第 52 卷 第 5 期：2291-2302 高电压技术 Vol.52, No.5: 2291-2302
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250372

考虑环氧胶浸纸各向异性体积电导的直流套管芯体多物理场耦合仿真

蓝博涵[1]，郭能峰[1]，李金忠[2]，汤　浩[3]，王　霞[1]，丁卫东[1]
（1. 西安交通大学电气工程学院，西安 710049；2. 国家电网有限公司，北京 100031；
3. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘　要：当前对换流变压器阀侧套管电场分布和电荷积聚的仿真研究较少，考虑环氧胶浸纸材料电导率的各向异性。为研究环氧胶浸纸材料电导率的各向异性以及电导率随温度的变化规律，该文建立了三电极体积电导率测量平台，并以 800 kV 缩比套管为研究对象建立了电-热-流多物理场耦合仿真模型，对比了采用各向同性与各向异性电导时套管芯体电场分布和电荷积聚特性。研究发现，环氧胶浸纸材料的体积电导率具有显著的各向异性，在 40~100 ℃范围内沿纸面和穿过纸面方向上的体积电导率相差达到 6 倍以上。仿真结果表明：在考虑材料电导率的各向异性时，相比各向同性条件下，正极性电压下套管端部会积聚大量的负极性电荷，最大负电荷密度达到 1.28×10^{-5} C/m^2，使得套管端部电位下降 20.2%，使屏蔽罩与套管芯体间气隙段 SF_6 侧的电场强度增大了 10.9 倍。仿真结果预示着真实的环氧胶浸纸套管有可能由于套管芯体端部和屏蔽罩之间的小间隙放电而引发套管的沿面闪络。
关键词：阀侧套管；各向异性电导率；环氧胶浸纸；电场分布；电荷积聚

Multi-physical Field Coupling Simulation of DC Bushing Core Considering the Anisotropic Volume Conductivity of Resin Impregnated Paper

LAN Bohan[1], GUO Nengfeng [1], LI Jinzhong[2], TANG Hao[3], WANG Xia[1], DING Weidong[1]
(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong Univesity, Xi'an 710049, China;
2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;
3. China Electrical Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The anisotropic conductivity of resin impregnated paper (RIP) has been seldom considered in the simulation of electric field distribution and charge accumulation within the valve-side bushing of a converter transformer until now. In order to investigate both the anisotropy in the conductivity of resin impregnated paper and its temperature dependence, we established a three-electrode volume conductivity measurement platform. A simulation model based on electric-thermal-fluid multi-physical coupling was developed for a scaled model of an 800 kV DC bushing. The characteristics of electric field distribution and charge accumulation were compared between isotropic and anisotropic conductivity scenarios. It was observed that resin impregnated paper exhibits significant anisotropy in volume conductivity, with the volume conductivity along the paper being over six times greater than that across it within a temperature range of 40~100 ℃. The simulation results indicated that, when considering anisotropic conductivity, substantial negative charges accumulated at the end of the bushing under the positive DC power compared with the isotropic condition. The maximum negative charge density reached 1.28×10^{-5} C/m^2. This led to a 20.2% decreased potential at this location and a 10.9-fold electric field intensification of SF_6 side across the gas gap between the shielding electrode and the end of the bushing core. These findings reveal that the surface flashover observed in actual resin impregnated paper bushings may be attributed to discharges occurring within small gaps present in these bushings.
Key words: valve-side bushing; anisotropic conductivity; resin impregnated paper; electric field distribution; charge accumulation

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(5500-202455120A-1-1-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-202455120A-1-1-ZN).

0 引言

环氧胶浸纸套管电场调控能力强，体积小、质量轻、易维护，被广泛用作我国±800 kV 特高压直流输电工程中的换流变压器阀侧套管[1-3]。换流变压器阀侧套管的运行工况极为复杂，长期经受严酷的电、热、力联合作用，同时芯体表面的电荷积聚会畸变其电场分布，从而影响其绝缘可靠性[4]。张书琦等学者研究了胶浸纸套管表面电荷积聚及闪络特性，结果表明长期电压作用会使直流套管表面电荷积聚加剧，在加压 10 h 内电荷密度最大值能够达到 0.98 pC/mm^2，长时直流电压作用下气-固界面闪络放电电压均显著降低[5]。因此，对换流变压器阀侧套管开展多物理场耦合仿真研究，优化套管的结构，对提升其绝缘可靠性，保障直流输电工程的安全稳定运行具有重要的意义。

国内外学者对环氧胶浸纸材料介电性能的温度依赖性，以及换流变压器阀侧套管的温度、电场分布和电荷积聚特性进行了大量研究。王青于等学者对 400 kV 换流变干式阀侧套管建立了三维电磁-热-流耦合场仿真模型，考虑了热辐射、热传导和对流传热的影响，得到了套管内部的温度分布规律，并在 400 kV 换流变干式阀侧套管上进行了温升试验，实际测量结果与仿真计算结果的差值在 8%以内[6]。傅明利等学者仿真计算了采用非线性电导环氧树脂材料的±600 kV 换流变压器干式套管的电场分布，结果表明随着套管负载的增加，径向温度差使法兰处套管芯子的电场分布发生畸变，法兰附近的畸变场强满载时高达 12 kV/mm，替换为非线性电导环氧树脂绝缘后，法兰处的套管芯子电场畸变得到了极大的改善，同时也有效缓解了套管端部 SF_6 气体和变压器油的绝缘负担[7]。M.Chen 等学者测量了环氧胶浸纸材料的电导率，并建立了电-热耦合模型，研究了环氧胶浸纸材料的体积电导率对电场分布和表面电荷积聚的影响，结果表明降低体积电导率有助于减少表面电荷积聚[8]。

但当前的仿真研究集中在对温度、电导大小和非线性等因素对套管电场分布和电荷积聚的影响，并未考虑到环氧胶浸纸材料电导率的各向异性。在换流变压器油纸绝缘领域，A.Kurita 等很早就发现层压纸板的电导率各向异性和非线性，顺着纸板方向的电导率($\sigma_{PB,H}$)要高于垂直纸板方向的电导率($\sigma_{PB,T}$)[9]。E.Takahashi 等建立了考虑纸板各向异性和非线性的电场计算方法，发现考虑非线性和各向异性时电场计算结果存在差异[10]。国内吕晓德和李锦彪等分别建立了考虑纸板各向异性和非线性的换流变压器直流电场计算方法，指出换流变压器直流电场分布计算考虑各向异性和非线性更加合理[11-12]。李冬雪等考虑纸板材料电导率的各向异性建立了直流电场计算模型，计算表明考虑材料的各向异性后纸板中的场强减小，油中场强增大[13]。目前国内外对直流套管的仿真与电荷积聚研究是将环氧胶浸纸材料视为各向同性电导率材料来考虑的，没有文献指出环氧胶浸纸的体积电导率可能存在各向异性，但环氧胶浸纸材料的结构类似于层压纸板，其电导率也可能存在明显的各向异性，从而对环氧胶浸纸套管的电场分布和电荷积聚产生较大的影响，因此有必要研究环氧胶浸纸材料电导率是否存在各向异性，以及其对套管电场分布的影响。

本文测量了不同温度和电场强度下环氧胶浸纸材料在不同方向上的体积电导率，证实其具有明显的各向异性。采用实测的环氧胶浸纸材料各向异性体积电导率建立了缩比套管模型的电-热-流多物理场耦合仿真模型，研究了电导率各向异性对套管电场分布和电荷积聚的影响。并实验测量了缩比套管的表面电位以验证仿真结果。

