

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.03.005

强风沙环境汤生电离系数计算

史志鹏¹, 张庆平², 康永强¹, 李帅兵¹, 李宏伟¹, 曹炳磊¹

(1. 兰州交通大学新能源与动力工程学院, 兰州 730070; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750000)

摘要: 由于西北地区恶劣的气候环境, 常年爆发强风沙天气, 使高速列车车顶外绝缘常年暴露在强风沙环境中, 引发绝缘放电导致事故频发。处于风沙环境下的气体放电特性与静态气体放电特性有较大差异, 风沙环境下气流与沙尘对放电电离过程产生重要影响。文中以板—板电极所形成的均匀场为分析对象, 考虑强风沙环境下气流速度、沙粒畸变电场和沙粒电荷捕获对放电过程所造成的影响, 应用强化偶极子模型, 推导了风沙条件下汤生电离系数的解析表达式。研究结果对于定量分析强风沙环境下气体放电特性具有理论参考价值。

关键词: 强风沙环境; 汤生理论; 汤生电离系数; 气体放电

Calculation of Townsend Ionization Coefficient in Strong Wind-sand Environment

SHI Zhipeng¹, ZHANG Qingping², KANG Yongqiang¹, LI Shuaibing¹,

LI Hongwei¹, CAO Binglei¹

(1. School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750000, China)

Abstract: The external insulation on the roof of high-speed train is exposed to strong wind-sand environment due to the harsh climate environment and strong wind sand weather all year round in the Northwest region of China, which leads to frequent accident because of insulation discharge. The characteristics of gas discharge in wind-sand environment are quite different from those of static gas discharge, and the airflow and sand have a serious influence on the discharge ionization process in wind-sand environment. In this paper, the uniform field formed by plate-plate electrode is taken as the analysis object, the analytical expression of Townsend ionization coefficient under wind-sand condition is derived by considering the influence of airflow speed, sand distorting the electric field and sand capture of the electrons on the discharge process in strong wind-sand environment and also by using the dipole-enhanced model. The research results have theoretical reference value for quantitative analysis of gas discharge characteristics in strong wind-sand environment.

Key words: strong wind-sand environment; Townsend's theory; Townsend ionization coefficient; gas discharge

0 引言

高速铁路是国民经济主战场, 承担着国家交通运输的重大任务, 其安全稳定运行是国民经济持续增长的有力保障。近年来, 随着我国铁路建设的高

速发展, 铁路风沙问题日益严峻^[1]。兰新铁路由于地处西北, 途径众多风区和戈壁沙漠, 常年出现强沙尘天气^[1-2], 这使得车顶外绝缘完全暴露在强风沙环境中, 高速气流/沙尘导致绝缘子伞裙撕裂, 使其电气绝缘性能下降引发绝缘闪络, 导致列车停电/停

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52067014, 52167018); 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03493); 甘肃省教育厅青年博士基金项目(2021QB-060); 甘肃省自然科学基金(20JR10RA226); 兰州交通大学青年科学研究基金项目(2020013, 2019029)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52067014, 52167018), Ningxia Natural Science Foundation(2021AAC03493), Young Doctor Fund Project of Gansu Provincial Department of Education(2021QB-060), Natural Science Foundation of Gansu Province(20JR10RA226), Science Foundation for Young Scholars of Lanzhou Jiaotong University(2020013, 2019029).

运等故障,给列车安全运行带来严重威胁^[3]。因此,研究风沙对气体放电电离过程的影响具有重要意义。

目前,国内外学者针对风沙环境下间隙放电、绝缘闪络特性和气固两相体放电特性,以及对各种不同条件下空气/ SF_6 等气体的电离特性进行了大量研究。在风沙环境间隙击穿和绝缘闪络方面,大量研究表明:气流/风沙对间隙击穿/绝缘闪络的影响与风速、电极结构、沙尘参量等有关^[4-7]。文[4]通过研究板—板间隙交直流击穿特性发现:击穿电压与风速、间隙距离和沙尘浓度等有关,击穿电压随风速增大而增大,随间隙距离增大而升高,随沙尘浓度增大而降低;文[5]开展了针—板间隙交流击穿试验发现:有风有沙和有风无沙条件下击穿电压均随着风速的增加呈先上升后下降的趋势,随沙粒质量浓度的增加呈下降趋势;文[6]研究了沙尘环境下棒—板间隙雷电冲击试验发现:沙尘会使间隙的雷电冲击击穿电压降低,且沙粒粒径越小,电压降低的幅度越大;文[7]研究发现:绝缘子闪络电压随风速增大而逐渐上升,有风有沙时其闪络电压比有风无沙时略低;文[8]通过试验发现,在纯气流和风沙环境下,绝缘子闪络电压随风速变化趋势较为一致。也就是说,沙尘的引入在一定程度上加剧了气体电离,造成击穿电压下降,但其并未改变击穿电压的变化趋势。

