

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.025

# 高压屏蔽电极炭黑含量对 GIS 终端电场分布特性的影响

牛为<sup>1</sup>, 咸日常<sup>1</sup>, 魏凯<sup>2</sup>, 孙冠岳<sup>1</sup>, 孙锐<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东淄博 255000; 2. 山东七星电气科技发展有限公司, 山东淄博 255000)

**摘要:** 高压屏蔽电极是电力电缆终端内部的半导体屏蔽层, 通常由半导体材料制成并嵌入应力锥中, 用以均匀电场分布, 提高气体绝缘金属封闭开关(GIS)终端绝缘水平。高压屏蔽电极的电性能往往取决于半导体屏蔽材料的品质, 其中炭黑(CB)含量的影响最为显著。为获取高压屏蔽电极 CB 含量最优值, 首先, 在乙烯-丙烯酸丁酯共聚物(EBA)中添加不同含量的 CB, 制备具有不同 CB 含量的高压屏蔽电极样品, 通过测试其在不同温度下的体积电阻率, 研究高压屏蔽电极导电性能随温度的变化规律。之后, 使用 COMSOL 软件构建 GIS 终端电热场模型, 分析不同环境温度条件下不同高压屏蔽电极样品对 GIS 终端电场分布特性的影响, 得到最优 CB 含量的高压屏蔽电极。最后, 通过局部放电量检测和工频耐受电压试验进行考核验证。结果表明: 在相同温度条件下, CB 含量的增加会导致高压屏蔽电极的体积电阻率降低, 在 CB 含量不变条件下, 温度升高会导致高压屏蔽电极的体积电阻率增加。环境温度变化只影响 GIS 终端的绝对温度, 并不会改变 GIS 终端内部的温度差。基于仿真结果, 高压屏蔽电极的最优 CB 质量分数是 30%, 以之优化的 GIS 终端具有良好的局部放电特性和工频电压耐受能力。

**关键词:** GIS 终端; 高压屏蔽电极; 炭黑含量; 局部放电量; 工频耐受电压试验

**中图分类号:** TM762 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0197-12

## Influence of carbon black content in high-voltage shielding electrodes on electric field distribution characteristics of GIS terminals

NIU Wei<sup>1</sup>, XIAN Richang<sup>1</sup>, WEI Kai<sup>2</sup>, SUN Guanyue<sup>1</sup>, SUN Rui<sup>1</sup>

(1. College of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Qixing Electric Technology Development Co., Ltd., Zibo 255000, China)

**Abstract :** The high-voltage shielding electrode is the semiconductive shielding layer inside the power cable terminal, usually made of semiconductive material and embedded in the stress cone to evenly distribute the electric field and improve the insulation level of GIS terminal. The electrical performance of high-voltage shielded electrodes often depends on the quality of the semiconductive shielding material, among which the content of carbon black (CB) has the most significant influence. To obtain the optimal CB content of the high-voltage shielding electrode, first, different amounts of CB were added to ethylene-acrylate-butyl acrylate copolymer (EBA) to prepare high-voltage shielding electrode samples with different CB contents. The volume resistivity of the samples was tested at different temperatures to study the variation law of the conductive performance of the high-voltage shielding electrode with temperature. Then, COMSOL software was used to build the electric and thermal field model of GIS terminal, and the influence of different high-voltage shielding electrode samples on the electric field distribution characteristics of GIS terminal under different ambient temperatures was analyzed to obtain the optimal CB content of the high-voltage shielding electrode. Finally, the partial discharge quantity detection and power frequency withstand voltage test were carried out for verification. The results show that under the same temperature conditions, the increase of CB content leads to the decrease of the volume resistivity of the high-voltage shielding electrode. Under the condition of constant CB content, the increase of temperature leads to the increase of the volume resistivity of the high-voltage shielding electrode. The change in environmental temperature only affects the absolute temperature of the

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52477147)

**通信作者:** 咸日常, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备在线检测技术

**收稿日期:** 2025-08-09

**引用格式:** 牛为, 咸日常, 魏凯, 等. 高压屏蔽电极炭黑含量对 GIS 终端电场分布特性的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 197-208.

NIU Wei, XIAN Richang, WEI Kai, et al. Influence of carbon black content in high-voltage shielding electrodes on electric field distribution characteristics of GIS terminals[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 197-208.

GIS terminal, without altering the temperature difference within the terminal. Based on the simulation results, the optimal mass fraction of CB in the high-voltage shielding electrode is 30wt%, and GIS terminal optimized with it has good partial discharge characteristics and power-frequency voltage withstand capability.

**Keywords :** GIS terminal ; high voltage shielding electrode ; carbon black content ; local discharge quantity ; power frequency withstand voltage test

随着经济高速发展和电网升级改造,高压电力电缆的应用愈加广泛,高压电缆终端是电缆与变压器、开关设备等连接的关键设备,直接影响电网的供电安全<sup>[1-4]</sup>。高压屏蔽电极通常由半导体屏蔽材料制成并嵌入应力锥中,其主要功能是均匀电场分布<sup>[5-7]</sup>。为保证高压电缆终端运行可靠性,高压屏蔽电极需要具备良好的电性能以及力学性能;这些性能主要由半导体屏蔽材料品质决定,其中基体树脂、导电填料以及加工助剂均会影响半导体屏蔽材料性能。基体树脂有两类,分别为热固性和热塑性树脂<sup>[8-9]</sup>。常用热固性基体树脂有三类,分别为乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(EVAC)、乙烯-丙烯酸乙酯共聚物以及乙烯-丙烯酸丁酯共聚物(EBA)<sup>[10-11]</sup>。导电填料的含量会显著影响半导体屏蔽材料的性能,其中最常用的导电填料是炭黑(CB)。半导体屏蔽材料需要多种加工助剂,例如分散剂、抗氧剂和交联剂等。

CB含量与半导体屏蔽材料的体积电阻率负相关,王岩等<sup>[11]</sup>研究CB含量对聚丙烯(PP)/乙烯-辛烯共聚物(POE)/CB半导体屏蔽复合材料电性能的影响,结果表明随着CB质量分数的增加,PP/POE/CB半导体复合材料的体积电阻率整体呈下降趋势,当CB质量分数在5%至20%时,复合材料的体积电阻率随着CB含量的增加而急剧下降。孟广泽等<sup>[12]</sup>通过制备不同质量份[表示每100 g EVAC中掺杂CB的克数]的CB/EVAC半导体复合材料,研究CB质量份数对半导体复合材料体积电阻率的影响。结果表明当CB的质量份<20份时,半导体复合材料的体积电阻率随着CB含量的增加而急剧降低;当CB质量份从20份增至30份时,其体积电阻率呈现缓慢减小的趋势;当CB的质量份超过30份后,其体积电阻率基本保持不变。王岩、孟广泽等研究CB含量对半导体屏蔽复合材料电性能的影响,更倾向于研究材料自身性能。笔者通过研究CB含量、温度对高压屏蔽电极体积电导率的影响,进而研究不同环境温度条件下,不同CB含量的高压屏蔽电极样品对气体绝缘金属封闭开关(GIS)终端电场分布特性

的影响,更倾向于GIS终端的生产应用<sup>[13-14]</sup>。

笔者通过在EBA中添加不同含量的CB,制备具有不同CB含量的高压屏蔽电极样品,通过COMSOL构建110 kV GIS终端电热场模型,研究不同环境温度条件下不同高压屏蔽电极样品对GIS终端电场分布特性的影响,得到最优的高压屏蔽电极CB含量,并对优化后的GIS终端通过局部放电检测以及工频耐受电压试验进行验证。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

半导体屏蔽材料由三部分组成,分别为基体树脂、导电填料以及加工助剂<sup>[15-17]</sup>。笔者选择的基体树脂是EBA,导电填料是CB,加工助剂包括交联剂过氧化二异丙苯(DCP)、润滑剂硬脂酸锌和季戊四醇、抗氧剂、分散剂*N,N'*-乙撑双硬脂酰胺(EBS)以及偶联剂 $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷。