1 电导率测试方法

1.1 实验装置与实验方法

本文参考 GB/T 31838.3—2019 第 2 部分，采用三电极法测量试样的体积电导率。实验装置如图 1 所示，三电极系统被置于烘箱中，其温度可精确控制。三电极由测量电极、保护电极和被保护电极构成，测量电极直径为 39 mm，被保护电极直径为 25 mm，保护电极内径为 29 mm，外径为 31 mm。皮安表型号为 Keithley 6485，测量精度为 10 fA。直流高压电源通过保护电阻 R_{DC} 给试样施加电压 U_{DC}，保护电阻的值相对试样电阻可以忽略。

施加直流电压范围为 3~7 kV，以使得试样(厚度为 2 mm)承受的电场强度范围为 1.5~3.5 kV/mm，最大场强覆盖常规环氧胶浸纸直流套管承受的水平。实验温度选择 40、60、80、100 ℃，最大值不超过环氧胶浸纸材料的玻璃化转变温度。每次测试前试样经过规范化的清洗、烘干流程，测量过程中严格控制试样温度，以保证测量结果的准确性。

当环氧胶浸纸试样被施加直流电压时，将流过

极化电流和电导电流，其中极化电流在加压瞬间的数值很大，随着时间的推移会逐渐下降到零，而电导电流是唯一长期存在的电流分量。本文以电流值在 1 min 内下降率小于 5%作为标准确定稳态电导电流，加压时间通常为 10 min，基于稳态电导电流计算了试样的电导率，如下式所示：

$$\gamma = \frac{I}{U_{DC}} \frac{4l}{\pi(d+g)^2} \tag{1}$$

式中：γ 为材料电导率；I 为稳态泄漏电流；U_{DC} 为测量电极所加的直流电压；l 为试样的厚度；d 为被保护电极的直径；g 为保护电极与被保护电极之间的距离。

阀侧套管工作时其芯体可能会存在一定温升，根据阿伦尼乌斯方程，环氧材料的电导率随温度升高呈指数上升，满足下式：

$$\gamma(T) = \gamma_0 \mathrm{e}^{-\left(\frac{W_a}{k_B T}\right)} \tag{2}$$

式中：T 代表温度；$\gamma(T)$ 表示材料在温度 T 下的电导率；γ_0 为电导率常数，与材料自身的性质有关；W_a 代表活化能；k_B 是玻耳兹曼常数。

1.2 试样准备

本文实验中采用的试样是从同一支实际套管芯体上切取的，在一定程度上保证了试样的一致性。试样直径为 90 mm，厚度为 2 mm。根据试样的切取方向不同将试样分为两类，分别为平行试样和垂直试样，平行试样是指试样圆面与纸面平行的试样，垂直试样是指试样圆面与纸面垂直的试样，试样的外观如图 2 所示。图 3 为使用偏光显微镜将试样圆面放大 10^5 倍后的照片。从图中可以看出，平行试样的圆面存在明显的竖条纹，这是绝缘纸面的特征；而垂直试样的试样圆面类似网状结构，并且在偏光显微镜下明暗部位交替出现，其中较亮的位置为环氧树脂部分，较暗的位置为绝缘纸部分。图 4 为平行和垂直试样体积电导率的测试示意图，对于平行试样，其测试时的电场方向与绝缘纸面方向垂直，而垂直试样的电场方向与绝缘纸面方向平行。

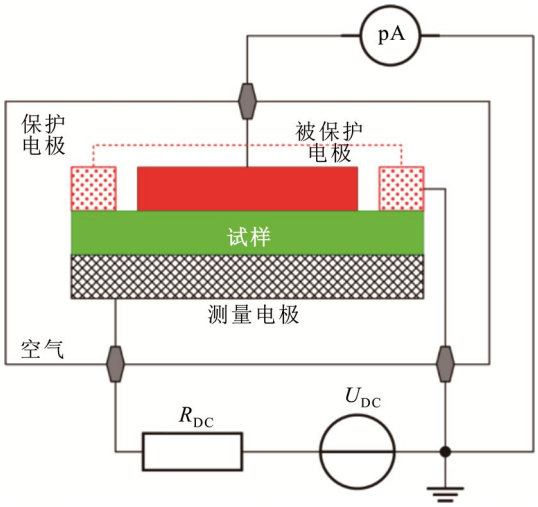
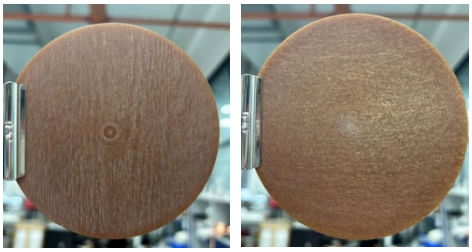


图 1 三电极体积电导率测试平台示意图

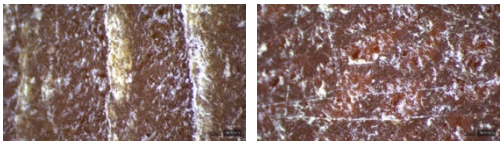
Fig.1 Schematic of three-electrode conductivity test platform



(a) 平行试样 (b) 垂直试样

图 2 两类试样图片

Fig.2 Photos of two kinds of samples



(a) 平行试样 (b) 垂直试样

图 3 两类试样放大图片

Fig.3 Enlarged photos of two kinds of samples

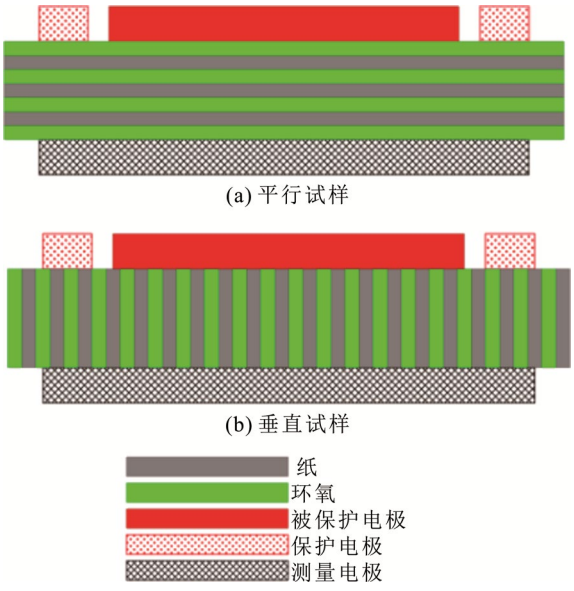


图 4 平行垂直试样测试示意图

Fig.4 Test diagram of parallel and vertical samples

2 多物理场耦合仿真模型建立

由于直接在 800 kV 真实套管上开展实验研究较为困难，而缩比套管能够在一定程度上反映真实套管的绝缘特性以及薄弱环节，因此大多数实验研究是在缩比套管上进行的。当前已经建立了缩比套管实验平台，为方便后续对缩比套管实测数据进行验证，本文以缩比套管实体模型为对象建立仿真模型，缩比套管仿真模型如图 5 所示，套管具有旋转对称性，因此采用轴对称仿真模型可以在保证计算精度足够高的同时减少计算量。缩比套管实体模型长 1.5 m，芯体半径为 60 mm，内部铝箔屏蔽层简化为 9 层，其末屏与法兰相连并接地，两端安装有圆柱形屏蔽罩，其半径 60 mm，高 55 mm，两下两面倒角 15 mm，用于平均套管电场分布。为与实验平台环境相符，套管上端置于空气中，下端置于金属罐内部，气体氛围为 0.1 MPa 的 SF_6，金属实验容器的半径为 0.5 m，高 1 m。

