

# 气体绝缘输电管道用环氧树脂/氮化硼高导热复合材料表面电荷动态特性

杜伯学<sup>1</sup>, 杜强<sup>1</sup>, 李进<sup>1</sup>, 李昂<sup>1</sup>, 傅明利<sup>2</sup>, 肖微<sup>2</sup>

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080)

**摘要:** 大容量气体绝缘管道输电(GIL)运行过程中产生的温升问题会加速环氧树脂绝缘子老化, 温度梯度下绝缘子表面电荷行为也与沿面闪络密切相关。为解决上述问题, 制备了环氧树脂/氮化硼(EP/BN)高导热复合材料, 研究其在加热至60℃再散热不同时间下针板电晕后的表面电荷动态特性。结果表明: 在相同温度下, 试样表面电荷消散速度随着BN含量的增加而先减慢后加快, 起始表面电荷密度先升高后降低; 对于同一种试样, 随着散热时间的增加, 表面电荷消散速度变慢, 起始表面电荷密度升高, 且通过陷阱能级分布特性发现, 试样的深、浅陷阱能级均变低, 深陷阱密度增大, 浅陷阱密度减小, 且BN掺杂含量越高, 该分布特性越明显。

**关键词:** GIL; 环氧树脂/BN复合材料; 温升; 直流电晕; 表面电位; 陷阱分布特性

## Surface Charge Dynamic Behaviors of Epoxy/BN Composite with High Thermal Conductivity for Gas Insulated Transmission Pipeline

DU Boxue<sup>1</sup>, DU Qiang<sup>1</sup>, LI Jin<sup>1</sup>, LI Ang<sup>1</sup>, FU Mingli<sup>2</sup>, XIAO Wei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** The temperature rises during gas insulated transmission pipeline (GIL) operation will accelerate the aging of epoxy insulators, and the surface charge behavior of insulators under temperature gradient is also closely related to flash-over. In order to solve the above problems, EP/BN composites with high thermal conductivity were prepared, of which the surface charge dynamics under needle-plane corona system were investigated with different cooling time after being heated to 60 °C. The results show that the surface charge dissipation rate of the sample decreases first and then increases with increasing the BN contents at the same temperature, and the initial surface charge density increases first and then decreases. For the same sample, the surface charge dissipation slows down and the initial surface charge density increases with the lapse of the cooling time. Besides, it can be found from the trapping distribution characteristics that the depth of both deep and shallow traps becomes lower, and the deep trap density increases while the shallow trap density decreases. The higher the BN content is, the more obvious the distribution characteristics are.

**Key words:** GIL; epoxy/BN composites; temperature rise; DC corona; surface potential; trap distribution characteristic

## 0 引言

近年来, 随着高压直流输电技术的发展, 越来越多的国家开始关注和研究其在输电领域的优势, 并建立了高压直流输电系统<sup>[1-3]</sup>。气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)作为一种新型的输电方式, 因其

传输容量大、损耗小、可靠性高等优点, 可应用到大容量、长距离的高压直流输电系统中<sup>[4-5]</sup>。环氧树脂制造成本低廉, 具有优异的机械和电气性能, 被用来制造GIL中的盆式绝缘子等主要绝缘部件<sup>[6-7]</sup>。然而, GIL在实际运行过程中导体通有很大电流再加上环氧绝缘的电导损耗, 会产生很大的热量, 使环氧树脂温度升高, 加快绝缘的老化, 缩短GIL的使用寿命, 当GIL发生短路时, 温升问题将更加严重<sup>[8]</sup>。因此高导热型的环氧树脂的研究成为热点, 而氮化硼(BN)颗粒作为优异的纳米填料, 常用于研究高导热性绝缘材料的填充物<sup>[9]</sup>。

GIL盆式绝缘子在运行过程中会受外电场的影

基金资助项目: 国家自然科学基金(51537008); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB239506); 中国南方电网有限责任公司科技项目(WYKJQQ20143013); 广东省领军人才专项基金研究项目(SEPRI-K151001)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (51537008), National Basic Research Program of China (973 Program) (2014CB239506), Science and Technology Program of China Southern Power Grid(WYKJQQ20143013), Guangdong Leading Talent Foundation (SEPRI-K151001).

响, 自由电荷会在其固-气交界面累积形成表面电荷, 而表面电荷的大量积累会导致绝缘子表面电场发生畸变, 降低绝缘子的耐受电压, 对直流输电系统的稳定运行造成威胁<sup>[10-11]</sup>。研究表明, 绝缘子的表面电荷积累对于沿面闪络的发生有重要影响<sup>[12-13]</sup>。目前已有部分学者对直流电压下的表面电荷动态特性进行了研究。张贵新等研究了在空气中不同极性直流电压单独作用下和电压极性翻转作用下环氧盆式绝缘子表面电荷的积累和消散情况, 发现电荷消散过程近似呈指数衰减规律<sup>[14]</sup>。张博雅等研究发现了盆式绝缘子在 SF<sub>6</sub> 气体会积累与施加直流电压极性相反的电荷, 并在积累到一定程度时会导致沿面闪络发生<sup>[15]</sup>。杜伯学等研究了表层氟化后的环氧/TiO<sub>2</sub> 复合材料在直流电压下的表面电荷特性, 发现环氧树脂中添加少量的 TiO<sub>2</sub> 粒子会降低表面电荷消散速度, 而表层氟化后的试样表面电荷消散速度却加快<sup>[6]</sup>。然而, 关于高导热型环氧树脂表面电荷动态特性研究还很少。

本文制备了不同纳米 BN 含量的环氧树脂试样, 并在不同的温度下对试样进行直流电晕放电, 然后使用静电电位计测量表面电荷的消散过程, 研究了纳米粒子的界面效应和试样热导率对复合环氧树脂表面电荷动态特性的影响。

