第 49 卷 第 6 期：2662-2670 高电压技术 Vol.49, No.6: 2662-2670
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220657

绝缘特性对正极性脉冲下表面静电放电的影响

雷志鹏[1]，石志杰[1,2]，杜宇鹏[1]，宋建成[1]，刘　洋[1]，李　杰[1]
（1. 太原理工大学电气与动力工程学院，太原 030024;
2. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电公司，宿迁 223800）

摘　要：绝缘材料表面的静电放电现象会对电力设备以及通讯系统运行造成严重的影响，研究介质表面的静电放电特性及其影响因素有助于理解绝缘材料与表面静电放电的关系，对于绝缘材料的优化设计也具有重要的参考价值。为此使用静电放电枪在绝缘材料表面触发静电放电，利用粉尘图法复现了绝缘材料表面的电荷分布，通过二值化处理方法定量表征流注的发展程度，研究了绝缘材料的相对介电常数、表面电阻率和厚度等因素对表面静电放电的影响。结果表明：正极性静电放电下，绝缘材料表面的放电斑图形貌呈现梅花状；材料类型会对流注的发展产生不同的影响；绝缘材料表面电阻率减小会加快表面电荷的消散；绝缘材料越厚，沿面流注通道越长。因此，绝缘材料性能的变化导致介电常数、电荷注入方式、电荷附着效应等的变化，从而影响表面电荷的积聚形式和放电方式，最终使绝缘材料表面静电放电过程发生变化。

关键词：静电放电；粉尘图法；表面电荷；流注；表面放电

Effect of the Properties of Insulating Materials on the Surface Electrostatic Discharge Under Positive Pulse Volage

LEI Zhipeng[1], SHI Zhijie[1,2], DU Yupeng[1], SONG Jiancheng[1], LIU Yang[1], LI Jie[1]
(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Suqian Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suqian 223800, China)

Abstract: The electrostatic discharge (ESD) on the surface of insulating materials seriously impairs the operation of power equipment and communication systems. The research on the properties of surface electrostatic discharge and its influencing factors is helpful to understand the relationship between insulating materials and surface discharge, which can also provide an important reference for the optimal design of insulation system. In this paper, an ESD gun was used to trigger the ESD on the insulating surface. The dust figure method was introduced to show the charge distribution on the insulating surface. The development of streamers was quantitatively characterized by the binarization method. Moreover, the influences of insulating properties, such as relative permittivity, surface resistivity and thickness, on the surface electrostatic discharge were studied. Experimental results indicate that, under the positive ESD, the dust figure on the surface of the insulating material is the plum blossom-like pattern. The type of material affects the development of the streamer. The decrease of the surface resistivity accelerates the dissipation of the surface charge. The length of the surficial streamer increases with the sample' thickness increasing. Therefore, different properties of the insulating material, such as the relative permittivity, charge injection methods, charge adhesion effects, etc., will affect the accumulating form of the surface charge as well as the manner of surface discharge. Finally, the ESD process of the insulating surface is further changed by these properties.

Key words: electrostatic discharge; dust figure; surface charge; streamer; surface discharge

0　引言

聚合物绝缘材料被广泛应用于电气设备的气固绝缘体系中[1-4]。电场作用下，气固界面的带电粒子将定向移动，并积聚在绝缘材料表面。大量积聚的电荷会引起表面电场畸变，对空气间隙产生击穿，进而引发火花、电弧放电等静电放电(electrostatic discharge，ESD)现象，严重时将发生闪络，造成绝缘故障[5-8]。因此，分析气固界面静电放电机理，研究沿面流注的发展特性及影响因素，提出表征表面

基金资助项目：国家自然科学基金(51977137)；山西省重点研发计划(202003D111008；202102040201001)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51977137), Fundamental Research Program of Shanxi Province (202003D111008, 202102040201001).

电荷特性的特征，对于理解静电放电过程和优化绝缘结构具有重要意义。

现阶段测量绝缘材料表面电荷的方法主要包括粉尘图法、静电探针法、光电效应法等。上述方法中，静电探针法可以定量地测量绝缘材料表面的电位分布，但其装置较为复杂，且不能在带电状态下得到电荷分布；光电效应法可以在带电状态下定量测量绝缘材料表面的电场分布，但设备造价昂贵，且无法直接得到表面电荷的分布情况；粉尘图法是一种可以直观观察绝缘材料表面放电和电荷分布的方法，由 Lichtenberg 在 1777 年提出，经过后人的改进并一直沿用至今。该方法将带电的粉尘颗粒均匀地撒在待测绝缘材料表面，材料表面存在电荷的地方将吸引带异号电荷的粉尘。轻轻地吹去没有被表面电荷吸附的粉尘，绝缘材料表面将留下一幅粉尘图案，即所谓的“粉尘图”，进而复现出表面电荷的极性及分布特征。现有研究也已证实，在绝缘表面由单个脉冲电压作用形成的放电可以使用粉尘图法进行分析。这是因为当脉冲电压作用于绝缘表面并出现放电时，在绝缘表面会残留不同极性的电荷，形成电荷积聚区域。如正极性脉冲电压下形成的前放电会在绝缘表面残留正极性电荷；后放电则会残留负电荷[9]。这些电荷可以反映放电过程中流注的发展路径。因此，当使用不同极性粉尘在绝缘表面形成粉尘图时，受残余电荷的吸引或排斥，将形成与各种放电形成后的流注形貌相似的粉尘图，为绝缘表面放电研究提供了一种方法。

