第 52 卷 第 5 期：2086-2100 高电压技术 Vol.52, No.5: 2086-2100
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251005

换流变阀侧套管环氧浸纸芯体模型气-固界面电荷积聚特性

李 杨[1]，王青于[1]，史石峰[1]，刘 鹏[1]，彭宗仁[1]，刘 智[2]
（1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049;
2. 西安西电高压套管有限公司，西安 710077）

摘 要：特高压换流变阀侧套管是直流输电工程中的核心设备，对于电网的安全稳定运行具有重要作用。然而，近年来换流变阀侧套管 SF_6-芯体气-固界面频繁发生沿面闪络故障，而气固界面电荷分布直接影响其绝缘性能，因此掌握 SF_6-芯体气-固界面电荷聚特性对于维护换流变阀侧套管的安全稳定运行具有重要意义。为此搭建了换流变阀侧套管芯体模型气固界面电荷测量系统，在 SF_6 气体环境中测量了环氧浸纸芯体缩比模型在直流电压下的表面电荷短时分布特性与长时分布特性。试验发现，直流电压下芯体气固界面电荷分布呈现 2 种分布模式，即由芯体结构决定的基本模式以及由芯体表面状况决定的单极性电荷斑模式。最后通过仿真分析，探究了芯体固体电流、气体电流以及表面电流作用项对芯体表面电荷积聚过程的影响，得出表面电流作用项是芯体模型表面电荷积聚的主要影响因素的结论。

关键词：阀侧套管；环氧浸纸芯体；气固界面；反演；表面电荷积聚

Charge Accumulation Characteristics of Gas-solid Interface in Glue-impregnated Paper Core Model of Valve-side Bushing of Converter Transformer

LI Yang[1], WANG Qingyu[1], SHI Shifeng[1], LIU Peng[1], PENG Zongren[1], LIU Zhi[2]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. Xi'an Xidian High Voltage Bushing Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The valve-side bushing of ultra-high voltage (UHV) converter transformers is a key component in DC power transmission systems, playing a critical role in ensuring the safe and stable operation of the power grid. However, in recent years, surface flashover failures have frequently occurred at the SF_6-solid insulation interface of valve-side bushings, and the surface charge distribution at this interface directly affects insulation performance. Therefore, understanding the charge accumulation characteristics at the SF_6-solid interface is essential for maintaining the safe and stable operation of valve-side bushings. In this study, a charge measurement system was developed to assess the gas-solid interface of a scaled epoxy-impregnated paper model of a valve-side bushing. Surface charge distributions were measured under DC voltage in an SF_6 environment, including both short-term and long-term behaviors. Experimental results reveal that two charge distribution patterns appear under DC voltage,namely, a fundamental pattern determined by the bushing structure, and a unipolar spot pattern influenced by surface conditions. Finally, simulation analysis was conducted to investigate the effects of solid current, gas current, and surface current components on surface charge accumulation.It is concluded that the surface current components is the main influencing factor of the core model surface charge accumulation.

Key words: valve-side bushing; epoxy impregnated paper core; gas-solid interface; inversion algorithm; surface charge accumulation

0 引言

特高压换流变阀侧套管是换流变压器与阀塔实现电气连接的重要设备[1-2]，在直流输电工程中发挥着重要作用。然而，近年来国产特高压换流变压器阀侧套管内部胶浸纸电容芯体沿面闪络放电故障频发，2022 年豫南换流站、2023 年金沙江换流站各发生一起±800 kV 换流变阀侧套管内部闪络放电故障，表征均为内部电容芯体气-固界面贯通性沿面闪络[3]，在故障分析过程中均发现直流电压下芯体气-

基金资助项目：国家自然科学基金(U25B20195)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (U25B20195).

固界面电荷积聚现象明显且对沿面绝缘性能存在显著影响[4-6]。因此，研究换流变压器阀侧套管胶浸纸芯体气固界面的电荷积聚特性，获取电荷积聚对胶浸纸芯体沿面绝缘性能的影响，对于提升国产套管可靠性能具有重要意义。

特高压换流变压器阀侧套管运行工况复杂，SF_6-环氧浸纸芯体气固复合绝缘系统的直流电场建立是一个由容性分布逐渐向阻性分布过渡的过程，涉及电、热、力以及气固界面电荷积聚多种因素的影响[7-10]。国内外学者已经对直流条件下的气固界面电荷积聚进行了大量研究。Volpov 等建立了 SF_6 与环氧绝缘系统的直流暂态场仿真计算模型[11]，通过电流连续性方程，将气固界面的导电层简化为表面电荷密度随时间变化的微分方程[12]。薛建议等通过测量 SF_6 气体中盆式绝缘子模型的表面电荷分布，认为同极性电荷依靠绝缘子表面电导和体积电导，而异极性电荷来源于气体电导[13]。齐波等发现，在 SF_6 环境中操作冲击电压作用下，绝缘子表面负极性电荷积聚程度高于正极性电荷[14]。王青于等仿真研究了换流变阀侧套管芯体与 SF_6 气固界面的电荷积聚过程[7]，发现在 10^6 s 时气固界面电荷仍在缓慢增长，仅达到稳态值的 67%，这表明电荷积聚是一个长期、缓慢变化的过程。薛建议、罗毅等通过仿真计算，发现温度梯度的存在增加了体传导电流，加剧了表面电荷的积聚[15-16]。

然而，直流电压下气固界面电荷积聚特性的研究大多围绕盆式绝缘子开展，换流变压器阀侧套管环氧浸纸芯体气固界面电荷积聚特性的研究报道较少。因此，为了进一步掌握换流变压器阀侧套管胶浸纸芯体气固界面电荷积聚特性，本文设计了内含三层电容屏的环氧浸纸芯体模型，并搭建了一套胶浸纸芯体模型电荷测量系统，获取了直流电压下 SF_6 气氛中环氧浸纸芯体模型的气固界面电荷积聚分布特性。研究成果可为国产换流变压器阀侧套管电容芯体设计提供理论指导，促进换流变阀侧套管运行可靠性提升。

1　试验装置及测量系统

1.1　芯体模型表面电位测量系统

芯体模型表面电位测量系统如图 1 所示。该系统由密封腔体、运动控制系统、静电电位计(Model 341B)与静电探头(Trek 3455ET)、真空泵、数据采集卡与数据存储模块组成。试验测量时，由直线伺服电机带动静电探头在芯体表面沿芯体轴向方向进行运动，运动完成后，由旋转伺服电机带动芯体模型实现圆周方向的运动，如图 2 所示的“s”型路径运动实现对整个芯体模型下端部表面电位的测量。

芯体模型以环氧浸纸为主绝缘材料。芯体模型尺寸如图 2 所示，芯体模型由中心导杆、内部 3 层电容屏(由内至外依次为 0 屏、悬浮屏、末屏，电容屏间的厚度为 4.5 mm)以及接地法兰组成。施加直流电压−10 kV 下的罐体内部电场分布与芯体沿面电场分布如图 3 所示。芯体模型沿面切向场强最大值为 0.17 kV/mm，与±800 kV 换流变阀侧套管芯体沿面最大切向场强接近。在 0~100 mm 范围内芯体模型沿面电场以法向分量为主，且受模型内部电容屏边缘影响，沿面电场分布呈现弯折状态。设计的芯体模型具有等效套管芯体沿面电场的特征，可用于模拟实际直流套管电容屏边缘对芯体表面电荷积聚影响的研究。

1.2　试验准备

试验前用无水乙醇擦拭芯体表面，去除芯体表面的杂质，擦拭完成后将芯体模型放置在 100 ℃的真空烘箱中，烘干 15 d 以上，排除芯体受潮因素对试验的干扰。经 TR100 粗糙度测量仪测量，芯体表面粗糙度 R_a 约为 5.5 μm。试验开始前，将烘干好的芯体在密封腔体内安装好，关闭试验腔体门板，进

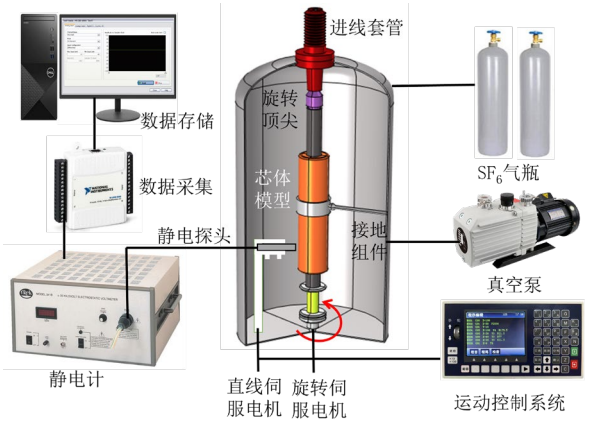


图 1　芯体模型表面电位测量系统

Fig.1　Surface potential measurement system

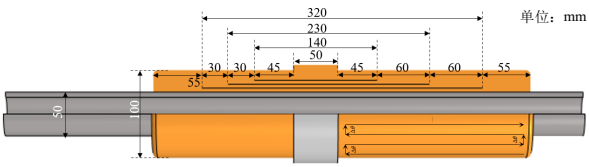


图 2　芯体模型尺寸及测量路径

Fig.2　Core model size and measurement path

行抽真空操作。当腔体内部的气压低于 50 Pa 时，充入 0.1 MPa 的 SF_6。

2 芯体表面电荷积聚特性

2.1 表面电荷反演方法

将芯体模型表面划分为 N 个单元(轴向方向 m 个单元，圆周方向 n 个单元，$N=m\times n$)，作为反演计算过程中单位电荷施加单元，构建反演过程中的电位电荷关系矩阵。芯体表面电荷反演方法选用维纳滤波方法。芯体表面电位与表面电荷的关系[17]可以表示为：

$$\boldsymbol{\varphi}_{N\times1}=\boldsymbol{H}_{N\times N}\boldsymbol{\sigma}_{N\times1}=\begin{pmatrix}h_{11}&\cdots&h_{1N}\\ \vdots& &\vdots\\ h_{N1}&\cdots&h_{NN}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \vdots\\ \sigma_N\end{pmatrix} \tag{1}$$

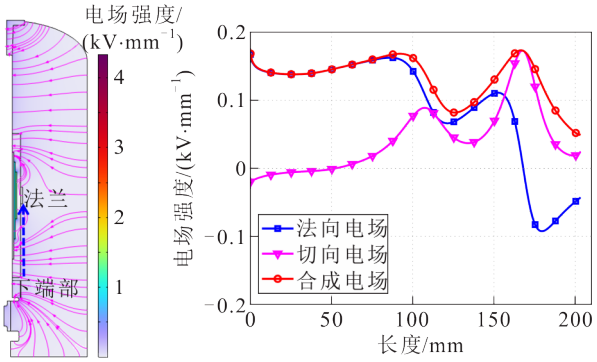


图 3 −10 kV 直流电压下罐体内及芯体沿面电场

Fig.3 Electric field in the tank body and along the core surface under −10 kV DC voltage

