

直流 GIL 绝缘子表面电荷抑制方法的研究进展

王天宇, 张贵新*

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Progress in Research of Surface Charge Suppression Method for DC GIL Insulators

WANG Tianyu, ZHANG Guixin*

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The accumulation of surface charges on insulators is an important factor that causes the degradation of the insulation performance of large-scale power transmission equipment such as DC gas insulated transmission lines (GIL). The research on how to effectively suppress the accumulation of surface charges on insulators has important engineering significance. The control and suppression of surface charge accumulation through material modification is currently a common and effective method. Based on the three main modification strategies, i.e., surface modification, doping modification, and other modification, the latest research progress in surface charge regulation through material modification in recent years were reviewed, and the advantages and disadvantages of each method were analyzed. Finally, the future research direction of controlling surface charge accumulation through material modification was prospected.

KEY WORDS: surface charge; material modification; high-voltage direct current (HVDC); gas insulated transmission lines (GIL)

摘要: 绝缘子表面电荷的积聚是造成大型输电设备如直流气体绝缘输电线路(gas insulated transmission lines, GIL)绝缘性能下降的重要因素, 研究如何有效抑制绝缘子表面电荷积聚具有重要的工程意义。而通过材料改性调控和抑制表面电荷积聚是目前较为普遍和有效的思路。该文从绝缘子表面改性、掺杂改性和其他改性 3 个主要的改性策略入手, 综述了近年来通过材料改性调控表面电荷的最新研究进展, 并对每种方法的优势和不足进行分析。最后, 该文对未来通过材料改性来调控表面电荷积聚的研究方向进行展望。

关键词: 表面电荷; 材料改性; 高压直流; 气体绝缘输电线路

基金项目: 国家自然科学基金(面上项目)(52177151)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (General Program) (52177151).

0 引言

为了满足长距离、大容量的电能输送需求, 高压直流(high-voltage direct current, HVDC)输电技术受到了越来越多的关注^[1]。其中, 气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)技术日趋成熟, 并得到了推广和应用^[2-4]。但是直流 GIL 设备在长期运行中绝缘子沿面闪络电压会降低, 而绝缘材料的沿面闪络问题是制约直流 GIL 发展和安全稳定运行的关键问题^[5-9]。研究表明, 绝缘子沿面闪络电压的变化和绝缘子表面电荷积聚现象密切相关^[10-14]。绝缘子表面积聚电荷会改变电场分布, 导致表面电场畸变, 从而可能诱发闪络, 对绝缘性能产生不利影响^[15-22]。在直流 GIL 中, 由于绝缘子长期处于单极性电压环境下, 电荷会在电场的作用下向一个方向迁移, 加之长期处于干燥密闭的环境中, 使得电荷易于积聚而不易消散, 给输电系统的安全稳定运行带来了很大的挑战^[23-26]。因此, 研究一种方法来抑制绝缘子表面电荷的积聚, 具有重要的工程价值。

目前, 关于抑制绝缘子表面电荷积聚的策略, 国内外专家学者们进行了广泛研究, 其中通过材料改性来抑制表面电荷积聚是目前最为普遍且有效的研究思路。因此, 本文对近年来关于材料改性抑制表面电荷积聚的重要研究成果进行综述。先介绍表面电荷的主要来源及积聚机理, 再从绝缘子表面改性处理和掺杂改性处理 2 方面总结目前关于材料改性对表面电荷进行调控和抑制的最新研究成果, 并对每种材料改性方法的优势和不足进行分析。最后, 对未来通过材料改性来抑制绝缘子表面电荷积聚的研究进行展望。

1 绝缘子表面电荷来源及积聚机理

GIL 设备由中心导杆和外壳同轴布置，其绝缘系统由气体和固体共同构成。目前，GIL 常用的绝缘气体为 SF₆ 气体或 SF₆/N₂ 混合气体，但由于 SF₆ 气体温室效应明显，因此目前国内外正在研究用 C₄F₇N 等环保型绝缘气体来替代 SF₆^[27-29]，固体绝缘材料常采用 70% 的 Al₂O₃ 微米颗粒掺杂环氧树脂制成。要想抑制 GIL 中气固界面的电荷积聚，首先要分析这些电荷的来源。图 1 为 GIL 中与界面电荷积聚相关部分的物理过程，可以看到其中物理过程非常繁杂。

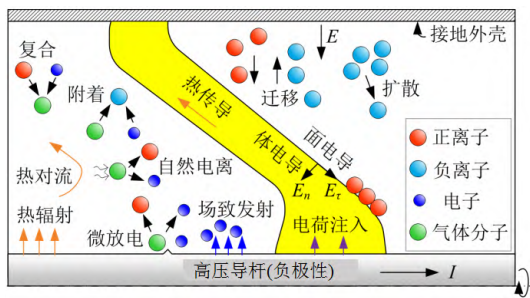


图 1 HVDC GIL 中电荷积聚的多物理过程
Fig. 1 Multiphysics process of surface charge accumulation in an HVDC GIL

从电荷的产生方式来看，气体侧和固体侧都会产生电荷。气体侧有宇宙背景辐射等因素导致的气体分子自然电离^[30]，金属微粒、尖端毛刺或三结合点处的微放电及阴极的场致发射等^[30-32]。固体侧电荷主要来源于高压电极的电荷注入、电场中绝缘材料的极化及材料中的缺陷引起的放电等。以上电荷来源中，有一部分电荷，比如气体侧金属微粒、尖端毛刺或三结合点处的微放电及材料中的缺陷引起的放电，主要属于加工过程中所带来的问题。减少这些电荷的来源主要通过提高加工水平和精细化程度来实现。而剩下的电荷来源则是无法避免的，比如气体侧的自然电离及固体侧从高压电极处注入的电荷。

大量的研究表明，气-固界面电荷主要通过 3 种输运方式积聚在绝缘子表面：1) 气体侧离子；2) 固体侧表面面电流；3) 固体侧体电流^[7,15]。这 3 种电荷输运模式对表面电荷密度 ρ_s 的贡献可以表示为

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = n \cdot J_V - n \cdot J_G - \text{div}(\kappa_s \cdot E_t) \quad (1)$$

式中： J_V 和 J_G 分别代表绝缘子固体侧和气体侧的电流， J_G 由气体侧电导率和气体中场强决定； κ_s 是

绝缘子表面电导率； E_t 是绝缘子表面的切向电场分量； n 是气固界面的单位法向相量。 J_V 由固体侧体电导 κ_d 和固体侧场强 E_d 决定，表达式为

$$J_V = \frac{\partial D}{\partial t} + (\kappa_d \cdot E_d) \quad (2)$$

这表明 J_V 和 J_G 与绝缘子表面电场的法向分量呈正相关。式(2)中各个物理量方向如图 2 所示^[33]。因此，有学者提出通过优化绝缘子结构来降低绝缘子表面电场的法向分量的方法，来抑制表面电荷通过气体侧或固体侧电导的积累^[34]。这种抑制表面电荷积累的方法虽然简单易行，但高度依赖于理想条件下的电场分布。当外界条件发生变化时，如存在温度梯度或脉冲电压时，电场分布也会随之发生变化，从而引起电荷积累。因此，这种方法不能从根本上抑制表面电荷的积累。

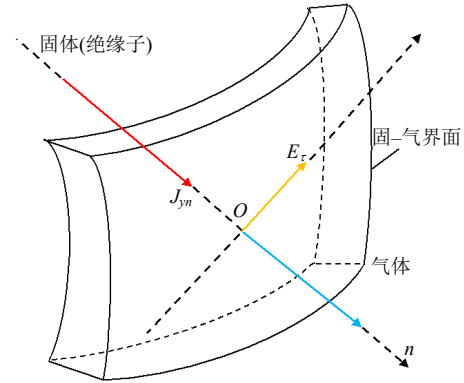


图 2 气-固界面各物理量方向示意图^[33]

Fig. 2 Schematic diagram of the direction of each physical quantity at the gas-solid interface^[33] (Open Access)

气体侧电导与电场强度呈非线性关系，与气体中正负离子的产生、迁移和扩散有关(见图 1)。因此，仅靠式(1)中 J_G 不能准确地描述气体侧电流密度。需要说明的是，对于实际 GIL 等电气设备在正常运行过程中，气体侧不会产生强烈的放电，并且绝缘气体也使用的是 SF₆ 等电负性气体，所以电子浓度可以忽略，输运方程只考虑正负离子的浓度，如下所示：

$$\partial_t n^+ = n_{IP} - R n^+ n^- - \text{div}(n^+ \cdot \mu^+ \cdot E) + D^+ \nabla^2 n^+ \quad (3)$$

$$\partial_t n^- = n_{IP} - R n^+ n^- + \text{div}(n^- \cdot \mu^- \cdot E) + D^- \nabla^2 n^- \quad (4)$$

式中： n^+ 与 n^- 分别表示正负离子浓度； n_{IP} 为在自然辐射下正负离子对产生速率； R 为正负离子复合系数； μ 为离子迁移率； D 为离子的扩散系数。

式(3)、(4)可以反映离子在气体中的产生、消失、迁移及扩散等过程的信息。由式(3)、(4)可得到气体中电流密度：

$$J_G = \frac{\partial D}{\partial t} + e(\mu^+ n^+ + \mu^- n^-) \cdot E - e\nabla(D^+ n^+ - D^- n^-) \quad (5)$$

