



·脉冲功率技术·

固体绝缘子的真空沿面闪络研究*

何友辉^{1,2}, 陈洪斌², 李 飞², 宋法伦²

(1. 中国工程物理研究院 研究生院, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对在高压设备中因沿面闪络现象而发生绝缘失效的问题, 对沿面闪络现象中的基础特性测量手段、影响因素及其发生机制等关键问题进行了归纳总结, 介绍了目前关于沿面闪络观测手段及其影响因素研究的主要进展, 并对沿面闪络过程的具体机制以及表面电荷在沿面闪络过程中扮演的作用进行讨论。其中, 外在因素、电极-介质界面层因素以及真空-介质表面层因素等三大类因素在影响沿面闪络的同时也对表面电荷积累消散造成影响, 其具体机制各不相同。在沿面闪络的主流机制中, SEEA 理论较完整地阐述了沿面闪络的起始过程, ETPR 理论则对沿面闪络的发展过程有着更好的解释。此外, 表面电荷为沿面闪络发生提供了必要电荷, 其积累与消散行为对沿面闪络发展起着决定性作用。开发能够实现低二次电子发射系数与高表面电导的绝缘材料及表面改性技术将是该领域未来重点研究方向。

关键词: 沿面闪络; 表面电荷; 二次电子雪崩发射; 电子极化松弛

中图分类号: TM214

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220214

Review of surface flashover and surface charge behavior of vacuum insulators

He Youhui^{1,2}, Chen Hongbin², Li Fei², Song Falun²

(1. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621900;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: Aiming at the insulation failure caused by surface flashover phenomenon in high voltage equipment, this paper summarizes the key issues such as basic characteristic measurement means, influencing factors and occurrence mechanism of surface flashover phenomenon. In this paper, the main research progress of surface flashover observation methods and their influencing factors are introduced, and the specific mechanism of surface flashover process and the role of surface charge in the process of surface flashover are discussed. Among them, the external factors, the electrode - medium interface layer factor and the vacuum - medium surface layer factor affect the surface flashover as well as the surface charge accumulation and dissipation, and the specific mechanism is different. In the mainstream mechanism of surface flashover, the SEEA theory has a complete description of the initial process of surface flashover, while the ETPR theory has a better explanation of the development process of surface flashover. In addition, surface charge provides the necessary charge for the generation of flashover along the surface, and its accumulation and dissipation play a decisive role in the development of flashover along the surface. Developing insulating materials with low secondary electron emission coefficient and high surface conductance and surface modification technology will be the key research direction in this field in the future.

Key words: surface flashover, surface charge, secondary electron avalanche emission, electron polarization relaxation

固体绝缘子被广泛应用于高电压设备绝缘耐压, 其高电压耐受能力一直是广大研究者研究的热点。一般情况下, 固体绝缘子在真空、液氮以及大气等介质中的耐电压能力不仅小于类似尺寸的介质间隙, 也小于固体绝缘子

* 收稿日期: 2022-07-15; 修订日期: 2022-11-17
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51907182)
联系方式: 何友辉, heyuhui20@gcaep.ac.cn。
通信作者: 宋法伦, songfalun@caep.cn。

体耐压性能。研究发现,绝缘子表面耐电压性能偏低是导致各种介质中绝缘子耐压失效的主要原因。造成这种现象的原因是沿面闪络现象,即固体绝缘子表面在强电场作用下,周围气体或液体电介质被击穿,电弧沿电介质表面延伸,最终发生电极间的贯穿性击穿,造成绝缘失效。沿面闪络现象的发生不仅严重制约着高压介质设备的耐压能力,影响设备的正常运行,还可能造成巨大的经济损失。目前这一现象已成为制约固体绝缘子朝着紧凑型、小型化方向发展的瓶颈所在^[1]。本文对沿面闪络现象的基础特性测量手段、成因、与表面电荷联系的相关研究进行了总结,阐述了沿面闪络与表面电荷的关系,介绍了目前常见沿面闪络特性的测量方式以及影响沿面闪络的主要因素,并对沿面闪络相关机理和表面电荷积聚消散行为对沿面闪络性能的影响进行了讨论。

1 沿面闪络基础特性及其测量手段

对沿面闪络现象的研究离不开对沿面闪络发光特性、二次电子发射系数以及表面电荷分布等基础特性的测量。为此,改进现有沿面闪络与表面电荷测量手段、开发先进的测量方法一直是国内外研究重点之一。

1.1 沿面闪络发光特性

在沿面闪络现象中,光学特性简单直观,被研究者广泛关注。目前光学特性的测量主要有光电倍增管(PMT)以及高速分幅相机等两种办法。

例如,国内林川杰^[2]等人对经过不同方式涂敷脱模剂、冷热冲击处理以及不同固化温度时间等处理的环氧树脂进行了电致发光实验,用光电倍增管记录闪络达到稳定发光状态时的光子数目,图1(a)给出了稳态发光特性测量装置及测量结果。研究结果表明:稳态光子数越高、表面电导率越低、闪络电压越高,发光特性与其他特性密切相关。涂抹脱模剂能一定程度提高闪络电压,如图1(b)所示,图中涂敷脱模剂剂量 $A2 > A3 > A1$ 。而适当的固化时间同样能有效提高闪络电压,如图1(c)所示,图中固化时间 $C2 > C1 > C3$ 。

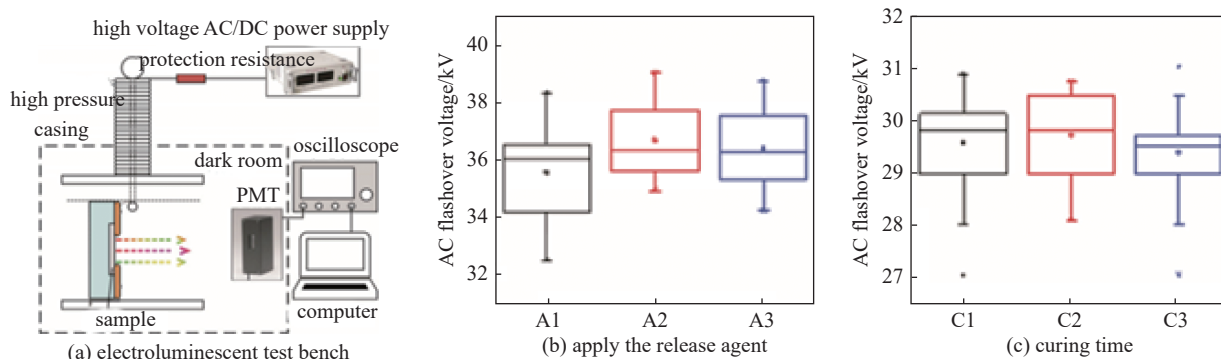


Fig. 1 Steady-state luminous characteristics measurement device and result under different treatment conditions