式中：$\boldsymbol{\varphi}_{N\times1}$ 为各测量点的表面电位；$\boldsymbol{\sigma}_{N\times1}$ 为各测量点的表面电荷密度；$\boldsymbol{H}_{N\times N}$ 为电位电荷关系矩阵；h_{ij} 为 j 位置的单位电荷密度在测量点 i 处的电位响应。基于维纳滤波反演方法与 Tikhonov 正则化方法，芯体表面电荷密度 $\boldsymbol{\sigma}_\lambda$[18]可由式(2)求得。

$$\boldsymbol{\sigma}_\lambda=\left(\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}+\alpha\boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi} \tag{2}$$

式中：α 的取值为 $\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}$ 最大特征值，为 0.03%~1%[19]。

2.2 表面电荷短时分布基本特征

试验测量了加压时长 2 h，±5、±10、±15、±20 kV 直流电压下的环氧浸纸芯体模型的表面电位分布。为兼顾芯体表面电位测量速度与芯体表面电位采样数据量，选取轴向方向 m=102 个数据点、圆周方向上 n=36 个数据点(即在圆周方向上间隔 10°测量)，整个采样过程耗时约 2 min。通过反演得到芯体模型表面电荷分布。直流电压下，芯体表面电荷密度分布如图 4 所示。从试验测量结果可以看出，带有 3 层电容屏的芯体模型在施加直流电压 2 h 条件下，芯体表面电荷分布呈现 2 种分布模式。一种表现为沿着轴向方向从芯体下端部到法兰处，表面电荷“峰”“谷”交替出现(基本模式)；另一种表现为在同一轴向高度，沿着同一圆周方向，芯体表面电荷分布极性基本一致，但由于芯体表面状态的差异(环氧树脂与浸渍纸交替出现)，芯体表面电荷密度幅值存在高低差异(电荷斑模式)。

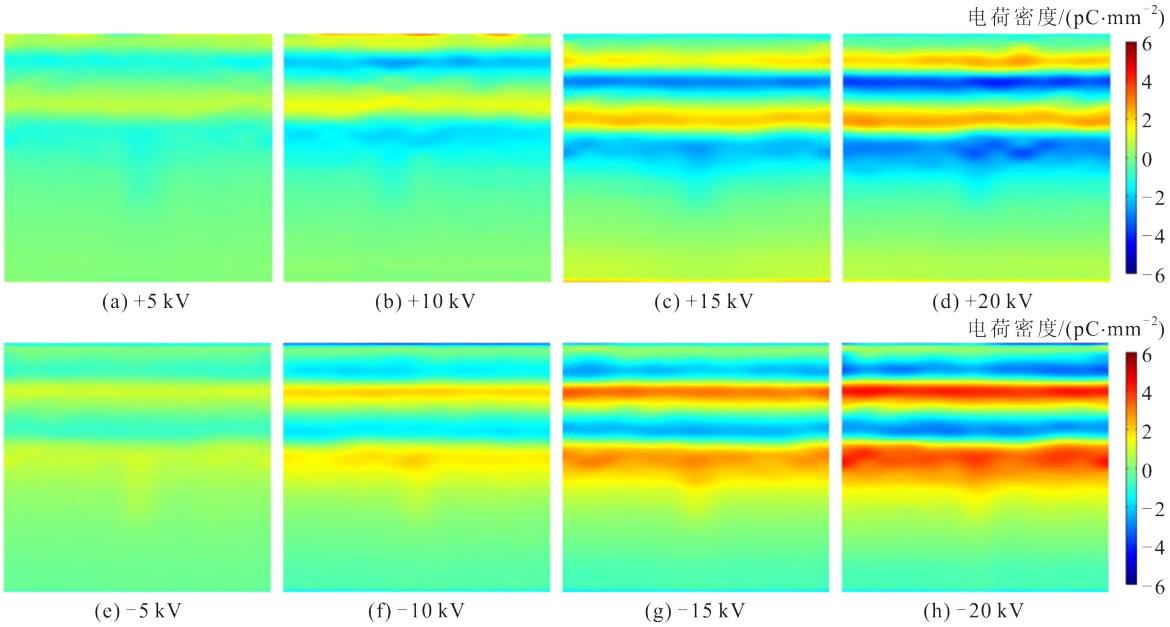


图 4 SF_6 中不同电压幅值 2 h 下芯体表面电荷分布

Fig.4 Charge distribution of core surface under different voltage amplitudes of 2 h in SF_6

为更清晰地展示芯体模型表面电荷分布，在圆周方向上选取 n=180 个数据点，即在圆周方向上间隔 2°进行 1 次测量。测试得到芯体表面电荷在−10 kV 直流电压下 2 h 的分布结果如图 5 所示。由于芯体模型测量范围较大，定位电荷斑位置缺少参照，选用 30 mm 长铝丝与尼龙丝固定在芯体模型表面，铝丝与尼龙丝方向与导杆竖直方向相同，二者在圆周方向上间隔 180°。经测试，可发现铝丝与尼龙丝位置，对应试样圆周面展开实物形貌(见图 6)，可发现 3 处较为明显的由材料表面皱纹纸与浸渍纸交界引起的电荷斑，但仍有较多的交界区域与电荷斑位置不能一一对应。之所以未完全按照表面深浅颜色区域出现电荷斑，是因为表面电荷的积聚本质是固体电流、气体电流与表面电流竞争的结果，芯体表面局部的材料差异有助于电荷斑的形成。

使用 260 目砂纸打磨芯体表面，经 TR100 粗糙度测量仪测量，芯体表面粗糙度 R_a 约为 1.5 μm。从图 7 的表面电荷分布可以看出，表面的电荷斑显著减少。可见，适当提高芯体表面光洁度能减少表面材料的局部差异，从而减少电荷斑的形成。

2.3　芯体表面电荷分布基本模式提取

芯体模型是二维轴对称圆柱体结构，理想情况下，芯体表面的电荷分布仅在轴向方向变化，而在圆周方向保持不变。为提取芯体表面电荷分布的基本模式，排除电荷斑模式的干扰，采用统计学中的四分位法，提取出芯体表面电荷分布的基本模式。找到距离芯体下端面某一高度的圆周方向表面电荷密度的最大值 q_{max} 与最小值 q_{min}，将其均匀地划分为 4 个区间。区间宽度为 $d_q=(q_{max}-q_{min})/4$，所以各个区间为 $[q_{min}, q_{min}+d_q)$、$[q_{min}+d_q, q_{min}+2d_q)$、$[q_{min}+2d_q, q_{min}+2d_q)$、$[q_{min}+2d_q, q_{min}+3d_q)$、$[q_{min}+3d_q, q_{max}]$[20]。

图 8 为−10 kV 下，施加直流电压 12 h 的距离芯体下端部 20 mm 处圆周方向的统计结果。将频数最大的 1 组取平均值作为该圆周方向基本模式的平均电荷密度值。按照四分位法，将所有轴向高度圆周方向上的平均电荷密度值计算出来，从而得到芯体表面电荷的基本分布模式。

通过准均匀 B 样条基函数对芯体表面电荷基本分模式进行拟合[21]，得到如图 9 所示的从芯体下端部到法兰处的表面电荷密度分布基本模式。从图 10 提取的各电压幅值下的芯体表面电荷密度曲线可以看出，随着施加电压幅值的提高，芯体表面电荷密度幅值逐渐增大，沿轴向方向“峰”“谷”交替分布的基本模式分布保持不变。并且正、负极性电压下的表面电荷密度曲线基本关于 y=0 轴对称。

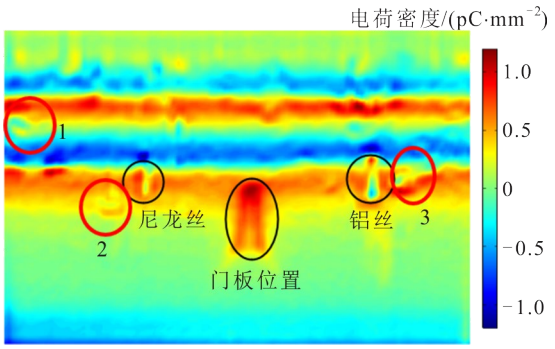


图 5　−10 kV 下 2 h 芯体表面电荷分布

Fig.5　Surface charge distribution of core at −10 kV for 2 h



图 6　芯体表面形貌圆周方向展开

Fig.6　Surface morphology of the core which is expanded in the circumferential direction

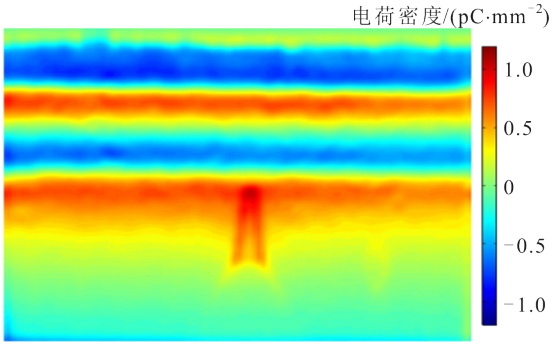


图 7　芯体打磨后表面电荷分布

Fig.7　Surface charge distribution after grinding

图 11 为通过四分位法与准均匀 B 样条基函数拟合得到的−10 kV 下 12 h 内的沿轴向方向的表面电荷分布基本模式。随着加压时间的增加，芯体表面的电荷密度逐渐增大，正、负电荷密度中心随着时间增加电荷密度幅值不断增加。在施加电压 2 h 时，芯体模型的表面电荷分布基本模式已经显现。表面电荷积聚时间 12 h 内，芯体表面电荷的积聚形态基本保持不变。

