DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.008

直流叠加冲击电压下GIS绝缘子沿面闪络特性

何 成[1]， 游 溢[1]， 王欣欣[1]， 杨柱石[2]， 赵普志[2]
（1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院，乌鲁木齐 830011；2. 国网新疆电力有限公司，乌鲁木齐 830002）

摘要： 大量故障统计表明，GIS带电操作瞬间或之后短时间内常发生绝缘击穿故障。分析认为，开关操作产生的直流残压与暂态过电压的联合作用更易于激发GIS内金属微粒诱发绝缘放电，但目前缺少针对直流叠加冲击电压下绝缘子沿面放电规律的研究。为此搭建了直流叠加冲击电压实验平台，分别研究了不同直流电压预加时长、电压极性和沿面异物条件下绝缘子表面电荷积聚特征以及闪络放电特性。研究发现，相较于单纯冲击电压下的绝缘子闪络电压，在极性相反的直流—冲击叠加电压下，无论是洁净绝缘子还是附着微粒绝缘子的闪络电压均明显更低；与洁净绝缘子相比，附着微粒绝缘子表面电荷积聚过程更快，表面电荷密度较大，叠加电压下闪络电压的变化率更大，微粒显著影响绝缘子的放电特性。反极性叠加电压下表面电荷会增强绝缘子沿面电场，促进电荷的迁移过程并增大场强，激发微粒诱导绝缘子的沿面放电。

关键词： 气体绝缘组合电器；直流叠加冲击电压；绝缘子；表面电荷；沿面闪络

Surface Flashover Characteristics of GIS Insulators Under DC Superimposed Impulse Voltage

HE Cheng[1], YOU Yi[1], WANG Xinxin[1], YANG Zhushi[2], ZHAO Puzhi[2]
（1. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830011, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830002, China）

Abstract: A large number of fault statistics show that insulation breakdown faults often occur at the instant of or within a short time after live operation of GIS. Analysis suggests that the combined effect of DC residual voltage and transient overvoltage generated by switch operation is more likely to excite metal-particle-induced insulation discharge in GIS. However, there is currently a lack of research on the surface discharge characteristics of insulators under DC superimposed impulse voltage. To this end, the DC superimposed impulse voltage experimental platform is set up to study the surface charge accumulation characteristics and flashover discharge characteristics of insulators under different DC voltage pre- application duration, voltage polarities, and surface foreign matter conditions. It is found by research that compared to the flashover voltage of insulators under pure impulse voltage, the flashover voltage of either clean insulators or particle-attached insulators is significantly lower under the polarity opposite DC impulse superimposed voltage. While, compared with clean insulators, particle-attached insulators have a faster surface charge accumulation process, higher surface charge density and a greater flashover voltage variation rate under superimposed voltage. Particles significantly affect the discharge characteristics of insulators. Under reverse polarity superimposed voltage, surface charges will enhance the surface electric field of insulators, promote the migration process of charges, and increase the field strength, as well as excite particles to induce surface discharge of insulators.

Key words: gas-insulated switchgear; DC superimposed impulse voltage; insulator; surface charge; surface flashover

收稿日期：2026-04-07； **修回日期：**2026-07-10
基金项目：国网新疆电力有限公司科技项目(B330DK23005)。
Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Xinjiang Electric Power Company(B330DK23005).

0 引言

经过现场测试发现，气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear，GIS)在断路器、隔离开关断开后母线会存在残余直流电压，幅值可达到0.6~1.0 p.u.。GIS设备中的电荷泄漏速度相对较慢，因此残余的直流电压能够持续存在数10个小时。残余直流电压的存在会造成GIS内部自由金属微粒跳动、绝缘子表面电荷积聚[1-6]，引起局部电场集中，削弱SF_6气体的绝缘能力。GIS开关操作时会产生快速暂态过电压[7-8]，并且暂态过电压会与母线上的残余直流电压相叠加，导致GIS承受直流—冲击电压的叠加作用[9-10]。2016年北京东变电站1 100 kV GIS系统调试过程中6次因合闸操作引起绝缘子沿面闪络，且放电均发生在未装配电压互感器、残压难以泄放的母线，推测事故原因为母线残压与合闸过电压叠加使得绝缘子发生闪络。在过去的几年中，国内频繁出现GIS放电故障，其中绝大多数发生在开关合闸瞬间，因而研究直流叠加冲击电压下GIS绝缘子沿面闪络特性，有助于理解GIS绝缘放电故障原因并优化其绝缘设计[11-12]。

实际上，SF_6中绝缘子在直流—冲击叠加电压下的闪络放电反映了直流电压下空间电荷、表面电荷积聚对放电过程的影响规律。近年来，关于GIS带电操作过程中绝缘子表面电荷的积聚与分布的研究已成为高压绝缘领域的热点问题[13-20]。西安交通大学的李晓昂研究发现，相较于单独作用的冲击电压，特定参数组合的工频—冲击叠加电压可以降低GIS中母线尖刺、绝缘沿面异物等典型绝缘缺陷的放电电压，具有诱导绝缘缺陷放电过程的能力[21-23]。东京电力公司的Okabe S分别探究了在正/负极性直流叠加正/负极性冲击等组合电压下绝缘子的闪络特性，研究结果表明，当直流电压与冲击电压极性相反时，绝缘子闪络电压会降低，且随着直流电压幅值的增加，闪络电压的降低程度也会加大[24-25]。在此基础上陈庆国等学者进行了更为深入地研究，该团队使用附着金属微粒的支柱绝缘子作为缺陷模型，首先施加直流电压以使绝缘子表面积聚电荷，再移除直流电压，接着在冲击电压条件下获得绝缘子的闪络电压。实验发现，金属微粒在绝缘子表面激发出的反极性电荷有利于电晕放电的发生，从而导致绝缘子的沿面闪络[26]。

目前研究表明，GIS带电操作产生的直流残压对绝缘子表面电荷的积聚和放电过程存在一定的影响，然而现有成果缺少系统地研究表面电荷积聚规律与直流—冲击叠加电压下绝缘子沿面放电之间的关联规律，以及金属微粒附着在绝缘子表面后导致的电荷积聚与沿面放电特性，均需开展进一步研究。研究直流叠加冲击电压下GIS绝缘子沿面闪络特性将有助于解释GIS带电操作工况下绝缘放电故障频发的过程和机理，促进GIS绝缘可靠性的进一步提升，具有重要的学术和工程价值。

1 实验平台与实验方法

1.1 实验平台

本研究针对直流叠加冲击电压下SF_6中绝缘子沿面放电特性，因而需搭建直流叠加冲击实验回路，回路应能产生正/负极性直流(±DC)叠加正负极性冲击(±Imp)电压波形，同时需要考虑直流电压源与冲击电压发生器的相互作用。综合上述要求，搭建直流叠加冲击实验回路，见图1。额定输出±400 kV的直流电压源和±1 400 kV的冲击电压发生器并联接在试品高压端以实现直流—冲击的叠加电压。为了避免冲击电压幅值过高对直流电压源造成损坏，在直流电压源输出端串联300 kΩ保护电阻。同时，在冲击电压发生器输出端串联30 nF的隔直电容，保护冲击电压发生器不受直流电压影响。

