

沙尘环境下空气间隙和平板模型沿面放电特性的研究



重庆大学硕士学位论文

学生姓名：吴 亮

指导教师：司马文霞 教 授

专 业：电气工程

学科门类：工 学

重庆大学电气工程学院

二〇〇八年五月

Study on discharge characteristics of flat model and air gap under sand dust environment



**A Thesis Submitted to Chongqing University
in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering**

by

Wu Liang

Supervisor: Prof. Sima Wenxia

Major: Electrical Engineering

**College of Electrical Engineering of
Chongqing University, Chongqing, China**

May 2008

摘 要

随着我国电力工业的发展,输电电压等级的提高,以及大电网的形成,对电力系统的输变电设备的可靠性提出了更高要求。在我国,沙尘暴活动频繁并且十分强烈。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,形成强烈的负极性电场。而沙尘暴活动过程中形成带电沙粒将对输电线路的相间及相对铁塔空气间隙和绝缘子放电特性产生影响进而影响到电力系统的可靠运行,我国也曾由于扬沙天气而导致电力系统的停电事故发生的相关报道,因此深入而系统的研究沙尘环境对电力系统外绝缘放电特性的影响,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。

沙尘天气一般分为浮尘、扬沙和沙尘暴三种天气情况,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,模拟扬沙天气情况,通过改变风速和沙粒带电量等条件研究沙尘对空气间隙和平板模型沿面工频放电特性的影响。

本文进行了沙尘对空气间隙和平板模型沿面工频放电特性的试验研究,通过改变风速、沙粒带电量以及沙尘浓度等条件,分析沙尘对空气间隙和平板模型工频放电特性的影响,结果表明:在有风有沙和有风无沙时,空气间隙和平板模型沿面工频放电电压随风速的增大而增大;有沙尘条件下,空气间隙和平板模型沿面工频放电电压比无沙尘时要高;在一定电荷量变化范围内,空气间隙和平板模型沿面工频放电电压受沙尘的电荷量影响很小;有沙尘时,空气间隙的工频击穿电压受电极表面沙粒沉积的影响较大,而受间隙之间沙粒的影响很小。

沙粒沉积到平板模型表面后,会改变平板模型表面介质特性,影响平板模型沿面闪络特性,为了分析沙粒沉积对平板模型沿面放电的影响,进行沙粒沉积量、沙粒的含水量对其放电特性和放电过程影响的研究,结果表明:平板模型沿面闪络电压随沙粒沉积密度的变化存在着极小值,当沙粒沉积密度小于 0.05g/cm^2 时沿面放电电压均小于清洁绝缘表面的放电电压;平板模型沿面闪络电压随着沙粒含水量的增加先升高后降低;沙粒的沉积对平板模型沿面闪络过程产生明显影响,当沙粒沉积密度较小时,在闪络过程中形成无沙区域,当沙粒沉积密度较大时,在闪络过程中不会出现明显的无沙区域,其中电源的能量一部分用于维持电弧的燃烧,另一部分消耗在沙粒的运动中。

关键词: 沙尘天气, 空气间隙, 平板模型, 工频放电特性

ABSTRACT

With the rapid development of our power system and the improving of transmission voltage, the reliability power system operation is becoming more and more important. The sand storm is one kind of serious natural disaster. In recent years, Along with the frequent appearance of sand dust weather in our country, the influence of sand dust on electrical discharge of outdoor insulation causes our attention. There are also some reports on the power system tripped-out accidents caused by blowing sand in China.

The weather of sand dust is generally divided into floating dust、 sand-dust storm. considering the conditions of the laboratory, we design the trial device which simulate the weather and study the effect of sand dust to the breakdown characteristics of air gap and plat plane model by the change of wind speed and the charge of sand dust.

The sand storm has changed insulation characteristic of the air. This article study the influence of sand dust to the breakdown characteristics of air gap and plat plane model under frequency voltage. So it is necessary to research the influence of sand dust. The results show the influence degree of sand dust to breakdown voltage and the influence degree of speed to breakdown voltage. The breakdown voltage increases with speed. In a certain range, the breakdown voltage is unrelated with the charge of the sand dust; and the dust particles which settle on the cathode are most responsible for this dust related effects.

After the deposition to the plat plane model, the sand dust will change the surface medium characteristics of the plat plane model and influence the process of flashover of the plat plane model. In order to analysis the effect of sand dust deposition to the surface, this article studies the effect of the deposition density and the moisture Content of sand dust to the characteristics of flashover of the plat plane model, the results show the flashover voltage of the flat model changes with the deposition density and the moisture content of sand dust; the deposition of sand dust influence the process of flashover of the plat plane model, when the deposition density of sand dust is small, it will form no sand region. But there is no sand region with the increasing of the deposition density of sand dust. The energy of power supply is used to maintain burning of electric arc and movement of sand particle.

Key words: weather of sand dust; air gap; plat plane model; breakdown characteristics

目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
1 绪论.....	1
1.1 课题研究的背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 沙尘环境下风沙起电的研究.....	1
1.2.2 沙尘对空气间隙放电特性的影响.....	2
1.2.3 沙尘对绝缘子放电特性的影响.....	9
1.3 本文的研究内容	11
1.4 本章小结	11
2 试验装置及方法.....	12
2.1 试验装置.....	12
2.2 试验电源.....	12
2.3 参数测量方法与仪器	14
2.4 本章小结	15
3 沙尘环境下空气间隙的工频击穿特性的研究	16
3.1 引言	16
3.2 风速对间隙击穿电压的影响.....	16
3.3 沙粒电荷量对间隙工频击穿电压的影响.....	18
3.4 金属电极表面沉积沙尘对间隙工频击穿电压的影响	21
3.5 沙尘环境下空气间隙电场特性的分析及理论分析	22
3.5.1 沙尘环境下空气间隙电场特性的分析.....	22
3.5.2 有沙尘时空气间隙的极性效应.....	24
3.6 本章小结	25
4 沙尘环境下平板模型的沿面工频闪络特性的研究	26
4.1 引言.....	26
4.2 风速对平板模型闪络电压的影响.....	26
4.3 沙粒电荷量对平板模型闪络电压的影响.....	28
4.4 沙粒沉积对平板模型闪络电压的影响.....	29
4.4.1 沙粒沉积量对平板模型闪络电压的影响.....	29
4.4.2 沙粒含水量对平板模型闪络电压的影响.....	30

4.5 本章小结	31
5 沙粒沉积时平板模型沿面闪络过程及机理分析	32
5.1 不同情况下平板模型沿面闪络过程	32
5.1.1 无沙粒沉积时平板模型沿面闪络过程	32
5.1.2 有沙粒沉积时平板模型沿面闪络过程	33
5.1.3 沉积污秽时平板模型沿面闪络过程	36
5.2 沙粒含水量对平板模型沿面闪络过程的影响	37
5.3 有沙粒沉积时平板模型表面电场特性分析	40
5.4 本章小结	46
6 结论	47
致 谢	48
参考文献	49
附录： A.作者在攻读硕士学位期间发表的论文目录	52

1 绪论

1.1 课题研究的背景和意义

随着我国电力工业的发展,输电电压等级的提高,以及大电网的形成,对电力系统的输变电设备的可靠性提出了更高要求。在连网的情况下,系统一旦发生故障,将造成大面积的停电,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。

在我国,沙尘暴活动频繁并且十分强烈,西起新疆的喀什,东至黑龙江的富锦,东北至呼玛,西南至西藏的隆子,涉及新疆、甘肃、青海、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河北、北京、天津、辽宁、吉林、黑龙江、西藏、河南等 15 个省(区)市^[5]。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,北方的沙尘暴向西南部蔓延。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^[6],形成强烈的负极性电场。而沙尘暴活动过程中形成带电沙粒将对输电线路的相间及相对铁塔空气间隙和绝缘子放电特性产生影响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。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 220 千伏红托线、托楼线多次跳闸, 220 千伏(吐鲁番地区的)楼兰至哈密电网线跳闸停电。

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,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

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^{[7]~[11]}及沙尘输送模式^{[12],[13]}等方面进行研究。在国外,相关学者进行了沙尘对棒-棒间隙和棒-板间隙的雷电冲击、操作冲击放电特性^{[15]~[20]}及绝缘子闪络特性影响的试验研究^[21]。

1.2.1 沙尘环境下风沙起电的研究

为了研究风沙电这一自然现象的规律,从野外实地观测和室内实验模拟两个方面来分析。

① 室内实验模拟

兰州大学和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的有关研究人员^{[6]~[13]}通过室内风洞模拟试验,分析沙尘天气电场形成的机理。

1) 沙尘天气的电场

由于沙粒之间及沙粒与地面之间的摩擦使大粒子带上正电荷、小粒子带上负电荷,并且在不同风速下对不同沙径范围的均匀沙进行实验测量,得出当沙粒粒径小于 250 μm 时,运动沙粒带负电荷;当直径大于 500 μm 时带正电荷。风沙流中的电场主要是由运动着的带电沙粒形成的,其方向垂直地面向上。在同样条件下,当风速增大时,沙粒之间及其与床面之间碰撞次数增加,从而导致风速越大,电场越强;在风速相同情况下,粒径较大的粒子较难起动,碰撞数机会较少,产生的电场强度也较小;电场强度随沙粒含水量的增加先减小后增加;电场强度随高度的增加而减小。

2) 沙尘的荷质比

由于沙粒之间及沙粒与地面之间的摩擦使大粒子带上正电荷、小粒子带上负电荷,并且通过试验测量得出负电荷最大荷质比为 304 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 、正电荷最大荷质比为 158 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 。其平均带电量随风速增大而减小;随高度的增大而增大。