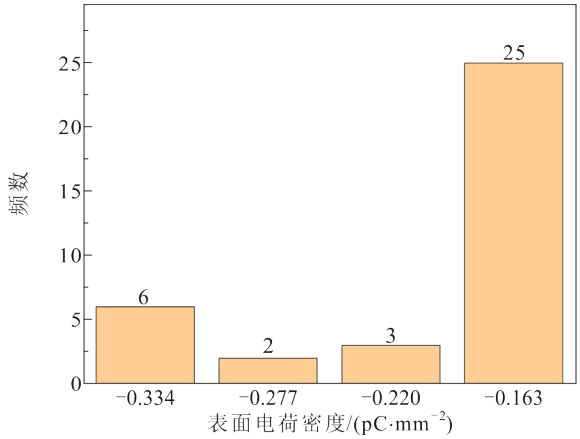


图 8 圆周方向电荷密度分布统计

Fig.8 Statistics of charge density distribution in the circumferential direction

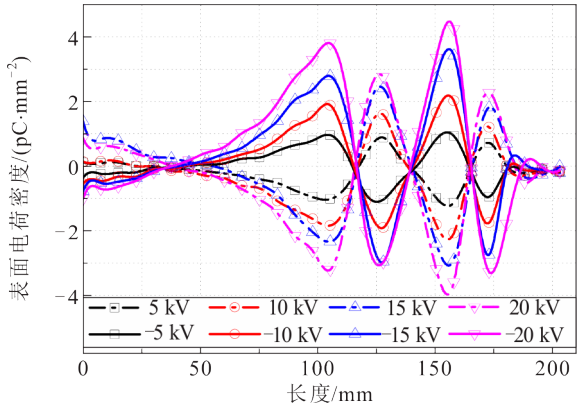


图 10 芯体表面电荷分布

Fig.10 Distribution of core surface charge

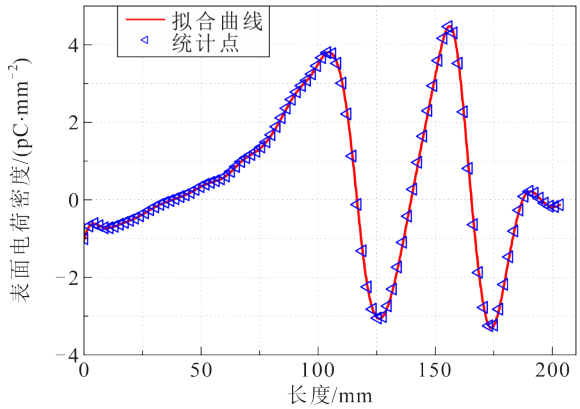


图 9 统计点与拟合曲线

Fig.9 Statistical points and fitting curves

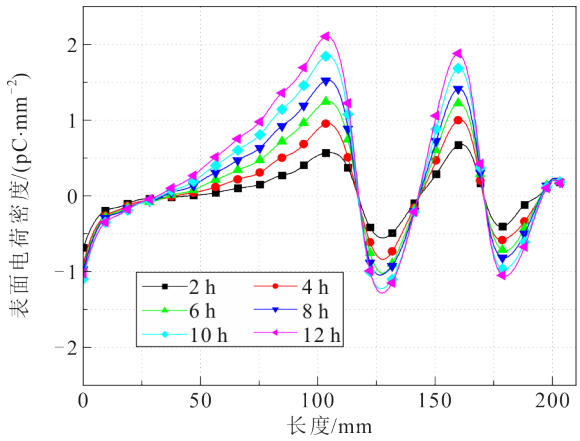


图 11 −10 kV 下 12 h 内芯体表面电荷分布

Fig. 11 Charge distribution of core surface within 12 h at −10 kV

图 12 为各施加电压下芯体模型下端部气侧沿面直流电场分布与 2 h 表面电荷积聚曲线的对比结果。其中，法向电场正方向规定为气体侧指向固体侧，切向电场正方向规定为芯体法兰侧指向下端部。从图 12(d)可以看出，沿面直流电场与表面电荷密度曲线凹凸性基本一致，但存在峰谷位置偏移的现象，这可能与正负电荷在切向电场下的迁移有关。法向电场在 167 mm 位置存在正负方向转变，在 0~167 mm 区间为正，在 167 mm 后为负。结合 2.5 节表面电荷长时积聚导致的表面电位增长曲线，分析可知法向电场是驱动气体侧异极性电荷迁移运动并在芯体模型表面积聚的主要动力[17]。

2.4 表面电荷分布统计分析

芯体表面电荷量[22]定义为：

$$Q_{+}=\sum(\sigma_{+}s) \tag{3}$$

$$Q_{-}=\sum(|\sigma_{-}|s) \tag{4}$$

$$Q_{\mathrm{sum}}=\sum(|\sigma_{+}+\sigma_{-}|s) \tag{5}$$

式中：Q_{+}与 Q_{-}分别为芯体表面的正、负极性电荷量量；Q_{sum}为净电荷量；σ_{+}与 σ_{-}分别为反演得到的芯体表面正、负电荷密度；s 为反演划分单元的面积。

在±5、±10、±20、±30 kV 电压下，芯体表面的正电荷量、负电荷量以及净电荷量在 12 h 内的数值变化如图 13 所示。结果表明：在各电压幅值下，芯体表面异极性电荷随着积聚时间的增加会逐渐增加，同极性电荷会经历一个短暂的增加阶段迅速进入饱和状态，之后缓慢减少。

2.5 表面电荷长时积聚特性

为检验芯体模型在长时间的表面电荷积聚特性，将−10 kV 下的芯体进行 20 d 的电荷积聚试验，发现在长时间的积聚过程中同极性电荷逐渐消失，芯体表面整体积聚异极性电荷，并且芯体端部的电荷积聚逐渐增加。在−10 kV 直流电压作用下，进行

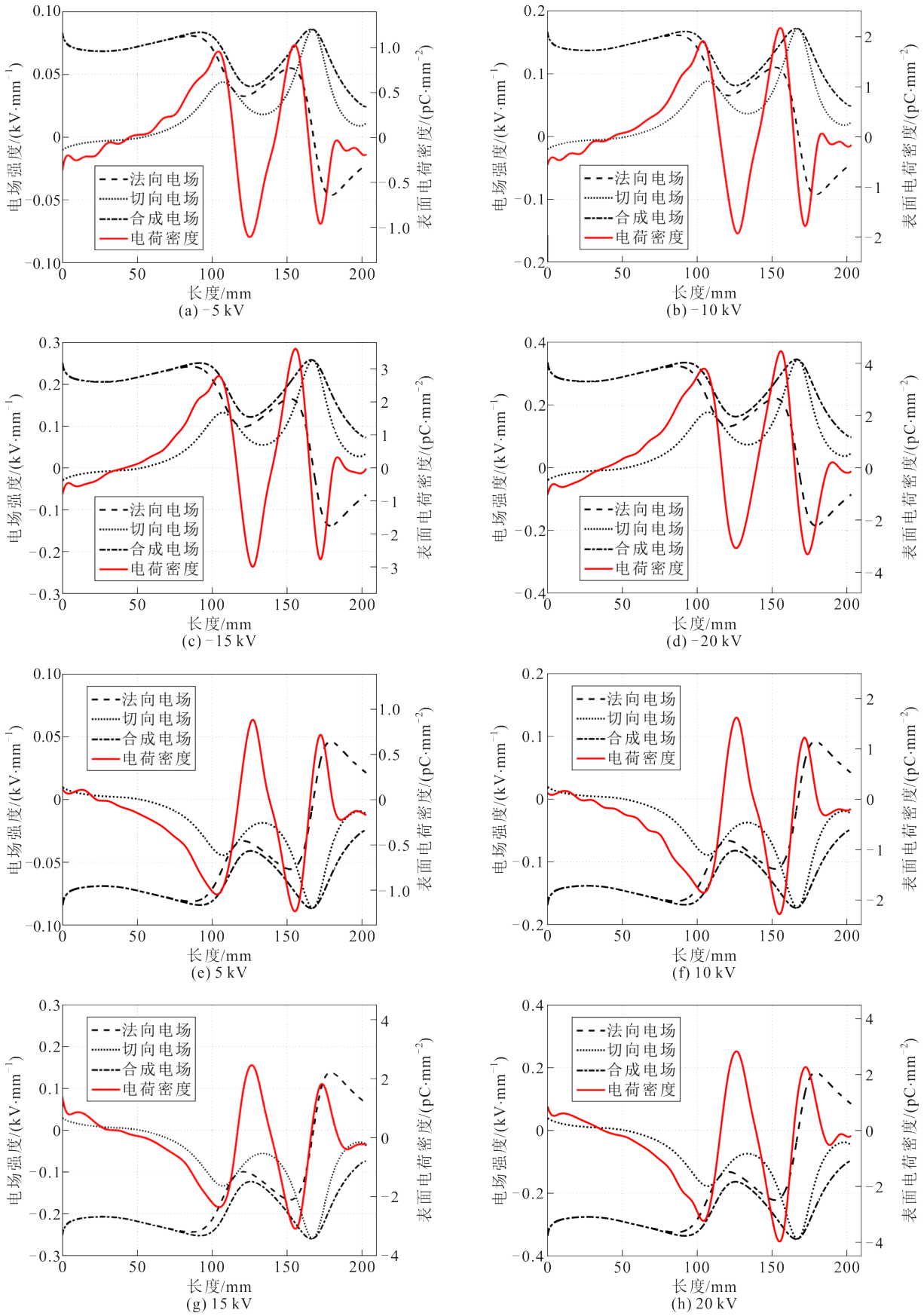


图 12　各施加电压下气侧沿面电场与 2 h 电荷密度分布曲线

Fig.12　Electric field along gas side under each applied voltage and charge density curve of 2 h

了为期 456 h 的电荷积聚试验。芯体表面电荷分布随时间变化如图 14 所示，随着时间的增加，芯体模型表面电荷保持“峰”、“谷”交替分布的基本模式，芯体表面电荷密度逐渐增大。结果表明，短时间内芯体表面电荷积聚难以达到平衡状态，胶浸纸芯体气固界面电荷积聚是一个长时间的动态变化过程。

图 15(a)为芯体表面电位 456 h 积聚分布曲线，模型下端部的电位在 24 h 内表现为逐渐降低，整体电位峰值增加。在 24~48 h 之间，发生积聚模式的转变，模型下端部电位不断升高，正电荷不断积聚，