## 1 试样制备和实验装置

### 1.1 环氧树脂/BN 纳米复合试样的制备

本文使用缩水甘油醚类的双酚 A 环氧树脂作为制作环氧树脂试样的基体, 掺杂剂为片状的六方 BN 纳米颗粒, 尺寸约为 100 nm。制作流程如下: 首先将 BN 纳米颗粒混合至环氧树脂中, 同时加入偶联剂以提高纳米颗粒在基体中的分散性, 使用超声搅拌器对混合物进行充分搅拌, 接着将上述混合物与固化剂(低分子量聚酰胺树脂, HY-651)按照 3:1 的质量比混合并继续搅拌均匀, 然后放置在真空箱中进行脱气处理, 最后使用压片机将混合物在 100 °C 温度下压制不少于 4 h, 使其完全固化成型后冷却, 得到厚度为 1 mm, 边长为 50 mm 的正方形试样。本文制备了纳米 BN 质量分数分别为 10%、20%、30%和 40%的环氧树脂复合试样, 同时制备了纯环氧树脂试样作为对照。图 1 为纳米质量分数为 40%的试样的表面和断面形貌 (SEM) 图。由图 1 可见, 试样表面没有完全被纳米颗粒覆盖, 且纳米颗粒在环氧基体中分散比较均匀, 没有发生明显

的团聚现象。

对试样实验前均要使用酒精将表面擦拭干净并进行充分干燥。为避免残余电荷对实验结果的影响, 每次实验使用新的试样, 每组实验重复 5 次。

### 1.2 实验装置及实验过程

图 2 为电晕放电和表面电荷测量实验装置图。为研究试样在不同温度下的表面电荷动态特性, 本装置将地电极牢固设置在加热平台上, 并在两者间加设可靠的绝缘。本实验装置分为电晕放电和电荷测量两个模块。在电晕放电模块中所用电源为高压直流电源, 使用针电极将电荷注入到试样表面, 针尖和试样上表面的距离设置为 3 mm, 且位于试样中心的正上方<sup>[16]</sup>。地电极及加热平台设置在光滑的滑轨上, 当向试样表面注入电荷后, 可将其立即滑至电荷测量模块并对电荷消散情况进行测量和记录。在电荷测量模块, 使用连接至静电电位计的 Kelvin 型振动式探头测量试样表面的电位数据, 探头与试样表面的距离设置为 3 mm, 同样位于试样中心的正上方。静电电位计的测量精度为  $\pm 3$  V, 分辨率为 3 mV。本文还使用夏溪电子科技有限公司生产的 TC-3000 快速导热系数仪测量试样的热导率。

表面电荷实验在空气相对湿度约为 40% 条件下

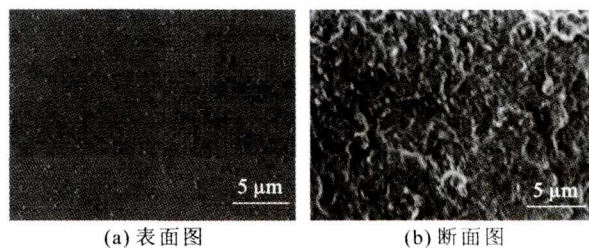


图 1 纳米质量分数为 40% 的试样表面及断面形貌电镜图

Fig.1 SEM images of surface and fractured surface of the samples with the weight percentage of 40%

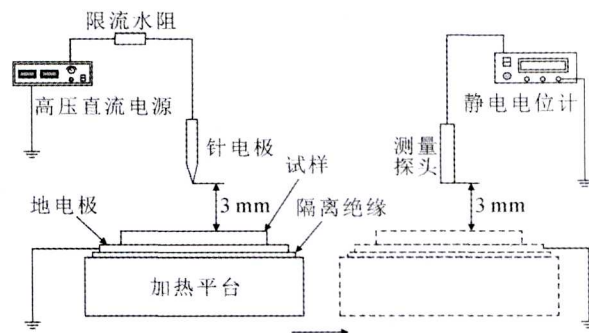


图 2 电晕放电和表面电荷测量装置

Fig.2 Experiment setup for corona discharge and surface charge measuring system

进行。开始实验时,先使用加热平台将试样加热至需要的温度,并保持足够长的时间以保证试样各部分温度分布均匀。本实验中使用的高压直流电压为+4 kV和-4 kV。

### 1.3 表面电位数据处理方法

试样表面电荷密度与表面电位的关系式为<sup>[12]</sup>

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{L} \varphi(t) \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_r$  分别为真空下的介电常数和试样的相对介电常数;  $L$  为试样的厚度;  $\sigma$  为表面电荷密度;  $\varphi(t)$  为  $t$  时刻的表面电位。

表面电荷消散快慢可用电位消散率来表征,消散率越高,消散速度也就越快。消散率  $D$  定义为<sup>[17]</sup>

$$D = \frac{\varphi_0(t) - \varphi(10 \text{ min})}{\varphi_0(t)} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\varphi_0(t)$  为起始表面电位值;  $\varphi(10 \text{ min})$  为 10 min 时的表面电位值。

表面电荷的消散过程往往与试样表面的陷阱能级和陷阱密度有关系,陷阱能级  $E_m$  可由式(3)计算得到<sup>[18]</sup>, 即

$$E_m = k_B T \ln(\nu_A t) \quad (3)$$

式中:  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为开尔文温度;  $\nu_A$  为陷阱中电荷的逃逸频率;  $t$  为表面电荷消散时间。在本实验中只有  $T$  和  $t$  发生变化。