在对不同条件下空气/ SF_6 等各种混合气体的电离特性研究和电离系数的计算方面,文[9]在前人工作的基础上通过分析不同电离系数和附着系数对导线起晕场强的影响,基于气体放电理论,分别计算了干燥和潮湿空气下的电离系数;文[10]研究了在一定压强和温度下热态 SF_6/N_2 混合气体的电击穿特性,通过求解玻尔兹曼方程,得到了热态 SF_6/N_2 混合气体的折合电离系数和折合吸附系数,研究结果表明电子和中性粒子之间的碰撞电离随着折合场强的增大而加强;文[11]提出一种全新的用于测定大气压下汤生电离系数的光学测量法,推导出了大气压下的汤生电离系数;文[12]针对气体放电过程中的粒子微观特性出发,根据不同压强、混合比下的 SF_6/CF_4 的电子能量分布求解了放电过程中的电离系数和吸附系数,以此为基础对均匀场中的流注放电进行了数值模拟;文[13]应用稳态汤逊(SST)法实验平台,对不同摩尔分数比的 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}-\text{N}_2$ 混合气体的电离特性和绝缘强度进行了评估,为替代 SF_6 绝缘气体提供了一种新的可能;文[14]通过有限元仿真软件搭建二维针—板电极等离子体模型,研究了单极性方波脉冲电压下低温低气压气体放电特性。

在气固/气液两相体研究方面,相关学者针对气固/气液环境下介质放电进行了大量研究,已获得诸多成果^[15-22]。重庆大学蒋兴良课题组通过对雾霾/降雨环境下交/直流放电特性研究发现:棒—板间隙放电电压与降雨强度、雾水质量浓度、环境温度和颗粒物粒径等有关^[15-17]。相关学者研究降雨/水雾对棒—板间隙冲击电压放电特性的影响发现:水中颗粒物会造成放电间隙局部电场畸变,颗粒物直径越大,电场畸变越严重^[18-19]。华北电力大学王胜辉等通过淋雨对操作冲击放电的影响发现:雨量的大小对棒—板间隙的冲击电压影响具有很大差异^[20]。以上研究表明颗粒物的存在会显著影响放电的电离过程,进而影响放电电压。华中科技大学叶齐政等通过分析气固两相体的放电特性,考虑影响电子崩发展的两个主要因素:固体颗粒畸变电场和颗粒荷电捕获,建立了基于汤生理论的气固两相体放电模型,实现了静态气固两相体击穿电压的定量计算^[21-22],所建放电模型对于进一步定量分析强风沙环境下气体放电问题提供了很好的基础,但是未考虑气流因素对放电电离过程的影响,缺乏流动气体放电问题的分析研究。

以上所述研究成果以试验和仿真为主针对风沙环境下间隙击穿、绝缘闪络和气固/气液两相体放电,以及空气/ SF_6 等各种混合气体的电离特性已获得一些基本规律,对于定性分析强风沙介质放电特性及机理提供了很好的基础,但是风沙环境下气流/沙尘综合参量与电离系数之间关联不清,放电过程难以定量描述。因此,文中通过分析强风沙环境下气流速度、沙粒畸变电场和沙粒荷电捕获对放电电离过程所造成的影响,推导出了汤生电离系数与气流/沙尘综合参量之间的解析表达式,可为进一步建立强风沙环境气体放电模型提供理论参考。

1 电离系数计算

汤生理论作为经典的气体放电理论,是解决各种气体放电问题的基础依据,但是该理论未考虑气流和沙粒对放电的影响,难以用于强风沙环境气体放电问题的定量计算。建立气流/沙粒与电离系数之间的关联关系是建立强风沙环境介质放电模型的关键。