国内外学者使用粉尘图法对绝缘材料表面放电机理及其影响因素展开了大量的研究。Y. Murooka 等人使用硫磺和氧化铅粉末对涂有硅膜的玻璃板表面电荷分布进行测量，结果表明绝缘材料表面放电存在明显的极性效应，且外加脉冲电压幅值，脉冲持续时间，以及气体压力均会对放电过程产生影响[10]。Y. Gan 等人使用静电放电发生器对液晶显示屏表面触发静电放电[11]，使用粉尘图法得到了典型的静电放电斑图，结果显示正极性脉冲电压作用下粉尘图形貌为树杈形，且高湿度环境会对放电过程产生抑制。徐洋等人通过粉尘图法在离线和带电状态下研究了气体绝缘封闭组合电器(gas insulated switchgear，GIS)用绝缘子表面缺陷引起的电场畸变和电荷分布[12]，指出绝缘材料表面法向电场的变化是造成表面电荷积累的重要原因，同时验证了粉尘图法示踪绝缘材料表面缺陷的有效性。综上所述，目前的研究多集中在施加电压参数以及环境条件对放电的影响，然而静电放电沿着绝缘材料表面发展，与绝缘材料介电常数、表面电阻率及材料厚度等因素密切相关。因此，探究绝缘材料特性对静电放电过程及电荷分布模式的影响，对揭示气固界面表面静电放电机理是非常重要的。

本文使用 ESD 枪对绝缘材料表面触发静电放电，使用粉尘图法对放电斑图进行复现，通过改变绝缘材料类型、厚度以及表面电阻率，分析了典型固体绝缘材料在正极性脉冲电压下的静电放电粉尘图和静电放电的发展过程。

1 实验设置

本实验使用的粉尘为粒径分布 5~100 μm 的球形红色碳粉。为验证该碳粉的极性，测量了碳粉对地电流。测量时取 40 mL 碳粉置于容器中，然后将铜箔一端置于碳粉中，铜箔浸入面积为 8 cm^2。另一端与 KEYSIGHT B2981A 的输入端连接，B2981A 的 Common 端接地，测得电流值范围为-2.3×10^{-14}~-8.6×10^{-13} A，表明该粉尘携带负极性电荷。图 1 为取绝对值后的电流波形图。

ESD 静电枪型号为 SCHLODER 的 SESD–200，其放电幅值为 0~±20 kV 可调。如图 2 为静电放电实验电路示意图。本实验分别使用图 2 中的球形和锥形两种放电电极，模拟不同电场分布，其中球形放电电极的半径为 4 mm；锥形放电电极的曲率半径为 0.1 mm。实验时，先将被测绝缘试样用酒精擦拭干净并烘干，然后水平放置于地电极上；使 ESD 枪的放电电极接触绝缘材料表面正中心之后触发放电，施加固定幅值的单个正极性放电脉冲。同时，

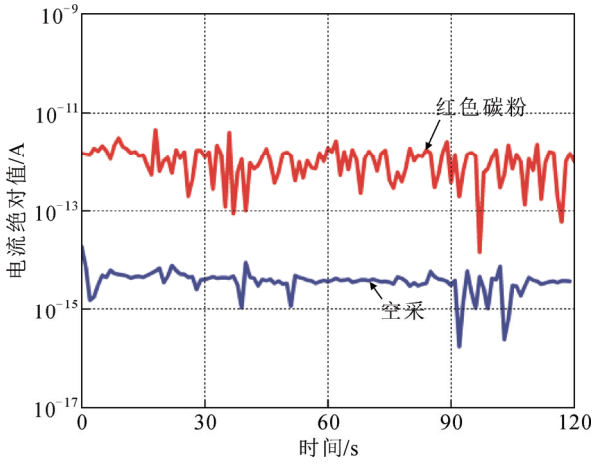


图 1 碳粉极性验证

Fig.1 Verification of toner polarity

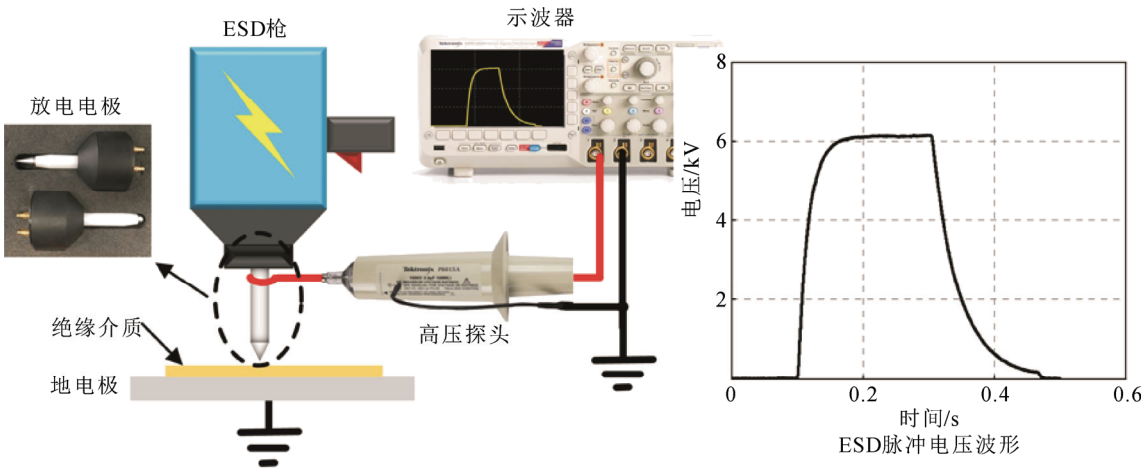


图 2 静电放电实验示意图

Fig.2 Schematic diagram of ESD

使用高压探头测量放电时的电压波形，脉冲电压峰值约为 6.2 kV，脉冲宽度约为 300 ms，上升时间约为 37 ms。

在触发放电后 10 s 内将试样平移至鼓风腔内部进行等时间的粉尘法处理。鼓风机出风口置于鼓风腔体内，用于控制粉尘的流动，将粉尘较为均匀地弥散在腔体内部。为保持粉尘图处理过程的一致性，每次取约 15 mL 碳粉置于出风口的正下方，并使用绝缘夹片将放电后的试样垂直固定于腔体底部。实验时，腔内温度为室温，气压为标准大气。实验所用材料分别为聚酰亚胺薄膜(polyimide，PI)、环氧树脂(epoxy resin，EP)板、聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate，PMMA)和聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene，PTFE)。4 种材料的具体参数如表 1 所示。