近年来,很多文献研究表明在干燥洁净的直流 GIL 系统中,固体侧电导是绝缘子表面电荷积聚的主要方式,由于温度越高,体积电阻率越低,这种方式在实际 GIL 中温度梯度存在时尤为显著^[25,35-39]。因此,可以通过掺杂改性的方式,降低绝缘材料的体积电导率,从而降低固体侧体电流,进而实现抑制绝缘子表面电荷积聚的效果^[40]。同时,绝缘材料的表面电导率很低,表面电导率的变化对表面电荷的积聚影响较小^[15,25,32,41]。但是通过适当提高绝缘子表面电导率,可以加速表面电荷的消散。通过对电荷积累模式进行深入分析,发现电荷积累主要有 2 种形式:基本模式和电荷斑^[35]。前者是由于固体侧的电流大于气体侧电流造成的,因此降低固体侧的电流并抑制电荷注入可以降低表面电荷的整体水平。对于后一种模式,可以对绝缘体表面进行处理来促进电荷的消散,以起到减少了局部的电荷积累的效果。

因此,通过材料改性改善绝缘子表面电荷积聚的思路有以下 2 种:一是对绝缘子进行表面进行改性,加速积聚的表面电荷的消散;二是通过对绝缘子内掺杂纳米材料的方式进行体改性,来抑制表面电荷积聚。下文将重点从这 2 个方面来对材料改性调控表面电荷进行综述。

2 绝缘子表面改性

对绝缘子表面进行改性来加速表面电荷的消散,是控制表面电荷积聚的主要方法之一。目前常见的改性方案包括表面氟化、等离子体处理、表面涂覆涂层等。

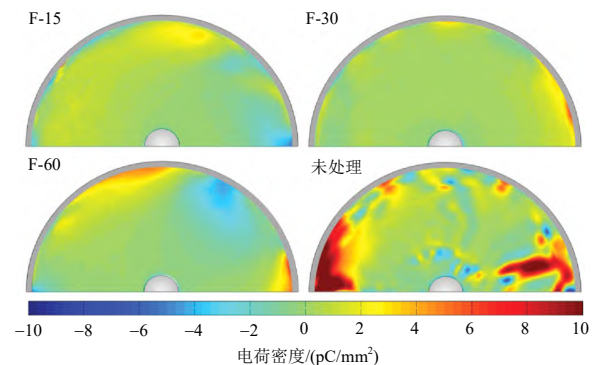
2.1 表面氟化处理

氟化技术在化工领域已经有了几十年的应用。氟气具有很强的化学活性,能和多种聚合物发生反应并形成稳定的碳氟键(C—F)。氟化技术目前在汽车油箱、电池等多个领域都有广泛的应用。近年来,一些学者通过对绝缘材料表面进行氟化处理,发现能很好地促进表面电荷的消散,并提升环氧绝缘子直流闪络性能和耐电弧能力。2012 年,同济大学安振连等发现对纯环氧表面氟化仅 10min,就能在表面形成一层微米级别的氟化层。通过氟化后的环氧树脂表面陷阱能级变浅,且抑制了表面电荷的积聚^[42]。随后,安振连等对绝缘子表面氟化进行了一

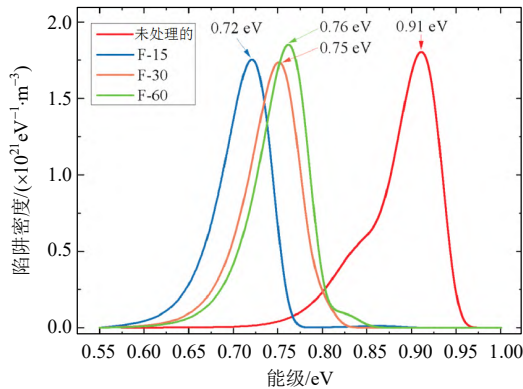
系列更加深入的研究。他们通过改变对纯环氧氟化的温度和时间,发现氟化温度越高,表面电荷消散速度越快。而氟化时间的延长似乎对电荷消散影响不大,过长的氟化时间促进电荷消散的效果反而还会下降^[43]。他们发现氟化明显地提高了纯环氧的直流闪络电压,氟化后的环氧直流闪络电压比未氟化提升了约 13%。他们认为这一现象与氟化层能促进表面电荷的消散有关^[44]。然后,他们对工业中实际运用的氧化铝掺杂的环氧绝缘子进行氟化,通过对比相同条件下未掺杂并氟化后的环氧绝缘子,发现氧化铝颗粒虽然也会被氟化并放出氧气,但对氟化层影响很小^[45],这为氟化技术在实际工程中的运用提供了指导。此外,他们还发现经氟化处理引入致密氟化层后,绝缘子耐电弧能力、耐紫外线辐射能力和耐电晕性能都有所提高^[46-48]。

张博雅等人对工业用 Al₂O₃/环氧复合绝缘子表面进行了氟化处理,对表面电位进行了测量,并用反演算法得到了直观的表面电荷密度分布图,结果如图 3(a)所示(其中 F-15, F-30, F-60 分别表示氟化 15、30 和 60 min)^[49]。从图中可以看到氟化后绝缘子表面积聚的电荷斑显著减少,且电荷密度远小于未处理区域。主要原因是通过氟化后表面原先较深的陷阱被较浅陷阱取代了(如图 3(b)所示),氟化后基体表层形成了碳-氟表层,这种表层相较于以前基体的表层陷阱能级下降,促进了表面电荷沿着表面消散。

除了环氧树脂,氟化技术还能用来对其他绝缘材料进行表面处理。如天津大学杜伯学等通过对室温硫化硅橡胶进行表面氟化,发现经氟化能增加硅橡胶表面的疏水性,并抑制表面电荷的积聚^[50]。此外,专家学者们还发现通过氟化聚酰亚胺薄膜、聚乙烯、聚苯乙烯、液态硅橡胶等绝缘材料,可以促进表面电荷的消散^[51-54]。虽然绝缘材料表面氟化技术具有很大的潜力,但由于材料的表面陷阱能级会



(a) 绝缘子氟化前后表面电荷分布情况



(b) 氟化前后的电子陷阱能级分布

其中 F-15, F-30, F-60 分别表示氟化 15、30 和 60 min

图3 绝缘子表面氟化处理^[49]

Fig. 3 Insulator surface fluorination treatment^[49] (Open Access)

变浅, 表面电导会增加, 进而导致表面泄露电流增加, 因此在实际运用中需要对氟化的温度和时间等参数多次测试, 并进行最优化选择。

2.2 表面等离子体处理

应用低温等离子体对材料进行处理是材料表面改性的重要手段, 具有设备简单、安全环保、容易操作且处理速度快等优点。近年来, 一些学者发现通过等离子体对绝缘材料进行表面处理, 可以增加绝缘子表面粗糙度, 促进表面电荷消散, 以及提高闪络电压的效果^[55-56]。

一些研究者发现可以运用介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD) 等离子体对绝缘材料表面进行改性。中科院电工所邵涛等于 2014 年, 通过 DBD 等离子体对聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 进行表面处理后发现, PMMA 的表面引入了 C—F_n 基团, 并且表面粗糙度有所增加。这降低了绝缘子表面二次电子发射系数, 从而提升了沿面闪络电压^[57]。随着等离子体处理时间的增加, 表面粗糙度先增加后降低。这也是沿面闪络电压随等离子体处理时间的增长先升高后降低的原因。他们还用 DBD 等离子体对环氧树脂进行表面处理, 发现表面电导升高并有效地促进了表面电荷消散。他们认为这是因为绝缘子表面引入了大量的浅陷阱, 而浅陷阱的来源他们认为与 DBD 等离子体处理后表面引入了亲水性的羰基有关^[58]。浙江大学陈向荣等持相同的观点, 他们通过 DBD 等离子体分别对环氧树脂/AlN 纳米复合材料和硅橡胶 (silicone rubber, SR) 进行表面处理, 发现在绝缘子表面引入了极性基团, 这导致了表面引入了大量的浅陷阱, 浅陷阱的引入又促进了表面电

荷的消散。再加上处理后增加了表面粗糙度, 使得闪络电压有所提升^[59-60]。

除了用等离子体对绝缘子表面进行直接处理, 还可以用等离子体增强化学气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposited, PECVD) 的方法。通过对绝缘子表面沉积 SiO₂ 薄膜来实现绝缘子表面电荷消散的目的。中国科学院电工所邵涛等利用 DBD 等离子体, 通过在电极表面沉积 SiO_x 薄膜, 提升了闪络电压^[61]。西安交通大学张冠军等通过大气氟碳 DBD, 将在等离子体中形成的粉尘状氟碳化物沉积在环氧树脂上, 发现可以促进电荷消散, 结果表明最大表面电荷密度从 77.84 pC/mm² 降至 1.42 pC/mm²^[62]。虽然 DBD 等离子体能较好地实现绝缘材料表面改性, 引入一些化学基团并促进表面电荷消散。但是, 这种等离子体源只能应用于平板型且薄的材料, 并且由于 DBD 等离子体电极间距小, 难以形成均匀放电, 导致可能会损坏绝缘材料表面^[6]。