图1 不同处理条件下稳态发光特性测量装置及结果

1.2 二次电子发射系数

对此,崔阳、宋佰鹏^[3]等人就航天器表面材料(ITO薄膜)二次电子发射特性进行了实验研究:在真空下借助电子枪对样品表面充入初始电子并使用法拉第杯收集反射二次电子直接测量二次电子发射系数 σ ,并对二次电子发射系数对表面电位、充电电流的影响进行分析。结果表明,当二次电子发射系数增大时,表面电位升高,二次发射电流与二次电子发射系数并非严格遵循线性关系。接着,他们使用具有不同能量(E_p)的电子对不同厚度的ITO膜进行照射测量相应的二次电子发射系数(SEY)并与SPIS仿真结果进行了对比分析,实验装置图与研究结果如图2所示,图中1st、2nd、3rd为实验次数。从图中可以看出,50 μm 厚度ITO膜二次电子发射系数明显低于25 μm 厚度ITO膜。对此,他们认为,一次电子进入表面后一部分被禁带陷阱俘获形成陷阱,另一部分能量较高的电子进入导带克服原子核静电引力逃向真空成为二次电子,由于这个过程中存在电子导带电子声子损耗、与原子弹性碰撞损耗、非弹性碰撞激发声子损耗能量以及与空穴复合损耗所以随着膜厚增加,二次电子发射系数有所下降。

1.3 表面电荷测量

目前,表面电荷测量方法主要有粉尘图法^[4-5]、静电探头法^[6-8]以及基于Pockel效应的光电测量^[8]等三种办法。粉尘图法主要是通过绝缘子表面涂抹一层粉尘,通过粉尘分布反映表面电荷分布,这种办法虽然直观,但由于不能进行定量分析,目前主要用作一种辅助测量手段。静电探头法可以依据设备的差异分为有源静电探头法与无源静电探头法两种。前者通过静电计输出高电压匹配表面电位来实现表面电荷测量,后者主要通过表面电荷在探头

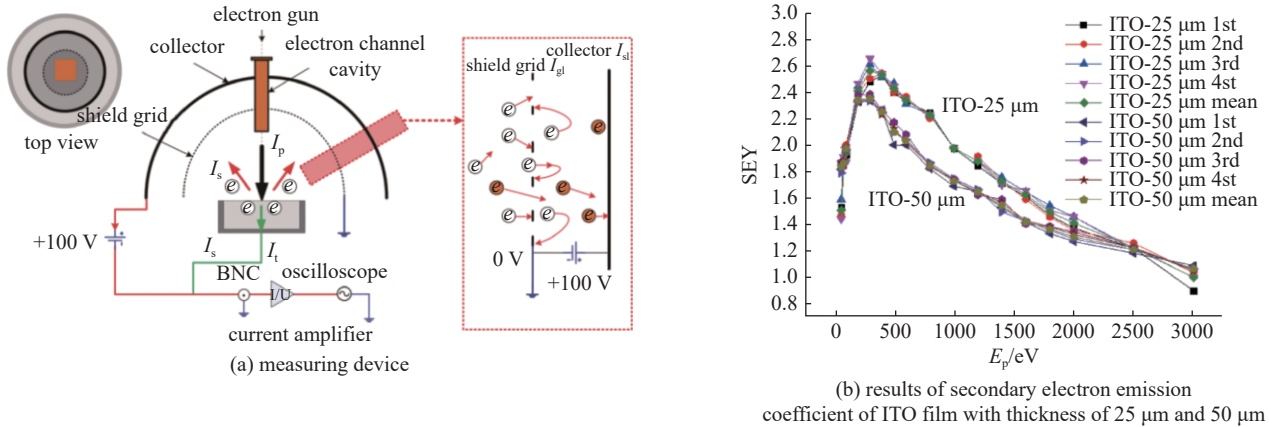


Fig. 2 Secondary electron emission coefficient test device and results

图2 二次电子发射系数测试装置以及结果

表面感应电荷, 测量探头电容值的改变来实现测量。光电测量法通过对绝缘子表面拍摄得到光学信息, 再通过偏振片等器件转换为电场信息来实现测量。有效避免了传统静电探头法因在探头上施加匹配电压而造成原始表面电场扭曲问题, 并且在电荷时空动态特性测量上具有无与伦比的优势, 是目前最主要的非接触式测量手段之一, 缺点是设备复杂、操作较为繁杂。

国内外研究者对上述方法展开了大量研究: 在粉尘图法方面, 徐洋等^[4-5]人用粉尘图法对交流高压下的气体绝缘组合电器(GIS)表面电荷分布进行了在线与离线测量; 在静电探头法方面, Sang Ju^[7]等人使用开尔文探头测量绝缘子表面电位, 测量过程中, 发现真空会有微小电流影响表面电位测量, 其数量级在几十 fA 到几 fA 不等, 具体大小与真空度相关。张博等人^[8]对基于 Pockel 效应的电光法测量方法以及将光学信息转换为表面电场的算法进行了总结, 认为电光测量方法可以实现高信噪比、高时空分辨率的测量, 对透明与不透明材料都有很好效果, 是表面电荷测量技术的未来发展方向。

2 沿面闪络影响因素

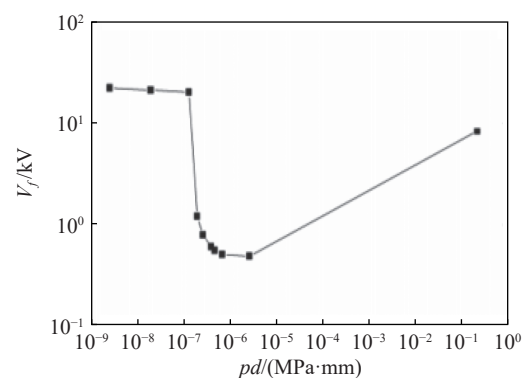
Miller^[9]和高巍^[10]等人对沿面闪络影响因素进行了总结, 将其主要归纳为三大类: 外在因素, 电极-介质界面层因素和真空-介质表面层因素。

