

重庆大学

硕士学位论文

风沙环境下绝缘沿面放电特性研究

姓名：马高权

申请学位级别：硕士

专业：电气工程

指导教师：司马文霞

20090522

摘 要

国内外学者均观测到沙尘过境地带的强电场和电火花及对无线电干扰信号的现象。这是由于气流运动中不同粒径的沙粒碰撞摩擦带上异性电荷。这些带电沙粒形成的空间电荷区对输电线路相间和导线对杆塔的空气间隙以及绝缘子表面放电特性产生影响。我国曾发生过由于扬沙及沙尘暴天气而导致电力系统的停电事故,国外也有因沙尘暴引起的外绝缘闪络报道。北方的沙尘天气向西南地区蔓延,使四川、重庆及三峡库区和与黔、湘相连的广大地区被尘雾和细雨笼罩,绝缘沿面有沙粒沉积、湿度大、风速小的情况。因此研究在沙尘天气下电力系统外绝缘电气特性,可为沙尘天气频发区的电力系统的外绝缘设计和安全运行提供理论依据。

本文在参阅相关文献和已有研究成果的基础上,以平板模型和真型绝缘子为研究对象,采用试验研究和理论分析相结合的方法,研究沙尘对平板模型和绝缘子对交、直流闪络特性的影响规律。

通过大量的试验研究发现:直流电压作用下,平板模型的沙闪络特性存在极性效应。平板模型沿面直流负极性闪络电压随风速的增大而升高,有沙尘时闪络电压比无沙尘时低;有沙尘时直流正极性闪络电压比无沙尘时高。平板表面沉积干沙粒时,随着沙粒沉积密度增加,交流和直流负极性闪络电压存在极小值,直流正极性沙闪络电压存在极大值。平板模型的直流沙闪络电压随沙粒含水量的增大而降低,沙粒湿润沿面闪络电压较干沙时的沙闪络电压降低 52.34%。荷电沙粒的电荷量在一定范围内变化时,沿面沙闪络电压没有显著的变化。沙粒粒径在 100-350 μm 之间变化时对平板模型的沿面沙闪络电压影响极小。

XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流闪络电压随风速的增大而升高。绝缘子上表面沉积干沙尘时,XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流沙闪络电压与绝缘子的干闪络电压相比略有下降;而沉积湿沙尘时,两者的沙闪络电压分别低于沉积干沙时闪络电压的 16.13%和 10.26%,

利用高速摄像机拍摄了平板模型和真型绝缘子在风沙环境中以及沙粒沉积时的闪络过程。直流电压下,干沙粒时在平板边缘处形成无沙区域,并向高压电极推进,且负极性下沙粒运动的速度快,形成的无沙区域大;平板表面上的湿沙粒在加压过程中极少运动,有干沙带出现。大风下绝缘子闪络出现飘弧现象;绝缘子表面沉积的干沙粒被电场力“吹”走,放电通道周围有带电沙粒运动,而沉积的湿沙粒不运动。

关键词: 风沙天气, 绝缘子, 平板模型, 绝缘沿面, 闪络特性

ABSTRACT

The domestic and foreign scholars have observed the spark discharge, the strong electric field and the phenomenon of the radio interference signal in the weather of sand dust. The friction between the different size sand dust particles in airflow movement can cause the sand dust particles to deposit the opposite charge. The space charge region formed by the sand dust charged particles have effect on the discharge characteristics of the insulators surface and the air gap between the transmission line phase to phase and the wire to the tower. The power system tripped-out accidents caused by blowing sand or sandstorm have happened in China. There are some reports on the flashover of external insulation caused by the sandstorm at abroad. The sandstorm has spread from the north to the southwest. The dust fog and drizzle is hanging over Sichuan, Chongqing, the three gorges region and the wider area linked to Guizhou and Hunan. There is sand dust particles deposition on the insulation surface when the high humidity and light wind surrounds the insulation surface. Therefore it can provide a theoretical basis for the external insulation of power system design and safe operation in frequent sandstorms area that the electrical characteristics of the external insulation of power system in sand dust weather is deeply researched.

Based on the analysis of the literature and the research results relating to this topic, a typical flat plate model and two real insulators are taken as the research object in this paper. The ac and dc flashover characteristics regularity of the flat plate model and insulators in wind sand environment is studied by the experimental and theoretical analysis methods.

Through a number of tests, it is found that there is the polarity effect of the dc sand flashover characteristics. Under the negative polarity voltage, the flashover voltage of the flat plate model increases with the increase of the wind speed in wind sand environment. The flashover voltage of the flat plate model in weather of wind dust is lower than in the weather of wind. Under AC voltage or negative polarity voltage, the flashover voltage reaches to its minimum value as the sand dust deposition density increases, while the positive flashover voltage always reaches to the maximum value. With the increase of the moisture content of the sand particles, the flashover voltage of the flat plate model decreases under DC voltage and the flashover voltage is 52.34% lower than the flashover voltage of the flat plate model surface depositing the dry sand particles. When the

charge-to-mass ratio of sand particles changes in some degree, there is no significant influence of the charge-to-mass ratio on the flashover voltage of the flat plate model. When the diameter of the sand particles changes from 100 to 350 micron, the flashover voltage of the flat plate model is unrelated with the diameter of the sand particles.

Under the AC voltage, the flashover voltage of the XP-70 porcelain insulator and the FXBW4-10/70 composite insulator increases with the increase of the wind speed in wind sand environment. The flashover voltage of XP-70 porcelain insulator and the FXBW4-10/70 composite insulator with the upper surface depositing the dry sand particles is little lower than these insulators surface clean. The flashover voltage of XP-70 porcelain insulator with the upper surface depositing the moistened sand particles is 16.13% lower than this insulator upper surface depositing the dry sand particles, and the flashover voltage of FXBW4-10/70 composite insulator with the upper surface depositing the moistened sand particles is 10.26% lower than this insulator upper surface depositing the dry sand particles.

Using the high speed camera, the process of the flashover of the flat plate model and two real insulators in wind sand environment & sand particles deposition on surface is photographed. Under DC voltage, the band without sand occurs at the edge of the flat plate, then it moves forward the high-voltage electrode. The band without sand under the negative polarity voltage is bigger than that under the positive polarity voltage. There is a dry sand band on the flat plate with the moistened sand particles deposition and the sand particles hardly move under DC voltage. Under AC voltage, the arc is blown from the insulator surface by the strong wind. The charged sand particles on the insulators upper surface are blown away by the electric field strength and the discharge channel is surrounded by the moving sand particles. But the sand particles movement is not found when the sand particles deposition on the insulators is moistened.

Key words: weather of wind sand; insulator; flat plate model; insulation surface, flashover characteristics.

学位论文独创性声明

本人声明所呈交的硕士学位论文《风沙环境下绝缘沿面放电特性研究》是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：马高权

签字日期：2009.5.25

导师签名：

马高权

签字日期：2009.5.25

学位论文使用授权书

本人完全了解重庆大学有关保留、使用学位论文的规定。本人完全同意《中国博士学位论文全文数据库、中国优秀硕士学位论文全文数据库出版章程》（以下简称“章程”），愿意将本人的硕士学位论文《风沙环境下绝缘沿面放电特性研究》提交中国学术期刊（光盘版）电子杂志社（CNKI）在《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》以及《重庆大学博硕士学位论文全文数据库》中全文发表。《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版，并同意编入CNKI《中国知识资源总库》，在《中国博硕士学位论文评价数据库》中使用和在互联网上传播，同意按“章程”规定享受相关权益和承担相应义务。本人授权重庆大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公开论文的全部或部分内容。

作者签名：马高权

导师签名：马高权
2009 年 5 月 25 日

备注：审核通过的涉密论文不得签署“授权书”，须填写以下内容：

该论文属于涉密论文，其密级是_____，涉密期限至_____年____月____日。

说明：本声明及授权书必须装订在提交的学位论文最后一页。

1 绪论

1.1 课题研究的背景和意义

沙尘暴既是一种气象灾害和突发性的地质灾害，也是环境恶化的征兆。沙尘暴发生时，土地被迅速风蚀，沙质荒漠化。20 世纪 90 年代起，我国北方进入沙尘暴活动相对活跃时期，并多次出现影响长江流域的大沙尘暴^[1]。2007 年 4 月 2 日，受西北偏北气流引导，北方沙尘南下空袭“长三角”，使得上海遭遇了 7 年以来最为严重的浮沉天气，“申城”笼罩着一片灰黄色的“尘幕”。北方的沙尘同时西南部蔓延，使重庆及三峡库区与川、黔、湘相连的广大地区被“尘雾”和细雨笼罩，能见度不足 400m，白昼似黄昏。同时，四川阿坝、甘孜和西藏等西部高海拔地区草原退化，每年的沙尘暴已逼近成都，快速向成渝方向蔓延。随着我国“西电东送”战略的实施，西部地区丰富水电资源的开发，西电东送中南、中西通道都要经过高海拔和潮湿地区，北方及西部的沙尘暴蔓延到这些地区形成的沙尘湿雾到底对高压输电空气间隙和绝缘子串的放电特性有何影响，是西电东送和西部电网发展极为关注的课题。

我国已建成的 750kV 和 1000kV 超特高压线路通过沙尘天气频发的北方干旱地区，在联网的情况下，系统的这些主联络线一旦发生故障，将造成大面积的停电事故，其维修费用和造成的经济损失都是无法估量的，因此电网的安全运行显得格外重要。

在沙尘暴活动过程中，由于气流运动中沙尘颗粒之间以及沙尘颗粒与地床面之间的电荷交换使沙粒带上了电荷，造成空气的介电常数增大、电阻率减小、形成强烈的负极性电场，从而改变输电线路的电场分布，影响输电线路的相间及相对铁塔空气间隙和绝缘子放电特性，危害电能的输送，进而影响到电力系统的可靠运行。2006 年 3 月 28 日，在郑州刮起沙尘暴，当天郑州共发生电力故障 30 多起，由于沙尘暴造成两条高压线跳闸，出现大面积停电现象。2006 年 04 月 10 日，内蒙古地区发生了强沙尘天气，同一天内蒙古地区电网发生了 15 条线路闪络事故，分析认为大气中的浮尘是导致空气间隙失效的主因。2007 年 4 月 9 日至 12 日，新疆西北部至东南部地区出现沙尘暴和雨雪天气，4 月 9 日、10 日，在沙尘暴的袭击下，吐鲁番地区 220kV 红托线、托楼线多次跳闸，220kV（吐鲁番地区的）楼兰至哈密电网线跳闸停电。

2009 年 4 月 23 日白天至夜间，中国北方出现今年以来第 6 次沙尘天气，这也是今年出现的范围最大的沙尘天气。新疆、内蒙古、甘肃、宁夏、陕西、山西等地出现大范围扬沙或浮尘天气，其中甘肃河西及陇中地区、宁夏、内蒙古中西部出现

区域性沙尘暴，内蒙古和甘肃的局部地区出现了强沙尘暴。24 日，四川 30 个县出现浮尘天气；25 日浮尘抵达重庆大足，之后扩散至垫江、铜梁、潼南；自 25 日起台湾各地遭受严重的沙尘天气侵袭，台北一监测站 25 日所监测到的悬浮颗粒浓度一度高达每立方米 1088 微克，创下台湾气象观测史上的最高纪录。

因此深入而系统的研究沙尘环境对空气间隙及绝缘子串放电特性的影响，可为沙尘天气频发区的电力系统的外绝缘设计和安全运行提供理论依据，既具有重要的学术价值又对电力系统安全运行具有十分重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 风沙运动研究^[2-6]

从 19 世纪末人们就开始有目的地认真考察研究风沙运动与沙漠化；20 世纪 30 年代开始对风沙流进行系统研究，英国工程师和物理学家拜格诺首次把风沙和荒漠沙丘的研究从定性描述改变为定量的动力过程研究，于 1941 年出版的巨著《风沙物理和荒漠沙丘物理学》。在该书中拜格诺将风沙运动分为跃移、蠕移与悬移 3 种相互关联的运动形式。其中跃移是指沙尘颗粒在近地层做跳跃式的运动；蠕移是指颗粒在地表的滚动和滑动；而悬移是指沙尘颗粒悬浮于空气中保持一段时间而不与地面接触的运动形式。当风力很强，沙尘颗粒被输送到几百甚至几千公里时沙尘颗粒的悬移运动即为沙尘暴。

20 世纪 60-80 年代由于航天领域对火星、金星等行星表面的地貌特征及其演化过程的兴趣，使得人们进行了大量的风洞实验和数值计算，以探讨不同大气环境下颗粒的起动和跃移过程及其与风成地貌的关系，各国学者竞相利用高速摄影技术，结合理论分析与计算对单一颗粒的运动特征进行了深入细致的研究，但却没有能够将这些微观研究成果应用于定量描述风沙流整体行为的论著出现。美国学者 Anderson 于 1988 年发表了题为“simulation of eolian saltation”的论文，文中从单颗沙粒起跳开始，在空中吸收风能后撞击沙面，由击溅函数得到反弹沙粒和被溅起沙粒数及其速度，通过考虑沙粒对风场的反作用力，模拟了风沙跃移运动从起始阶段至风沙流达到自平衡状态的整个过程，这些结果与实验结果能够在定性上相吻合，但在定量上相差较大。

我国由于风洞建成较晚（1963 年正式投入使用），风沙流研究工作多在野外。从本世纪初开始，兰州大学有黄宁和郑晓静等组成的风沙环境力学研究小组，从实验测试，理论预测，计算机模拟方面对风沙运动进行研究，取得了较大的进展。

1.2.2 风沙电研究

研究表明，飞沙具有起电的效应（Lathem^[7]），风沙过境常观察到高压打火，输电网络跳闸，通讯干扰等，这种风沙电现象早在 20 世纪 40 年代就已引起 Gill^[8]的

注意。此后 Latham 注意到风沙起电和飘雪起电有相似性,把沙粒带电归结为由于非对称摩擦产生的温度梯度造成电荷分离,最早提出非对称摩擦起电概念^[7]:在吹沙过程中,不同尺度沙粒发生相对运动而碰撞摩擦,接触表面形成温度梯度,小粒子由于有较小相对接触面故温度较高,同理,大粒子温度较低;如果沙粒携带的电荷是自由离子,离子浓度随温度上升而增加,由于沙粒表面常附有水分子^[9],而附着于沙粒表面的水分子会游离出正氢离子(H^+)和负氢氧根离子(OH^-),正离子(H^+)要比负离子(OH^-)有更大的迁移率,故(H^+)聚集于大粒子上而带正电荷,小粒子留下(OH^-)带负电荷,从而形成电荷分离。Greeley 通过风洞试验^[10],给出的临界粒径为 $60\mu m$ 。不过后来的研究结果表明^[11]:对不同地区的沙样,其临界粒径有所不同。如国内兰州大学风沙环境力学研究组通过风洞实验测量,得到当沙粒粒径小于 $250\mu m$ 时,运动沙粒带负电荷;而当直径大于 $500\mu m$ 时带正电荷。

在对沙粒带电现象进行观测和实验研究的同时,研究人员也注意到了作为沙粒带电的主要外在反映——风沙电场的存在。20 世纪 90 年代以来, Schmidt^[12]采用大气电场仪对野外风沙电场进行了定量测定。结果证实:风沙电场方向垂直地面向上,与晴天电场方向相反;在离地表面 $0.017m$ 处的电场强度为 $166kV/m$,且风沙电场的强度随离地高度的增加单调减小。在实验测量结果的基础上, Schmidt 给出了拟合风沙电场的解析表达式,如(1.1)式所示:

$$E = 51y^{-0.6} \quad (1.1)$$

式中 E 是风沙电场强度,单位 kV/m , y 是测量点的高度,单位 cm 。

兰州大学风沙环境力学研究组^{[2-6], [13-15]}对风沙流中沙粒带电的荷质比、风沙电场强度以及输沙率和风速廓线等宏观物理量开展了风洞实验测量。结果发现:沙粒的荷质比随沙粒粒径和风速的增大而减小,随高度的上升而增加;风沙流中的电场主要是由运动的带电沙粒形成的,其电场强度方向垂直地面向上,与晴天大气电场的方向相反;在相同风速下,由小粒径沙粒形成的风沙流,其电场强度大于大粒径沙粒情形的电场强度;在相同粒径范围内,电场强度随风洞轴线来流风速和高度的增大而上升;混合沙的风沙电场比“均匀沙”的电场大得多,在 $20 m/s$ 的风速时,前者的最大值高出后者 20 倍以上。

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的屈建军等^[16-20]对沙尘暴起电进行了实验模拟,实验在室内木结构的风沙环境风洞进行。对沙尘暴中蠕移跃移扬沙、悬移扬沙和加水悬移扬沙的电场状况进行了模拟实验,得到以下结论:

①沙物质运动,特别是沙尘暴过程伴有强烈的电场。在蠕移跃移扬沙、悬移扬沙和加水悬移扬沙 3 种实验方案中,电场大多表现为负极性,最大值达 $-74 kV/m$ 。

②电场强度随沙物质运动状态、风速、物质粒径、含水量、气流稳定度及高度而变化。在沙物质 3 种运动方式中,悬移运动产生的电场较蠕移跃移的在相同条

件下, 电场强度随风速增大而增大, 随沙物质粒径增大而减小。含水量对电场的影响有一定限度, 在加水悬移实验中, 当含水量在 0.5%-1.0%之间时, 电场强度显著增加; 但是含水量达到 2%时, 电场强度又开始迅速减小。每次实验中, 电场强度都是扩散段都大于实验段, 并随高度增加而减少。

③沙尘暴电场的形成主要是由于沙粒之间及沙粒与床面之间的碰撞摩擦引起沙粒表面电荷的转移与分离形成的。在“不对称摩擦起电”过程中, 摩擦生热使沙粒表面的正负离子(主要是 H^+ 与 OH^-)向不同方向迁移。一般, 大小粒子的碰撞, 会使小粒子带负电荷, 大粒子带正电荷; 沙粒与床面的碰撞会使沙粒带负电荷, 而床面带正电荷。如果床面接地, 则观测到的电场多为负极性。这种电场形成机制也较为合理的解释了实验中观测到的电场强度随沙物质运动状态、风速、物质粒径、含水量、气流稳定度及高度的变化。

④电荷量计算得到负电荷最大荷质比为 $304\mu C/kg$, 正电荷最大荷质比为 $158\mu C/kg$, 说明尽管大部分沙粒带负电荷, 但是在每次实验开始阶段, 距离床面较近处也能测量到正电荷。这是因为, 在开始吹沙阶段, 除了沙粒和地面摩擦起电外, 沙粒之间的摩擦也较重要, 非对称摩擦使大粒子带正电荷, 小粒子带负电荷。当小粒子被风吹走, 留下大粒子, 使接近铺沙床面处空间电场为正极性。

⑤电场静电力计算结果表明, 在电场很强的情况下, 电场力可以与沙粒重力相当, 以致在分析沙粒受力过程中不能忽略。但是, 在大多数情况下, 强度较小的风沙运动产生的电场力可以忽略。

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室言穆弘等^[21]利用风沙环境风洞, 实验模拟沙尘暴天气条件下, 沙尘对导线电位的影响, 总结了沙尘暴现象的成因及其影响因素。在模拟实验中发现以下规律: 导线电位随着风速及输沙量的增大, 呈指数规律递增的态势; 随沙粒粒径的增大, 电位差极值出现高度具有上扬的趋势; 随粒径增大, 电位差反而小, 沙尘暴中导线电位高于扬沙天气; 伴雨状况下的沙尘暴较之非伴雨下的沙尘暴具有较强的电位差; 导线材料相同时, 直径愈细, 电位差愈大, 导线直径基本相同时, 铝线较之铜线具有较强的电位差并当两端加压 2-4kV 时出现尘端放电现象。