② 在野外实地观测

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的有关研究人员^[8]在野外进行实地测量,在不同沙尘天气下产生的电场的强度和极性有较大不同,如表 1.1 所示,其中 E1、E2 和 E3 分别为离地面高 4m、8m 和 16m。并得出在有沙尘天气时,电场强度随风速的变化而变化。

表 1.1 不同沙尘天气时电场强度

Tab.1.1 the electric field under different sand-dust weather

电 场 强 度 沙 尘 天 气	E1(16m)	E2(8m)	E3(4m)
扬 沙	-10~-80kV/m	10~70kV/m	5~35kV/m
强沙尘暴	-40~-190kV/m	-10~70kV/m	-5~-35kV/m

1.2.2 沙尘对空气间隙放电特性的影响

在沙特, M.I.Qureshi、A.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^{[15]~[20]}。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、沙径和间隙上所施加电压有关。

① 沙尘对空气间隙雷电冲击放电特性的影响^{[15]~[17]}

1) 雷电冲击电压作用下沙尘对棒-棒空气间隙放电特性的影响

研究表明^[9]: 在雷电冲击电压($1.2/50\mu s$)作用下, 沙尘对棒-棒间隙 50%击穿电压的影响与间隙距离有关。

在正、负雷电冲击电压作用下, 有沙尘(电极表面和空气间隙均有沙尘)和无沙尘(电极表面和空气间隙均无沙尘)两种情况下空气间隙的 50%击穿电压与间隙距离的关系如图 1.1、图 1.2 所示。其中, 按沙尘对间隙放电特性的影响, 间隙距离 d 分为三个区域, 第①间隙区域: $5\text{cm}<d<15\text{cm}$; 第②间隙区域: $15\text{cm}<d<50\text{cm}$; 第③间隙区域: $d>50\text{cm}$ 。

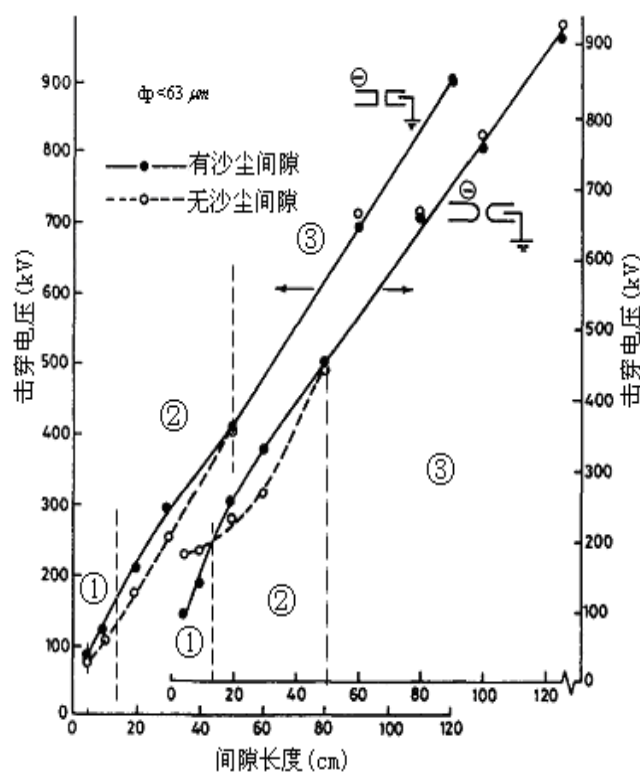


图 1.1 负极性雷电冲击电压作用下间隙 50%击穿电压与间隙距离的关系

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

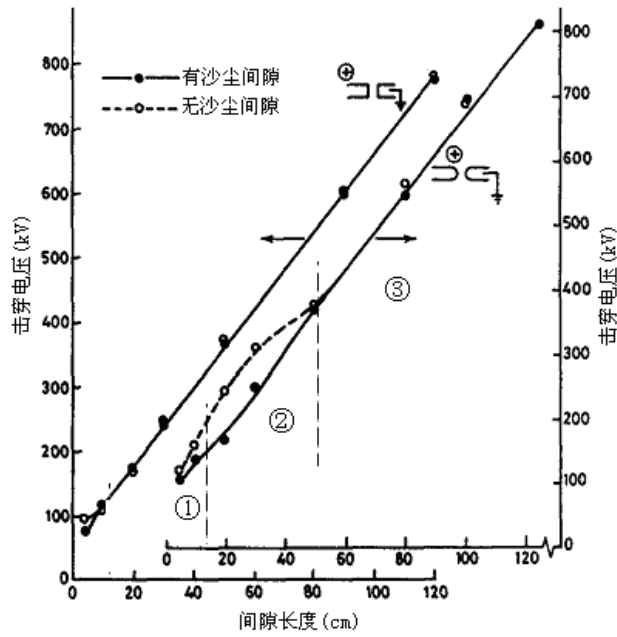


图 1.2 正极性雷电冲击电压作用下间隙 50%击穿电压与间隙距离的关系

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

在第①间隙区域，在负极性雷电冲击电压作用下，对于半球形电极，有沙尘时，间隙 50%击穿电压比无沙尘时低；对于方形电极，有沙尘时，间隙 50%击穿电压比无沙尘时高；对于这两种形状电极，有沙尘时，间隙的击穿电压分散性和击穿时间分散性比无沙尘时小。在正极性雷电冲击电压作用下，对于半球形电极，有沙尘时，间隙 50%击穿电压比无沙尘时低；对于方形电极，有沙尘时，当间隙距离为 5cm 时，间隙 50%击穿电压比无沙尘时小，对于其它长度的间隙，其 50%击穿电压没有明显变化；对于这两种形状电极，有沙尘时，间隙击穿电压的分散性比无沙尘时要小，而击穿时间的分散性和无沙尘时类似。

在第②间隙区域，在负极性雷电冲击作用下，对于半球形电极和方形电极，有沙尘时，间隙 50%击穿电压均较无沙尘时大。在正极性雷电冲击电压作用下，对于半球形电极，有沙尘时，其间隙 50%击穿电压较无沙尘时低；对于方形电极，有沙尘时，间隙 50%击穿电压较无沙尘时无明显变化。

在第③间隙区域，有沙尘时，空气间隙 50%击穿电压值随间隙距离线性增加，如式(1.1)

$$V_{50} = Ad + B \quad (1.1)$$

其中 A 为击穿电压随间隙距离的变化率、 B 为常数。 A 和 B 的大小与电极形状及作用电压极性有关。在此间隙区域，有沙尘时，间隙的击穿电压和击穿时间较无沙尘时均无明显变化。

综上，在第①间隙区域，有沙尘时，间隙的击穿电压较无沙尘时有变化，其变

化情况与作用电压的极性和电极的形状有关。在第②间隙区域，有沙尘时，间隙的正极性击穿电压比负极性击穿电压低，因此在考虑有沙尘时的绝缘配合时，只需考虑正极性击穿电压。在第③间隙区域，有沙尘时，间隙的击穿电压及击穿时间较无沙尘时，无明显变化，在此区域，可不考虑沙尘对间隙放电特性的影响。同时，一些试验比较了有沙尘、无沙尘以及仅电极表面有沙尘（棒-棒间隙之间无沙尘）三种情况下间隙的放电特性，结果表明：间隙放电特性的变化主要是由于阴电极表面上沉积沙尘所引起，而与间隙之间是否有沙尘关系不大。

2) 在雷电冲击电压作用下沙尘对棒-板空气间隙放电特性的影响

在正极性雷电冲击电压作用下，有无沙尘时，棒-板空气间隙击穿电压无明显变化^[11]。在负极性雷电冲击电压作用下，有无沙尘时，棒-板间隙击穿电压与间隙距离有关，如图 1.3 所示。同样，间隙也可分为三个区域：第①间隙区域；第②间隙区域；第③间隙区域。区域的划分与电极的形状和大小有关^[10]。

在第①间隙区域，有沙尘时，棒-板间隙击穿电压及分散性比无沙尘时小，表 1.2 所示为间隙长度为 10cm，棒半径为 38mm 时，有无沙尘时棒板间隙的击穿电压。

表 1.2 10cm 棒-板间隙有无沙尘时击穿电压 (kV)

Tab. 1.2 Breakdown voltage of Rod to Plane Gap (kV)

条件	V_0	$V_{50\%}$	$V_{100\%}$
无沙尘	155-198	215-256	285-315
有沙尘	140-152	157-190	140-220

在第②间隙区域，有沙尘时，间隙击穿电压较无沙尘时高，击穿电压的分散性比无沙尘时小。图 1.4 为在负极性雷电冲击电压作用下间隙距离为 30cm 的击穿概率。

在第③间隙区域，沙尘的存在对间隙 50%击穿电压特性无明显影响。

同时，实验表明：在负极性雷电冲击电压作用下，棒-板间隙的放电特性主要受阴极表面上沉积沙尘影响，阴极表面上沉积沙尘增加了阴极发射电子的数目，当间隙距离比较短时，电子数目的增加导致间隙击穿电压下降；当间隙距离变长，间隙的电场的不均匀度增加，在棒电极头部形成稳定的电晕，沙尘发射的电子加强了电晕的形成，电晕的起始放电电压增大；当间隙距离进一步增长，沙尘发射的电子形成的空间电荷对间隙放电特性的影响变的比较弱，沙尘对间隙击穿电压特性影响不明显。