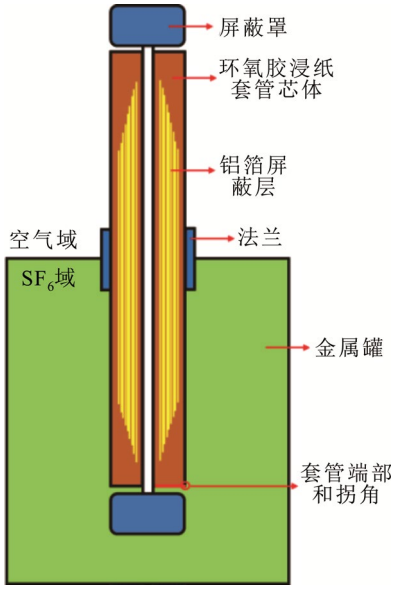


图 5 仿真模型示意图

Fig.5 Schematic of simulation model

2.1 电场模型与控制方程

换流变压器阀侧套管工作在直流电压下，因此稳态电场分布主要取决于材料的电导率。根据电流连续性方程和欧姆定律：

$$\begin{cases} \nabla \cdot \boldsymbol{J} = 0 \\ \boldsymbol{J} = \gamma \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{E} = -\nabla U \end{cases} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{J}$ 为传导电流密度；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；U 为电势。套管中的各铝箔使用悬浮电位来约束，末屏和法兰设置为接地。

2.2 电荷积聚模型与控制方程

大量实验现象和理论分析均表明直流电场中气固界面电荷的积聚和耗散主要有 3 个途径，即固体中的体电流、气体中的离子流以及绝缘材料表面的面电流，如图 6 所示[14-16]。

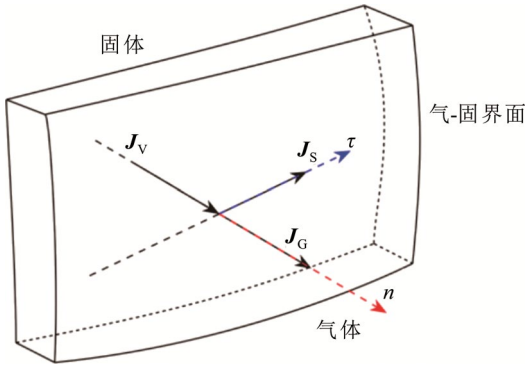


图 6 气固界面电荷积聚方式

Fig.6 Gas-solid interface charge accumulation mode

对套管模型上气固界面的一个微元进行分析，在忽略表面导电层的厚度之后，根据电流的连续性方程，将气固界面电荷密度 σ 的积聚过程表征为：

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{J}_{\mathrm{V}} - \boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{J}_{\mathrm{G}} - \nabla \cdot \boldsymbol{J}_{\mathrm{S}} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{J}_{\mathrm{V}}$ 表示流入绝缘材料表面的固体侧电流密度；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{G}}$ 表示流出绝缘子表面的气体侧电流密度；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$ 表示气-固界面的电流密度；$\boldsymbol{n}$ 是气固界面的单位法向矢量。

在绝缘气体中，气体电流密度与电场强度呈非线性，且气体侧电导与气体中的离子浓度有关。正负离子在气体域中主要发生 3 个过程，分别是电场下的迁移、流场下的扩散和正负离子的产生与复合。离子运动产生的气体侧电流密度方程以及正负离子密度分布由式(5)和式(6)描述：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{G}} = \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} + e(n^+ b^+ + n^- b^-)\boldsymbol{E}_{\mathrm{g}} - e\nabla(D^+ n^+ - D^- n^-) \tag{5}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial n^+}{\partial t} = \dfrac{\partial n}{\partial t} - Rn^+ n^- - \nabla \cdot (n^+ b^+ E_{\mathrm{g}}) + D^+ \nabla^2 n^+ \\ \dfrac{\partial n^-}{\partial t} = \dfrac{\partial n}{\partial t} - Rn^+ n^- + \nabla \cdot (n^- b^- E_{\mathrm{g}}) + D^- \nabla^2 n^- \end{cases} \tag{6}$$

式中：e 为元电荷；$\boldsymbol{D}$ 为电通量密度；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{g}}$ 为气体侧电场强度；n^+/n^- 分别为正/负离子数密度；b^+/b^- 分别为正/负离子的迁移率；D^+/D^- 分别为正/负离子的扩散系数；$\partial n/\partial t$ 为正/负离子对的生成速率；R 为正/负离子的复合系数[17]。

对于固体侧的电荷积聚，稳态的套管侧体电流密度仅由传导电流密度组成，有：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{V}}=\gamma_{\mathrm{V}}\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$为固体侧电场强度；$\gamma_{\mathrm{V}}$为环氧胶浸纸材料的体电导率，采用上述环氧胶浸纸片状试样所测量得到的电导率数据。

对于各向异性材料，由于其电导率在不同方向上存在差异，所以不能使用统一的电导率来表征材料的电导率，需要使用电导率张量来表征。此时，各向异性材料体电流密度方程为：

$$\begin{bmatrix}J_{\mathrm{V}r}\\J_{\mathrm{V}z}\\J_{\mathrm{V}phi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\gamma_{\mathrm{V}r}&0&0\\0&\gamma_{\mathrm{V}z}&0\\0&0&\gamma_{\mathrm{V}phi}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_{sr}\\E_{\mathrm{s}z}\\E_{\mathrm{s}phi}\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：其中 $J_{\mathrm{V}i}$、$\gamma_{\mathrm{V}i}$和 E_{si}分别为 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{V}}$、$\gamma_{\mathrm{V}}$和 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$在 i 方向上的分量(i=r、z 和 *phi*，r、z 和 *phi* 分别代表套管芯体径向、轴向和周向)。图 7 示意了 r、z 和 *phi* 方向。对于环氧胶浸纸材料而言，在其制造时为一层一层纸卷制而成，通常认为纸面具有较好的一致性，在各个方向的性能相同，所以在仿真中可以认为 z 方向和 *phi* 方向的电导率也能保持一致，都是使用垂直试样测得的电导率，r 方向的电导率是使用平行试样测得的电导率。

套管芯体气固界面的面电流密度如下式所示：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}=\gamma_{\mathrm{S}}\boldsymbol{E}_{\tau} \tag{9}$$

式中：γ_{S}为环氧胶浸纸材料的表面电导率；$\boldsymbol{E}_{\tau}$为气固界面的电场切向分量。通常情况下，当气固界面的表面电导率小于 1×10^{-20} S 时，对仿真计算结果的影响可以忽略不计[18]。

2.3 热场模型与控制方程

直流套管的热量传递通常有 3 种形式：热传导、热对流和热辐射[19-20]。热传导一般发生在两种介质之间，或者同一物质的不同区域，固体以纯粹的热传导进行热量传递。热对流是指流体中不同温度的部分通过流动使温度趋向均匀。热辐射是指高温物体将热量以辐射的形式直接向外传递热量，由于套管中通过热辐射传递的热量较少，因此在仿真研究中忽略了辐射传热。在二维轴对称模型中，稳态的固体侧热传导方程如下式所示：

$$\frac{k}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_{\mathrm{c}}}{\partial r}\right)+k\frac{\partial^2 T_{\mathrm{c}}}{\partial z^2}+Q_{\mathrm{c}}=0 \tag{10}$$