试样表面陷阱密度  $N_t$  与电荷消散时间  $t$  和电位消散的速度有关系,可由式(4)表示<sup>[18]</sup>, 即

$$N_t = \frac{4\epsilon_0 \epsilon_r}{eL^2 k_B T} \left| t \frac{d\varphi(t)}{dt} \right| \quad (4)$$

式中  $e$  为元电荷的电量。图 3 为一个典型的  $N_t$  与  $E_m$  对应关系图。由图 3 可见曲线出现了两个峰值,分别对应着深陷阱和浅陷阱。因此,试样表面电荷的消散过程必然跟两种陷阱的分布均有关系。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 纳米掺杂浓度对表面电荷特性的影响

本实验采用针-板电极向试样注入电荷,由于针电极尖端曲率半径很小,在直流电压作用下会引起电晕放电,向试样表面注入电荷。

图 4 为不同纳米质量分数的环氧/BN 试样在 30℃ 下施加直流电压后的表面电荷消散曲线,其中图 4(a)施加电压为+4 kV,图 4(b)施加电压为-4 kV。由图 4 可见,不管是施加正压还是负压,试样表面电荷密度均随着时间的增加而减少,而且消散速度

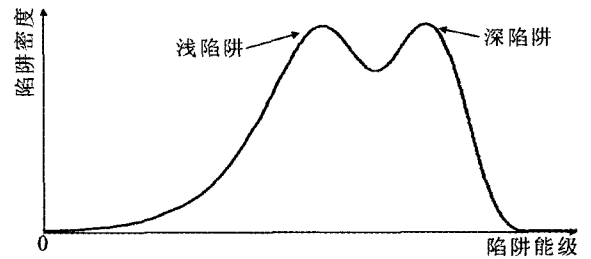
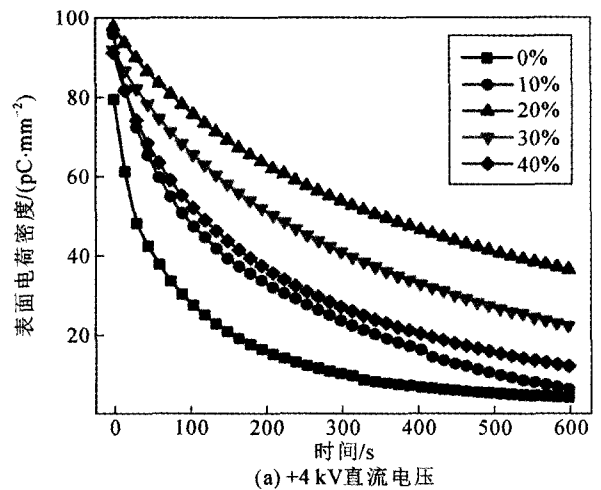
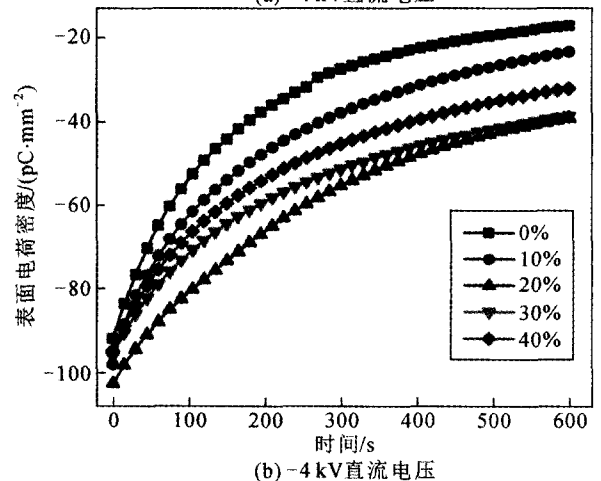


图 3 典型的陷阱能级分布图

Fig.3 A typical curve of the trap energy distribution



(a) +4 kV 直流电压



(b) -4 kV 直流电压

图 4 不同纳米质量分数的试样在 30℃ 下直流放电后的表面电荷消散曲线

Fig.4 Relationship between the surface charge density and the decay time of sample with different weight percentage after the application of DC voltage at 30℃

也随着时间的增加不断减小,这是因为前期表面电位值很高,试样表面与地电极间形成的电场强度很大,被试样陷阱尤其是浅陷阱所俘获的电荷在高场强作用下很容易获得能量而脱陷而消散,因此消散速度很快;到后期,表面电位越来越低,试样表面与地电极间场强也越来越小,而且此时被浅陷阱俘获的电荷大多已消散,深陷阱俘获的电荷在低场强

下也不容易脱陷, 所以电荷消散速度会越来越慢。图 4 中显示, 对于同一种试样, 施加负直流电晕后的起始表面电荷密度始终比施加正直流后高, 这是因为当幅值相同时, 负电压更容易在针电极上产生电子崩作用, 而且电子也比正离子更容易在电场作用下迁移至试样表面。由图 4 还可见, 当试样中纳米 BN 质量分数从 0 增加至 40% 时, 起始表面电荷密度先增加后降低, 且纳米 BN 质量分数为 20% 时, 起始表面电荷密度达到最大。

图 5 为电荷消散率与试样中纳米 BN 质量分数的关系曲线。由图 5 可见, 施加负压后的电位消散率始终大于施加正压后的情况。由图 5 还可看到, 随着纳米 BN 质量分数的增加, 消散率先降低后增加, 说明试样的表面电荷消散速度随着纳米质量分数的增加先减小后增大。当试样纳米质量分数为 20% 时, 消散率达到最小值, 意味着此时试样表面电荷消散速度最慢, 这也解释了图 4 中纳米质量分数在 20% 时起始表面电荷密度最大的原因。当试样在针板电极系统中做电晕放电处理时, 针电极向试样表面注入电荷的同时, 已到达试样表面的电荷也会在外施电场等的作用下不断消散, 电荷消散途径包括表面迁移、介质体内传输等。试样起始表面电荷密度是电晕放电过程中电荷注入和电荷消散同时作用的结果, 是两者达到动态平衡时的数值。当施加电压不变时, 单位时间内注入试样表面的电荷也是一定的, 那么此时表面电荷消散速度越快, 两者达到动态平衡时的起始表面电荷密度也越低。因此, 随着纳米质量分数的增加, 起始表面电荷密度先增大后减小, 纳米质量分数在 20% 时达到最大, 对应此时的表面电荷消散速度也最快。