EBA:BA质量分数为18%,广州雷普索尔新材料有限公司;

CB:原始粒径为30~40 nm,江西黑猫炭黑股份有限公司;

DCP:山东瑞皇化工有限公司;

硬脂酸锌和季戊四醇:南通润丰石油化工有限公司;

四[ $\beta$ -(3,5-二叔丁基-4-羟基苯基)丙酸]季戊四醇酯(抗氧剂1010)和三[2,4-二叔丁基苯基]亚磷酸酯(抗氧剂168):天津利安隆新材料股份有限公司;

EBS:山东浩纳新材料科技集团有限公司;

$\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷:KH550,南京向前化工有限公司。

### 1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:AK20,南京科亚化工成套装备公司;

鼓风干燥箱:DHG-9030,上海一恒科学仪器有限公司;

平板硫化机:XLB,上海齐才液压机械有限公司;

半导体电阻测量仪:DB-4,上海商流电子科技

有限公司。

### 1.3 试样制备

本试验总共制备四份不同CB含量的高压屏蔽电极样品,1<sup>#</sup>至4<sup>#</sup>样品的CB质量分数分别为28%,30%,32%以及34%,样品配方见表1。润滑剂是硬脂酸锌和季戊四醇混合,其质量比为1:1;抗氧剂是由抗氧剂1010和抗氧剂168混合,其质量比为2:1。

表1 不同CB含量的高压屏蔽电极样品配方

Tab. 1 Formula of high voltage shielded electrode samples with different CB content

|                                      | %              |                |                |                |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Material                             | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> |
| EBA                                  | 65.5           | 63.5           | 61.5           | 59.5           |
| CB                                   | 28             | 30             | 32             | 34             |
| DCP                                  | 1              | 1              | 1              | 1              |
| Zinc stearate and pentaerythritol    | 2              | 2              | 2              | 2              |
| Antioxidant 1010 and antioxidant 168 | 0.5            | 0.5            | 0.5            | 0.5            |
| EBS                                  | 1.5            | 1.5            | 1.5            | 1.5            |
| KH550                                | 1.5            | 1.5            | 1.5            | 1.5            |

通过表1配方分别取适量的EBA、CB、交联剂、润滑剂、抗氧剂、分散剂以及偶联剂,首先将CB、分散剂和偶联剂均匀混合;然后在混合物中继续添加适量的抗氧剂和润滑剂,使其混合均匀;最后添加EBA树脂,将其混合均匀。将制备的混合物使用双螺杆挤出机进行熔融混合挤出,并造粒以及烘干得到颗粒料。双螺杆挤出机六区温度分别为130,140,150,160,150,140℃,主机转速为120 r/min。将颗粒料与研磨均匀的交联剂均匀混合,将其置于70℃鼓风干燥箱中处理7.5 h,即可得到高压屏蔽电极样品。取适量的高压屏蔽电极样品,将其均匀平铺在模具中间,置于平板硫化机中热压成型。热压成型工艺参数:200℃、12 MPa、热压时间15 min。获得的板材尺寸是10 cm×10 cm×0.1 cm。

### 1.4 测试与表征

通过半导体电阻测量仪来测试样品的体积电阻率,样品尺寸为50 mm×50 mm×1 mm,分别在23,30,40,50,60,70,80℃以及90℃下测量各样品的体积电阻率,试验结果如图1所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 体积电阻率与温度特性

图1为不同温度下高压屏蔽电极样品的体积电阻率。如图1所示,在温度分别为23℃和90℃时,1<sup>#</sup>样品的体积电阻率的最大值分别为36.74,331.46

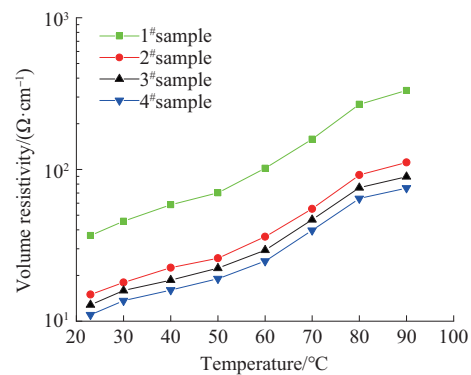


图1 不同温度下高压屏蔽电极样品的体积电阻率

Fig. 1 Volume resistivity of high-pressure shielded electrode samples at different temperatures

Ω·cm,符合GB/T 11017.2-2024“在温度23℃和90℃时,半导体屏蔽层的体积电阻率应分别小于100,350 Ω·cm”的规定。

由图1可知,在相同温度条件下,随着CB含量的增加,高压屏蔽电极的体积电阻率逐渐降低<sup>[18-20]</sup>。这是因为随着CB质量分数的增加,CB颗粒浓度增加,颗粒间距持续减小,颗粒间接触概率提高。改变的微观结构能够促进形成导电通路,增加电子传输通道,外在表现为体积电阻率的降低<sup>[21]</sup>。通过图1可以看出,温度从23℃到90℃时,高压屏蔽电极的体积电阻率增大至少5倍。在低温条件下,CB颗粒能够在EBA基体中形成致密且稳定的导电通路。当温度升高时,基体树脂EBA热膨胀系数显著高于导电填料CB,会发生明显的体积膨胀,导致CB颗粒间距增加。当CB颗粒间距过大时,导电通路会出现断裂。这在宏观上表现出体积电阻率的急剧上升。

通过电热场仿真研究不同环境温度下高压屏蔽电极CB含量对GIS终端电场分布特性的影响,高压屏蔽电极的体积电阻率受到环境温度的影响较大,故需要构建不同CB含量的高压屏蔽电极的体积电阻率与温度的特性曲线用于电热场仿真研究。

对1<sup>#</sup>样品至4<sup>#</sup>样品的体积电阻率与温度的实验数据进行曲线估计,将温度设置为自变量 $X$ ,体积电阻率设置为因变量 $Y$ ,通过SPSS软件构建6种曲线模型进行拟合。6种曲线模型的公式见式(1)。曲线估计的仿真结果见表2。

线性模型:  $y = b_0 + b_1x$

倒数曲线模型:  $y = b_0 + b_1/x$

二次曲线模型:  $y = b_0 + b_1x + b_2x^2$

三次曲线模型:  $y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3$

S形曲线模型:  $y = e^{b_0 + b_1/x}$

增长曲线模型:  $y = e^{b_0 + b_1x}$

式中: $b_0$ 为常数项系数; $b_1$ 为一次项系数; $b_2$ 为二次项系数; $b_3$ 为三次项系数。

表2为曲线估计的仿真结果。决定系数 $R^2$ 取值范围为[0, 1], $R^2$ 越大则表明曲线模型对观测数据的拟合效果越好。 $F$ 检验常用作显著性检验,曲线模型显著性越好,则 $F$ 值越大且显著性(Sig)越小。