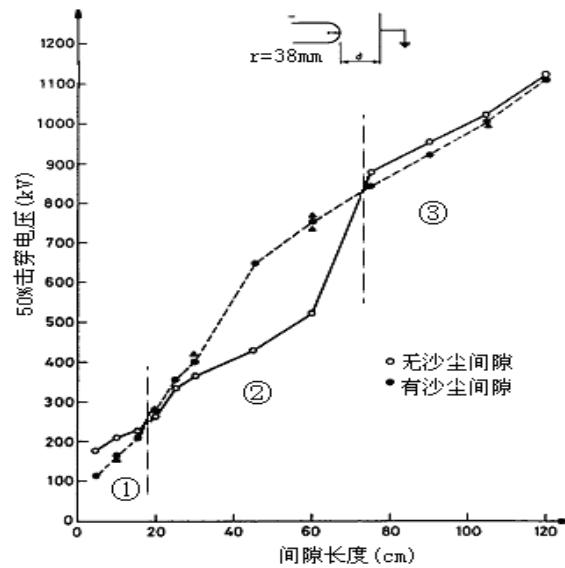


图 1.3 在负极性雷电冲击电压作用下沙尘对击穿电压的影响与间隙距离关系

Fig.1.3 50% breakdown voltage as a function of gap Length under positive lightning impulse

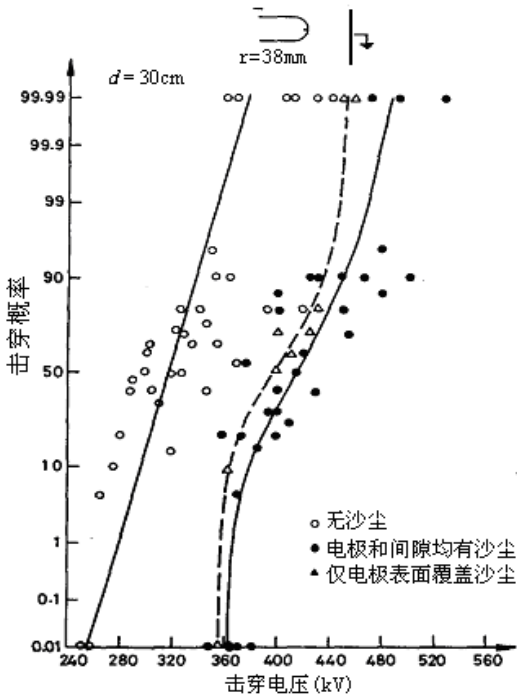


图 1.4 在负极性雷电冲击电压作用下间隙距离为 30cm 的击穿概率

Fig.1.4 Breakdown voltage probability distribution for 30 cm air gap under negative lightning impulse.

② 沙尘对空气间隙操作冲击放电特性的影响^{[18]~[19]}

1) 操作冲击电压作用下沙尘对棒-棒空气间隙放电特性的影响

研究表明^[12]：在操作冲击电压(250/2500 μ s)作用下，沙尘对棒-棒间隙 50%击穿电压的影响与间隙距离有关。

在负极性操作冲击电压作用下, 有无沙尘时, 棒-棒空气间隙 50%击穿电压与间隙距离的关系如图 1.5 所示, 其影响程度与间隙距离有关, 可分为三个区域: 第①间隙区域: $d < 20\text{cm}$; 第②间隙区域: $20\text{cm} < d < 70\text{cm}$; 第③间隙区域: $d > 70\text{cm}$ 。

在第①间隙区域, 对于半球形电极和方形电极, 有沙尘时间隙 50%击穿电压比无沙尘时低; 对于方形电极, 间隙的 50%击穿电压分散性大, 间隙距离为 5cm 和 10cm 时其变化量范围为-2%~+5%。

在第②间隙区域, 对于半球形电极和方形电极, 有沙尘时, 间隙 50%击穿电压比无沙尘时高。间隙平均击穿时间较无沙尘时长, 如图 1.6 所示。

在第③间隙区域, 对于半球形电极和方形电极, 间隙 50%击穿电压随间隙距离线性增加, 具有式(1)类似的函数关系, 对于两种电极 A 均为 7.5kV/cm 。沙尘的存在对间隙击穿电压特性无明显影响。

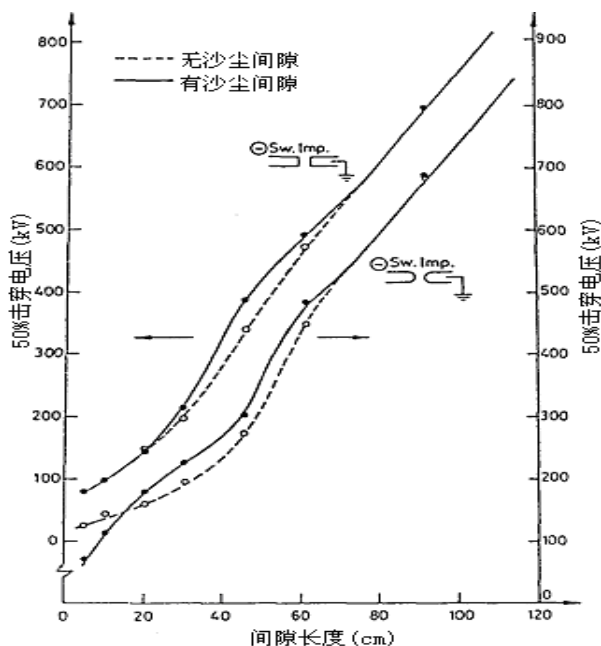


图 1.5 负极性操作冲击电压作用下间隙 50%击穿电压值与间隙距离的关系

Fig.1.5 50% breakdown voltage as a function of gap length under negative switching impulse

在正极性操作冲击电压作用下, 有无沙尘时, 棒-棒间隙 50%击穿电压与间隙距离的关系如图 1.7 所示。

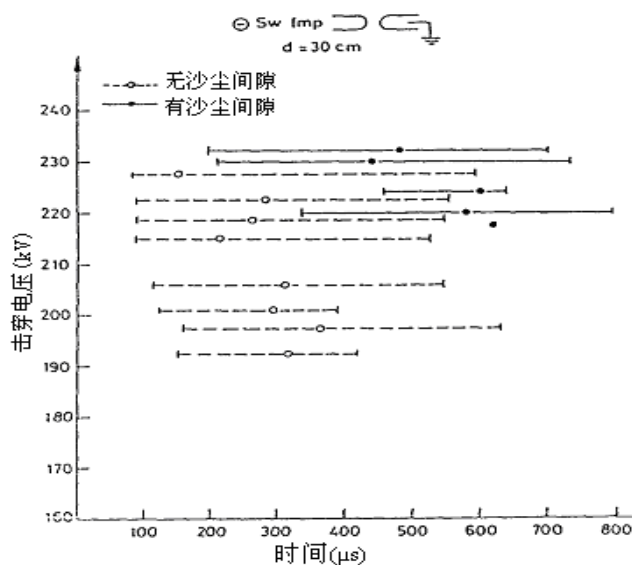


图 1.6 负极性操作冲击电压作用下间隙距离为 30cm 时的伏秒特性

Fig. 1.6 Effect of dust particles on V-t characteristics under negative switching impulse.

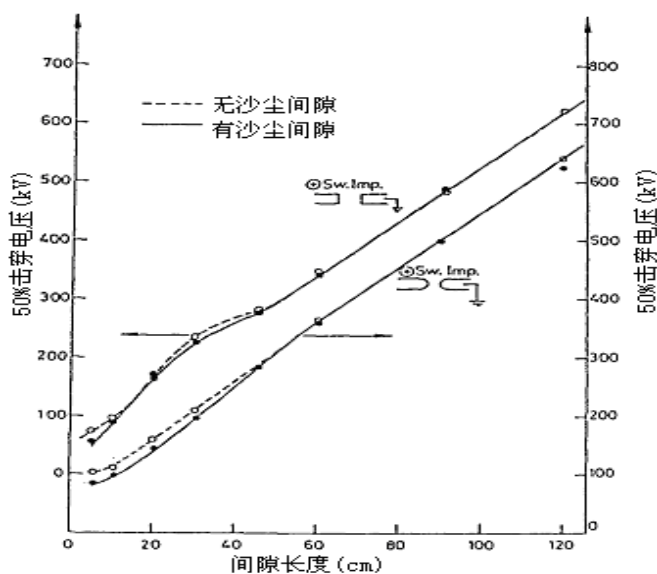


图 1.7 在正极性操作冲击电压作用下间隙 50%击穿电压值与间隙距离的关系

Fig. 1.7 50% breakdown voltage as a function of gap length under positive switching impulse

从图中可看出，对于半球形电极，当间隙距离为 $5\text{cm} < d < 50\text{cm}$ 时，有沙尘时，间隙 50%击穿电压明显较无沙尘时小；当间隙距离大于 50cm 时，沙尘对间隙的 50%击穿电压影响不明显。对于方形电极，间隙距离可分为三个区域：第①间隙区域： $d < 20\text{cm}$ 、第②间隙区域： $20\text{cm} < d < 50\text{cm}$ 、第③间隙区域： $d > 50\text{cm}$ 。对于第①间隙区域，有沙尘时，间隙的 50%击穿电压比无沙尘时小。对于第②间隙区域，有沙尘，间隙的 50%击穿电压比在无沙尘时大。对于第③间隙区域，沙尘对间隙 50%击穿电

压影响不大。

同雷电冲击电压作用下的情况类似，在操作冲击电压作用下，棒-棒间隙放电特性的变化由阴极表面上沉积沙尘所引起。

2) 操作冲击电压作用下沙尘对棒-板空气间隙放电特性的影响

在正极性操作冲击电压作用下，沙尘的存在对棒-板间隙放电特性影响不大。

在负极性操作冲击电压作用下，同在负极性雷电冲击电压作用下的情况类似，沙尘的存在对棒-板间隙击穿电压的影响程度与间隙距离有关，可分为三个区域，短间隙区域；中等长度间隙区域；长间隙区域，区域分界线与电极的形状和大小有关^[13]。