2.1 外在因素

外在因素主要包括真空度^[11-12]、电压波形^[13-15]和温度^[16-18]三种。关于真空度, Pillai 等^[11]研究了聚四氟乙烯(PTFE)在直流、交流(60 Hz)和脉冲电压作用下的沿面闪络电压与气体压强之间的关系。实验发现: 气压范围在 1×10^{-6} Pa ~ 1 Pa 内时, 压强的变化基本不影响沿面闪络电压; 当气压高于 1 Pa 时, 随着气压的升高, 沿面闪络电压明显降低, 并在 100 Pa 左右降至最小值, 而后又随气压升高而有所提高。张冠军等^[1]研究了气体压强与距离乘积(pd)对氧化铝陶瓷闪络电压 V_f 的影响, 得到了类似的结果, 如图 3 所示。

关于脉冲电压、直流和交流电压这几种常用电压波形下的闪络, 不同类型材料有不同表现, 如图 4 所示。国外 Kuffel 等人^[12]对特氟龙(聚四氟乙烯)进行闪络实验, 发现交流电压闪络性能好于脉冲闪络性能好于直流闪络性能。Sudarshan^[13-14]等人分别对具有氧化铬涂层以及氧化亚铜涂层的氧化铝陶瓷进行了脉冲电压、直流和交流电压等三种电压下的闪络实验, 发现直流闪络性能强于交流闪络性能, 交流闪络性能强于脉冲电压闪络性能。初步分析认为, 未进行表面处理时, 直流电压下更容易导致表面电荷积聚, 致使闪络性能下降; 而涂敷 Cr_2O_3 后表面电荷积聚减少, 致使实验结果与先前有所差异。

最后关于温度对沿面闪络的影响, Ohki^[15]等人在 1975 年以圆柱形聚乙烯材料对此开展了研究, 发现在温度 $-40 \sim$

Fig. 3 Relationship of Al_2O_3 flashover voltage and the production of pressure and distance^[1]图3 气体压强与距离乘积对氧化铝陶瓷闪络电压的影响^[1]

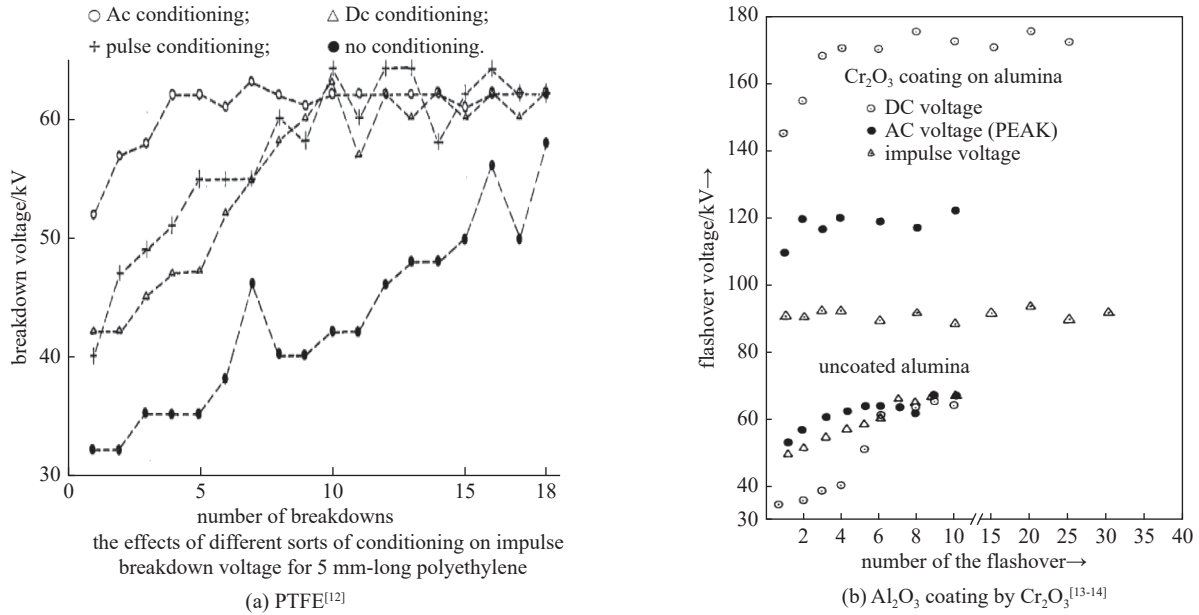


Fig. 4 Flashover voltages of materials under different voltage wave-forms^[12-14]

图 4 不同材料在不同电压波形下的闪络^[12-14]

80 °C 范围内, 圆柱形聚乙烯绝缘子的真空沿面闪络电压随温度的升高而降低, 如图 5 所示。其他研究者^[16-17]开展类似实验后对此做出解释, 认为环境温度通过对沿面闪络发展过程中最关键的气体解吸附过程来影响绝缘子闪络特性。一般说来, 此现象是由于温度升高, 造成气体解吸附加剧, 使得沿面闪络性能下降。

2.2 电极-介质层因素

电极-介质层因素主要包括介电常数^[18-20]、电介质与电极连接方式^[21]以及接触状况^[22-24]等, 这些因素可最终归结为电极-介质界面电场强度的影响, 尤其是真空、介质和金属的三结合处的电场强度影响, 如图 6 所示。

对此, Suki 等^[18]对不同介电常数 ϵ_r 的陶瓷材料展开研究, 结果发现: 对于 $10 < \epsilon_r < 6000$ 的陶瓷材料, 随着介电常数 ϵ_r 的增加, 材料的真空沿面耐压性能下降, 尤其介电常数特别高时, 材料表面吸附气体大幅增加, 耐压性能显著下降。分析认为, 高介电常数能加剧发射结点处的电场畸变, 使得闪络加剧。Akahane M^[19] 等人与 Kofield^[20] 开展了类似实验后认为, 电场畸变是影响三结合点电子发射的重要因素, 高介电常数会加剧上述畸变, 验证了 Suki 的观点。