表2 曲线估计的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of curve estimation

| Curve model                                 | $R^2$ | $F$     | Sig    |
|---------------------------------------------|-------|---------|--------|
| 1 <sup>#</sup> sample linear model          | 0.868 | 39.522  | <0.001 |
| 1 <sup>#</sup> sample inverse curve model   | 0.571 | 7.972   | 0.030  |
| 1 <sup>#</sup> sample quadratic curve model | 0.988 | 200.428 | <0.001 |
| 1 <sup>#</sup> sample cubic curve model     | 0.988 | 100.496 | <0.001 |
| 1 <sup>#</sup> sample S-shaped curve model  | 0.786 | 22.069  | 0.003  |
| 1 <sup>#</sup> sample growth curve model    | 0.981 | 306.777 | <0.001 |
| 2 <sup>#</sup> sample linear model          | 0.867 | 39.098  | <0.001 |
| 2 <sup>#</sup> sample inverse curve model   | 0.570 | 7.964   | 0.030  |
| 2 <sup>#</sup> sample quadratic curve model | 0.985 | 167.964 | <0.001 |
| 2 <sup>#</sup> sample cubic curve model     | 0.986 | 91.363  | <0.001 |
| 2 <sup>#</sup> sample S-shaped curve model  | 0.767 | 19.720  | 0.004  |
| 2 <sup>#</sup> sample growth curve model    | 0.974 | 220.694 | <0.001 |
| 3 <sup>#</sup> sample linear model          | 0.871 | 40.458  | <0.001 |
| 3 <sup>#</sup> sample inverse curve model   | 0.576 | 8.153   | 0.029  |
| 3 <sup>#</sup> sample quadratic curve model | 0.983 | 148.571 | <0.001 |
| 3 <sup>#</sup> sample cubic curve model     | 0.983 | 79.286  | <0.001 |
| 3 <sup>#</sup> sample S-shaped curve model  | 0.764 | 19.371  | 0.005  |
| 3 <sup>#</sup> sample growth curve model    | 0.971 | 197.920 | <0.001 |
| 4 <sup>#</sup> sample linear model          | 0.872 | 40.731  | <0.001 |
| 4 <sup>#</sup> sample inverse curve model   | 0.578 | 8.209   | 0.029  |
| 4 <sup>#</sup> sample quadratic curve model | 0.982 | 138.508 | <0.001 |
| 4 <sup>#</sup> sample cubic curve model     | 0.982 | 73.871  | <0.001 |
| 4 <sup>#</sup> sample S-shaped curve model  | 0.763 | 19.304  | 0.005  |
| 4 <sup>#</sup> sample growth curve model    | 0.970 | 191.818 | <0.001 |

表5 GIS终端温度场仿真参数

Tab. 5 Temperature field simulation parameters of GIS terminal

| Component                | Density/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | Constant-pressure heatcapacity/<br>[ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ] | Thermal conductivity/<br>[ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ] |
|--------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Hav block                | 8 960                                           | 385                                                                                     | 400                                                                          |
| Aluminum alloy component | 2 700                                           | 896                                                                                     | 167                                                                          |
| Epoxy resin              | 1 200                                           | 1 600                                                                                   | 0.25                                                                         |
| Damper ring              | 2 140                                           | 1 500                                                                                   | 0.25                                                                         |
| Stress cone              | 1 340                                           | 1 300                                                                                   | 0.28                                                                         |
| Reinforced insulation    | 1 180                                           | 1 700                                                                                   | 0.25                                                                         |

为研究高压屏蔽电极CB含量不同而导致的电场强度变化,选取了3条不同的观测路径,如图2所

由表2可得,二次曲线模型与三次曲线模型的 $R^2$ 为最大值,二次曲线模型与三次曲线模型的Sig均小于0.001。但二次曲线模型的 $F$ 值高于三次曲线模型的 $F$ 值,故1<sup>#</sup>样品、3<sup>#</sup>样品、4<sup>#</sup>样品的曲线模型应选择二次曲线模型。由表2可得,三次曲线模型的 $R^2$ 为最大值,三次曲线模型的Sig小于0.001,2<sup>#</sup>样品的曲线模型应为三次曲线模型。1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>样品的曲线模型的具体公式见表3。

表3 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>样品的曲线模型公式

Tab. 3 Curve model formulas for samples 1<sup>#</sup>-4<sup>#</sup>

| Sample         | Formula                                                    |
|----------------|------------------------------------------------------------|
| 1 <sup>#</sup> | $y = 119.931 - 5.228x + 0.085x^2$                          |
| 2 <sup>#</sup> | $y = 31.893 - 1.029x + 0.015x^2 + 7.706 \times 10^{-5}x^3$ |
| 3 <sup>#</sup> | $y = 33.373 - 1.306x + 0.022x^2$                           |
| 4 <sup>#</sup> | $y = 27.910 - 1.079x + 0.018x^2$                           |

由表3可见,高压屏蔽电极的体积电阻率不仅与CB含量有关,还与环境温度相关。当CB含量不变时,高压屏蔽电极的体积电阻率会随环境温度变化而变化。

2.2 电场仿真结果

GIS终端的零部件包括:哈弗块、铝合金零部件、环氧树脂、挡环、应力锥、增强绝缘。铝合金零部件包括屏蔽罩、环氧套管高压嵌件、环氧套管低压嵌件、锥托、过渡装置以及尾管。GIS终端零部件的电场以及温度场仿真参数分别见表4、表5。

表4 GIS终端电场仿真参数

Tab. 4 Electrical field simulation parameters of GIS terminal

| Component                | Relative permittivity | Conductivity/<br>( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ) |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| Hav block                | $5 \times 10^3$       | $5.91 \times 10^7$                                  |
| Aluminum alloy component | $4 \times 10^3$       | $3.71 \times 10^7$                                  |
| Epoxy resin              | 6.06                  | $7.35 \times 10^{-15}$                              |
| Damper ring              | 2.01                  | $1.01 \times 10^{-15}$                              |
| Stress cone              | 4.12                  | $1.66 \times 10^{-6}$                               |
| Reinforced insulation    | 2.93                  | $1.57 \times 10^{-15}$                              |

表5 GIS终端温度场仿真参数

Tab. 5 Temperature field simulation parameters of GIS terminal

| Component                | Density/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | Constant-pressure heatcapacity/<br>[ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ] | Thermal conductivity/<br>[ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ] |
|--------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Hav block                | 8 960                                           | 385                                                                                     | 400                                                                          |
| Aluminum alloy component | 2 700                                           | 896                                                                                     | 167                                                                          |
| Epoxy resin              | 1 200                                           | 1 600                                                                                   | 0.25                                                                         |
| Damper ring              | 2 140                                           | 1 500                                                                                   | 0.25                                                                         |
| Stress cone              | 1 340                                           | 1 300                                                                                   | 0.28                                                                         |
| Reinforced insulation    | 1 180                                           | 1 700                                                                                   | 0.25                                                                         |

示。观测路径L1是应力锥与高压屏蔽电极交界线AF;观测路径L2是沿应力锥的多段线ABCDE;观测

路径  $L3$  是交联聚乙烯(XLPE)与应力锥、增强绝缘以及高压屏蔽电极的交界线  $GIJ$ 。

使用 COMSOL 构建 110 kV GIS 终端电热场模型,分析不同环境温度条件下不同高压屏蔽电极样品对 GIS 终端电场分布特性的影响。设置 GIS 终端内部导体线芯上施加电压为 64 kV,外屏蔽层接地;环境温度分别设置为 10, 25, 40 °C,导体电流为 1 000 A。

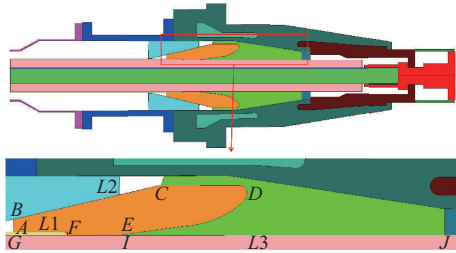


图2 GIS终端内部的观测路径图

Fig. 2 Observation path diagram inside GIS terminal

### 2.2.1 环境温度为 10 °C 时 GIS 终端电场分布

图3为环境温度为 10 °C 时 1<sup>#</sup>至 4<sup>#</sup>样品的电场分布图。由图3可知, GIS 终端内部电场强度最小处为线芯, 电场强度最大处为 XLPE 与半导体屏蔽层交界面。为研究高压屏蔽电极 CB 含量不同导致的 GIS 终端内部电场强度变化, 绘制观测路径  $L1$  至  $L3$  上的电场强度分布图, 结果如图4所示。