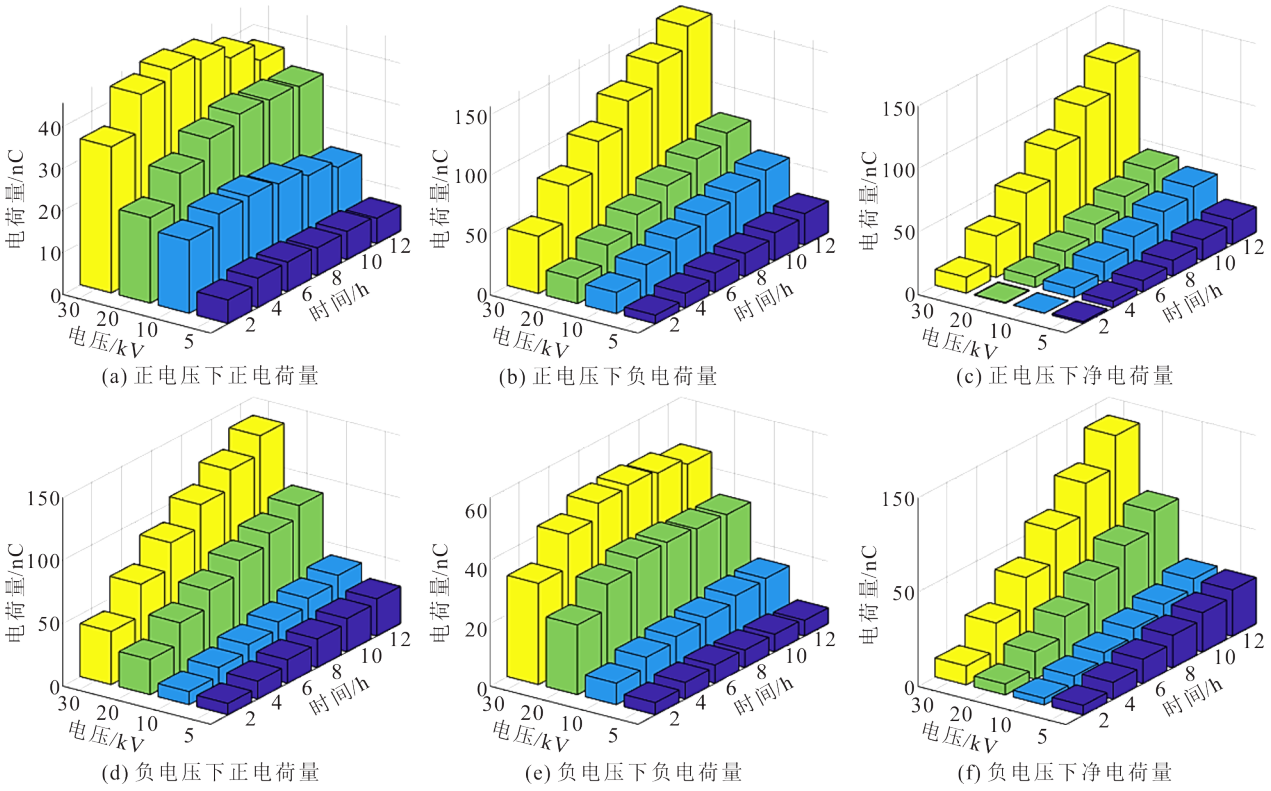


图 13 正、负电荷量及净电荷量

Fig.13 Positive and negative charges and net charges

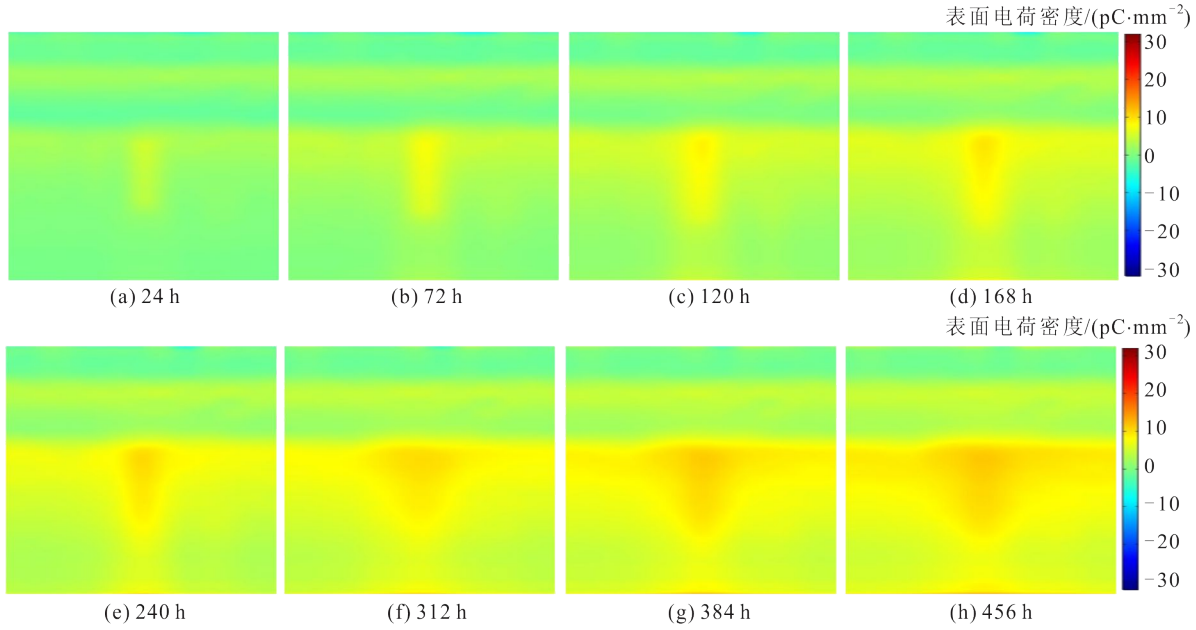
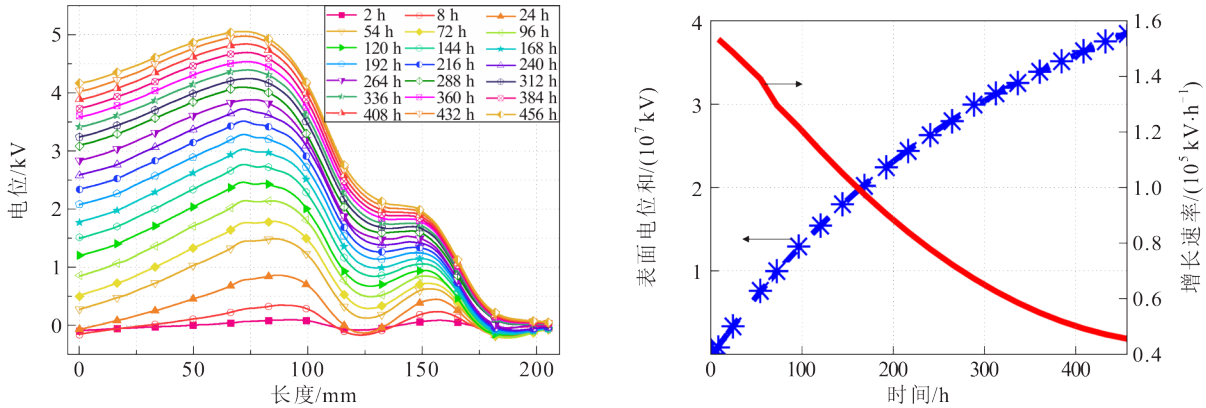


图 14 456 h 内芯体表面电荷密度分布

Fig.14 Charge density distribution of core surface within 456 h

芯体表面同极性电荷逐渐消失，向着异极性电荷积聚的模式转变，其中气体侧、固体侧、以及表面电流密度与表面电荷密度的变化过程在 3.2 节进行了仿真分析。将沿面路径芯体电位总和随时间分布用多项式函数进行拟合，从图 15(b)可以看到，芯体表面电位总和在积聚过程中虽然逐渐增加，但增长速度逐渐降低，芯体表面电荷逐渐趋于饱和状态。

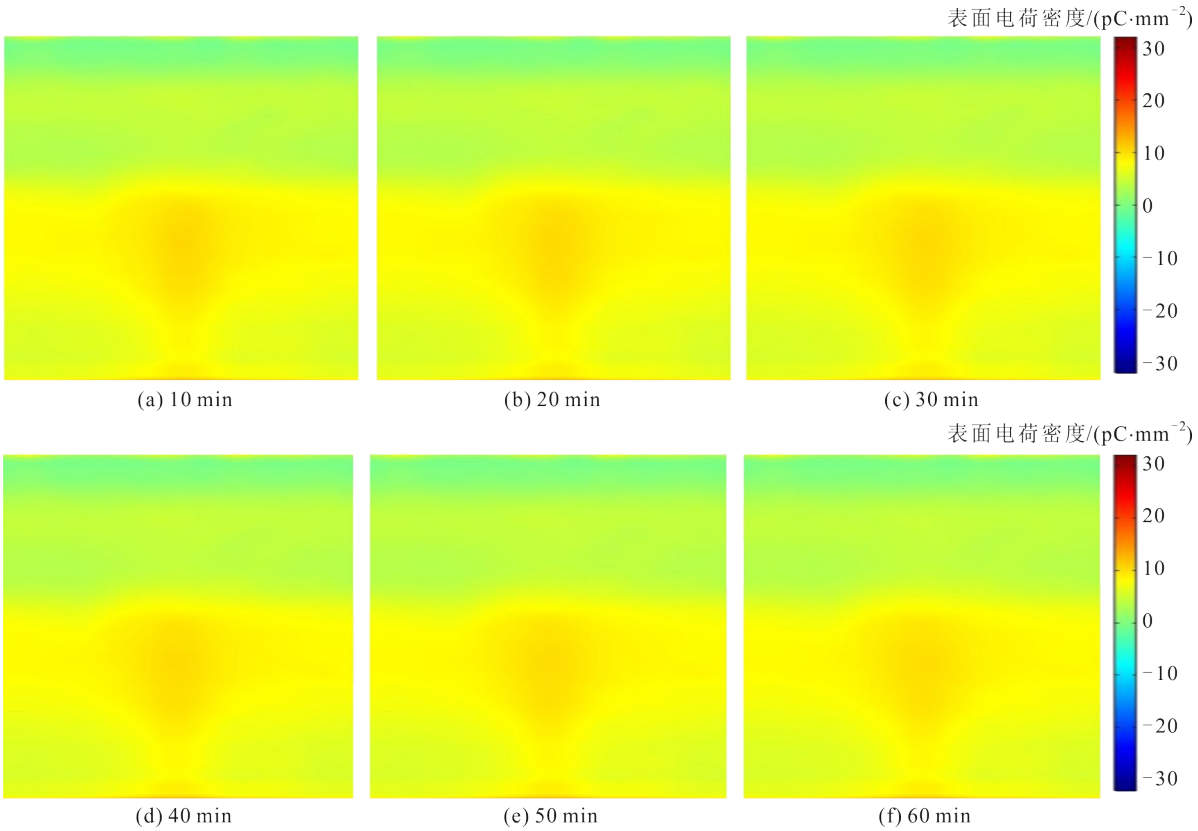
在去压之后，每隔 10 min 进行 1 次测量，测量结果如图 16、图 17(a)所示。在 1 h 内芯体表面电位分布趋势与幅值基本保持不变，这表明芯体表面电位测量时间带来的芯体表面电位的衰减误差可以忽略。在去压 196 h 后，芯体表面最大电位幅值仍然具有 1.1 kV，约为初始衰减电位最大值的 1/5。这表明芯体表面电荷的衰减也是一个长期的过程。衰减过程中，在 9 h 内，首先表现为在保持整体电位分布的形状的前提下，电位幅值的整体轻微降低。在 9 h 后，表面电位第 2 个峰消失，仅存有第 1 个峰，且随着时间的延长，第 1 个峰的幅值不断降低，



