧, 等. 湿度对棒-板间隙电晕特性的影响规律[J]. *南方电网技术*, 2021, 15(7): 90-95.
- Xie Liang, Hua Guangru, Cui Yunxiang, et al. Influence of humidity on the corona characteristics of the bar-plate gap[J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(7): 90-95.

---

#### 作者简介

吴佩遥 女, 2000年生, 硕士研究生, 研究方向为设备外绝缘放电机理和紫外成像检测技术及应用。

E-mail: 1105880134@qq.com

裴少通 男, 1990年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电气设备的智能故障检测与诊断技术。

E-mail: peishaotong@ncepu.com (通信作者)

## High-Voltage Discharge Particle Simulation and Discharge Spectral Characterization under the Influence of Metallic Foreign Object

Wu Peiyao<sup>1</sup> Pei Shaotong<sup>1</sup> Liu Yong<sup>2</sup> Liu Yunpeng<sup>1</sup> Han Xu<sup>1</sup>

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense

North China Electric Power University Baoding 071003 China

2. State Grid Hengshui Electric Power Supply Company Hengshui 053000 China)

**Abstract** Metallic foreign objects in various types of power equipment may cause discharge problems. To achieve accurate multi-spectral monitoring of the discharge phenomenon caused by metallic foreign object, it is necessary to deeply understand its influence on the mechanism of optical radiation during discharge. Currently, research on the impact of metallic foreign objects on high-voltage discharge is mostly focused on the macro level, without delving into the micro-particle level to analyze its effect on the discharge mechanism, and the influence of metallic foreign object on optical radiation during discharge has not been thoroughly explored. To address these issues, this paper analyzes the characteristics of metallic foreign object's impact on the full-band optical radiation of discharge and its influence mechanism on the day-blind ultraviolet band through experiments and simulations.

A high-voltage discharge experimental platform was first constructed. Discharge images were captured using ultraviolet and high-speed cameras, and the emission spectra were measured with a spectrometer to investigate the influence of metallic foreign object on full-band optical radiation during discharge. The effect of metallic foreign objects on the generation of day-blind ultraviolet radiation was further studied. It was verified that the particle

transitions responsible for producing day-blind ultraviolet radiation are mainly  $N_2(A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+)$  and  $NO-\gamma(A^2\Sigma^+(v') \rightarrow X^2\Pi(v''))$ . Based on this, a two-dimensional plasma simulation model was constructed to investigate the effect of different quantities of large metallic particles and varying masses of metal shavings on the discharge process. The model was used to calculate the number densities of  $NO(A^2\Sigma^+)$  and  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  particles under different conditions, and the simulation results were validated by comparing them with the measured spectra. The experimental and simulation results were then comprehensively analyzed to explore the influence of metallic foreign object on day-blind ultraviolet radiation during discharge.

High-speed camera reveals that metallic foreign object increases the chance of arc formation between the tip of the needle electrode and the metallic foreign object. From the spectrum of the 200-1000 nm band measured in the experiment, it is evident that the increase in metallic foreign object enhances the optical radiation across the entire spectrum generated by the discharge. However, this enhancement is selective to certain bands, with the ultraviolet and visible light bands responding more sensitively. Therefore, ultraviolet and visible light detection is more effective for monitoring discharges caused by metallic foreign objects.

Analysis of UV images, 240~280 nm spectra, and simulations shows that an increase in the metal foreign object causes an increase in the amplitude of the spectral curve of the sun-blind UV band, an increase in the number densities of  $NO(A^2\Sigma^+)$  and  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  particles, and an increase in the rate of the chemical reactions in the discharge region; however, the spectral shape remains basically unchanged, which means that it does not affect the types of chemical reactions and the relative ratios among them. By combining the electric field simulation results, the reason can be analyzed as follows: the metal foreign object increases the strength and inhomogeneity of the electric field, promoting the excitation and ionization of particles. This leads to the production of more  $NO(A^2\Sigma^+)$  and  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  particles, thus promoting the enhancement of the sun-blind ultraviolet radiation.

The results of this paper apply to discharge phenomena in air influenced by metallic foreign objects, and the influence of metal particles on discharge in  $SF_6$  and its alternative gases will be further investigated in the future.

**Keywords:** Metal foreign object, emission spectrum, particle simulation, plasma, sun-blind ultraviolet band optical radiation

(编辑 李 冰)