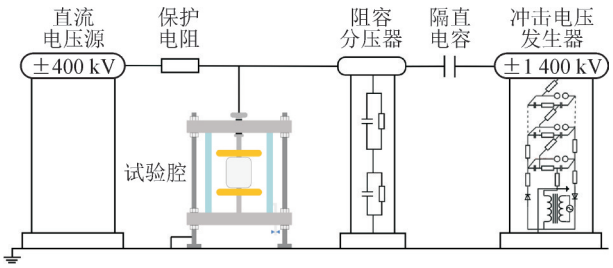


图1 直流叠加冲击电压实验回路

Fig. 1 DC superimposed impulse voltage experimental circuit

经调试，实验回路能够输出不同幅值、极性的直流—冲击叠加电压，其中冲击电压选用标准雷电冲击电压(1.2/50 μs)。不同极性的直流叠加冲击电压波形见图2，当直流与冲击电压极性相同时，$U_s=U_{Imp}+U_{DC}$，而当直流与冲击电压极性相反时，$U_s=U_{Imp}-U_{DC}$。叠加条件下的放电电压U_s为叠加电压相对于地电位的幅值。

实验中绝缘子模型由添加Al_2O_3填料的双酚A型环氧树脂浇注而成，材料配方和浇注工艺均与实际工程中GIS绝缘子相同。绝缘子模型采用对称结构，其中环氧部分高度30 mm，直径26 mm。为了对电极、绝缘子、气体三结合点处的电场进行屏蔽，在绝缘子上下端分别嵌入内屏蔽电极，见图3。

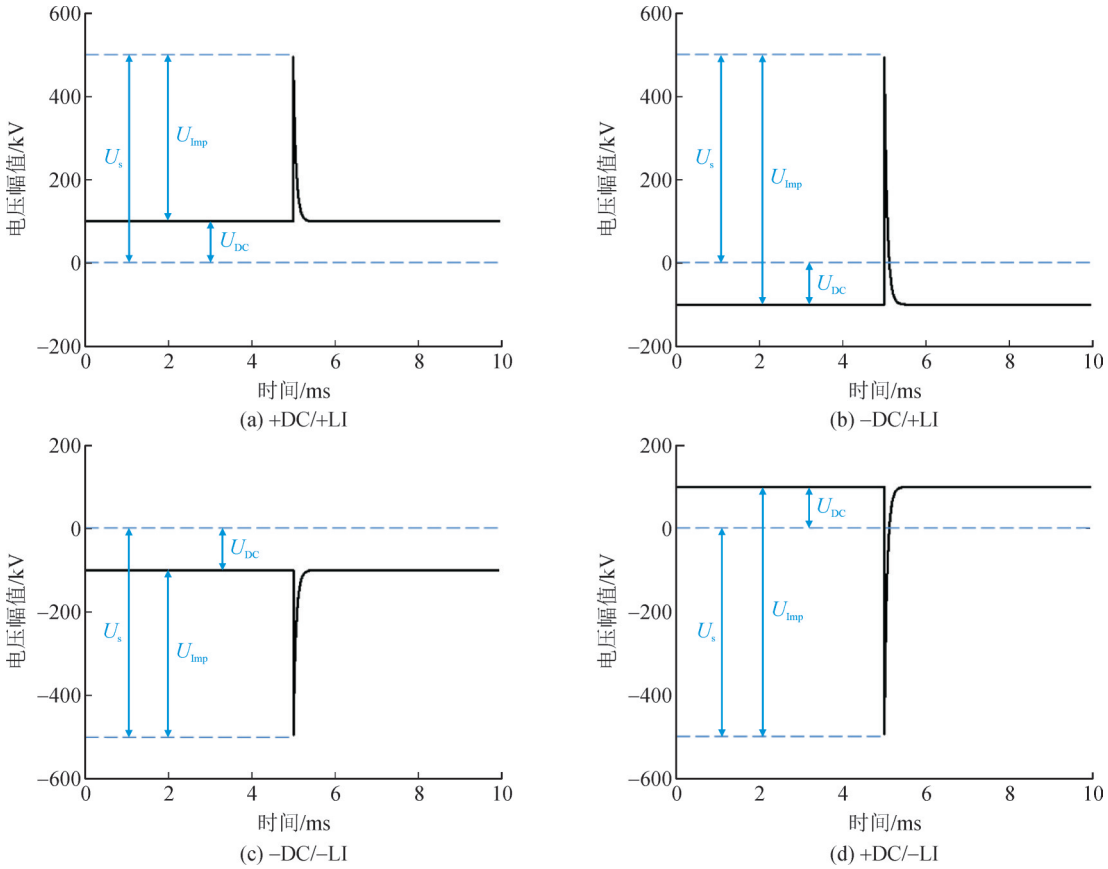


图2　直流叠加冲击电压波形

Fig. 2　DC superimposed impulse voltage waveform

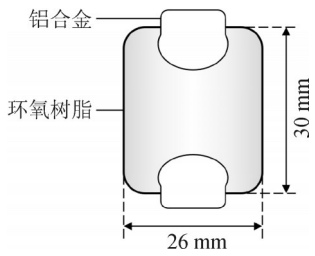


图3　支柱绝缘子模型

Fig. 3　Post insulator model

实验平台中采用静电探头及电荷放大器(Kistler 5018A 型)测量绝缘子表面电荷密度值。静电探头沿支柱绝缘子轴向扫描 8 周，每周扫描点数为 23 个，整个采集过程需要约 3 min。此外，平台中还采用光电倍增管(PMTH-S1-CR131 型)对绝缘子的沿面放电过程进行观测。

1.2　实验方法

文中所述实验均在 SF_6 气体中开展，因此有必要对实验罐体中 SF_6 气体的纯度和含水量进行严格控制。实验前，将实验罐体抽真空至 40 Pa 并充入 0.2 MPa 的高纯氮气，静置干燥 12 h。然后再次将实验罐体抽真空至 40 Pa 并充入所需压力的 SF_6 气体(采用绝对气压表示)，静置 12 h 后方可进行实验。

对于绝缘子，每次放电后均需要将试品取出，对闪络痕迹进行洁净处理，然后用无毛纸浸渍无水乙醇将绝缘子表面擦拭干净。特别地，对绝缘子施加直流电压后，由于绝缘子表面所积聚电荷难以在短时间内彻底消散，即使绝缘子未发生放电，亦需将绝缘子取出，使用浸满无水乙醇的无毛纸将绝缘子表面擦拭除去表面电荷，以防止对后续实验造成影响。

实验中选用GIS中常见的线形金属铝微粒作为缺陷模型，微粒的半径为 0.1 mm，长度在 2~10 mm 范围内，采用导电环氧胶将微粒粘固在绝缘子表面。实验前测得直流电压下微粒的最大局部放电起始电压不超过 25 kV，因此后续实验中施加的直流电压幅值均高于该值，以确保达到能够引起绝缘子表面微粒引发局部放电程度。在开展直流叠加冲击实验时，首先以 2 kV/s 的升压速率将直流电压提高到预定的幅值 U_{DC}，接着保持直流电压幅值不变并计时。预加一定时间的直流电压后，施加冲击电压，形成直流与冲击电压的叠加。与冲击电压下类似，直流叠加冲击电压下绝缘子沿面的放电电压具有一定分散性。由于绝缘子在放电后绝缘性能无法立刻恢复，因此升降法的实验效率较低。为了获

得绝缘子的闪络电压，文中采用升压法。取预估闪络电压的2%作为电压变化值ΔU，保持直流电压不变，冲击电压每次增加ΔU，直至绝缘子发生闪络。取10次闪络电压的平均值作为绝缘子的闪络电压。

2 直流叠加冲击电压下洁净绝缘子沿面闪络特性

直流电压下GIS绝缘子表面积聚的电荷将会影响后续冲击电压叠加时的闪络放电过程。本节系统研究直流叠加冲击电压下支柱绝缘子模型的闪络特性，分析不同条件下表面电荷积聚特征，获得直流电压预加时间、电压极性、表面粗糙度对绝缘子闪络特性的影响规律。