表 1 4 种绝缘材料的参数

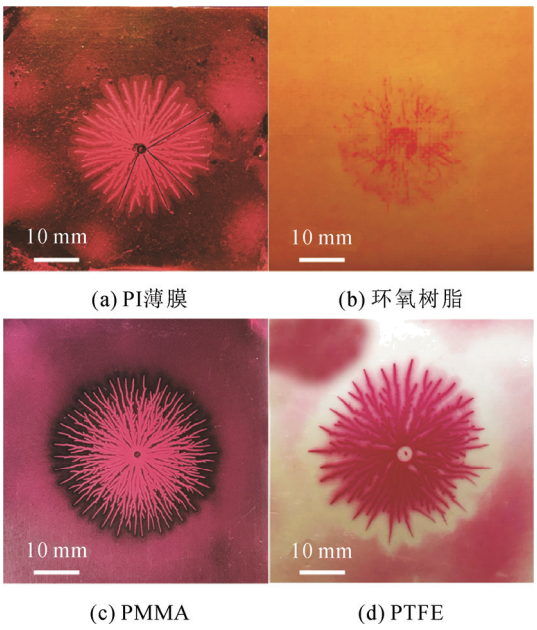
Table 1 Parameters of insulating materials

材料名称	相对介电常数	表面电阻率/Ω	厚度/mm
PI	4	$>10^{14}$	0.075
EP	3.5	$>10^{9}$	4
PMMA	3.2	$>10^{12}$	4
PTFE	2.1	$>10^{16}$	4

2 结果与分析

2.1 不同绝缘材料的粉尘图

如图 3 所示为不同绝缘材料的粉尘图，所用 ESD 电极为球电极。可以看出，不同材料表面的粉尘图形貌均为梅花状，其中 PI 表面形成的粉尘图直径最小，PTFE 表面形成的粉尘图直径最大，而环氧树脂表面的粉尘图却是模糊不清的。可见，在相同的环境条件下，由于材料不同导致绝缘材料表面静电放电过程发生变化，进而影响电荷分布模式。这与材料的介电常数以及表面粗糙度等的差异有很大的关系。



(a) PI薄膜 (b) 环氧树脂

(c) PMMA (d) PTFE

图 3 不同类型绝缘材料的粉尘图

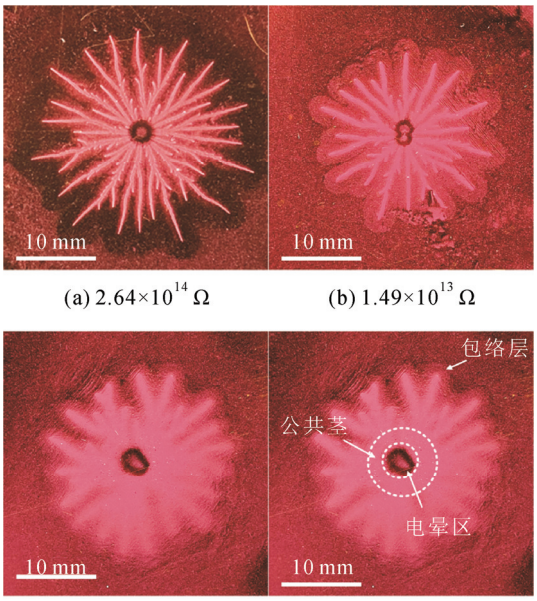
Fig.3 Dust figures of different insulation

2.2 相同材料不同表面电阻率的粉尘图

本文所用 PI 厚度为 75 μm，为避免拿取试样时，试样变形改变粉尘图图案，将 PI 固定在 PMMA 表面。实验前，将 PI 裁剪成直径 6 mm 的圆片作为试样，随后使用离子溅射仪分别对试样进行 10 s 和 20 s 的喷金处理，得到具有不同表面电阻率的 PI 试

样。为得到处理后试样的表面电阻率，在试样表面小心地放置电极间距与电极宽度均为 10 mm 的一对测量电极。对正电极施加 400 V 直流电压后，测量试样表面电流。取 600 s 后的电流值计算得到未处理、10 s 和 20 s 喷金处理后 PI 表面电阻率分别为 2.64×10^{14} Ω、1.49×10^{13} Ω 和 1.23×10^{13} Ω。

如图 4 为锥形电极作用下，使用粉尘图法得到拥有不同表面电阻率 PI 试样表面的静电放电斑图，粉尘图整体形貌呈现“梅花状”。粉尘图中央存在环形的双极性电荷区，各流注通道从该区域出发沿径向较均匀地爆发，且在向前发展过程中随机生长出诸多子通道。随着表面电阻率的降低，各流注通道的宽度随之增加，流注外围出现均匀分布的包络层，同时各通道的公共茎沿径向逐步延伸，导致粉尘图整体形貌变得模糊不清。