在短间隙区域，有沙尘时间隙的击穿电压比无沙尘时小；间隙的击穿时间比无沙尘时短，其分散性比无沙尘时小。

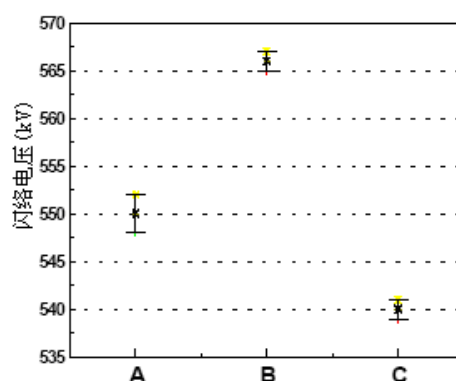
在中等长度间隙区域，有沙尘时，间隙的击穿电压比无沙尘时大；无沙尘时间隙的击穿时刻一般发生在波前或波尾，而有沙尘时间隙的击穿时刻发生在波峰。

在长间隙区域，有无沙尘时，间隙的击穿电压和击穿时间都没有明显的变化。同负极性雷电冲击电压作用下的情况类似，在负极性操作冲击电压作用下，沙尘所引起间隙放电特性的变化主要是由于阴极表面上沉积沙尘所引起，且其变化程度与电极表面上沙尘的存积量有关。

1.2.3 沙尘对绝缘子放电特性的影响

埃及学者 M. Awad^[20]等进行了沙尘对绝缘子闪络特性影响的试验研究，其试品是由 10 片玻璃绝缘子组成的绝缘子串，串长为 180cm、爬电距离为 550cm。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不对称摩擦所带电荷。

研究表明：沙尘的存在使绝缘子的闪络电压明显降低，如图 1.8 所示。



A 无风无沙情况； B 有风无沙情况； C 有沙尘情况

图 1.8 沙尘对绝缘子闪络电压的影响

Fig 1.8 Effect of natural desert pollution on the insulators flashover voltage.

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 1.9 所示。沙尘环境下绝缘子闪络电压同金属网所带电压极性及大小的关系如图 1.10 所示, 由图可知沙尘环境下, 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; 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。

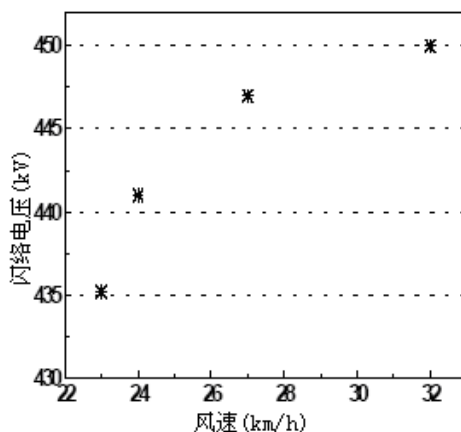
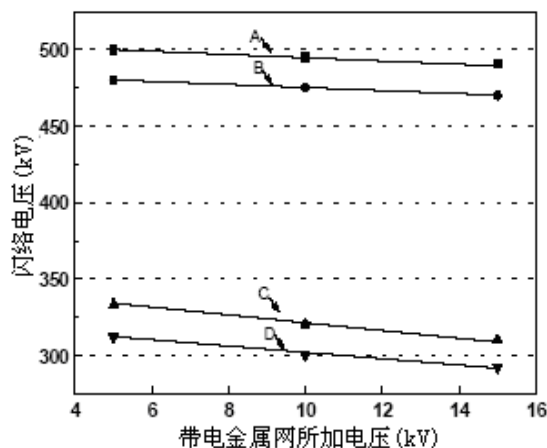


图 1.9 绝缘子闪络电压与风速大小的关系

Fig. 1.9 Effect of wind speed on the flashover of string



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 绝缘子工频闪络电压 (金属网上所施加的为交流电压);

D 绝缘子工频闪络电压 (金属网上所施加的为直流电压)

图 1.10 金属网带不同极性电压及大小时绝缘子闪络电压

Fig. 1.10 Flashover voltage of the string under the effect of charged grid of a.c and d.c voltages

1.3 本文的研究内容

综上所述，在沙尘环境下就空气间隙和绝缘子放电特性进行了一定的研究，但远远不能满足工程需要，理论深度不够。如在空气间隙方面，未见有关沙尘对空气间隙工频、直流放电特性的影响文献。在绝缘子方面，文[21]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，本文以棒-棒和棒-板等典型的极不均匀场间隙及平板模型为研究对象，进行工频电压下沙尘环境的空气间隙及沿面放电特性的试验和理论分析，主要工作如下：

- ① 根据实验室的条件，自建了模拟扬沙天气的模拟试验装置，该装置可模拟不同风速、沙尘的电荷量和沙尘浓度的扬沙天气。
- ② 研究沙尘的风速、沙尘的电荷量以及沙尘的沉积对空气间隙击穿电压的影响；并结合电场仿真分析有沙尘时棒-棒间隙和棒-板间隙击穿特性。
- ③ 研究沙尘的风速、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和电场仿真分析沙粒沉积对平板模型闪络特性的影响。

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不足提出了本论文的研究内容。

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沙尘环境下空气间隙及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^[22-23],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。模拟扬沙环境天气情况,通过改变风速和沙粒带电量等条件研究沙尘对空气间隙及平板模型工频放电特性的影响。

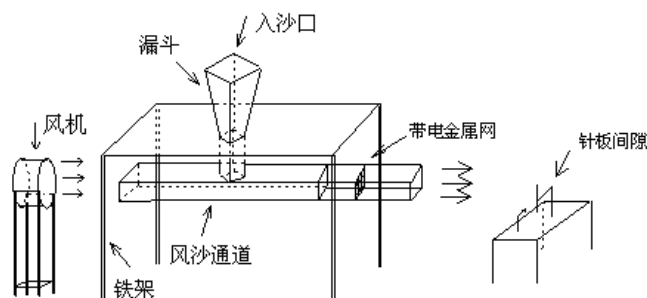


图 2.1 试验装置示意图

Fig. 2.1 The schematic of test device

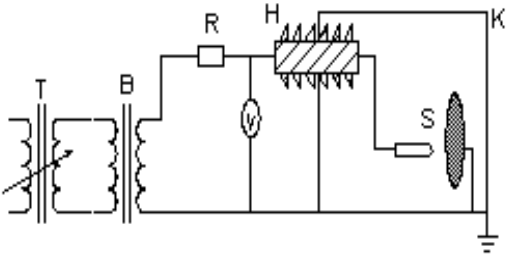
该模拟装置包括:风机采用轴流通风机,额定功率为 2.5 千瓦,其风速可调,风速最大可达 10m/s;主体装置由铁架支撑,进沙漏斗连接一通道,通道侧面采用玻璃,为了便于观察。前端为带电金属网,其作用是使沙尘带上电荷。该装置可模拟具有一定风速和带电量的沙尘环境。金属网前方放置被试品。铁架高为 1.2m,长为 1.4m,宽为 0.8m。通道高为 0.4m,长为 1.2m,宽为 0.6m。漏斗的上下两个面是正方形,边长分别是 40cm,20cm,高 30cm。试验用沙来源于宁夏沙坡头,其沙径变化范围为 0.1~0.315mm。

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 100kVA;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 100kVA,输入电压 380V,输出电压 0~400V,保护电阻 R 的阻值为 3kΩ。

在工频电压作用下,为了分析沙尘对空气间隙和平板模型放电特性的影响,采

用的被试品为棒—棒和棒—板等典型的极不均匀场间隙及平板模型，如图 2.3、2.4 所示。



T: 调压器, B: 变压器, R: 保护电阻, H: 高压套管, V: 静电电压表 K: 沙尘暴模拟实验室 S: 试品

图 2.2 试验回路

Fig. 2.2 Test circuit

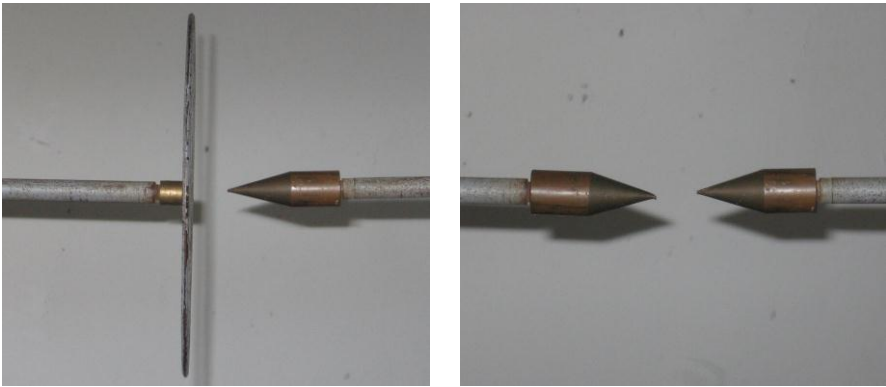


图 2.3 棒-棒间隙及棒-板间隙

Fig. 2.3 The Rod-Rod gap and Rod-Plane gap

其中棒电极头部为圆锥形，半径 1cm，棒长 4cm。板电极是圆形金属板，半径 11cm。试验过程中，加压采用均匀升压法，升压速度为 2kV/s，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。

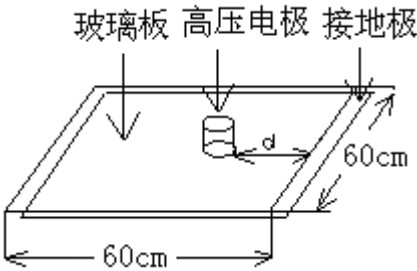


图 2.4 平板模型示意图

Fig. 2.4 the Flat Model

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^[20]，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^[24]，其原理示意图如图 2.5。