(a) 456 h内表面电位分布　(b) 表面电位增长曲线及变化率

图 15　456 h 芯体表面电位积聚曲线及增长变化率

Fig.15　Accumulation curve of the core surface potential and growth rate within 456 hours



(a) 10 min　(b) 20 min　(c) 30 min

(d) 40 min　(e) 50 min　(f) 60 min

图 16　去压后 1 h 内芯体表面电荷消散过程

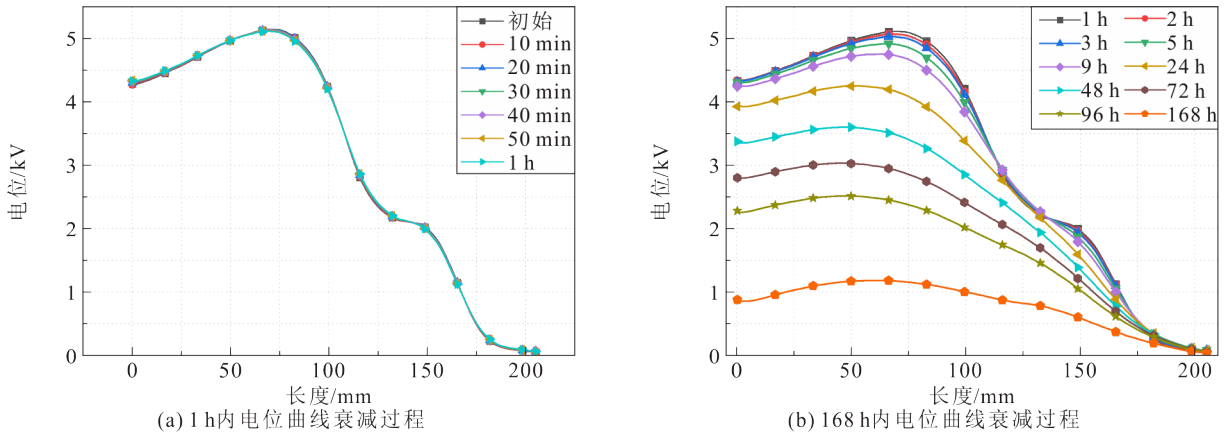
Fig.16　Charge dissipation process of the inner core surface with 1 h after decompression

如图 17(b)所示。在芯体表面电荷分布图(图 18)中可以看到，芯体表面电荷在自然消散的过程中整体电荷密度逐渐降低，芯体中间部位对应罐体门板处的电荷较其他位置电荷消散更快，在芯体表面电荷通过体电导消散与表面电导消散基本相同的条件下，中间罐体门板处的气体空间较其他位置大。在气体域饱和电流的角度分析，中间侧的气体域空间大，气体中的正负离子较其他位置多，加速了芯体表面中间部位的电荷消散。

2.6 温度与气压对表面电荷积聚的影响

通过加热带包覆罐体加热的方式，在 30、40、50 ℃与 60 ℃下，进行了−10 kV 直流电压下 2 h 芯体模型表面电荷积聚试验。测试结果电位曲线如图 19 所示。试验发现，在同等积聚时间下，随着温度升高，芯体轴向测量电位分布曲线幅值增加，仍呈现峰谷交替分布，芯体表面电荷密度积聚量增加，结果如图 20 所示。温度升高，提高了芯体表面电导，3.2 节中的表面电流作用项增大，芯体表面电荷积聚速率增加。

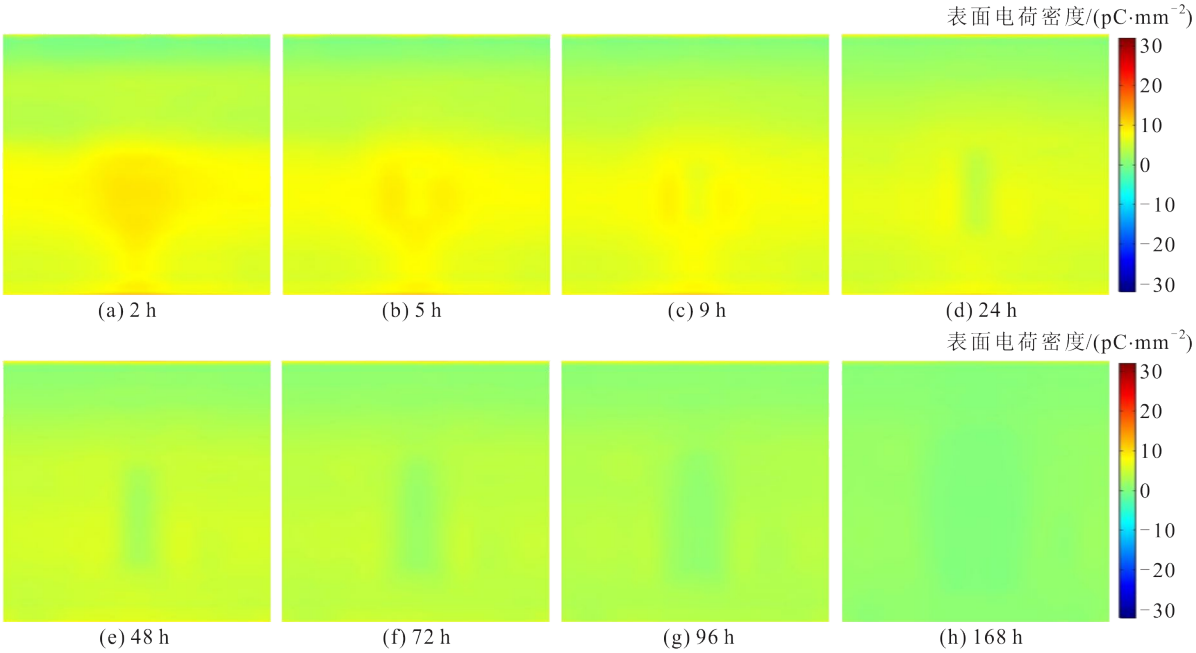
在−10 kV 直流电压下测试了不同气压下芯体表面电荷 2 h 积聚特性。图 21 为 0.1、0.2、0.3 MPa SF_6 气压环境下芯体表面电位曲线。随着气压升高，芯体模型表面电位分布仍然呈现峰谷交替分布模式，电位幅值略有提升。芯体模型表面电荷分布如图 22 所示，气压增高，中间门板位置处电荷密度增



(a) 1 h内电位曲线衰减过程　(b) 168 h内电位曲线衰减过程

图 17　芯体表面电位衰减曲线

Fig.17　Attenuation curve of core surface potential



(a) 2 h　(b) 5 h　(c) 9 h　(d) 24 h

(e) 48 h　(f) 72 h　(g) 96 h　(h) 168 h

图 18　芯体表面电荷消散过程

Fig.18　Core surface charge dissipation process

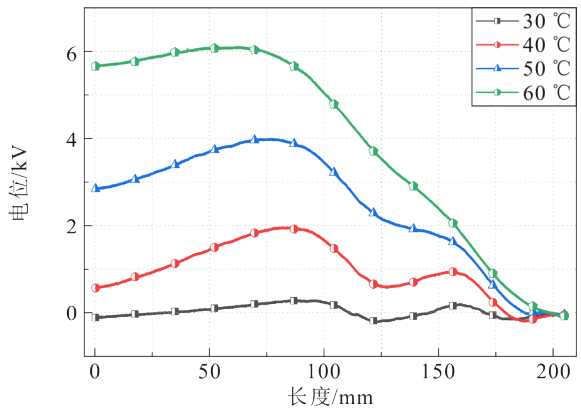


图 19　不同温度下芯体表面电位曲线

Fig.19　Surface potential curve of core at different temperatures

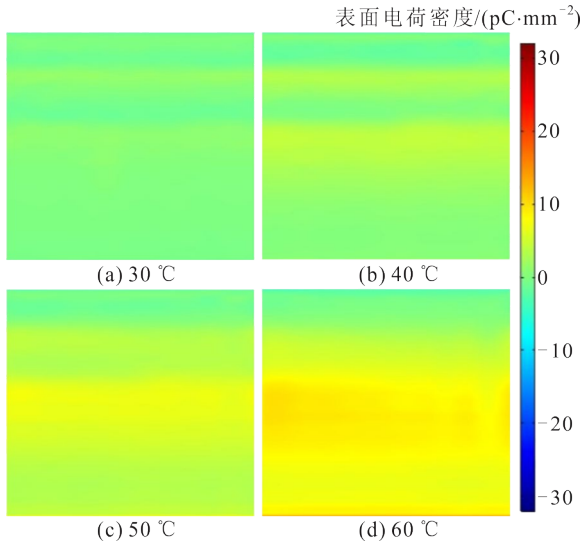


图 20　不同温度下芯体表面电荷分布

Fig.20　Surface charge distribution of core at different temperatures

大明显。由 3.2 节芯体模型表面电荷积聚机理分析可知，芯体模型电荷积聚主要由表面电流作用项起主导作用，气体侧电流对芯体模型表面电荷积聚的贡献小，所以气压升高没有对芯体气固界面电荷积聚模式产生较大影响。

3　芯体表面电荷积聚特性仿真分析

3.1　直流瞬态电场模型建立

阀侧套管绝缘结构由气体绝缘介质、液体绝缘介质、固体绝缘介质以及金属材料组成。在讨论套管直流瞬态电场模型前，先作以下假设：1）气体绝缘介质内部的电荷变化过程通过电离、复合、迁移、扩散方程描述；2）液体绝缘介质、固体绝缘介质内部的电荷变化过程通过电导率与电荷守恒方程描述；3）电介质交界面上的电荷变化过程通过体积电流、表面电流以及电荷守恒方程描述，油-固界面、固-固界面忽略表面电流作用；4）在初始时刻，电