2.1 直流电压预加时间对绝缘子闪络特性的影响

首先研究了不同直流电压预加时间条件下绝缘子在直流叠加冲击电压时的闪络放电特性。分别对绝缘子施加1、60、120、240、300、360 min的直流电压，直流电压幅值为−100 kV，然后叠加正极性冲击电压，获得绝缘子的闪络电压，见图4。图4中横坐标代表直流电压的预加时间，纵坐标代表绝缘子的闪络电压，虚线代表正极性冲击电压单独作用时绝缘子的闪络电压。

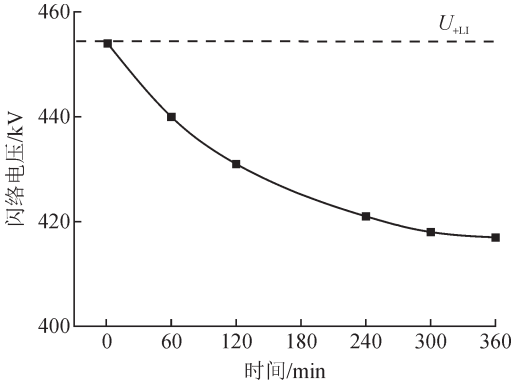


图4 绝缘子闪络电压与直流电压预加时间的关系(U_{DC}=−100 kV，p=0.3 MPa)

Fig. 4 The relationship between insulator flashover voltage and DC voltage pre-application time (U_{DC}=−100 kV，p=0.3 MPa)

实验结果显示，当直流电压预加时间为1 min时，绝缘子在直流叠加冲击电压下闪络电压与冲击电压下的相同。随着直流电压预加时间的延长，绝缘子的闪络电压变化逐渐增大。这是由于随着直流电压预加时间增长，绝缘子表面电荷密度逐渐增大，对于沿面电场的畸变作用增强，因此对闪络电压的影响增大。在直流电压预加时间超过300 min后，绝缘子表面的电荷积聚达到饱和状态，此时闪络电压不会再下降。基于该结果，在后续实验中直流电压预加时间均采用300 min。

2.2 电压极性对绝缘子闪络特性的影响

分别研究了±DC叠加±LI下支柱绝缘子的闪络电压，见图5。图中横坐标为预加直流电压幅值，纵坐标为绝缘子在叠加电压下的闪络电压，横坐标为零的点代表绝缘子在冲击电压单独作用时的闪络电压。

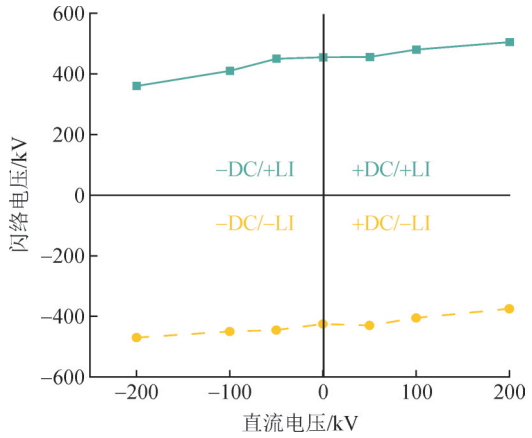
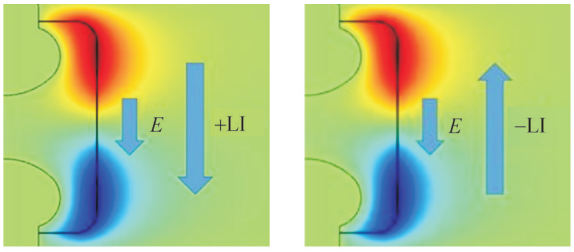


图5 绝缘子闪络电压与直流电压的关系(p=0.3 MPa)

Fig. 5 The relationship between insulator flashover voltage and applied DC voltage(p=0.3 MPa)

由图5中结果可知，叠加电压的极性会显著影响绝缘子的闪络放电特性。当直流电压与冲击电压极性相同时，绝缘子闪络电压会变大；而当叠加极性相反时，绝缘子闪络电压变小。当直流电压幅值为200 kV时，相较于冲击电压单独作用条件，在−DC/+LI条件下绝缘子闪络电压降低20%，在+DC/−LI条件下绝缘子闪络电压降低17%。

分析认为，直流电压下绝缘子表面的电荷积聚是导致绝缘子闪络电压在后续叠加电压下发生显著变化的关键因素。当叠加电压极性相反时，以−DC/+LI为例，起初在负极性直流电压作用下绝缘子上端会积聚正电荷，下端会积聚负电荷。表面电荷对场强的畸变见图6，图6中红色代表正极性电荷，蓝色代表负极性电荷。在绝缘子中部，正、负极性电荷形成了向下的电场，且该电场方向与正极性冲击电压下绝缘子沿面的电场方向一致。由图6所示的电场分布可知，绝缘子沿面最大场强位置位于绝缘子中间位置，表面电荷形成的电场增大了冲击电压下绝缘子沿面的最大电场强度，因此绝缘子闪络电压降低。而当叠加电压极性相同时，以−DC/−LI为例，正、负极性电荷会在绝缘子中部形成向下的电场，与负极性冲击电压下绝缘子沿面的电场方向相反，因此表面电荷形成的电场削弱了冲击电压下绝缘子沿面的最大电场强度，使得绝缘子闪络电压升高。



(a) −DC/+LI　　(b) −DC/−LI

图6 表面电荷对电场的畸变作用示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the distortion effect of surface charges on the electric field

为验证直流叠加冲击电压下绝缘子闪络电压变化的原因，开展了先施加直流电压、撤去直流电压后施加冲击电压的直流/冲击实验，获得了绝缘子在冲击电压下的闪络电压，并与直流叠加冲击实验结果进行对比，见表1。由表1可知，叠加电压下绝缘子闪络电压与直流/冲击实验中闪络电压近似相等，证明了直流叠加冲击实验中绝缘子闪络电压的变化是由直流电压下绝缘子表面电荷积聚造成的，而与波形的关系不大。

表1 直流叠加冲击实验与直流/冲击实验结果

Table 1 Results of DC superimposed impulse experiment and DC/impulse experiment　　kV

直流叠加冲击实验			直流/冲击实验	
直流电压	冲击电压	叠加电压	直流电压	冲击电压
−100	+518	+418	−100	+424
−200	+561	+361	−200	+356
−100	−346	−446	−100	−449
−200	−264	−464	−200	−459

2.3 表面粗糙度对绝缘子闪络特性的影响

实验测得在直流叠加冲击电压下不同表面粗糙度绝缘子的闪络电压见图7，发现当不存在表面电荷时，粗糙度对绝缘子闪络电压的影响较小。在−DC/+LI条件下，随着绝缘子表面粗糙度的增大，表面电荷密度也随之增大，因此绝缘子表面电荷对沿面电场的畸变效果更加明显，所以闪络电压降低，见图7(a)。而在−DC/−LI条件下，粗糙度对绝缘子闪络电压的影响较小，见图7(b)。这是由于当直流电压与冲击电压极性相同时，表面电荷对沿面电场起削弱作用，闪络将沿表面电荷密度较小的区域发展，而表面粗糙度的增大主要使绝缘子在局部区域表面电荷密度增大，因此对闪络过程影响较小。