近年来, 大气压等离子体射流 (atmospheric-pressure plasma jet, APPJ) 由于能提供均匀的放电, 同时对被处理材料的形状没有 DBD 等离子体那么严苛, 因而受到了广泛的关注^[6]。邵涛等通过用 APPJ 对 PMMA 进行表面处理, 发现表面引入了亲水性极性基团, 并增加了表面粗糙度, 从而降低了二次电子发射系数, 从而提升了沿面闪络电压^[63]。西安交通大学张冠军等也有类似的发现, 他们用 APPJ 处理环氧树脂, 发现表面粗糙度增加, 并且引入了强电负性的氟基团, 这 2 个因素导致了闪络电压的提升^[64-65]。同样也可以用 APPJ 来实现 PECVD。邵涛等利用 APPJ, 以正硅酸乙酯 (ethyl orthosilicate, TEOS) 为前驱物, 在 Al₂O₃/环氧树脂复合绝缘子表面涂覆了 SiO_x 薄膜, 发现绝缘子表面陷阱能级变浅, 有效地促进了绝缘子表面电荷的消散^[66]。他们认为在绝缘子表面引入浅陷阱的原因是原始有机基团 (C—H, C—C, C=O, C=C) 被含 Si 的无机基团 (Si—O—Si, Si—OH) 取代。环氧树脂中, 酯基中的 C=O 和 C=C 的减少, 可能是陷阱能级减少的主要原因^[67]。

通过等离子体对绝缘材料进行表面处理, 促进表面电荷的消散目前已经取得了很多研究成果。但笔者认为仍有 2 个问题需要进一步研究。1) 从一些文献中可以发现, 用等离子体处理后的绝缘材料在放置一段时间后, 促进表面电荷消散的效果会有

明显下降^[53,58-61]。例如邵涛等把聚苯乙烯(polystyrene, PS)分别用 DBD 等离子体和氟化处理后进行长期放置,并在放置的第 5 天和第 60 天进行表面电导率的测量。结果发现直接氟化的 PS,放置 5 天和 60 天的表面电导率基本维持不变,但用等离子体处理的样品放置 60 天后的表面电导率就与放置 5 天的相比有显著降低。他们认为用等离子体处理后稳定性差可能与引入了不稳定的亲水性极性基团有关^[53]。虽然中国科学院电工所章程等发现,将绝缘材料先干燥后再用等离子体处理,能较长时间保持良好的促进表面电荷消散的性能^[68]。但是用等离子体处理绝缘材料后,如何保持稳定性,

仍需要深入的理论和实验的研究。2) 等离子体特殊的放电结构限制了其在实际工业中大规模处理不同形状绝缘子的运用。因此,如何满足工业化生产的需求,仍需要进一步研究。此外,还有一些问题,如不同气体氛围下等离子体处理后对表面电荷的影响是否有差异等问题目前仍缺乏研究。

绝缘子表面等离子体和氟化处理有一定的相似之处。例如,这 2 种方法都涉及在绝缘子表面发生化学反应,引入一些化学基团,并改变绝缘子的表面形态,从而促进表面电荷的消散和提高闪络电压。氟化处理和等离子体处理调控绝缘子表面电荷的重要实验研究的方法和结论列入表 1 中。

表 1 氟化及等离子体处理调控绝缘子表面电荷

Table 1 Fluorination and plasma treatment to regulate the surface charge of insulators

实验方法	主要结论
对纯环氧表面氟化(文献[42,44])	表面形成微米级氟化层;抑制表面电荷的积累;闪络电压升高
在不同温度下对纯环氧氟化不同时间(文献[43])	氟化温度越高,表面电荷消散速度越快;过长的氟化时间促进电荷消散的效果会下降
对工业用 Al ₂ O ₃ /环氧复合绝缘子表面进行了氟化处理(文献[45,49])	氧化铝颗粒也会被氟化并放出氧气,但对氟化层影响很小;表面积聚的电荷显著减少
对硅橡胶、聚酰亚胺薄膜、聚乙烯、聚苯乙烯、液态硅橡胶等绝缘材料进行氟化处理(文献[50-54])	增加表面疏水性;促进表面电荷的消散;提升闪络电压
用 DBD 等离子体对 PMMA, EP, EP/AIN, SR 等材料进行表面改性(文献[57-60])	随着等离子体处理时间的增加,表面粗糙度先增加后降低;引入了亲水性的羰基;促进了表面电荷的消散;提升了沿面闪络电压
用 APPJ 对 PMMA, EP 等材料进行表面改性(文献[63-64])	表面粗糙度增加;引入了亲水性极性基团;闪络电压提升
用 DBD、APPJ 在绝缘子表面沉积 SiO _x 薄膜(文献[61,66-67])	原始有机基团被含 Si 的无机基团取代,促进了表面电荷消散

2.3 表面涂层

在绝缘子表面涂覆功能性涂层,适当调整表面电导率来加速表面电荷的消散,也是一种有效的方法。2.2 节中提到的用等离子体在绝缘子表面沉积薄膜的方法,实际上也是一种表面涂层的方法。

西安交通大学张博雅等研制了一种能自组装的二维纳米片层涂层^[26]。如图 4(a)所示,他们将蒙脱土(montmorillonite, MMT)在去离子水中,用超声处理形成 MMT 单片层结构。再添加聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA),形成 PVA/MMT 的分散系,再添加交联剂戊二醛(glutaraldehyde, GA),使 MMT 片层与聚乙烯醇进行交联,具体交联反应过程如图 4(b)所示。再将绝缘子通过垂直浸渍的方式,就能在绝缘子表面形成具有高度取向性的片层状纳米涂层。这种紧密排列的二维结构,有助于载流子沿着切向迁移,从而促进表面电荷的消散。同时,在法向方向,由于有数百层致密的结构,阻碍载流子法向迁移,所以法向电导不会增加。张博雅等对

涂覆前后的绝缘子进行了表面积聚实验和闪络电压实验,实验结果如图 4(c)所示。可以看到涂覆后的绝缘子能有效促进表面电荷消散,并提升沿面闪络电压。此外,他们发现该涂层还具有恢复柔性聚合物电介质的“肖特基”势垒的效果^[69]。清华大学张贵新等用羟基化氮化硼纳米片,通过自组装的方式研制了一种取向性氮化硼纳米片薄膜,该薄膜能有效地促进表面电荷消散,还可以提升设备的热管理能力^[70]。华北电力大学屠幼萍等通过在环氧树脂绝缘子表面分别涂覆纳米 TiO₂/环氧复合涂层和微米及纳米 SiO₂/环氧复合涂层,发现在涂覆这些涂层后能引入浅陷阱,促进表面电荷的消散^[71-72]。中国科学院电工所邵涛等将甲基丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸十二氟庚酯(dodecafluoroheptyl methacrylate, DFHMA)混合物通过低温等离子体聚合,制备了一种碳氟化合物涂层。将该涂层涂覆在聚苯乙烯(polystyrene, PS)表面后,发现可以将表面电荷消散速率提升 6 倍以上。且该涂层具有良好的抗老化

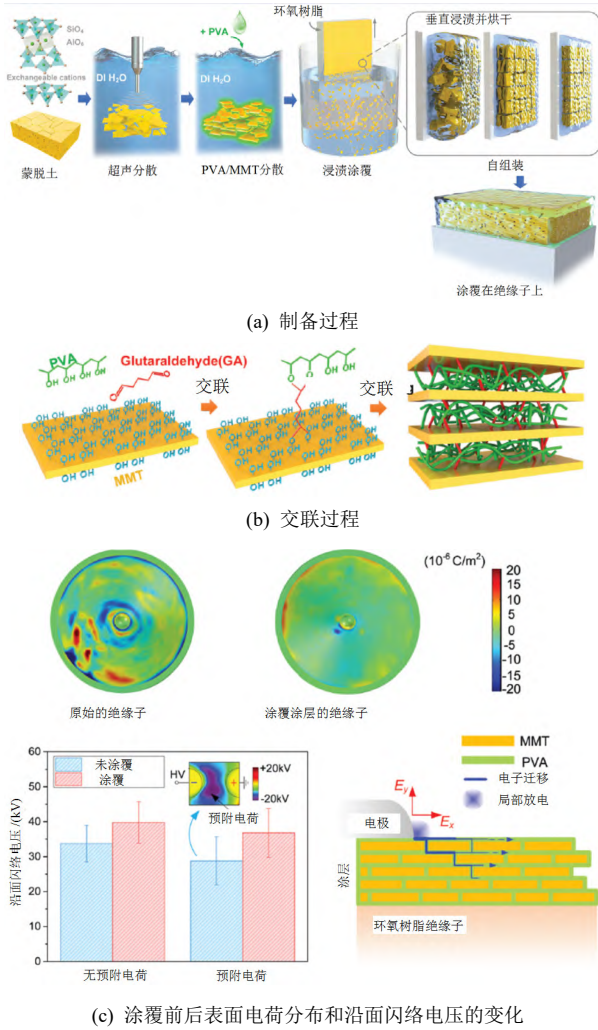


图4 自组装二维纳米片层涂层^[26]