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。

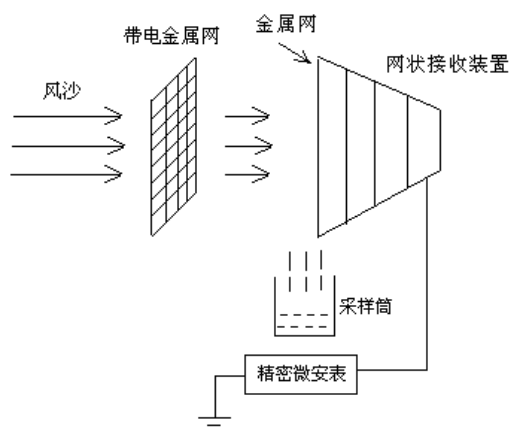


图 2.5 网状目标法原理示意图

Fig. 2.5 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器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。

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 2.6 所示，其中 MS6250 型数字风速仪风速测量范围 $0 \sim 20 \text{ m/s}$ ，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： $1504 \times 1108 \text{ pixels}$ ，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。



图 2.6 HG-100K 高速摄像机

Fig. 2.6 The high speed camera

2.4 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。

3 沙尘环境下空气间隙的工频击穿特性的研究

3.1 引言

扬沙和沙尘暴是一种气象灾害和突发性的地质灾害，不仅强大的风力和浓厚的沙尘给人类造成了巨大危害，而且国内外学者均观测到沙尘暴过境地带的强电场和电火花及对无线电干扰信号的现象^[5-10]。这是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^[8-13]。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串表面放电特性产生影响。如我国曾发生过由于扬沙天气而导致电力系统的停电事故^[7]。

为了分析沙尘对空气间隙放电特性的影响，分别进行了无沙尘、有风无沙（间隙只有自然风吹过）、有风有沙（沙粒上无吸附电荷）和有风有沙（沙粒上有吸附电荷）等四种情况下，风速的大小及沙粒电荷量对空气间隙工频击穿电压影响的试验研究。

3.2 风速对间隙击穿电压的影响

在无沙尘、有风无沙和有风有沙（沙粒无电荷，沙尘浓度为 $2\sim 5\text{g/m}^3$ ）这三种情况下，分析风速与间隙工频击穿电压的关系。

图 3.1 为在有风有沙和有风无沙两种情况下，棒-板间隙距离为 3cm、4cm、5cm 时，风速与间隙击穿电压的关系。图 3.2 为在有风有沙和有风无沙两种情况下，棒-棒间隙距离为 3cm、3.5cm、4cm 时，风速与间隙击穿电压的关系。

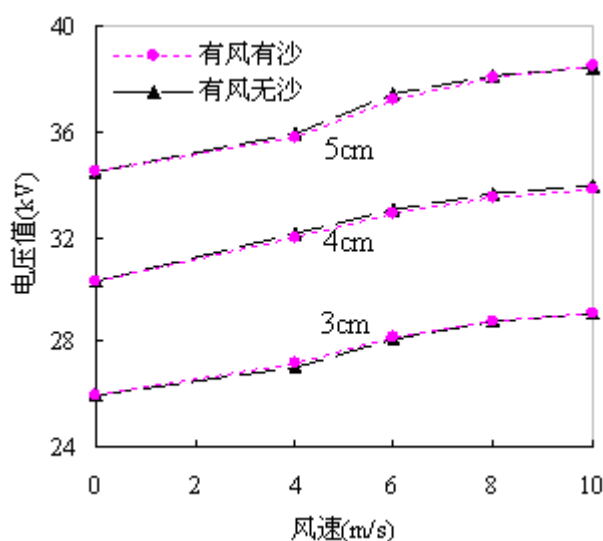


图 3.1 棒-板间隙击穿电压与风速的关系

Fig. 3.1 Breakdown voltage of Rod- Plane gap as a function of wind speed under frequency voltage

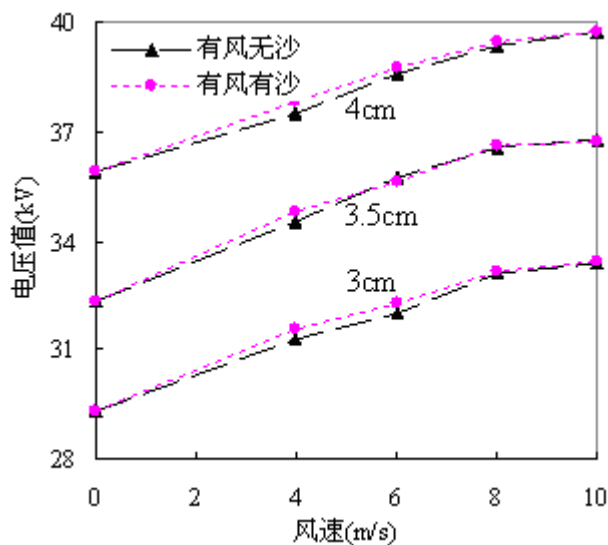


图 3.2 棒-棒间隙击穿电压与风速的关系

Fig. 3.2 Breakdown voltage of Rod- Rod gap as a function of wind speed under frequency voltage

从图 3.1、3.2 可以看出, 在有风有沙和有风无沙时, 间隙的击穿电压随风速的增大而升高, 当风速达到 6m/s 后, 间隙的击穿电压随风速的升高趋势变缓。在相同条件下, 有沙尘时间隙击穿电压与有风无沙时几乎一致。由此可以看出, 沙尘对空气间隙的击穿电压无明显影响。

图 3.3 为在有沙尘和无沙尘两种情况下, 棒-板间隙距离为 3cm、5cm 时, 风速对间隙击穿电压的影响。图 3.4 为在有沙尘和无沙尘两种情况下, 棒-棒间隙距离为 3cm、4cm 时, 风速与间隙击穿电压的关系。

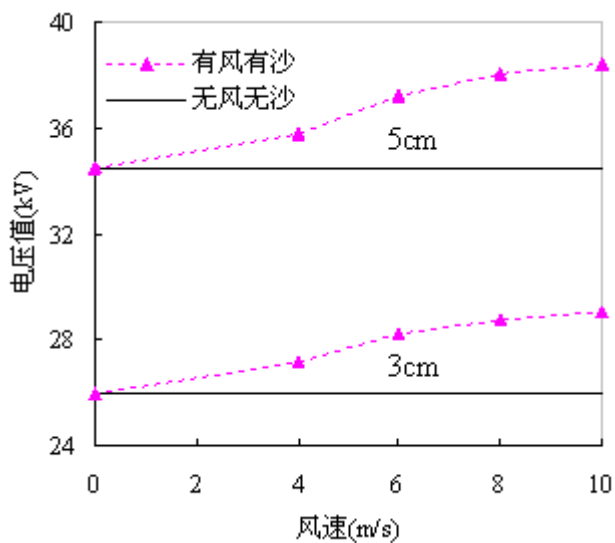


图 3.3 有无沙尘时风速与棒-板间隙击穿电压的关系

Fig. 3.3 Breakdown voltage of Rod- Plane gap as a function of wind speed

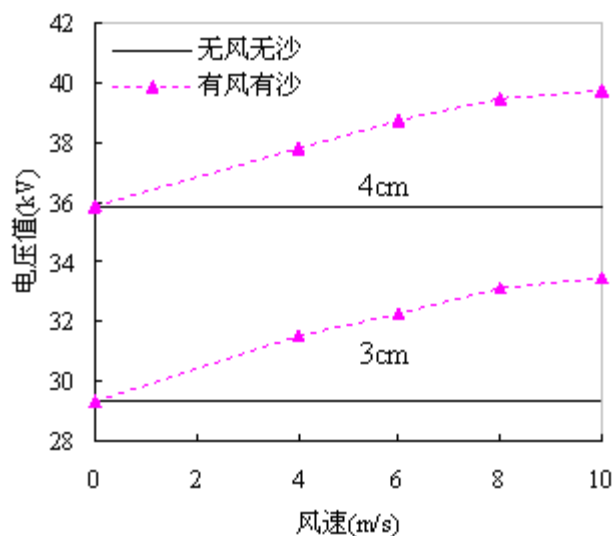


图 3.4 有无沙尘时风速与棒—棒间隙击穿电压的关系

Fig. 3.4 Breakdown voltage of Rod- Rod gap as a function of wind speed

从图 3.3、3.4 中可以看出，有沙尘时，间隙的击穿电压比无沙尘时高，其差值由风引起并随风速的增大而增大，当风速到达 6m/s 后，间隙击穿电压增大趋势变缓。由于大风的作用拉长了放电过程中的电弧长度，并使得放电发展过程保持的时间较长，电弧易于熄灭。由此说明：伴随着大风扬沙的天气，沙尘改变了空气间隙的介质特性，贯穿两电极间间隙的电弧较无风时要长，如图 3.5 所示，同时，电弧易于熄灭。因此导致了在有沙尘条件下，空气间隙工频击穿电压比无沙尘时要高。



(1) 无风沙

(2) 有风沙

图 3.5 棒-棒间隙击穿时电弧

Fig. 3.5 electric arc of rod-rod gap in the breakdown

3.3 沙粒电荷量对间隙工频击穿电压的影响

试验研究进行了风速为 7m/s，沙粒带正、负电荷时（沙尘的浓度为 $2\sim 5\text{g/m}^3$ ），棒—棒间隙的工频击穿电压与沙粒电荷量之间的关系，如图 3.6、3.7 所示。当风速为 7m/s 时，沙粒带正、负电荷时（沙尘的浓度为 $2\sim 5\text{g/m}^3$ ），棒—板间隙的工频击穿电压与沙粒电荷量之间的关系，如图 3.8、3.9 所示。