3 直流叠加冲击电压下附着金属微粒的绝缘子表面闪络特性

在GIS带电操作的过程中，开关触头的机械磨合会产生金属颗粒、碎屑、粉末等金属微粒型绝缘

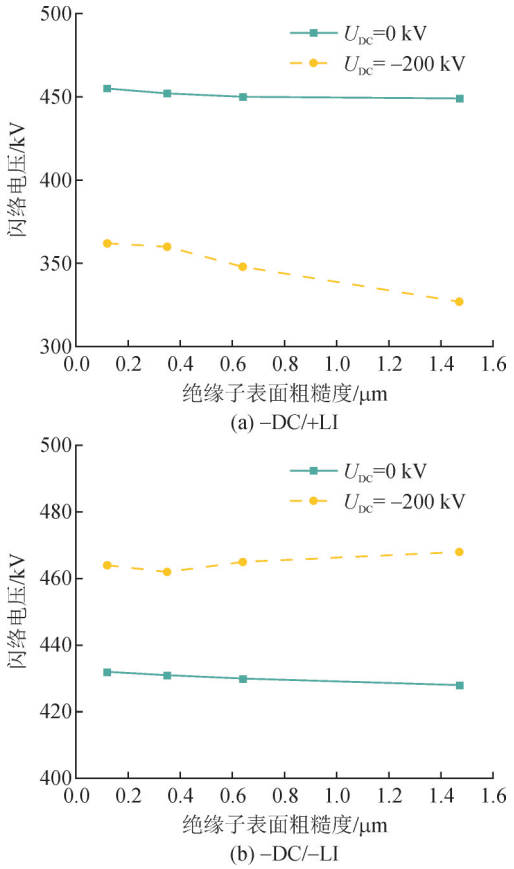


图7 不同表面粗糙度下绝缘子的闪络电压

Fig. 7 The flashover voltage of insulators under different surface roughness

缺陷，而金属微粒在电场作用下易于吸附在绝缘子表面，进一步影响绝缘子表面的电荷积聚特性与闪络放电过程。

3.1 直流电压下附着微粒绝缘子表面电荷积聚特性

3.1.1 直流电压作用时间对表面电荷积聚特性影响

为了探究金属微粒吸附在绝缘子表面后对表面电荷积聚特性的影响，将一根半径0.1 mm、长6 mm的铝丝沿竖直方向粘附在绝缘子中部，施加−100 kV直流电压，测得绝缘子表面电荷密度随直流电压作用时间的变化见图8。在10 min时绝缘子表面已存在明显的电荷积聚。随着直流电压作用时间增长，绝缘子表面电荷密度逐渐上升至饱和状态。

绝缘子表面正、负电荷密度最大值与直流电压作用时间的关系见图9，可见在约60 min时电荷积聚达到饱和。相较于洁净绝缘子，当附着金属微粒时绝缘子表面电荷积聚过程显著加快，且在微粒端部电荷密度出现激增。这是由于金属微粒会畸变绝缘子沿面电场，导致局部放电并生成大量电荷，从而使得微粒端部的电荷密度增大。

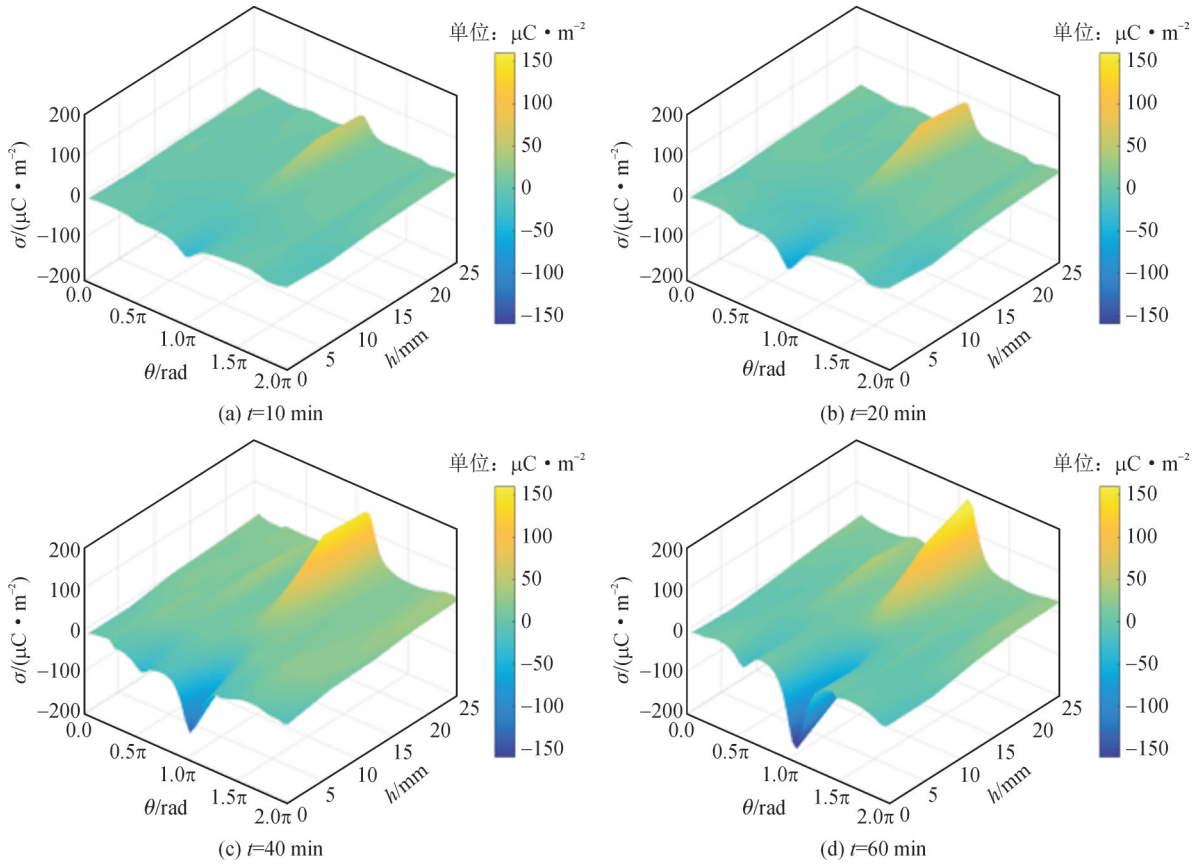


图8 绝缘子表面电荷分布随直流电压作用时间的变化(p=0.3 MPa)

Fig. 8 The variation of surface charge distribution on insulators with the duration of DC voltage application(p=0.3 MPa)

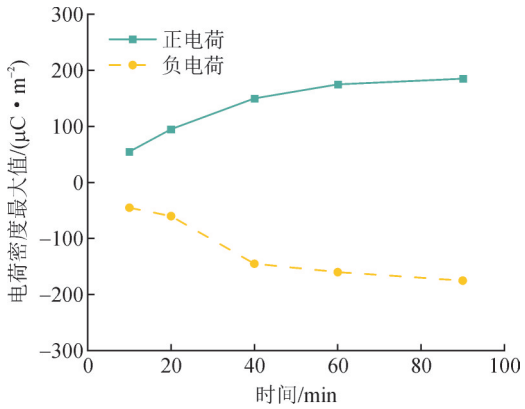


图9 正、负电荷密度最大值与直流电压作用时间的关系

Fig. 9 The relationship between the maximum positive and negative charge density and the duration of DC voltage application

3.1.2 直流电压幅值对表面电荷积聚特性影响

分别对附着金属微粒的绝缘子施加−50、−80、−100、−120 kV的直流电压，测得不同直流电压幅值下绝缘子表面的电荷分布情况，见图10。随着直流电压幅值增大，微粒引起的局部放电逐渐增强，微粒端部产生的电荷数量进一步增多。由于金属微粒端部会出现与其所在侧电极极性相反的电荷，所以微粒两端所在处的绝缘子表面积聚的电荷极性也与所对电极的极性相反。另外，随着电压幅值升高，表面电荷出现畸变的范围逐渐增大。根据图11可知，表面电荷密度随直流电压幅值的增加而迅速增大，表面电荷密度与直流电压幅值呈正相关性。