图4a中电场强度曲线左半部分的场强变化较小, 均小于  $2.50 \times 10^{-3}$  kV/mm; 电场强度曲线右半部分的场强呈现持续上升的趋势。这是因为电场强度曲线右半部分对应位置是嵌入应力锥的高压屏蔽电极末端部分, 电极末端的几何形状发生突变导致其曲率半径减小; 电极末端的曲率半径减小导致电荷密度增加以及电场线的高度集中, 进而显著增强电场强度。电场强度曲线上电场强度最大值对应位置是  $F$  点, 这是因为  $F$  点是高压屏蔽电极与应力锥、XLPE 的交点处, 其几何形状发生突变以及介质界面的介电常数差异均会加剧局部场强集中。当高压屏蔽电极为 2<sup>#</sup> 样品时,  $F$  点电场强度为  $2.42 \times 10^{-2}$  kV/mm; 与电场强度最大值  $2.71 \times 10^{-2}$  kV/mm 相比,  $F$  点电场强度降低了 10.71% 左右。

图4b中电场强度曲线的第一峰值对应位置是  $C$  点, 为应力锥与增强绝缘以及终端内部空隙的交点; 第二峰值对应位置是  $D$  点, 为应力锥端部。曲线上电场强度最大值对应位置是  $E$  点, 这是因为  $E$

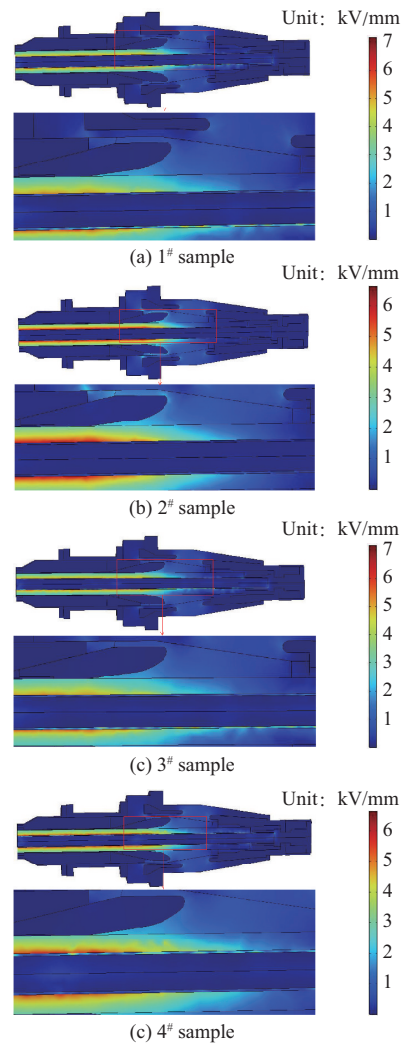


图3 环境温度为 10 °C 时 1<sup>#</sup>至 4<sup>#</sup>样品的电场分布图

Fig. 3 Electric field distribution diagrams of 1<sup>#</sup> to 4<sup>#</sup> samples at an ambient temperature of 10 °C

点位于应力锥根部, 应力锥根部形状尖锐导致曲率半径减小, 曲率半径越小处电场强度越高; 应力锥与 XLPE 的介电常数差异导致应力锥根部介电常数不连续, 极易导致电场畸变。当高压屏蔽电极为 2<sup>#</sup> 样品时,  $D$  点、 $E$  点的电场强度最小, 最小值分别为 0.59 kV/mm, 1.17 kV/mm。

图4c中电场强度曲线左半部分的场强基本保持在 1.60 kV/mm 以下, 电场强度曲线右半部分的场强呈现持续下降的趋势。电场强度曲线上电场强度最大值对应位置是  $I$  点, 这是因为  $I$  点是应力锥、增强绝缘以及 XLPE 的交点, 介质的改变导致介电常数的不连续, 极易导致电场畸变, 显著增强电场强度。当高压屏蔽电极为 2<sup>#</sup> 样品时,  $I$  点电场强度为 2.58 kV/mm, 当高压屏蔽电极为 1<sup>#</sup> 样品时,  $I$  点电场强度最大, 最大值为 2.76 kV/mm。

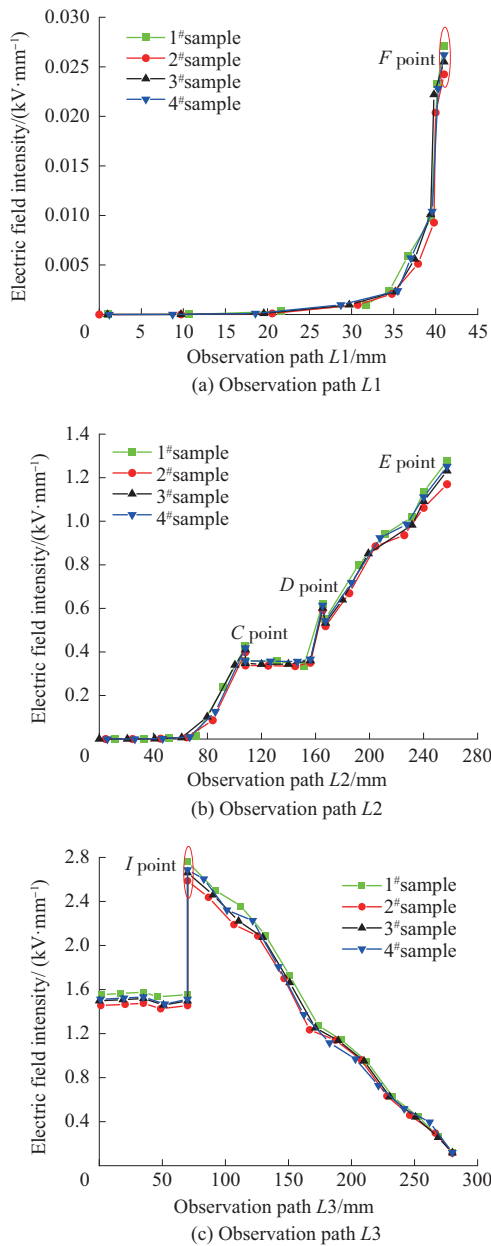


图4 环境温度为10 °C时观测路径L1至L3的电场强度分布图

Fig. 4 Electric field intensity distribution diagram along observation path from L1 to L3 at an ambient temperature of 10 °C

当环境温度为10 °C时,与观测路径L2上D点、E点以及路径L3上I点相比,观测路径L1上的F点电场强度受高压屏蔽电极CB含量的影响最大,观测路径L1上电场分布受高压屏蔽电极的影响最为显著。当高压屏蔽电极选择2#样品时,观测路径L1上F点,路径L2上D点、E点,路径L3上I点的电场强度此时最小。综上所述,在环境温度为10 °C时最优CB质量分数应为30%。

## 2.2.2 环境温度为25 °C时GIS终端电场分布

图5为环境温度为25 °C时1#至4#样品的电场分

布图。由图5可知,GIS终端内部电场强度最小处为线芯,电场强度最大处为XLPE与半导体屏蔽层交界面。绘制观测路径L1至L3的电场强度分布图,结果如图6所示。

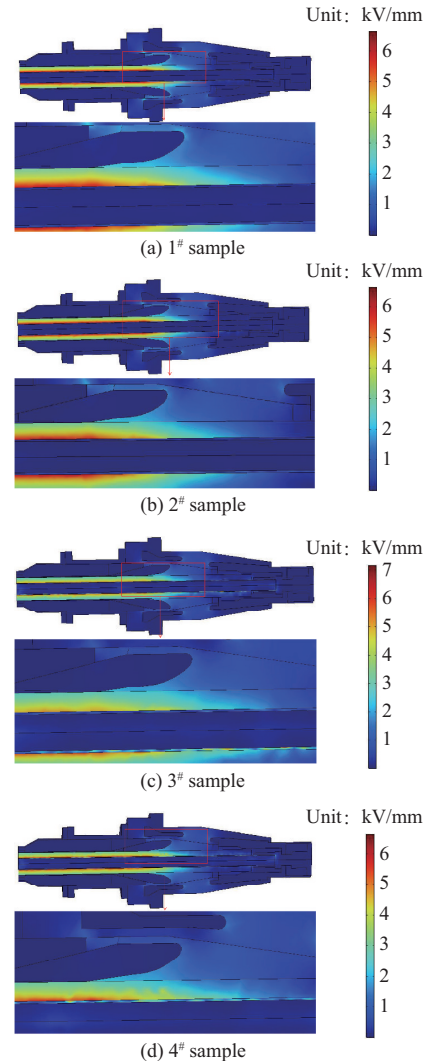


图5 环境温度为25 °C时1#至4#样品的电场分布图

Fig. 5 Electric field distribution diagrams of 1# to 4# samples at an ambient temperature of 25 °C