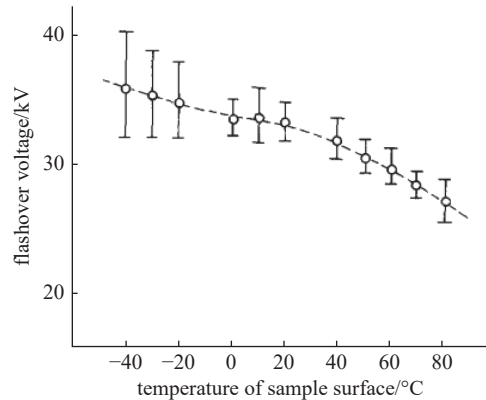


Fig. 5 Cylinder polystyrene flashover voltages on different temperature^[15]

图 5 不同温度下的圆柱形聚乙烯绝缘子闪络电压^[15]

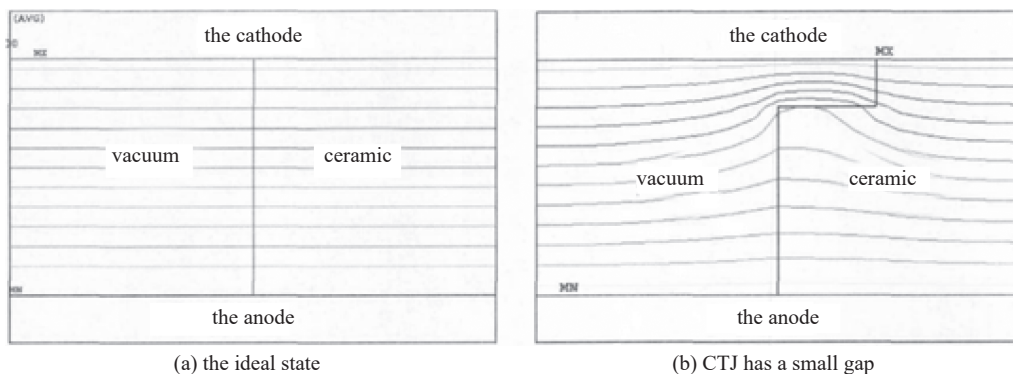


Fig. 6 Distribution of equipotential line in CTJ

图 6 阴极三结合点处等位线分布

此外,国外 Sudarshan^[21] 等人对氧化铝陶瓷进行直流电压下的沿面闪络实验,通过改变圆柱形电极与氧化铝陶瓷表面接触面积使沿面闪络场强得到了大幅提升。国内张冠军^[22-23] 等对经过金溅射处理后的氧化铝表面进行真空交流闪络实验,测量闪络过程中的发光强度变化、相位改变、光谱以及空间分布等特征,发现具有较低的表面能级以及良好接触的电极表面发光更强。分析后认为,良好的接触会加剧电子注入、迁移过程以及二次电子发射过程,促进注入电荷在远离电极处积聚,使得电场发生畸变,最终使得闪络性能下降。

2.3 真空-介质层表面因素

真空-介质层表面因素可分为两类:第一类是表面粗糙度^[24-26]、宏观外形^[27-28]等介质表现特性。以表面粗糙度为例,Yamamoto^[24] 等研究了氧化铝陶瓷、二氧化硅晶体和有机玻璃等材料的表面粗糙度与其真空沿面闪络电压的关系,发现当表面粗糙度大于 $2\mu\text{m}$ 后,表面粗糙度增加有利于遏制表面电荷积聚,进而提高真空沿面闪络电压,如图7所示。

而在绝缘子宏观外形方面,Milton^[27] 与 Pillai^[28] 等就圆柱形绝缘子形状对闪络电压的影响进行研究,如图8、图9所示。他们发现正 45° 倾角下闪络电压最高,而负 45° 角的闪络电压最低。分析认为:正倾角下圆柱绝缘子等势线远离三结合点,电场增强效应得到抑制,同时这还使得阴极电子更容易发射到真空中而非参与表面二次电子发射,最终使绝缘子表面闪络性能得到改善。

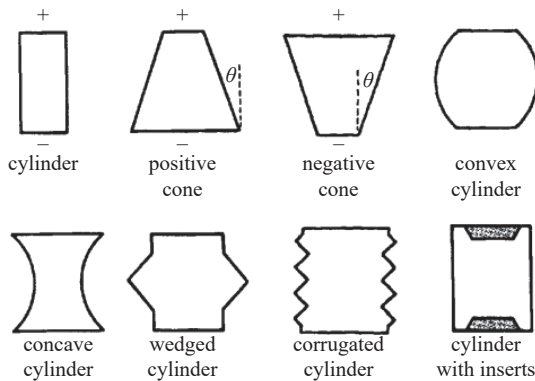


Fig. 8 Common insulator surface shapes

图8 常见绝缘子表面形状

第二类则是表面电导率^[29]、二次电子发射系数^[13-14]和表面陷阱^[30-32]等表面电学特性。关于这类因素,Fukuda^[29] 对铝合金进行了研究,认为表面电阻率越低,表面电荷消散越快,有助于抑制真空沿面闪络的起始阶段;Suardan、Croos^[13] 等人在氧化铝陶瓷表面镀上低二次电子发射系数涂层,使得电子倍增过程得到了有效抑制,同样实现了绝缘子耐压性能提升;吕金壮等^[30] 对氧化铝脉冲电压闪络特性与表面电荷积聚消散特性进行研究后认为,表面深陷阱会加剧电荷积累降低闪络电压,而浅陷阱则能在俘获载流子同时不造成表面电荷的积累,使得闪络性能得到提高。

总的来说,沿面闪络影响因素众多而且繁杂,大多数研究者采用的表面镀膜、溅射等表面改性方法往往改变非单一参数,不仅使得判定各因素的影响比较困难,也无法确切说明材料表面特性影响沿面闪络过程的具体机制。

3 沿面闪络发生机制

关于真空沿面闪络的发展过程,一般认为起始于绝缘子-电极-真空三结合点处的电子发射,结束于绝缘子脱附气体层的闪络击穿。关于中间电子倍增过程有不同的观点,最主要的观点有二次电子发射雪崩(SEEA)^[33] 以及电子引发极化松弛模型(ETPR)^[34-35] 等两种观点。