表面电荷的消散过程往往与电介质的陷阱能级分布及载流子的入陷和脱陷过程有关<sup>[19]</sup>。纳米颗粒的加入会在环氧基体中引入纳米界面区域, 而纳米界面内存在大量深陷阱。当纯试样在电晕放电作用后, 电荷大都被环氧基体本身的浅陷阱俘获, 因此比较容易在自激电场的作用下脱陷发生迁移。而对于加入纳米颗粒的试样, 大量的电荷会被环氧基体本身的陷阱和纳米界面区域的深陷阱俘获, 处于深陷阱的电荷很难脱陷而消散, 因此在纳米 BN 质量分数从 0 增加至 20% 时, 试样表面电荷消散速度变慢。但当纳米颗粒添加太多时, 环氧基体中的各纳米界面区域会发生重叠, 在外电场下甚至形成一个导电路径, 从而能增大了载流子的迁移速率, 加

快了电荷的消散速度<sup>[20]</sup>。这就是当纳米 BN 质量分数从 20% 增加至 40% 时, 试样表面电荷消散速度加快的原因。

## 2.2 不同散热时间下试样表面电荷动态特性

在环氧树脂中添加纳米 BN 颗粒可增大试样的热导率<sup>[9]</sup>, 本文研究了不同热导率环氧树脂的表面电荷动态特性。实验前先将试样在加热平台上加热至 60 °C, 接着关闭加热平台电源, 令试样在室温下自然散热 0 s、60 s 和 120 s, 记录下散热后的温度, 然后使用加热平台将试样加热至相应温度后进行表面电荷实验。各试样的热导率及自然散热 60 s 和 120 s 后的温度见表 1。

由表 1 可见, 纯环氧试样的热导率比较低, 但随着纳米 BN 添加量的增加, 试样的热导率随之上升, 纳米质量分数为 40% 试样的热导率上升至纯试样的 2 倍左右。这是因为 BN 纳米颗粒会在环氧基体内部形成导热通路, 热量沿着此通路可加快其传递速度, 进而使复合试样的热导率升高。同时由表 1 可见, 纳米 BN 添加质量分数越高, 试样散热相同时间后的温度越低, 说明散热速度越快。

图 6 为试样分别散热 0 s、60 s 和 120 s 后所对应温度下的表面电荷积累特性, 其中图 6(a) 为纯环

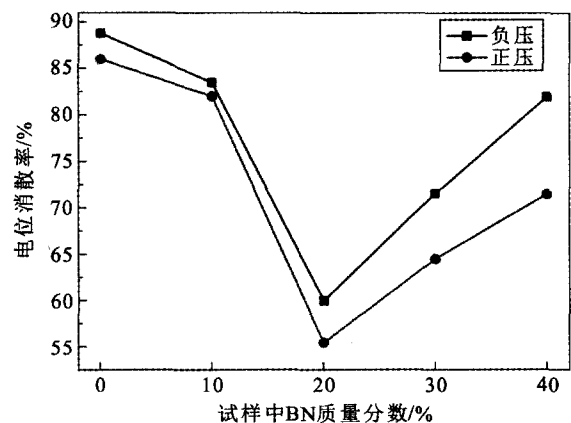


图 5 电位消散率与纳米 BN 质量分数的关系

Fig.5 Relationship between the decay rate and the weight percentage of BN particles

表 1 各试样的热导率及散热不同时间后的温度

Table 1 Thermal conductivity of samples and the temperatures after different cooling time

参数	试样纳米质量分数/%			
	0	10	20	40
热导率/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	0.21	0.27	0.28	0.40
散热 60 s 后温度/°C	53.0	51.4	50.8	48.5
散热 120 s 后温度/°C	48.0	45.4	43.9	40.0

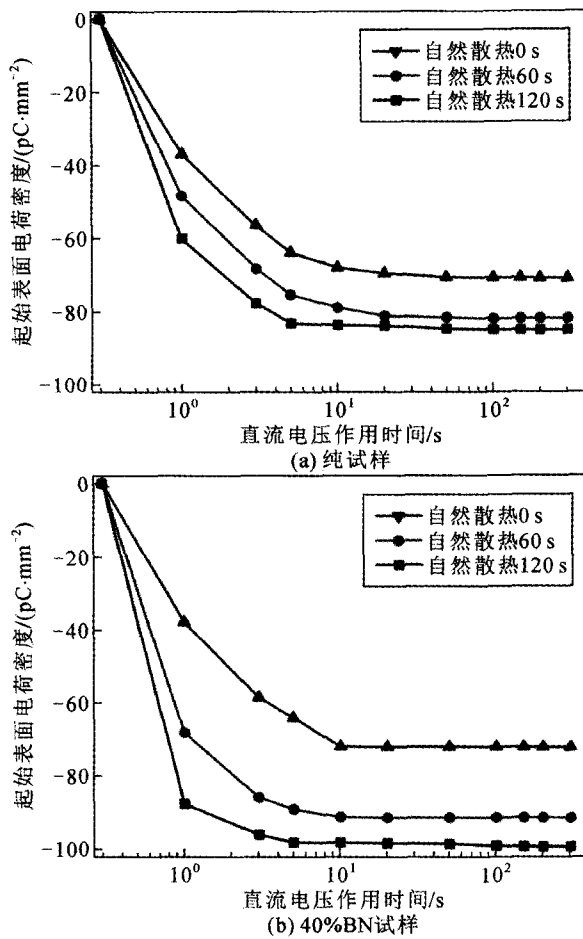


图6 试样起始表面电位与电晕作用时间的关系

Fig.6 Relationship between initial surface charge density of sample and corona action time