首先需根据强风沙环境介质放电特性与机理提出介质放电模型构建的基本先决条件与参数定义以合理描述气流/沙尘对放电的影响。气流/沙尘对气体放电影响的一些假设条件将被定义如下^[21,23]:

1) 放电路径沿气流方向偏转一个角度, 也就是说, 参与放电的电子在气流方向发生偏转。

2) 部分电子被气流吹离, 其中包括完全被吹离的电子和偏离主放电路径的电子。

3) 气体是可压缩流体, 即气体密度随气流速度增加而下降。

4) 沙粒会畸变原有电场, 畸变后的等效电场为 E_{0c} 。

5) 放电过程中沙粒会捕获部分电子或离子进行荷电。

基于以上 5 个假设条件, 带有水平气流速度、短间隙、均匀电场的沙尘环境下介质击穿可被描述的物理过程见图 1。

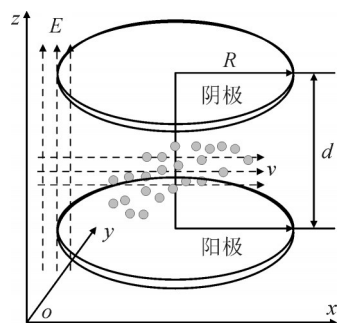


图 1 强风沙环境下均匀场中间隙击穿

Fig. 1 Gap breakdown in uniform field under strong wind sand environment

基于以上假设, 在考虑强风沙环境综合作用参量对放电电离过程影响的基础上, 依据气体放电理论、流体理论等, 结合强风沙环境介质击穿特性、影响因素及其影响机理, 获得电离系数在气流/沙尘综合作用下的解析表达式, 通过以上所述气流/沙尘对放电过程影响的分析, 将根据以上 5 个假设条件逐步求解汤生电离系数。

由于沙粒与周围空气的介电常数差异, 沙粒在电场中易产生介质极化而使沙粒周围局部电场产生畸变。针对沙粒浓度较大且无法忽略沙粒间的相互影响时, 采用强化偶极子模型来计算混合体局部电场^[24]。假设沙粒均匀分布于放电空间, 选择沙粒中任意中间颗粒, 将其看做是由均匀介质组成的球体, 视其处于一等效电场中, 并且认为此等效电场仍为均匀电场, 此时沙粒受到的等效电场 E_{0c} 为外电场和其余沙粒产生的电场之和, 而不是外电场 E_0 。沙粒分布图与等效电场示意图见图 2。

等效电场 E_{0c} 包含其他颗粒对中心颗粒所施加的影响, 计算式为^[24]

$$E_{0c} = \frac{E_0}{1 - \left[(\varepsilon_i - \varepsilon_e) / (\varepsilon_i + 2\varepsilon_e) \right] (2R/h)^3} \quad (1)$$

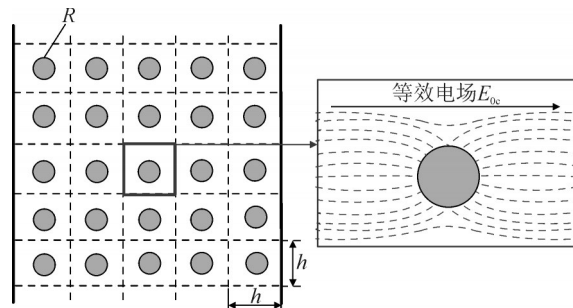


图 2 强风沙环境下的沙粒分布图与等效电场示意图

Fig. 2 Diagram of sand distribution and equivalent electric field under strong wind sand environment

式(1)中: ε_i 为沙粒介电常数; ε_e 环境介电常数; R 为沙粒半径; h 为沙粒之间的间距。

此时, 沙粒表面的最大电场为

$$E_{\max} = \frac{3\varepsilon_i}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} E_{0c} \quad (2)$$

另外, 还需要考虑由于沙尘颗粒荷电捕获所造成的影响。因此, 需要计算沙粒荷电之后的局部电场, 首先需要计算沙粒所吸附的饱和电荷量(即最大电荷量), 这与沙粒荷电过程相关, 如表达式(2)所示, 当沙粒捕获的电荷产生的电场与由等效电场引起的沙粒表面最大电场强度相等时, 沙粒所捕获的电荷量达到饱和, 沙粒荷电过程结束式为

$$\frac{3\varepsilon_i}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} E_{0c} = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon_e R^2} \quad (3)$$