3.1 二次电子发射雪崩

SEEA模型由Anderson等^[33] 人提出,他们在脉冲电压下对氧化铝与有机玻璃进行了闪络实验,测试了闪络过

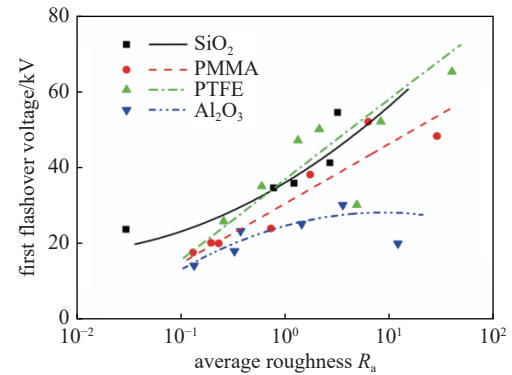


Fig. 7 Relationship between average surface roughness of different insulators and the flashover voltage^[24]

图7 不同绝缘子平均表面粗糙度与闪络电压关系^[24]

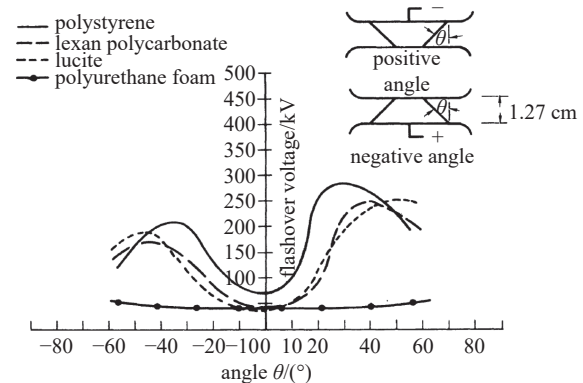


Fig. 9 Cylindrical insulator inclination angle vs flashover voltage^[27]

图9 圆柱形绝缘子倾角与闪络电压关系^[27]

程中电压电流特性,并结合仿真提出了二次电子雪崩发射模型,如图10所示。该模型很好地解释了脉冲电压下的绝缘子沿面闪络现象。其主要观点是:阴极场致发射产生初始电子,初始电子撞击介质表面形成二次电子,进而形成二次电子雪崩同时促进吸附气体解吸附,最终导致沿面闪络发生。

3.2 电子引发极化松弛

ETPR模型由Blase G^[34]于1991年提出,他对之前固体绝缘子表面击穿电场偏低的异常现象进行总结,认为二次电子发射只对沿面闪络起始阶段有较大影响,而影响电子倍增过程的主要是极化电荷的能量释放。他认为,在闪络发生之前,局部区域陷阱就已经俘获一定电荷形成极化平衡态,建立了表面静电场,此后外界扰动促使捕获电荷迁移,极化电荷能量释放,电子发生倍增导致沿面闪络发展并给出了上述过程中极化电荷能量、陷阱密度等关键参数的表达式。之后,他对上述理论中表面电荷积聚、储存能量以及电荷向闪络释放能量等过程中的一些细节进行完善^[35],建立起一个较为完善可靠的模型,如图11所示。

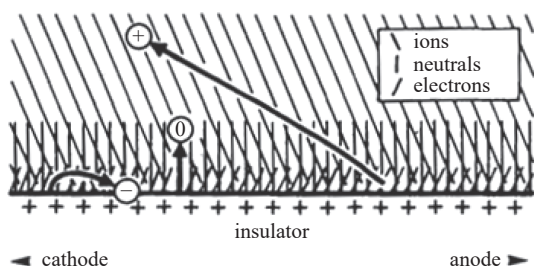


Fig. 10 Schematic diagram of the development process of flashovers along the surface in the SEEA model^[33]

图10 SEEA模型中沿面闪络发展过程示意图^[33]

当前关于上述两种理论的实验证据如表1所示,其中SEEA理论能够较好地解释纳秒脉冲电压下的沿面闪络、表面气体解吸附过程以及二次电子发射系数对沿面闪络的影响,而ETPR在解释直流电压下的沿面闪络现象则有更好的表现^[36]。对此,Anderson^[33]等人基于SEEA理论计算出脉冲电压下氧化铝陶瓷表面击穿电场与预击穿时间延迟的关系,与实验结果对比发现,两者吻合得极好,如图12所示。而Bommakanti^[37]等人依据ETPR理论计算出了直流电压下出现发光到表面出现电流的时间差,与实验对照后发现吻合较好,验证了ETPR理论解释直流沿面闪络现象的可靠性。

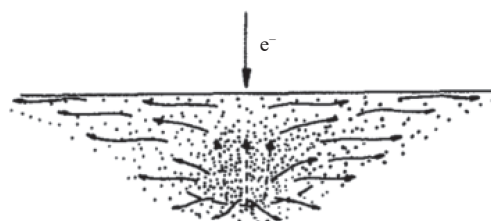


Fig. 11 Schematic of an electron polarization relaxation model^[34]

图11 电子极化松弛模型示意图^[34]

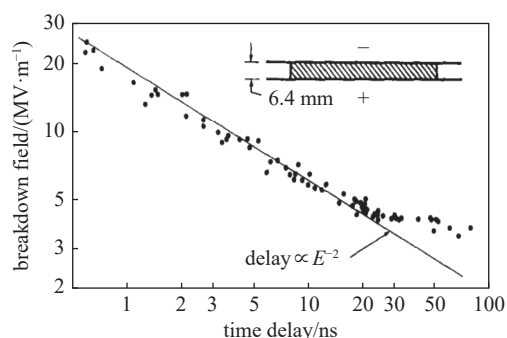


Fig. 12 Insulator flashover electric field with different pre-breakdown time delays^[33]

图12 不同预击穿时间延迟下的绝缘子闪络电场^[33]

表1 不同沿面闪络理论的实验证据^[36]

Table 1 Experimental evidence for different along-surface flashover theory^[36]

theory	support	against
SEEA	effects of nanosecond pulse flashover, desorption gas, magnetic field and secondary electron emission coefficient on surface flashover	DC flashover has a delay of several nanoseconds
ETPR	DC flashover, desorption gas, effect of mechanical properties of insulators and flashover caused by charged particle bombardment	flashover phenomenon at nanosecond pulse voltage