西安交通大学人居环境与建筑工程学院教授顾兆林等^[22]人, 针对沙尘暴、尘卷风为代表的风沙运动研究需要, 基于水的电离理论和颗粒动力学理论, 从沙粒碰撞摩擦行为出发, 研究粒径不同的颗粒系统静电机理。颗粒表面覆盖有水分子薄层, 颗粒间的碰撞导致能量转移和颗粒温度变化; 水电离生成 H_3O^+ 和 OH^- 离子, 当两个温度不同或水分子薄层正(负)离子浓度不同的颗粒接触时, H_3O^+ 比 OH^- 以更快地速度从浓度高的地方向浓度低的地方迁移。在动力学的模拟计算中采用 0.1mm、0.2mm 和 0.4mm 三种粒径的沙粒表示沙粒直径分布特性, 并根据沙源地采样分析,

沙粒的数量选取 750 粒、100 粒和 50 粒。模拟结果表明：在 3 种大小的颗粒系统中，不同大小的颗粒平均带电量随时间的变化规律为：大颗粒平均带电量为正、小颗粒平均带电量为负。这一结果解释了风沙电场的产生机制，同时定性解释了颗粒摩擦产生静电需要一定的湿度环境。

1.2.3 风沙对空气间隙击穿特性的影响^[23-28]

在沙特，M. I. Qureshi 和 A. Al. Arainy 等学者在雷电冲击电压和操作冲击电压作用下对棒-棒间隙和棒-板间隙的放电特性进行实验研究。研究表明，沙尘对空气间隙的击穿电压有影响，其影响程度与间隙距离、电极形状、沙粒粒径和间隙上所施加电压有关。

①棒-棒间隙

在雷电、操作冲击电压作用下，有沙尘时间隙 50% 的击穿电压与间隙距离、电极形状有关，如图 1.1、1.2、1.3、1.4 所示。

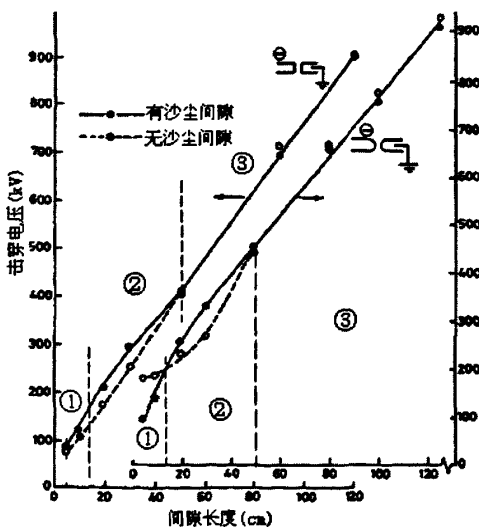


图 1.1 负极性雷电冲击电压作用下间隙 50% 击穿电压与间隙距离的关系

Fig. 1.1 50% breakdown voltage as a function of gap length under negative lightning impulse

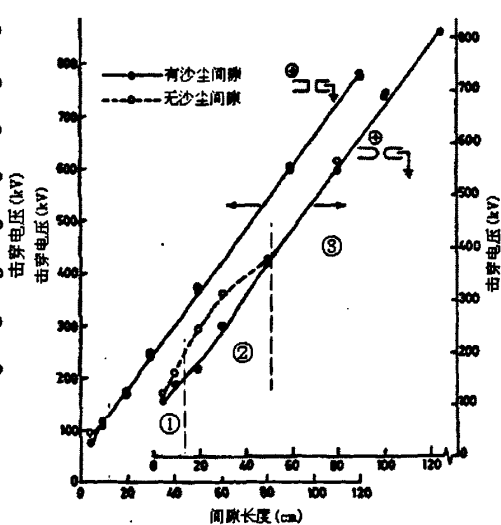


图 1.2 正极性雷电冲击电压作用下间隙 50% 击穿电压与间隙距离的关系

Fig. 1.2 50% breakdown voltage as a function of gap length under positive lightning impulse

从图 1.1、1.2、1.3、1.4 可以看出，沙尘对棒-棒间隙 50% 击穿电压影响分为三个区域来考虑。

在负极性冲击电压作用下，在短间隙区域，沙尘使间隙 50% 击穿电压减小以及使间隙击穿电压分散性变小，在间隙击穿时间方面，沙尘时间隙击穿时间分散性变

小；在中等长度间隙区域，沙尘使间隙 50% 击穿电压增加以及使间隙击穿电压分散性变大，在间隙击穿时间方面，沙尘时间隙平均击穿时间变长；在长间隙区域，沙尘对间隙击穿特性无明显影响。

在正极性冲击电压作用下，在短间隙区间、中等长度间隙区间，沙尘使间隙 50% 击穿电压减小；在长间隙区间，沙尘对间隙 50% 的击穿电压没有影响。

得出以下结论：

- 1) 在中等长度间隙区间，有沙尘时正极性冲击 50% 击穿电压比负极性冲击 50% 击穿电压要小；
- 2) 有沙尘时，在相同条件下，雷电冲击 50% 击穿电压比操作冲击 50% 击穿电压要高。
- 3) 有沙尘时，电极形状和电压类型对棒间隙的击穿特性均有影响。
- 4) 沙粒半径越小，对间隙击穿电压的影响越大。而沙粒的浓度对间隙击穿电压影响很小。

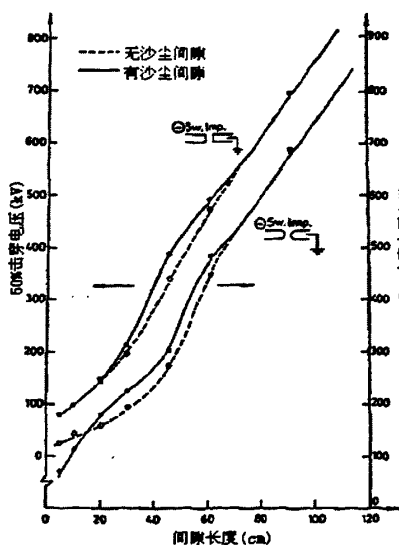


图 1.3 负极性操作冲击电压作用下间隙 50% 击穿电压与间隙距离的关系

Fig. 1.3 50% breakdown voltage as a function of gap length under negative switching impulse

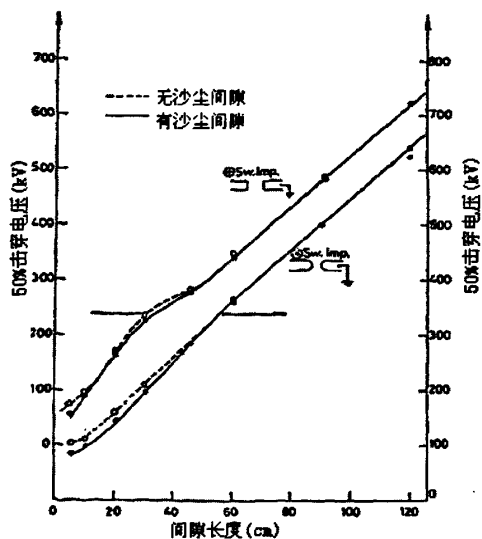


图 1.4 正极性操作冲击电压作用下间隙 50% 击穿电压与间隙距离的关系

Fig. 1.4 50% breakdown voltage as a function of gap length under positive switching impulse

②棒-板间隙

在雷电、操作冲击电压作用下，就沙尘对空气间隙击穿电压影响的研究得出以下结论。

1) 在正极性雷电、操作冲击电压作用下, 沙尘对空气间隙击穿电压无明显影响。

2) 在负极性雷电、操作冲击电压作用下, 间隙区域可分为三个区域, 如图 1.5 所示, 沙尘使间隙 50%击穿电压降低的区域(减小区域)、沙尘使间隙 50%击穿电压升高的区域(增大区域)、沙尘对间隙 50%击穿电压无明显影响(无影响区域)。

在短间隙区域(即减小区域), 沙尘使间隙 50%的击穿电压降低, 使间隙 50%的击穿电压的分散性变小。在间隙击穿时间方面, 沙尘使间隙平均击穿时间变短以及使击穿时间的分散性变小。

在中等长度间隙区域(即增大区域), 沙尘使间隙 50%的击穿电压升高, 而间隙 50%的击穿电压的分散性没有明显变化。在间隙击穿时间方面, 沙尘使间隙平均击穿时间变长以及使击穿时间的分散性变大。

在长间隙区域(无影响区域), 沙尘对间隙的击穿特性无明显影响。

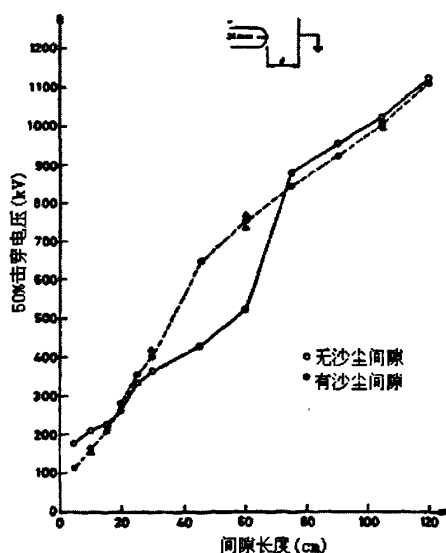


图 1.5 在负极性雷电冲击电压作用下沙尘对击穿电压的影响与间隙距离关系

Fig.1.5 50% breakdown voltage as a function of gap Length under positive lightning impulse

在负极性冲击电压作用下, 得出以下结论:

1) 在短间隙区域, 沙尘使间隙 50%的击穿电压降低; 在中等长度间隙区域, 沙尘使间隙 50%的击穿电压升高; 在长间隙区域, 沙尘对间隙的击穿特性无明显影响。

2) 有沙尘时, 电压的类型和电极形状对棒-板间隙击穿特性均有影响。

3) 沙粒半径越小, 对间隙击穿电压的影响越大。而沙粒的浓度对间隙击穿电

压无影响。

重庆大学也对沙尘环境下空气间隙交流击穿特性进行研究^[29]，试验中，风速变化范围 0-12m/s，棒板及棒棒间隙距离 3-5cm，沙粒荷质比变化范围 $0-35 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ ，得出的结论有：有沙尘时，间隙交流击穿电压比无沙尘高，其差值随风速的增大而升高；在一定电荷量变化范围内，间隙交流击穿电压与沙尘的电荷量无关；有沙尘时，间隙的交流击穿电压与间隙之间的沙尘无关，与电极表面的沙尘有关。并且通过 COMSOL Multiphysics 电场分析软件仿真得出当沙尘荷质比为 $1 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ ，沙尘浓度为 10g/m^3 时，此时带电沙尘在空间产生的电场仅仅为 $2 \times 10^{-5} \text{kV/cm}$ ，对原棒板电极间的电场分布几乎没有影响。

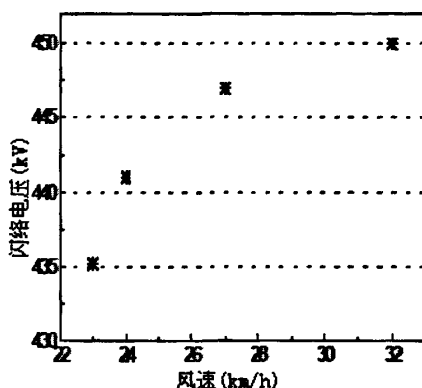


图 1.6 绝缘子闪络电压与风速大小的关系

Fig. 1.6 Effect of wind speed on the flashover voltage of string insulators

根据国内外的学者对沙尘环境对空气间隙击穿特性的研究成果，目前沙尘环境对空气间隙击穿特性的影响主要有以下结论：

1) 有沙尘时同无沙尘时相比，负极性雷电冲击电压下，短间隙及长间隙时，其击穿电压减小，中等长度间隙 ($15\text{cm} < d < 50\text{cm}$) 时，其击穿电压增大；在正极性雷电冲击电压下，棒—棒间隙击穿电压在各种间隙情况下，均有不同程度的减小，棒—板间隙的击穿电压无明显变化。

2) 有沙尘时同无沙尘时相比，正极性操作冲击电压下间隙距离大于 50cm，负极性操作冲击电压下间隙距离大于 70cm，沙尘对间隙击穿电压值没有影响。间隙距离小于 50cm 时，正极性操作冲击电压下其击穿电压减小，间隙距离小于 70cm 时负极性操作冲击电压下其击穿电压增大。

3) 有沙尘时，间隙的交流击穿电压与间隙之间的沙尘无关，与电极表面的沙尘有关。

1.2.4 风沙对绝缘沿面放电特性的影响^[30-36]

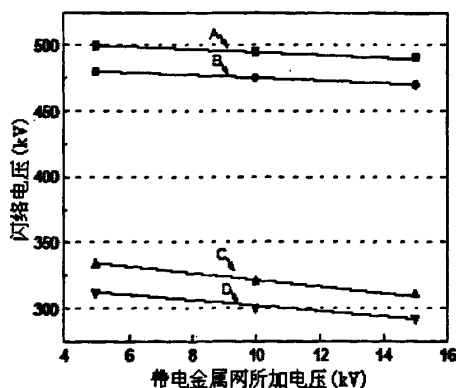
埃及学者 M.Awad 等进行了沙尘对绝缘子闪络特性影响的研究，并做了一些模拟试验。

在试验中，沙粒通过与带电金属网碰撞后带上一定的电荷来模拟实际沙尘暴中沙粒因各种原因所带电荷。通过改变风速大小、金属网的带电电压的极性及大小等因素来考察沙尘对绝缘子闪络特性的影响。研究表明：

① 沙尘使绝缘子闪络电压明显降低；

② 随风速的增大，绝缘子闪络电压增加，当风速达到一定值时闪络电压变化趋于饱和，如图 1.6 所示；

③ 绝缘子的闪络电压随着金属网所带电压即沙粒带电量的增大而减小，如图 1.7 所示；当金属网带直流电压时，沙尘环境下绝缘子闪络电压随沙粒带电量减小的程度比金属网带交流电压时要大。



A 绝缘子雷电冲击闪络电压（金属网上所施加的为交流电压）

B 绝缘子雷电冲击闪络电压（金属网上所施加的为直流电压）

C 绝缘子交流闪络电压（金属网上所施加的为交流电压）

D 绝缘子交流闪络电压（金属网上所施加的为直流电压）

图 1.7 金属网带不同极性电压及大小时绝缘子闪络电压

Fig. 1.7 Flashover voltage of the string under the effect of charged grid of a.c and d.c voltages

重庆大学高压试验室分析了沙尘对平板模型放电特性的影响^[29]，图 1.8 为在不同爬电距离下，平板模型闪络电压与沙粒沉积密度的关系。

从图中可以看出，随着沉积量的增加，平板模型的闪络电压随沙粒沉积密度的变化存在着极小值（当沉积密度为 $12.5\text{mg}/\text{cm}^2$ ），当密度小于等于 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 时，沿面闪络电压比无沙尘时低；当沉积密度大于 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 时，沿面闪络电压比无沙尘

时高，其值随着沉积密度增大而升高。

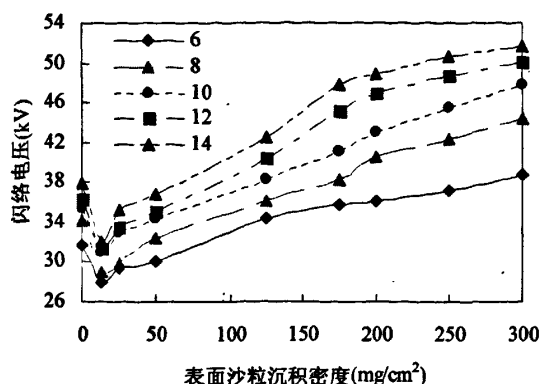


图 1.8 平板模型闪络电压与沙粒沉积量的关系

Fig.1.8 Relationship between flashover voltage of flat plate model and deposition density of sand dust

1.2.5 人工模拟沙尘气候环境下线路绝缘子积污特性研究

对高压电网塔杆绝缘子而言，沙尘天气是极端恶劣的工作环境。沙尘天气一方面会带来绝缘子周围介质环境的改变，使得环境介质由原来的空气介质变为沙尘和空气的混合介质（气-固两相体）。另一方面，沙尘暴环境下绝缘子表面的积污速率也会发生明显的变化，积污不仅会畸变原有的电场分布，同时又为将来污秽闪络的发生埋下了隐患。西安交通大学的贺博等^[37]在人工沙尘暴环境模拟实验室进行了沙尘气候环境下线路绝缘子积污特性研究。选取沙尘试样为颗粒度小于 $100\mu\text{m}$ 的研磨细沙、颗粒度小于 $50\mu\text{m}$ 的研磨干燥硅藻土和化学分析用粉剂 NaCl 按 6:6:1 质量比配制而成。试验过程中单位体积流体含细沙量、硅藻土量、NaCl 量分别为 56.6mg/L、56.6mg/L、9.4mg/L。得出：

- ①在相同实验条件下，复合绝缘子和瓷、玻璃绝缘子相比，积污更加严重。
- ②复合绝缘子上伞面的积污明显大于下伞面。
- ③复合绝缘子芯棒背风侧积污最大，其次是迎风侧，后侧面(侧面靠近背风侧)较小，前侧面最小，几乎没有污秽沉积，伞裙的上下表面也具有类似的积污分布趋势。
- ④瓷和玻璃绝缘子伞面积污分布受伞裙结构影响明显，钟罩型下伞面迎风侧棱槽内积污最多，而双伞和三伞型下伞面背风侧积污最多，伞裙上表面积污分布趋势接近复合绝缘子上表面。
- ⑤相同条件下，钟罩型绝缘子积污最多，三伞型居中，双伞型积污量最少。

⑥就相同伞裙表面污层分布不均匀度而言,瓷、玻璃绝缘子的不均匀度明显大于复合绝缘子。

⑦不同风速和时长条件下各伞裙表面积污有明显差异。流速影响着整个绝缘子串的平均盐密和灰密,在流速为 13m/s 的时候,盐密和灰密均值出现了峰值点,此后随着流速的继续增加,盐密、灰密开始出现下降趋势,灰密的下降趋势比盐密更明显。

综上所述,目前对沙尘暴的研究主要在沙尘暴的形成及沙尘暴形成后对电力系统外绝缘电气特性的影响这两方面。在国内,对于沙尘环境对输电线路外绝缘电气特性影响的研究比较少,主要从野外实地观测和室内实验模拟两个方面进行风沙起电^{[16]-[20]}及沙尘输送模式^{[21]、[22]}等方面进行研究。虽然国外对沙尘环境下空气间隙和绝缘子放电特性进行了一定的研究,仍存在问题尚待解决。其中在沙尘对空气间隙影响研究方面,在操作、雷电冲击电压作用下,没有考虑风速、空气湿度、沙粒含水量这些变化因素对棒—棒间隙和棒—板间隙击穿特性影响;并且在直流、交流电压作用下,没有进行沙尘对棒—棒和棒—板间隙影响的实验研究。在沙尘对绝缘子影响研究方面,在沙尘对绝缘子闪络特性影响的实验研究中,没有考虑沙粒粒径、沙粒的浓度、空气湿度对绝缘子闪络特性影响。在交流、雷电电压作用下,进行沙尘对绝缘子闪络特性的影响的实验研究,但研究不够全面。而且没有研究在直流等其他类型电压作用下,沙尘对绝缘子闪络特性的影响。以往研究只是对绝缘沿面闪络特性进行研究,机理分析和风沙下的绝缘沿面模型还没有见到。