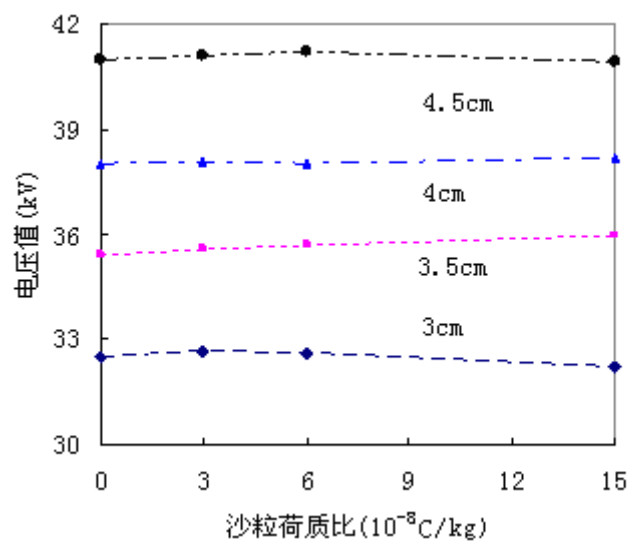


图 3.6 棒—棒间隙击穿电压与沙尘电荷量的关系

Fig. 3.6 Breakdown voltage of Rod-Rod gap as a function of charge of sand dust

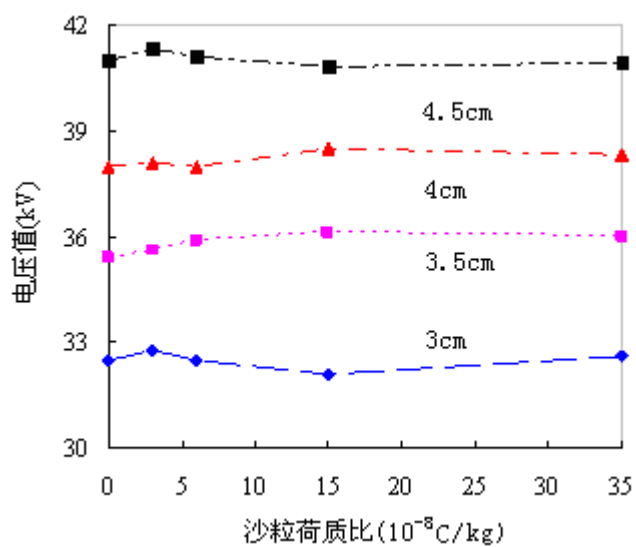


图 3.7 棒—棒间隙击穿电压与沙尘电荷量的关系

Fig. 3.7 Breakdown voltage of Rod-Rod gap as a function of charge of sand dust

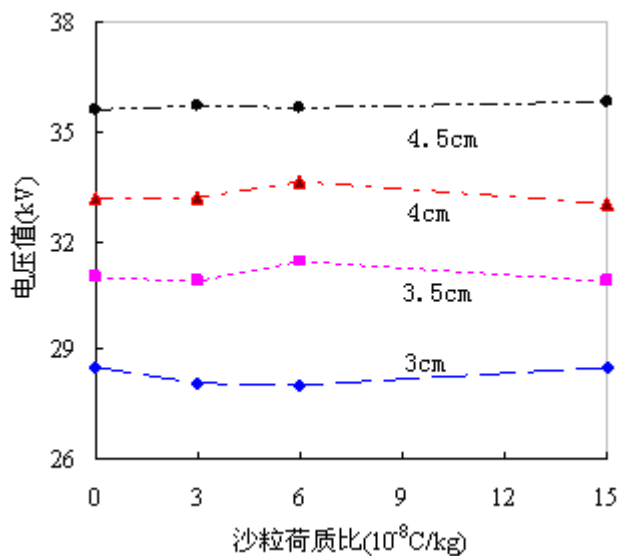


图 3.8 棒-板间隙击穿电压与沙尘电荷量的关系

Fig. 3.8 Breakdown voltage of Rod-Plane gap as a function of charge of sand dust

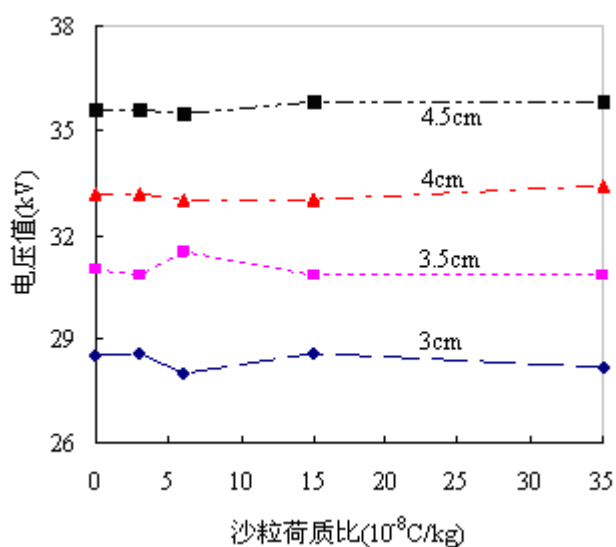


图 3.9 棒-板间隙击穿电压与沙尘电荷量的关系

Fig. 3.9 Breakdown voltage of Rod-Plane gap as a function of charge of sand dust

从图中可以看出,当沙粒电荷量相差 10 倍的变化时对间隙的击穿电压无明显影响。同样通过电场的数值仿真分析结果可得,当沙粒的荷质比在 $1 \times 10^{-7} \text{ C/kg}$ 和 $1 \times 10^{-8} \text{ C/kg}$ 时,棒电极尖端处的电场没有发生明显的改变。只有当沙粒的荷质比达到 $1 \times 10^{-5} \text{ C/kg}$ (对于自然界中的沙尘暴,其沙粒的荷质比^[3,18]约为 $60 \times 10^{-6} \text{ C/kg}$),此时与实际情况相近,棒电极尖端处的电场强度增大 1.24%。因此在一定的沙粒荷质比变化范围内,间隙工频击穿电压不随沙尘电荷量变化而变化。

3.4 金属电极表面沉积沙尘对间隙工频击穿电压的影响

图 3.10、3.11 为棒电极(高压电极)表面有无沙尘时, 棒—棒和棒—板间隙工频击穿电压与间隙距离的关系。从图 3.10、3.11 中可以看出棒电极表面沉积的沙尘对间隙击穿电压有影响, 其影响程度与间隙距离有关。间隙距离为 3cm、4cm、4.5cm、5cm 时, 间隙击穿电压的降幅分别为 1.6%、2.3%、2.9%、3.9%。对于棒—板间隙, 间隙距离为 3cm、3.5cm、4cm、5cm 时, 间隙击穿电压的降幅分别为 2.5%、3.0%、4.6%、5.3%。

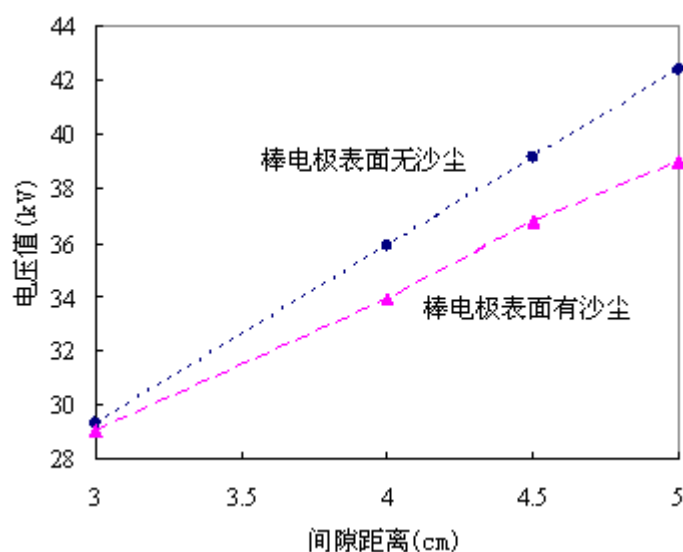


图 3.10 棒—棒间隙击穿电压与间隙距离的关系

Fig. 3.10 Breakdown voltage of Rod-Rod gap as a function of gap distance

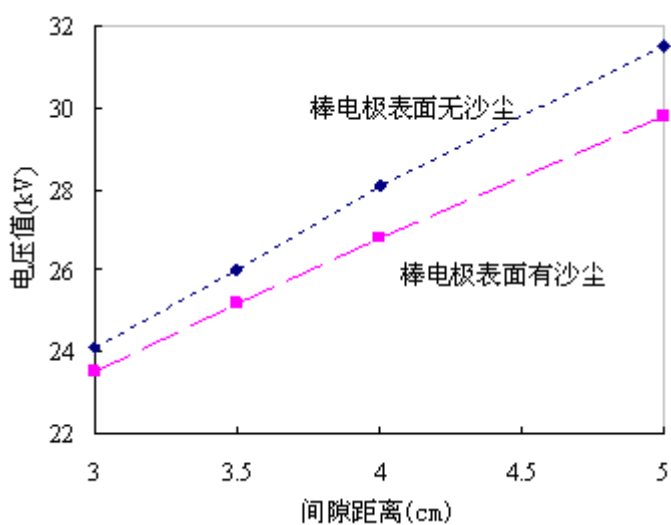


图 3.11 棒—板间隙击穿电压与间隙距离的关系

Fig. 3.11 Breakdown voltage of Rod-Plane gap as a function of gap distance

当棒电极表面附着沙粒时，相当于增加了棒电极表面的粗糙度，在一定程度增加了棒电极附近的电场强度；同时，由于吸附在棒电极上的沙粒会感应出与棒电极极性相同的电荷，因此，在电场力的作用，棒电极上附着的带电荷沙粒会像另一电极方向移动，但由于此电场力通常与其范德华吸附力相差不大，因此，带电荷沙粒移动较困难，同时，当棒电极的极性在交流作用下改变的时候，带电沙粒又将迅速碰撞电极，中和电荷并感应出新的不同极性电荷。因此，沙粒的电荷极性随着棒电极的极性在交流作用下来回改变，但几乎始终与棒电极极性一致，这就增加了棒电极周围的电场，导致击穿电压下降；同时由于沙粒碰撞棒电极，使得棒电极发射电子的能力得到了提高，也在一定程度上导致了击穿电压的下降。