3.1.3 微粒尺寸对表面电荷积聚特性影响

为了研究微粒尺寸对绝缘子表面电荷积聚特性的影响，分别将一根半径为0.1 mm，长度为2、4、6 mm的铝丝使用环氧胶粘附在绝缘子中部，施加−100 kV直流电压，电荷积聚达到饱和时绝缘子表面电荷分布见图12。可见随着微粒长度增加，微粒对绝缘子沿面电场的畸变作用增强，微粒端部的电荷密度也随之显著增加。表面电荷最大值与微粒长度的关系见图13，随着微粒长度增加，表面电荷密度迅速增大。

3.2 直流叠加冲击电压下绝缘子闪络特性

3.2.1 电压极性对绝缘子闪络特性的影响

为探究附着微粒绝缘子的闪络特性，将半径0.1 mm、长4 mm的铝丝附着在绝缘子中部，分别测量±DC叠加±LI下绝缘子的闪络电压，实验结果见图14。与叠加电压下无缺陷绝缘子的放电特性一致，当直流电压与冲击电压极性相同时，叠加电压条件下绝缘子的闪络电压升高；当直流电压与冲击电压极性相反时，绝缘子闪络电压降低。表面电荷

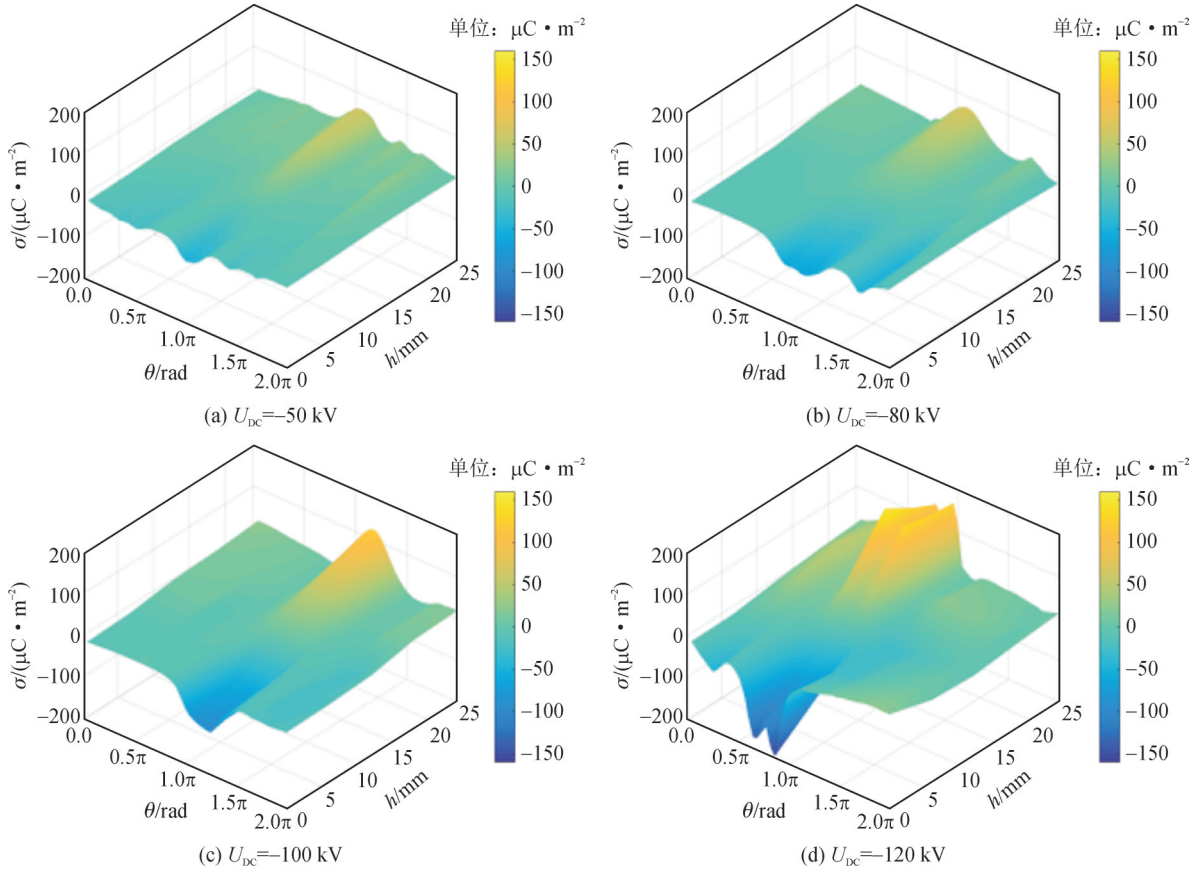


图 10　绝缘子表面电荷分布与直流电压幅值的关系(p=0.3 MPa，l=4 mm)

Fig. 10　The relationship between the surface charge distribution of insulators and the amplitude of DC voltage (p=0.3 MPa，l=4 mm)

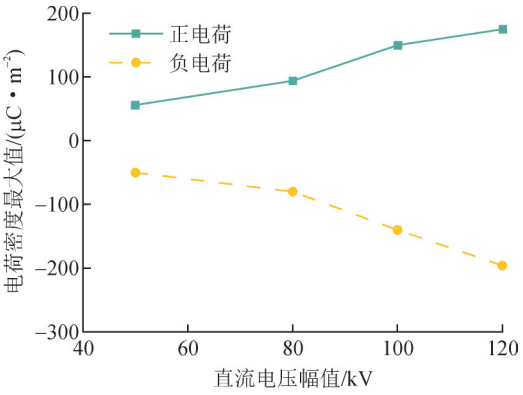


图 11　正、负电荷密度最大值与直流电压幅值的关系

Fig. 11　The relationship between the maximum positive and negative charge density and the amplitude of DC voltage

对电场的畸变作用见图 15，当直流电压与冲击电压极性相反时，以−DC/+LI 为例，在−DC 下，微粒上端会积聚正电荷，下端会积聚负电荷，电荷在微粒端部形成的电场与+LI 下的电场方向相同，因此会增强微粒端部电场，使得放电更易起始，闪络电压降低。而当叠加电压极性相同时，电荷会削弱微粒端部电场，使得闪络电压升高。

与洁净绝缘子的闪络特性相比，叠加电压条件下附着微粒绝缘子闪络电压的变化率显著增大，当直流电压幅值为−100 kV 时，−DC/+LI 下绝缘子闪络电压降低 36%，−DC/−LI 下绝缘子闪络电压升高 20%。这是由于相较于洁净绝缘子，附着微粒绝缘子表面电荷密度增大，电荷对电场的畸变作用增强，因此绝缘子闪络电压变化率增大。

3.2.2　微粒尺寸对绝缘子闪络特性的影响

分别将半径为 0.1 mm，长度为 2、3、5、7、10 mm 的金属微粒粘附在绝缘子高压导体处，获得了叠加电压下微粒长度对附着微粒绝缘子闪络特性的影响规律，见图 16。随着微粒长度增加，绝缘子闪络电压迅速降低，并且在−DC/+LI 下，不同长度微粒诱发的绝缘子闪络电压均低于+LI 单独作用下的微粒诱发的绝缘子闪络电压，即叠加电压下绝缘子对于金属微粒缺陷的容忍度将会降低。

绝缘子闪络电压变化率与微粒长度的关系见图 17，由图 17 可见随着微粒长度增加，微粒端部电荷积聚将增强，闪络电压变化率也逐步升高，而且当叠加极性相反时，绝缘子闪络电压变化率的增长幅度会更大。