4 表面电荷来源及其行为

4.1 表面电荷对沿面闪络的影响

表面电荷决定了局部电场增强和畸变,为沿面闪络发展提供了所需电荷,其积累和消散行为在沿面闪络过程扮演了一个至关重要的角色,对沿面闪络发展起着决定性作用。

Kumara^[38]等人对聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)绝缘子在脉冲电压下的情况进行研究,发现与脉冲电压极性相反的表面电荷积聚会降低闪络性能,而同性电荷则能提高闪络电压,这一效果同样受材料介电常数、电荷离阴极三结合点距离等因素的影响,结果示意于图13中,图中 V_c^+ 表示正向充电电压, V_c^- 表示反向充电电压。

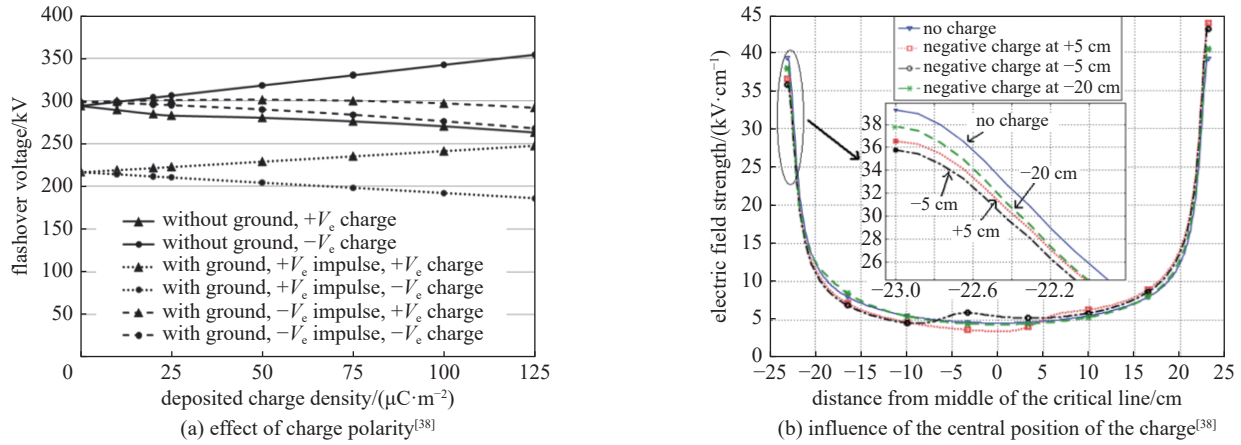


Fig. 13 Effect of surface charge on the flashover voltage under the pulse voltage

图 13 脉冲电压下表面电荷对闪络电压的影响

Katsumi^[39]就氧化铝陶瓷的进一步研究表明：三结合点处同性电荷积聚能够有效提高闪络电压，而在远离三结合点的放电通道中，无论同性或异性电荷的积聚，均使得闪络性能下降。经过仿真分析后认为，电荷在放电通道积聚使得二次电子能量增加、场强增大，造成电子倍增与电荷迁移过程加剧，使得闪络性能下降；而当电荷在三结合点处积聚时，会对场致电子发射产生较大影响，进而抑制沿面闪络的起始过程。

此外，对于直流电压下的情况，天津大学的孟晓^[40]等人就环氧树脂复合材料进行研究，发现异性电荷积聚使得闪络电压下降了 10%；Kumara^[41]等人同样就聚合物绝缘子在负直流电压下的闪络情况展开研究，也得到了类似结果，如图 14 所示，异性电荷积聚最多使得闪络电压下降了 20%。对此，他们认为这可能与二次电子同积聚电荷相互抵消有关。

4.2 表面电荷来源及行为

绝缘介质—真空交界面的表面电荷积聚主要有以下几种来源：阴极表面场致发射，金属、绝缘材料和气体之间形成的三结合点的局部放电，介质夹层极化，绝缘材料电导率不均匀或非线性，表面金属微粒以及由宇宙射线等引起的气体电离等。电荷在积聚的同时还存在消散行为，主要路径为沿表面传导消散、固体传导消散以及气体侧消散等。

针对积聚过程，Sudarshan^[42]提出真空环境下介质中电荷的累积可能由以下三种途径引起：电荷迁移、由于电极与介质的接触而通过 Schottky 效应或 Fowler-Nordheim 效应引发的电荷注入和高能带电粒子碰撞引发的晶格电离。张冠军等人^[1]将绝缘材料的表面带电现象进一步归纳为体内过程(电荷注入)和体外过程(一次及二次电子碰撞)共同作用的结果。图 15 总结了他们关于表面电荷积聚路径的研究结果。

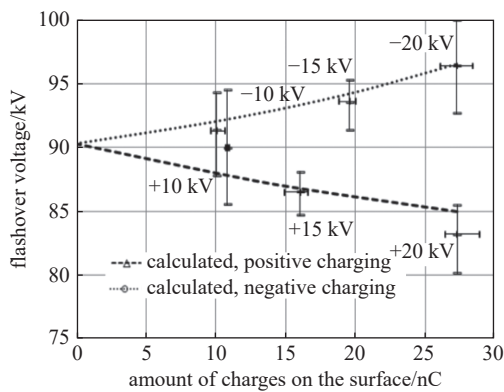


Fig. 14 Influence of surface charge polarity on flashover voltage at DC voltage^[41]

图 14 直流电压下表面电荷极性对闪络电压的影响^[41]

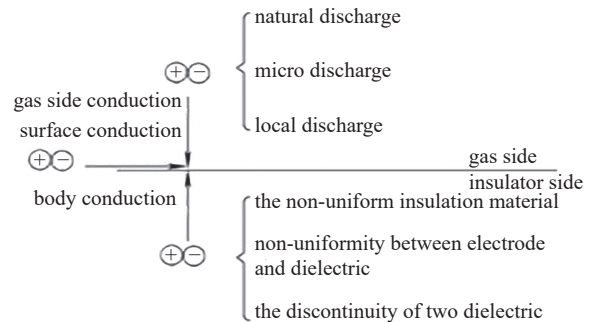


Fig. 15 Three ways of surface charges accumulation

图 15 表面电荷的三种积聚途径

针对消散过程，Kindersberger^[43-44]对 SF₆ 氛围中圆柱形绝缘子表面电荷消散过程开展了直流高压充放电实验和仿真计算，详细分析了电荷的三种消散途径，并且建立了相应的电荷消散模型。

