

# 直流电场下盆式绝缘子体积电导率对其表面电荷积聚特性的影响

蔺占芳<sup>1</sup>, 王 柯<sup>2</sup>

(1. 国网山西省电力公司营销服务中心, 山西 太原 030032;

2. 乌海超高压供电局, 内蒙古 巴彦淖尔 016000)

**摘要:**综合考虑直流 GIL 内部的传热及电荷积聚过程, 研究建立了直流 GIL 电-热多物理场耦合模型。基于该模型, 仿真计算了直流电应力和热应力耦合作用下, 绝缘材料体积电导率对盆式绝缘子表面电荷积聚特性的影响规律。结果表明: 将现有交流盆式绝缘子典型绝缘材料的体积电导率减小两个数量级, 可以有效抑制绝缘子表面电荷积聚, 但若过度减小绝缘材料的体积电导率反而会加剧盆式绝缘子的表面电荷积聚。

**关键词:**盆式绝缘子; 直流 GIL; 表面电荷; 热应力; 体积电导率

中图分类号: TM216 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2021)03-0054-06

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.03.009

## Effect of Volume Conductivity of Basin Type Insulator on Its Surface Charge Accumulation Under DC Electric Filed

LIN Zhanfang<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>2</sup>

(1. State Grid Shanxi Marketing Service Center, Taiyuan 030032, China;

2. Wuhai UHV Power Supply Bureau, Bayan Nur 016000, China)

**Abstract:** Considering the heat transfer and charge accumulation process in DC GIL comprehensively, we established an electro-thermal multi-physics field coupling model of DC GIL. On the basis of this model, the effect of the volume conductivity of insulating materials on the surface charge accumulation of basin type insulator was simulated and calculated under the coupling action of DC electric stress and thermal stress. The results show that the surface charge accumulation of insulator can be inhibited effectively by decreasing the volume conductivity of typical insulating materials for current AC basin type insulator by two orders of magnitude. However, if the volume conductivity of insulating materials decreases excessively, the surface charge accumulation of basin insulator will be aggravated.

**Key words:** basin type insulator; DC GIL; surface charge; thermal stress; volume conductivity

## 0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated transmission line, GIL)具有可靠性高、环境协调性好、传输容量大等诸多优点, 是替代传统架空线路进行电能传输的首选方案<sup>[1-4]</sup>。但目前直流 GIL 的一些关键技术问题仍没有完全解决, 严重制约了其大规模发展<sup>[3-5]</sup>, 如在直流电场作用下, 绝缘子表面电

荷积聚严重, 畸变了沿面电场分布, 降低了绝缘子的沿面闪络电压, 导致直流 GIL 无法长期稳定运行。

近年来, 随着高压直流输电技术的不断发展, 对高压直流 GIL 设备的需求日益迫切, 直流 GIL 绝缘子的表面电荷积聚问题愈发引起科研人员的关注。为了抑制直流 GIL 绝缘子的表面电荷积聚, 提高直流 GIL 的绝缘性能, 各国研究人员在表面电荷积聚特性、绝缘子形状优化、绝缘性能试验等方面展开了广泛的研究, 并取得了一定的成果。现有理论研究表明<sup>[6-11]</sup>, 通过形状优化设计和绝缘材料改性, 平衡盆式绝缘子沿面的法向场强和切向场强可

收稿日期: 2020-04-02 修回日期: 2020-06-24

作者简介: 蔺占芳(1975-), 女(汉族), 山西大同人, 高级工程师, 主要从事电气工程领域研究。

以有效提高其绝缘性能。

在绝缘子形状方面,THASEGAWA等<sup>[9]</sup>、MAGM等<sup>[10]</sup>以及贾志杰等<sup>[12]</sup>分别通过电场仿真计算,提出了半圆锥型直流盆式绝缘子的形状设计方案。然而上述研究均是以现有交流盆式绝缘子材料为基础,一旦材料改变,现有结论是否成立仍需进一步研究。因此,在进行直流盆式绝缘子绝缘优化时,有必要在直流电场作用下对绝缘材料进行研究。