式中：T_{c}为芯体材料温度；k 为导热系数；Q_{c}为芯体材料的热通量。

气体侧对流换热的热传递方程如下式所示：

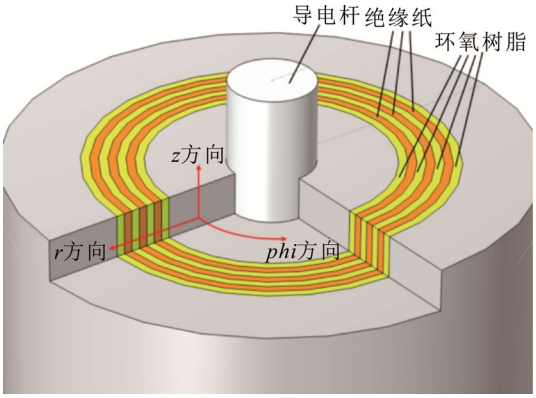


图 7 各向异性电导率方向

Fig.7 Anisotropic conductivity direction

$$Q_{\mathrm{g}}=hA(T_{\mathrm{c}}-T_{\mathrm{g}}) \tag{11}$$

式中：Q_{g}为芯体表面与气体的对流换热通量；h 为对流换热系数；A 为气-固界面有效面积；T_{g}为固体表面处气体温度。

同时考虑热传导与热对流的控制方程如下：

$$\rho c_{\mathrm{p}}u\cdot\nabla T_{\mathrm{g}}=\nabla\cdot(k\nabla T_{\mathrm{g}})+Q_{\mathrm{g}}\ (\nabla\cdot(\rho u)=0) \tag{12}$$

式中：ρ 为气体密度；c_{p}为气体定压比热容；u 为气体分子的速度。

2.4 仿真流程与边界条件

本文建立二维轴对称套管模型开展多物理场耦合仿真。根据实际套管结构，将仿真模型的不同区域材料分别设置为金属、环氧胶浸纸、空气以及 SF_6，具体材料参数见表 1，其中环氧胶浸纸的体积电导率根据本文测量得到的数据设定。本文总共使用电流场、固体和流体传热场、湍流场和稀物质传递场，4 个物理场的耦合方式如图 8 所示。仿真中以流过导电杆的电流所产生的焦耳热作为热场的热源；热场中温度分布通过芯体材料电导率 γ_{V}随温度的变化影响电场，以离子扩散系数 $D^{\pm}$的形式影响离子流场(稀物质传递场)，由电介质中载流子电导公式 $\gamma_{\mathrm{G}}=e(n^{+}b^{+}+n^{-}b^{-})$将气体中离子数密度分布转化为电导率写入电流场中。式中 γ_{G}为 SF_6的电导率。

对电流场计算需要在高压侧(屏蔽罩)与接地侧(法兰)分别设置狄利克雷边界条件，即已知边界的电位值。稀物质传递场用于模拟 SF_6中正负离子的产生与复合过程，在进行计算时，需要在高压侧(屏蔽罩)设置正离子数密度和负离子数密度梯度为零，在接地侧(金属罐内壁)设置负离子数密度和正离子数密度梯度为零，分别如式(13)和(14)所示。在热场的计算中，空气域温度设置为环境温度 20 ℃，在金属导电杆上通入 1 400 A 电流提供热源。套管芯

体上端与空气接触部分设置为自然对流条件，对流换热系数设置为 5 W/(m²·K)。湍流场的范围设置为 SF_6 气体域，设置参考压力为 0.1 MPa，同时考虑重力的影响。本文使用的相关物理场参数如表 2 所示[17]。本文选用自由三角形网格划分，因为 SF_6 区域内需要计算离子的生成、复合、迁移、扩散等过程，需要较高的计算精度，所以控制最大网格尺寸不超过 9 mm，其他区域使用自动划分。

$$\begin{cases} U_{\mathrm{h}} = 8\ \mathrm{kV} \\ n^{+} = 0 \\ \nabla \cdot n^{-} = 0 \end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases} U_{\mathrm{g}} = 0 \\ n^{-} = 0 \\ \nabla \cdot n^{+} = 0 \end{cases} \tag{14}$$

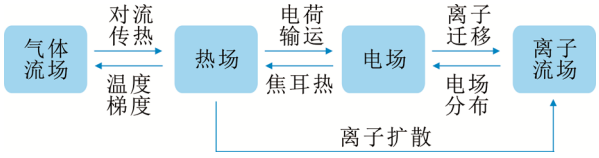


图 8 多物理场耦合示意图

Fig.8 Diagram of multi-physics coupling

表 1 仿真相关材料参数

Table 1 Simulation of relevant material parameters

材料	相对介电常数	电导率/(S·m⁻¹)	导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹)	恒压热容/(J·kg⁻¹·K⁻¹)	动力黏度/(Pa·s)	密度/(kg·m⁻³)
SF_6	1.002	γ_G	k	700	μ	6.14
空气	1	1×10^{-15}	0.024	—	—	1.29
金属导杆	1×10^{6}	5.998×10^{7}	400	900	8 960	—
环氧胶浸纸	4.1	γ_V	0.463	1 574	1 430	—

注：$\gamma_G = e(n^{+}b^{+} + n^{-}b^{-})$；$k = k_0 (T/T_0)^{1.5} \left((T_0 + S)/(T + S)\right)$；$\mu = \mu_0 (T/T_0)^{1.5} \left((T_0 + S)/(T + S)\right)$。其中 k_0 为导热系数常数，取值为 0.012 06 W/(m·K)；μ_0 为黏度系数，取值为 1.42×10^{-5} Pa·s；T_0 为环境温度，取值 273.15 K；S 为萨瑟兰常数，通常取值为 110.56 K。

表 2 仿真相关物理场参数

Table 2 Simulation of relevant physical filed parameters

符号	单位	数值或公式	物理学意义
k_B	J/K	1.38×10^{-23}	玻耳兹曼常数
e	C	1.6×10^{-19}	元电荷
$n_0^{\pm}$	cm^{-3}	7.6×103	初始正负离子浓度
$b^{\pm}$	$\mathrm{cm}^2/(\mathrm{V\cdot s})$	0.048	正负离子迁移率
$D^{\pm}$		$n^{\pm}k_BT/e$	正负离子扩散系数
$\partial n/\partial t$	$(\mathrm{cm}^3\cdot\mathrm{s})^{-1}$	10	正负离子对生产速率
R	cm^3/s	1.73×10^{-7}	正负离子复合系数
h	$\mathrm{W/(m^2\cdot K)}$	5	对流换热系数

3 电导率测量结果及分析

3.1 直流电场强度对试样体电导率的影响

图 9 给出了不同温度下平行和垂直试样的体积电导率随电场强度的变化关系。当温度较低时(如 60 ℃)，随着电场强度的提升，两类试样的体积电导率几乎不变；而当温度较高时(如 100 ℃)，随着电场强度的提升，两类试样的体积电导率随着电场强度的提升略微增大，但增幅也很小。

3.2 温度对试样体电导率的影响

根据 3.1 节的分析，环氧胶浸纸在本文测量的电场强度范围内的体积电导率上升幅度不大，因此本文选择 2.5 kV/mm 的测试数据作为套管的体积电阻率，两类试样在 2.5 kV/mm 时电导率随温度的变化如图 10 所示。