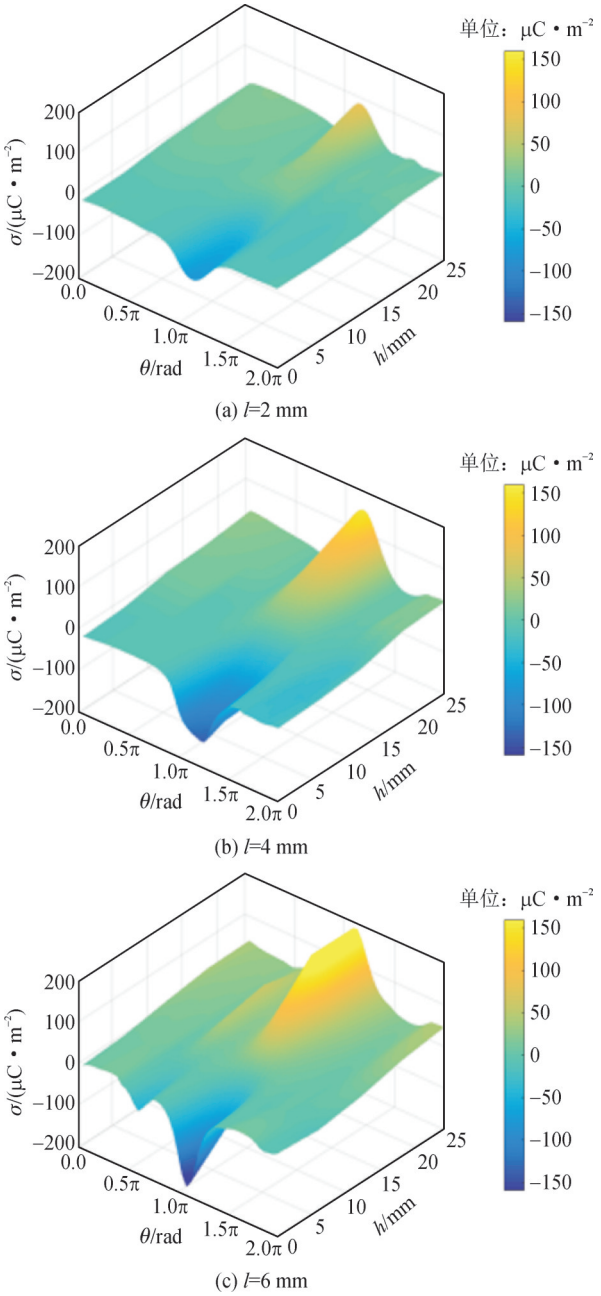


图12 绝缘子表面电荷分布与微粒长度的关系(p=0.3 MPa，U_{DC}=−100 kV)

Fig. 12 The relationship between surface charge distribution of insulators and particle length(p=0.3 MPa，U_{DC}=−100 kV)

3.3 表面电荷对绝缘沿面放电过程的影响

3.3.1 表面电荷对绝缘子沿面流注起始电压的影响

为了研究极不均匀电场中表面电荷对绝缘子沿面放电过程的影响，利用光电倍增管对绝缘子沿面放电过程进行光学诊断，其中光电倍增管主要测量金属微粒端部绝缘子表面的光信号。实验测得不同直流电压预加时间对叠加电压下绝缘子沿面流注起始电压的影响规律，见图18，其中0 s代表冲击电压下的流注起始电压。随着直流电压预加时间变长，绝缘子表面积聚的电荷数量增多，畸变沿面电场的能力也增强，引发流注起始电压逐渐降低。当直流电压预加时间超过60 min后，表面电荷积聚达到饱和，流注起始电压趋于稳定。

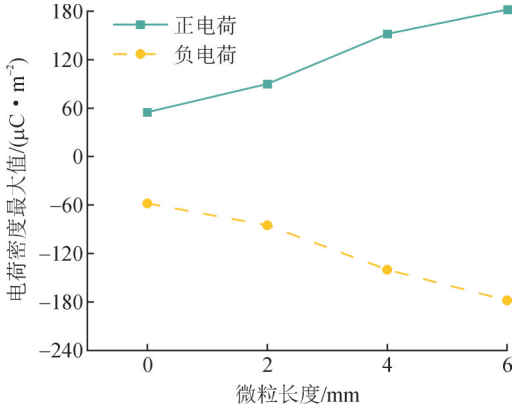


图13 正、负电荷密度最大值与微粒长度的关系

Fig. 13 The relationship between the maximum positive and negative charge density and the length of particles

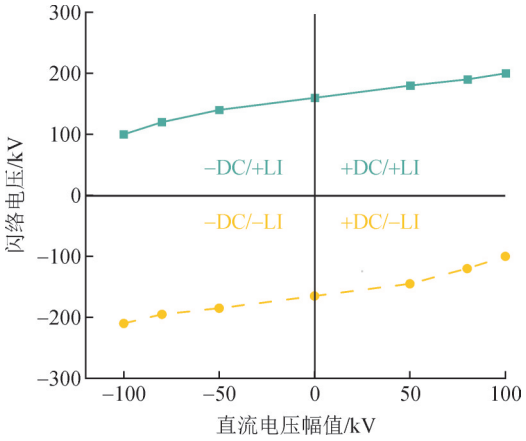


图14 不同直流电压下附着微粒绝缘子的闪络电压(p=0.3 MPa，l=4 mm)

Fig. 14 Flashover voltages of particle attached particulate insulators under different DC voltages(p=0.3 MPa，l=4 mm)

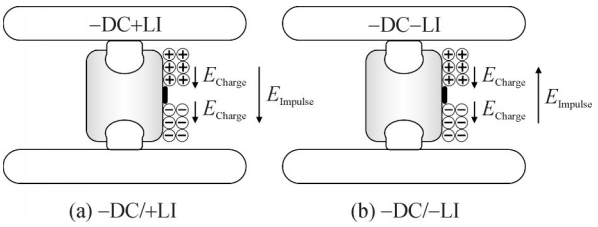


图15 表面电荷对电场的畸变作用示意图

Fig. 15 Schematic diagram of the distortion effect of surface charges on the electric field

叠加电压下直流电压幅值对绝缘子沿面流注起始电压的影响规律见图19，其中直流电压预加时间为60 min。实验发现当叠加极性相反时，随着直流电压幅值的升高，绝缘子沿面流注起始电压随之下降，且沿面流注起始电压降低的幅度更大，表明绝缘子表面电荷对沿面放电的过程起到了显著的增强作用。

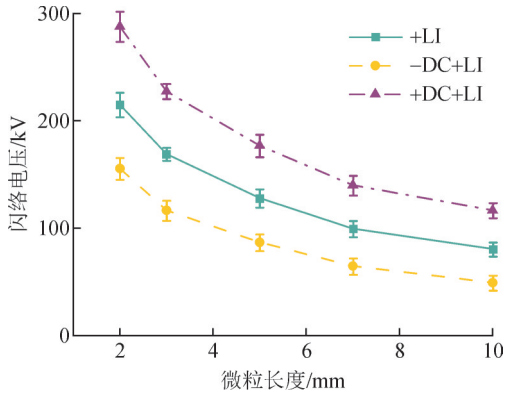


图16　附着微粒绝缘子闪络电压与微粒长度的关系
(p=0.3 MPa，U_{DC}=±90 kV)

Fig. 16　The relationship between flashover voltage of particle attached insulators and particle length
(p=0.3 MPa，U_{DC}=±90 kV)