Fig. 4 Self-assembled two-dimensional nanosheet coating^[26] (Copyright 2019 RSC)

能力, 闪络多次后仍可以重复使用^[73]。

在绝缘子表面涂覆非线性电导涂层也是加速表面电荷消散的有效方法。非线性电导涂层是指将非线性电导材料(如 SiC、ZnO 等)掺杂到聚合物中制备的涂层, 涂层的电导率会随着外加电场的变化而表现出自适应性^[74]。清华大学张贵新等在绝缘体表面涂上一层氧化锌/环氧树脂涂层, 发现可以有效地促进表面电荷的消散。有限元仿真表明, 这种涂层还可以起到均匀绝缘子表面电场分布的作用^[75]。天津大学杜伯学等分别在硅橡胶和环氧树脂中掺杂一定量的 SiC, 发现掺杂后材料表现出非线性电导特性, 加速了表面电荷的消散, 提升了沿面闪络电压^[76-77]。他们还运用磁控溅射的方法, 将 ZnO 薄膜溅射在绝缘子表面, 通过仿真和实验, 发现利用 ZnO 非线性电导特性起到均匀电场的作用^[78-79]。西安交通大学张冠军等通过将 SiC/环氧树脂制备成涂层, 并刷涂在绝缘子表面, 发现能促进表面电

荷消散, 并在一定掺杂浓度范围内能有效提升闪络电压^[80]。他们还进一步将该涂层涂覆在绝缘子表面不同位置处, 研究了绝缘子表面不同位置处电荷的积聚对闪络的影响^[81]。但是在绝缘子表面涂覆非线性电导涂层后, 绝缘子表面电导率会有所升高。根据 Volpov 等和 Lorenzi 等的仿真结果, 表面电导率升高会引发输电线路中三结合点处的电场强度增大, 引发局部放电^[34, 82]。所以非线性电导涂层的实用性仍需长期的实验观察。

表面涂层的涂覆方式有很多, 比如刷涂、喷涂、浸渍和磁控溅射等。磁控溅射由于易于控制涂覆厚度等参数, 因此这种涂覆方式受到了越来越多的关注。除了上文中提到的杜伯学等用磁控溅射法将 ZnO 薄膜溅射在绝缘子表面^[78-79], 他们还用磁控溅射法将 BaTiO₃ 层溅射到绝缘子表面。他们通过控制绝缘子表面不同位置溅射层厚度的变化, 来实现均匀电场分布的效果^[83]。清华大学何金良等通过磁控溅射的方式, 在绝缘子表面溅射一层 Cr₂O₃ 薄膜。发现该薄膜引入了大量的深陷阱, 能阻止电荷从电极处注入到绝缘子中^[84]。但是该薄膜只能改善电极和绝缘子接触位置附近的电荷积聚情况, 不能作用于绝缘子全部。而且磁控溅射的方法只能处理小部分区域, 在工程中如何大规模地对绝缘子进行处理, 仍需要继续研究。

综上, 在绝缘子表面涂覆涂层虽然是一种有效促进表面电荷消散的方法, 但目前的研究在实际应用方面仍存在问题。而且表面涂层在长期的温度应力和机械应力下的附着性问题, 以及引入的绝缘材料与涂层间的界面对绝缘子绝缘性能的影响, 仍需要进行深入的研究。表 2 总结了绝缘子表面涂层在调控表面电荷积聚方面重要实验研究的方法和结论。

表 2 表面涂层调控绝缘子表面电荷

Table 2 Surface coating modulates the surface charge of insulators

实验方法	主要结论
自组装的二维纳米片层涂层(文献[26,69-70])	促进表面电荷沿着切向消散, 提升沿面闪络电压
纳米 TiO ₂ /环氧复合涂层和微米及纳米 SiO ₂ /环氧复合涂层(文献[71-72])	促进表面电荷消散, 沿面闪络电压提升
非线性电导涂层: 在聚合物中掺杂非线性电导材料(如 SiC, ZnO 等)的涂层(文献[75-81])	均匀电场分布, 促进表面电荷消散, 提升闪络电压
用磁控溅射法涂覆非线性梯度材料(文献[78-79,83-84])	均匀电场分布, 提升闪络电压

3 绝缘子掺杂改性

通过在绝缘材料中掺杂功能性材料或纳米颗粒，来改变绝缘材料的电气性能也是调控表面电荷的主要思路。目前，通过掺杂改性的方式有 2 种：一种是通过掺杂降低绝缘材料的体积电导率，从而抑制表面电荷的积聚；另一种是在绝缘材料内掺杂高介电常数或非线性电导材料，起到均匀电场的效果。均匀电场后会减少场强较强地方气体的电离，从而减少气体侧离子附着在绝缘子表面造成的电荷积聚。下面将从这 2 个方面来进行详细叙述。

3.1 降低体积电导率

根据上文所述，在理想情况下(绝缘子无缺陷且气体侧无微放电)，固体侧电导是绝缘子表面电荷积聚的主要方式。在文献[41]中，直流电压下绝缘子表面电荷积聚的“本征”状态被称为“基本模式”，降低表面电荷积聚“基本模式”的有效方式就是减小固体测电流。所以通过对绝缘材料进行掺杂改性的方式，适当降低绝缘材料体积电导率，是抑制表面电荷积聚的有效方式。

清华大学张贵新等通过在环氧树脂中，掺杂不同浓度、粒径和不同种类的金属纳米颗粒，然后对不同材料的表面电位分布、表面电荷分布及沿面闪络电压进行测试，实验结果如图 5 所示。可以看到，在一定条件下掺杂金属纳米颗粒可以抑制表面电

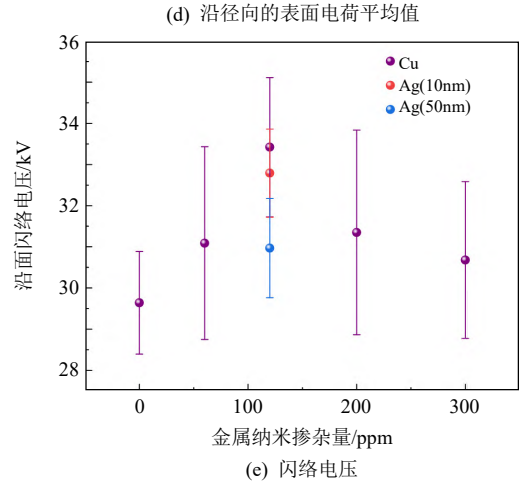
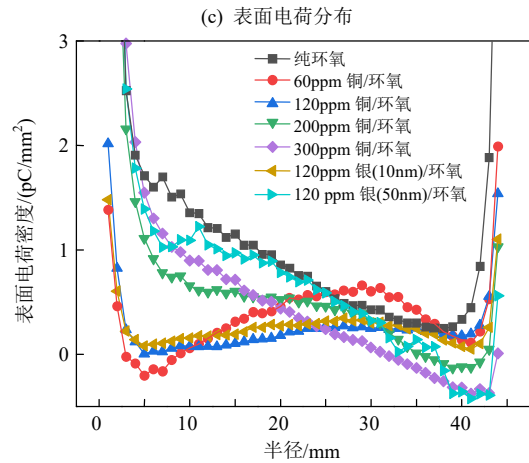
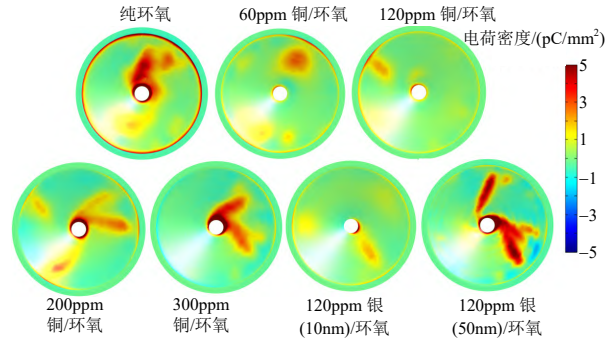
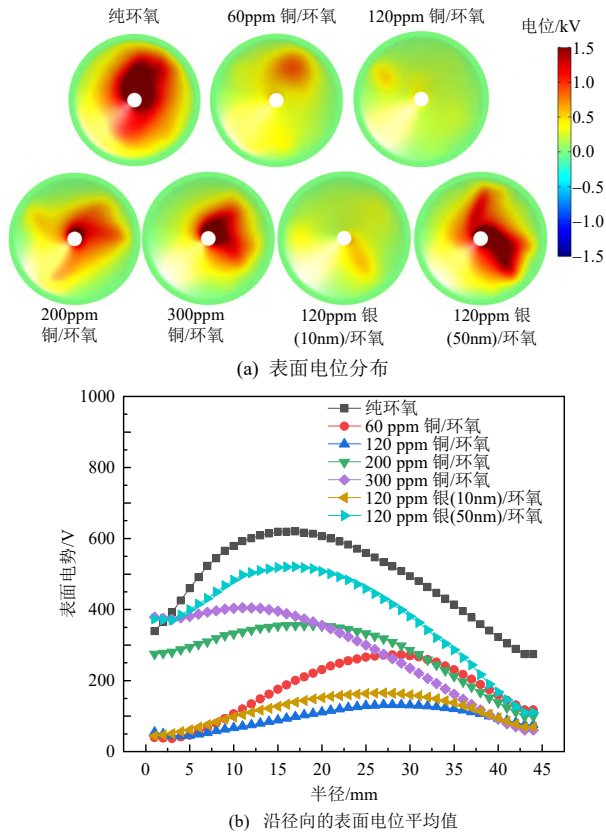