氧试样的实验结果,图6(b)为纳米质量分数为40%复合试样的实验结果,实验采用-4 kV的直流电压作用。由图6可见,随着直流电压作用时间的增加,试样起始表面电荷密度一开始上升很快,然后上升速度越来越慢,最后在10 s左右达到稳定,几乎不再变化。这是因为已注入至试样表面的电荷会对针电极上的同极性电荷产生排斥作用,因此,试样表面电荷越多,针电极上的电荷就越难再注入至试样表面,试样表面电荷密度上升速度也就越慢。由图6还可以看到:对于同一试样,自然散热时间越长,对应温度下试样放电稳定后的表面电荷密度越大。图6(b)中纳米BN质量分数为40%的复合试样各条曲线稳定后,其起始表面电荷密度的差值比图6(a)中的纯试样大。

图7为试样分别在散热0 s、60 s和120 s后所对应温度下的表面电荷消散特性,其中图7(a)为纯环氧试样的实验结果,图7(b)为纳米质量分数为40%复合试样的实验结果,实验采用+4 kV的直流

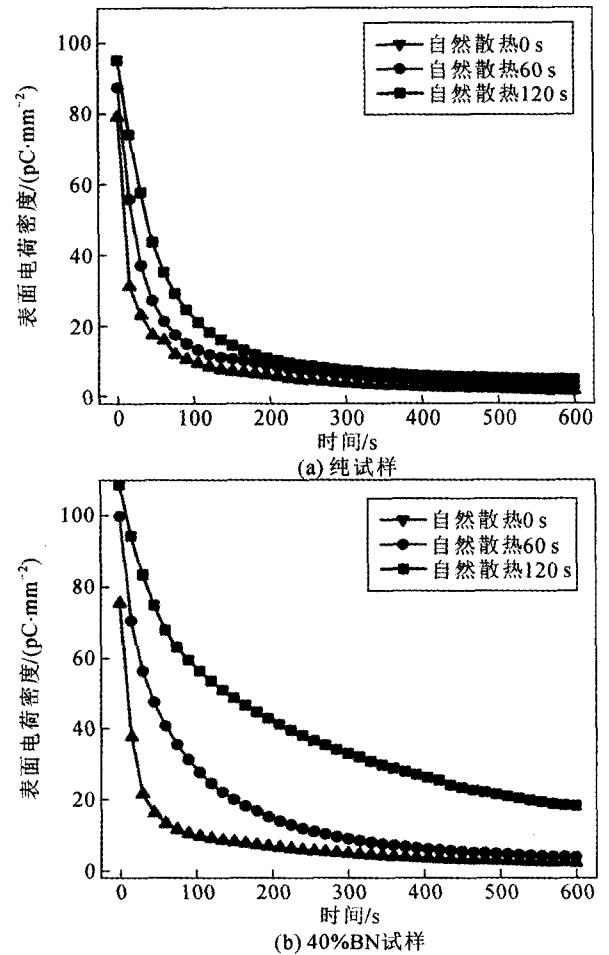


图7 试样在不同散热时间后对应温度下直流放电后的表面电荷消散曲线

Fig.7 Relationship between the surface charge density and the decay time of sample after the application of DC voltage at the temperatures after different cooling time

电压作用。由图7可见:对于同一试样,自然散热时间越长,对应温度下表面电荷的总体消散速度越慢,这也是图6中自然散热时间越长而稳定后的表面电荷密度越大的原因,如2.1节所述,表面电荷消散速度越慢,与针电极注入电荷过程达到动态平衡后的起始表面电荷密度也越大。由图7还可看到,纳米质量分数为40%的复合试样在自然散热不同时间的3个温度下表面电荷消散速度降低的幅度比纯环氧试样更大,这是因为复合环氧试样比纯环氧试样热导率高,在相同散热时间下复合环氧试样的温度会降至更低,自然散热后的3个温度梯度更大,因此表面电荷消散速度降低幅度也更大,这也是图6中纳米质量分数40%的复合试样各条曲线稳定后的起始表面电荷密度的差值比纯试样大的原因。更详细的机理将在2.3节中进行分析。

图8为各试样分别在散热0 s、60 s和120 s后

所对应温度下的直流电晕作用后的起始表面电荷密度, 其中图 8(a)为+4 kV 直流高压作用, 图 8(b)为-4 kV 直流高压作用。由图 8 可见, 对于同一试样, 随着自然散热时间的增加, 对应温度下电晕作用后的起始表面电荷密度呈上升趋势, 这是因为随着温度的下降, 试样表面电荷的消散速度也在下降, 由前文所述, 电晕作用过程和消散过程达到平衡的表面电荷密度即会上升。对于不同的试样在散热时间为 0 s 时, 他们的温度是一样的, 此时起始表面电荷密度随着试样中纳米 BN 质量分数的增加而先增大后减小, 原因如 2.1 节所述。当散热时间为 60 s 或 120 s 时, 各试样的温度并不相同, 因此变化规律与上述不同。在散热 60 s 的情况下, 起始表面电荷密度随着试样中纳米 BN 质量分数的增加而先增大再略有减小。然而在散热 120 s 的情况下, 起始表面电荷密度随纳米质量分数的增加始终在增大。