1.3 本文的研究内容

综上所述,虽然沙尘环境下的空气间隙和绝缘子放电特性有了一定的研究结果,但远远不能满足工程需要,理论分析深度不够。如在空气间隙方面,未见有关沙尘对空气间隙交流、直流放电特性的影响文献。在绝缘子方面,文[34]中比较粗略考虑沙尘对绝缘子闪络特性的影响,没有对绝缘子闪络特性进行深入分析。

因此,本文以 XP-70 瓷绝缘子、FXBW4-10/70 复合绝缘子和平板模型为研究对象,进行交流和直流电压下沙尘环境中绝缘子及平板模型沿面放电特性的试验和理论分析,主要工作如下:

①研究风沙环境中的风速、沙尘的电荷量以及沙尘的沉积对绝缘子交流闪络电压的影响;并结合高速摄像机拍摄得到的放电照片分析沙粒沉积对绝缘子闪络特性的影响。

②研究风沙环境中的风速、沙粒粒径、沙尘的电荷量以及沙尘的沉积对平板模型闪络电压的影响;并结合高速摄像机拍摄得到的放电照片分析沙粒沉积时沿面过程。

1.4 本章小结

本章提出了论文研究的目的和意义，并对国内外沙尘环境对输电线路外绝缘电气特性影响的研究进行了系统总结，针对目前国内外研究的状况提出了本论文的研究内容及技术路线。

2 试验装置及方法

根据论文研究的内容和目标,本章对论文所进行的风沙环境下平板模型放电特性影响研究的主要试验的原理、设备和方法进行简单介绍。

2.1 试验装置

沙尘天气一般分为浮尘、扬沙和沙尘暴三种天气情况^[38, 39],并以风速和能见度作为区分三者的标准。考虑到实验室的条件,自建了模拟扬沙天气的试验装置,如图 2.1 所示。为研究沙尘对外绝缘放电特性的影响,本文在实验室自建的模拟扬沙和沙尘暴天气的试验装置进行了一系列的试验研究。通过改变风速和沙尘荷电量等参数模拟实际可能出现的沙尘天气,进行不同风沙状况下,多种因素对平板沿面放电模型和绝缘子的交、直流放电特性和放电过程影响的分析。

本文对沙尘暴的模拟分为 2 种:一是研究北方的沙尘暴天气下绝缘的沿面闪络特性,即风沙两者对绝缘的沿面闪络特性的影响,试验装置如图 2.1 所示;二是研究沙尘在绝缘表面的沉积对绝缘的沿面闪络特性影响,这是由于随着沙尘暴向西南部蔓延,四川、重庆及三峡库区和与川、黔、湘相连的广大地区在沙尘季节被尘雾和细雨笼罩,绝缘表面有沙粒沉积、湿度大、风速小的情况,针对此种情况去掉图 2.1 中的风沙装置,而只在平板模型中加上均匀的沙尘进行试验。

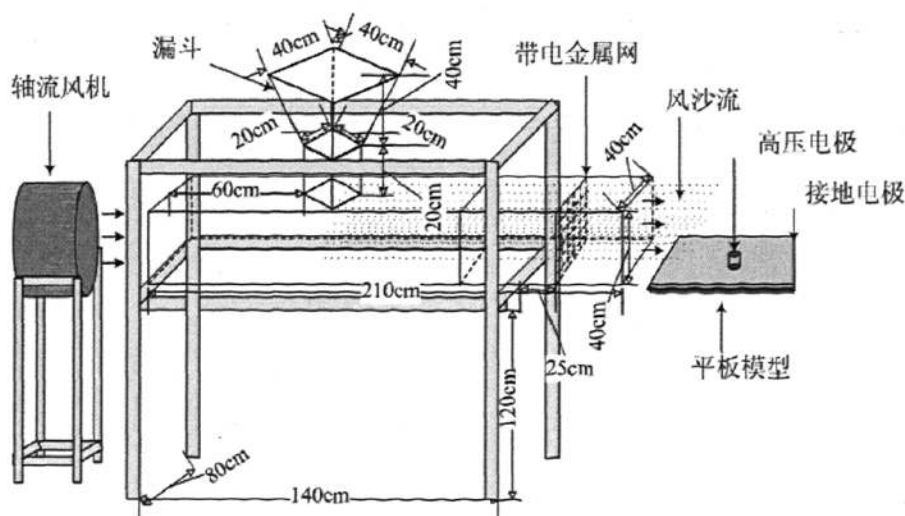


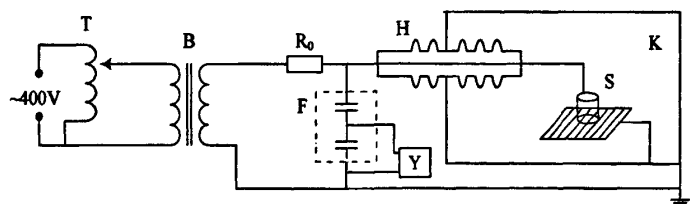
图 2.1 试验装置示意图

Fig. 2.1 The schematic of test device

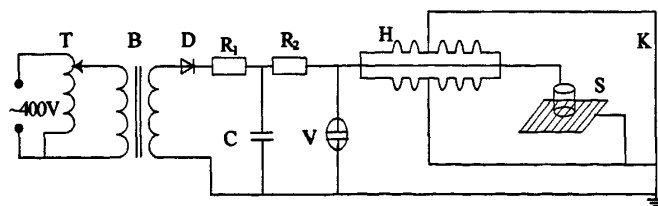
该模拟装置包括：风机采用轴流风机，额定功率为 2.5kW，其风速可调，风速最大可达 10m/s；主体装置由铁架支撑，进沙漏斗连接一通道，通道侧面采用玻璃，为了便于观察。前端为带电金属网，其作用是使沙尘带上电荷。该装置可模拟具有一定风速和带电量的沙尘环境。金属网前方放置被试品。铁架高为 1.2m，长为 1.4m，宽为 0.8m。通道高为 0.4m，长为 2.1m，宽为 0.4cm。漏斗的上下两个面是正方形，边长分别是 40cm，20cm，高 40cm。试验用沙来源于宁夏沙坡头，其沙粒粒径变化范围为 0.1-0.315mm。

2.2 试验电源

试验电源回路如图 2.2 所示，其中变压器的主要参数：额定容量为 200kVA；额定电流为 1A，输入电压 0~400V，输出电压为 0~100kV；调压器的主要参数：额定容量为 200kVA，输入电压 380V，输出电压 0~400V；保护电阻 R 的阻值为 $5k\Omega$ 。该试验是在重庆大学输配电装备及运行安全与新技术国家重点实验室内完成的。



(1) 交流



(2) 直流

T: 调压器, B: 变压器, R_0 、 R_1 、 R_2 : 保护电阻, C: 滤波电容, D: 高压硅堆, H: 高压套管, F: 电容分压器, Y: 数字万用表, V: 高压静电电压表, S: 试品, K: 沙尘模拟实验室

图 2.2 试验回路

Fig. 2.2 Test circuit

本文试验研究中采用的试品有平板模型、XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子，如图 2.3、2.4、2.5 所示。XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子参数如表 2.1 所示。其中图 2.3 中的平板模型的高压电极是一个直径和高都是 5cm 的

圆柱形铜电极，高压电极距玻璃板边缘的距离为 d ，电极下是两块 $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 1\text{cm}$ 的玻璃板，玻璃板中间夹着一张细密的接地金属网。

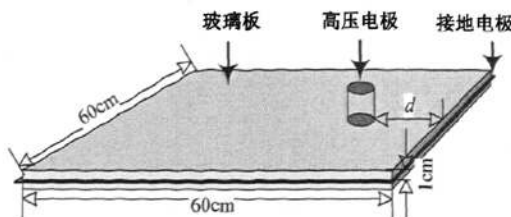


图 2.3 平板模型示意图

Fig. 2.3 the flat plate model

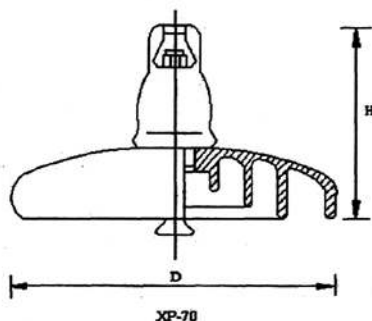


图 2.4 XP-70 瓷绝缘子基本结构示意图

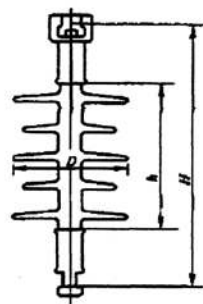
Fig.2.4 The basic structure schematic of the
XP-70 porcelain insulator

图 2.5 FXBW4-10/70 复合绝缘子基本结构示意图

Fig.2.4 The basic structure schematic of the
FXBW4-10/70 composite insulator

表 2.1 瓷和复合绝缘子的参数

Table 2.1 The parameters of the porcelain and composite insulators

型号	盘径 D (mm)	结构高度 H (mm)	最小公称爬距 L (mm)	结构形状
XP-70	254	146	320	图 2.4
FXBW4-10/70	125	360	420	图 2.5

2.3 参数测量方法与仪器

在实际的扬沙天气下，由于沙粒之间以及沙粒与大地之间的摩擦，导致沙尘带上了电荷。在试验过程中，为了使沙粒带上一定的电荷量，参考了国外学者的试验方法^[35]，在沙粒出口端加装一张金属网，通过改变金属网上所施加的电压及金属网

孔, 来改变沙尘的带电量极性和大小。

为了测量沙粒碰撞金属网后的带电量, 采用网状目标法进行测量, 网状目标法是用测量荷质比一种方法^[40], 其原理示意图如图 2.6。

该装置由带电金属网和数据采集 2 部分组成, 荷电粒子到达网状接收装置, 当电荷转移到金属网上时, 即与地面构成回路, 产生微电流。用精密微安表测出该电流 I , 同时采样筒在一定时间 t 内测出质量 m , 则可以测出粒子的平均荷质比。

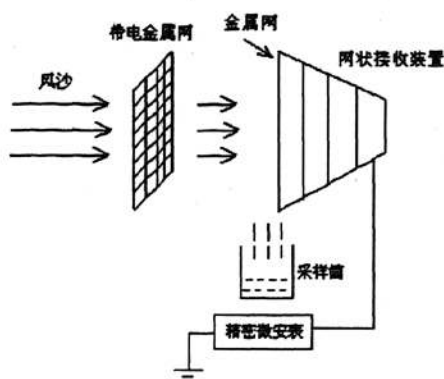


图 2.6 网状目标法原理示意图

Fig. 2.6 The schematic of mesh target

在试验过程中, 考虑测量的精度, 用 DQ-2 型数字式冲击电流计代替微安表直接测量电荷量, 其中 DQ-2 型数字冲击电流计是在原有冲击电流计的基础上, 根据要求进一步改进研制而成的, 使用大规模 CMOS 集成电路和高性能运算放大器及优质电子元件组成的数字式测量仪表, 主要用于测量短时间脉冲所迁移的电量, 其有两个量程: 19.99×10^{-8} 库仑和 199.9×10^{-8} 库仑, 分辨率为 10^{-9} 库仑。



图 2.7 HG-100K 高速摄像机

Fig. 2.7 The high speed camera

在试验过程中,为了测量沙尘的风速及拍摄其放电过程采用了 MS6250 型数字风速仪和 HG-100K 高速摄像机如图 2.7 所示,其中 MS6250 型数字风速仪风速测量范围 0-20m/s,精度为 $\pm 0.1\text{m/s}$; HG-100K 高速摄像机的主要技术参数:1.7 megapixel CMOS,最大分辨率:1504 $\times$ 1108 pixels,最高采样率:100,000fps,机载内存:4G 可以手动触发,也可以自动触发,触发方式有前触发、中触发和后触发三种:通过 100M 的高速网线同移动 PC 相连,可以有选择的保存拍摄的照片。

2.4 闪络电压的获取

参照污秽试验中给试品加压方式的不同,得到的电压不同,主要有以下几种^[41]:

① 最大耐受电压

在试品饱和湿润后,瞬时的或者不超过 5s 的时间内对试品加上试验电压并维持至闪络,如不出现闪络则维持 15min。然后将绝缘子从雾室中取出并让它干燥,将这个试品第二次放入雾室中,由雾再次湿润直至污层电导率达到它的最大值,如果此时污层电导率不低于基准值的,可以再一次施加试验电压直至闪络,如果不出现闪络则维持 15min;如果低于 90%,则应对该串试品进行重新染污。同一污层的一串绝缘子可以进行不多于两次的连续试验。按以上过程对具有一给定基准污层电导率或基准附盐密度的试品进行一系列的试验,每次试验在几个电压水平中取任一水平进行。只要:

1) 如在任一电压水平下的闪络总次数达到 2,就不应在相同的或较高的电压水平下做进一步的试验。

2) 如在任一电压水平下的耐受总次数达到 3,就不应在相同的或较低的电压水平下做进一步的试验。

② 50%耐受电压

施加试验电压前,污层还是干的,施加试验电压后,蒸汽雾按 $(0.05\pm 0.01)\text{kg/h}$ 每立方米试验室体积的恒定速率输入。试验电压维持至出现闪络,否则应从试验开始算起维持 100min,或是直至其电流峰值(如果测量电流的话)持续下降至低于记录到的最大峰值的 70%。在一给定基准污秽度下,试品应经受至少 10 次的“有效的”试验,每一次试验时的施加电压水平应按升降法来改变,电压级差应约为预期的 50%耐受电压的 10%。与先前一些试验产生的效果不同的第一个试验应被选作第一个“有效的”试验。只有这一次试验和随后的至少 9 次试验才算作为“有效的”试验,并用它们来确定 50%耐受电压。50%耐受电压应按下式计算:

$$U_{50\%} = \frac{\sum (n_i \times U_i)}{N} \quad (2.1)$$

式中, U_i 为某一施加的电压水平, kV; n_i 为在相同电压水平 U_i 下进行的试验的次数;

N 为有效试验次数。

③ 平均闪络电压

每一污秽度下绝缘子串的平均闪络电压试验由 3 串绝缘子组成, 加压方式为均匀升压, 每串闪络 4~5 次, 取其中与平均值误差不超过 10% 的所有点的算术平均值作为绝缘子串的平均闪络电压。

本文所考虑的分为无风无沙、有风无沙、有风有沙(沙粒不带电)、有风有沙(沙粒带电)、干沙粒沉积和湿沙粒沉积等六种情况, 要获得不同风沙环境下每种试品的最大耐受电压或 50% 耐受电压, 需要花很长时间, 根据实验室的时间安排, 完成的难度很大。因此, 本文采用平均闪络电压来对不同型式绝缘子和平板模型进行分析。

在试验中, 采用 JB/T5470、Q4-V 型静电电压表和 SGB-200A 电容分压器及 MY65 万用表测量电压。每个试验点的闪络电压值的获取是通过多次闪络试验得到 10 个有效试验数据, 求取算术平均值, 每个数据与本组数据的算术平均值相对误差小于 5%。

2.5 本章小结

本章叙述了风沙模拟装置、试验方法、测量方法及仪器, 试验装置和方法能满足研究的要求。

3 风沙环境下平板模型和绝缘子的交流闪络特性研究

3.1 引言

对沙尘的模拟分为两种，一是研究北方的沙尘天气下，风沙电三种因素对绝缘的沿面闪络特性的影响。二是研究沙粒在绝缘表面的沉积对绝缘的沿面闪络特性影响，这是基于随着沙尘天气向西南部蔓延，重庆及三峡库区与川、黔、湘相连的广大地区在沙尘季节被尘雾和细雨笼罩，绝缘表面有沙粒沉积、湿度大、风速小的情况。此种情况下只在绝缘子上加均匀的沙尘。因此，本章的研究是分别对平板模型、XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子三种试品进行沙尘过境后在绝缘表面沉积时的交流闪络特性试验，试验时持续均匀升压直至闪络。平板模型和这两种绝缘子的参数和基本结构示意图如表 2.1 和图 2.3、图 2.4 和图 2.5 所示。

3.2 沙粒沉积对平板模型交流闪络特性的影响

沙粒沉积在玻璃板上会改变平板模型表面介质特性，改变平板模型表面的电场分布，进而影响平板的沿面闪络特性，为了分析沙粒对平板模型沿面放电的影响，进行了沙粒沉积密度 σ_s 和沙粒粒径对平板模型放电特性和放电过程影响的研究。

3.2.2 沙粒沉积密度对平板模型交流沙闪络电压的影响

为研究不同沉积密度对平板模型闪络电压的影响，称取了不同的沙量，均匀铺在玻璃板上，分别得到了 $0\text{mg}/\text{cm}^2$, $6.25\text{mg}/\text{cm}^2$, $12.5\text{mg}/\text{cm}^2$, $18.75\text{mg}/\text{cm}^2$, $25\text{mg}/\text{cm}^2$, $37.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 六种不同沉积密度的沙层，然后在不同的距离下进行试验。表 3.1 是不同沙粒沉积密度和不同爬电距离下的沙闪络电压。

表 3.1 不同沙粒沉积密度和爬电距离下的交流沙闪络电压

Table 3.1 The flashover voltage of the flat plate model with different deposition density of sand dust under AC voltage

沉积密度 (mg/cm^2)	交流沙闪络电压(kV)			
	3cm	4cm	5cm	6cm
0	25.07	28.33	32.85	33.65
6.25	24.63	25.67	28.38	30.00
12.50	23.93	25.36	27.00	29.53
18.75	23.38	24.30	26.58	28.10
25.00	25.29	26.17	28.78	30.00
37.50	28.40	28.93	30.07	32.20

根据表 3.1 中数据作图 3.1 和图 3.2。由表 3.1 中数据及图 3.1 中的多项式拟合曲线可以看出, 在各种沙粒沉积密度下, 闪络电压都随着爬电距离的增大而升高, 在沙粒沉积密度 σ_s 为 $18.75\text{mg}/\text{cm}^2$ 时曲线位于最下方, 闪络电压较低; 在沙粒沉积密度为 $37.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 时曲线位于最上方, 闪络电压最高; 平板模型沿面闪络电压在各种沙粒沉积密度情况下都是随爬电距离的增大而升高。

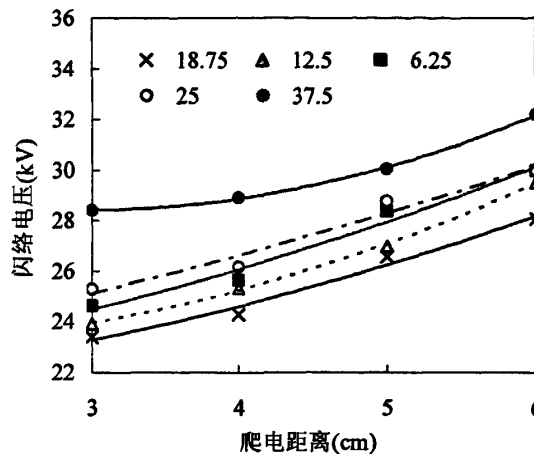


图 3.1 平板模型沿面闪络电压与爬电距离的关系

Fig.3.1 Relationship between flashover voltage of flat plate model and creepage distance