图 5 不同类型绝缘子的表面电位、电荷分布和闪络电压^[85]

Fig. 5 Surface potential, charge distribution and surface flashover voltage of different types of insulators^[85]
(Copyright 2020 IOP science)

荷的积聚。他们发现在环氧树脂中掺杂粒径为 10nm 的铜纳米颗粒后，能抑制表面电荷积聚，这种抑制效果随着掺杂量的增加而增加，但当掺杂量超过 120ppm(parts per million)后，随着掺杂量的升高，这种抑制效果又开始下降(1ppm=1mg/L)。他们对每个样品用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)进行观察发现当掺杂浓度为 120ppm 时，铜纳米颗粒的分布仍较均匀，但掺杂浓度继续升高时，就开始出现几百纳米到微米级别的团聚。因此他们认为在没有团聚的前提下，掺杂

浓度越高,越能抑制表面电荷积聚。通过图5所示的实验结果,他们还发现掺杂粒径越小越好(掺杂粒径10nm的效果好于50nm)。在掺杂浓度和粒径相同的情况下,不同种类金属纳米颗粒掺杂效果相差不大。他们认为出现以上现象的原因是在金属纳米颗粒掺杂的纳米电介质这一介观体系中,可能出现了单电子隧穿效应^[85]。他们还通过在环氧树脂中掺杂一种新型二维纳米材料MXene,发现掺杂30ppm时,就能将体积电阻率提升4倍,同时表面电荷积聚量只有未掺杂的1/3^[24]。张博雅等通过在环氧树脂中掺杂富勒烯,发现微量掺杂(200ppm)就能引入大量的深陷阱,将绝缘子体积电阻率升高3倍,并有效地抑制表面电荷积聚^[86]。这些发现与文献^[85]有相似的地方,即都在绝缘材料中掺杂极微量(百万分之量级)的、具有一定导电性质的纳米材料,就能有效地提升体积电阻率,抑制表面电荷积聚。然而,复合材料的性能对掺杂浓度的变化高度敏感。这是因为,当掺杂浓度增加时,纳米颗粒会发生团聚,复合材料的绝缘性能会迅速下降。这给工业应用带来了一定的困难。此外,对该方法的研究鲜见报道,关于机理方面的研究仍不深入,掺杂后可能带来的副作用仍不清楚。

除了上述百万分之量级掺杂就能抑制表面电荷积聚的材料改性方法,很多学者还发现了其他掺杂改性方法,不过这些掺杂改性的方法掺杂量就要高一些。清华大学张贵新等在环氧树脂中掺杂了质量分数为1%的SiO₂纳米颗粒,发现掺杂后对表面电荷积聚状况影响不大。但他们分别用八甲基环四硅氧烷和六甲基二硅氮烷2种硅烷偶联剂对SiO₂纳米颗粒处理后,发现SiO₂纳米颗粒表面的羟基被硅烷偶联剂所替代。处理后的纳米颗粒掺杂到环氧树脂中,有效抑制了表面电荷的积聚^[23]。西安交通大学李盛涛等将用硅烷偶联剂修饰的TiO₂纳米颗粒以质量分数为1%的掺杂浓度掺杂到环氧树脂或低密度聚乙烯中,发现引入了深陷阱,抑制表面电荷积聚,并提升了绝缘子沿面闪络电压^[87-88]。天津大学杜伯学等将氧化石墨烯以质量分数为0.01%的掺杂量分别掺杂到低密度聚乙烯和交联聚乙烯中,发现可以引入深陷阱,降低电导率,并抑制了空间电荷的注入和积聚^[89-90]。掺杂这些纳米颗粒能抑制表面电荷积聚的原因,可能与掺杂的纳米颗粒与基体之间形成的界面有关。虽然这些方法也能抑制表面电荷积聚,但由于纳米颗粒的比表面积和表面能

高,质量分数为0.5%~5%的掺杂量会显著增加聚合物制备过程中的粘度^[24,91],这给聚合物工业化的大规模制备带来了困难,如何解决这一问题仍需进一步研究。通过掺杂改性引入深陷阱,可以抑制表面电荷通过体电导的积聚。然而,这种方法也降低了电荷消散速率,并且不能调控通过气体侧积聚的电荷。因此,要达到最佳效果,需将掺杂改性和表面改性结合使用。目前,材料改性的研究主要集中在使用掺杂改性或表面改性一个方面。今后在寻找更有效的修改方案时应考虑多种修改方法的组合。

3.2 均匀电场分布

通过在绝缘子内掺杂非线性材料,能起到均匀电场的作用。非线性电导材料目前在改善电缆终端电场强度分布方面已经开始有所应用。通过在绝缘子内掺杂ZnO、SiC等非线性电导材料,在GIL三结合点等电场较强的地方,绝缘子的电导率和介电常数会上升,从而起到均匀电场的作用。抑制由于局部场强过大引发的局部放电,造成局部电荷积聚。除了传统的ZnO、SiC等非线性电导材料,J. Kingdersberger等研制了一种新型的非线性电导材料云母功能性填料。这种材料是在云母薄片上,涂覆一层掺杂了Sb和TiO₂的SnO薄层。他们发现绝缘子中掺杂MFF后,能表现出明显的非线性电导特性,能够有效地均匀电场的分布^[92-93]。

非线性电导材料虽然能均匀电场分布,减弱GIL中如三结合点处场强较强地方的电离现象,但是非线性电导材料可能造成的泄露电流增大等问题仍需研究。同时,由于绝缘子表面电荷积聚的主要途径是固体侧体电导,气体侧电离产生的电荷附着在绝缘子表面并不是表面电荷的主要来源,所以这种方法的实用性也有待商榷。表3总结了掺杂改性抑制表面电荷积聚的重要实验研究的方法和结论。

表3 掺杂改性抑制绝缘体表面电荷积聚
Table 3 Doping modification suppresses surface charge accumulation on insulators

实验方法	主要结论
掺杂具有导电性能的纳米颗粒,例如在环氧树脂中掺杂金属纳米颗粒、MXene、富勒烯(文献[24,85-86])	低浓度掺杂(ppm量级)不会在制备过程中造成困难;可以有效地引入深陷阱;增加体积电阻率;抑制表面电荷积聚
在聚合物中掺杂氧化石墨烯,用硅烷偶联剂处理的SiO ₂ ,TiO ₂ 纳米颗粒(文献[23,87-90])	引入深陷阱;提升体积电阻率;抑制电荷的注入
掺杂非线性电导材料,例如在绝缘子中掺杂MFF(文献[92-93])	有效的均匀电场分布

4 其他改性方案

还有一些通过材料改性来抑制表面电荷积聚的方案，虽然不像上文中提到的那些改性方法那样有着较为全面且系统的研究，但也取得了不错的实验结果，将来在工程实际运用中也具备潜力。

天津大学高宇等用伽马射线对环氧树脂和聚对苯二甲酸乙二醇酯表面进行辐射，发现能在绝缘子表面引入浅陷阱，促进表面电荷的消散。他们认为引入浅陷阱的原因是伽马射线辐射引发的化学反应使得环氧树脂表面的羰基和羟基数量增加^[94-95]。不过在处理过程中如何保障安全性是个需要考虑的问题。与上文中氟化处理的思路类似，西安交通大学李盛涛等利用臭氧对绝缘子表面进行氧化处理。他们发现经过氧化处理的绝缘材料表面羰基数量增加，引入了浅陷阱并促进了表面电荷消散^[96-97]。同样，这种方法存在的问题也和表面氟化处理的问题类似。清华大学何金良等通过将材料改性和绝缘子结构优化二者相结合，提出了一种自适应调控电荷的绝缘子。这种绝缘子结构如图 6 所示^[98]。图中：区域 1 为绝缘区，是由传统的绝缘子组成；区域 2 为电荷自适应区，在传统的绝缘子中掺杂了非线性电导材料 SiC。因为界面电荷的积聚主要与绝缘子表面的法向电场有关，所以区域 1 很难积聚电荷，电荷主要都积聚在了区域 2。由于区域 2 具有电导非线性的特性，因此表面积聚电荷后电导率会升高，促进电荷的消散，达到自适应调控电荷的目的^[98-99]。这种自适应调控电荷的绝缘子概念的提出为未来抑制绝缘子表面电荷积聚提供了新的思路，但还有很多问题需要深入研究，比如形状改变后绝缘子的机械性能的变化等。此外，天津大学高宇等通过数值模拟发现，可以在环氧树脂绝缘子不同区域灵活地涂覆涂层来有效抑制表面电荷的积聚^[100]。

除了通过对绝缘材料进行改性，绝缘气体会也会影响表面电荷的积聚。西安交通大学张博雅等通过

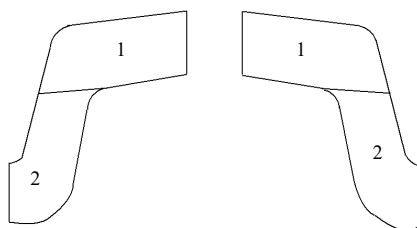


图 6 自适应调控电荷绝缘子示意图^[98]