图6a中电场强度曲线整体上呈现上升的趋势,嵌入应力锥的高压屏蔽电极末端部分电场强度最高,远离应力锥的高压屏蔽电极末端部分电场强度最低。电场强度曲线上电场强度最大值对应位置是F点。高压屏蔽电极为2#样品时,F点电场强度为 $2.22 \times 10^{-2}$  kV/mm,与电场强度最大值 $2.81 \times 10^{-2}$  kV/mm相比,F点电场强度降低了20.99%左右。

图6b中电场强度曲线整体上呈现上升趋势,应力锥根部E点电场强度在电场强度曲线上最大;电场强度曲线有两个峰值,第一峰值对应位置是C点,第二峰

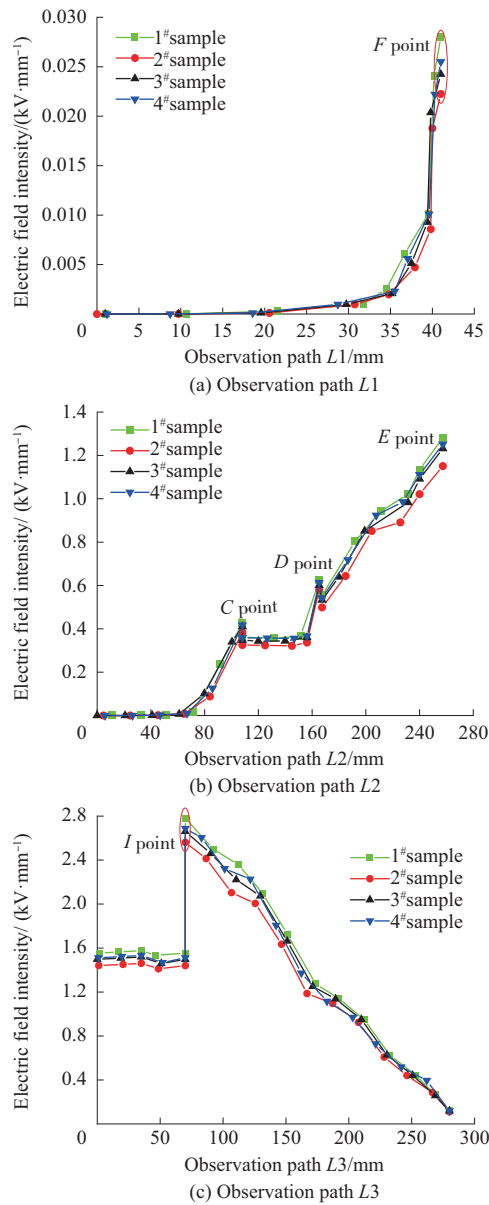


图6 环境温度为25 °C时观测路径L1至L3的电场强度分布图  
Fig. 6 Electric field intensity distribution diagram along observation path from L1 to L3 at an ambient temperature of 25 °C

值对应位置是D点。当高压屏蔽电极为2#样品时,D点的电场强度最小,最小值为0.58 kV/mm。当高压屏蔽电极为2#样品时,E点电场强度为1.15 kV/mm;当高压屏蔽电极为1#样品时,E点电场强度为1.28 kV/mm,E点电场强度降低了10.16%左右。

图6c中XLPE与应力锥和高压屏蔽电极交界线GI上电场强度变化较小,XLPE与增强绝缘交界线IJ上电场强度持续下降。电场强度曲线上电场强度最大值对应位置是I点。当高压屏蔽电极为2#样品时,I点电场强度最小,最小值为2.56 kV/mm;当高压屏蔽电极为1#样品时,I点电场强度最大,最大值

为2.78 kV/mm。

当环境温度为25 °C时,与观测路径L2上D点、E点以及路径L3上I点相比,观测路径L1上的F点电场强度受高压屏蔽电极CB含量的影响最大,观测路径L1上电场分布受高压屏蔽电极的影响最为显著。当高压屏蔽电极选择2#样品时,观测路径L1上F点,路径L2上D点、E点,路径L3上I点的电场强度此时最小。综上所述,在环境温度为25 °C时最优CB质量分数应为30%。

### 2.2.3 环境温度为40 °C时GIS终端电场分布

图7为环境温度为40 °C时1#至4#样品的电场分布图。由图7可知,GIS终端内部电场强度最小处为线芯,电场强度最大处为XLPE与半导体屏蔽层交界面。绘制观测路径L1至L3上的电场强度分布图,结果如图8所示。

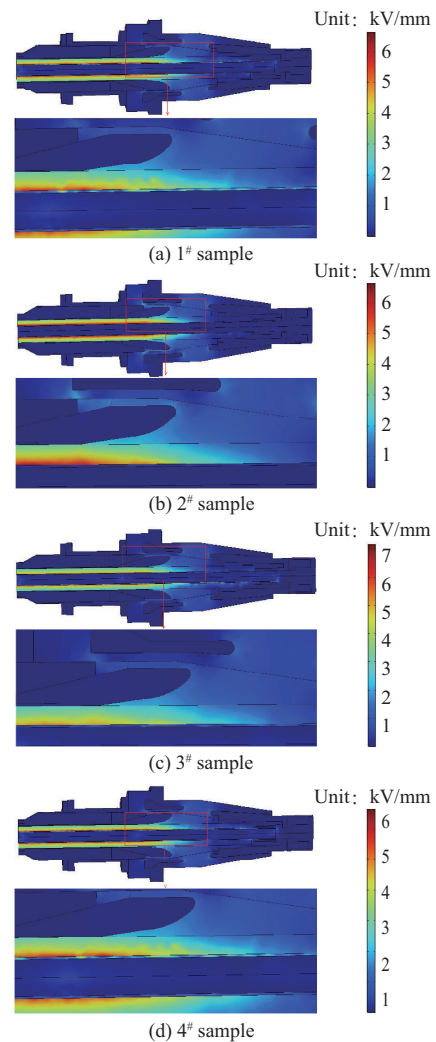


图7 环境温度为40 °C时1#至4#样品的电场分布图  
Fig. 7 Electric field distribution diagrams of samples 1# to 4# at an ambient temperature of 40 °C

图8a中嵌入应力锥的高压屏蔽电极末端部分电场强度受高压屏蔽电极CB含量的影响最大,远离应力锥的高压屏蔽电极末端部分电场强度受高压屏蔽电极CB含量的影响最小。电场强度曲线上电场强度最大值对应位置是F点。当高压屏蔽电极为2#样品时,F点电场强度为 $2.32 \times 10^{-2}$  kV/mm,与电场强度最大值 $2.91 \times 10^{-2}$  kV/mm相比,F点电场强度降低了20.27%左右。