(a) 2.64×10^{14} Ω (b) 1.49×10^{13} Ω

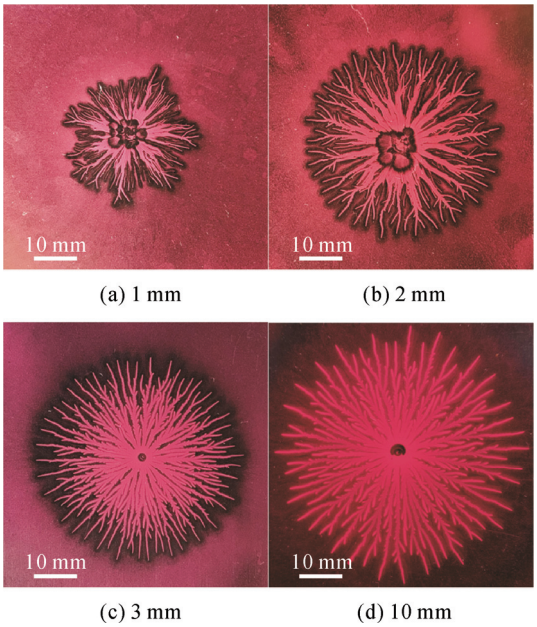
(c) 1.23×10^{13} Ω (d) 分区图

图 4 不同表面电阻率 PI 的粉尘图

Fig.4 Dust figures of PI with the different resistivity

2.3 不同厚度绝缘材料的粉尘图

选取 PMMA 为绝缘材料，研究绝缘材料厚度对静电放电的影响机理。如图 5 分别是厚度为 1、2、3 和 10 mm 时，+6.2 kV 脉冲电压(电极结构为球形)作用下，PMMA 表面形成的粉尘图。粉尘图整体形貌仍类似于梅花形，但其直径随着 PMMA 厚度的增加而增大。由图 5(a)和 5(b)可知，当试样厚度较小时，流注通道有团簇现象，且沿径向一直延伸至流注头部并形成多个子通道。此外，在粉尘图中央存在花瓣状的电荷积聚区域。对比图 5(c)和 5(d)可知，随着试样厚度增加，各流注主通道变得清晰可见，流注通道间隙减小，子通道从流注根部开始出现，沿主通道一直发展至流注头部。因此，当试样厚度增大后，更多的电荷将沿试样表面扩散，而非体内。



(a) 1 mm (b) 2 mm

(c) 3 mm (d) 10 mm

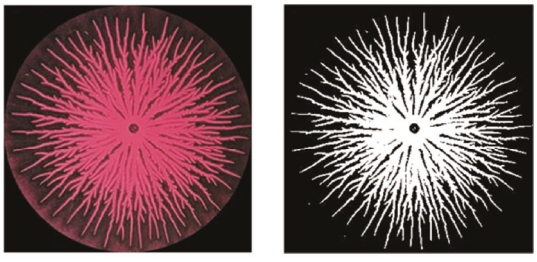
图 5 不同厚度绝缘材料的粉尘图

Fig.5 Dust figures of insulation with different thicknesses

2.4 基于二值化处理的分析方法

二值图像是一种特殊的灰度图，其每个像素点只有 0 和 1 两种取值，对应图像仅有黑色和白色两种颜色，常用于处理由纯文字和纯线条组成的图像。实验发现，正极性流注通道的轮廓均为多分叉的线条，使用二值化处理后可以识别出流注通道的基本轮廓，将流注通道单独分割显示。经统计图像中黑、白像素点的比例，可进一步计算出粉尘图圆周内流注通道的占比，以此来定量表征正极性流注的发展程度，以数据的形式直观分析各影响因素对流注发展的影响程度。

如图 6 所示为二值化处理前后的粉尘图像，通过调节阈值，可以精准识别正流注轮廓。本文定义



(a) 处理前 (b) 处理后

图 6 二值化处理前后的粉尘图

Fig.6 Dust figures before and after binarization

最长流注通道外径形成的圆为流注“发展圆周”，流注在发展圆周内的面积占比为“流注发展比”，后文将使用流注发展比定量描述正极性流注的发展程度。

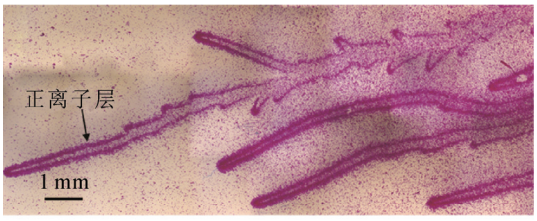
3 讨论

3.1 正极性脉冲下绝缘表面流注的形成过程

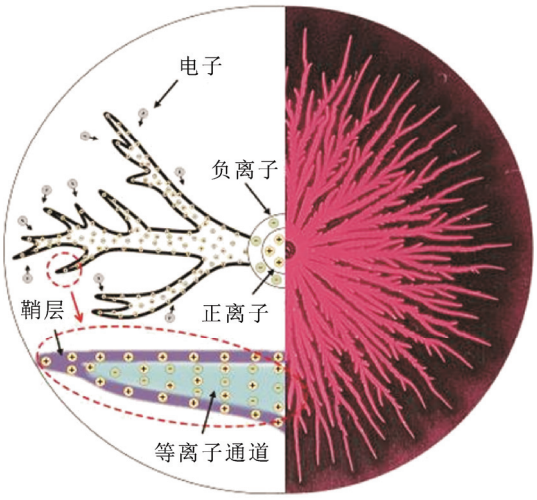
大气条件下的放电现象主要是由于电子在电场作用下引发的碰撞电离和光电离等共同作用的结果。因此材料表面电荷的分布与电场强度和电子的产生发展均有着重要的联系[13]。如图 7(a)所示为光学显微镜下图 5(c)的微观形貌。可以发现，树枝状流注通道外围存在大量的正离子层，同时内部也分布着少量正离子。绝缘材料表面放电发展可通过如图 7(b)所示的模型进行描述，图中红色虚线圈内部对应流注顶端的局部放大图。

当 ESD 枪施加正极性脉冲电压时，放电电极附近的场强非常高，向电极周围注入正电荷，使空气发生电子崩，电子崩生成的电子沿着流注内部向放电电极迁移[14]，形成等离子通道。同时，电离通道顶端的正电荷停留在电离发生的地方，并随着流注的发展形成包裹在等离子通道外围的“鞘层”[10]。在外加电场的作用下，电离通道同时较均匀地沿径向爆发，由此产生长度不等且密集分布的多个流注通道。放电后向绝缘材料表面喷洒粉尘，正离子会吸附负极性的球形红色碳粉，最终形成梅花状的粉尘图。