Fig. 6 Schematic diagram of adaptively regulating charge insulators^[98] (Copyright 2018 IEEE)

实验发现，在 C_4F_7N/CO_2 混合气体中， C_4F_7N 的含量越高，表面积聚的电荷越少。但是 C_4F_7N 的含量哪怕高达 25% 时，积聚在绝缘子表面的电荷量仍远远高于 SF_6 气体氛围^[101]。因此，关于绝缘气体和表面电荷积聚之间的关系，在未来的研究中也是需要考虑的一个方面。

5 结论与展望

在直流 GIL 中，绝缘子表面电荷积聚会造成沿面闪络电压降低的问题，威胁电力设备的安全稳定运行。通过材料改性的方式来抑制绝缘子表面电荷积聚是解决这一问题的有效方法。本文从绝缘子表面改性和掺杂改性 2 个主要方面，详细综述了近年来通过材料改性来抑制表面电荷积聚的最新研究进展，并对每种方法的优势和不足进行评价，同时对一些新的改性思路进行介绍。

通过本文综述可知，通过促进消散和抑制积聚可以调控绝缘子的表面电荷。促进电荷消散主要是通过通过对绝缘子进行表面处理来实现。处理方法通常是通过化学反应在绝缘子表面引入一些极性基团和浅陷阱，从而促进表面电荷的消散(如表面氟化处理、等离子体处理、伽马射线处理、氧化处理等)；也可以在绝缘子表面涂覆涂层以促进表面电荷的消散。抑制表面电荷积聚主要通过掺杂改性来实现。在绝缘材料中引入深陷阱来抑制电荷注入并削弱固体侧体电导，从而抑制表面电荷的积聚。目前，对于引入深陷阱或浅陷阱能否提高绝缘材料的闪络电压还存在一些争议。通过对近期研究的回顾，从调控电荷积累的角度，笔者认为在绝缘材料表面引入浅陷阱促进电荷消散或在绝缘材料内部引入深陷阱则抑制电荷积聚都有提升闪络电压的作用。基于本文的综述，对未来通过材料改性抑制绝缘子表面电荷积聚进行如下展望：

1) 在绝缘子表面改性方面，通过各种手段来适当提高绝缘子表面电导率来促进表面电荷消散依然是未来抑制表面电荷积聚的主要策略。但是表面改性后绝缘子长期运行的可靠性问题仍要继续进行研究，比如等离子体处理后的稳定性问题，表面涂层在长期运行过程中的附着性问题等。

2) 在掺杂改性方面，通过掺杂纳米颗粒适当降低绝缘子体积电导率，从而减少固体侧体电流进而抑制表面电荷积聚也是一种可行的思路。但掺杂后对绝缘子整体热学和机械学性能的影响，以及掺

杂纳米颗粒后的微观机理,仍需要进行研究。

3) 绝缘材料的表面电荷特性,与它的陷阱特性有着直接的关系。聚合物中的深、浅陷阱分别由化学缺陷和物理缺陷造成。因此,理论上最理想的调控方式,是先研究清楚聚合物中的化学缺陷具体是由什么基团或化学成分引起,并在制备过程中通过某种试剂对这些基团或化学成分进行消除,起到减少表面深陷阱,减少表面电荷积聚的效果。但目前仍不清楚造成电荷积聚的最根本原因,即聚合物载流子陷阱的成分究竟是什么。因此,未来需要将表面电荷及陷阱的研究从宏观深入到微观,用先进的测量手段研究纳米层面的电荷及陷阱特性,发现聚合物深陷阱的组成成分,并对其进行精准的调控。

参考文献

- [1] SHU Yinbiao, CHEN Weijiang. Research and application of UHV power transmission in China[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 1-13.
- [2] Hermann K. Gas-insulated transmission lines (GIL)[M]. Manhattan: IEEE, 2012: 1-10.
- [3] LI Qiuye, NADERIALLAF H, LEI Zhipeng, et al. Surface charge pattern analysis based on the field-dependent charging theory: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 257-269.
- [4] 李进, 王雨帆, 梁虎成, 等. 高压直流 GIL 盆式绝缘子非线性电导参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 166-173.
LI Jin, WANG Yufan, LIANG Hucheng, et al. Parameter Optimization of Nonlinear Conductivity Spacer for HVDC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 166-173(in Chinese).
- [5] LI Shengtao, HUANG Yin, MIN Daomin, et al. Synergic effect of adsorbed gas and charging on surface flashover [J]. Scientific Reports, 2019(9): 5464.
- [6] LI Shengtao. Improvement of surface flashover in vacuum[J]. High Voltage, 2020, 5(2): 122-133.
- [7] LI Chuanyang, LI Chuanjie, ZHANG Bo, et al. Understanding surface charge accumulation and surface flashover on spacers in compressed gas insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1152-1166.
- [8] 申巍, 李枕, 李盛涛, 等. 电子束辐照处理环氧纳米复合材料沿面闪络性能提升及机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7144-7152.
SHEN Wei, LI Zhen, LI Shengtao, et al. Improvement and mechanism of surface flashover performances of epoxy nanocomposites treated by electron beam irradiation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7144-7152(in Chinese).
- [9] LI Chuanyang, LIN Chuanjie, YANG Yong, et al. Novel HVDC spacers by adaptively controlling surface charges—Part II: experiment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1248-1258.
- [10] XIE Qing, LIANG Shaodong, FU Kexin, et al. Distribution of polymer surface charge under DC voltage and its influence on surface flashover characteristics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2157-2168.
- [11] 王哲铭, 潘越, 张磊, 等. 直流 GIL 气-固界面电荷调控的影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7177-7192.
WANG Zheming, PAN Yue, ZHANG Lei, et al. Analysis of charge tailoring techniques for DC GIL gas-solid interface charges[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7177-7192(in Chinese).
- [12] YUAN Mengqiang, ZOU Liang, LI Zongze, et al. A review on factors that affect surface charge accumulation and charge-induced surface flashover [J]. Nanotechnology, 2021, 32(26): 262001.
- [13] ZHANG Zhousheng, WANG Zheming, TEYSSEDRE G, et al. Gas-solid interface charge tailoring techniques: what we grasped and where to go[J]. Nanotechnology, 2021, 32(12): 122001.
- [14] MA Jingtan, TAO Fengbo, MA Yong, et al. Quantitative analysis on the influence of surface charges on flashover of insulators in SF₆[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 274-281.
- [15] LUTZ B, KINDERSBERGER J. Surface charge accumulation on cylindrical polymeric model insulators in air: simulation and measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 2040-2048.
- [16] WINTER A, KINDERSBERGER J. Transient field distribution in gas-solid insulation systems under DC voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 116-128.
- [17] SCHUELLER M, STRAUMANN U, FRANCK C. Role of ion sources for spacer charging in SF₆ Gas insulated HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 352-359.
- [18] ZHANG Lei, LIN Chuanjie, LI Chuanyang, et al. Gas-solid interface charge characterisation techniques for HVDC GIS/GIL insulators[J]. High Voltage, 2020, 5(2): 95-109.
- [19] ZHANG Bo, XUE Jianyi, CHEN Xingyu, et al. Review of surface transient charge measurement on solid insulating materials via the Pockels technique[J]. High