图8b中电场强度曲线整体上呈现上升的趋势,应力锥根部电场强度受高压屏蔽电极CB含量的影响最大;电场强度曲线有两个峰值,对应位置分别为C

点与D点,电场强度曲线上电场强度最大值对应位置是E点。当高压屏蔽电极为2#样品时,D点、E点电场强度最小,最小值分别为0.60 kV/mm、1.18 kV/mm。

图8c中电场强度曲线上电场强度最大值对应位置是I点,I点为XLPE与应力锥根部交界点,其电场强度受高压屏蔽电极CB含量的影响最大。XLPE与应力锥和高压屏蔽电极交界线GI上电场强度变化较小,XLPE与增强绝缘交界线IJ上电场强度持续下降。当高压屏蔽电极为2#样品时,I点电场强度最小,最小值为2.60 kV/mm。

当环境温度为40℃时,与观测路径L2上D点、E点以及路径L3上I点相比,观测路径L1上的F点电场强度受高压屏蔽电极CB含量的影响最大,路径L1上电场分布受高压屏蔽电极的影响最为显著。当高压屏蔽电极选择2#样品时,观测路径L1上F点,路径L2上D点、E点,路径L3上I点的电场强度此时最小。综上所述,在环境温度为40℃时最优CB质量分数应为30%。

### 2.3 温度场仿真结果

图9为不同环境温度下GIS终端的温度分布图。由图9可得,当环境温度由10℃上升到40℃时,GIS终端内部的温度也逐渐上升,其最高温度点在导体线芯处,其最低温度点在GIS终端外表面处。当环境温度分别为10,25,40℃时,GIS终端内部的温度差保持在47.2℃,不受环境温度的影响。由此可以得出结论,环境温度的改变只影响GIS终端的绝对温度,并不会改变GIS终端内部的温度差。

为准确直观地研究终端内部的温度分布,分别绘制观测路径L1至L3的温度分布图。如图10所示,当环境温度每上升15℃时,观测路径L1至L3上温度曲线整体也上升15℃;环境温度的改变只影响观测路径L1至L3上绝对温度,并不会改变观测路径L1至L3上的温升。

图10a中温度曲线整体上呈现两端高中间低的特征,外在表现为高压屏蔽电极两端的温度偏高,高压屏蔽电极中间部分温度偏低。温度曲线上最高温度对应的位置是A点,沿观测路径L1的温度变化较为平缓,最大温差仅为2.75℃,表明观测路径L1上热传导相对均匀。图10b中温度曲线上最高温度对应的位置是E点,这是因为E点位于应力锥根部,距离导体线芯的距离最小,受到导体焦耳热效应的影响更大。图10c中温度曲线整体上呈现单调

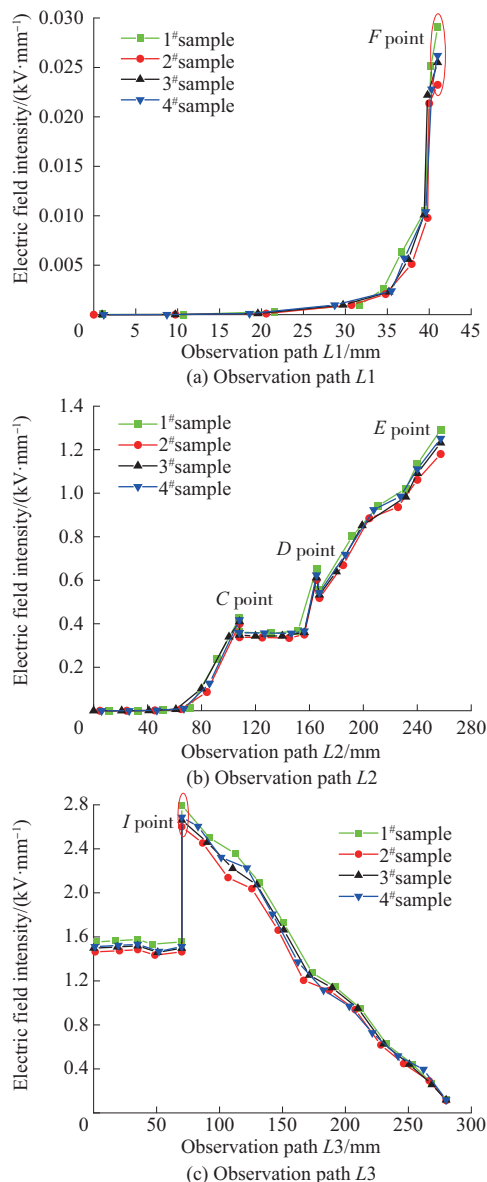


图8 环境温度为40℃时观测路径L1至L3的电场强度分布图  
Fig. 8 Electric field intensity distribution diagram along observation path from L1 to L3 at an ambient temperature of 40℃

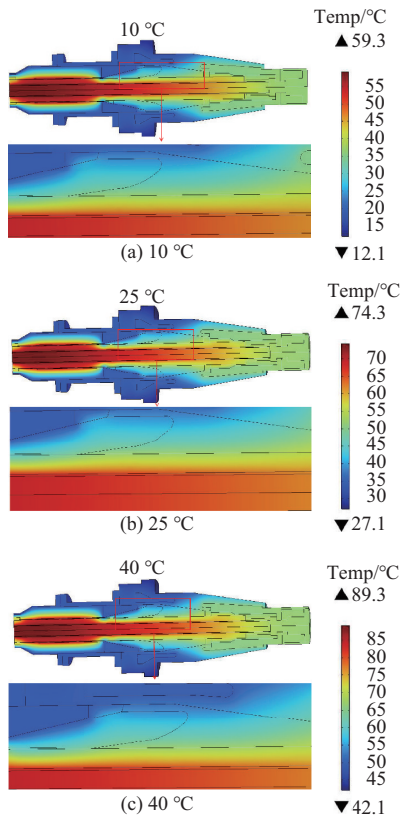


图9 不同环境温度下GIS终端的温度分布图

Fig. 9 Temperature distribution diagrams of GIS terminals under different ambient temperatures

递增的趋势,温度曲线上最低温度对应的位置是G点,温度曲线上最高温度对应的位置是J点。

### 3 局部放电检测与工频耐受电压试验

对优化后的GIS终端,通过局部放电检测与工频耐受电压试验进行验证。试验平台是由调压器、变压器、保护电阻、分压器、耦合电容、检测阻抗、测试仪以及试验样品组成,试验平台原理图如图11所示。

调压器通过调节输出电压,满足不同测试阶段的电压需求。变压器将调压器输出的低电压升至试验所需的高电压。保护电阻的阻值为50 k $\Omega$ ,能够限制短路电流或过电压对设备的冲击。分压器能够实时监测高压输出值,确保试验电压的准确性。耦合电容为1 000 pF,检测阻抗为50  $\Omega$ ,测试仪为MPD-600局部放电测试仪<sup>[22-23]</sup>。

#### 3.1 局部放电检测

局部放电检测参照GB/T 11017.3-2024中110 kVXLPE绝缘电力电缆附件试验要求,首先给优化后的GIS终端施加 $1.75U_0$  (112 kV)的试验电压,持续时间为10 s;然后试验电压缓慢地降到 $1.5U_0$  (96 kV),