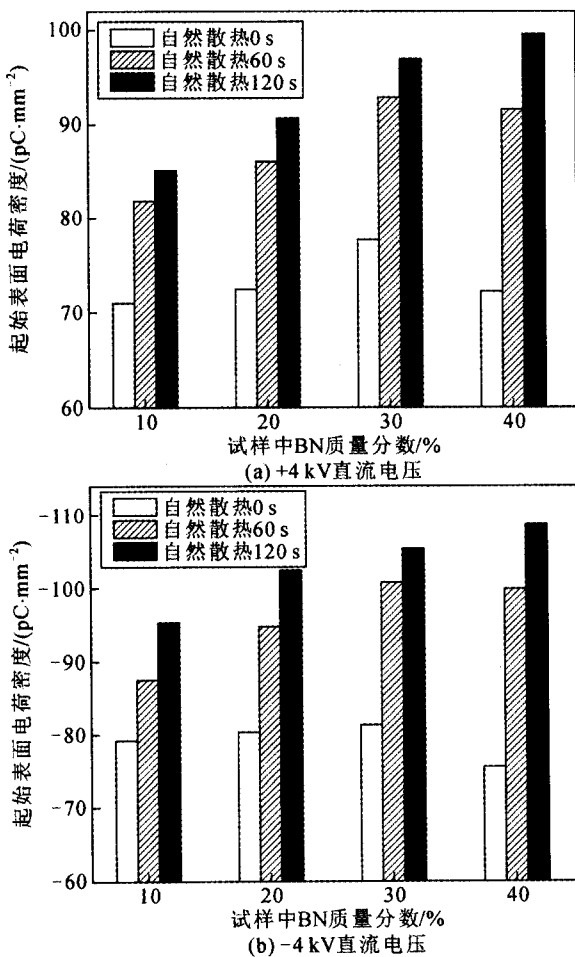


图 8 试样在不同散热时间后对应温度下起始表面电位与纳米 BN 质量分数的关系

Fig.8 Relationship between the initial surface charge density and the weight percentage of BN particles at the temperatures after different cooling time

这是因为散热 60 s 时, 各试样温度相差还不很大, 温差也不能主导试样的表面电荷动态特性; 在散热 120 s 时, 各试样的温差已很大, 此时温度的差异决定着各试样的电荷动态特性。

### 2.3 不同温度梯度下陷阱能级和密度分布特性

由前文所述, 表面电荷的消散过程与电介质的陷阱能量分布及载流子的入陷和脱陷过程紧密相关, 因此对环氧试样的陷阱分布特性的研究至关重要。本文根据表面电荷消散曲线和式(1)、式(3)和式(4)计算出了试样的陷阱分布特性。

图 9 为各试样在自然散热不同时间后对应的温度下的陷阱能级变化曲线, 其中图 9(a)为施加正压后的情况, 对应空穴陷阱能级的变化; 图 9(b)为施加负压后的情况, 对应电子陷阱能级的变化。由图 9 可见, 空穴陷阱和电子陷阱均存在深陷阱和浅陷阱之分, 且深陷阱能级均约为 0.84~0.89 eV, 浅陷阱能级均约为 0.77~0.82 eV。所有试样随着自然散热时间的增加, 电子陷阱能级和空穴陷阱能级均呈下降趋势。这是因为随着自然散热时间的增加, 试

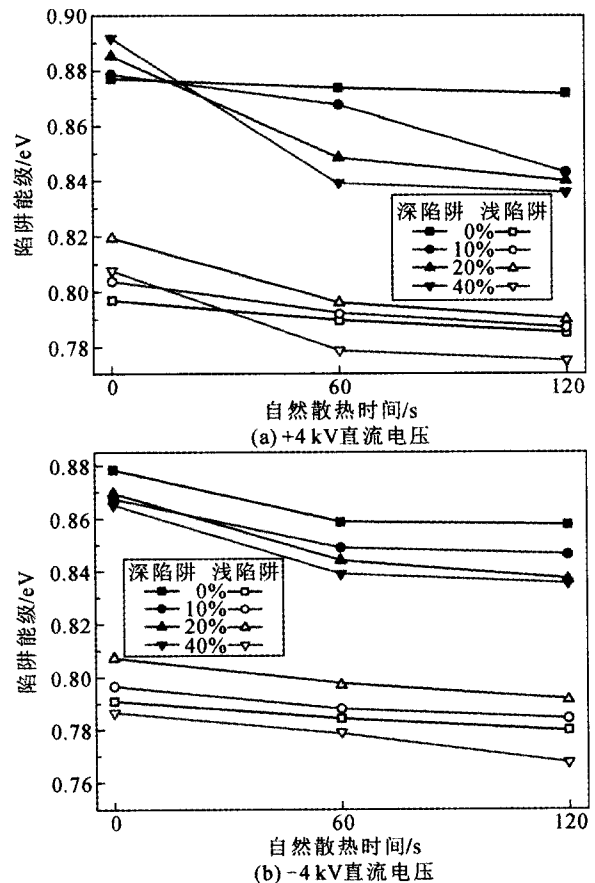


图 9 试样在不同散热时间后对应温度下的陷阱能级  
Fig.9 Trap energy levels of the samples at the temperatures after different cooling time

样的温度越来越低，被陷阱俘获的电荷获得的能量也更低，电荷更不容易从陷阱中脱陷，因此能够成功脱陷的电荷所处的陷阱能级整体变低，表现为试样的深陷阱和浅陷阱能级均下降的趋势。