3.5 沙尘环境下空气间隙电场特性及理论的分析

3.5.1 沙尘环境下空气间隙电场特性的分析

弥漫的沙尘改变了纯空气间隙的介质特性，为了进一步分析沙尘对间隙工频放电特性的影响，采用 COMSOL Multiphys 电磁场数值仿真软件分析了无沙尘、沙粒带电与不带电等三种情况下空气间隙的电场特性和电位分布特性。基于有限元和模拟电荷的数值分析方法建立了棒-板间隙三维电场模型，棒-板间隙距离取为 4cm，棒电极施加电压为 30kV，板电极接地，图 3.12 是无沙尘情况下，间隙之间的电位分布。

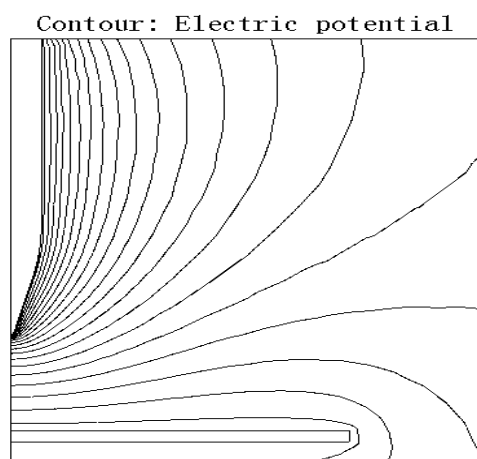


图 3.12 棒-板间隙之间的电位分布

Fig. 3.12 The electric potential of Rod-Plane gap

沙粒均匀分布在间隙中，间隙介质由沙粒和空气组成，用相对介电常数表示间隙介质特性的变化，随着沙尘浓度的变化，间隙相对介电常数的在 1~2 范围内变化，相对介电常数与棒电极尖端电场的关系如表 3.1 所示。

表 3.1 间隙的介质常数与棒电极端部电场的关系

Tab.3.1 the electric field as a function of Dielectric constant				
介质相对介电常数	1	1.005	1.01	1.5
电场强度 (kV/cm)	40.4	40.4	40.4	40.4

电场仿真研究结果表明：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 $2\times 10^{-2}\text{kV/cm}$ 。与棒—板电极间的原电场分布（最大 65.8kV/cm ，最小 2.8kV/cm ）相比，沙粒的附加电场对原电场的影响很小。带电沙粒的存在对棒—板间隙原来的电场整体分布没有明显影响，如图 3.13、3.14 所示。图 3.15、3.16 为有沙尘时棒、板电极附近电场分布图。从图中可以看出，沙尘浓度增加对电场分布的影响不大。

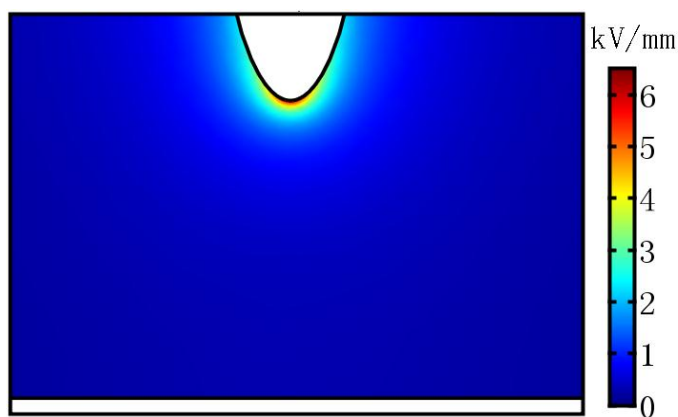


图 3.13 无沙尘时棒—板间隙电场分布图

Fig. 3.13 The electric Field of Rod-Plane gap

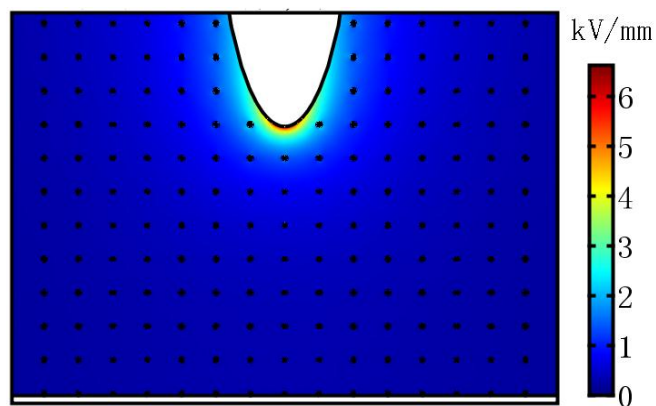


图 3.14 有沙尘时棒—板间隙电场分布图

Fig. 3.14 The electric Field of Rod-Plane gap

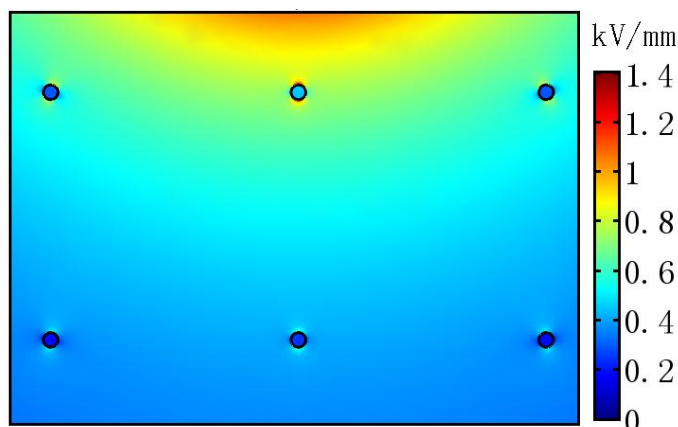


图 3.15 棒电极附近及沙粒附近的电场

Fig. 3.15 The electric Field of Rod-Plane gap

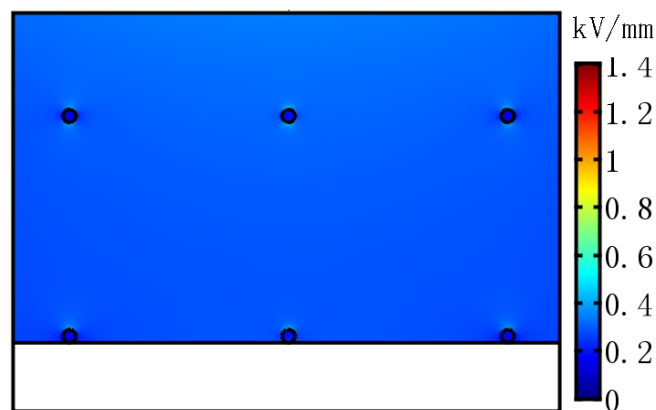
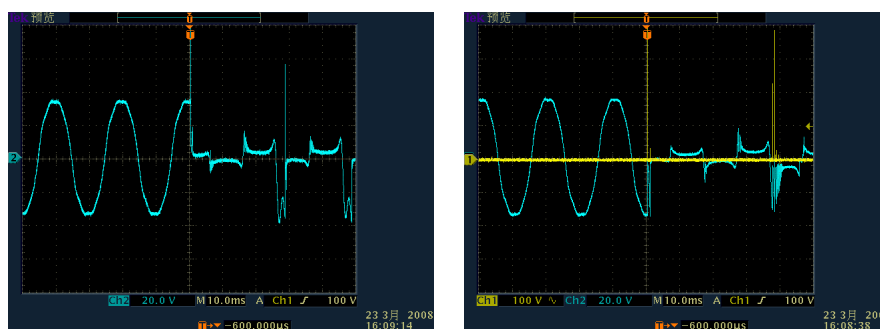


图 3.16 板电极附近及沙粒附近的电场

Fig. 3.16 The electric Field of Rod-Plane gap

3.5.2 有沙尘时空气间隙的极性效应

本文试验中使用数字式示波器测量了空气间隙击穿电压的波形, 如图 3.17 所示, 对其波形进行分析, 可得棒-棒间隙和棒-板间隙在沙尘环境下交流闪络时正半波闪络次数与总闪络次数的比率。对于棒-板间隙, 在有沙尘(沙粒上没有吸附电荷)和有沙尘(沙粒上有吸附电荷)时, 从进行 100 次击穿试验分析, 击穿全部发生在正半波。对于棒-棒间隙, 在有沙尘(沙粒上没有吸附电荷)时, 从进行 100 次击穿试验分析, 正半波击穿 59 次, 占击穿总次数的 59%; 在有沙尘(沙粒吸附正电荷)时, 从进行 50 次击穿试验分析, 正半波击穿 45 次, 占击穿总次数的 90%; 有沙尘(沙粒吸附负电荷)时, 从进行 50 次击穿试验分析, 正半波击穿 43 次, 占击穿总次数的 86%。从所进行的试验结果看, 在沙尘环境下, 棒-板间隙和棒-棒间隙都具有明显的极性效应。