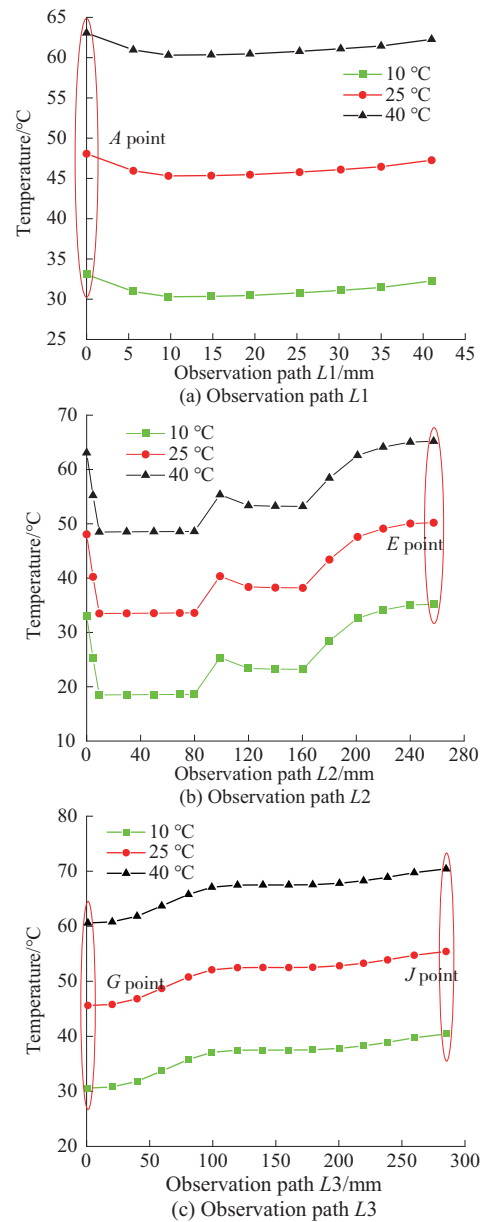


图10 不同环境温度下观测路径L1至L3的温度分布图

Fig. 10 Temperature distribution diagram of observation path from L1 to L3 under different environmental temperatures

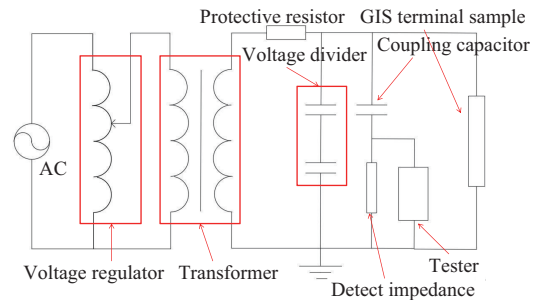


图11 试验平台原理图

Fig. 11 Schematic diagram of test platform

通过条件为GIS终端中无超过申明灵敏度(不超过5 pC)的可检测的放电<sup>[24-27]</sup>。

基于 GB/T 11017.3-2024,选取 4 组优化后的 GIS 终端以及未优化的 GIS 终端作为样品进行局部放电检测,申明灵敏度为 2.20 pC,试验结果如图 12 所示。由图 12 可知,4 组优化后的 GIS 终端以及未优化的 GIS 终端在试验中均未检测出超过 2.20 pC 的放电量,均符合要求;但是优化后的 GIS 终端的放电量更少,绝缘性能优越。

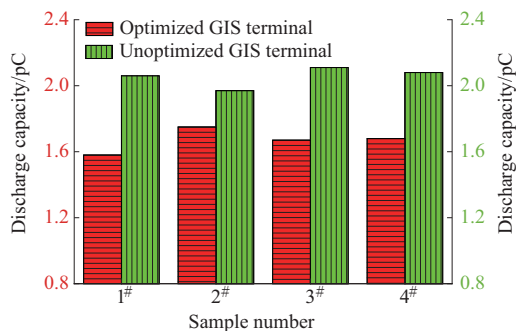


图 12 局部放电检测结果

Fig. 12 Partial discharge test results

### 3.2 工频耐受电压试验

工频耐受电压试验参照 GB/T 11017.3-2024 中 110 kVXLPE 绝缘电力电缆附件试验要求,首先给优化后的 GIS 终端施加  $2.5U_0$  (160 kV) 的试验电压,持续时间为 15 min;通过条件为 GIS 终端不发生绝缘击穿或闪络<sup>[28-29]</sup>。

基于 GB/T 11017.3-2024,选取 4 组优化后的 GIS 终端以及未优化的 GIS 终端作为样品进行工频耐受电压试验,比较工频耐受电压试验中的施加电压,结果如图 13 所示<sup>[30-31]</sup>。由图 13 可知,4 组优化后的 GIS 终端以及未优化的 GIS 终端样品的施加电压均大于 160 kV,未发生绝缘击穿或闪络现象,通过工频耐受电压试验的验证。

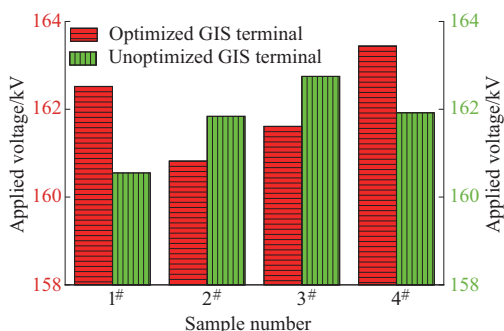


图 13 工频耐受电压试验结果

Fig. 13 Power frequency withstand voltage test results

## 4 结论

(1)在相同温度条件下,CB 含量的增加会导致

高压屏蔽电极的体积电阻率降低;在 CB 含量不变条件下,温度升高会导致高压屏蔽电极的体积电阻率增加。

(2)高压屏蔽电极的 CB 含量以及环境温度均会影响 GIS 终端内部观测路径  $L1$  至  $L3$  的电场分布,观测路径  $L1$  上电场分布受高压屏蔽电极的影响最为显著。基于仿真结果,高压屏蔽电极的最优 CB 质量分数是 30%。

(3)当环境温度改变时,GIS 终端整体温度会同步变化,环境温度的改变只影响 GIS 终端的绝对温度,并不会改变 GIS 终端内部的温度差。

(4)优化后的 GIS 终端局部放电性能好,能够通过工频耐受电压试验的验证,优化后的 GIS 终端具备良好的电气绝缘性能。

### 参考文献

- [1] 郑书生,孔举,戴敏婷,等. X射线激励 XLPE 电缆终端金属颗粒局部放电的研究[J]. 电工技术学报,2025,40(3):913-927.  
ZHENG Shusheng, KONG Ju, DAI Minting, et al. Study on partial discharge of metal particles in XLPE cable terminal excited by X-ray[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 913-927.
- [2] 黄博,杨铭远,聂永杰,等. 绝缘材料热老化对电缆终端接头典型缺陷处电场畸变的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 124-132.  
HUANG Bo, YANG Mingyuan, NIE Yongjie, et al. Effect of insulating materials thermal aging on electric field distortion of typical defects in cable terminal joints[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 124-132.
- [3] 秦晨元,魏福庆,杨世元,等. 交联聚乙烯电缆电树老化的研究进展[J]. 工程塑料应用,2023,51(7):175-181.  
QIN Chenyuan, WEI Fuqing, YANG Shiyuan, et al. Research progress on electrical tree aging of crosslinked polyethylene cables[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 175-181.
- [4] 黄剑平,陈伟林,彭向阳,等. 电老化对 XLPE 海底电缆绝缘性能影响[J]. 工程塑料应用,2023,51(4):111-118.  
HUANG Jianping, CHEN Yilin, PENG Xiangyang, et al. Effect of electric ageing on insulation performance of crosslinked polyethylene submarine cable[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 111-118.
- [5] 毛世明,修雪颖,黄兆阁. 基于 Moldex3D 的电缆接头外套注塑仿真模拟[J]. 工程塑料应用,2022,50(11):84-89.  
MAO Shiming, XIU Xueying, HUANG Zhaohe. Injection molding simulation of cable joint coat based on Moldex3D[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(11): 84-89.
- [6] 尹游,李诗雨,胡佳,等. 基于抗老化剂含量分布的交联聚乙烯电缆绝缘层老化特性[J]. 工程塑料应用,2022,50(9):115-120.  
YIN You, LI Shiyu, HU Jia, et al. Aging characteristics of cross-