在绝缘子材料方面,FMESSERER等<sup>[13]</sup>采用边界元法仿真计算了直流电应力下盆式绝缘子表面电导率和体电导率对其沿面电场的影响。结果表明,当绝缘子表面电导率为 $10^{-20}$  S,体积电导率为 $10^{-10} \sim 10^{-20}$  S/m时,直流盆式绝缘子的表面电场分布变化不大。贾志杰等<sup>[12]</sup>采用有限元仿真软件COMSOL计算了环氧树脂盆式绝缘子体积电导率和表面电导率对其沿面电场分布的影响。结果表明,在直流电应力下,当绝缘子的表面电导率相较于其体积电导率足够大时,体积电导率的变化对绝缘子的沿面电场分布不会产生大的影响。此外,当采用体积电导率为 $10^{-14}$  S/m的环氧树脂时,如果绝缘子的表面电导率控制在 $10^{-13}$  S左右,其沿面电场分布可得到大幅改善。田浩等<sup>[14]</sup>研究了直流电压下环氧绝缘材料电气性能对电荷积聚的影响。结果表明,在直流电场下,适当增大环氧绝缘材料的体积电阻率和适当减小表面电阻率,并保证体积电阻率和表面电阻率一定的差值关系,有利于减少绝缘子表面电荷的积聚。上述研究成果对于直流盆式绝缘子材料的开发具有参考价值。

然而,目前存在的问题是,不管是仿真计算还是试验研究,均没有考虑直流盆式绝缘子中热应力的影响。实际上,直流输电系统中运行电流很大,输电设备会出现明显的发热现象。现场直流GIL盆式绝缘子将受到热应力的作用,并存在热场梯度。由于绝缘子材料的电导特性与温度密切相关,盆式绝缘子中各个区域电学参数不尽相同。因此在恒定、均匀室温下开展材料电学性能对绝缘子电荷积聚及电场分布影响的研究难以真正指导实际工程应用中直流盆式绝缘子环氧树脂绝缘材料的开发。

为了解决上述问题,本研究综合考虑直流GIL内部的传热及电荷积聚过程,研究建立直流GIL电-热多物理场耦合仿真模型。基于该模型,仿真计算直流电应力和热应力耦合作用下,绝缘材料体积电

导率对盆式绝缘子表面电荷积聚特性及沿面电场分布的影响规律,以期为直流GIL盆式绝缘子绝缘材料的开发、设计提供参考。

## 1 仿真模型

### 1.1 数学模型

现有研究结果表明,直流电场下,盆式绝缘子表面电荷积聚存在3种方式:①绝缘子体电流积聚;②绝缘气体体电流积聚;③绝缘子沿面电流积聚<sup>[13-17]</sup>。这3种电荷积聚方式可由式(1)表示。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = J_{\text{in}} - J_{\text{Gn}} - \nabla(\gamma_s E_t) \quad (1)$$

式(1)中: $J_{\text{in}}$ 为绝缘子侧法向电流密度; $J_{\text{Gn}}$ 为绝缘气体侧法向电流密度; $\sigma$ 为该区域内表面电荷密度; $E_t$ 为切向电场强度; $\gamma_s$ 为表面电导率; $t$ 为电荷积聚时间。

绝缘子体积电导率和表面电导率的关系如式(2)所示<sup>[18]</sup>。

$$\gamma_s = \gamma_i d \quad (2)$$

式(2)中: $\gamma_i$ 为绝缘子体积电导率; $d$ 为表层等效厚度,通常可取 $d=50 \mu\text{m}$ 。

在恒定电场建立过程中,当导电介质不均匀时,其内部将积累自由电荷<sup>[19]</sup>。由于直流GIL盆式绝缘子存在温度梯度,其呈现非均匀介电特性,在直流电应力和热应力耦合作用下,盆式绝缘子内部存在动态空间电荷。该空间电荷密度 $\rho_i$ 与电位 $\varphi$ 的关系可由泊松方程表示为式(3)。

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_i}{\varepsilon_i} \quad (3)$$

式(3)中, $\varepsilon_i$ 为介电常数。

根据电荷守恒原理,绝缘子体电荷密度与单位空间闭合面的电流密度 $J$ 关系如式(4)所示。

$$\nabla J = -\frac{\partial \rho_i}{\partial t} \quad (4)$$

而根据麦克斯韦辅助方程,电场强度 $E$ 与电流密度 $J$ 及电位 $\varphi$ 之间的关系如式(5)~(6)所示。

$$J = \gamma_i E \quad (5)$$

$$E = -\nabla \varphi \quad (6)$$

由(3)~(6)可推导出式(7)。

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = (\nabla \gamma_i)(\nabla \varphi) - \frac{\gamma_i}{\varepsilon_i} \rho_i \quad (7)$$