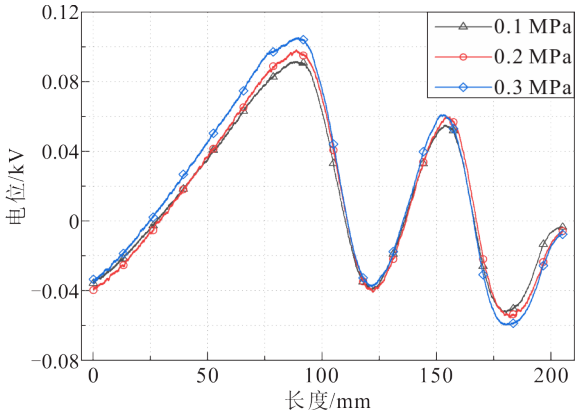


图 21　不同气压下芯体表面电位曲线

Fig.21　Surface potential curve of core under different air pressures

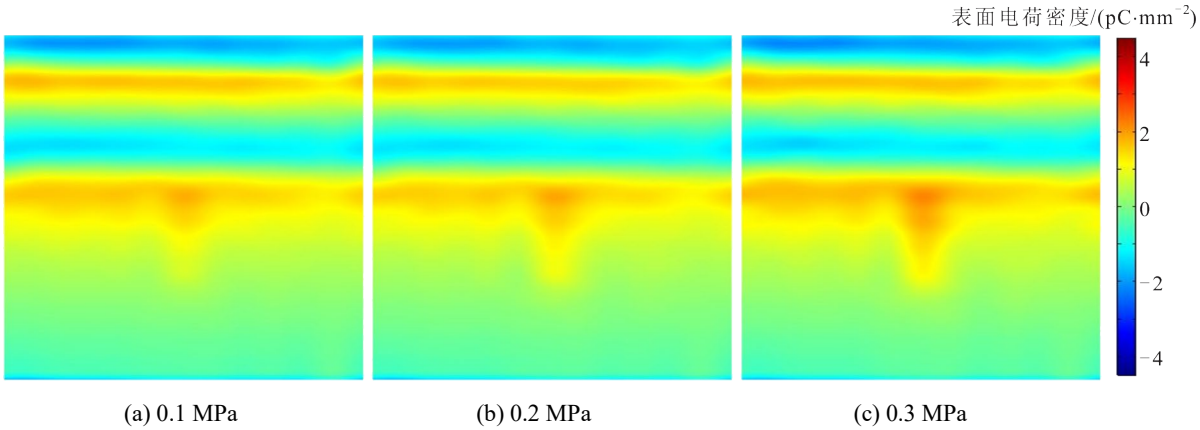


图 22　不同气压下芯体表面电荷分布

Fig.22　Surface charge distribution of core under different air pressures

介质交界面上无电荷，气体内部载流子浓度为离子平衡态浓度。为简化计算和突出主要物理过程(即离子迁移、复合与扩散对界面电荷分布的影响)，仅考虑 SF_6 俘获自由电子，形成运动速度远低于电子的负离子，正、负离子质量与气体分子相当，未考虑电子的行为及其关键的吸附、附着过程。这一简化处理在模拟可能发生局部放电或流注起始的高场强区域时，其准确性可能会受到影响。而当前试验与分析侧重在尚未达到剧烈电离的条件下进行。

气体介质内部电荷变化过程可以通过电离、复合、迁移、扩散方程描述[23-25]，有：

$$\partial_t c_+ + \nabla\cdot\left(c_+\mu_+\boldsymbol{E} - D\nabla c_+\right) = S - Rc_+c_- \tag{6}$$

$$\partial_t c_- + \nabla\cdot\left(c_-\mu_-\boldsymbol{E} - D\nabla c_-\right) = S - Rc_+c_- \tag{7}$$

$$\rho = F\left(c_+ - c_-\right) \tag{8}$$

式中：t 为时间，s；∂_t 为时间偏导算符；c_+、c_-为正、负离子的浓度，mol/m^3；μ_+、μ_-为正、负离子迁移率，m^2/(V·s)，μ_+=μ_-；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度，V/m；D 为扩散速率，m^2/s；S 为电离速率，mol/(m^3·s)；R 为复合反应速率，m^3/(mol·s)；ρ 为电荷密度，C/m^3；F=9.65×10^4 C/mol 为法拉第常数。

气体迁移率可以根据热力学性质计算。根据经典力学模型，气体迁移速率是气体载流子在平均自由时间内通过电场作用获得的速度[26]，有：

$$\mu_+ = -\mu_- = \frac{e\tau}{2m_0} \tag{9}$$

$$\tau = \frac{1}{\dfrac{p}{k_{\mathrm{B}}T}N_{\mathrm{A}}\sigma_{\mathrm{collision}}v_{\mathrm{rms}}} \tag{10}$$

$$\sigma_{\mathrm{collision}} = \frac{\pi}{2}d_0^2 \tag{11}$$

$$v_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\frac{3k_{\mathrm{B}}T}{m_0}} \tag{12}$$

式中：e=1.602×10^{-19} C 为电子电荷；τ 为平均自由时间，s；m_0 为气体分子质量，kg；p 为压强，Pa；k_{B}=1.38×10^{-23} J/K 为玻耳兹曼常数；T 为温度，K；N_{A}=6.02×10^{23} mol^{-1} 为阿伏伽德罗常数；$\sigma_{\mathrm{collision}}$ 为碰撞截面，m^2；v_{rms} 为分子平均速率，m/s；d_0 为分子平均有效直径，m。

气体介质中的载流子扩散现象也可以视为载流子在化学势作用下的电迁移过程，故扩散速率可以根据能斯特-爱因斯坦关系计算，有：

$$D = \frac{\mu_{\mathrm{p}}k_{\mathrm{B}}T}{e} \tag{13}$$

液体与固体介质内电荷变化过程[27]可表示为：

$$\partial_t\rho + \nabla\cdot\left(\gamma\boldsymbol{E}\right) = 0 \tag{14}$$

式中：γ 为电导率，S/m。

电介质交界面上的电荷变化过程[28]可表示为：

$$\partial_t\sigma + \nabla_{\mathrm{S}}\cdot\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}} = \boldsymbol{n}\cdot\left(\boldsymbol{J}_{\mathrm{V}} - \boldsymbol{J}_{\mathrm{G}}\right) \tag{15}$$

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}} = \gamma_{\mathrm{S}}\boldsymbol{E}_t - D\nabla\sigma \tag{16}$$

式中：σ 为表面电荷密度，C/m^2；∇_{S} 为表面微分算符；γ_{s} 为表面电导，S；$\boldsymbol{n}$ 为单位法向量，由固体侧指向气体侧；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{V}}$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{G}}$、$\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$ 分别为界面两侧固体、气体电流密度和表面电流密度，A/m^2。$\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$ 考虑表面电荷的迁移与扩散两部分。

固体电介质材料内部电流密度遵循欧姆定律，即：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{V}} = \gamma\boldsymbol{E} \tag{17}$$

气体中正、负离子迁移、扩散运动形成的正、负离子流密度之差即为气体电流密度[25]，表示为：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{G}} = (\mu_+c_+ + \mu_-c_-)\boldsymbol{E} - (D\nabla c_+ - D\nabla c_-) \tag{18}$$

3.2 表面电荷积聚机理分析

通过仿真得到−10 kV 下芯体气固界面不同时间的电位分布。从图 23 可以看出，仿真结果与试验测试得到的电位分布规律基本一致。其中，仿真中表面电导率为 5.5×10^{-16} S，体积电导率为 2.6×10^{-16} S/m，与环氧浸纸材料试验测量的电导率数量级一致。

图 24 为表面电荷密度与电流密度分布仿真结果，芯体气固界面总电流密度 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{SUM}}$($\boldsymbol{J}_{\mathrm{SUM}}$=$\boldsymbol{J}_{\mathrm{V}}$+$\boldsymbol{J}_{\mathrm{G}}$−$\nabla\cdot\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$)存在 3 个变化阶段，对应芯体表面电荷积聚的 3 个阶段。

第 1 阶段为短时积聚模式。在 2 h 短时表面电荷积聚过程中，表面电荷密度呈现“峰”、“谷”交替分布，在表面电荷积聚的 2 h 内，固体电流密度 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{V}}$ 幅值最小，$\boldsymbol{J}_{\mathrm{SUM}}$ 形状主要由表面电流密度作用项 $\nabla\cdot\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$ 与气体电流密度 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{G}}$ 决定，其中 $\nabla\cdot\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$ 起主导作用，决定了表面电荷短时分布的基本模式。第 2 阶段为短时向长时积聚的过渡模式。随着时间的延长，在 2~24 h 间，$\nabla\cdot\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$ 逐渐增大，表现为 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{SUM}}$ 为主要由 $\nabla\cdot\boldsymbol{J}_{\mathrm{S}}$ 贡献，在保留“峰”、“谷”交替分布特征的同时，相较于 2 h 时 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{SUM}}$ 分布，在 7~167 mm 位置全部为正极性电流，芯体表面正极性电荷密度增加，负极性电荷密度减少，在 0~7、167~205 mm 时为负极性电流，负极性电荷密度增加，随着积聚时间进一步延长，最终转变为图 24(c)所示 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{SUM}}$ 全部为正电流密度的现象。这就导致了芯体表面电荷密度在 0~167 mm 时逐渐变为正极性电荷，且幅值不断

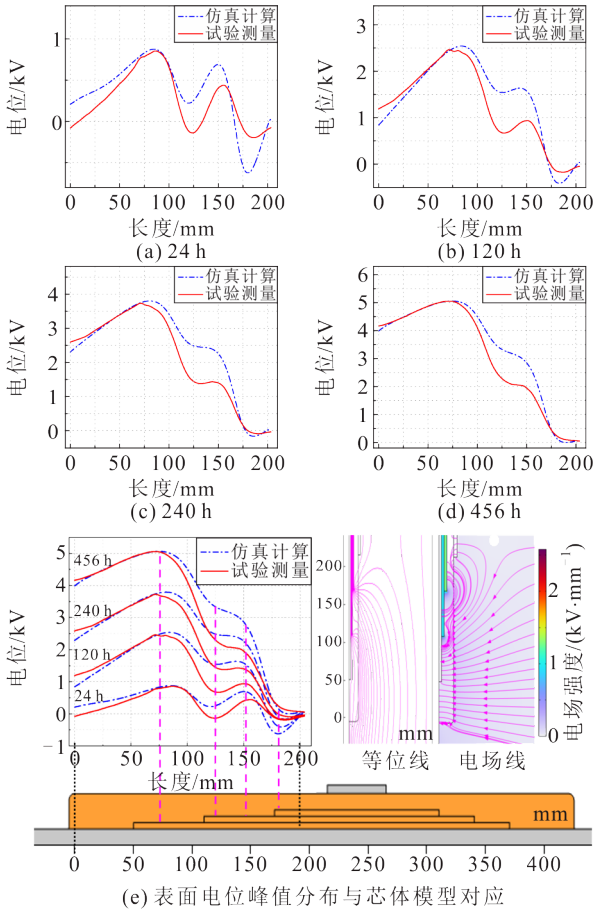


图 23　不同时间表面电位测量与仿真结果对比

Fig.23　Comparison of surface potential measurement and simulation results at different time