式(3)中, q_0 是沙粒所吸附的饱和电荷量。

如果用 f 来描述荷电系数, 即沙粒所捕获的电荷量为 $q = fq_0$ 。假设沙粒全部饱和和荷电, 求解式(2)可得

$$q_0 = \frac{12\pi\varepsilon_i\varepsilon_e R^2 E_0}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e - (2R/h)^3 (\varepsilon_i - \varepsilon_e)} \quad (4)$$

沙粒荷电之后沙粒表面的最大电场为

$$E'_{\max} = (1 + f) \frac{3\varepsilon_i}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_e} E_{0c} \quad (5)$$

基于先前的研究^[23], 强风沙环境中气流和沙尘的综合作用下, 考虑局部电场畸变、放电路径偏转、部分电子吹离和气体密度变化的汤生电离系数可被计算为

$$\alpha = A(v, E_{0c}) \exp\left(-\mu\rho \frac{v}{E_{0c}}\right) \exp\left[-\frac{B(v, E_{0c})}{E_{0c}}\right] \quad (6)$$

式(6)中: μ 是吹离因子; ρ 是气体密度。

$$A(v, E_{0c}) = \frac{1}{\bar{\lambda}_e \cos\left\{\arctan\left(\frac{v}{K_e E_{0c}}\right)\right\}} \quad (7)$$

$$B(v, E_{0c}) = A(v, E_{0c}) V_i \quad (8)$$

$$\bar{\lambda}_e = \frac{4M}{\pi d_m^2 N_A \rho_0 \left\{ 1 + \frac{\gamma_a - 1}{2} \left(\frac{v}{s} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{\gamma_a - 1}}} \quad (9)$$

式(7)–(9)中: K_e 是电子迁移率; $\bar{\lambda}_e$ 为电子平均自由程; V_i 为原子的电离势; γ_a 是气体比热比; p 是气体压力; 马赫数 $M_a = v/s$; s 是音速; d_m 是分子直径; n_m 是分子数密度; N_A 为阿伏伽德罗数; M 是相对分子质量; 参数 ρ_0 作为驻点值, 将其作为参考值。

在强风沙环境气体放电过程中, 除了考虑以上4个因素外, 荷电粒子沿电场方向上迁移过程中被沙尘颗粒所捕获, 部分电子和离子会被沙粒吸引到沙粒周围进行荷电, 沙粒荷电所产生的电场又会进一步畸变原有电场, 影响电离和迁移过程。

等效场中的球形沙粒见图3。假设电极间距为 d , 平板电极间沙粒数目为 m , 每一单元的长度为 h , 沙粒半径为 R , 根据文[21]将每一单元分为如图3所示区域, 图3中, $ABCD$ 和 $EFGH$ 区域长度为 $R/2$ 。根据汤生放电理论, 在低 pd 值和沙粒浓度较低时, 忽略正离子对放电的影响。假设在电场作用下, 电子沿电场迁移过程中沙粒将部分电子吸引周围进行荷电, 荷电过程当中部分电子被沙粒所捕获, 其余电子继续绕过沙粒参与放电。

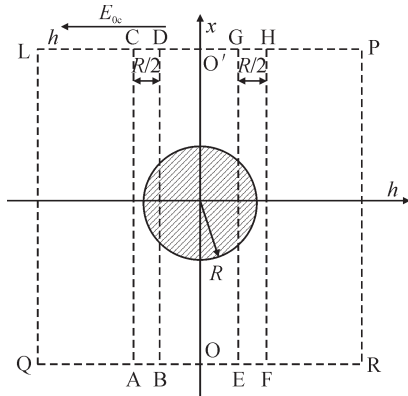


图3 等效场 E_{0c} 中的球形沙粒

Fig. 3 Diagram of spherical sand particles in equivalent field E_{0c}

当电子迁移到沙粒右边区域时, 沙粒尚未荷电, 区域 $ABCD$ 的电场强度为 E_{max} , 区域 $LCQA$ 的电场强度为 E_{0c} 。因此, 由汤生放电理论可知, $LCQA$ 区域的电离系数为

$$\alpha_0 = A(v, E_{0c}) \exp \left[-\frac{\mu \rho v + B(v, E_{0c})}{E_{0c}} \right] \quad (10)$$