当绝缘子空间电荷积聚达到饱和状态时,有式(8)。

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

由于环氧树脂的介电常数受温度影响很小,在本研究中只考虑温度分布对绝缘子电导率的影响。

直流 GIL 中的热量传递综合了热传导、热对流以及热辐射 3 种换热方式<sup>[15]</sup>。

热传导主要存在于导杆、盆式绝缘子及壳体等固体介质之间。在二维中心旋转对称模型中,高压导杆与绝缘子间的热传导、绝缘子与外壳间的稳态热传导过程可由式(9)描述<sup>[20]</sup>。

$$\frac{\lambda_t}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_c = 0 \quad (9)$$

式(9)中: $r$ 为导杆半径; $T$ 为温度; $\lambda_t$ 为导热系数; $Q_c$ 为固体介质间的热流量。

对流则是直流 GIL 中最为重要的换热方式,包括腔体内(恒容)的自然对流和腔体外(恒压)的自然对流。主要是由流体各部分间的温度差造成的,该换热方式可表示为式(10)<sup>[21]</sup>。

$$Q_c = \frac{2\pi k N_u}{\ln(D_o/D_i)} (T_i - T_o) \quad (10)$$

式(10)中: $Q_c$ 为对流换热热通量; $N_u$ 为 Nusselt 数; $T_i$ 、 $T_o$ 为换热面内、外温度; $D_i$ 、 $D_o$ 为等效管状对流区域内、外径; $k$ 为对流传热系数。

此外,对于 GIL 内部导杆、绝缘子以及壳体表面的热辐射,则根据 Stefan-Boltzman 法则,可表示为式(11)<sup>[20]</sup>。

$$Q_{rc} = \omega S_b A (T_i^4 - T_o^4) \quad (11)$$

式(11)中: $T_i$ 、 $T_o$ 为换热面内、外温度; $A$ 为固气换热面等效面积; $S_b$ 为 Stefan-Boltzman 常数; $\omega$ 为固体表面发射率。

为了准确求解直流 GIL 电-热多物理场耦合数学模型,需设置合理的边界条件。本研究在高压侧(中心嵌件和导杆)与接地侧(壳体)分别设置狄利克雷边界条件,如式(12)~(13)所示。

$$\varphi_c = U \quad (12)$$

$$\varphi_c = 0 \quad (13)$$

式(12)~(13)中: $U$ 为直流 GIL 所施加的电压等级,本研究中  $U=100$  kV。

设定无穷远处大气温度  $T_a$  恒定,作为求解直流 GIL 温度场的边界条件,则  $T_a=298$  K。

## 1.2 几何模型

本研究参照 126 kV 交流 GIS 母线尺寸建立仿真几何模型,如图 1 所示。

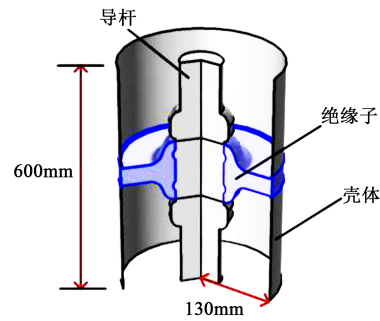


图 1 直流 GIL 仿真几何模型

Fig.1 Simulated geometric model of the DC GIL

## 1.3 仿真参数

在本研究的仿真计算中,环氧树脂盆式绝缘子和 SF<sub>6</sub> 的相关电、热学参数如表 1 和表 2 所示<sup>[22-25]</sup>。

表 1 盆式绝缘子物性参数

Tab.1 Material parameters of the basin type insulator

参数名称	参数值
导热系数/(W/(m·K))	0.25
恒压热容/(J/(kg·K))	1 500
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	2.2
表面发射率	0.9
相对介电常数	3.8
体积电导率( $k_v$ )/(S/m) (现有交流绝缘子)	$k_v=1.3\exp(-9\ 950/T)$

此外,在本研究中,选取多组盆式绝缘子的体积电导率进行仿真计算,以便于对比分析,掌握绝缘材料电导参数对于盆式绝缘子表面电荷积聚特性及沿面电场分布的影响规律。综合考虑现有材料和工艺水平,本研究选取的绝缘子体积电导率范围为  $0.001k_v \sim 100k_v$ 。

## 2 仿真结果与分析

试验研究表明,GIL 运行温度升高会导致绝缘性能下降<sup>[26]</sup>。为此,有必要在高温工况下开展绝缘材料电学参数影响规律研究。而目前国内外尚无直流 GIL 相关技术规范,本研究参考 GB/T 11022—2011,默认室温条件下,直流 GIL 中心导杆的最高允许温度为 90℃<sup>[27]</sup>。