图 10 和图 11 分别为各试样在自然散热不同时间后对应温度下的深陷阱和浅陷阱密度分布曲线。由图 10 可见不管是空穴陷阱还是电子陷阱，随着自然散热时间的增加深陷阱密度分布均升高，而图 11 恰好相反，随着散热时间的增加浅陷阱密度分布均降低，这说明在散热时间增加而试样温度越来越低时，试样中深陷阱俘获的电荷增多同时浅陷阱俘获的电荷却减少。这是因为在电晕放电过程中，由于浅陷阱的势垒很低，已被浅陷阱俘获的电荷会很快脱陷并发生迁移，而在迁移过程中电荷又会被更深的陷阱俘获，当散热时间较长导致温度很低时，电荷的能量较小，一旦被深陷阱俘获将很难脱陷，因此深陷阱俘获的电荷将会越来越多而浅陷阱却相反。与此同时，浅陷阱中的电荷由于能量低也不容易脱陷，这就是图 8 中随着散热时间的增加，表面

电荷消散速度变慢的原因。

通过比较发现，深陷阱密度分布的变化幅度较浅陷阱更大，这说明散热时间不同导致的温度差异对深陷阱密度分布的影响更大，这也证明了当温度降低时深陷阱密度分布是影响环氧试样表面电荷消散速度的主要原因。由图 10 还可见，对于不同的试样，纳米 BN 质量分数越多，深陷阱密度分布随着散热时间的增加而升高的幅度越大。这也是因为纳米 BN 质量分数越多，试样的热导率越大所致。

### 3 结论

1) 研究不同纳米质量分数对试样表面电荷特性的影响时发现，纳米 BN 质量分数  $w$  从 0 增加至 20% 时，试样表面电荷消散速度变慢，电位消散率降低，试样起始表面电荷密度却升高；而当  $w$  从 20% 增加至 40% 时，试样表面电荷消散速度加快，电位消散率升高，试样起始表面电荷密度却降低。

2) 研究不同热导率对试样表面电荷特性的研究时发现，随着自然散热时间的增加，试样表面电

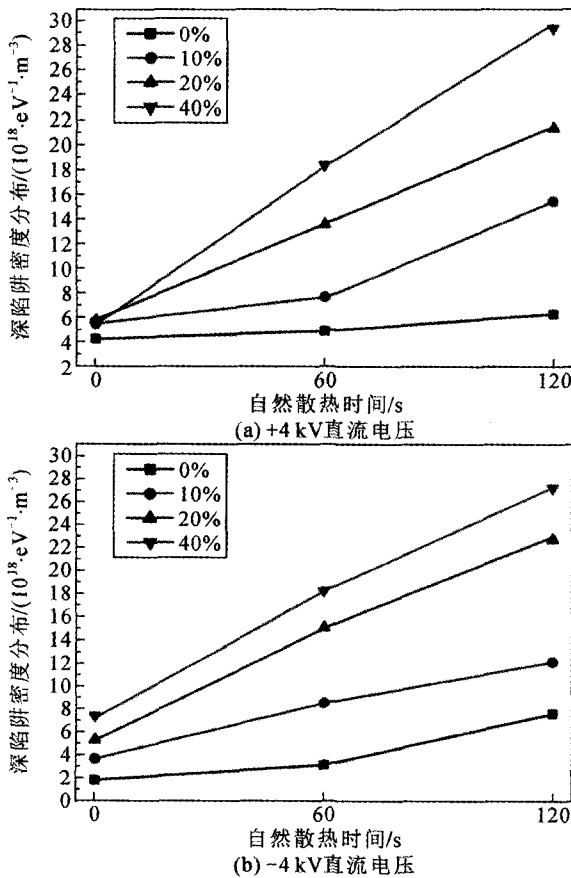


图 10 试样在不同散热时间后对应温度下的深陷阱密度分布  
Fig.10 Density distribution of deep traps of sample at the temperatures after different cooling time

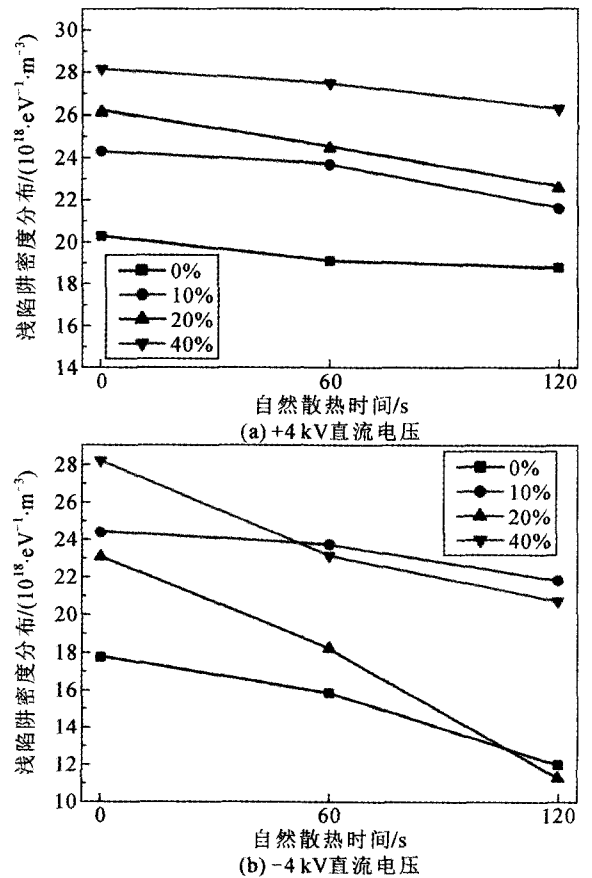


图 11 试样在不同散热时间后对应温度下的浅陷阱密度分布  
Fig.11 Density distribution of shallow traps of sample at the temperatures after different cooling time

荷消散速度降低,同时起始表面电荷密度却在升高,试样内的深陷阱能级均降低。而对于陷阱密度的分布,深陷阱的密度随着散热时间的增加而增加,浅陷阱的密度却在下降。同时,纳米BN质量分数越高的试样其热导率越高,温度下降也越快,在散热相同时间下,对应深陷阱的密度增加更大,表面电荷消散速度降低也更快。