如图 8 所示，由于 ESD 脉冲电压波形的特殊性，绝缘表面的静电放电过程可大致分为流注、电晕和反向放电 3 个阶段。粉尘图中央存在环形的双极性电荷区就是电晕放电和反向放电导致的。ESD 脉冲电压上升达到峰值时，放电进入电晕阶段。由于高压电极周围存在极强的电场，因此在其周围出现电离区，该区域分布着大量的正负极性离子。高压电极接触绝缘介质表面并放电时，电离区内的带电离子束受电场力作用在绝缘表面移动，由于该离子束中存在少量异极性的离子，吸附在绝缘表面靠近高压电极的位置，形成图 7(b)中所示环形的负离子电荷区。正极性脉冲电压作用下聚合物表面的电荷积聚过程主要依赖于流注放电与反向放电过程，电荷的总体分布特性取决于两者的相互影响。ESD 脉冲电压从峰值下降到一定值后，表面电荷形成的反向电场占主导，这一电场达到反向放电的阈值，放电进入反向放电阶段[15]。



(a) 流注通道微观形貌图



(b) 流注通道发展模型

图 7 绝缘材料表面放电发展模型

Fig.7 Surface discharge model of insulation

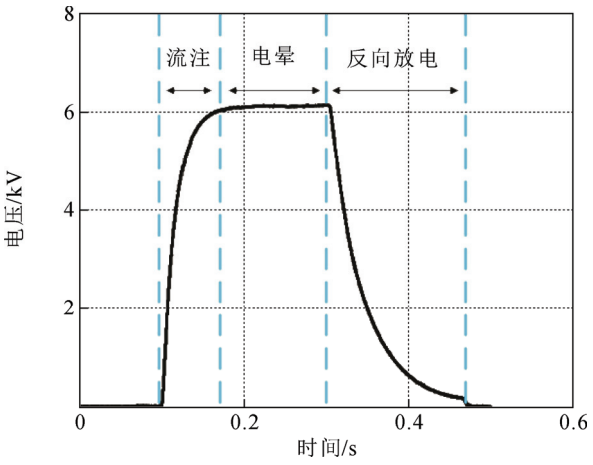


图 8 正极性脉冲下绝缘材料表面放电过程

Fig.8 Discharge process on the surface of insulation under positive ESD

如图 9 所示，高压电极产生的场强为 E_a，电晕区负离子产生的场强为 E_v，流注区正离子产生的场强为 E_s。当脉冲电压幅值较高时，$E_a+E_v>E_s$，不足以引起反向放电。此时流注放电占据主导，并向表面注入同极性电荷，促使沿面流注的发展。$E_a+E_v<E_s$，即脉冲电压幅值持续下降低于有效反向

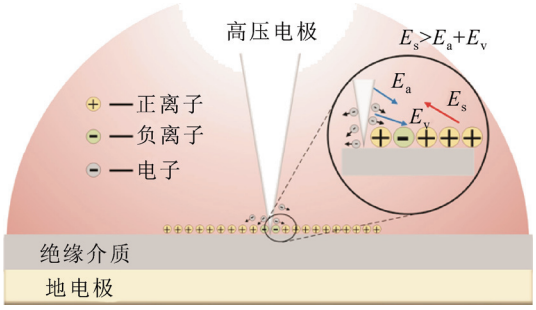


图 9 反向放电示意图

Fig.9 Schematic diagram of back discharge

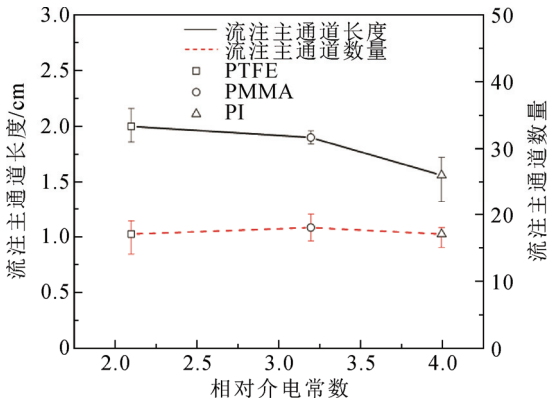


图 10 不同绝缘材料的流注特征量

Fig.10 Streamer characteristic quantities of insulation

放电的阈值时，电场方向会发生反转。在反向电场的作用下电子从高压电极出发，沿径向向外运动，碰撞产生正离子中和电晕区的负离子，最终聚集在高压电极附近，形成图 7(b)中央的正离子电荷区。

3.2 绝缘材料类型的影响

绝缘材料表面流注的发展过程也会受到绝缘材料相对介电常数和表面形貌的影响[16-19]。如图 10 为 PI、PMMA 以及 PTFE 表面放电的流注特征量，即流注主通道长度和流注主通道数量随相对介电常数的变化趋势。由于环氧树脂的粉尘图较为模糊，故未对其特征量进行提取。如图 11 为其粉尘图在二值化处理后的二值图及其直方图，其中，灰度值为 0 时，在二值图中呈现黑色像素点，灰度值为 1 时，呈现白色像素点。通过黑、白像素点的个数可计算得出流注发展比，表 2 为不同绝缘材料表面的流注发展比。可见，EP 表面的流注发展比最低，仅为 9.07%；PI 次之，说明流注发展较为困难；PTFE 表面流注发展比达到了 44.48%，说明其表面流注更容易发展。