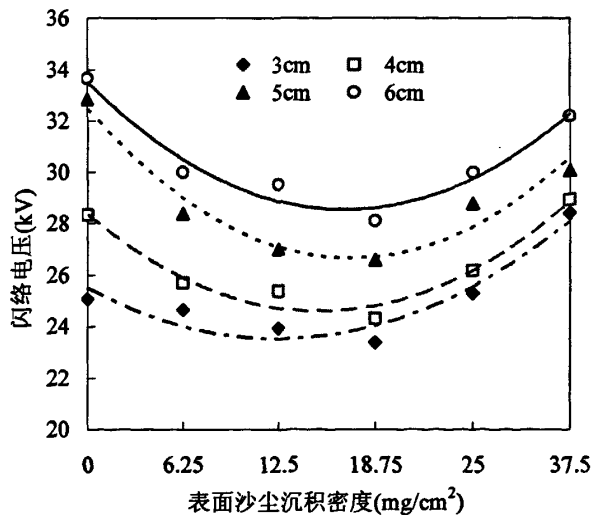


图 3.2 平板模型沿面闪络电压与表面沙粒沉积密度 σ_s 的关系

Fig.3.2 Relationship between flashover voltage of flat plate model and deposition density of sand dust

由图 3.2 中二阶多项式拟合曲线可以看出, 随着沙粒沉积密度 σ_s 的增加, 平板模型的沿面闪络电压随沙粒沉积密度的变化存在着极小值。

3.2.2 沙粒粒径对平板模型交流沙闪络电压的影响

根据样品的种类、粒径范围、取样多少以及设备条件等情况的不同, 有多种不同的颗粒分析方法^[42], 如尺量法、筛分法、粒径计法、吸管法、消光法、离心沉降法等。其中, 后四种方法都要借助于水体, 将样品放置于水溶液中进行分析, 因此又都称之为水分析法。

粒径计法所依据的原理是: 悬浮于液体介质中的颗粒受重力作用垂直向下沉降, 对于同种物质(因而其密度也相同)的颗粒来说, 其粒径越大, 颗粒在液体介质中下沉的速度越大, 下降同一距离所用的时间也越短。因此, 取样品中粒径大小不同的颗粒使它们同时从粒径计管(注满水)的上端下沉, 并在粒径计管的底部放置一系列接沙杯, 将指定时间间隔内下沉到粒径计管底部的颗粒接入不同的接沙杯。

筛分法是分析 $D>0.062\text{mm}$ 的颗粒的主要方法。筛分法是最古老、最简单但却被广泛应用的一种方法。筛分法通常有几种筛系, 每一筛系由若干个具有不同分辨率的筛组成, 每一个筛的分辨率用“目”表示筛孔的大小, “目”就是每英寸长度内有若干根编丝的数目, “目”数越高, 筛孔就越小, 可以分辨的颗粒粒径也就越小。

用不同“目”的筛子对颗粒进行筛分实验时, 将刚好能通过颗粒的筛孔直径或边长定义为其筛分粒径。实际进行筛分实验时, 每组颗粒的粒径介于其上下两级筛孔孔径之间, 有时也取该两级孔径的算术平均值或几何平均值作为这组颗粒的代表粒径。最后, 根据各级筛分颗粒的大小和数量, 即可获得颗粒尺寸的大小及分布。

本文用筛分法从混合沙中筛取不同沙粒粒径的沙粒, 试验中用的四种筛子分别是 40、70、85、190 目的, 对应的筛孔直径分别为 $450\mu\text{m}$ 、 $220\mu\text{m}$ 、 $180\mu\text{m}$ 和 $80\mu\text{m}$, 可以筛出 $80\text{--}180\mu\text{m}$ 、 $180\text{--}220\mu\text{m}$ 和 $220\text{--}450\mu\text{m}$ 三个沙粒粒径范围的沙粒。

① 沙粒沉积密度为 $12.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 时, 沙粒粒径对平板模型沿面闪络电压的影响

表 3.2 沙粒沉积密度 σ_s 为 $12.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 时, 不同沙粒粒径时的闪络电压

Table 3.2 The flashover voltage of the flat plate model with different particle size of sand under AC voltage ($\sigma_s=12.5\text{ mg}/\text{cm}^2$)

爬电距离	交流闪络电压(kV)			
	80-180 μm	180-220 μm	220-450 μm	混合沙
4cm	26.17	26.33	26.33	25.36
5cm	28.00	29.00	27.88	27.00
6cm	28.50	29.88	29.33	29.53

沙粒沉积密度 σ_s 为 $12.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 时, 用三种沙粒粒径的沙分别在 4cm, 5cm, 6cm 下进行沙粒粒径对平板模型沿面闪络电压的试验, 试验所得数据如表 3.2 所示:

由表 3.2 和图 3.3 拟合的线性直线可以看出, 沙粒粒径对闪络电压的影响并不大。

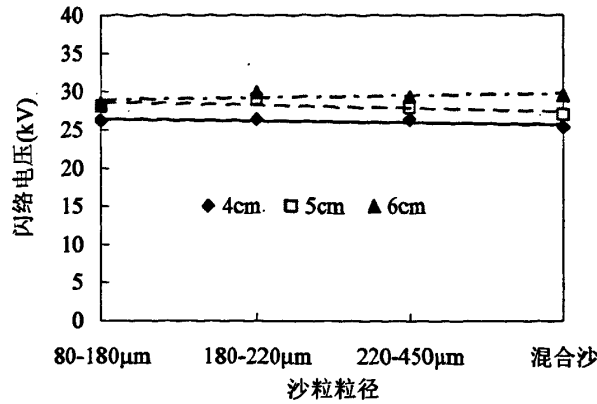


图 3.3 沙粒粒径对平板模型闪络电压的影响(沙粒沉积密度为 $12.5\text{mg}/\text{cm}^2$)

Fig.3.3 Relationship between flashover voltage of the flat plate model and particle size of sand($\sigma_s=12.5\text{mg}/\text{cm}^2$)

② 沙粒沉积密度为 $18.75\text{mg}/\text{cm}^2$ 时, 沙粒粒径对闪络电压的影响

沙粒沉积密度为 $18.75\text{mg}/\text{cm}^2$ 时, 用三种沙粒粒径的沙分别在 4cm, 5cm, 6cm 下进行试验, 试验所得数据如表 3.3 所示:

表 3.3 沉积密度 σ_s 为 $18.75\text{mg}/\text{cm}^2$ 时, 沙粒粒径对闪络电压的影响

Table 3.3 The flashover voltage of the flat plate model with different particle size of sand under AC voltage ($\sigma_s=18.75\text{mg}/\text{cm}^2$)

闪络距离	闪络电压(kV)			
	80-180μm	180-220μm	220-450μm	混合沙
4cm	26.67	26.17	26.83	24.30
5cm	29.17	27.50	28.00	26.58
6cm	30.00	28.83	29.63	28.10

由表 3.3 可以看出, 沙粒粒径对闪络电压的影响并不大。

因此, 沙粒粒径在一定的变化范围内($100\mu\text{m}$ - $350\mu\text{m}$)的变化对平板模型沿面闪络电压的影响极小。风沙环境中, XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流沙闪络试验和平板模型的直流沙闪络试验都没有考虑沙粒粒径的影响, 用混合沙

进行试验。

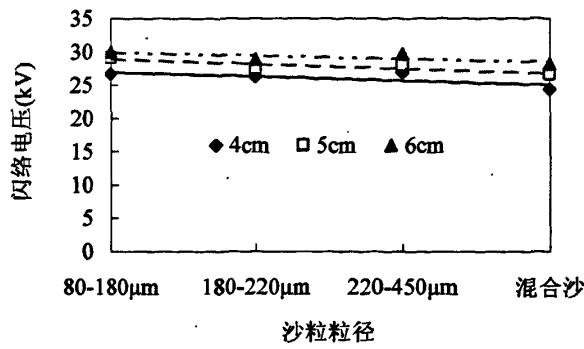


图 3.4 沙粒粒径对平板模型闪络电压的影响(沉积密度为 18.75mg/cm²)

Fig.3.4 Relationship between flashover voltage of the flat plate model and particle size of sand ($\sigma_s=18.75\text{mg/cm}^2$)

3.3 风沙环境下绝缘子的交流闪络特性

3.3.2 风沙对绝缘子闪络特性的影响

按照分级方法，沙尘天气可以分为浮尘、扬沙、沙尘暴 3 种。浮尘和扬沙天气对应的风力等级较小，一般在 4 级风以下，此时地表沙尘难以跃起，空气中含沙量较小。沙尘暴天气一般对应的风力为 4 级以上，最高可达到 11 级。考虑到实验结果的工程意义和实验室的条件，本实验安排的风速 v 为 4~8 m/s，对应的是中等沙尘暴及以下等级的天气，因为 8 级风以上的强、特强沙尘暴天气出现概率很小，而且对电网的破坏已经不局限于外绝缘方面了，可能以力学破坏占主导。

表 3.4 不同风沙下的绝缘子交流沙闪络电压(kV)

Table 3.4 Flashover voltage of insulator with different wind speed under AC voltage in wind-sand flow

沙闪络电压(kV) \ 风速(m/s)		0	4	6	8
XP-70	有风无沙	81.08	81.72	82.62	83.17
	有风有沙	81.08	81.11	81.98	82.42
FXBW4-10/70	有风无沙	117.78	118.91	119.97	120.15
	有风有沙	117.78	118.64	119.74	120.00

表 3.4 是不同风沙下的绝缘子交流沙闪络电压数值。

图 3.5 和图 3.6 分别为有风有沙和有风无沙尘时，试品为 XP-70 瓷绝缘子和

FXBW4-10/70 复合绝缘子，风速与绝缘子交流闪络电压的关系。

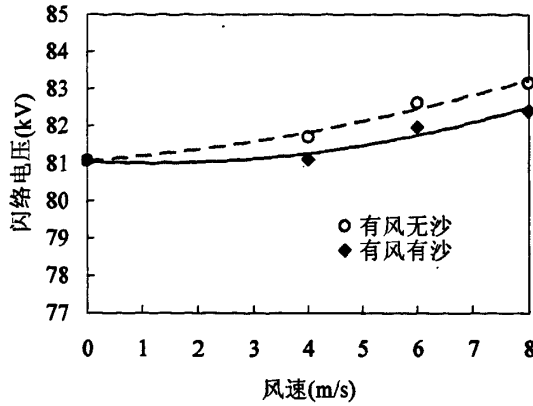


图 3.5 风速对 XP-70 瓷绝缘子闪络电压的影响

Fig. 3.5 Relationship between flashover voltage of the XP-70 porcelain insulator and wind speed under AC voltage

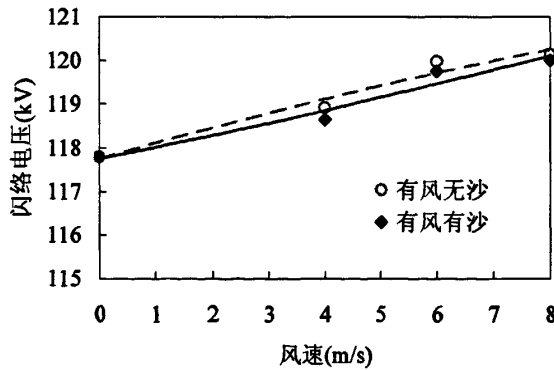


图 3.6 风速对 FXBW4-10/70 复合绝缘子闪络电压的影响

Fig. 3.6 Relationship between flashover voltage of FXBW4-10/70 composite insulator and wind speed under AC voltage

由图 3.5 和图 3.6 可知，XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流闪络电压随风速的增大而升高；且有风有沙时的沙闪络电压比有风无沙时稍低。在试验中发现大风的作用下，绝缘子沿面闪络出现飘弧现象，同时，大风使放电发展过程持续的时间较长，闪络完成后电弧易于熄灭。

3.3.3 沙粒电荷量对绝缘子交流沙闪络特性的影响

在沙尘模拟实验室，风速 v 为 6m/s，沙尘浓度为 5g/m^3 时，进行沙粒带电量对绝缘子沙闪络电压的影响的试验。图 3.7 和图 3.8 分别为沙粒荷质比对 XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子沙闪络电压影响的曲线图。

表 3.5 风沙下不同荷质比时的绝缘子交流沙闪络电压($v=6\text{m/s}$)(kV)

Table 3.5 The flashover voltage of insulator with different charge-to-mass ratio of sand under AC voltage in wind-sand flow($v=6\text{m/s}$)

荷质比(10^{-8}C/kg)		沙闪络电压(kV)			
		0	5	10	30
XP-70	正电荷	81.98	79.91	79.68	79.13
	负电荷	81.98	81.19	79.92	79.74
FXBW4-10/70	正电荷	119.74	117.69	117.35	117.12
	负电荷	119.74	118.81	117.62	117.34

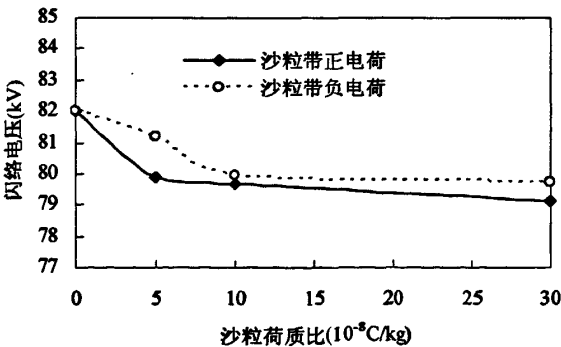


图 3.7 沙粒荷质比对 XP-70 瓷绝缘子沙闪络电压的影响($v=6\text{m/s}$)

Fig. 3.7 Relationship between flashover voltage of XP-70 porcelain insulator and charge-to-mass ratio of sand dust under AC voltage($v=6\text{m/s}$)

由图 3.7 和图 3.8 可知，随着金属网所加电压的升高，荷电沙粒的荷质比随之变大，在沙粒荷质比从 $5\times 10^{-8}\text{C/kg}$ 升到 $30\times 10^{-8}\text{C/kg}$ 时，XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子沙闪络电压降低。风沙电三种因素综合作用下，XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子沙闪络电压比干闪电压稍低。

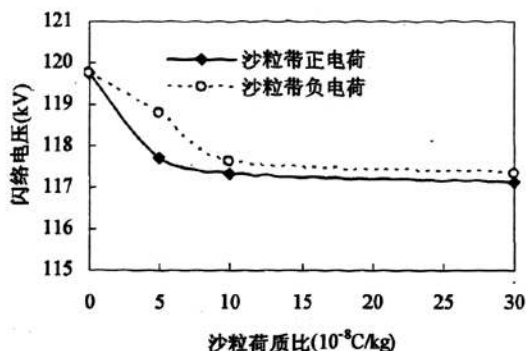


图 3.8 沙粒荷质比对 FXBW4-10/70 复合绝缘子沙闪络电压的影响($v=6\text{m/s}$)

Fig. 3.8 Relationship between flashover voltage of FXBW4-10/70 composite insulator and charge-to-mass ratio of sand dust under AC voltage($v=6\text{m/s}$)

3.3.4 绝缘子表面沙粒沉积量对沙闪络电压的影响

研究沙尘在绝缘表面的沉积对绝缘的沿面沙闪络特性影响,分为四种情况:绝缘子表面无沙尘、上表面沉积 $245\text{mg}/\text{cm}^2$ 的干沙粒、上表面沉积 $18\text{mg}/\text{cm}^2$ 的干沙粒、上表面沉积 $25\text{mg}/\text{cm}^2$ 的湿沙粒,绝缘子上表面沉积沙粒后的实物图如图 3.9 和 3.10 所示。图 3.11 是绝缘子表面沉积沙粒对沙闪络电压的影响曲线图。



(1) $245\text{mg}/\text{cm}^2$ 的干沙粒 (2) $18\text{mg}/\text{cm}^2$ 的干沙粒 (3) $25\text{mg}/\text{cm}^2$ 的湿沙粒

图 3.19 XP-70 瓷绝缘子上表面沉积沙粒图

Fig.3.9 The picture of the deposit sand on the upper surface of the XP-70 porcelain insulator



(1) $245\text{mg}/\text{cm}^2$ 的干沙粒 (2) $18\text{mg}/\text{cm}^2$ 的干沙粒 (3) $25\text{mg}/\text{cm}^2$ 的湿沙粒

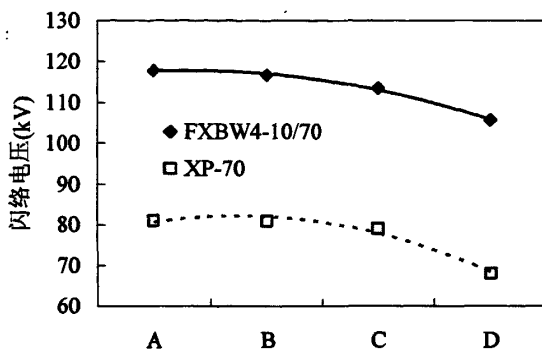
图 3.10 FXBW4-10/70 复合绝缘子上表面沉积沙粒图

Fig.3.10 The picture of the deposit sand on the upper surface of the FXBW4-10/70 composite insulator

表 3.6 上表面沉积沙粒时绝缘子的交流沙闪络电压 (kV)

Table 3.6 The flashover voltage of insulator with the upper surface depositing the sand particles under AC voltage

绝缘子型号	表面无沙粒	245mg/cm ² 干沙	18mg/cm ² 干沙	25mg/cm ² 湿沙
FXBW4-10/70	117.78	116.69	113.41	105.7
XP-70	81.08	80.90	79.08	68.00



A: 绝缘子表面清洁; B: 上表面沉积 245mg/cm² 的干沙尘;
C: 上表面沉积 18mg/cm² 的干沙尘; D: 上表面沉积 25mg/cm² 的湿沙尘

图 3.11 绝缘子表面沉积沙粒对沙闪络电压的影响

Fig.3.11 Relationship between flashover voltage of insulators and deposition density of sand dust

由图 3.11 可知, 绝缘子上表面沉积干沙尘时, XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子沙闪络电压与其干闪络电压相比略有下降; 上表面沉积湿沙尘时其沙闪络电压大幅下降, XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子沙闪络电压比干闪电压分别下降 16.13% 和 10.26%。而单片 XP-70 的污秽闪络电压 (盐密 ESDD 为 0.05mg/cm²) 为 11.33kV^[43], 比上表面沉积 25mg/cm² 的湿沙尘时沙闪络电压 (68kV) 降低了 83.38%, 比上表面沉积 245mg/cm² 的干沙尘时沙闪络电压 (80.09kV) 降低了 85.89%。因此在进行输电线路的外绝缘设计时, 按污耐压法确定的绝缘水平, 可以满足风沙环境中的要求。

3.4 本章小结

以平板模型、XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子为研究对象在交流电压下进行了沙尘对沿面闪络特性影响的大量试验研究和闪络特性的分析。

随着表面沙粒沉积密度 σ_s 的增加, 平板模型的沿面闪络电压在存在极小值。沙

粒粒径在 $100\text{-}350\mu\text{m}$ 之间变化时对平板模型的沿面闪络电压影响极小。

绝缘子上表面沉积干沙尘时，其沙闪络电压比其干闪电压稍低。湿沙尘闪络电压比干沙时低。

XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流闪络电压随风速的增大而升高，有风沙时的闪络电压比有风无沙时稍低。