- linked polyethylene cable insulation based on content distribution of anti-aging agent[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(9):115–120.
- [7] 杨爱晟,冯霆,王中杰,等. 变电站低压电缆绝缘层老化特征及老化模型[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(5):126–131.
- YANG Aisheng, FENG Ting, WANG Zhongjie, et al. Aging characteristics and model of low voltage cable insulation layer in transformer substation[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(5):126–131.
- [8] 谢明星,沈云海,沈家麟. 玻璃纤维增强聚乙烯复合材料的界面改性[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(11):100–104.
- XIE Mingxing, SHEN Yunhai, SHEN Jialin. Interfacial modification of glass fiber reinforced polyethylene composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(11):100–104.
- [9] 陈汝盼,林少芬,林鸿裕. 聚丙烯/改性膨胀石墨复合材料结构及性能[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(11):139–143.
- CHEN Rupan, LIN Shaofen, LIN Hongyu. Structure and properties of polypropylene/modified expanded graphite composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(11):139–143.
- [10] 梁家宇,王帅,戚嵘嵘. 正交试验法优化铂催化液体硅橡胶导电发泡材料[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(8):110–116.
- LIANG Jiayu, WANG Shuai, QI Rongrong. Optimization of platinum catalyzed liquid silicone rubber conductive foam by orthogonal experiment[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(8):110–116.
- [11] 王岩,李志强,夏宇涛,等. PP/POE/CB 导电屏蔽复合材料的制备和性能[J]. *塑料*, 2020, 49(3):32–35.
- WANG Yan, LI Zhiqiang, XIA Yutao, et al. Preparation and properties of PP/POE/CB semi-conductive shielding composite[J]. *Plastics*, 2020, 49(3):32–35.
- [12] 孟广泽,张沛红,冯宇,等. 导电屏蔽材料体积电阻率对聚乙烯空间电荷特性的影响[J]. *高电压技术*, 2019, 45(5):1 674–1 680.
- MENG Guangze, ZHANG Peihong, FENG Yu, et al. Effect of volume resistivity of semi-conductive shielding material on the space charge property in LDPE[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(5):1 674–1 680.
- [13] ZHAN Y P, HOU S, FU M L, et al. Improved conductive filler dispersion and charge injection properties of impact polypropylene copolymer DC cable semiconductive screen material by graft modification[J]. *Journal of Polymer Research*, 2025, 32(7). DOI: 10.1007/s10965-025-04476-z.
- [14] CHENG H B, ZHANG G X, LIU X H, et al. Achieving acceptable electromagnetic interference shielding in UHMWPE/ground tire rubber composites by building a segregated network of hybrid conductive carbon black[J]. *Nanocomposites*, 2023, 9(1):100–115.
- [15] 李陈莹,陈杰,刘建,等. 中压电缆信道特性判别绝缘与导电材料老化劣化状态方法[J]. *高压电器*, 2025, 61(3):168–175.
- LI Chenying, CHEN Jie, LIU Jian, et al. Method on distinguishing aging and deterioration condition of insulation and semi-conductive materials via channel characteristics of medium voltage cable[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(3):168–175.
- [16] 余欣,王智星,陈宇慧,等. 高压半导电屏蔽料导电炭黑结构与应用对比研究[J]. *绝缘材料*, 2025, 58(3):60–69.
- YU Xin, WANG Zhixing, CHEN Yuhui, et al. Comparative research of conductive carbon black structure and application in high-voltage semi-conductive shielding materials[J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(3):60–69.
- [17] 何文,侯帅,陈小琼,等. 乙烯-丙烯酸丁酯基高压电缆半导电屏蔽料挤出工艺技术研究[J]. *绝缘材料*, 2025, 58(3):51–59.
- HE Wen, HOU Shuai, CHEN Xiaoqiong, et al. Research on extrusion process technology of ethylene-butyl acrylate based semi-conductive shielding material for high-voltage cable[J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(3):51–59.
- [18] HOU S, FU M L, ZHAN Y P, et al. A comprehensive analysis of vinyl-based matrix resins used in semi-conductive shielding materials for power cables[J]. *Journal of Polymer Research*, 2025, 32(3). DOI:10.1007/s10965-025-04312-4.
- [19] ZHANG Y H, ZHANG L G, LIU Y, et al. Preparation and performance optimization in high-voltage cable semiconductive shielding layer for polyolefin composite based on multifractal analysis [J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(2):1 206–1 219.
- [20] LI G C, LIU T Y, CHEN X L, et al. Effect of matrix resin components on properties of the semi-conductive shielding material for high-voltage cable[J]. *High Voltage*, 2024, 9(2):419–428.
- [21] 张亚,王晓阳,龚敏,等. 乙烯基非交联电缆屏蔽料性能与分散剂含量关系研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(4):33–39.
- ZHANG Ya, WANG Xiaoyang, GONG Min, et al. Study on the relationship between the properties of vinyl non-cross linked cable shielding material and the content of dispersant[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(4):33–39.
- [22] 黄韬,郝艳捧,肖佳朋,等. 10 kV XLPE 电缆终端典型安装缺陷的工频局部放电特征对比研究[J]. *电网技术*, 2022, 46(6):2 420–2 428.
- HUANG Tao, HAO Yanpeng, XIAO Jiapeng, et al. Comparative study on partial discharge characteristics of typical installation defects in 10 kV XLPE cable terminals under power frequency[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(6):2 420–2 428.
- [23] ZHANG A N, HE J H, LIN Y, et al. Recognition of partial discharge of cable accessories based on convolutional neural network with small data set[J]. *COMPEL-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2020, 39(2):431–446.
- [24] 彭小圣,陈玉竹,贾诗媛,等. 多物理场下的高压直流电缆局部放电研究展望[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(3):1 210–1 222.
- PENG Xiaosheng, CHEN Yuzhu, JIA Shiyuan, et al. Research

- prospects for partial discharge of high voltage DC cables under multi-physics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(3): 1 210–1 222.
- [25] 周利军,刘聪,权圣威,等. 基于点对称变换的乙丙橡胶电缆终端缺陷诊断[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(9): 2 388–2 398.  
ZHOU Lijun, LIU Cong, QUAN Shengwei, et al. Defect diagnosis of EPR cable terminal based on symmetrized dot pattern[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(9): 2 388–2 398.
- [26] 郭蕾,李丽妮,白龙雷,等. 车载电缆终端非线性应控管改善畸变电场分布的优化研究[J]. *铁道学报*, 2021, 43(2): 61–70.  
GUO Lei, LI Lini, BAI Longlei, et al. Optimal research on improving distorted electric field distribution by nonlinear stress tube of vehicle cable terminal[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(2): 61–70.
- [27] 李巍巍,朱轲,周凯,等. 多应力条件下电缆附件局部放电的演变过程[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(1): 164–169.  
LI Weiwei, ZHU Ke, ZHOU Kai, et al. Evolution of partial discharge in cable accessories under multi-stress conditions[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(1): 164–169.
- [28] MA H, DU Y, SHEN J Y, et al. Transient characteristics and sites of pre-breakdown in spark conditioning for high-voltage vacuum interrupter under power frequency voltage[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023, 17(24): 5 386–5 395.
- [29] WANG Y Q, HUANG Z Y, ZHANG X L, et al. Characteristics of electrical tree morphological in glass fibre reinforced epoxy resin under power frequency voltage[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2022, 16(4): 274–282.
- [30] 康文斌,蒙绍新,崔浩喆,等. 工频电压叠加谐波作用下硅橡胶绝缘的陷阱和介电特性演变规律[J]. *高电压技术*, 2019, 45(12): 3 810–3 819.  
KANG Wenbin, MENG Shaoxin, CUI Haozhe, et al. Evolution of trap and dielectric properties of silicone rubber insulation under power frequency voltage with harmonic component[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(12): 3 810–3 819.
- [31] SHI S X, HU Z H, MA Z, et al. Travelling waves-based identification of sub-health condition of feeders in power distribution system[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(5): 1 067–1 073.