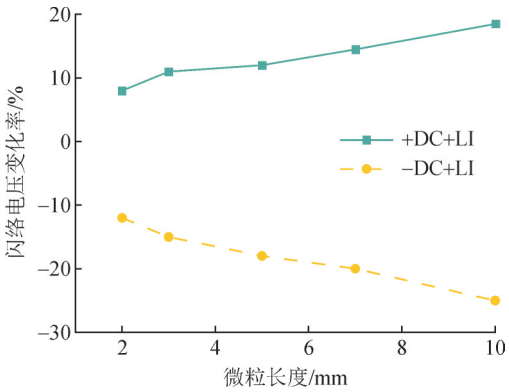


图17　附着微粒绝缘子闪络电压变化率与微粒长度的关系

Fig. 17　The relationship between the rate of change in flashover voltage of particle attached insulators and the length of particles

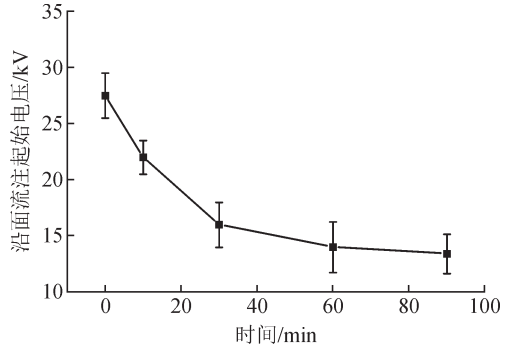


图18 绝缘子沿面流注起始电压与直流电压预加时间的关系
(−DC+LI，U_{DC}=−20 kV)

Fig. 18 The relationship between the initial voltage of insulator surface flow and the pre-application time of DC voltage(−DC+LI，U_{DC}=−20 kV)

3.3.2　表面电荷对绝缘子沿面先导发展过程的影响

在直流电压的影响下，附着金属微粒的绝缘子表面出现了一个由高密度的异极性电荷组成的“电荷对”[27-29]。该“电荷对”位于所设金属微粒的两端，其极性受直流电压极性的影响：在正极性直流电压

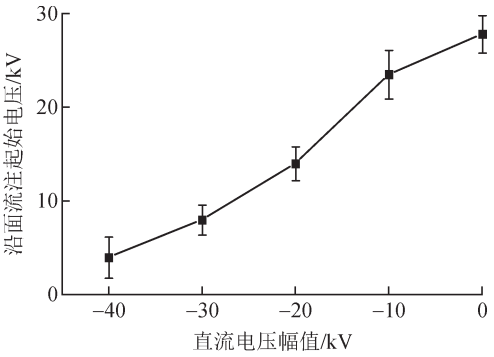


图19　绝缘子沿面流注起始电压与直流电压幅值的关系
(−DC+LI，p=0.1 MPa)

Fig. 19　The relationship between the initial voltage of insulator surface flow and the amplitude of DC voltage
(−DC+LI，p=0.1 MPa)

下，“电荷对”中靠近高压电极的为负电荷，距离较远的为正电荷；在负极性直流电压下，“电荷对”中靠近高压电极的为正电荷，距离较远的为负电荷。以+DC为例，此时绝缘子表面电荷分布情况见图20(a)。若叠加−LI，由于雷电压上升速度快，正离子不能完全进入金属微粒，形成流注电晕。流注头部在电场作用下分离出的正、负电荷导致流注前方，即丝状电荷区电场增强ΔE，有

$$\Delta E \propto \frac{Q_i}{R^2} \tag{1}$$

式(1)中：Q_i为流注头部形成的负空间电荷；R为流注通道半径。

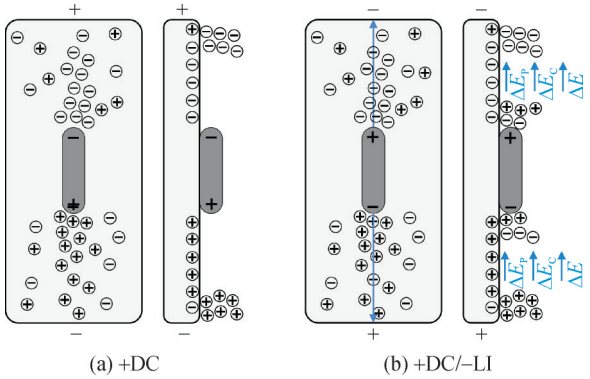


图20　直流与直流叠加雷电下绝缘子表面电荷分布情况

Fig. 20　Distribution of surface charges on insulators under DC and DC superimposed lightning impulse

同时，迁移区电荷形成的电场既会影响丝状电荷区内部空间电荷的迁移过程又会影响丝状电荷区末端的电场，进而影响放电的发展过程。金属微粒产生的电荷主要分布在微粒端部与对面电极的连线区域，则空间电荷在丝状电荷区末端产生的电场ΔE_C为

$$\Delta E_C = \frac{\int_{S_0} \sigma(s)\cdot \mathrm{d}s}{4\pi\varepsilon_0 (r-r_0)^2} \tag{2}$$

式(2)中：$\sigma(r)$为微粒与对面电极之间的连线上绝缘子表面电荷密度；r_0为丝状电荷区末端与微粒端部之间的距离；S_0为微粒与对面电极之间存在表面电荷区域的面积。

在叠加雷电时，除气隙侧的空间电荷影响流注发展外，绝缘子表面积聚的电荷也与空间电荷发生剧烈复合，发射大量光子，该过程对流注通道向先导转化的促进作用记为ΔE_P，有

$$\Delta E_P \propto \left| \int_S \sigma(s) \cdot \mathrm{d}s \right| \tag{3}$$

因此丝状电荷区末端电场E_f可记为

$$E_f = (E/p)_{cr} \cdot p + \Delta E + \Delta E_C + \Delta E_P \tag{4}$$

式(4)中：$(E/p)_{cr} \cdot p$为工作气压下的临界击穿场强；$\Delta E_P>0$恒成立，即绝缘子表面积聚的电荷与空间电荷发生的复合可促进流注向先导的转换。当表面电荷与雷电极性相反时，迁移区空间电荷形成的电场ΔE_C与ΔE方向相同，即$\Delta E_C>0$，则E_f增大，先驱起始条件更易满足，促进先导的形成，见图20(b)。

若表面电荷与雷电极性相同，迁移区电荷形成的电场ΔE_C与ΔE方向相反，即$\Delta E_C<0$，则E_f减小，先驱起始条件更难满足，抑制先导的形成，因此放电电压将会升高。

4 结论

文中研究了GIS带电操作工况中直流叠加冲击电压下绝缘子的沿面闪络特性，获得了附着微粒绝缘子的电荷积聚特性和叠加电压下附着微粒绝缘子的闪络特性，并在此基础上分析了表面电荷对绝缘子沿面放电过程的影响。具体结论如下：

1)当直流电压与冲击电压极性相同时，洁净绝缘子和附着微粒绝缘子在叠加条件下的闪络电压均高于单纯冲击电压下的闪络电压；而当叠加极性相反时，无论是洁净绝缘子还是附着金属微粒的绝缘子，其在叠加条件下的闪络电压均低于单纯冲击电压下的闪络电压。

2)在直流电压作用下，金属微粒吸附在绝缘子表面后显著加快了表面电荷积聚过程，同时在微粒端部表面电荷会急剧增加，而且微粒两端所积聚的电荷与微粒端部所对电极的极性相反。随着直流电压升高、微粒尺寸增大，微粒端部的电荷激增更加明显，并且显著影响绝缘子沿面闪络放电发展过程。

3)在极不均匀电场中，表面电荷会改变电极附近的电场分布，影响先驱形成过程中丝状电荷区内部空间电荷的迁移过程及丝状电荷区末端的电场，进而影响先导的形成和发展，因此当表面电荷与冲击电压极性相反时，表面电荷将促进先导的形成，进一步诱发绝缘子的沿面闪络放电。

参考文献：

[1] Yamagata Y, Rokunohe T, Endou F.Decay characteristics of residual DC voltage for 1 000 kV GIS[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials(Cat. No.03CH37417), 2003: 614-617.