3) BN 纳米颗粒的添加能够增大环氧树脂的热导率,解决 GIL 运行过程中的温升问题,但同时也可能降低表面电荷的消散速度,增加表面电荷的积累,提高沿面闪络的概率,对 GIL 稳定运行造成威胁。因此,掌握合适的纳米添加量对降低 GIL 的事故率具有重要意义。

## 参考文献 References

- [1] DU B X, LI J. Effects of ambient temperature on surface charge and flashover of heat-shrinkable polymer under polarity reversal voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1190-1197.
- [2] LIANG H C, DU B X, LI J, et al. Effects of non-linear conductivity on charge trapping and de-trapping behaviours in epoxy/SiC composites under DC stress[J]. IET Science Measurement & Technology, 2018, 12(1): 83-89.
- [3] MAGIER T, TENZER M, KOCH H. Direct current gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 440-446.
- [4] 唐炬, 潘成, 王邸博, 等. 高压直流绝缘材料表面电荷积聚研究进展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 10-21.  
TANG Ju, PAN Cheng, WANG Dibo, et al. Development of studies about surface charge accumulation on insulating material under HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 10-21.
- [5] DU B X, LIANG H C, LI J, et al. Temperature dependent surface potential decay and flashover characteristics of epoxy/SiC composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2018, 25(2): 631-638.
- [6] 李昂, 杜伯学, 徐航, 等. 表层氟化环氧纳米复合材料表面的电荷动态特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 410-416.  
LI Ang, DU Boxue, XU Hang, et al. Surface charge accumulation and decay of direct-fluorinated epoxy TiO<sub>2</sub> nanocomposites[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 410-416.
- [7] 刘朋飞, 南振乐, 李振军. ±800 kV 气体绝缘直流穿墙套管的研制[J]. 电气技术, 2017, 18(12): 42-45.  
LIU Pengfei, NAN Zhenyue, LI Zhenjun. Development of ±800 kV gas-insulated DC wall bushing[J]. Electrical Technology, 2017, 18(12): 42-45.
- [8] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及相关因素分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 65-72.  
WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Temperature rise numerical calculation and correlative factors analysis of gas-insulated transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 65-72.
- [9] 胡慧慧, 李凡, 李立群. 环氧树脂基导热绝缘复合材料的研究进展[J]. 绝缘材料, 2011, 44(5): 27-30.  
HU Huihui, LI Fan, LI Liqun. Progress in epoxy-based thermal conductive insulating composites[J]. Insulating Materials, 2011, 44(5): 27-30.
- [10] DU B X, ZHANG J W, GAO Y. Effects of TiO<sub>2</sub> particles on surface charge of epoxy nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(3): 755-762.

- [11] LIANG H C, DU B X, LI J, et al. Numerical simulation on the surface charge accumulation process of epoxy insulator under needle-plane corona discharge in air[J]. IET Science Measurement & Technology, 2018, 12(1): 9-16.
- [12] 海彬, 章程, 王瑞雪, 等. 等离子体沉积类 SiO<sub>2</sub> 薄膜抑制环氧树脂表面电荷积聚[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 375-385.  
HAI Bin, ZHANG Cheng, WANG Ruixue, et al. Plasma depositing SiO<sub>2</sub>-like film to suppress surface charge accumulation on epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 375-385.
- [13] STRAUMANN U, SCHULLER M, FRANCK C M. Theoretical investigation of HVDC disc spacer charging in SF<sub>6</sub> gas insulated system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2196-2205.
- [14] 张贵新, 张博雅, 王强, 等. 高压直流 GIL 中盆式绝缘子表面电荷积聚与消散的实验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1430-1436.  
ZHANG Guixin, ZHANG Boya, WANG Qiang, et al. Experiment study of surface charge accumulation and decay on a cone-type insulator in HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1430-1436.
- [15] 张博雅, 王强, 张贵新, 等. SF<sub>6</sub> 中绝缘子表面电荷积聚及其对直流 GIL 闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1481-1487.  
ZHANG Boya, WANG Qiang, ZHANG Guixin, et al. Surface charge accumulation on insulators in SF<sub>6</sub> and its effects on the flashover characteristics of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1481-1487.
- [16] KUMARA S, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. Charging of polymeric surfaces by positive impulse corona[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2009, 16(3): 726-733.
- [17] DU B X, GUO Y G. Effects of surface fluorination on dielectric properties and surface charge behavior of water absorbed polyimide film[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1369-1375.
- [18] SIMMONS J G, TAM M C. Theory of isothermal currents and the direct determination of trap parameters in semiconductors and insulators containing arbitrary trap distributions[J]. Physical Review B, 1973, 7(8): 3706-3713.
- [19] DU B X, DU Q, LI J, et al. Carrier mobility and trap distribution dependent flashover characteristics of epoxy resin[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 466-471.
- [20] 杜伯学, 崔彬, 徐航, 等. 聚乙烯/氮化硼高导热复合材料的耐电弧性和介电性能[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1412-1420.  
DU Boxue, CUI Bin, XU Hang, et al. Arc resistance and dielectric properties of polyethylene/boron nitride composites with high thermal conductivity[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1412-1420.



DU Boxue

Ph.D., Professor



LI Jin

Post-doctorate

Corresponding author

杜伯学

1961—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事聚合物绝缘材料的可靠性和安全性理论与试验、高温超导介电、纳米复合绝缘材料、电气绝缘在线监测、高电压新技术等方面的研究工作  
E-mail: duboxue@tju.edu.cn

李进(通信作者)

1988—, 男, 博士(后)

主要从事高压直流电缆及管道输电绝缘空间电荷调控机理研究工作  
E-mail: lijn@tju.edu.cn