4 风沙环境下平板模型的沿面直流闪络特性研究

4.1 引言

风沙对电力系统外绝缘放电的影响已引起广泛关注，由于污秽绝缘子的闪络与沉积在绝缘子表面的污秽性质有关，沙尘环境下的沙粒性质、状态、大气环境等均对绝缘子闪络特性有影响。因此以典型的平板模型为研究对象，在沙尘模拟实验室，对沙尘环境下外绝缘沿面直流放电特性进行了试验研究。

本章分别进行了干湿沙粒沉积与无风无沙、有风无沙、有风有沙（沙粒上无电荷）和有风有沙（沙粒上有电荷）等六种情况下，风速的大小及沙粒电荷量对平板模型沿面交流闪络电压影响的试验研究，试验装置如图 2.1 所示。

4.2 沙粒沉积对平板模型直流沙闪络电压的影响

为了分析沙粒沉积对平板模型沿面放电特性的影响，进行沙粒沉积密度、沙粒含水量对其直流闪络电压影响的试验研究。由于直流下的间隙击穿特性和沿面放电特性都存在极性效应，因此在研究中分别进行正、负极性下的沙闪络特性试验。

4.2.1 沙粒沉积密度对平板模型直流沙闪络电压的影响

表 4.1 是直流负极性电压作用下，爬电距离 d 分别为 3cm、4cm、5cm 和 6cm，表面沙粒沉积密度 σ_s 分别为 6.25、12.5、18.75、25、37.5、50mg/cm² 和表面清洁时的平板模型闪络电压。

表 4.1 直流负极性电压作用下不同沉积密度的闪络电压（kV）

Table 4.1 The flashover voltage of the flat plate model with different deposition density of sand dust under negative polarity voltage

爬电 距离	直流负极性闪络电压 (kV)						
	0	6.25	12.5	18.75	25	37.5	50
	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²
3 cm	43.10	42.50	38.75	36.83	38.00	38.50	38.01
4 cm	50.30	49.13	48.00	44.10	44.90	45.50	45.38
5 cm	56.80	56.10	52.42	51.70	51.50	52.00	52.60
6 cm	63.55	62.60	56.30	56.10	56.80	57.90	58.42

图 4.1 为不同爬电距离下，直流负极性电压作用下平板模型闪络电压与沙粒沉积密度的关系。

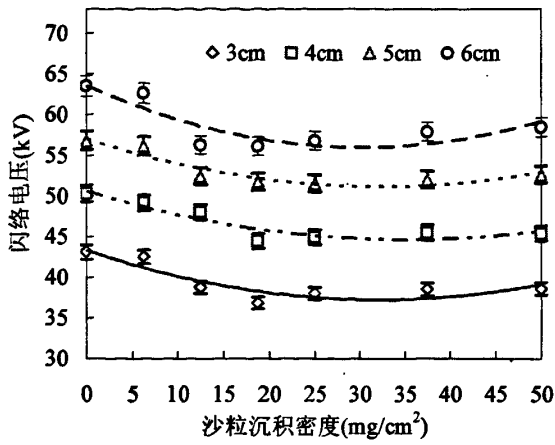


图 4.1 平板模型闪络电压与沙粒沉积密度的关系(DC-)

Fig. 4.1 The flashover voltage of the flat plate model as a function of the deposition density of sand

表 4.2 是直流正极性电压作用下，爬电距离 d 为 3-6cm，表面沙粒沉积密度 σ_s 分别为 0、6.25、12.5、18.75、25、37.5、50mg/cm² 平板模型闪络电压。

表 4.2 直流正极性电压作用下不同沉积密度的闪络电压（kV）

Table 4.2 The flashover voltage of flat plate model with different deposition density of sand dust under positive polarity voltage

爬电 距离	直流正极性闪络电压 (kV)						
	0 mg/cm ²	6.25 mg/cm ²	12.5 mg/cm ²	18.75 mg/cm ²	25 mg/cm ²	37.5 mg/cm ²	50 mg/cm ²
3 cm	32.08	42.00	45.30	52.37	46.20	39.50	38.14
4 cm	41.60	50.20	56.00	67.38	56.60	53.00	51.70
5 cm	45.71	54.40	61.60	81.30	71.90	70.70	65.43
6 cm	53.30	59.17	75.13	83.92	76.40	75.13	72.30

图 4.2 为不同爬电距离下，直流正极性电压作用下平板模型闪络电压与沙粒沉积密度的关系。

由图 4.1 可知：直流负极性电压作用下，平板模型沿面沙闪络电压随着表面沙粒沉积密度 σ_s 的增大先降低，后增大，沉积密度为 12.5-25mg/cm² 之间时存在极小值，爬电距离 $d=3、4、5、6$ cm 时沙闪络电压的极小值分别比清洁绝缘表面 ($\sigma_s=0$) 的闪络电压降低 14.55%、12.33%、8.98%和 11.72%，平均降低 11.89%；并且当沙粒沉积密度不大于 50mg/cm² 时沿面沙闪络电压均小于清洁绝缘表面的闪络电压。

这和干沙粒沉积密度 σ_s 对平板模型交流沙闪络电压的影响规律一致。

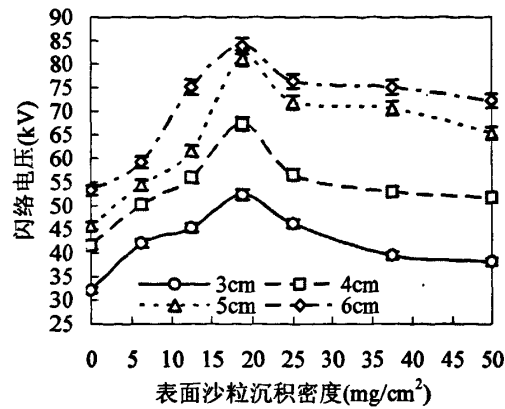


图 4.2 平板模型闪络电压与沙粒沉积密度的关系(DC+)

Fig. 4.2 Relationship between the flashover voltage of the flat plate and the deposition density of sand

由图 4.2 可知：直流正极性电压作用下，平板模型沿面沙闪络电压随着表面沙粒沉积密度 σ_s 的增大先增大，后降低，沙粒沉积密度约为 12.5-25mg/cm² 之间时存在极大值，爬电距离 $d=3、4、5、6\text{cm}$ 时沙闪络电压的极大值分别比 ($\sigma_s=0$) 时的闪络电压升高 63.25%、61.97%、77.86%和 57.45%，平均升高 65.13%；并且当沙粒沉积密度不大于 50mg/cm² 时沿面沙闪络电压均大于清洁绝缘表面的闪络电压。

4.4.2 沙粒含水量对平板模型直流沙闪络电压的影响

为了分析沙粒含水量 η 对其闪络过程的影响，进行了沙粒含水量对其沙闪络电压影响的研究。表 4.3 为不同沙粒沉积密度 σ_s 和沙粒含水量 η ，爬电距离 d 为 5cm 时平板模型沿面直流正、负极性沙闪络电压。

表 4.3 $d=5\text{cm}$ 时不同沙粒沉积密度和含水量的沙闪络电压($d=5\text{cm}$) (kV)

Table 4.3 The flashover voltage of flat plate model with different deposition density and moisture content of sand dust under dc voltage($d=5\text{cm}$)						
		含水量 η (%)				
		0	2.7	5.3	7.8	10
沙闪络电压(kV)						
$\sigma_s=25\text{mg/cm}^2$	负极性	51.50	42.10	28.25	21.67	15.75
	正极性	71.90	470	40.50	30.80	24.80
$\sigma_s=50\text{mg/cm}^2$	负极性	52.60	39.50	24.30	16.13	11.38
	正极性	65.43	43.80	32.90	24.00	17.50

图 4.3 为沙粒沉积密度 σ_s 分别为 $25\text{mg}/\text{cm}^2$ 和 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 、爬电距离 d 为 5cm 时平板模型沿面直流正、负极性沙闪络电压与沙粒含水量 η 的关系图。

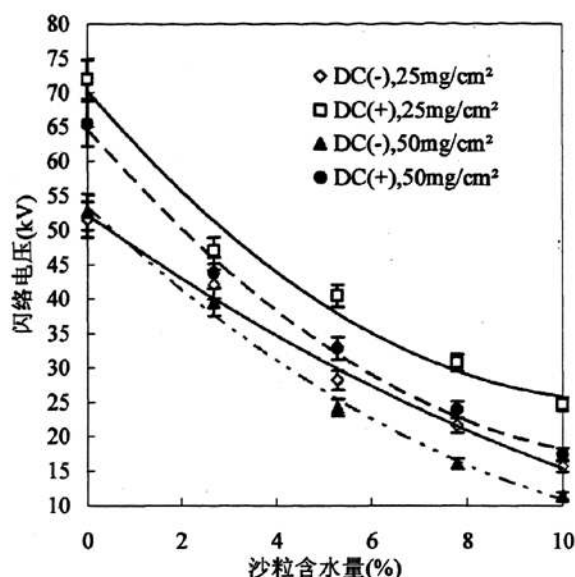


图 4.3 沙粒含水量与直流沿面沙闪络电压的关系($d=5\text{cm}$)

Fig. 4.3 Relationship between the flashover voltage of the flat plate model and the moisture content of sand dust($d=5\text{cm}$)



(a) DC(-), $\eta=2.7\%$ $\sigma_s=50\text{mg}/\text{cm}^2$ (b) DC(-), $\eta=10\%$ $\sigma_s=25\text{mg}/\text{cm}^2$ (c) DC(+), $\eta=5.3\%$ $\sigma_s=50\text{mg}/\text{cm}^2$

图 4.4 沙粒含水时平板模型沿面沙闪络后的干沙带和无沙环($d=5\text{cm}$)

Fig. 4.4 The band with drying sand and ring without sand post after flashover of the flat plate model with damp sand($d=5\text{cm}$)

从图 4.3 中可以看出, 直流正、负极性电压作用下, 平板模型沿面沙闪络电压都随沙粒含水量的增大而降低。升压过程中可以看到当沙粒含水时沿面放电电弧的发展过程和污秽沿面放电极相似, 先在高压电极边缘和玻璃板边缘出现局部电弧,

随着电压的升高局部电弧不断发展，最后贯通形成沿面闪络。图 4.4 是沙粒含水时不同沙粒含水量和不同沙粒沉积密度下的平板模型沿面后闪络后电极边缘和玻璃板边缘处的干沙带和无沙环。

从图 4.3 中还可以看出，在同一沙粒含水量、表面沙粒沉积密度和爬电距离下，负极性的沿面沙闪络电压低于正极性的沿面沙闪络电压，这与污秽放电的极性效应相同^[43]。

沙粒湿润后可视为一种特殊的污秽，此时的沿面闪络电压较干沙时的闪络电压降低，当沙粒含水量为 2.7%、5.3%、7.8%、10%时，其降幅分别为 27.71%、48.08%、61.93%、71.64%，平均降幅为 52.34%。

4.4.3 沙粒沉积时平板模型沙闪络电压的极性效应

直流沙闪络电压存在明显的极性效应，表 4.4 是干沙粒沉积时的平板模型直流正极性闪络电压与负极性闪络电压比值，由表 4.1、4.2 中的数值计算得出。

表 4.4 干沙粒沉积时的平板模型直流正极性闪络电压与负极性闪络电压比值
Table 4.4 The positive and negative flashover voltage ratio of flat plate model with different deposition density of dry sand dust

爬电 距离	(DC+)/ (DC-)						
	0	6.25	12.5	18.75	25	37.5	50
	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²	mg/cm ²
3 cm	0.7443	0.9882	1.1690	1.4219	1.2158	1.0260	1.0034
4 cm	0.8270	1.0218	1.1667	1.5279	1.2606	1.1648	1.1393
5 cm	0.8048	0.9697	1.1751	1.5725	1.3961	1.3596	1.2439
6 cm	0.8387	0.9452	1.3345	1.4959	1.3451	1.2976	1.2376

由表 4.4 可知：当玻璃板表面清洁时，直流负极性沿面闪络电压 $U_{f(DC-)}$ 均比直流正极性沿面沙闪络电压 $U_{f(DC+)}$ 高。当沙粒沉积密度 σ_s 为 6.25mg/cm² 时， $U_{f(DC-)}$ 比 $U_{f(DC+)}$ 稍高；当沙粒沉积密度 σ_s 为 12.5mg/cm²、18.75mg/cm²、25mg/cm²、37.5mg/cm²、50mg/cm² 时， $U_{f(DC-)}$ 比 $U_{f(DC+)}$ 低，且随着爬电距离 d 的增大，其差值越来越大，这与绝缘子污秽闪络电压的极性效应一致^[43]。从试验结果看，沙粒沉积密度 σ_s 为 18.75mg/cm² 时， $U_{f(DC-)}$ 与 $U_{f(DC+)}$ 相差最大，当 $d=3、4、5、6$ cm 时 $U_{f(DC+)}$ 比 $U_{f(DC-)}$ 分别大 42.19%、52.79%、57.25%、49.59%。由表 4.3 也可知湿沙粒沉积时平板模型的负极性沙闪络电压小于正极性，也存在明显的极性效应。

4.3 风沙对平板模型直流沙闪络电压的影响

在玻璃板表面清洁的情况下，分析风速 v 与平板模型直流沙闪络电压的关系。
表 4.5 为爬电距离 d 为 4cm、6cm 时，不同风沙下的平板模型直流沙闪络电压。

图 4.5 为有风无沙尘时，爬电距离 d 为 4cm、6cm 时，风速与平板模型直流沿面沙闪络电压的关系。

从图 4.5 中可知，直流正负极性电压作用下，平板模型沿面闪络电压都随风速的增大而升高，这与交流电压下风速对沿面闪络电压的影响一致。这是由于风使起始放电质点分散；风速的影响随沿面爬电距离的增加而增大，这说明随着爬电距离的增大，风对电弧拉长能力增强，飘弧现象越明显。

表 4.5 不同风沙下的平板模型直流沙闪络电压(kV)

Table 4.5 The flashover voltage of flat plate model with different wind speed under dc voltage in wind-sand flow

风速	直流沙闪络电压值(kV)				
	0 m/s	2.5 m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s
6cm, DC-, 无沙尘	61.94	62.72	64.64	66.21	67.11
6cm, DC+, 无沙尘	54.75	55.08	57.00	57.83	58.00
6cm, DC-, 有沙尘	61.94	60.25	61.56	62.00	63.10
6cm, DC+, 有沙尘	54.75	64.83	60.50	60.13	59.50
4cm, DC-, 无沙尘	45.50	46.20	46.30	46.58	46.71
4cm, DC+, 无沙尘	42.80	42.90	43.51	43.50	43.90
4cm, DC-, 有沙尘	45.50	45.83	46.08	46.05	46.23
4cm, DC+,有沙尘	42.80	46.80	45.70	45.00	45.70

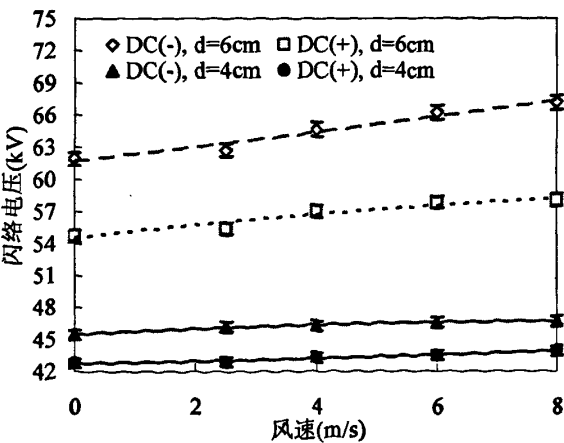


图 4.5 风速与直流沿面闪络电压的关系（无沙尘）

Fig. 4.5 Relationship between flashover voltage of flat plate model and the wind speed without sand

图 4.6 是有风有沙，爬电距离 d 为 4cm、6cm 时平板模型沿面沙闪络电压与风速的关系图。从二阶多项式拟合曲线可以看出，平板模型周围空间有沙尘时（沙尘浓度为 $2.5\text{--}5\text{g/m}^3$ ），直流正极性电压作用下，沿面沙闪络电压比无沙尘时高，且随着风速的增加先增加后降低，存在极大值。这与平板表面沙尘的沉积量和沙闪络电压的关系有关。风速较小(4m/s 左右)时，在绝缘表面可沉积一定量（沙粒沉积密度 σ_s 为 15mg/cm^2 ）的沙尘，由前面结论知，沙闪络电压升高；风速大于 4.5m/s 时，沉积于玻璃板表面较大的沙粒被吹走，但还有极少量的尘土和颗粒较小的沙粒（沙粒沉积密度 σ_s 小于 4mg/cm^2 ），且风具有飘弧和使带电质子发散的作用，此时沿面沙闪络电压开始降低。

而直流负极性电压作用下，平板模型周围空间有沙尘时（沙尘浓度为 $2.5\text{--}5\text{g/m}^3$ ），沙尘随着风速的增加，其沉积情况和直流正极性时一样，沿面沙闪络电压比同种风速下有风无沙时略低，这与 4.2.1 节的结论吻合。

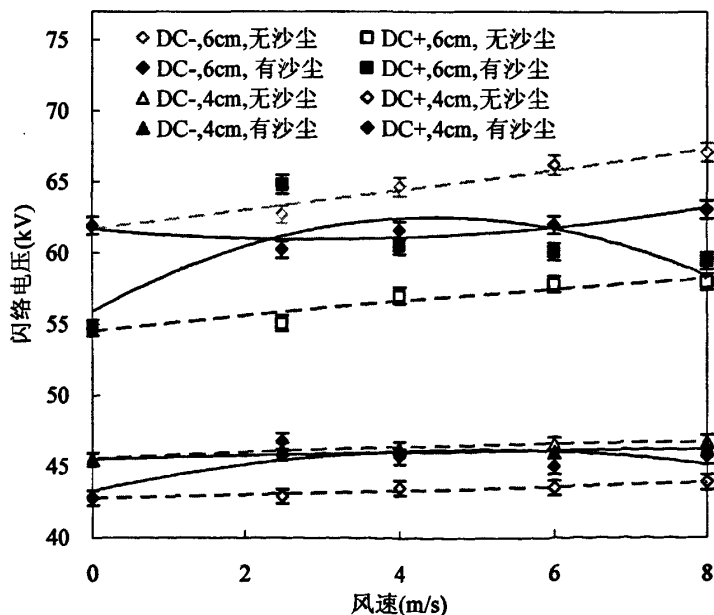


图 4.6 风速与直流沿面沙闪络电压的关系（有沙尘）

Fig. 4.6 Relationship between flashover voltage of flat plate model and the wind speed with sand

总之，在有风有沙和有风无沙时，直流负极性电压作用下，平板模型沿面闪络电压随风速的增大而升高，有沙尘闪络电压比无沙尘时低；而直流正极性电压作用

下，有沙尘闪络电压比无沙尘时高，有沙尘在 4m/s 左右沿面沙闪络电压最高。直流沙闪络电压随风速的变化也存在明显的极性效应。

4.4 沙粒电荷量对平板模型直流沙闪络电压的影响

为分析沙粒带电量对平板沿面放电特性的影响，进行了风速 v 为 8m/s，沙粒带正、负电荷时（空间沙尘浓度为 $2.5\text{-}5\text{g/m}^3$ ）试验研究，风沙环境下不同电荷量时的平板模型直流沙闪络电压值如表 4.6 所示。

表 4.6 风沙下不同电荷量时的平板模型直流沙闪络电压($v=8\text{m/s}$)(kV)

Table 4.6 The flashover voltage of flat plate model with different charge-to-mass ratio of sand under dc voltage in wind-sand flow($v=8\text{m/s}$)