$ABCD$ 区域的电离系数为

$$\alpha_1 = A(v, E_{0c}) \exp \left[-\frac{\mu \rho v + B(v, E_{0c})}{E_{max}} \right] = \alpha_0 \exp \left\{ \frac{2[\mu \rho v + B(v, E_{0c})](\varepsilon_i - \varepsilon_c)}{3\varepsilon_i E_{0c}} \right\} \quad (11)$$

设阴极的初始电子数为 n_0 , 则初始电子从 Q 迁移到 O 所产生的电子数为

$$n_L = n_0 \exp \left[\alpha_0 \left(\frac{h}{2} - \frac{R}{2} \right) + \alpha_1 \frac{R}{2} \right] = n_0 \exp \left\{ \frac{h}{2} \left[\alpha_0 \left(1 - \frac{R}{h} \right) + \alpha_1 \frac{R}{h} \right] \right\} \quad (12)$$

因此, 沙粒左边区域'的平均电离系数为

$$\alpha' = \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{h} \right) + \alpha_1 \frac{R}{h} = \alpha_0 \left\{ 1 - \frac{R}{h} + \frac{R}{h} \exp \left\{ \frac{2[\mu \rho v + B(v, E_{0c})](\varepsilon_i - \varepsilon_c)}{3\varepsilon_i E_{0c}} \right\} \right\} \quad (13)$$

当电子迁移到沙粒右边区域时, 沙粒已经捕获电子, 此时, 区域 $HPRF$ 的电场强度为 E_{0c} , 则其电离系数为 α_0 ; 区域 $EFGH$ 的电场强度近似为 E'_{max} , 其电离系数计算式为

$$\alpha_2 = A(v, E_{0c}) \exp \left[-\frac{\mu \rho v + B(v, E_{0c})}{E'_{max}} \right] = \alpha_0 \exp \left\{ \frac{2[\mu \rho v + B(v, E_{0c})](\varepsilon_i(3f+2) - 2\varepsilon_c)}{3\varepsilon_i(1+f)E_{0c}} \right\} \quad (14)$$

电子从 O 迁移到 R 所产生的电子数为

$$n_R = n_L \exp \left[\alpha_0 \left(\frac{h}{2} - \frac{R}{2} \right) + \alpha_2 \frac{R}{2} \right] = n_L \exp \left\{ \frac{h}{2} \left[\alpha_0 \left(1 - \frac{R}{h} \right) + \alpha_2 \frac{R}{h} \right] \right\} \quad (15)$$

因此, 沙粒左边区域的平均电离系数为

$$\alpha'' = \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{h} \right) + \alpha_1 \frac{R}{h} = \alpha_0 \left\{ 1 - \frac{R}{h} + \frac{R}{h} \exp \left\{ \frac{2[\mu \rho v + B(v, E_{0c})](\varepsilon_i(3f+2) - 2\varepsilon_c)}{3\varepsilon_i(1+f)E_{0c}} \right\} \right\} \quad (16)$$

由式(12)、(15)可得初始电子 n_0 从 Q 迁移到 R 所产生的总电子数为

$$n_R = n_L \exp \left[\alpha_0 \left(\frac{h}{2} - \frac{R}{2} \right) + \alpha_2 \frac{R}{2} \right] = n_0 \exp \left\{ h \left[\alpha_0 \left(1 - \frac{R}{h} \right) + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \frac{R}{h} \right] \right\} \quad (17)$$

因此, 可求得强风沙环境下每一放电单元的平均电离系数为

$$\bar{\alpha} = \alpha_0 \left(1 - \frac{R}{h} \right) + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \frac{R}{h} = \alpha_0 \left\{ 1 - \frac{R}{h} + \frac{R}{h} \exp \left\{ \frac{[\mu \rho v + B(v, E_{0c})][2\varepsilon_i(5f+4) - \varepsilon_c(6+2f)]}{6\varepsilon_i(1+f)E_{0c}} \right\} \right\} \quad (18)$$