[2] Okabe S, Ueta G, Utsumi T.Behavior of metallic particles in GIS under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2889-2897.

[3] 林 岑，邱 炜，周 波，等. 一起110 kV GIS设备自由金属颗粒放电缺陷及解体分析案例[J]. 高压电器，2024，60(4)：214-220.
Lin Cen, Qiu Wei, Zhou Bo, et al.Discharge defect of free metal particle of 110 kV GIS equipment and its disassembly analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 214-220.

[4] 韩 铺，潘 成，叶宇涵，等.温度梯度对直流盆式绝缘子表面电荷积聚特性的影响[J]. 电工技术学报，2026，41(9)：3157-3169.
Han Pu, Pan Cheng, Ye Yuhan, et al.Effect of temperature gradient on surface charge accumulation characteristics of DC basin insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(9): 3157-3169.

[5] 张 彬，张周胜，于瑞冬，等.直流均匀电场下金属微粒运动状态与识别[J]. 电力科学与技术学报，2025，40(1)：265-273.
Zhang Bin, Zhang Zhousheng, Yu Ruidong, et al. Motion state and identification of metal particles in a uniform DC electric field[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 265-273.

[6] 杜伯学，姚 航，梁虎成，等. 时变温差工况下直流GIL/GIS盆式绝缘子动态电场畸变抑制[J]. 电工技术学报，2024，39(9)：2851-2859.
Du Boxue, Yao Hang, Liang Hucheng, et al.Electric field relaxation of basin spacer under variable temperature gradient in DC-GIL/GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2851-2859.

[7] Zhang Lu, Zhang Qiaogen, Liu Shi, et al.Insulation characteristics of 1 100 kV GIS under very fast transient overvoltage and lightning impulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 1029-1036.

[8] 张 璐，张乔根，刘 石，等. 特快速瞬态过电压和雷电冲击作用下特高压GIS绝缘特性[J]. 高电压技术，2012，38(2)：335-341.
Zhang Lu, Zhang Qiaogen, Liu Shi, et al.Insulation characteristics of UHV GIS under VFTO and lightning impulse[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 335-341.

[9] 马径坦，张乔根，吴治诚，等. 直流叠加冲击电压对GIS中自由导电微粒检测的有效性[J]. 高电压技术，2019，45(3)：737-742.
Ma Jingtan, Zhang Qiaogen, Wu Zhicheng, et al. Effectiveness of detecting free conductive particle in GIS using impulse voltage with DC superimposition[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 737-742.

[10] 周黎明，邱毓昌. 直流叠加冲击电压下极不均匀场中SF_6气体的击穿特性[J]. 高压电器，1995，31(5)：13-17.

Zhou Liming, Qiu Yuchang.The breakdown characteristics of SF_6 gas in non-uniform field gap under combined DC and impulse voltages[J]. High Voltage Apparatus, 1995, 31(5): 13-17.

[11] 李　阳, 唐志国.恒压下GIS环氧树脂绝缘子沿面放电发展全过程状态特征研究与诊断[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 123-130.
Li Yang, Tang Zhiguo.Research and diagnosis of state characteristics in the whole process of creeping discharge development of GIS epoxy resin insulating parts under constant voltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 123-130.

[12] 吕岩婷, 蒋 菲, 张素慧, 等.一起GIS用盆式绝缘子原始缺陷导致开裂故障分析[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 180-185.
Lyu Yanting, Jiang Fei, Zhang Suhui, et al.Cracking fault caused by original defect of gis basin insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 180-185.

[13] 廖瑞金, 伍飞飞, 刘兴华, 等. 大气压直流正电晕放电暂态空间电荷分布仿真研究[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 362-372.
Liao Ruijin, Wu Feifei, Liu Xinghua, et al. Numerical simulation of transient space charge distribution of DC positive corona discharge under atmospheric pressure air[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(24): 362-372.

[14] 廖瑞金, 伍飞飞, 刘康淋, 等. 棒—板电极直流负电晕放电脉冲过程中的电子特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 319-329.
Liao Ruijin, Wu Feifei, Liu Kanglin, et al. Simulation of characteristics of electrons during a pulse cycle in bar-plate DC negative corona discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 319-329.

[15] Chen Junhong, Davidson J H.Electron density and energy distributions in the positive DC corona: interpretation for corona-enhanced chemical reactions[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2002, 22(2): 199-224.

[16] Qin Bailin, Pedrow P D.Particle-in-cell simulation of bipolar DC corona[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(6): 1104-1118.

[17] 唐　炬, 潘　成, 王邸博, 等. 高压直流绝缘材料表面电荷积聚研究进展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 10-21.
Tang Ju, Pan Cheng, Wang Dibo, et al.Development of studies about surface charge accumulation on insulating material under HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 10-21.

[18] 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): 4649-4662.
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.

[19] 张博雅, 张贵新. 直流GIL中固—气界面电荷特性研究综述Ⅱ: 电荷调控及抑制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5145-5158.
Zhang Boya, Zhang Guixin.Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, part Ⅱ: charge control and suppression strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5145-5158.

[20] 薛建议, 王　涵, 王艺博, 等. 直流电压下SF_6中环氧复合绝缘的表面电荷积聚与衰减特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3824-3832.
Xue Jianyi, Wang Han, Wang Yibo, et al. Accumulation and decay characteristics of surface charges on epoxy composite insulation in SF_6 under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3824-3832.

[21] 孙昊晨, 李晓昂, 李　杰, 等. 工频—雷电冲击叠加电压检测GIS金属尖刺缺陷有效性研究[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 795-802.
Sun Haochen, Li Xiaoang, Li Jie, et al.Research on the effectiveness of detecting metal spike defects in GIS under lightning impulse superimposed power frequency voltage[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 795-802.

[22] Li Xiaoang, Wu Menghan, Hu Xinwen, et al. Discharge characteristics of insulation defects in GIS under AC/LI superimposed voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 2017-2025.

[23] Sun Haochen, Li Xiaoang, Li Jie, et al.Platform phenomenon of insulation characteristics of SF_6 under AC superimposed impulse voltage[C]//2021 IEEE Electrical Insulation Conference, 2021: 703-706.

[24] Okabe S, Yuasa S, Kaneko S, et al.Evaluation of breakdown characteristics of gas insulated switchgears for non-standard lightning impulse waveforms under diverse conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5): 1415-1423.

[25] Okabe S, Ueta G, Utsumi T, et al.Insulation characteristics of GIS insulators under lightning impulse with DC voltage superimposed [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 1-9.

[26] 汪　飒, 肖登明, 陈庆国, 等.介质分界面电荷积聚过程分析[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(4): 347-380.
Wang Feng, Xiao Dengming, Chen Qingguo, et al. Analysis of charge accumulation at dielectric interface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(4): 347-380.

[27] Niemeyer L, Ullrich L, Wiegart N.The mechanism of leader breakdown in electronegative gases[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(2): 309-324.

[28] Niemeyer L, Pinnekamp F. Leader discharges in SF_6[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1983(16): 1031-1045.

[29] 陈庆国, 张乔根, 汪　飒, 等. SF_6气体中放电特征参数及机理[J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 7-9.
Chen Qingguo, Zhang Qiaogen, Wang Feng, et al. Discharge characteristic parameters and mechanism in SF_6 gas[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(6): 7-9.

何　成(1971—), 男, 教授级高工, 主要研究方向为电网设备故障分析及可靠性提升(通信作者)(E-mail: xjdkyhc@163.com)。