表面电荷积聚消散特性是多种因素共同作用下的结果，主要影响因素有以下几种：外加电压^[45]、温度^[46-47]、粗

糙度^[48]、湿度^[49]以及表面电阻率^[50]。

王邸博等人^[45]发现直流电压幅值的增加使得 GIS 支柱绝缘子表面电荷分布形态和集中分布区的改变,但作用时间却对电荷分布影响不大。对此,他认为:表面法向电场是表面电荷积聚的主导因素,外加切向直流电压使得表面法向电场发生较大改变,导致绝缘子表面电荷分布形态发生较大变化。

唐炬^[46]等人对直流电压下聚合物表面电荷积聚进行研究后认为温度升高造成电子平均自由行程增大,而这一现象会造成电晕放电起晕电压降低^[47],加速表面电荷沿着气体侧传导积聚,最终使得正电荷密度也相应升高。

表面粗糙度一方面会影响表面电导率,从而对电荷积聚产生影响。另一方面表面细小的突起可能导致电场畸变,引发微放电,从而加剧电荷积聚^[48]。

环境湿度主要通过影响表面电导率来对影响表面电荷积聚,但不同材料的亲水性不同,对湿度的敏感度有所差异,如与硅橡胶相比,环氧树脂更易受湿度影响^[49]。汪枫^[50]等人进一步研究发现,表面电阻率通过影响表面电荷在表面电场作用下的迁移运动来影响表面电荷积聚消散特性。

总的来说,不同固体绝缘材料的表面粗糙度与表面电导率等特征参量之间的差异,是导致其表面电荷积聚消散特性区别较大的主要原因,但由于研究者的实验目的、实验条件各不相同,获得的实验现象繁多,关于对最终网络性能改善的方式、机理和结论偏差也较大,甚至相互矛盾。

5 结 论

本文对绝缘子沿面闪络现象、表面电荷来源以及行为的相关研究进行了回顾,并结合相关实验结果进行分析。但是因为绝缘子沿面闪络涉及到高电压绝缘、固体物理、表面物理、真空电子、分子动力学等众多学科,加之不同研究者在进行实验时实验条件的差异,导致真空绝缘子沿面闪络尚无统一论,但通过对相关研究进行总结可以发现:阴极三结合点场致发射是真空沿面闪络的主要起燃机理,经过二次电子倍增过程,结束于表面脱附气体的电离形成放电通道。表面电荷为真空绝缘子沿面闪络提供了必要电荷,其积聚消散行为对沿面闪络发展产生深远影响。外加电压波形、环境温湿度、真空度以及绝缘子表面电学与机械特性等因素在影响着表面电荷积聚消散的同时也影响着沿面闪络。但目前鲜有研究深入探讨外在因素、绝缘子表面电学特性等因素影响沿面闪络过程的具体机制,致使现有表面改性技术存在着泛用性不佳,改性效果不理想并随时间增加有所衰退等问题。因此,对沿面闪络过程中电子倍增过程进行进一步研究,探究绝缘子表面性质影响沿面闪络过程的具体机制并对表面电荷积聚消散过程展开深入研究,以便开发有效抑制手段将是该领域的未来研究方向。

参考文献:

- [1] Zhang Guanjun, Su Guoqing, Song Baipeng, et al. Pulsed flashover across a solid dielectric in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(6): 2321-2339.
- [2] 林川杰, 高文虹, 李琦, 等. 环氧树脂工艺参数与交流沿面闪络的关联性[J]. *高电压技术*, 2019, 45(9): 2732-2739. (Lin Chuanjie, Gao Wenhong, Li Qi, et al. Correlation between epoxy resin process parameters and AC flashover[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(9): 2732-2739)
- [3] 崔阳, 宋佰鹏, 杨勇, 等. 航天器表面材料二次电子发射特性研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(8): 770-774. (Cui Yang, Song Baipeng, Yang Yong, et al. Study on characteristics of secondary electron emission for spacecraft surface materials[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(8): 770-774)
- [4] 徐洋, 刘卫东, 高文胜. 使用粉尘图法研究交流电压下典型GIS绝缘表面缺陷的电场电荷分布[J]. *电瓷避雷器*, 2020(5): 211-218. (Xu Yang, Liu Weidong, Gao Wensheng. Research on distribution of the electric field and surface charge of typical defects on GIS insulators with dust figure[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2020(5): 211-218)
- [5] 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)
- [6] 张博雅, 王强, 祁喆, 等. 直流电压下聚合物表面电荷测量方法及积聚特性[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(24): 6664-6674. (Zhang Boya, Wang Qiang, Qi Zhe, et al. Measurement method and accumulation characteristics of surface charge distribution on polymeric material under DC voltage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(24): 6664-6674)
- [7] Lee S J, Hong A, Kim I H, et al. Surface potential measurements of a polymer film following primary ion gun irradiation for ToF-SIMS analysis of insulator using a Kelvin probe and the observation of effects from the vacuum gauge[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 525: 146561.
- [8] 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.
- [9] Miller H C. Flashover of insulators in vacuum: the last twenty years[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(6): 3641-3657.