本研究基于上述仿真模型,采用多物理场耦合仿真软件——COMSOL Multiphysics 计算了 25℃ 下,直流 GIL 中心导杆为 90℃ 时盆式绝缘子的温度

表2 SF<sub>6</sub>物性参数

Tab.2 Material parameters of SF<sub>6</sub>

参数名称	参数值
动力黏度( $\mu$ )(Pa·s)	$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \cdot \frac{T_0 + S}{T + S}$
导热系数( $\lambda$ )(W/(m·K))	$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \cdot \frac{T_0 + S}{T + S}$
恒压热容(J/(kg·K))	665.18
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho = \frac{P \cdot M_{\text{const}}}{T \cdot R_{\text{const}}}$
比热率	1.33
相对介电常数	1.002 6
离子迁移率/(cm/(V·s))	0.048
离子对产生率/(cm <sup>3</sup> ·s) <sup>-1</sup>	50

注:  $\mu_0$  为0℃、1个大气压下SF<sub>6</sub>动力黏度,  $\mu_0=1.42 \times 10^{-5}$  Pa·s;  $T_0=273.16$  K;  $T$ 为气体温度;  $S$ 为Sutherland常数,  $S=110.56$  K。  $\lambda_0$  为0℃、1个大气压下SF<sub>6</sub>的导热系数,  $\lambda_0=0.012$  06 W/(m·K)。  $P$ 为气压;  $T$ 为温度;  $M_{\text{const}}$  为气体摩尔质量,  $M_{\text{const}}=146.05$  g/mol;  $R_{\text{const}}$  为比例系数,  $R_{\text{const}}=8.314$  J/(mol·K)。

分布情况。在此基础上,研究不同盆式绝缘子体积电导率对其表面电荷积聚特性的影响,以期为直流GIL绝缘材料的优化设计奠定理论基础。

### 2.1 盆式绝缘子温度分布

当环境温度为25℃, 竖直布置的直流GIL中心导杆温度达90℃时, 绝缘子的稳态温度分布如图2所示。

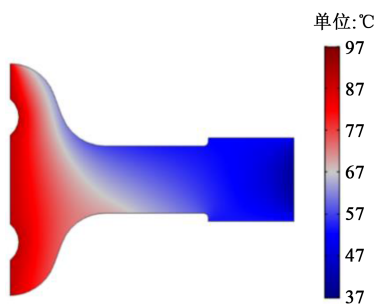


图2 盆式绝缘子温度分布

Fig.2 The temperature distribution in basin type insulator

从图2可以看出, 当直流GIL温升达到稳态时, 盆式绝缘子内部存在温度梯度。绝缘子靠近中心嵌件处温度达90℃时, 其最外侧(与空气接触处)温度仅为40.1℃, 温度梯度为49.9℃。此外, 由于气体

自然对流的作用, 对于竖直安装的GIL, 其盆式绝缘子上、下表面温度分布不均, 绝缘子下表面平均温度(70.6℃)比上表面平均温度(59.3℃)高11.3℃。

### 2.2 盆式绝缘子体电导率的影响

对中心导杆施加直流电压+100 kV, 在2.1所述温度场下, 盆式绝缘子体电导率对其饱和表面电荷密度的影响如图3所示。由图3可以看出, 当直流GIL中心导杆施加+100 kV电压时, 在电热应力耦合作用下, 盆式绝缘子表面积聚有大量电荷。在现有交流盆式绝缘子的典型材料电学参数下, 盆式绝缘子上、下表面主要积聚正电荷。若以其为对照组(体电导率为 $k_v$ ), 随着盆式绝缘子体积电导率变化, 其表面电荷分布变化显著, 具体情况如下:

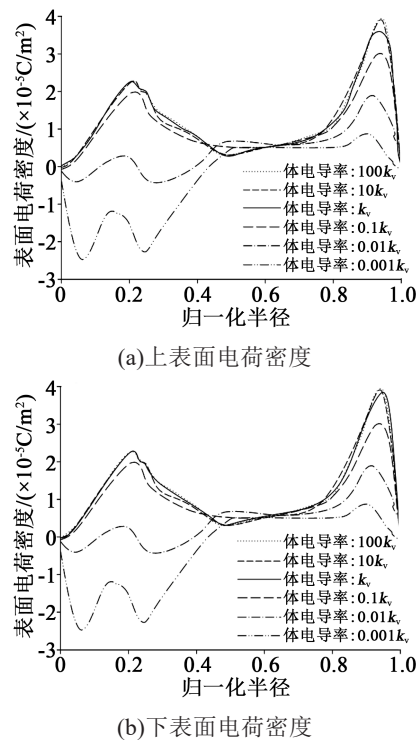


图3 不同体积电导率的盆式绝缘子表面电荷密度

Fig.3 The surface charge density of basin type insulator with different volume conductivity