- Voltage, 2021, 6(4): 608-624.
- [20] CALLENDER G, GODDARD K F, LEWIN P L. Simulating surface charge dynamics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 19-27.
- [21] LI Chuanyang, ZHU Yujie, ZHI Qingyun, et al. Dust figures as a way for mapping surface charge distribution—a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(3): 853-863.
- [22] WANG Feng, LIANG Fangwei, CHEN She, et al. Effect of surface charges on flashover voltage—an examination considering charge decay rates[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(3): 1053-1060.
- [23] 王天宇, 李大雨, 侯易岑, 等. SiO₂ 纳米颗粒表面接枝对环氧树脂纳米复合电介质表面电荷积聚的抑制[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4129-4137.
WANG Tianyu, LI Dayu, HOU Yicen, et al. Suppression of surface charge accumulation of epoxy resin nanocomposites by SiO₂ nanoparticle surface grafting [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4129-4137(in Chinese).
- [24] WANG Tianyu, ZHANG Guixin, LI Dayu, et al. MXene-doped epoxy resin to suppress surface charge accumulation on insulators in a DC gas-insulated system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 939-946.
- [25] STRAUMANN U, SCHULLER M, FRANCK C M. Theoretical investigation of HVDC disc spacer charging in SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2196-2205.
- [26] ZHANG Boya, WANG Qiang, ZHANG Yunxiao, et al. A self-assembled, nacre-mimetic, nano-laminar structure as a superior charge dissipation coating on insulators for HVDC gas-insulated systems[J]. Nanoscale, 2019, 11(39): 18046-18051.
- [27] LI Zhichuang, DING Weidong, LI Yishu, et al. Surface flashover characteristics of epoxy insulator in C₄F₇N/CO₂ mixtures in a uniform field under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1065-1072.
- [28] ZHANG Boya, UZELAC N, CAO Yang. Fluoronitrile/CO₂ Mixture as an eco-friendly alternative to SF₆ for medium voltage switchgears[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1340-1350.
- [29] WANG Cong, CHENG Yi, TU Youping, et al. Characteristics of C₃F₇CN/CO₂ as an alternative to SF₆ in HVDC-GIL systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1351-1356.
- [30] SCHUELLER M, GREMAUD R, DOIRON C B, et al. Micro discharges in HVDC gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2879-2888.
- [31] LI Chuanyang, LIN Chuanjie, HU Jun, et al. Novel HVDC spacers by adaptively controlling surface charges—Part I: charge transport and control strategy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1238-1247.
- [32] TSCHENTSCHER M, FRANCK C M. Conduction processes in gas-insulated HVDC equipment: from saturated ion currents to micro-discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1167-1176.
- [33] 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): 4647-4662.
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(in Chinese).
- [34] VOLPOV E. Dielectric strength coordination and generalized spacer design rules for HVAC/DC SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 949-963.
- [35] ZHANG Boya, QI Zhe, ZHANG Guixin. 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.
- [36] LI Chuanyang, LIN Chuanjie, CHEN Geng, et al. Field-dependent charging phenomenon of HVDC spacers based on dominant charge behaviors[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(20): 202904.
- [37] MA Guoming, ZHOU Hongyang, LIU Shupin, et al. Measurement and simulation of charge accumulation on a disc spacer with electro-thermal stress in SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1221-1229.
- [38] ZHOU Hongyang, MA Guoming, WANG Yuan, et al. Surface charge accumulation on 500kV cone-type GIS spacer under residual DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1230-1237.
- [39] ZHANG Boya, QI Zhe, ZHANG Guixin. Thermal gradient effects on surface charge of HVDC spacer in gas insulated system[C]//2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Toronto,

- ON, Canada: IEEE, 2016: 703-706.
- [40] MA Guoming, ZHOU Hongyang, LU Shijie, et al. Effect of material volume conductivity on surface charges accumulation on spacers under DC electro-thermal coupling stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1211-1220.
- [41] ZHANG Boya, ZHANG Guixin. Interpretation of the surface charge decay kinetics on insulators with different neutralization mechanisms[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(10): 105105.
- [42] LIU Yaqiang, AN Zhenlian, CANG Jun, et al. Significant suppression of surface charge accumulation on epoxy resin by direct fluorination[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(4): 1143-1150.
- [43] AN Zhenlian, YIN Qianqian, LIU Yaqiang, et al. Modulation of surface electrical properties of epoxy resin insulator by Changing fluorination temperature and time[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 526-534.
- [44] QUE Longkai, AN Zhenlian, MA Yong, et al. Improved DC flashover performance of epoxy insulators in SF₆ gas by direct fluorination[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1153-1161.
- [45] AN Zhenlian, CHEN Weijun, CHEN Kang, et al. Comparative study on direct fluorination and surface properties of alumina-filled and unfilled epoxy insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 85-93.
- [46] QUE Longkai, AN Zhenlian, MA Yong, et al. High resistance of surface fluorinated epoxy insulators to surface discharge in SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(1): 245-252.
- [47] AN Zhenlian, YIN Qianqian, XIAO Huanhuan, et al. Evolutions of surface characteristics and electrical properties of the fluorinated epoxy resin during ultraviolet irradiation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 1124-1133.
- [48] AN Zhenlian, LIU Fenglei, TANG Yujiao, et al. Resistance of surface fluorinated epoxy resin to corona discharge in SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3659-3667.
- [49] ZHANG Boya, ZHANG Guixin, WANG Qiang, et al. Suppression of surface charge accumulation on Al₂O₃-filled epoxy resin insulator under dc voltage by direct fluorination[J]. AIP Advances, 2015, 5(12): 127207.
- [50] DU B X, LI Zhonglei. Hydrophobicity, surface charge and DC flashover characteristics of direct-fluorinated RTV silicone rubber[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 934-940.
- [51] DU B X, LI Jin. Surface charge coupling behavior of fluorinated polyimide film under DC and pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 567-573.
- [52] ZHOU Rundong, SUN Guangyu, SONG Baipeng, et al. Mechanism of F₂/N₂ fluorination mitigating vacuum flashover of polymers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(37): 375304.
- [53] KONG Fei, CHANG Chao, MA Yiyang, et al. Surface modifications of polystyrene and their stability: A comparison of DBD plasma deposition and direct fluorination[J]. Applied Surface Science, 2018, 459: 300-308.
- [54] AN Zhenlian, SHEN Zihan, GAO Wenjain, et al. Enhancement of DC flashover of liquid silicone rubber by direct fluorination[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 2023-2030.
- [55] YUE Wenying, MIN Daomin, NIE Yongjie, et al. Plasma treatment enhances surface flashover performance of EP/Al₂O₃ micro-composite in vacuum[C]//2008 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an, China: IEEE, 2018: 1086-1089.
- [56] ZHANG Cheng, LIN Haofan, ZHANG Shuai, et al. Plasma surface treatment to improve surface charge accumulation and dissipation of epoxy resin exposed to DC and nanosecond-pulse voltages[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(40): 405203.
- [57] SHAO Tao, YANG Wenjin, ZHANG Cheng, et al. Enhanced surface flashover strength in vacuum of polymethylmethacrylate by surface modification using atmospheric-pressure dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(7): 071607.
- [58] SHAO Tao, LIU Feng, HAI Bin, et al. Surface modification of epoxy using an atmospheric pressure dielectric barrier discharge to accelerate surface charge dissipation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1557-1565.
- [59] CHEN Xiangrong, GUAN Honglu, JIANG Tie, et al. Surface charge dissipation and DC flashover characteristic of DBD plasma treated epoxy resin/AlN nanocomposites [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 504-511.
- [60] GUAN Honglu, CHEN Xiangrong, DU Hao, et al. Surface potential decay and DC surface flashover characteristics of DBD plasma-treated silicone rubber [J]. Nanotechnology, 2020, 31(42): 424005.
- [61] WANG Ruixue, CUI Chaochao, ZHANG Cheng, et al. Deposition of SiO_x film on electrode surface by DBD to improve the lift-off voltage of metal particles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,

- 2018, 25(4): 1285-1292.
- [62] CHEN Xingyu, CHEN Sile, ZHANG Bo, et al. Promotion of epoxy resin surface electrical insulation performance and its stability by atmospheric fluorocarbon dielectric barrier discharge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 1973-1981.
- [63] SHAO Tao, ZHOU Yixiao, ZHANG Cheng, et al. Surface modification of polymethyl-methacrylate using atmospheric pressure argon plasma jets to improve surface flashover performance in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1747-1754.
- [64] CHEN Sile, WANG Shuai, WANG Yibo, et al. Surface modification of epoxy resin using He/CF₄ atmospheric pressure plasma jet for flashover withstanding characteristics improvement in vacuum[J]. Applied Surface Science, 2017, 414: 107-113.
- [65] CHEN Sile, CHENG Tao, CHEN Zhaoquan, et al. Mechanism on improved surface flashover performances in vacuum of epoxy resin using fluorocarbon plasma treatment[J/OL]. High Voltage, 2021[2022-01-29]. <https://doi.org/10.1049/hve2.12169>.
- [66] SHAO Tao, KONG Fei, LIN Haofan, et al. Correlation between surface charge and DC surface flashover of plasma treated epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1267-1274.
- [67] XIE Qing, LIN Haofan, ZHANG Shuai, et al. Deposition of SiC_xH_yO_z thin film on epoxy resin by nanosecond pulsed APPJ for improving the surface insulating performance[J]. Plasma Science & Technology, 2018, 20(2): 025504.
- [68] ZHANG Cheng, MA Yiyang, KONG Fei, et al. Surface charge decay of epoxy resin treated by AP-DBD deposition and direct fluorination[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 768-775.
- [69] ZHANG Boya, LIU Jingjing, REN Ming, et al. Reviving the "Schottky" barrier for flexible polymer dielectrics with a superior 2D nanoassembly coating[J]. Advanced Materials, 2021, 33(34): 2101374.
- [70] WANG Tianyu, ZHANG Guixin, ZHANG Boya, et al. Oriented boron nitride nanosheet films for thermal management and electrical insulation in electrical and electronic equipment[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(4): 4153-4161.
- [71] TU Youping, ZHOU Fuwen, JIANG Han, et al. Effect of nano-TiO₂/EP composite coating on dynamic characteristics of surface charge in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1308-1317.
- [72] TU Youping, ZHOU Fuwen, CHENG Yi, et al. The control mechanism of micron and Nano SiO₂/epoxy composite coating on surface charge in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1275-1284.
- [73] ZHANG Penghao, ZHANG Cheng, ZHANG Chuansheng, et al. Low-temperature plasma polymerized fluorocarbon coating promotes surface charge dissipation in polystyrene[J]. Nanotechnology, 2021, 32(12): 125703.
- [74] LI Zhonglei, YANG Zhuoran, DU Boxue. Surface charge transport characteristics of ZnO/silicone rubber composites under impulse superimposed on DC voltage [J]. IEEE Access, 2019, 7: 3008-3017.
- [75] WANG Tianyu, LIU Cheng, LI Dayu, et al. Nano ZnO/epoxy coating to promote surface charge dissipation on insulators in DC gas-insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1322-1329.
- [76] DU B X, LIANG Hucheng, LI Jin, et al. Temperature dependent surface potential decay and flashover characteristics of epoxy/SiC composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2): 631-638.
- [77] DU B X, YANG Z R, LI Zhonglei, et al. Surface charge behavior of silicone rubber/SiC composites with field-dependent conductivity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1340-1348.
- [78] DU B X, LIANG Hucheng, LI Jin. Novel spacer coated with functionally graded ZnO film for HVDC gas insulated line[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 231-239.
- [79] LI Jin, LIANG Hucheng, DU B X, et al. Surface functional graded spacer for compact HVDC gaseous insulated system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 664-667.
- [80] XUE Jianyi, CHEN Junhong, DONG Junhao, et al. The regulation mechanism of SiC/epoxy coatings on surface charge behavior and flashover performance of epoxy/alumina spacers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(40): 405502.
- [81] XUE Jianyi, CHEN Junhong, DONG Junhao, et al. Enhancing flashover performance of alumina/epoxy spacers by adaptive surface charge regulation using graded conductivity coating[J]. Nanotechnology, 2020, 31(36): 364002.
- [82] DE LORENZI A, GRANDO L, PESCE A, et al. Modeling of epoxy resin spacers for the 1MV DC Gas insulated line of ITER neutral beam injector system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 77-87.