- [10] 高巍, 孙广生, 严萍, 等. 影响真空中绝缘体沿面闪络特性因素研究综述[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 456-460,465. (Gao Wei, Sun Guangsheng, Yan Ping, et al. Summary of influence factors about insulator surface flashover in vacuum[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(6): 456-460,465)
- [11] Pillai A S, Hackam R. Surface flashover of solid insulators in atmospheric air and in vacuum[J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 58(1): 146-153.
- [12] Kuffel E, Grzybowski S, Ugarte R B. Flashover across polyethylene and tetrafluoroethylene surfaces in vacuum under direct, alternating and surge voltages of various waveshapes[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1972, 5(3): 575-579.
- [13] Sudarshan T S, Cross J D. The effect of chromium oxide coatings on surface flashover of alumina spacers in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1976, EI-11(1): 32-35.
- [14] Cross J D, Sudarshan T S. The effect of cuprous oxide coatings on surface flashover of dielectric spacers in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1974, EI-9(4): 146-150.
- [15] Ohki Y, Yahagi K. Temperature dependence of surface flashover voltage of polyethylene in vacuum[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, 46(8): 3695-3696.
- [16] 张振军, 郑晓泉, 吴文斌, 等. 不同温度下聚酰亚胺真空直流沿面闪络特性[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 47-51. (Zhang Zhenjun, Zheng Xiaoquan, Wu Wenbin, et al. DC surface flashover characteristics of polyimide in vacuum at different temperatures[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 47-51)
- [17] 屠幼萍, 谭荣, 张贵峰, 等. 聚酰亚胺在低温真空环境下的直流电气特性[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 194-200. (Tu Youping, Tan Rong, Zhang Guifeng, et al. DC electrical characteristics of polyimide at cryogenic temperature in vacuum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 194-200)
- [18] Suzuki T. Flashover voltage over ceramics in high vacuum[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1974, 13(10): 1541-1546.
- [19] Akahane M, Kanda K, Yahagi K. Effect of dielectric constant on surface discharge of polymer insulators in vacuum[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44: 2927.
- [20] Kofoid M J. Phenomena at the metal-dielectric junctions of high-voltage insulators in vacuum and magnetic field[J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 1960, 79(3): 991-999.
- [21] Sudarshan T S. Electrode architecture related to surface flashover of solid dielectrics in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997, 4(4): 374-381.
- [22] Zhang Guanjun, Yan Zewu, Liu Yi, et al. Influence of electrode contact on luminescence from alumina ceramic surface under ac electric field in vacuum[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(5): 625-627.
- [23] Zhang Guanjun, Zhao Wenbin, Yan Zhang, et al. Optical investigation of AC preflashover of alumina ceramic in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2004, 11(3): 498-505.
- [24] Yamamoto O, Takuma T, Fukuda M, et al. Improving withstand voltage by roughening the surface of an insulating spacer used in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10(4): 550-556.
- [25] 郎艳, 王艺博, 苏国强, 等. 表面粗糙度对有机玻璃材料真空沿面闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 474-478. (Lang Yan, Wang Yibo, Su Guoqiang, et al. Influence of surface roughness on vacuum flashover characteristics of PMMA[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 474-478)
- [26] Guo Baohong, Sun Guangyu, Zhang Shu, et al. Mechanism of vacuum flashover on surface roughness[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52: 215301.
- [27] Milton O. Pulsed flashover of insulators in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1972, EI-7(1): 9-15.
- [28] Pillai A S, Hackam R. Surface flashover of conical insulators in vacuum[J]. *Journal of Applied Physics*, 1984, 56(5): 1374-1381.
- [29] Fukuda H, Yamano Y, Kobayashi S, et al. Relationship between vacuum surface flashover and charging characteristics for alumina ceramics of lowered resistivity[C]//2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. 2013: 1-4.
- [30] 吕金壮. 氧化铝陶瓷的陷阱分布对其真空中沿面闪络特性的影响[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2003: 66-74. (Lv Jinzhuang. The influence of trap distribution of alumina ceramics on the surface flashover performance in vacuum[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2003: 66-74)
- [31] Li Chengrong, Ding Lijian, Lv Jinzhuang, et al. The relation of trap distribution of alumina with surface flashover performance in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2006, 13(1): 79-84.
- [32] Li Shengtao, Huang Qifeng, Sun Jian, et al. Effect of traps on surface flashover of XLPE in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(3): 964-970.
- [33] Anderson R A, Brainard J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron-stimulated desorption[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(3): 1414-1421.
- [34] Blaise G, Le Gressus C. Charging and flashover induced by surface polarization relaxation process[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(9): 6334-6339.
- [35] Blaise G. New approach to flashover in dielectrics based on a polarization energy relaxation mechanism[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1993, 28(4): 437-443.
- [36] Miller H C. Flashover of insulators in vacuum: review of the phenomena and techniques to improved holdoff voltage[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1993, 28(4): 512-527.
- [37] Bommakanti R G, Sudarshan T S. Trap-dominated breakdown processes in an insulator bridged vacuum gap[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(5): 2091-2099.
- [38] Kumara S, Serdyuk Y V, Gubanski S M. Simulation of surface charge effect on impulse flashover characteristics of outdoor polymeric insulators[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(6): 1754-1763.

- [39] Kato K, Kato H, Ishida T, et al. Influence of surface charges on impulse flashover characteristics of alumina dielectrics in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(6): 1710-1716.
- [40] Du Boxue, Xiao Meng. Influence of surface charge on DC flashover characteristics of epoxy/BN nanocomposites[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, 21(2): 529-536.
- [41] Kumara S, Serdyuk Y V, Gubanski S M. Surface charge decay on polymeric materials under different neutralization modes in air[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(5): 1779-1788.
- [42] Jaitly N C, Sudarshan T S. In-situ insulator surface charge measurements in dielectric bridged vacuum gaps using an electrostatic probe[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1988, 23(2): 261-273.
- [43] Kindersberger J, Lederle C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluorid—part I: simulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(4): 941-948.
- [44] Kindersberger J, Lederle C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluorid—part II: measurements[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(4): 949-957.
- [45] 王邸博, 唐炬, 刘凯. 直流高压下GIS支柱绝缘子表面电荷积聚特性[J]. *高电压技术*, 2015, 41(9): 3073-3081. (Wang Dibo, Tang Ju, Liu Kai. Charge accumulation on post insulator surface under HVDC in GIS[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(9): 3073-3081)
- [46] 王邸博, 唐炬, 陶加贵, 等. 直流电压下闪络及电晕后聚合物表面电荷积聚特性[J]. *高电压技术*, 2015, 41(11): 3618-3627. (Wang Dibo, Tang Ju, Tao Jiagui, et al. Surface charge accumulation characteristics on polymer after flashover and corona charging under DC voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(11): 3618-3627)
- [47] 陈士修, 解广润. 温度对电晕特性的影响[J]. *高电压技术*, 1994, 20(3): 3-8. (Chen Shixiu, Xie Guangrun. The effect of temperature on the corona performances[J]. *High Voltage Engineering*, 1994, 20(3): 3-8)
- [48] Nakanishi K, Yoshioka A, Arahata Y, et al. Surface charging on epoxy spacer at DC stress in compressed SF6 GAS[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, PAS-102(12): 3919-3927.
- [49] Lutz B, Kindersberger J. Influence of the relative humidity on the DC potential distribution of polymeric cylindrical model insulators[C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2010: 541-544.
- [50] 汪飒, 方志, 邱毓昌. 高压直流GIS中绝缘子的表面电荷积聚的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(3): 105-109. (Wang Feng, Fang Zhi, Qiu Yuchang. Study of charge accumulation on insulator surface in HVDC gas-insulated switchgear[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(3): 105-109)