从图 10 中可以看出，两类试样的体积电导率受温度的影响较大，在取对数之后，体积电导率随着温度的上升近似呈线性增长。这是因为电介质的

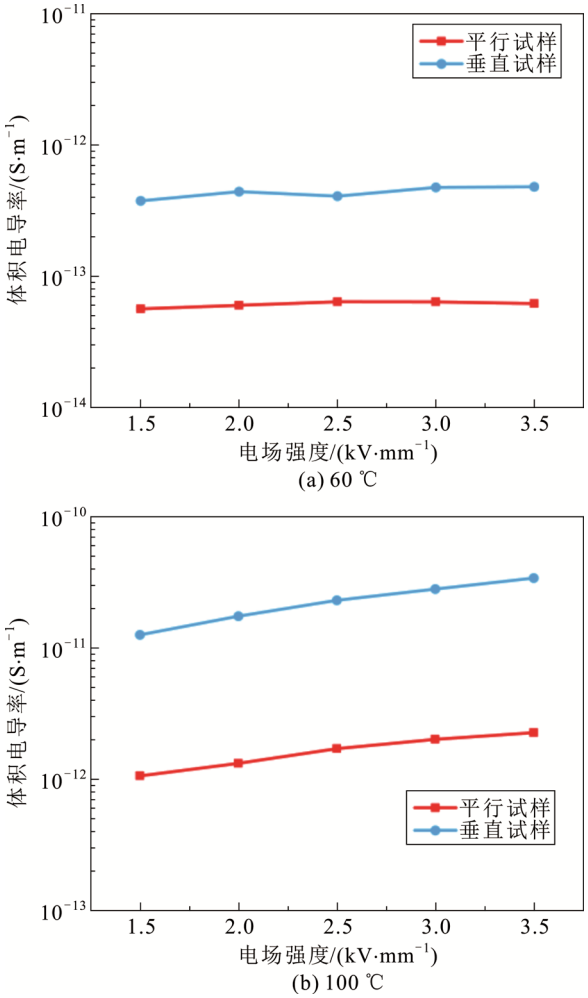


图 9 电导率随电场强度变化曲线

Fig.9 Conductivity curve with electric field intensity

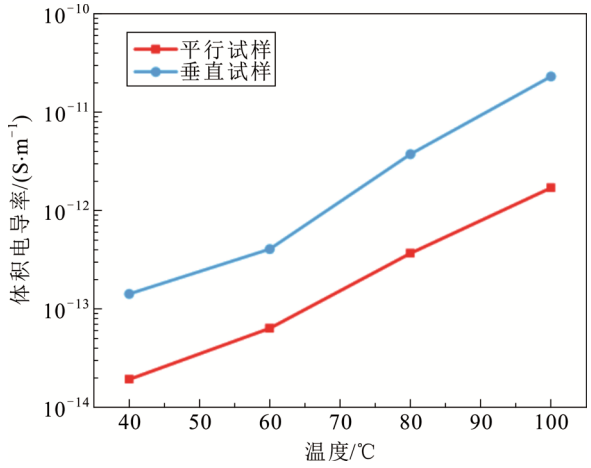


图 10　电导率随温度变化曲线

Fig.10　Conductivity curve with temperature

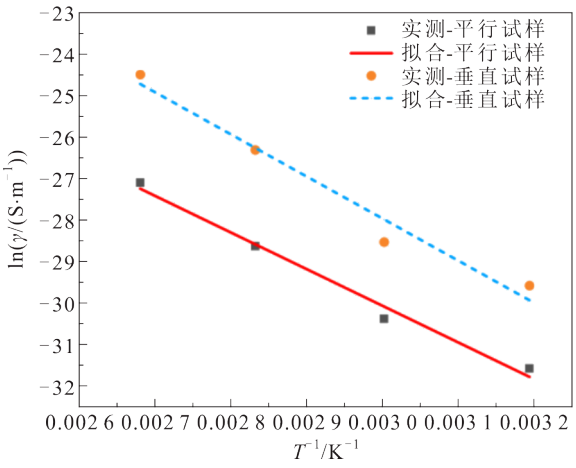


图 11　电导率随温度变化拟合曲线

Fig.11　Fitting curve of conductivity with temperature

电导率与电介质中载流子的浓度和载流子的迁移率相关。随着温度的升高，一方面，陷阱中的入陷电子和空穴能够获得更大的能量脱陷变为自由电荷，增加了电介质中载流子的数密度；另一方面，自由的载流子也能获得更大的能量，越过更高能级的势垒，增加了载流子的迁移率，因此体积电导率受温度的影响较大。使用 MATLAB 对两类试样在 2.5 kV/mm 的电场强度下的体积电导率对数 lnγ 和温度的倒数 1/T 进行一次函数拟合，得到拟合曲线如图 11 所示，拟合公式以及误差分析相关参数见表 3。

从表 3 可以看出，在 2.5 kV/mm 下的温度-体积电导率关系拟合曲线中，相关系数均大于 0.95，说明拟合较好。在下文开展的仿真研究中，依据此公式设定环氧胶浸纸材料的体积电导率。

表 3　体积电导率拟合参数与误差参数

Table 3　Fitting parameters and error parameters of volume conductivity

试样	残差平方和	均方根误差	相关系数	拟合公式
平行试样	0.151 6	0.194 7	0.987 0	$\gamma_{\text{parallel}}(T)=0.029\text{e}^{-8\,846/T}$
垂直试样	0.467 0	0.345 0	0.969 5	$\gamma_{\text{vertical}}(T)=12.44\text{e}^{-10\,161/T}$

3.3　平行垂直试样体电导率的差异及分析

图 12 给出了平行垂直试样在多种测试条件下的体积电导率测量结果。从图中可以看出，不论在何种温度条件下，垂直试样的体积电导率均明显大于平行试样的体积电导率，至少都能达到 6 倍的差距。在 60 ℃、2.5 kV/mm 的条件下，平行试样的电导率为 6.402×10^{-14} S/m，垂直试样的电导率为 4.093×10^{-13} S/m，后者是前者的 6.4 倍。

这是由于环氧胶浸纸材料试样中存在大量的纸与环氧的界面，在界面上的电荷陷阱密度远大于环氧树脂内的电荷陷阱密度。当电场方向和界面平行时(对应垂直试样)，载流子可以通过入陷和出陷在界面陷阱中移动，所以也会受到温度的影响。这种电导率各向异性和油浸绝缘纸板以及掺杂定向碳纳米管的聚合物的电导率有类似之处[21]。对于环氧胶浸纸材料，电导率的各向异性可能对套管芯体的电场分布和电荷积聚产生很大的影响。