- [83] DU B X, WANG Zehua, LI Jin, et al. Epoxy insulator with surface graded-permittivity by magnetron sputtering for gas-insulated line[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 197-205.
- [84] LI Chuanyang, HU Jun, LIN Chuanjie, et al. The control mechanism of surface traps on surface charge behavior in alumina-filled epoxy composites[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(44): 445304.
- [85] WANG Tianyu, ZHANG Boya, LI Dayu, et al. Metal nanoparticle-doped epoxy resin to suppress surface charge accumulation on insulators under DC voltage[J]. Nanotechnology, 2020, 31(32): 324001.
- [86] ZHANG Boya, GAO Wenqing, HOU Yicen, et al. Surface charge accumulation and suppression on fullerene-filled epoxy-resin insulator under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 2011-2019.
- [87] YU Shihu, LI Chengtao, WANG Shihang, et al. Surface flashover properties of epoxy based nanocomposites containing functionalized nano-TiO₂[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1567-1576.
- [88] WANG Wweiwang, LI Shengtao, NIE Yongjie, et al. Impulse and DC surface flashover of LDPE/TiO₂ nanocomposites in Vacuum[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Xi'an, China: IEEE, 2016: 497-500.
- [89] DU B X, HAN Chenlei, LI Zhonglei, et al. Effect of graphene oxide particles on space charge accumulation in LDPE/GO nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1479-1486.
- [90] DU B X, HAN Chenlei, LI Jin, et al. Temperature-dependent DC conductivity and space charge distribution of XLPE/GO nanocomposites for HVDC cable insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 418-426.
- [91] YUE Yinglei, ZHANG Chong, ZHANG Hui, et al. Rheological behaviors of fumed silica filled polydimethylsiloxane suspensions[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 53: 152-159.
- [92] WINTER A, KINDERSBERGER J, TENZER M, et al. Solid/gaseous insulation systems for compact HVDC solutions[C]//CIGRE Session 45. Paris, France: CIGRE, 2014: D1-102.
- [93] WINTER A, KINDERSBERGER L, HINRICHSEN V, et al. Compact gas-solid insulating systems for high-field-stress in HVDC applications[C]//CIGRE SC B3 & D1 Colloquium. Paris, France: CIGRE, 2013: 227.
- [94] 高宇, 杜伯学. 伽玛线辐射对环氧树脂表面电荷消散特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 824-830.
- GAO Yu, DU Boxue. Effect of gamma-ray irradiation on surface charge decaying characteristic of epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 824-830(in Chinese).
- [95] GAO Yu, LI Nan, LI Jing, et al. Charge transport behavior in gamma-ray irradiated poly (ethylene terephthalate) estimated by surface potential decay[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 435-447.
- [96] NIE Yongjie, YANG Liuqing, ZHAO Ni, et al. Effect of surface state on DC breakdown of LDPE films[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2522-2530.
- [97] LI Shengtao, LI Zhen, HUANG Yin, et al. Unraveling the “U-Shaped” dependence of surface flashover performance on the surface trap level[J]. IEEE Access, 2019, 7: 180923-180934.
- [98] LIN Chuanjie, LI Qi, LI Chuanyang, et al. Novel HVDC spacers by adaptively controlling surface charges—Part III: industrialization prospects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1259-1266.
- [99] HE S, LIN C J, LI Chuanyang, et al. Surface charge tailoring strategy using SiC doped bowl shaped spacer[C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an, China: IEEE, 2018: 914-917.
- [100] GAO Yu, ZHAO Huicun, YUAN Xiaochen, et al. Numerical simulation of surface charge inhibition performance on epoxy insulator under DC voltage by flexible coating strategy[J]. High Voltage, 2021[2022-01-29]. <https://doi.org/10.1049/hve.2.12154>.
- [101] ZHANG Boya, LI Xingwen, WANG Tianyu, et al. Surface charging characteristics of GIL model spacers under DC stress in C₄F₇N/CO₂ gas mixture[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 597-605.



王天宇

收稿日期: 2022-01-29。

作者简介:

王天宇(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为纳米电介质、绝缘材料表面电荷特性, 2327808810@qq.com;

*通信作者: 张贵新(1963), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事气体放电、交/直流绝缘、等离子体技术以及光电测量等方面的研究, guixin@mail.tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 李婧妍)

Progress in Research of Surface Charge Suppression Method for DC GIL Insulators

WANG Tianyu, ZHANG Guixin*

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University)

KEY WORDS: surface charge; material modification; high-voltage direct current (HVDC); gas insulated transmission lines (GIL)

High voltage direct current (HVDC) transmission technology has attracted increasing attention as researchers have sought to meet the requirements for long-distance, large-capacity power transmission. Within this field, gas-insulated substation (GIS) and gas-insulated transmission line (GIL) technologies are maturing and have been widely applied. However, the flashover voltage of the insulator decreases during the long-term operation of DC GIL equipment. The flashover of insulating material is the key issue that restricts the development and safe, stable operation of DC GIL technology. Studies have shown that changes in the flashover voltage along the insulator surface are closely related to the accumulation of surface charge on the insulator. Insulator surface charge accumulation changes the electric field distribution, resulting in distortion of the surface electric field. This adversely affects insulation performance. In DC GIL systems, the charge migrates in one direction under the action of the electric field because the insulator is in a unipolar voltage environment for long periods. The insulator is also in a closed, dry environment for a long time. This makes charge accumulation easy and dissipation difficult, placing substantial challenges on the safe, stable operation of the transmission system. Therefore, it is of great engineering importance to the study on effective methods of suppressing charge accumulation on the insulator surface.

Several scholars have proposed different strategies for suppressing surface charge accumulation on insulators. Among these strategies, material modification with the aim of suppressing surface charge accumulation is currently the most common and effective research approach. Therefore, in this article, we review several important results from the past few years in which the modification of materials has been used to suppress surface charge accumulation. First, the main sources of surface charge are briefly introduced (Fig. 1). We then summarize the latest research results on the regulation and suppression of surface charge via material

modification. Modifying the surface of insulators to accelerate the dissipation of surface charges is one of the main methods to control the accumulation of surface charges. We summarize the current common surface modification methods, such as surface fluorination, plasma treatment, surface coating and so on. Another idea is to change the electrical properties of the insulating material by doping functional materials or nanoparticles in the insulating material to suppress charge accumulation. We review these methods in recent years, summarize the main achievements and breakthroughs of each method, and analyze the advantages and disadvantages of each method in detail. In addition, there are some methods of suppressing surface charge accumulation through material modification, although they are not as comprehensive and systematic as the above two ideas, but they have also achieved good experimental results. It also has potential for practical application in engineering in the future. Therefore, we also summarize these methods. Finally, the prospects for future researches on insulator surface charge accumulation suppression via material modification are discussed. We hope that through this article, researchers interested in surface charge of insulating materials can quickly understand the latest developments in this area. We also hope to give some inspiration to engineers and researchers in related fields, and provide some guidance and help for building a more secure and reliable DC GIL in the future.

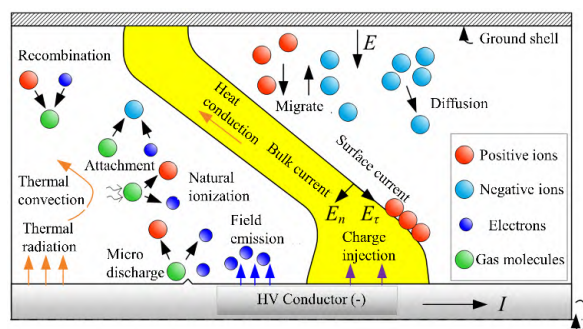


Fig. 1 Multiphysics process of surface charge accumulation in an HVDC GIL