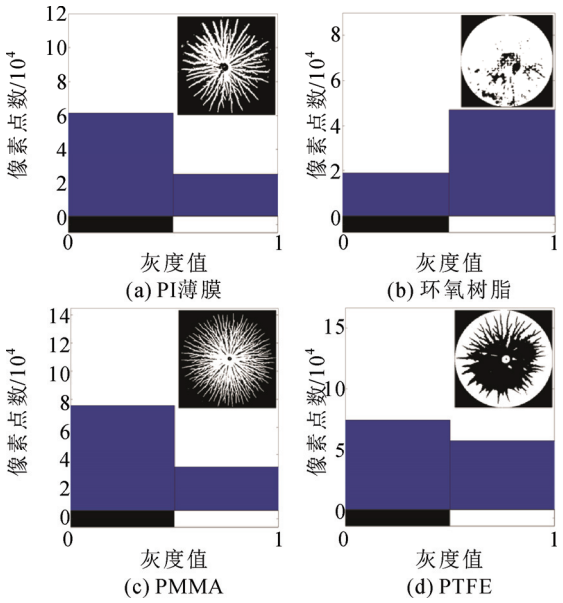


图 11 不同类型绝缘材料的二值图及其直方图；

Fig.11 Binary graph and histogram of insulation

表 2 不同绝缘表面的流注发展比

Table 2 Streamer development ratio on the surface of different insulation

材料名称	PI	EP	PMMA	PTFE
流注发展比/%	36.67	9.07	37.07	44.48

结合图 10 和图 11 可以得出，不同相对介电常数绝缘表面流注主通道数量没有太大的变化，但其流注长度随着相对介电常数的增大而减小，表明相对介电常数较大时，流注更难发展，这是由于电场削弱以及电荷附着效应增强导致的。介电常数越大，绝缘材料表面越容易积累电荷[20-22]。流注沿面发展的过程中，由于电荷附着效应的增强，流注的发展会受到阻碍。同时，介电常数增大时，表面积累的正电荷数量增加，对电场的削弱作用也会增强，流注需要更大的外加电场才能继续发展，发展速度也会减慢。因此，PI 的流注发展圆周明显小于 PMMA。聚合物绝缘材料受加工工艺的影响，导致其表面微观形貌有很大的区别，主要体现在表面粗糙度不同。环氧树脂板是由玻璃纤维布用环氧树脂粘合加工而成，其表面坑洼不平，存在网格状的凸起条纹，表面粗糙度较大。绝缘材料表面粗糙度越大，电荷积聚现象越严重[23]，电荷附着效应越强烈，流注的发展越会受到阻碍。同时凸起的表面也会使电场产生畸变，使得流注的沿面发展路径弯曲，改变表面电荷的分布模式，最终导致图 3(b)所示的放电斑图。

3.3 绝缘材料表面电阻率的影响

表面电阻率是反映绝缘材料表面状态的重要

参数，所以表面电阻率的大小与绝缘材料表面电荷积聚和沿面消散有着密切的联系[5-6]。如图 12 为不同表面电阻率的 PI 表面流注特征量变化趋势，其中流注通道归一化宽度 $f(t)$ 为

$$f(t)=D_t/D_0 \tag{1}$$

式中：D_t 是喷金时间为 t 时主流注通道的平均宽度；D_0 为主流注通道的平均宽度。

由图 12 可知，随着喷金时间(即表面电阻率的下降)的增加，流注主通道长度未发生较大的变化，表明表面电场的分布没有发生变化，沿面流注传播的稳定场强和发光强度不变[24]。然而，流注归一化宽度却随着喷金时间的增加而急剧增大，且由于电荷消散速度加快粉尘图也变得模糊不清。如图 13 所示为不同表面电阻率 PI 表面粉尘图的二值图及其直方图，表 3 为通过二值化处理计算得到不同电导率 PI 表面的流注发展比，数据表明喷金 20 s 后电荷扩散速度几乎增长了一倍。

电荷消散机制一般有固体侧消散、表面传导、和气体侧消散等。图 4 所示 PI 表面积聚的电荷是不均匀分布的，同时随着表面电阻率的下降，表面电荷在切向电场的作用下沿面横向迁移。因此，可以认为该种电荷消散过程以表面传导为主导。表面电荷沿面消散形成消散电流，表面消散电流密度 j_s 可表示为

$$j_s=E_t/\rho_s \tag{2}$$

式中：ρ_s 为绝缘材料表面电阻率；E_t 为绝缘材料表面切向电场强度。

可以得出，表面电阻率和切向电场强度的大小决定了表面电荷的消散速率。因此，PI 试样表面喷金后，其表面电阻率减小了一个数量级，在切向电场一定的情况下，表面消散电流密度急剧增大，电荷加速消散。

3.4 绝缘材料厚度的影响

如图 14 所示，在 ESD 脉冲的作用下，随着厚度的增加，流注主通道长度以及数量均呈现上升的趋势，流注发展过程得到了增强。

如图 15 为不同厚度 PMMA 表面粉尘图的二值图及其直方图，表 4 为不同绝缘材料表面的流注发展比。由此可知，流注的发展程度随着厚度的增加而缓慢增加。这与瞬态电场分布增强相关[25]。绝缘材料表面出现沿面放电时，绝缘材料的厚度增加会使绝缘材料表面切向电场增强，从而引起电离范围的增加，导致沿面流注的进一步发展[22]。厚度较小

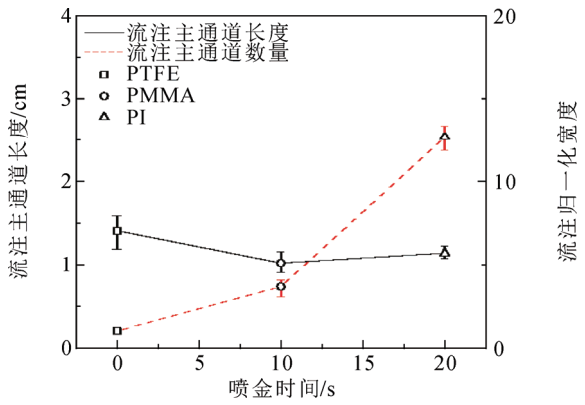


图 12 不同表面电阻率 PI 的流注特征量

Fig.12 Streamer characteristic quantities of PI with different surface resistivity