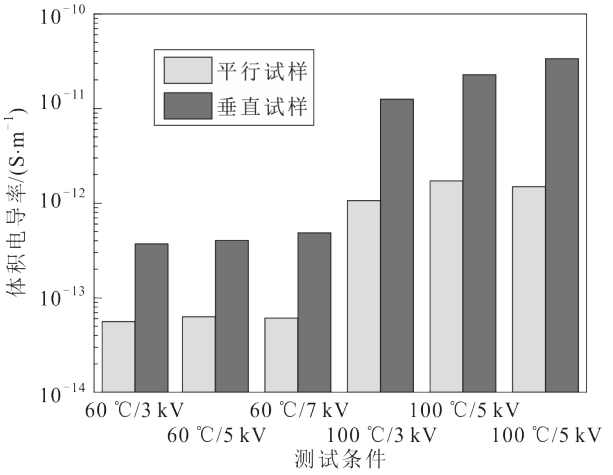


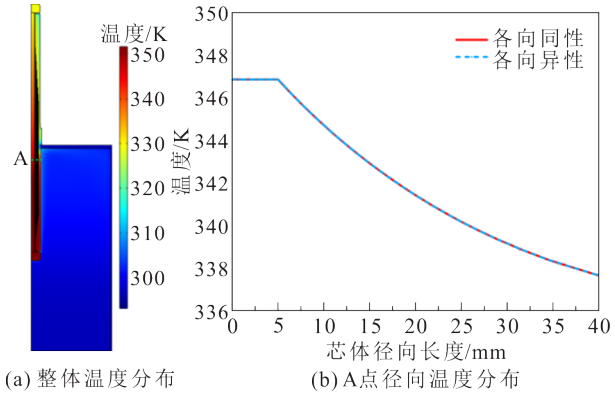
图 12　平行试样与垂直试样的电导率对比

Fig.12　Comparison of conductivities between parallel and vertical samples

4　多物理场仿真结果及分析

4.1　套管芯体温度场分布

在添加了 1 400 A 电流热源的条件下对缩比套管实体模型的温度场、电场和离子场进行了仿真分析，得到的温度场分布如图 13 所示。



(a) 整体温度分布 (b) A点径向温度分布

图 13 套管模型的温度分布

Fig.13 Temperature distribution of model bushing

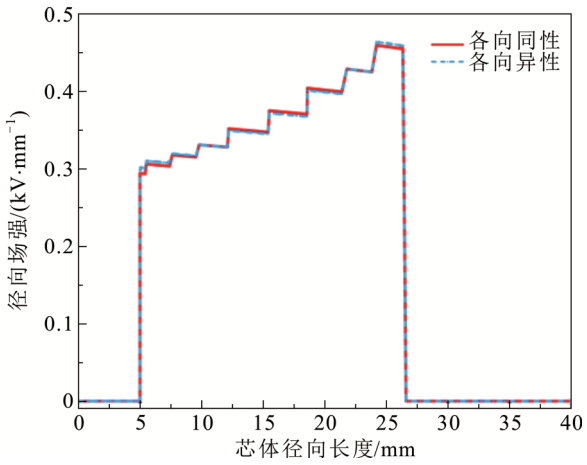


图 14 套管 A 处径向电场分布

Fig.14 Bushing radial electric field distribution

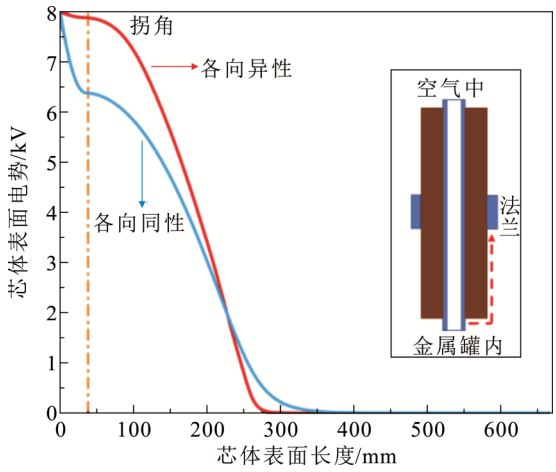


图 15 套管表面电势分布

Fig.15 Distribution of bushing surface potentials

当前仿真模型基于实验测试装置搭建，与直流套管真实运行环境存在一定差异。套管上端置于空气中，其散热快于处于金属罐内套管部分，导致存在纵向温度梯度，芯体表面位置越靠近法兰端，芯体温度越低。图 13(b)为距离套管端部 585 mm 的 A 处(靠近法兰端)的芯体径向温度分布，各向异性和各向同性材料仿真的温度分布几乎没有区别。图中在 0~5 mm 的位置为导电杆，所以其温度保持不变，5~40 mm 的位置为芯体材料，热量通过芯体材料与气体进行交换，所以温度逐渐降低，形成温度梯度。A 处的芯体的温度最高点为 346.9 K，最低点为 337.7 K，温度差为 9.2 K。

4.2 套管芯体径向电场分布

图 14 给出了在套管 A 处的径向电场分布，由于 0~5 mm 的位置为导电杆，在导电杆内部径向场强为零；在 26.6~40.0 mm 的位置为末屏到套管芯体表面部分，由于末屏接地，导致这一部分也没有径向电场。而在导电杆与末屏之间的位置，由于温度梯度的存在使得套管芯体的径向电场分布不再均匀，也存在电场梯度，并在每一层电容屏的位置处径向电场发生跳跃。在套管零屏位置的径向电场强度为 0.30 kV/mm，在末屏位置的径向电场强度为 0.46 kV/mm。考虑环氧胶浸纸的各向异性时，芯体的径向电场相较于各向同性在零屏、一屏和末屏的位置有小幅度的升高，而在三屏、四屏和五屏的位置有小幅度的降低，但相差不大。

4.3 套管芯体表面电势与电场分布

图 15 展示了套管芯体表面的电势分布，本图中及后续图中的小套管模型为对应测量结果的测试范围示意图。从图 15 可以看出，在套管气隙段(0~37.8 mm)，各向异性材料的套管表面电势相较于各向同性材料有很大的下降，各向异性材料在气隙段的表面电势从 8 kV 下降至 6.38 kV，下降率为 20.2%，而各向同性材料在这一段的表面电势 8 kV 下降至 7.88 kV，下降率仅为 1.5%，两者存在显著的差异。

图 16 展示了套管芯体表面 SF_6 侧的合成电场分布。从图中可以看出，在气隙段各向异性材料套管的表面合成场强最大为 1.43 kV/mm，而各向同性材料套管的表面合成场强最大为 0.12 kV/mm。各向异性材料套管的表面合成场强远大于各向同性材料套管的表面合成场强，是其的 11.9 倍。这是因为对于各向异性材料仿真而言，套管端部的电位与屏蔽罩的电位存在较大的电势差，这意味着气隙将承受更大的电场强度，更容易引发气隙的击穿放电从而导致套管表面发生沿面闪络。

4.4 套管芯体表面电荷积聚情况

图 17 展示了套管芯体表面的电荷分布。对于各向同性材料的芯体套管而言，正负电荷较为均匀的积聚在套管表面，正电荷积聚在套管端部的拐角处到靠近末屏的位置(31~230 mm)，最大电荷密度为 1.05×10^{-6} C/m^2，位于套管端部的拐角处；负电荷密度最大值为 4.503×10^{-7} C/m^2，位于套管末屏末端所处的位置。但是，对于考虑各向异性材料的模型而言，大量的负电荷积聚在套管端部，即气隙位置，电荷密度的最大值达到了 1.28×10^{-5} C/m^2，并且负电荷的积聚面积也扩大了，在套管端部的拐角处也是以负电荷为主。相对地，正电荷的积聚面积和积聚电荷密度相较于各向同性材料减小了，最大电荷密度也降低为 6.026×10^{-7} C/m^2。这也能够解释当套管芯体使用各向异性材料仿真后套管端部电势相较于各向同性材料大幅下降。

由于各向异性材料的 *z* 方向和 *phi* 方向的电导率明显大于 *r* 方向的电导率，使得载流子在芯体材料中通过 *r* 方向迁移的数量明显低于通过 *z* 方向的数量，即载流子在直流的作用下更容易沿着纸面迁移而不是穿过纸面迁移，所以法兰端的负电荷能够更容易沿芯体内部迁移到芯体的端部，使得芯体端部积聚大量的负电荷，导致套管端部电位的下降和合成场强的升高。这种情况在此前的仿真中并未被发现，说明不考虑环氧胶浸纸材料的各向异性将影响仿真结果的准确性，预示着真实套管有可能因为套管芯体端部和屏蔽罩之间的小间隙放电而引发套管的沿面闪络。

4.5 仿真结果验证

本文建立了如图 18 所示的实验平台，将一根环氧胶浸纸缩比套管的一端密封在金属容器中，另一端置于空气中，通过法兰连接。容器半径为 0.5 m，高 1 m，壁厚 10 mm，容器内充入 0.1 MPa 的 SF_6 气体，采用电位探头测试套管表面电位分布。电位探头选用 EFM-115 表面电位测试仪(Kleinwächter GmbH)，其测量精度为 5%。电位探头安装于金属罐内部的电动位移平台上，通过程序控制可以实现对套管表面一维不同位置的电位测量。测试时法兰和金属容器均接地，在空气中的套管屏蔽罩上加高压，等待芯体的表面电位稳定后开展测试。目前实验平台暂未设计加热装置，只能在室温下测量。