		直流沙闪络电压(kV)			
带电量(10^{-8}C/kg)		0	3	6	30
正电荷	DC-, 6cm	63.10	62.19	61.50	62.75
	DC+, 6cm	55.40	54.82	55.17	56.00
正电荷	DC-, 4cm	47.50	47.80	47.75	47.20
	DC+, 4cm	45.90	44.30	44.56	45.00
负电荷	DC-, 6cm	63.10	64.25	64.00	64.25
	DC+, 6cm	55.40	56.23	56.50	58.10
负电荷	DC-, 4cm	47.50	46.32	46.25	46.70
	DC+, 4cm	45.90	44.70	45.40	46.00

风沙环境下，风速 v 为 8m/s 时，平板模型直流沙闪络电压与沙粒荷电量（沙粒分别带正负电荷）之间的关系，如图 4.7、4.8 所示。

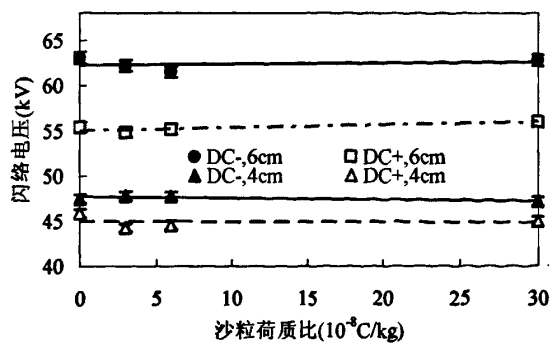


图 4.7 当沙粒带正电荷时平板模型沙闪络电压与沙粒电荷量的关系($v=8\text{m/s}$)

Fig. 4.7 Relationship between flashover voltage of flat plate model and positive charge-to-mass ratio of sand dust($v=8\text{m/s}$)

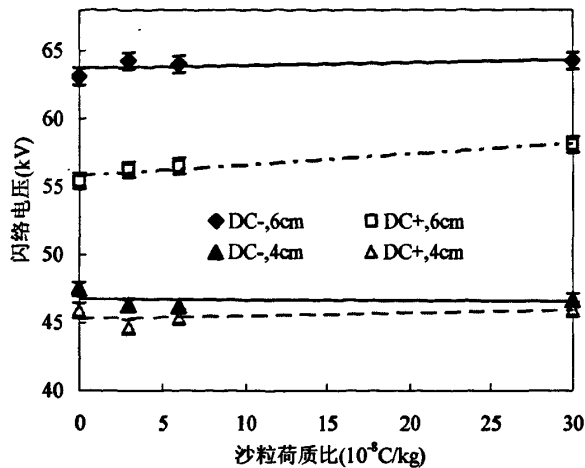


图 4.8 当沙粒带负电荷时平板模型沙闪络电压与沙粒电荷量的关系($v=8\text{m/s}$)

Fig. 4.8 Relationship between flashover voltage of flat plate model and negative charge-to-mass ratio of sand dust($v=8\text{m/s}$)

从图 4.7、4.8 中可以看出, 在沙粒荷质比从 $3\times 10^{-8}\text{C/kg}$ 变化到 $30\times 10^{-8}\text{C/kg}$ 时, 沙粒电荷量对平板模型的沿面直流沙闪络电压无明显影响。当沙尘浓度为 10g/m^3 , 荷质比为 $1\times 10^{-8}\text{C/kg}$ 时, 带电沙尘在空间产生的附加电场为 $2\times 10^{-5}\text{kV/cm}$, 而当沙尘荷质比为 $1\times 10^{-5}\text{C/kg}$ 时, 其产生的附加电场为 $2\times 10^{-2}\text{kV/cm}$ 。与平板模型的原电场分布相比, 沙粒的附加电场对原电场的影响很小^[29]。带电沙粒的存在对平板模型原来的电场整体分布没有明显影响。

4.5 本章小结

以典型的“平板模型”为研究对象进行了沙尘对沿面直流闪络特性影响的大量试验研究和分析, 得出:

在有风有沙和有风无沙时, 直流负极性下, 平板模型沿面闪络电压随风速的增大而升高, 有沙尘闪络电压比无沙尘时低; 而直流正极性下, 有沙尘闪络电压比无沙尘时高。

在一定电荷量变化范围内, 沿面直流沙闪络电压受沙尘的电荷量影响很小。

当沙粒沉积到绝缘表面时, 随着沉积量的增加, 直流负极性电压作用下, 沙闪络电压随表面沙粒沉积密度的增加有极小值; 而直流正极性电压作用下, 当表面沙粒沉积密度在存在极大值。直流沙闪络电压特性存在明显的极性效应。

沿面沙闪络电压都随沙粒含水量的增大而降低，沙粒湿润的沿面闪络电压较干沙时的闪络电压降低 52.34%。

5 沙粒沉积时平板模型和绝缘子沿面闪络过程分析

5.1 引言

沿沙粒沉积平板模型和绝缘子沿面闪络现象是一种与电、热、力等因素相关的沙粒带电、沙粒在电场力下运动、表面气体电离以及局部电弧的产生、发展的平衡过程，其过程非常复杂。

使用 HG-100K 高速相机对平板模型在直流正负极性电压作用下沿面闪络的过程进行了拍照，分析其闪络过程。

5.2 直流电压下平板模型的沿面闪络过程

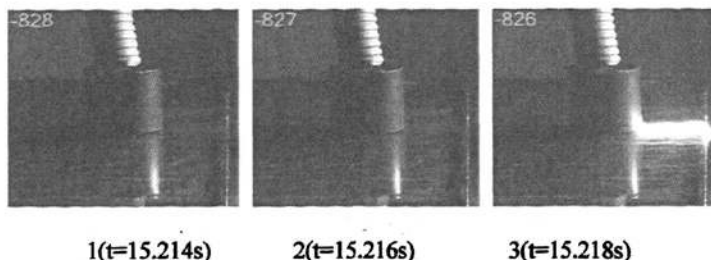
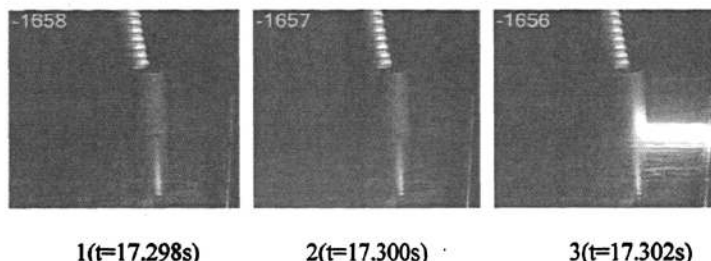
5.2.1 无沙粒沉积时平板模型沿面闪络过程

HG-100K 高速相机的最高拍摄速度为 100,000 帧/s，本次试验拍摄速度设置为 500 帧/s 时为最佳拍摄状态，若速度再提高，由于进光量减少，拍摄的图片中就无法看清试品。

平板模型沿面闪络属于极不均匀电场具有强垂直分量的沿面放电^[44]，这类沿面放电过程分为辉光放电阶段、滑闪放电阶段和最后闪络阶段。由于高压电极处电场极强，因此放电首先从此处开始。在不太高的电压下，靠近高压电极处已经出现电晕放电。随着电压升高，电晕向前延伸，到某一电压后，形成了由许多伸向另一电极的平行细火花线条组成的光带，这些细线带的光比电晕亮些，但仍比较弱，放电细线的长度随着电压成正比增加，这一阶段的特点是放电通道中电流密度较小，压降较大，伏安特性具有上升特征，仍是一种辉光放电现象。继续升高电压，当超过某临界值后，放电的性质就发生了变化，个别放电细线开始迅速增长，转变为树枝状、浅紫色、明亮得多得火花，这些放电火花在不同位置上交替出现，一处产生后紧贴介质表面向前发展，随即很快消失，而后又在新的地方产生。这一放电形式称为滑闪放电。滑闪放电通道中电流密度较大，压降较小，伏安特性具有下降特征。滑闪放电火花的长度随着外加电压的增加迅速地增大，因此电压只需增加不多，滑闪放电火花就能达到另一个电极，形成完全击穿。滑闪放电现象在交流和冲击电压下表现得很明显，而直流电压下没有明显的滑闪放电现象。

图 5.1、5.2 分别是无沙粒沉积，爬电距离 $d=4\text{cm}$ 时平板模型直流正、负极性电压下的闪络过程。

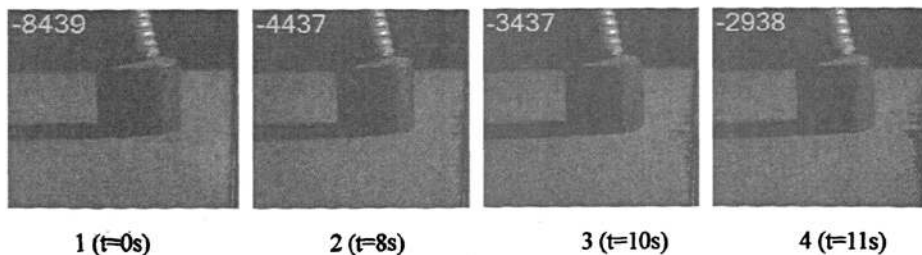
由图 5.1、5.2 可知，直流电压下，无沙粒沉积的平板模型无滑闪放电，电晕放电持续一段时间后，电弧突然出现贯通高压级和接地极，形成完全闪络。由表 4.1

图 5.1 无沙粒沉积, 爬电距离 $d=4\text{cm}$ 时平板模型直流正极性闪络过程Fig. 5.1 The flashover process of flat plate model with $d=4\text{cm}$ under positive polarity voltage图 5.2 无沙粒沉积, 爬电距离 $d=4\text{cm}$ 时平板模型直流负极性闪络过程Fig. 5.2 The flashover process of flat plate model with $d=4\text{cm}$ under negative polarity voltage

和 4.2 可知, 随着爬电距离的增加, 直流闪络电压增加也较快。直流电压下平板表面的电压分布比交流电压下的要均匀些^[52], 因此没有明显的滑闪放电现象, 沿面闪络电压也较交流电压下的沿面闪络电压高的多, 由表 3.1 和表 4.1、4.2 中的试验数据对比也和这点吻合。

5.2.2 有干沙粒沉积时平板模型沿面闪络过程

在试验过程中, 发现沙粒沉积密度对平板模型直流闪络过程有影响, 因此在不同沉积密度下进行了沙粒沉积对平板模型放电特性影响的试验研究, 在试验过程中沙粒沉积密度分别采用 6.25、12.5、18.75、25、37.5、和 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 。从放电过程可以发现, 放电是沿着沙粒与玻璃板的交界面发展, 根据放电过程的不同, 分为两种情况: 直流正极性电压和直流负极性电压下玻璃板上沉积的沙粒运动有显著的区别。



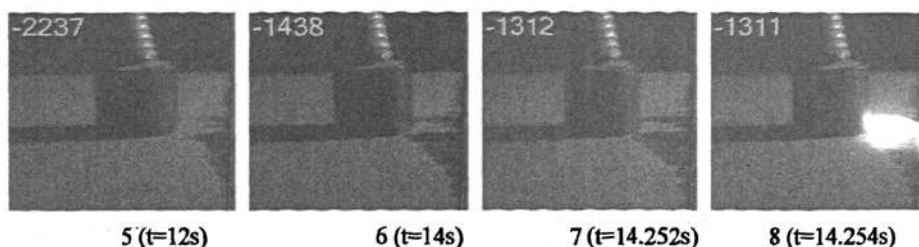


图 5.3 沙粒沉积密度为 $18.75\text{mg}/\text{cm}^2$ 、距离 $d=3\text{cm}$ 时平板模型直流负极性闪络过程

Fig. 5.3 The flashover process of flat plate model with $d=3\text{cm}$ and $\sigma_s=18.75\text{mg}/\text{cm}^2$
under negative polarity voltage

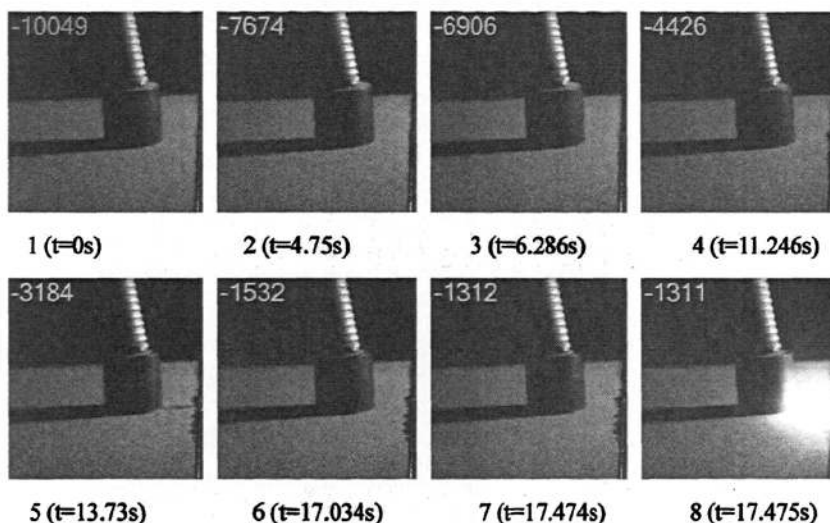
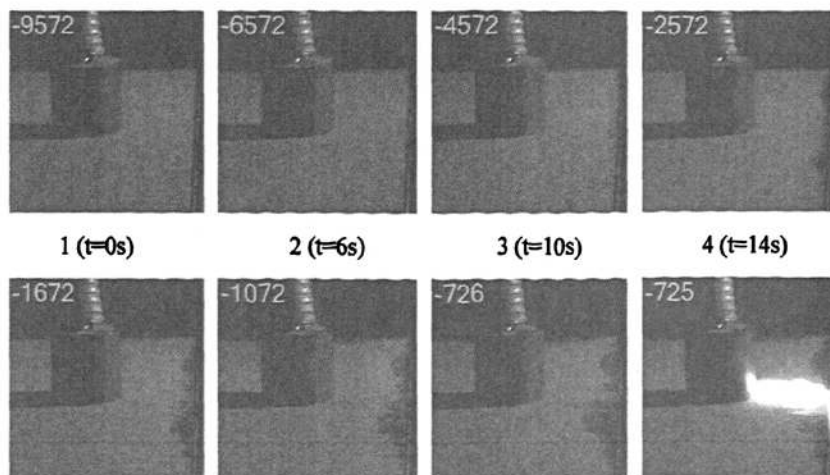


图 5.4 沙粒沉积密度为 $18.75\text{mg}/\text{cm}^2$ 、距离 $d=3\text{cm}$ 时平板模型直流正极性闪络过程

Fig. 5.4 The flashover process of flat plate model with $d=3\text{cm}$ and $\sigma_s=18.75\text{mg}/\text{cm}^2$
under positive polarity voltage



5 ($t=15.8s$) 6 ($t=17s$) 7 ($t=17.692s$) 8 ($t=17.694s$)
 图 5.5 沙粒沉积密度为 $18.75mg/cm^2$ 、距离 $d=5cm$ 时平板模型直流负极性闪络过程

Fig. 5.5 The flashover process of flat plate model with $d=5cm$ and $\sigma_s=18.75mg/cm^2$
 under negative polarity voltage

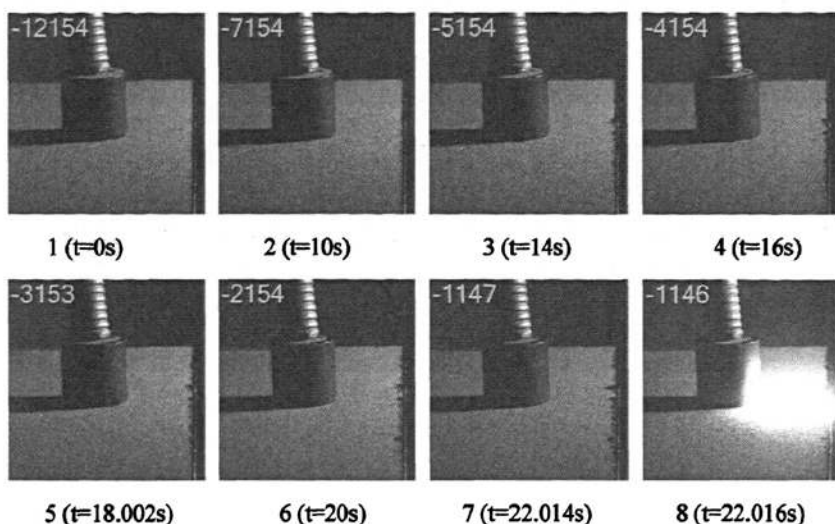


图 5.6 沙粒沉积密度为 $18.75mg/cm^2$ 、距离 $d=5cm$ 时平板模型直流正极性闪络过程

Fig. 5.6 The flashover process of flat plate model with $d=5cm$ and $\sigma_s=18.75mg/cm^2$
 under positive polarity voltage

由图 5.3 至图 5.6 可知：直流负极性电压作用下，离高压电极最近的玻璃板边缘上的沙粒在电场力的作用下首先运动，此处玻璃板边缘先出现无沙区域，随着电压的上升，运动的沙粒越来越多，无沙区域向高压电极逐渐推进， $d=3cm$ （图 5.3）时无沙区域会推进到高压电极边缘时突然发生沿面闪络； $d=5cm$ （图 5.5）时，无沙区域推进到离最近的玻璃板边缘 $3cm$ 时发生沿面闪络。而直流正极性电压作用下，离高压电极最近的玻璃板边缘上的沙粒在电场力的作用下首先运动，此处玻璃板边缘先出现无沙区域，随着电压的上升，运动的沙粒越来越多，无沙区域向高压电极逐渐推进，但较负极性的推进慢得多，到发生沿面闪络时最多的只推进了 $1cm$ ，闪络后沿闪络路径出现了一条无沙区域。

无论是直流正极性还是负极性电压作用下，沙粒的运动是从电场集中的平板玻璃边缘开始，在电场力的作用下向高压电极运动，出现“无沙区域”。正、负极性电压作用下的沙粒运动情况相比：负极性下的沙粒运动的速度快，形成的无沙区域大。

5.2.3 有湿沙粒沉积时平板模型沿面闪络过程

当沙尘受潮时，由于沙粒含水量以及沙粒与沙粒、沙粒与玻璃板之间的吸附力

的变化, 其闪络过程呈现出与干沙时不同的现象。

图 5.7、5.8、5.10 分别为爬电距离为 5cm 沙粒沉积密度为 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 时含水量为 10% 平板模型直流正极性闪络过程图、含水量为 5.3% 平板模型直流正极性闪络过程图、含水量为 7.8% 平板模型直流负极性闪络过程图。图 5.9 为爬电距离为 5cm 沉积密度为 $25\text{mg}/\text{cm}^2$ 含水量为 5.3% 平板模型直流负极性闪络过程图。