(1) 当盆式绝缘子体电导率由 $k_v$ 增大至 $10k_v$ 时, 绝缘子的表面电荷密度仅略微增大, 最大电荷密度由 $3.59 \times 10^{-5}$  C/m<sup>2</sup>增大至 $3.74 \times 10^{-5}$  C/m<sup>2</sup>, 增大了4.2%。若继续增大体电导率至 $100k_v$ , 相比于体电导率为 $10k_v$ 时的稳态电荷分布, 盆式绝缘子上、下表面电荷分布规律和积聚电荷密度几乎不再变化。这是因为对于现有交流绝缘子材料, 在直流电场作用下, 绝缘子体电流是其表面电荷积聚的主导方

式。当绝缘子体积电导率进一步升高时,除了加快积聚速度外,不会改变其电荷积聚的主导方式。绝缘子表面积聚电荷的饱和密度最终是取决于法向电场强度。因此,在现有交流绝缘材料基础上进一步提高电导率不会改变饱和时的表面电荷积聚特性。

(2)当盆式绝缘子体积电导率由 $k_v$ 减小至 $0.1k_v$ 时,绝缘子上、下表面积聚电荷密度减小,上表面最大电荷密度由 $3.59 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ 减小至 $2.87 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ ,减小了20.1%。绝缘子下表面最大电荷密度由 $3.84 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ 减小至 $2.96 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ ,减小了22.3%。若继续减小盆式绝缘子的体积电导率至 $0.01k_v$ ,相比于体积电导率为 $k_v$ 时的稳态电荷分布,表面电荷密度变化更为显著。在靠近导杆区域内,绝缘子上、下表面均出现了负极性积聚电荷。在靠近壳体区域,虽然积聚电荷的极性不变,但最大电荷密度显著下降,上表面最大电荷密度由 $3.59 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ 减小至 $1.69 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ ,减小了52.9%;下表面最大电荷密度则由 $3.84 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ 减小至 $1.88 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ ,减小了51.0%。这是因为绝缘子体积电导率减小后,在绝缘子表面靠近导杆区域电荷积聚的主导机制发生了改变,来自气体侧的负极性粒子数多于来自绝缘子的正极性粒子数,因而积聚电荷的极性发生了改变。由于在靠近导杆区域积聚了负极性电荷,抑制了靠近壳体区域绝缘子沿面的法向电场强度,导致该区域积聚的电荷密度有所下降;若继续减小绝缘子体积电导率至 $0.001k_v$ ,绝缘子上、下表面在靠近导杆区域则会积聚大量的负极性电荷。当导杆上施加正极性直流电压时,在负极性电荷影响下,绝缘子靠近导杆区域的沿面电场强度会显著增大,畸变的电场会降低绝缘子的绝缘性能。

综上所述,在现有交流盆式绝缘子典型材料电学参数的基础上,增大绝缘材料体积电导率会加剧盆式绝缘子表面电荷积聚,但若体积电导率增量达1个数量级以上时,对电荷积聚的促进作用则不再明显;而在现有交流盆式绝缘子典型材料电学参数的基础上,适当减小绝缘材料体积电导率可以有效抑制绝缘子表面电荷积聚,但若过度减小绝缘材料体积电导率反而会加剧盆式绝缘的表面电荷积聚。

### 3 结 论

(1)对于直流GIL,当温升达稳态时,盆式绝缘子内部存在温度梯度。绝缘子靠近中心嵌件处温

度达 $90^\circ\text{C}$ 时,其最外侧(与空气接触处)温度仅为 $40.1^\circ\text{C}$ ,温度梯度为 $49.9^\circ\text{C}$ 。此外,由于气体自然对流的作用,对于垂直安装的GIL,其盆式绝缘子上、下表面温度分布不均,绝缘子下表面平均温度( $70.6^\circ\text{C}$ )比上表面平均温度( $59.3^\circ\text{C}$ )高 $11.3^\circ\text{C}$ 。