在套管导电杆上施加 8 kV 的直流电压，待电位分布稳定后得到套管表面电位的测量结果，与未添

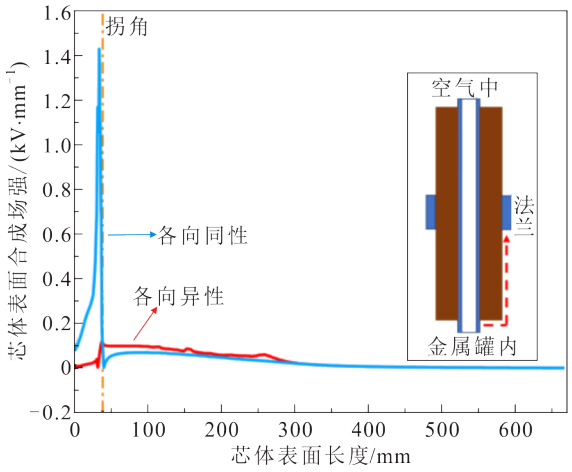


图 16 套管表面电场分布

Fig.16 Electric field distribution of bushing surface

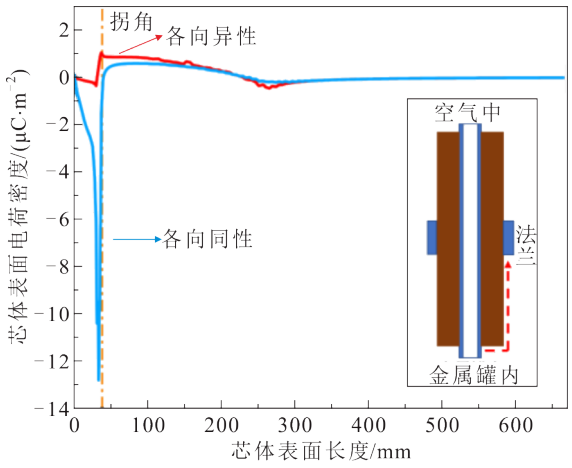


图 17 套管表面电荷积聚情况

Fig.17 Charge accumulation on bushing surface

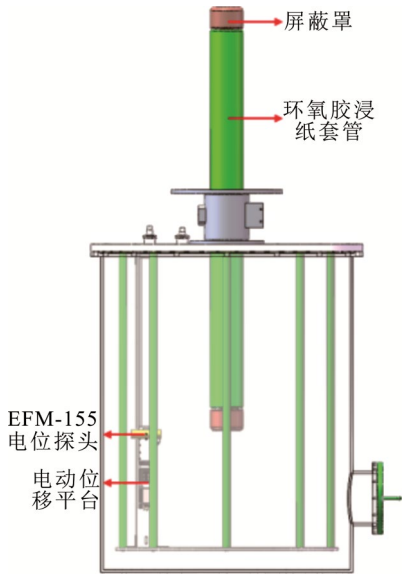


图 18 缩比套管实验平台示意图

Fig.18 Schematic of scaled bushing test platform

加 1 400 A 电流热源条件下的表面电势仿真结果对比如图 19 所示。

将图 19(b)与图 15 的表面电势仿真结果对比可以发现，未添加热源的表面电势仿真结果与添加热源的仿真结果相比，整体趋势变化一致，只是端部电位下降幅度更小，各向异性材料在拐角处为表面电势为 6.84 kV。这是因为添加热源后套管芯体内部的温度增加，导致环氧胶浸纸材料的在不同方向上的体积电导率差异更大(体积电导率各向异性更加明显，平行试样和垂直试样体积电导率的差异从 20 ℃下的 4.8 倍增加到 80 ℃下的 12.5 倍)，因此会出现端部电位的差异。而缩比套管的实测表面电势分布也与表面电势的仿真结果变化趋势相似，从套管端部拐角处到法兰处表面电势逐渐降低。虽然端部电位的实测结果与仿真结果有差异，但实际套管端部电位的降低也说明了仿真结果的合理性。实测套管芯体端部拐角处附近的电位只有不到 6 kV，意味着套管芯体端部拐角处和屏蔽罩之间的电压超过 2 kV，在套管芯体端部和屏蔽罩之间存在较高场强，该处的高场强对套管绝缘可能存在威胁。

本文还在–10 kV 的电源电压下对套管的表面电势进行了测量，为方便与 8 kV 的数据进行对比，进行了归一化处理如图 20 所示。从图中可以看出两者数据基本一致，说明了套管芯体表面电势测量的可靠性。同时，套管芯体绝缘材料端部电势相较于高压导体电势有 20%以上的下降，说明套管端部存在较高的电场。

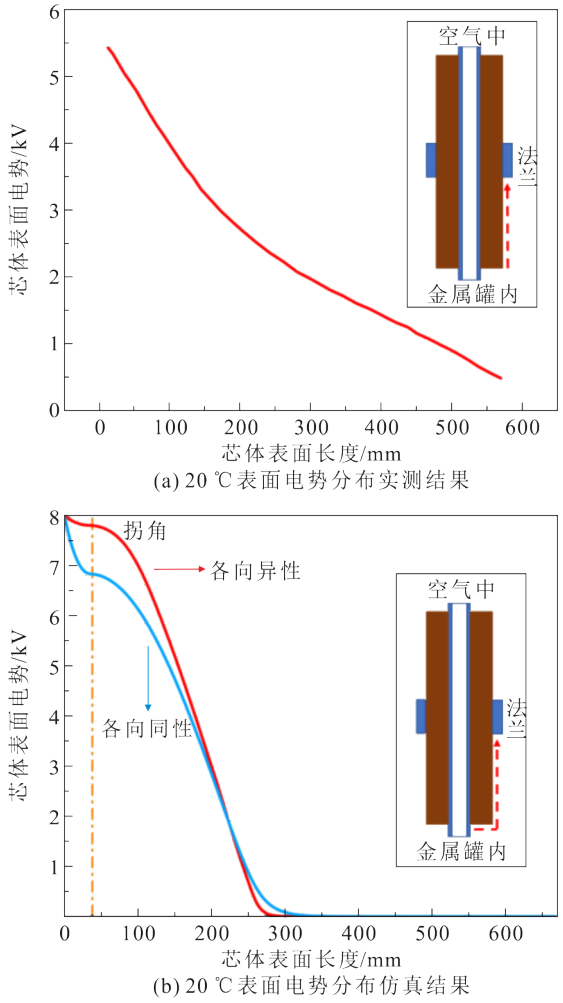


图 19 缩比套管表面电势对比

Fig.19 Comparison of the potential of scaled bushings

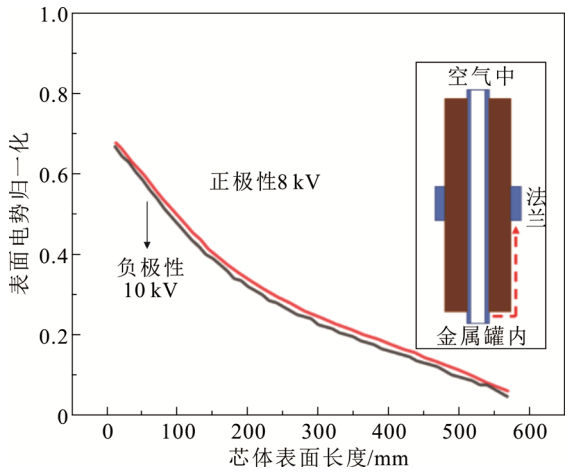


图 20 不同电源电压下的表面电位归一化对比

Fig.20 Normalized comparison of surface potential under different power supply voltages

5 结论

1）环氧胶浸纸材料的体积电导率存在明显的各向异性，在 60 ℃、2.5 kV/mm 的条件下垂直试样的电导率为平行试样电导率的 6.4 倍，温度高时该倍率更大。这可能与环氧和纸界面的陷阱态相关，环氧和绝缘纸的界面陷阱密度大于环氧内部，在电场的作用下，电荷通过入陷和出陷更容易沿着环氧和绝缘纸界面移动而不是穿过环氧内部。