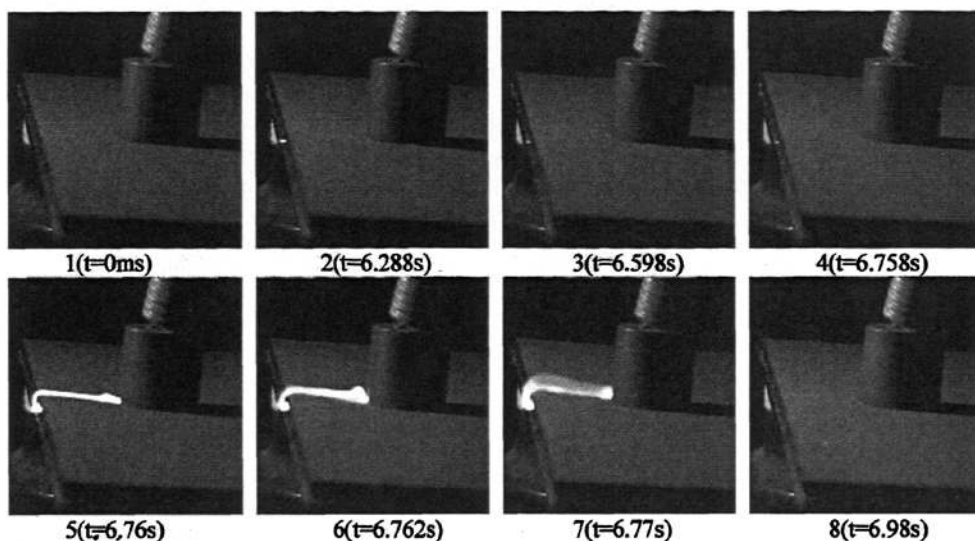


图 5.7 沙粒沉积密度为 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 含水量为 10%、爬电距离为 5cm 时直流正极性闪络过程

Fig. 5.7 The flashover process of flat plate model with $d=5\text{cm}$ $\eta=10\%$ and $\sigma_s=50\text{mg}/\text{cm}^2$ under positive polarity voltage

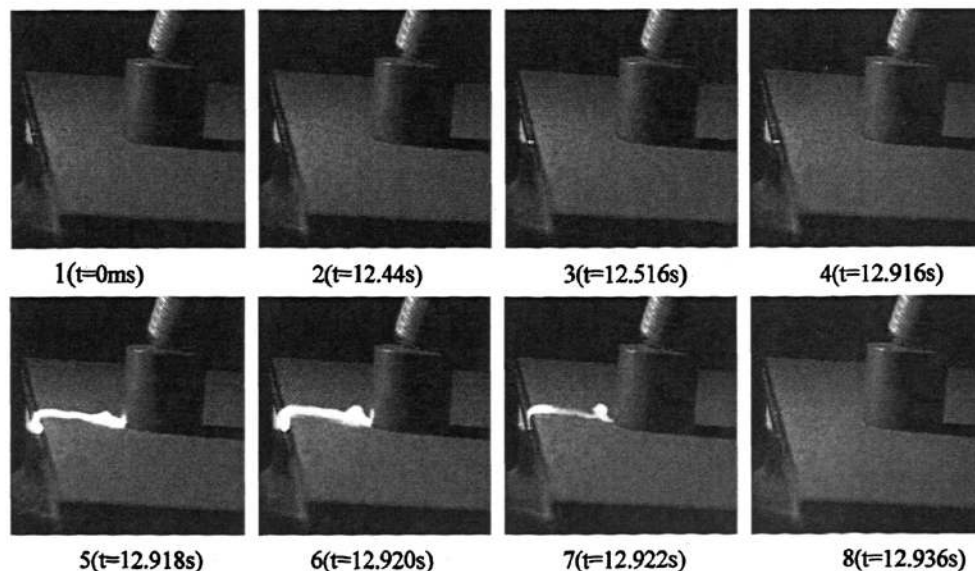


图 5.8 沙粒沉积密度为 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 含水量为 5.3% 、爬电距离为 5cm 时直流正极性闪络过程

Fig. 5.8 The flashover process of flat plate model with $d=5\text{cm}$ $\eta=5.3\%$ and $\sigma_s=50\text{mg}/\text{cm}^2$
under positive polarity voltage

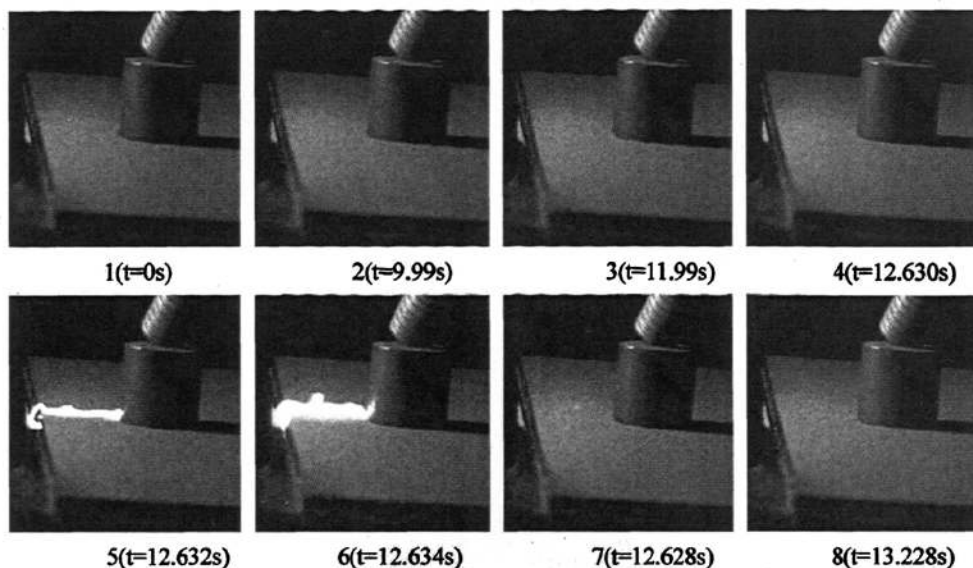
图 5.9 沙粒沉积密度为 $25\text{mg}/\text{cm}^2$ 含水量为 5.3% 、爬电距离为 5cm 时直流负极性闪络过程

Fig. 5.9 The flashover process of flat plate model with $d=5\text{cm}$ $\eta=5.3\%$ and $\sigma_s=25\text{mg}/\text{cm}^2$
under negative polarity voltage

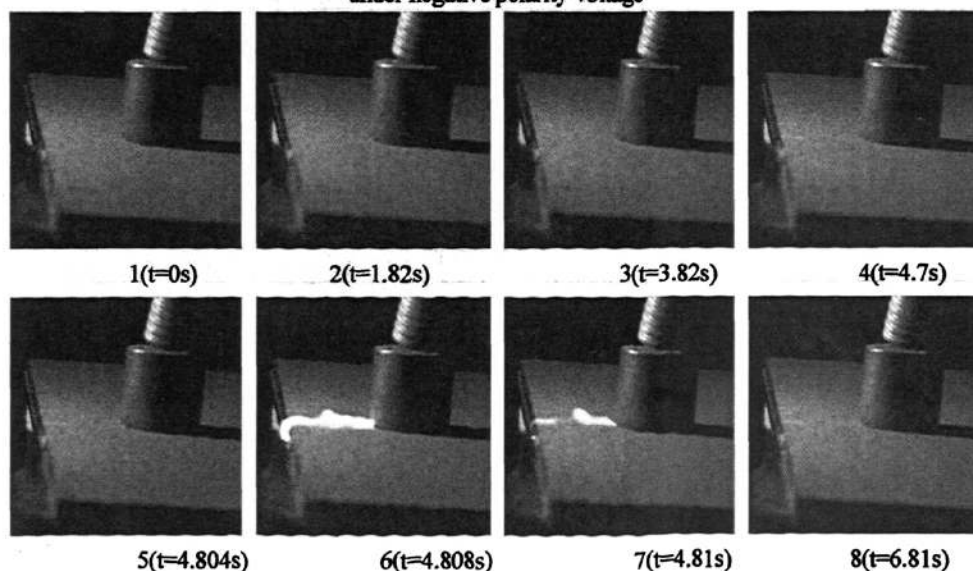
图 5.10 沙粒沉积密度为 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 含水量为 7.8% 、爬电距离为 5cm 时直流负极性闪络过程

Fig. 5.10 The flashover process of flat plate model with $d=5\text{cm}$ $\eta=7.8\%$ and $\sigma_s=50\text{mg}/\text{cm}^2$
under negative polarity voltage

随着含水量的增加,沙粒与沙粒、沙粒与玻璃板之间的粘附力的增加。在施加电压的初始阶段,与干沙相比沙粒的运动不显著,不容易形成无沙区域,并且随着含水量的增加沙粒在电场力的作用下运动更加困难。直流正极性下,当沙粒含水量大于等于 5.3% 时,随着施加电压的升高,高压电极和玻璃板边缘附近的湿沙粒被烘干;随着施加电压的继续升高,玻璃板边缘出现明显的局部电弧,如图 5.7-2 到 5.7-4 和图 5.8-2、5.8-3 所示;施加电压进一步提高后,局部电弧贯穿高压极和接地极,形成沿面完全闪络。而直流负极性下,当沙粒含水量大于等于 2.7% 时,随着施加电压的增加,高压电极和玻璃板边缘附近的湿沙粒被烘干,出现干沙区域,如图 5.10-4 所示;随着:施加电压进一步提高,局部电弧贯穿高压极和接地极,形成沿面完全闪络。

升压过程中可以看到当沙粒含水时沿面放电电弧的发展过程和污秽沿面放电极为相似,先在高压电极边缘和玻璃板边缘出现局部电弧,随着电压的升高局部电弧不断发展,最后贯通形成沿面闪络;且沙尘湿润时沙闪络电压的极性效应和污秽时也一样,因此,沙粒湿润后可视为一种特殊的污秽。

5.3 交流电压下绝缘子的沙闪络过程

使用 HG-100K 高速摄像机对 XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流沙闪络过程进行了拍照, HG-100K 高速相机每秒拍 250 张,分析其闪络过程。闪络过程如图 5.11 至图 5.20 所示。

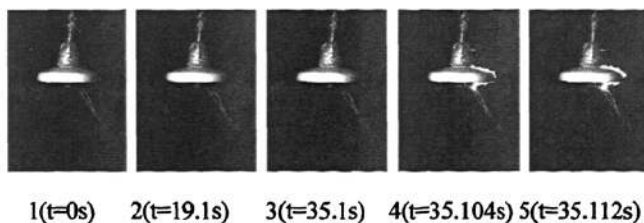


图 5.11 无风无沙时 XP-70 瓷绝缘子的交流闪络过程

Fig.5.11 The flashover process of the XP-70 porcelain insulator in normal ambient air under AC voltage

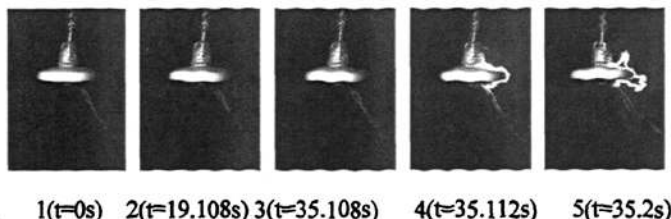
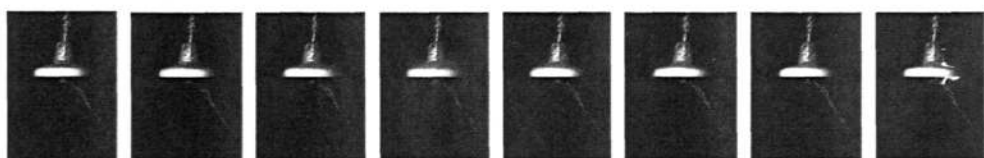


图 5.12 有风有沙, 风速为 6m/s 时 XP-70 瓷绝缘子的交流闪络过程

Fig.5.12 The flashover process of the XP-70 porcelain insulator in the wind sand air (wind speed=6m/s) under AC voltage

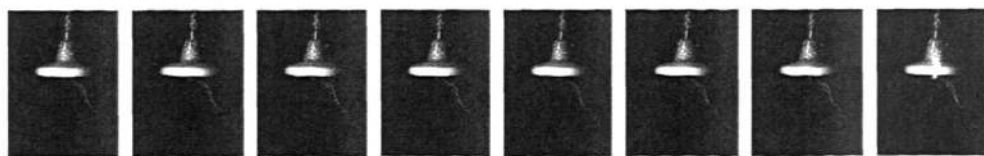
由图 5.11 可以看出, 交流电压下, XP-70 瓷绝缘子在无风沙时, 其干闪过程如下, 随着施加电压的升高, 钢脚处先出现电晕, 电晕声随着施加电压的升高越来越大, 电压达到一定值, 电弧沿绝缘子表面贯通钢脚和钢帽, 形成完全闪络, 如图 5.11-4、5。图 5.12 是有风有沙, 风速为 6m/s, 空间沙尘密度为 5g/m^3 时 XP-70 绝缘子的交流闪络过程。从试验中可以看出, 在风的作用下, 沙粒不断撞击绝缘子表面, 却很少有沙粒沉积在绝缘子表面, 如图 5.12-1、2、3 所示; 施加电压升高的过程中, 先出现电晕, 电晕声从小到大, 然后局部电弧飘起, 最后贯通两级, 形成完全闪络, 如图 5.12-4、5 所示。



1(t=0s) 2(t=17s) 3(t=21s) 4(t=25s) 5(t=27s) 6(t=29s) 7(t=35.084s) 8(t=35.088s)

图 5.13 XP-70 瓷绝缘子上表面沉积 245mg/cm^2 干沙粒的交流闪络过程

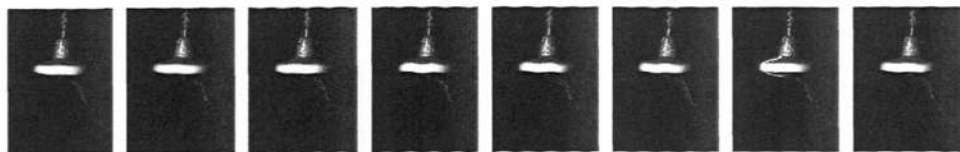
Fig.5.13 The flashover process of the XP-70 porcelain insulator when the deposition density of dry sand on the upper surface is 245mg/cm^2 under AC voltage



1(t=0s) 2(t=17.404s) 3(t=19.404s) 4(t=21.404s) 5(t=25.404s) 6(t=27.404s) 7(t=34.975s) 8(t=34.980s)

图 5.14 XP-70 瓷绝缘子上表面沉积 18mg/cm^2 干沙粒的交流闪络过程

Fig.5.14 The flashover process of the XP-70 porcelain insulator when the deposition density of dry sand on the upper surface is 18mg/cm^2 under AC voltage



1($t=0s$) 2($t=12.191s$) 3($t=14.691s$) 4($t=16.191s$) 5($t=18.691s$) 6($t=20.035s$) 7($t=20.039s$) 8($t=20.199s$)

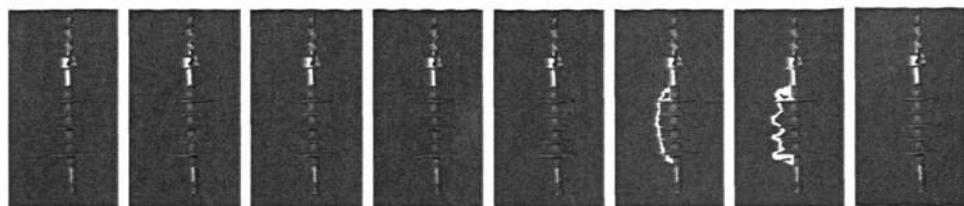
图 5.15 XP-70 瓷绝缘子上表面沉积 $25mg/cm^2$ 湿沙粒的交流闪络过程

Fig.5.15 The flashover process of the XP-70 porcelain insulator when the deposition density of damp sand on the upper surface is $25mg/cm^2$ under AC voltage

图 5.13 是交流电压下, XP-70 瓷绝缘子上表面沉积 $245mg/cm^2$ 干沙粒的闪络过程。从试验中可以看出, 随着施加电压的升高, 绝缘子表面的沙粒逐步带上了电荷, 在电场力的作用下, 沙粒在绝缘子上面跳动, 并不断远离钢帽, 向绝缘子边缘处运动, 如图 5.13-3 所示, 与此同时, 钢脚和钢帽处的电晕声越来越大; 随着施加电压的进一步升高, 绝缘子上的沙粒运动越来越剧烈如图 5.13-4 所示; 沙粒开始运动后 8s 后, 绝缘子上表面基本没有沙粒了, 此时电晕声更大了, 如图 5.13-6 所示; 再过 6s 后, 电压达到一定值, 电弧沿绝缘子表面贯通钢脚和钢帽, 形成完全闪络, 如图 5.13-8 所示。

图 5.14 是 XP-70 瓷绝缘子上表面沉积 $18mg/cm^2$ 干沙粒的交流闪络过程。从试验中可以发现, 与沉积 $245mg/cm^2$ 干沙粒闪络过程相比, 沙粒开始运动后, 绝缘子上表面中部出现无沙环, 并不断扩大, 其他阶段两者过程一样。

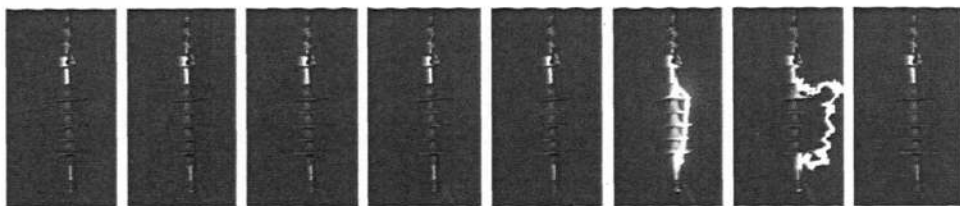
图 5.15 是 XP-70 瓷绝缘子上表面沉积 $25mg/cm^2$ 湿沙粒的交流闪络过程。从图中可以看出, 施加电压升高过程中, 绝缘子表面上的湿沙粒没有明显的运动现象, 此后出现电晕声, 然后电弧贯通两级, 形成完全闪络, 如 5.15-7 所示。这是由于沙粒湿润后, 沙粒与沙粒、沙粒与绝缘子之间的粘附力的增加, 同时沙粒湿润后也很难带上电荷, 受到的电场力较小, 所以在整个闪络过程中, 沙粒无明显运动现象。和沉积干沙粒时相比, 沉积湿沙粒时, 绝缘子表面是湿润的, 起始电压较低, 电晕声也较响。



1($t=0s$) 2($t=33.759s$) 3($t=37.759s$) 4($t=45.759s$) 5($t=53.679s$) 6($t=53.683s$) 7($t=53.699s$) 8($t=53.803s$)

图 5.16 无风无沙时 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流闪络过程

Fig.5.16 The flashover process of the FXBW4-10/70 composite insulator in normal ambient air under AC voltage

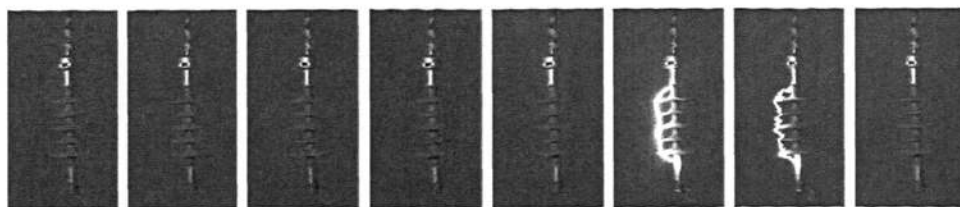


1($t=0s$) 2($t=34.189s$) 3($t=42.189s$) 4($t=50.189s$) 5($t=54.513s$) 6($t=54.517s$) 7($t=54.529s$) 8($t=54.597s$)

图 5.17 有风有沙，风速为 6m/s 时 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流闪络过程

Fig.5.17 The flashover process of the FXBW4-10/70 composite insulator in the wind sand air (wind speed=6m/s) under AC voltage