(2)对于直流GIL,在电热应力耦合作用下,在现有交流盆式绝缘子典型材料的基础上,增大绝缘材料体积电导率会加剧盆式绝缘子表面电荷积聚,但若体积电导率增量达1个数量级以上时,对电荷积聚的促进作用减弱。适当减小绝缘材料体积电导率可以有效抑制绝缘子的表面电荷积聚,但若过度减小绝缘材料体积电导率反而会加剧盆式绝缘子的表面电荷积聚。

### 参考文献:

- [1] 范建斌,李鹏,李金忠,等.  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流GIL关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(13):1-7.
- [2] KOCH H. Gas insulated transmission lines(GIL)[M]. Chichester: John Wiley & Sons,2011.
- [3] 张子,张周胜,邓保家,等. 直流GIL绝缘子表面电荷研究现状与展望[J]. 绝缘材料,2019,52(6):1-7.
- [4] 李博,淡淑恒. 直流GIL中温度对绝缘子表面电荷积聚时变特性影响研究[J]. 绝缘材料,2020,53(4):52-58.
- [5] 张博雅,王强,张贵新,等.  $\text{SF}_6$  中绝缘子表面电荷积聚及其对直流GIL 闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2015,41(5):1481-1487.
- [6] OKABE S. Phenomena and mechanism of electric charges on spacers in gas insulated switchgears[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,46(1):46-52.
- [7] 刘志民,邱毓昌. 对绝缘子表面电荷积聚机理的讨论[J]. 电工技术学报,1999,14(2):65-68.
- [8] 汤浩,吴广宁,范建斌,等. 直流气体绝缘输电线路的绝缘设计[J]. 电网技术,2008,32(6):65-70.
- [9] HASEGAWA T, YAMAJI K, HATANNO M, et al. Development of insulation structure and enhancement of insulation reliability of 500 kV DC GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1997, 12:194-202.
- [10] MA G M, ZHOU H Y, LI C R, et al. Designing epoxy insulators in  $\text{SF}_6$ -filled DC-GIL with simulations of ionic conduction and surface charging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,22(6):3312-3320.
- [11] 贾志杰,张乔根,张斌,等. 直流下 $\text{SF}_6$  中绝缘子的闪络特性[J]. 高电压技术,2009,35(8):1903-1907.
- [12] 贾志杰,李建明,李佳,等. 500 kV 直流GIL支撑绝缘子的电场优化[J]. 高压电器,2010,46(6):18-21,24.
- [13] MESSERER F, BOECK W, STEINBIGLER H, et al. Enhanced field calculation for HVDC GIS[J]. Gaseous Dielectrics IX, 2001:473-483.
- [14] 田浩,李继承,郝留成,等. 直流电压下环氧绝缘材料电气性能对电荷积聚的影响[J]. 电网技术,2015,39(5):1463-1468.

- [15] 周宏扬,马国明,刘姝媛,等. 基于电-热多物理场耦合模型的直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):1251-1259.
- [16] ZHOU H Y, MA G M, LI C R, et al. Impact of temperature on surface charges accumulation on insulators in SF<sub>6</sub>-filled DC-GIL [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(1):601-610.
- [17] LUTZ B, KINDERSBERGER J. Surface charge accumulation on cylindrical polymeric model insulators in air: Simulation and measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,18(6):2040-2048.
- [18] WINTER A, KINDERSBERGER J. Stationary resistive field distribution along epoxy resin insulators in air under DC voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012,19(5):1732-1739.
- [19] 王泽忠,全玉生,卢斌生. 工程电磁场[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [20] 周宏扬,马国明,刘姝媛,等. 基于电-热多物理场耦合模型的直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):1251-1259.
- [21] KIM J K, HAHN S C, PARK K Y, et al. Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magnetothermal finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1636-1639.
- [22] WIEGART N, NIEMEYER L, PINNEKAMP F, et al. Inhomogeneous field breakdown in GIS - the prediction of breakdown probabilities and voltages. II. Ion density and statistical time lag [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 931-938.
- [23] 黎斌. SF<sub>6</sub>高压电器的设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [24] 王健,李庆民,李伯涛,等. 考虑非弹性随机碰撞与 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体影响的直流 GIL 球形金属微粒运动行为研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(15):3971-3978.
- [25] WINTER A, KINDERSBERGER J. Transient field distribution in gas-solid insulation systems under DC voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(1): 116-128.
- [26] HERING M, GREMAUD R, SPECK J, et al. Flashover behaviour of insulators with inhomogeneous temperature distribution in gas insulated systems under DC voltage stress[C]//2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Poznan, Poland:IEEE,2014.
- [27] 全国高压开关设备标准化技术委员会. 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求:GB/T 11022—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.