至此,在考虑风沙条件下气流速度、沙尘浓度和粒径对放电电离过程的联合影响下,推导出了风沙条件下汤生电离系数的解析表达式。

2 结语

文中基于汤生理论,结合风沙环境下气体放电特性与机制,考虑强风沙环境下影响放电电离过程的几个主要因素:放电路径偏转、部分电子吹离、气体密度下降、沙粒畸变电场和沙粒荷电捕获,采用强化偶极子模型求解沙粒所形成的等效电场,确立了各个因素与电离过程的相互联系,推导了联合作用下的汤生电离系数表达式。从汤生电离系数的表达式可以得出:沙粒体积分数、沙粒半径、气流速度、荷电系数、电场强度等共同影响强风沙环境下气体放电过程。

参考文献:

- [1] 张克存,屈建军,鱼燕萍,等. 中国铁路风沙防治的研究进展[J]. 地球科学进展,2019,34(6):573-583.
ZHANG Kecun, QU Jianjun, YU Yanping, et al. Research progress on prevention and control of wind blown sand on railway in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6):573-583.
- [2] 肖艳荣,张国芹. 兰新线动车组耐候性技术研究[J]. 铁道机车车辆,2014,34(4):90-93.
XIAO Yanrong, ZHANG Guoqin. Study on weatherability technology of EMUs on Lanzhou Xinjiang railway[J]. Railway Locomotive & Car, 2014, 34(4):90-93.
- [3] 赵玉顺,向奕同,董冰冰,等. 强风沙尘环境下车顶复合绝缘子风压分布和形变特性研究[J]. 高压电器,2019,55(12):07-14.
ZHAO Yushun, XIANG Yitong, DONG Bingbing, et al. Study on the wind pressure distribution and deformation characteristics of roof composite insulators in strong wind and sand-dust environment[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12):07-14.
- [4] 贺博,张刚,陈邦发,等. 沙尘环境对板-板电极气隙放电特性影响的模拟试验研究[J]. 中国科学,2010,40(3):296-302.
HE Bo, ZHANG Gang, CHEN Bangfa, et al. Simulation experimental study on the influence of dust environment on the discharge characteristics of plate to plate electrode air gap[J]. Science in China, 2010, 40(3):296-302.
- [5] 张血琴,尹现彬,康永强,等. 高速沙尘环境对针-板电极击穿电压的影响[J]. 高电压技术,2018,44(12):3973-3979.
ZHANG Xueqin, YIN Xinbin, KANG Yongqiang, et al. Breakdown voltage of needle-plate air gaps in high-speed sand environment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12):3973-3979.
- [6] 王建,涂志飞,陈彬,等. 沙尘环境下棒-板间隙的雷电冲击击穿特性[J]. 高电压技术,2020,46(3):1012-1017.
WANG Jian, TU Zhifei, CHEN Bin, et al. Effect of sand and dust on lightning pulse breakdown characteristics in bar-plate air gap[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3):1012-1017.
- [7] 司马文霞,程浩,杨庆,等. 沙尘环境下绝缘子交流闪络特性及机理[J]. 高电压技术,2011,37(4):834-840.
SIMA Wenxia, CHEN Hao, YANG Qing, et al. Effect of sand dust environment on external insulation of electrical power system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1):16-20.
- [8] 刘学忠,高超,邓显波,等. 高速气流对绝缘子表面放电特征的影响[J]. 电工技术学报,2010,25(12):16-21.
LIU Xuezhong, GAO Chao, DENG Xianbo, et al. Influence of high-speed airflow on surface discharge characteristics of insulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12):16-21.
- [9] 段娜娜,王雪焕,徐伟杰,等. 不同电离系数和附着系数对导线起晕场强的影响综述[J]. 高压电器,2021,57(4):1-9.
DUAN Nana, WANG Xuehuan, XU Weijie, et al. Summary of the influence of different ionization coefficients and attachment coefficients on the corona inception field strength[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4):1-9.
- [10] 钟建英,王志刚,张博,等. 热态SF₆/N₂混合气体击穿特性研究[J]. 高压电器,2020,56(7):8-14.
ZHONG Jianying, WANG Zhigang, ZHANG Bo, et al. Research on breakdown properties of hot SF₆/N₂ mixed gas [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7):8-14.
- [11] 冉俊霞,罗海云,梁卓,等. 大气压介质阻挡放电中电子碰撞电离系数 α 的测定[J]. 高电压技术,2012,38(7):1677-1680.
RAN Junxia, LUO Haiyun, LIANG Zhuo, et al. Preliminary measurement of electron impact ionization coefficient in gases at atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7):1677-1680.
- [12] 李辉,李鑫涛,徐建源,等. 均匀电场下SF₆/CF₄流注放电数值模拟[J]. 高压电器,2016,52(12):122-127.
LI Hui, LI Xintao, XU Jianyuan, et al. Streamer discharge Simulation of SF₆/CF₄ in uniform electrical field[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12):122-127.
- [13] 龙云翔,郭立平,沈震宇,等. SF₆替代气体C₄F₇N-N₂电离特性的稳态汤逊法研究[J]. 高电压技术,2019,45(4):1064-1070.
LONG Yunxiang, GUO Liping, SHEN Zhenyu, et al.