图 5.16 是交流电压下，FXBW4-10/70 复合绝缘子在无风无沙时的闪络过程。从试验中可以看出，随着施加电压的升高，芯棒两端的金属端头处先出现电晕，电压达到一定值，电弧桥接伞群，沿绝缘子表面贯通芯棒两端的金属端头，形成完全闪络，如图 5.16-6 所示，电弧在电场力的作用下，受伞群的影响，电弧向伞群表面靠近，电弧拉长，颜色也有明亮变成黄色，如图 5.16-7 所示。图 5.17 是有风有沙，风速为 6m/s，空间沙尘密度为 $5g/m^3$ 时 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流闪络过程，和同种条件下 XP-70 瓷绝缘子的闪络过程一样，也有飘弧现象出现。



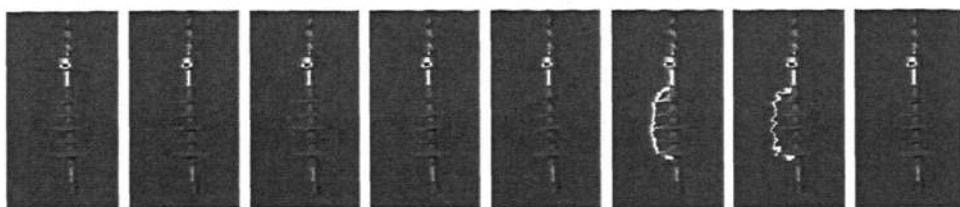
1($t=0s$) 2($t=36.006s$) 3($t=44.006s$) 4($t=48.006s$) 5($t=53.182s$) 6($t=53.186s$) 7($t=53.190s$) 8($t=53.306s$)

图 5.18 FXBW4-10/70 复合绝缘子上表面沉积 $245mg/cm^2$ 干沙粒的交流闪络过程

Fig.5.18 The flashover process of the FXBW4-10/70 composite insulator when the deposition density of dry sand on the upper surface is $245mg/cm^2$ under AC voltage

图 5.18 是交流电压下，FXBW4-10/70 复合绝缘子上表面沉积 $245mg/cm^2$ 干沙粒的闪络过程。从试验中可以看出，随着施加电压的升高，沙粒在绝缘子上面跳动，

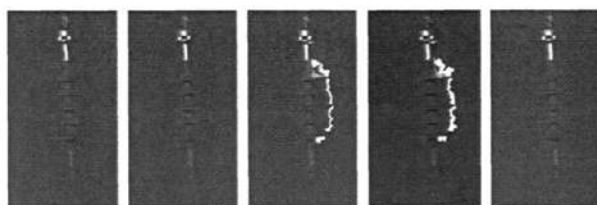
如图 5.18-3 所示；随着施加电压的进一步升高，绝缘子表面上的沙粒运动越来越剧烈，绝缘子周围也充满了落下的沙粒，如图 5.18-4 所示；闪络发生前一帧照片，大伞上面还有一层沙粒，小伞上面沙粒残余量很小，如图 5.18-5 所示；施加电压达到一定值，电弧贯通芯棒两端的金属端头，形成完全闪络，放电通道周围是浓密的、剧烈运动的沙粒，并伴随“噼噼啪啪”的声音，如图 5.18-6、7 所示。



1($t=0s$) 2($t=34.832s$) 3($t=46.832s$) 4($t=40.832s$) 5($t=51.688s$) 6($t=51.692s$) 7($t=51.696s$) 8($t=51.816s$)

图 5.19 FXBW4-10/70 复合绝缘子上表面沉积 $18\text{mg}/\text{cm}^2$ 干沙粒的交流闪络过程

Fig.5.19 The flashover process of the FXBW4-10/70 composite insulator when the deposition density of dry sand on the upper surface is $18\text{mg}/\text{cm}^2$ under AC voltage



1($t=0s$) 2($t=48.172s$) 3($t=48.176s$) 4($t=44.8180s$) 5($t=48.276s$)

图 5.20 FXBW4-10/70 复合绝缘子上表面沉积 $25\text{mg}/\text{cm}^2$ 湿沙粒的交流闪络过程

Fig.5.20 The flashover process of the FXBW4-10/70 composite insulator when the deposition density of damp sand on the upper surface is $25\text{mg}/\text{cm}^2$ under AC voltage

图 5.19 是 FXBW4-10/70 复合绝缘子上表面沉积 $18\text{mg}/\text{cm}^2$ 干沙粒的交流闪络过程。从试验中可以看出随着施加电压的升高，靠近接地端的大伞上出现无沙区域，如图 5.19-2 所示；之后 2s 到 3s，其他两个大伞和两个小伞上面的沙粒也开始远离芯棒运动，无沙区域不断扩大，如图 5.19-3、4 所示，同时，芯棒两端的端头处的电晕声越来越大；沙粒开始运动后 7s 后，靠近高压端的大伞和两个小伞上的沙粒基本上没有了，另外两个大伞上还剩少量的沙粒，此时电晕声更大了，如图 5.19-5 所示；施加电压达到一定值，形成完全闪络，放电通道周围有少量运动的沙粒，如图 5.19-6 所示。

图 5.20 是 FXBW4-10/70 复合绝缘子上表面沉积 $25\text{mg}/\text{cm}^2$ 湿沙粒的交流闪络过程，从试验中发现，和同种条件下 XP-70 瓷绝缘子的闪络过程一样。

5.4 本章小结

本章利用高速摄像机拍摄了平板模型和两种真型绝缘子在风沙环境中以及沙粒沉积其表面后的闪络过程。

直流电压下，干沙粒从平板边缘处出现无沙区域，向高压电极推进，且负极性下的沙粒运动的速度快，形成的无沙区域大；湿沙粒在平板表面极少运动，而有干沙带出现。

XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子在交流电压下，大风下绝缘子闪络出现飘弧现象；绝缘子表面沉积干沙粒被电场力“吹”下绝缘子表面，放电通道周围有带电沙粒运动；沉积的湿沙粒基本上不运动。

6 结论与展望

6.1 结论

本文在重庆大学沙尘模拟实验室,以平板模型和 XP-70 瓷绝缘子、FXBW4-10/70 复合绝缘子为研究对象,研究沙尘对绝缘子和平板模型交、直流闪络特性的影响规律,得出:

①XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流闪络电压随风速的增大而升高,且有风有沙时的闪络电压比有风无沙时稍低;在沙粒荷质比从 $5 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 升到 $30 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 时,XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子沙闪络电压降低。

②绝缘子上表面沉积干沙尘时,XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子的交流沙闪络电压与绝缘子的干闪络电压相比略有下降;而沉积湿沙尘时,两者的沙闪络电压分别低于沉积干沙时闪络电压的 16.13%和 10.26%,对 XP-70 瓷绝缘子和 FXBW4-10/70 复合绝缘子其降低的程度相当于污秽等级小于 0.05mg/cm^2 。

③直流电压下,平板模型沙闪络电压特性存在明显的极性效应。在有风有沙和有风无沙时,直流负极性下,平板模型沿面闪络电压随风速的增大而升高,有沙尘闪络电压比无沙尘时低;而直流正极性下,有沙尘闪络电压比无沙尘时高。在一定电荷量变化范围内,沿面直流沙闪络电压受沙尘的电荷量影响很小。沙粒粒径在 $100\text{-}350\mu\text{m}$ 之间变化时对平板模型的沿面沙闪络电压影响极小。

④当干沙粒沉积到绝缘表面时,随着沉积量的增加,交流和直流负极性电压作用下,沙闪络电压存在极小值;而直流正极性电压下,存在极大值。平板模型沿面直流沙闪络电压都随沙粒含水量的增大而降低,沙粒湿润后可视为一种特殊的污秽,此时的沿面闪络电压较干沙时的闪络电压降低 52.34%。

⑤利用高速摄像机拍摄了平板模型和真型绝缘子在风沙环境中以及沙粒沉积时的闪络过程。得出直流电压下,干沙粒时在平板边缘处形成无沙区域,并向高压电极推进,且负极性下沙粒运动的速度快,形成的无沙区域大;平板表面上的湿沙粒在加压过程中极少运动,有干沙带出现。大风下绝缘子闪络出现飘弧现象;绝缘子表面沉积的干沙粒被电场力“吹”走,放电通道周围有带电沙粒运动,而沉积的湿沙粒不运动。

6.2 下一步研究工作的展望

尽管本文的研究工作已取得了一定的成果,但仍有一些内容需作进一步的研究。展望今后进一步研究的方向,主要集中在以下几个方面:

①介质表面上沉积的干沙粒在电压升高的过程中,在电场力的作用下运动,形

成无沙区域,使得平板上的沙粒分布不均匀,平板上的局部场强增大,是导致干沙粒沉积影响沿面闪络特性的原因。实际中的沙粒沉积状况就是不均匀的。因此,下一步可以进行沙粒不均匀分布时的绝缘子沿面闪络特性研究。

②FXBW4-10/70 复合绝缘子在其上表面沉积干沙粒时,交流电压升高的过程中,沙粒带上了电荷,在电场力的作用下在绝缘子上面跳动,并不断背向芯棒运动,闪络完成时,放电通道周围有大量的带电沙粒。因此,下一步的研究可以集中在沙粒如何带电(感应带电、吸附空间电荷等方式),沙粒带电后,分析其受力情况(重力、摩擦力、电场力等),也可分析带电沙粒对原电场的畸变程度。

③测量沉积沙粒时绝缘沿面放电过程中的泄漏电流和电压波形,分析其临闪前电流变化规律,为建立沙闪络电压模型打下基础。

④在风沙环境中,可以进行沙耐压试验,先在试品上加上一定的电压,再吹风吹沙,金属电网加压,使沙粒带电,这样更接近实际情况。

⑤研究大风(大于 10m/s)时绝缘子的沙闪络特性,风场下的沙尘在绝缘子表面分布情况。

致 谢

三年研究生生活弹指一挥间，我十分庆幸在求学的道路上遇到了很多好老师。在硕士论文即将脱稿之际，我要深深地感谢导师司马文霞教授给予我各方面的照顾。司马老师在我的学业和论文上给予了耐心的指导。本论文从选题到最后的修改定稿，无不渗透了司马老师的心血与汗水。司马老师广博的学识，严谨的作风，对科研教学的高度责任感，更使学生受益非浅，将永远激励我发奋向上。在此谨向恩师致以最诚挚的谢意！

在攻读硕士期间还得到了杨庆、袁涛、胡建林、胡琴、陈明英、卢至等实验室老师及吴亮、程浩、武坤、谢博、杨夏飞、俞鹏和施建等众多同学的帮助，在此一并感谢！

另外，还要深深地感谢我的家人，他们是我求学道路上坚实的后盾，为了我的成长付出了无尽的辛劳。

最后，忠心地感谢在百忙之中评阅论文及参加答辩的各位专家、老师！

马高权

2009年5月于重庆大学

参考文献

- [1] 王凌. 北方沙尘天气频繁[J]. 陕西气象, 2006.7, 32(7):126-127.
- [2] 郑晓静, 周义和. 风沙运动研究中的若干关键力学问题[J]. 力学与实践, 2003, 25(2):1-6.
- [3] 郑晓静, 黄宁, 周义和. 风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1): 77-86.
- [4] 黄宁, 郑晓静. 风沙运动力学机理研究的历史、进展与趋势[J]. 力学与实践, 2007, 29(4): 9-16
- [5] 董治宝, 王涛, 屈建军. 100a 来沙漠科学的发展[J]. 中国沙漠, 2003.1, 23(1): 1-5.
- [6] 郑晓静. 风沙运动的力学机理研究[J]. 科学导报, 2007, 25(14): 22-27
- [7] Latham J. The electrification of snowstorms and sandstorms [J]. Q J R Meteor Soc, 1964, 90: 91-95.
- [8] Gill E WB. Frictional electrification of sand[J]. Nature, 1948, 18 (4) : 568-569.
- [9] Zhong Yu, Zongren Peng, Peng Liu, Xinqiao Wu. The Influence of Charged Sand Particles on the External Insulation Performance of Composite Insulators in Sandstorm Condition [J]. Properties and applications of Dielectric Materials, 2006. 8th International Conference on June 2006: 542 – 545.
- [10] Greeler, R Leach. A preliminary assessment of the effects of electrostatics on Aeolian process[R]. Rep Plane, Geol. Program. NASA TM79729, 1978, 236-237.
- [11] 黄宁, 郑晓静. 风沙流中沙粒带电现象的实验测试[J]. 科学通报, 2000, 45(20): 2232-2235.
- [12] Schmidt DS, RS Schmidt. Electrostatic force on saltating sand[J]. JGR, 1998, 103 (4) : 8997-9001.
- [13] 董治宝, 郑晓静. 中国风沙物理研究 50a[J]. 中国沙漠, 2005.11, 25(6): 795-815.
- [14] 郑晓静. 风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展[J]. 力学进展, 2004.2, 34(1): 77-86.
- [15] 何丽红, 郑晓静. 风沙电多场耦合模型及其对风沙流结构的影响[J]. 兰州大学学报, 2005.6, 41(3): 87-92
- [16] 言穆弘, 屈建军. 张鸿发沙尘暴电效应的实验观测研究[J]. 地球物理学报, 2004.1, 47(1): 47-53.
- [17] 李芳, 屈建军. 风沙电研究的现状及展望[J]. 地球科学进展, 2002.8, 17(4): 572-575.
- [18] 屈建军, 王涛. 沙尘暴风洞模拟实验的综述[J]. 干旱区资源与环境, 2004.3, 18(1): 109-115.
- [19] 张鸿发. 风沙起电的风洞实验研究[J]. 高原气象, 2002.8, 4: 402-407.
- [20] 屈建军. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. 中国科学, 2003.6, 33(6): 593-601.
- [21] 屈建军, 昝瑞平, 等. 扬沙和沙尘暴对导线电位影响的风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2004,

- 25(5): 34-538.
- [22] 鲁录义, 顾兆林, 罗昔联等. 一种风沙运动的颗粒动力学静电起电模型[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6939-6945.
- [23] M.I.Qureshi, A.A. Al-Arainy, N.H. Malik. Performance of rod-rod gaps in the presence of dust particles under lightning impulses[J].IEEE Transactions on Power Delivery April 1991, 6(2): 706-714.
- [24] A.A.Al-Arainy, N.H. Malik, M.I.Qureshi. Influence of desert pollution on the lightning impulse breakdown voltages of rod to plane air gaps[J].IEEE Transactions on Power Delivery, January 1991, 6(1): 421-428.
- [25] M.I.Qureshi, A.A.Al-Arainy, N.H. Malik. Performance of rod-rod gaps in the presence of dust particles under standard switching impulses[J].IEEE Transactions on Power Delivery, July, 1993, 8(3): 1045-1051.
- [26] M.I.Qureshi, A.A.Al-Arainy, N.H. Malik. Influence of Sand/Dust Contamination on the Breakdown of asymmetrical Air Gaps under Switching Impulses[J].IEEE Transactions on Electrical Insulation, April,1994, 1(2): 305-314.
- [27] M.I.Qureshi, A.A.Al-Arainy, N.H. Malik. Influence of Sand/Dust Contamination on the Breakdown of asymmetrical Air Gaps under Lightning Impulses[J].IEEE Transactions on Electrical Insulation, April,1992, 27(2): 193-206.
- [28] 司马文霞, 吴亮, 杨庆. 沙尘对电力系统外绝缘电气特性影响分析[J]. 高电压技术, 2008, 34 (1): 16-20.
- [29] 吴亮. 沙尘环境下空气间隙和平板模型沿面放电特性的研究[D]. 硕士论文, 重庆大学, 2008.5.
- [30] Farag, A.S Zedan, F.M.; Cheng, T.C; etc. New DC insulator design for use in the desert environment [J]. Electrical Insulation, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, April 1990,25(2): 435-448.
- [31] Zedan, F.M,Akbar, Farag.A.S. Review Performance of HV Transmission Line Insulators in Desert Conditions Part I: Review of Research and Methods Adopted Internationally [J].Electrical Insulation, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, April 1983,18(2): 97-109.
- [32] M. Akbar, F. Zedan. Performance of HV transmission line insulators in desert conditions part III pollution measurements at a coastal site in the eastern region of Saudi Arabia[J]. Electrical Insulation, IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE Transactions on, January 1991,6(1): 429-438.
- [33] MUKHERJEE P. K, AHMED A, Electric field distortion caused by asymmetric pollution on

- insulator surfaces[J].IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation , 1999.7, Vol.6, No.2: 175-180.
- [34] Mohamed M.Awad, Hassan M.Said, Bahaa A. Arafa etc. Effect of Sandstorms With Charged Particles on The Flashover and Breakdown of Transmission Lines[J]. CIGRÉ (2002).
- [35] Abdel-Salam H.A. Hamza , Nagat M.K. Abdelgawad and Bahaa A. Arafa. Effect of desert environmental conditions on the flashover voltage of insulators [J].Energy Conversion and Management, October ,2001, 43(2): 2437-2442.
- [36] Ricardo w.s.garcia, Ronaldo Bosignoli and Edegard Gomes Jr. Influence of the non-uniformity of pollution distribution on the electrical behavior of insulators[C]. Proceedings of the 3rd international conference on properties and applications of dielectric materials. Japan(1991).
- [37] 贺博, 万军, 陈邦发, 等. 人工模拟沙尘气候环境下线路绝缘子积污特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1510-1514.
- [38] 王宗海. 扬沙与浮尘的区分方法[J]. 陕西气象, 2002.6, Vol.20, No.2: 44-56
- [39] 马金福. 扬沙和浮尘成因的探讨及其观测[J]. 浙江气象科技, 2000.2, Vol.22, No.1: 44-46.
- [40] 陈志刚. 网状目标法测量雾滴或粉尘荷质比的精度分析[J]. 排灌机械, 2006.8, Vol.24, No.4: 40-43.
- [41] GB/T 4585-2004 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验, 2004.
- [42] 吴世亮, 倪晋仁, 李振山. 沙漠沙的筛分粒径与粒径计粒径的比较实验[J]. 泥沙研究, 2002, 2(1): 60-65.
- [43] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002. 45-49, 75.
- [44] 谢述教. 直流绝缘子串覆冰闪络特性研究[D]. 硕士论文, 重庆大学, 2004.5.
- [45] 王岩. 污秽覆冰绝缘子串交流闪络特性和过程研究 [D]. 硕士论文, 重庆大学, 2004.5.
- [46] 武利会. 海拔 2500m 以下污秽绝缘子直流闪络特性及机理研究[D]. 硕士论文, 重庆大学, 2003.5.
- [47] 蒋兴良, 舒立春, 张志劲, 等. 覆冰绝缘子长串交流闪络特性和放电过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (14): 158-163.
- [48] 司马文霞, 蒋兴良, 武利会, 等. 低气压下覆冰染污 10kV 合成绝缘子直流电气特性[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 122-126.
- [49] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新, 等. 低气压下特高压直流污秽复合绝缘子覆冰闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (6): 7-11.
- [50] 苑吉河, 蒋兴良, 孙才新, 等. 冰柱直流放电特性及路径[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(06): 20-24
- [51] 王进华. 合成绝缘子在污湿环境下交流闪络特性及机理的研究[D]. 硕士论文.重庆大学,

2002.5.

[52] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007. 107-112.

附录：作者在攻读硕士学位期间发表的论文目录

- [1] 司马文霞, 马高权, 杨庆. 风沙条件下的平板模型直流沿面放电特性[J]. 高电压技术, 2008.12, Vol.34, No.12: 2570-2574.