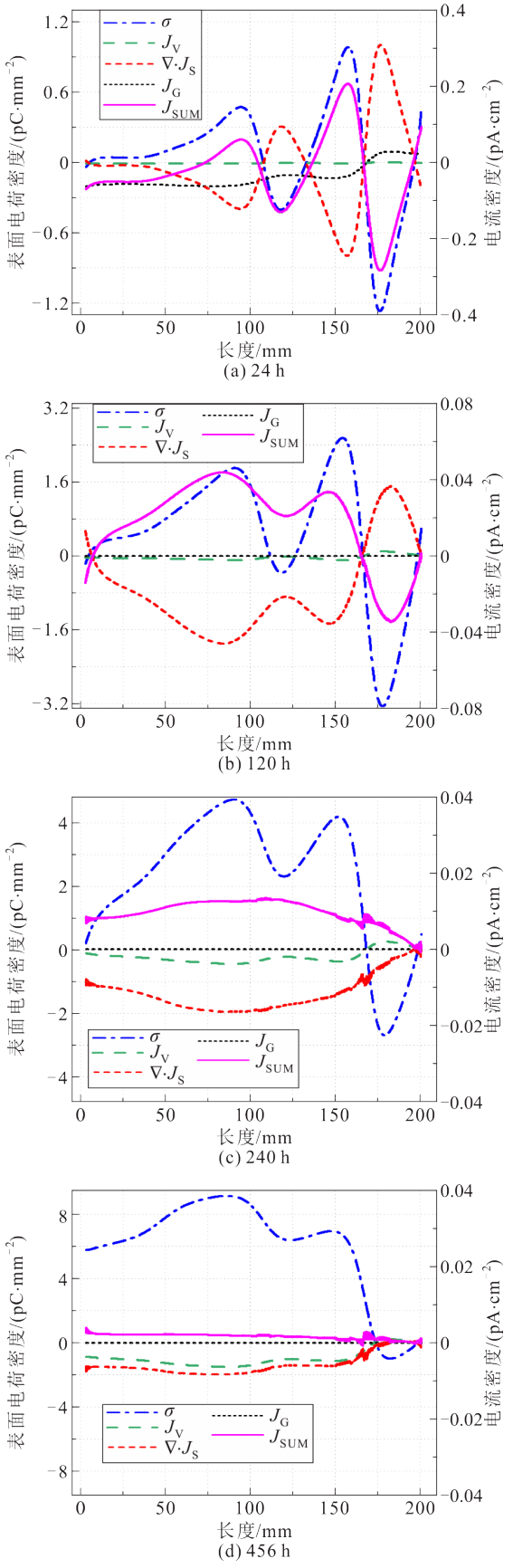


图 24　不同时间电荷密度与电流密度仿真结果

Fig.24　Simulation results of different time charge density and current density

增加，在 167~205 mm 时的负极性电荷密度幅值持续减小。第 3 阶段为长时积聚趋于饱和的过程。

在此阶段，$\boldsymbol{J}_{SUM}$ 峰谷分布特征基本消失，电流幅值逐渐减小，如图 24(c)、(d)所示，芯体表面电荷密度整体向正极性电荷分布转变，167~205 mm 的负极性电荷持续减小。在此期间，$\nabla\cdot\boldsymbol{J}_S$ 与 $\boldsymbol{J}_V$ 幅值接近，$\boldsymbol{J}_{SUM}$ 幅值逐渐减小，表面电荷积累逐渐进入饱和状态。

如图 25 所示，在芯体表面电荷积聚过程中，气体侧电流密度 $\boldsymbol{J}_G$ 对表面电荷积聚的贡献小，与固体侧电流密度 $\boldsymbol{J}_V$ 相比小 3 个数量级，且随着时间增加，$\boldsymbol{J}_G$ 幅值逐渐减小，$\boldsymbol{J}_V$ 幅值增加，直到与减小的 $\nabla\cdot\boldsymbol{J}_S$ 幅值接近，与 $\boldsymbol{J}_G$ 一起使总电流密度 $\boldsymbol{J}_{SUM}$ 趋于 $\boldsymbol{0}$，使式(15)满足要求，气固界面电荷积聚饱和，进入稳定状态。在表面电荷积聚过程中，芯体气固界面切向电场、法向电场随时间的变化曲线如图 26 所示，从初始容性分布逐渐转变为阻性分布。由于芯体表面异极性电荷的积聚，气侧法向电场与切向

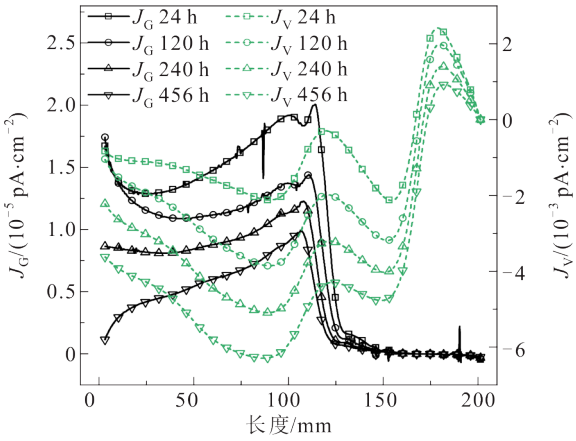


图 25 24~456 h 间芯体固体侧与气体侧电流

Fig.25 Core solid side and gas side currents between 24 h and 456 h

电场逐渐减小，电荷的存在起到均匀气侧法向电场与切向电场的作用。而固体侧法向电场有所增加，直至与表面电流作用相接近，使界面电荷积聚进入饱和状态。

3.3 芯体模型结构对表面电荷积聚的影响

利用建立的仿真模型，仿真计算了芯体模型端部倒角半径 r、金属屏蔽距端部距离 h 以及芯体表面电导率变化时对芯体模型表面电荷积聚的影响。倒角位置及金属屏蔽如图 27 所示，仿真结果如图 28 所示。计算结果表明芯体端部存在金属屏蔽、增大端部倒角半径、缩短屏蔽距离能够在一定程度减少表面电荷的积聚。在特定范围内，表面电导率的提升并不会减小表面电荷的积聚。

4 结论

1）SF_6 环境中芯体表面电荷分布受内部电容屏影响，沿芯体轴向方向从芯体下端部到法兰处表现为“峰”、“谷”交替分布的基本模式，在圆周方向，存在局部同极性电荷密度增大或减小的电荷斑。适当提升芯体表面光洁度，可减少电荷斑分布。通过不同温度下芯体表面电荷积聚试验，发现温度的提高可显著增加芯体表面电荷积聚速率。

2）芯体表面电荷积聚是一个缓慢的过程，存在 3 个阶段，即由表面电流密度与气侧电流密度作用项决定的“峰”、“谷”交替分布短时积聚模式；由表面电流密度作用项起主导作用，芯体表面向积聚异极性电荷转变的增长过渡阶段；由表面电流密度作用项幅值降低与固体侧电流密度、气体侧电流密度逐渐平衡，电荷积聚增速放缓的饱和阶段。气

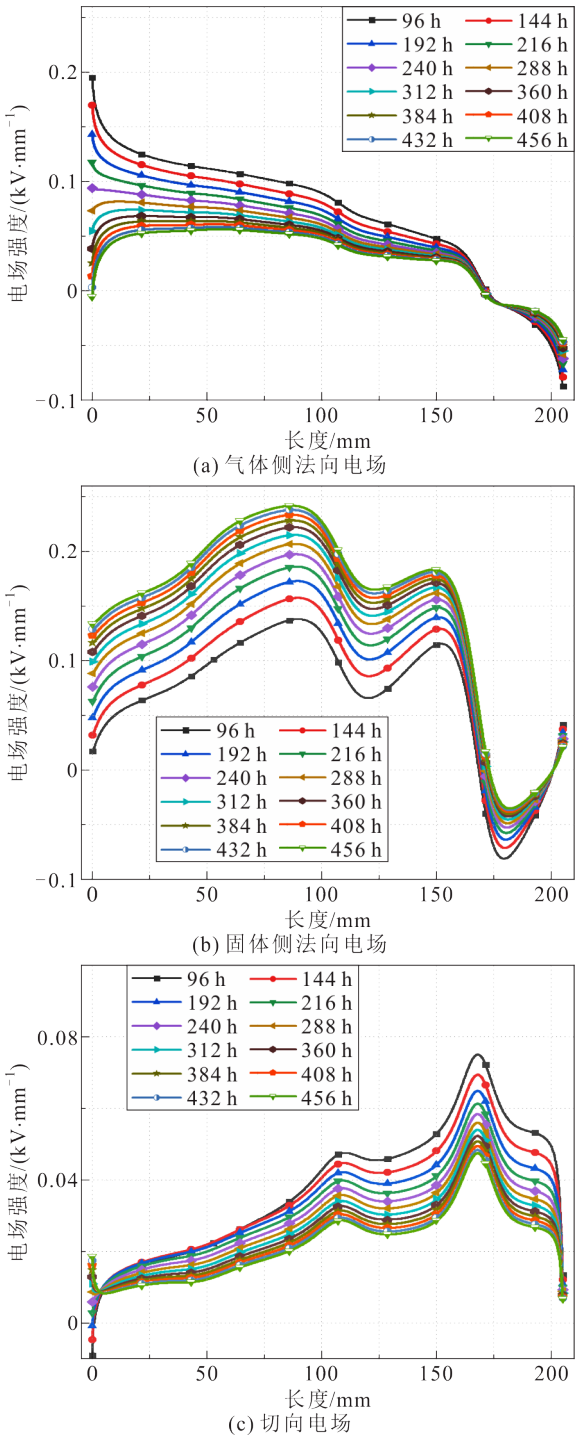


图 26 456 h 内电场随时间变化仿真曲线

Fig.26 Simulation curve of the electric field change over time within 456 h

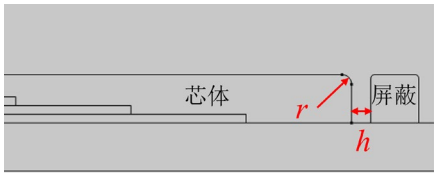
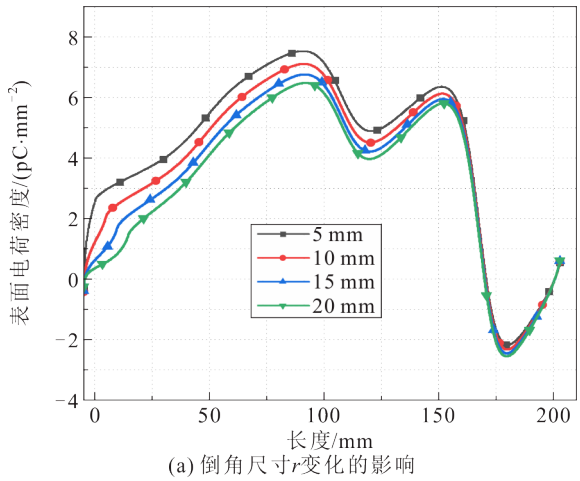
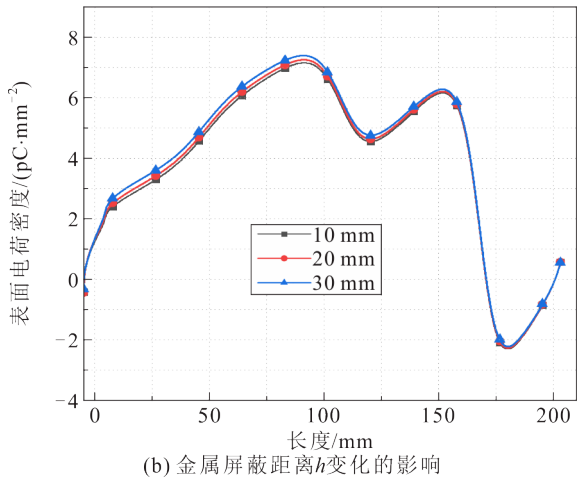