- Investigation of ionization characteristics of $C_4F_7N-N_2$ gas mixtures as alternative gas to SF_6 by steady-state townsend method[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1064-1670.
- [14] ZHAO Z H, WEI X L, SONG S, et al. A two-dimensional air discharge modified model under unipolar square pulse voltage at low temperature and sub-atmospheric pressure[J]. IEEE Access, 2021, 09(4): 51896-51907
- [15] 蒋兴良, 周龙武, 袁 耀, 等. 降雨对短空气间隙直流放电的影响分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2350-2355.
JIANG Xingliang, ZHOU Longwu, YUAN Yao, et al. Analysis on DC discharge performance of short air gap under rain conditions[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2350-2355.
- [16] 董冰冰, 蒋兴良, 黄 俊, 等. 雾对棒-板空气间隙交流放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1339-1344.
DONG Bingbing, JIANG Xingliang, HUANG Jun, et al. Influence of fog on AC discharge characteristics of rod-plane air gaps[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1339-1344.
- [17] 蒋兴良, 刘 伟, 奚思建, 等. 降雨对“棒-板”短空气间隙正极性直流放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 261-267.
JIANG Xingliang, LIU Wei, XI Sijian, et al. Influence of rain on positive DC discharge characteristic of rod-plane short air gap[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 261-267.
- [18] 陈宝辉, 邓 婕, 吴传平, 等. 110~1 900 μm 水雾对棒-板长间隙雷电冲击放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2964-2970.
CHEN Baohui, DENG Jie, WU Chuanping, et al. Influence of water spray with a diameter of 110~1 900 μm on lightning impulse discharge characteristics of long rod-plate gap[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2964-2970.
- [19] 胡建林, 石 壁, 杨晓辉, 等. 强降雨条件下空气间隙长波前操作冲击放电特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3888-3895.
HU Jianlin, SHI Bi, YANG Xiaohui, et al. Discharge characteristics of air gap subject to long wavefront switching impulse voltage under heavy rain condition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3888-3895.
- [20] 王胜辉, 邓畅宇, 王新宇, 等. 淋雨对短空气间隙操作冲击放电影响的实验研究[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1092-1098.
WANG Shenghui, DENG Changyu, WANG Xinyu, et al. Experimental study on effects of rain on short air gaps discharge with switching impulse voltage[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1093-1098.
- [21] YE Q Z, LI J, XIE Z H. Analytical model of the breakdown mechanism in a two-phase mixture[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(24): 3373-3382.
- [22] YE Q Z, LI J, LU F. Abnormal breakdown characteristic in a two-phase mixture[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(10): 2198-2204.
- [23] KANG Y Q, WU G N, ZHANG X Q, et al. Modeling of flowing gas discharge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1049-1053.
- [24] YE Q Z, LI J, ZHANG J C. A dipole-enhanced approximation for a dielectric mixture[J]. Journal of Electrostatics, 2004(61): 99-106.
- 史志鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为气体放电与极端环境高压绝缘与防护(E-mail: shizhipeng19950910@163.com)。
- 康永强(1988—), 男, 博士, 研究方向为极端环境高压绝缘与防护(通信作者)(E-mail: kangyong137@163.com)。