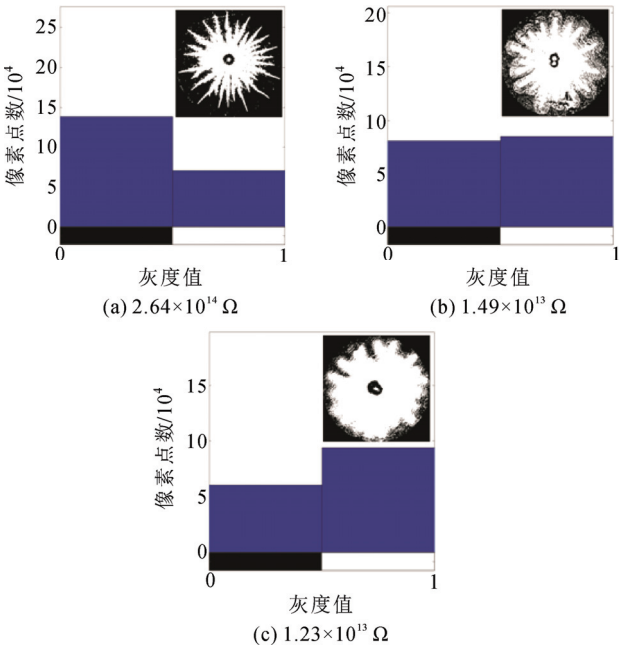


图 13 不同表面电阻率 PI 的二值图及其直方图

Fig.13 Binary graph and its histogram of PI with different surface resistivity

表 3 不同表面电阻率 PI 的流注发展比

Table 3 Streamer development ratio of PI with different surface resistivity

喷金时间/s	0	10	20
表面电阻率/Ω	2.64×10^{14}	1.49×10^{13}	1.23×10^{13}
流注发展比/%	42.88	65.25	77.41

时，地电极处更容易发生电离，对绝缘材料反向注入负极性电荷，在反向电场作用下更快地迁移至绝缘材料上表面，最终导致粉尘图中央出现较大的负极性电荷区。然而，由于反向放电的存在，绝缘材料表面出现正极性电荷积聚[9]，正电荷会重新填充

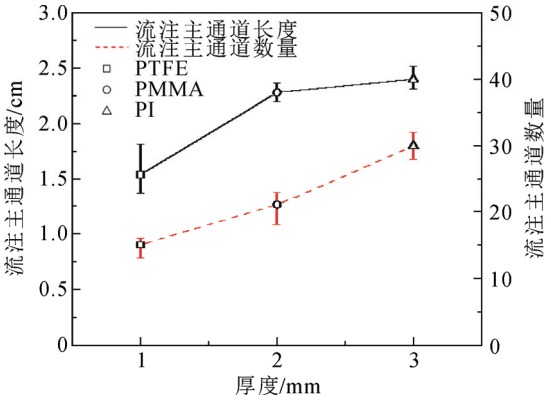


图 14　不同厚度 PMMA 的放电流注特征量

Fig.14　Streamer characteristic quantities of PMMA with different thicknesses

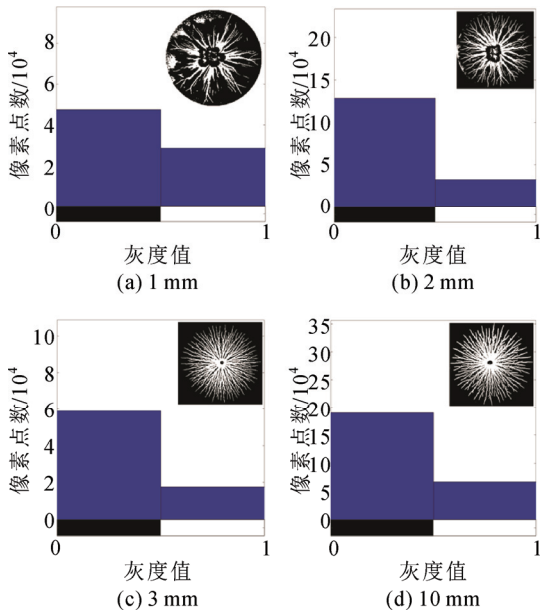


图 15　不同厚度 PMMA 的二值图及其直方图

Fig.15　Binary graph and its histogram of PMMA with different thicknesses

表 4　不同厚度 PMMA 的流注发展比

Table 4　Streamer development ratio of PMMA with different thicknesses

PMMA 厚度/mm	1	2	3	10
流注发展比/%	20.61	25.65	29.25	33.09

进入负极性电荷区，并与负极性电荷产生中和与排斥，形成图 4(a)和 4(b)中央的花瓣状区域。

4　结论

1）正极性脉冲下的静电放电会在绝缘表面形成放射状电荷积聚区，所积聚电荷的极性和形状与静电放电中的流注、电晕和反向放电相关。流注放电形成以静电放电点为起点，向四周辐射的树枝状电荷积聚，其外层是正极性电荷形成的鞘层，内层为等离子区；电晕放电和反向放电形成环形的内正、外负双极性电荷区。

2）相对介电常数、表面电阻率和绝缘厚度对绝缘表面静电放电特性具有一定的影响。相对介电常数较高时，电荷附着效应的增强，流注发展被阻碍，流注主通道长度变短，表面静电放电区域减小，有利于抑制静电放电。表面电阻率的降低，将加快表面电荷消散速率，流注主通道长度有所缩短，但流注通道宽度增加，电荷积聚量增大。材料的厚度则主要影响静电放电时电荷的扩散方式。当厚度较小时，反向注入负极性电荷导致流注发展被抑制。

参考文献　References

[1] 邓军波，董俊豪，陈俊鸿，等. SF_6 替代气体界面绝缘特性的研究进展[J]. 高电压技术，2022，48(2)：661-673.
DENG Junbo, DONG Junhao, CHEN Junhong, et al. Research advances in interface insulation characteristics of SF_6 alternative gases[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 661-673.

[2] 李　进，王泽华，陈　允，等. 高压气体绝缘输电设备用功能梯度材料研究进展[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2471-2477.
LI Jin, WANG Zehua, CHEN Yun, et al. Research progress on functionally graded materials for high voltage gas insulated transmission apparatus[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2471-2477.