图 27 芯体模型倒角及金属屏蔽

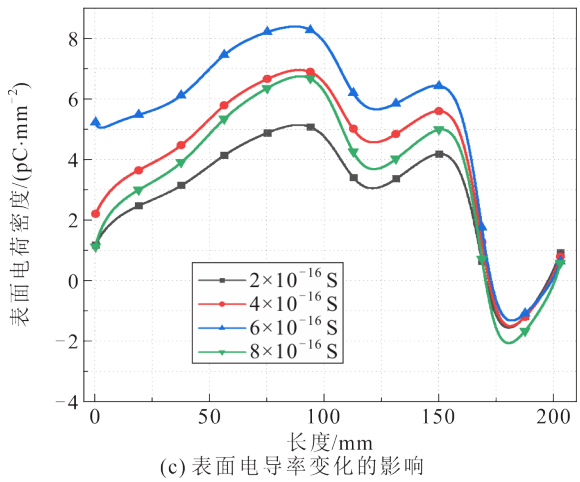
Fig.27 Chamfering and metal shielding of core model



(a) 倒角尺寸r变化的影响



(b) 金属屏蔽距离h变化的影响



(c) 表面电导率变化的影响

图 28　结构及表面电导对表面电荷积聚的影响

Fig.28　Influence of structure and surface conductance on surface charge accumulation

体侧电流密度对芯体表面电荷积聚的贡献小，导致气压提升，芯体表面电荷密度增加并不显著。

3）芯体表面电荷的消散同样是一个缓慢的过程，在消散 9 h 后，芯体表面电荷的“峰”“谷”交替分布的基本模式开始消失，且随着时间继续延长，峰值不断降低。中间罐体门板处的气体空间较其他位置大，从气体域饱和电流的角度分析，气体中的正负离子较其他位置多，加速了芯体模型中间部位的表面电荷消散。

4）仿真计算了芯体模型端部倒角尺寸、金属屏蔽距端部距离以及芯体表面电导率对芯体模型表面电荷积聚的影响。芯体表面电荷的积聚量受芯体结构与材料的控制。从减少表面电荷积聚量的角度出发，后续将继续完善表面电荷仿真模型，开展芯体轮廓外形、端部屏蔽、极板边缘等结构优化与芯体表面涂层处理的研究，实现协同减少表面电荷积聚量与均匀套管电场分布的目标。

参考文献　References

[1] 张施令，彭宗仁. ±800 kV 换流变压器阀侧套管绝缘结构设计分析[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2257-2266.
ZHANG Shiling, PENG Zongren. Design and analysis of insulation structure of ±800 kV valve side converter transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2257-2266.

[2] WANG Q Y, YANG X, TIAN H D, et al. A novel dissipating heat structure of converter transformer RIP bushings based on 3-D electro-magnetic-fluid-thermal analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1938-1946.

[3] 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.

[4] ZHANG B Y, LI Y X, MIN D M, et al. Insight into charge-induced flashover at the gas-solid interface in DC gas-insulated systems[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57(10): 103001.

[5] LI Z, LIU J, OHKI Y, et al. Surface flashover in 50 years: theoretical models and competing mechanisms[J]. High Voltage, 2023, 8(5): 853-877.

[6] 李传扬，林川杰，陈　庚，等. 高压直流盆式绝缘子气-固界面电荷行为研究综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(6)：2016-2025.
LI Chuanyang, LIN Chuanjie, CHEN Geng, et al. Review of gas-solid interface charging phenomena of HVDC spacers[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2016-2025.

[7] 王青于，靳守锋，袁书文，等. 特高压环氧浸纸-SF_6气体复合绝缘穿墙套管界面电荷积累过程和直流电场分布特性仿真[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4102-4112.
WANG Qingyu, JIN Shoufeng, YUAN Shuwen, et al. Simulation of interface charge accumulation progress and DC electric field distribution characteristics of the UHV epoxy impregnated paper-SF_6 gas composite insulation wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4102-4112.

[8] ZHANG Y, QI B, YANG X, et al. The evolution characteristics of surface charge on the gas-solid interface under the long-time co-action of DC-temperature gradient[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(3): 034003.

[9] 何　顺，郑易谷，林川杰，等. 温度梯度下电荷行为与直流沿面闪络的关联性[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3597-3604.

HE Shun, ZHENG Yigu, LIN Chuanjie, et al. Relation between charge behavior and dc surface flashover under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3597-3604.

[10] 张云霄，周远翔，张征辉，等. 温度梯度叠加极性反转电压下硅橡胶电荷输运及电树枝特性[J]. 中国电机工程学报，2022，42(11)：4266-4276.
ZHANG Yunxiao, ZHOU Yuanxiang, ZHANG Zhenghui, et al. Charge transportation and electrical tree characteristics in silicone rubber under temperature gradient superimposed polarity reversal voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4266-4276.

[11] VOLPOV E. Electric field modeling and field formation mechanism in HVDC SF_6 gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(2): 204-215.

[12] 田汇冬，李乃一，吴泽华，等. 直流 GIL 柱式绝缘子表面电荷积聚特性[J]. 电工技术学报，2018，33(22)：5178-5188.
TIAN Huidong, LI Naiyi, WU Zehua, et al. Accumulation characteristics of surface charge for post insulators of DC enclosed transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5178-5188.

[13] 薛建议，王　涵，李科峰，等. 直流 GIL 中盆式绝缘子表面电荷分布特性研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(20)：6164-6172.
XUE Jianyi, WANG Han, LI Kefeng, et al. Research on charge distribution characteristics on spacer surface in DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6164-6172.

[14] 齐　波，高春嘉，邢照亮，等. 操作冲击电压下 GIS 绝缘子表面电荷的积聚特性[J]. 中国电机工程学报，2017，37(15)：4538-4547.
QI Bo, GAO Chunjia, XING Zhaoliang, et al. The accumulation characteristic for surface charge on GIS insulator under switching impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4538-4547.

[15] XUE J Y, ZHANG Z, LI B B, et al. Temperature-dependent adaptive conductivity coating for surface charge release and electric field control under electro-thermal coupling field[J]. High Voltage, 2023, 8(5): 1082-1092.

[16] LUO Y, TANG J, PAN Z J, et al. How temperature and pressure affect the electric field distribution in HVDC GIS/GIL: a numerical study[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(4): 1334-1342.

[17] 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.

[18] LUO Y, MAO S Y, LI Y, et al. From surface potential to surface charge: an inversion algorithm for shift-variant system based on hybrid LBD-Tikhonov method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 6004814.

[19] KUMADA A, OKABE S. Charge distribution measurement on a truncated cone spacer under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 929-938.

[20] ZHANG B Y, QI Z, ZHANG G X. Charge accumulation patterns on spacer surface in HVDC gas-insulated system: dominant uniform charging and random charge speckles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1229-1238.

[21] 胡学军，李嘉诚. 基于非均匀有理 B 样条的多尺度三维建模研究[J]. 软件工程，2022，25(5)：36-38，29.
HU Xuejun, LI Jiacheng. Research on 3D modeling of multi-scale based on non-uniform rational B-spline[J]. Software Engineering, 2022, 25(5): 36-38, 29.

[22] 董俊豪，陈俊鸿，李金殊，等. 直流电压下 C_4F_7N/CO_2 混合气体中环氧复合绝缘子表面电荷积聚特性[J]. 中国电机工程学报，2022，42(17)：6521-6532.
DONG Junhao, CHEN Junhong, LI Jinshu, et al. Surface charge accumulation characteristics of epoxy composite insulator in C_4F_7N/CO_2 mixture under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6521-6532.

[23] LI X L, HAN S L, WANG W, et al. Transient surface charge of SF_6-filled direct current gas-insulated transmission lines insulator under thermal-electric coupled fields: effects of ambient temperature, load current and gas pressure[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(3): 2688-2700.

[24] LI X L, WAN M D, ZHANG G K, et al. Surface charge characteristics of DC-GIL insulator under multiphysics fields: 3-D modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1608-1616.

[25] WANG Y G, WANG Z M, ZHAO W B, et al. Competitive effect of charge injection on surface charge accumulation of the DC GIL insulator: a numerical study[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(6): 2320-2329.

[26] SEKERKA R F. Thermal physics[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2015: 610.

[27] LI W G, YANG Z D, ZHOU H J, et al. The 3D accumulation characteristics of surface charges on actual 550 kV GIL tri-post insulator under AC voltage in SF_6[C]//2021 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Vancouver, Canada: IEEE, 2021: 359-362.

[28] WANG Q Y, XIE G S, TIAN H D, et al. Impact of temperature on the transient DC field distribution of ±1 100 kV UHVDC wall bushing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1449-1457.



李　杨
1997—，男，博士生
主要从事套管环氧浸纸芯体表面电荷积聚等方面的研究工作
E-mail: 2387993122@qq.com

LI Yang
Ph.D. candidate



王青于(通信作者)
1991—，女，博士，副教授
主要从事超/特高压交、直流套管绝缘结构优化设计及多物理场数值计算方法等方面的研究工作
E-mail: wqy.1991624@xjtu.edu.cn

WANG Qingyu
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-07-03　在线出版日期　2026-02-02　　编辑　曾文君