2）在 1.5~3.5 kV/mm 的电场强度范围内，环氧胶浸纸材料体积电导率并没有发生大幅度的变化，可以认为其体积电导率在设计场强下与电场强度无关。但环氧胶浸纸材料在平行于纸面和垂直于纸面方向上的体积电导率均随温度的升高呈指数上升，温度升高时两者差异更加显著。在实际运行的套管中，温升引起各向异性更明显，可能增加在套管芯体表面积聚的电荷，不利于套管的绝缘。

3）套管导电杆的发热会使得套管芯体出现径

向的温度梯度，导致芯体的内部径向电场分布也出现梯度分布，不再是均匀分布。体积电导率的各向异性会导致套管端部积聚大量的异极性电荷，同时增大积聚范围。在材料电导率为各向同性的仿真中，套管端部的最大负电荷密度为 3.567×10^{-7} C/m^2，而在材料电导率为各向异性的仿真中，套管端部的最大负电荷密度达到了 1.28×10^{-5} C/m^2，两者相差 36 倍。由于环氧胶浸纸材料的各向异性，载流子在直流的作用下更容易沿着纸面迁移而不是穿过纸面迁移，所以负电荷能够更容易沿绝缘纸面迁移从而聚集到芯体的端部，而不是沿着芯体径向迁移。这些额外积聚的负电荷使得套管端部的表面电位相较于各向同性仿真时大幅减小，芯体表面 SF_6 侧的合成电场也出现严重的畸变，预示着真实套管可能由于套管芯体端部和屏蔽罩之间的小间隙放电而引发套管的沿面闪络。

参考文献 References

[1] 刘 杉，侯俊义，周建辉，等. 基于强制空气冷却的换流变阀侧套管设计及特性[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4478-4487.
LIU Shan, HOU Junyi, ZHOU Jianhui, et al. Design and characteristics of side bushing of converter valve based on forced air cooling technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4478-4487.

[2] 王流火，陶雄武，周俊宏，等. 550 kV/8 000 A 大容量 SF_6 充气式套管温升特性的仿真研究[J]. 高电压技术，2024，50(3)：986-993.
WANG Liuhuo, TAO Xiongwu, ZHOU Junhong, et al. Simulation research on temperature rise characteristics of 550 kV/8 000 A large capacity SF_6 inflatable bushing[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 986-993.

[3] 刘泰蔚，谢雄杰，罗晓庆，等. 基于电热耦合的油纸绝缘套管内部压强变化特性[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3636-3643.
LIU Taiwei, XIE Xiongjie, LUO Xiaoqing, et al. Internal pressure change characteristics of oil-impregnated paper bushing based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3636-3643.

[4] 谢更生，史石峰，王琪林，等. ±800 kV 换流变阀侧套管温度场仿真与大电流温升试验分析[J]. 高电压技术，2024，50(3)：994-1002.
XIE Gengsheng, SHI Shifeng, WANG Qilin, et al. Simulation and experimental analysis of ±800 kV converter transformer valve-side bushing under high current[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 994-1002.

[5] 张书琦，李金忠，汤 浩，等. 特高压直流套管气-固界面长时闪络放电特性及其影响因素[J]. 中国电机工程学报，2024，44(14)：5776-5786.
ZHANG Shuqi, LI Jinzhong, TANG Hao, et al. Long-time flashover discharge characteristics of gas-solid interface of UHVDC bushing and its influencing factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5776-5786.

[6] 王青于，杨 熙，彭宗仁，等. 应用三维电磁-热-流耦合场分析法计算换流变压器干式套管的温度场分布[J]. 中国电机工程学报，2016，36(22)：6269-6275.
WANG Qingyu, YANG Xi, PENG Zongren, et al. 3D coupled electromagnetic-thermal-fluid method for computation of temperature field of converter transformer RIP bushings[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6269-6275.

[7] 傅明利，梁虎成，杜伯学，等. 非线性电导环氧树脂复合材料在±600 kV 换流变压器套管中的应用仿真研究[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1476-1482.
FU Mingli, LIANG Hucheng, DU Boxue, et al. Simulation research on the application of epoxy resin with nonlinear conductivity in the ±600 kV converter transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1476-1482.

[8] CHEN M, LIU X D, SUN Y H, et al. Influence of material volume conductivity on electric field and surface charge of RIP valve-side bushing core under DC electro-thermal coupling stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 164-171.

[9] KURITA A, TAKAHASHI E, OZAWA J, et al. DC flashover voltage characteristics and their calculation method for oil-immersed insulation systems in HVDC transformers[J]. IEEE Power Engineering Review, 1986, PER-6(7): 51-52.

[10] TAKAHASHI E, SHIRASAKA Y, OKUYAMA K. Analysis of an anisotropic nonlinear electric field with a discussion of dielectric tests for converter transformers and smoothing reactors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1480-1486.

[11] 吕晓德，陈世坤，孙定华，等. 各向异性非线性直流电场数值算法研究[J]. 电工技术学报，1998，13(4)：60-64.
LÜ Xiaode, CHEN Shikun, SUN Dinghua, et al. The study on numerical method for anisotropic nonlinear DC electric field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(4): 60-64.

[12] 李锦彪，谢德馨. 直流输电换流变压器各向异性非线性直流电场的自适应有限元分析[J]. 变压器，2007，44(12)：13-16.
LI Jinbiao, XIE Dexin. Adaptive FE analysis of nonlinear and anisotropic DC electric field in converter transformer for DC transmission[J]. Transformer, 2007, 44(12): 13-16.

[13] 李冬雪，李 岩，李晓辉. 换流变压器各向异性直流电场的有限元计算[J]. 高压电器，2012，48(6)：18-22.
LI Dongxue, LI Yan, LI Xiaohui. Finite element calculation of anisotropic DC electric field in converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 18-22.

[14] 张博雅，张贵新. 直流 GIL 中固-气界面电荷特性研究综述I：测量技术及积聚机理[J]. 电工技术学报，2018，33(20)：4649-4662.
ZHANG Boya, ZHANG Guixin. Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, part I: measurement and mechanisms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4649-4662.

[15] 罗 毅，唐 炬，潘 成，等. 直流 GIS/GIL 盆式绝缘子表面电荷主导积聚方式的转变机理[J]. 电工技术学报，2019，34(23)：5039-5048.
LUO Yi, TANG Ju, PAN Cheng, et al. The Transition mechanism of surface charge accumulation dominating way in DC GIS/GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 5039-5048.

[16] CHEN J H, XUE J Y, DONG J H, et al. Effects of surface conductivity on surface charging behavior of DC-GIL spacers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 1038-1045.

[17] STRAUMANN U, SCHULLER M, FRANCK C M. Theoretical investigation of HVDC disc spacer charging in SF_6 gas insulated

systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2196-2205.

[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] ZHOU H Y, MA G M, LI C R, et al. Impact of temperature on surface charges accumulation on insulators in SF6-filled DC-GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 601-610.

[20] 刘 杉，高 冲，侯俊义，等. 基于去离子水冷却±800 kV 换流变压器阀侧套管的冷却效果和参数的影响[J]. 电工技术学报，2024，39(12)：3884-3894.
LIU Shan, GAO Chong, HOU Junyi, et al. Cooling effect and effect of parameters of the deionized water cooling based ERIP type bushing of ±800 kV converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3884-3894.

[21] GONG S, ZHU Z H, MEGUID S A. Anisotropic electrical conductivity of polymer composites with aligned carbon nanotubes[J]. Polymer, 2015, 56: 498-506.



蓝博涵
2000—，男，硕士生
主要从事直流套管环氧胶浸纸电荷分布及材料特性方面的研究工作
E-mail: lbh3122104224@stu.xjtu.edu.cn

LAN Bohan



丁卫东(通信作者)
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事气体放电、高电压测量和脉冲功率技术方面的研究工作
E-mail: wdding@.xjtu.edu.cn

DING Weidong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-03-24 在线出版日期 2025-06-06 编辑 曹昭君