[3] 王　璁，张绍立，仝殿杰，等. C_4F_7N/CO_2 中微水对环氧树脂沿面闪络特性影响[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2635-2641.
WANG Cong, ZHANG Shaoli, TONG Dianjie, et al. Effect of micro water in C_4F_7N/CO_2 on surface flashover characteristics of epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2635-2641.

[4] LIANG Z D, LIN C J, LIANG F W, et al. Designing HVDC GIS/GIL spacer to suppress charge accumulation[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 645-651.

[5] LI C Y, FU J J, ZI Y L, et al. Insulator surface charge behaviors: from hazards to functionality[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2022, 38(3): 6-14.

[6] 王邸博. 直流电压下聚四氟乙烯表面电荷的聚散及其对闪络特性的影响[D]. 重庆：重庆大学，2015.
WANG Dibo. Accumulation and decay of surface charge on PTFE under DC voltage and its influence on flashover[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2015.

[7] LI C Y, YANG Y, XU G Q, et al. Insulating materials for realising carbon neutrality: opportunities, remaining issues and challenges[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 610-632.

[8] 张宇程，李文栋，王　超，等. 3D 打印环保型 10 kV 支撑绝缘子的电气性能[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2677-2687.
ZHANG Yucheng, LI Wendong, WANG Chao, et al. Electrical properties of 3D printed environment-friendly 10 kV support insulators[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2677-2687.

[9] CHEN J H, LI J S, DONG J H, et al. Surface forward and backward discharges and corresponding residual charge accumulation characteristics under positive impulse[J]. Journal of Applied Physics, 2022, 131(3): 033302.

[10] MUROOKA Y, TAKADA T, HIDDAKA K. Nanosecond surface discharge and charge density evaluation part I: review and experiments[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001, 17(2): 6-16.

[11] GAN Y J, TALEBZADEH A, XU X Y, et al. Experimental characterization and modeling of surface discharging for an electrostatic discharge (ESD) to an LCD display[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(1): 96-106.

[12] 徐 洋，刘卫东，高文胜. 使用粉尘图法测量交流电压下 GIS 绝缘表面电场电荷分布的影响因素研究[J]. 电瓷避雷器，2020(3)：205-212.
XU Yang, LIU Weidong, GAO Wensheng. Research on the influence factor of the dust figure used for the measurement of the surface charge and electric field distribution of GIS insulator under AC voltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 205-212.

[13] 梁瑞雪，王 健，胡 琦，等. 直流 GIL 盆式绝缘子附近微米级金属粉尘的动力学行为与吸附机制研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(4)：1387-1396.
LIANG Ruixue, WANG Jian, HU Qi, et al. Study on kinetic behavior and adsorption mechanism of the micron metal dust near the basin-type insulator in DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1387-1396.

[14] RAIZER Y P. Gas discharge physics[M]. Berlin, Germany: Springer, 1991: 335-338.

[15] 杨津基. 气体放电[M]. 北京：科学出版社，1983：345-347.
YANG Jinji. Gas discharge[M]. Beijing, China: Science Press, 1983: 345-347.

[16] ALLEN N L, MIKROPOULOS P N. Streamer propagation along insulating surfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(3): 357-362.

[17] AKYUZ M, GAO L, COORAY V, et al. Positive streamer discharges along insulating surfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 902-910.

[18] ALLEN N L, HASHEM A, RODRIGO H, et al. Streamer development on silicone-rubber insulator surfaces[J]. IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, 2004, 151(1): 31-38.

[19] MIKROPOULOS P N. Streamer propagation along room-temperature-vulcanised silicon-rubber-coated cylindrical insulators[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2008, 2(4): 187-195.

[20] 汪 泓，梁芳蔚，钟理鹏，等. 基于 X 射线短时照射的高压直流 GIS/GIL 绝缘子表面电荷主动消散方法[J]. 电工技术学报，2020，35(14)：3147-3151.
WANG Feng, LIANG Fangwei, ZHONG Lipeng, et al. Active charge dissipation method for surface charge on the surface of DC GIS/GIL insulator based on short-time X-Ray irradiation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3147-3151.

[21] 杨 莉，汤俊萍，邱爱慈，等. 纳秒脉冲下真空中绝缘子表面带电特性[J]. 强激光与粒子束，2008，20(12)：2091-2095.
YANG Li, TANG Junping, QIU Aici, et al. Surface charge characteristics on insulators in vacuum under nanosecond pulse excitation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(12): 2091-2095.

[22] SHI Z J, LI C Y, LEI Z P, et al. Lichtenberg figures presenting electrostatic discharge patterns at different humidity[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(34): 34LT01.

[23] YAMANO Y, KASUGA K, KOBAYASHI S, ET al. Surface flashover and charging characteristics on various kinds of alumina under nonuniform electric field in vacuum[C]//Proceedings of the 20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tours, France: IEEE, 2002: 115-118.

[24] 孟晓波，梅红伟，陈昌龙，等. 气压与湿度对绝缘介质表面流注发展特性影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报，2014，34(12)：1938-1947.
MENG Xiaobo, MEI Hongwei, CHEN Changlong, et al. Experimental research on influences of air pressure and humidity on characteristics of streamer propagation along insulation surfaces[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1938-1947.

[25] CHIBA M, KUMADA A, HIDAKA K. Inception voltage of positive streamer and its length on PMMA in air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(1): 118-123.



雷志鹏(通信作者)
1983—，男，博士，副教授，硕导
主要从事电气绝缘放电、绝缘诊断与寿命评估，智能电器方面的研究
E-mail: leizhipeng@163.com

LEI Zhipeng
Ph. D.
Associate professor
Corresponding author



石志杰
1996—，男，硕士
主要从事绝缘材料表面电荷检测及静电放电机理研究
E-mail: 15234073440@163.com

SHI Zhijie

收稿日期 2022-05-25 修回日期 2022-10-10 编辑 曹昭君