(a) 正极性闪络的电压波形

(b) 负极性闪络的电压波形

图 3.17 有沙尘时空气间隙正、负极性闪络的电压波形图

Fig. 3.17 The wave shape of positive and negative voltage during breakdown process of the gap

3.6 本章小结

① 在有风有沙和有风无沙时，间隙的击穿电压随风速的增大而升高，当风速达到 6m/s 后，间隙的击穿电压随风速的升高趋势变缓。在相同条件下，有沙尘时间隙击穿电压与有风无沙时几乎一致。由此可以看出，沙尘对空气间隙的击穿电压无明显影响。由于大风的作用拉长了放电过程中的电弧长度，并使得放电发展过程保持的时间较长，电弧易于熄灭。因此在有沙尘条件下，空气间隙工频击穿电压比无沙尘时要高。

② 在一定电荷量变化范围内，间隙工频击穿电压受沙尘的电荷量影响很小；电场仿真研究结果表明：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 $2 \times 10^{-2} \text{ kV/cm}$ 。与棒—板电极间的原电场分布（最大 65.8kV/cm，最小 2.8kV/cm）相比，沙粒的附加电场对原电场的影响很小。

③ 沙尘时，间隙的工频击穿电压受电极表面沙粒沉积得影响较大，而受间隙之间沙粒得影响很小。

4 沙尘环境下平板模型的沿面工频闪络特性的研究

4.1 引言

绝缘子的闪络是沿着绝缘子表面和空气间隙串联路径的放电，沉积在绝缘子表面的沙尘和空间的沙尘可能会对绝缘子闪络特性产生影响，本文以平板模型为研究对象，在工频电压下分析沙尘在沿面闪络过程中的作用，研究沙尘对平板模型闪络特性的影响，并分别进行了无沙尘、有风无沙（只有自然风吹过）、有风有沙（沙粒上无吸附电荷）和有风有沙（沙粒上有吸附电荷）等四种情况下，风速的大小及沙粒电荷量对平板模型沿面工频闪络电压影响的试验研究，并考虑沙尘天气后，在平板模型上沉积的沙尘对其闪络特性的影响。

4.2 风速对平板模型闪络电压的影响

在无沙尘、有风无沙和有风有沙（沙粒上无吸附电荷，沙尘浓度为 $5\sim 10\text{g/m}^3$ ）这三种情况下，分析风速与平板模型工频击穿电压的关系。图 4.1 为有风无沙时，闪络间隙距离为 6cm、8cm、10cm、12cm、14cm 时，风速与平板模型闪络电压的关系。

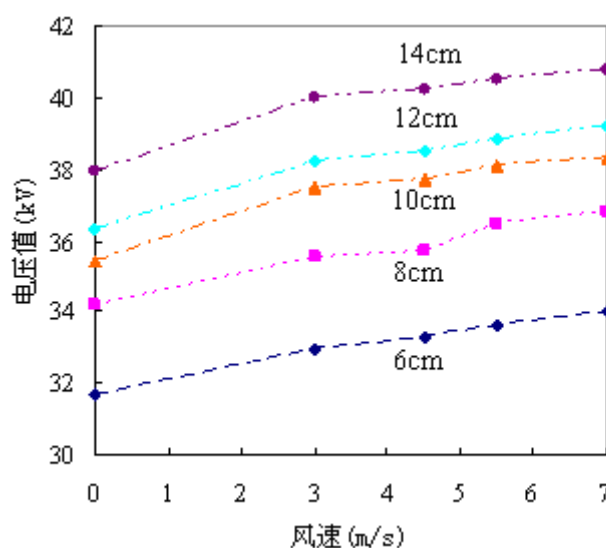


图 4.1 有风无沙时平板模型闪络电压与风速的关系

Fig. 4.1 flashover voltage of the flat model as a function of wind speed under frequency voltage

从图 4.1 中可以看出，平板模型闪络电压随沙尘风速的增大而升高，当风速到达 4.5m/s 后，其升高趋势变缓。在试验中发现由于大风的作用拉长了放电过程中的电弧长度，使沿面闪络的电弧较无风时要长，同时，大风的吹弧使得放电发展过程保持的时间较长，电弧易于熄灭。

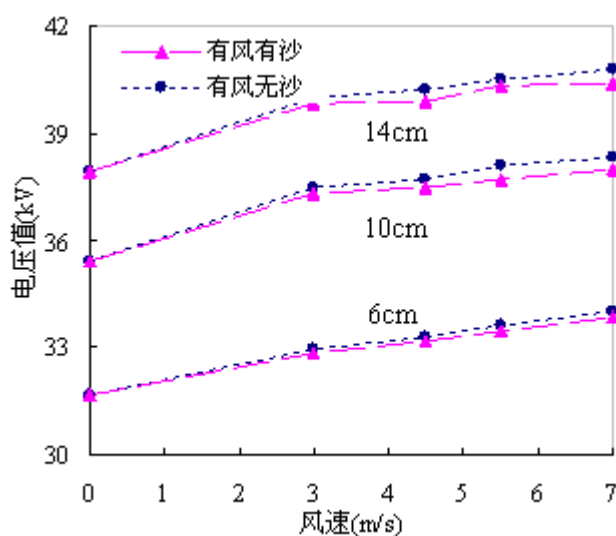


图 4.2 有风有沙及有风无沙时平板模型闪络电压与风速的关系

Fig. 4.2 flashover voltage of the flat model as a function of wind speed

图 4.2 为有风无沙和有风有沙时，闪络距离为 6cm、10cm、14cm，平板模型闪络电压与沙尘风速的关系。从图中可以看出，在有风无沙和有风有沙时，平板模型的闪络电压随着沙尘的风速的增大而升高，当风速到达 4.5m/s 左右，其增大趋势变缓。并发现，有风有沙时，其闪络电压比有风无沙时略低。在试验过程中，发现在有风有沙情况下，在平板模型表面沉积了一些沙尘，从后面试验研究以及电场方面分析可以发现，沉积的沙尘会改变平板模型表面的状况，继而影响平板模型表面的电位分布和平板模型沿面闪络特性。

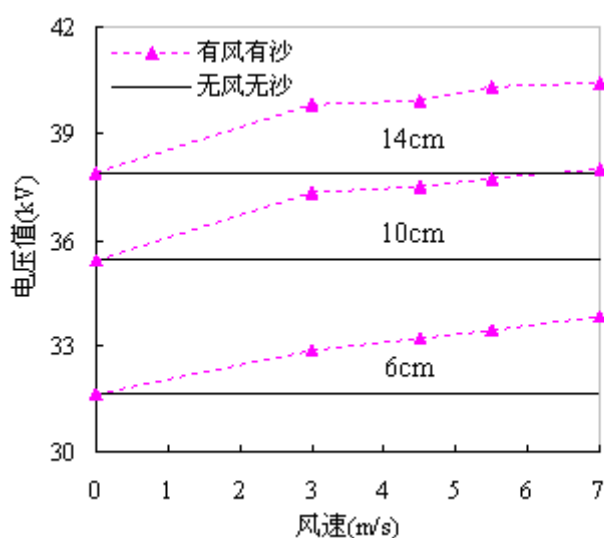


图 4.3 有无风沙时平板模型闪络电压与风速的关系

Fig.4.3 flashover voltage of the flat model as a function of wind speed

图 4.3 为在有沙尘和无沙尘两种情况下，闪络距离为 6cm、10cm 和 14cm 时，风速对平板模型闪络电压的影响。从图 4.3 中可以看出，有沙尘时，平板模型闪络电压比无沙尘时高，其差值由风引起并随风速的增大而增大。

由此说明：有沙尘时，在试验过程中平板模型表面会沉积一定量的沙粒，沙粒的沉积会改变平板模型表面介质特性，进而影响平板模型的闪络特性；在试验中由于大风的作用拉长了放电过程中的电弧长度，电弧较无风时要长，同时，大风的吹弧使得放电发展过程保持的时间较长，电弧易于熄灭。因此导致了有沙尘时，平板模型闪络击穿电压比无沙尘时要高。

4.3 沙粒电荷量对平板模型闪络电压的影响

试验研究进行了风速为 3m/s，沙粒带正、负电荷时（沙尘的浓度为 $5\sim 10\text{g/m}^3$ ），平板模型闪络电压与沙粒电荷量之间的关系，如图 4.4、4.5 所示。

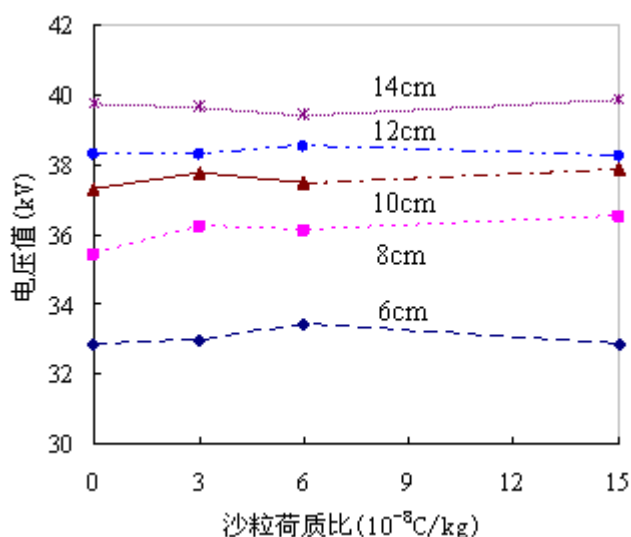


图 4.4 当沙粒带正电荷时平板模型闪络电压与沙尘电荷量的关系

Fig. 4.4 flashover voltage of the flat model as a function of charge of sand dust

从图 4.4、4.5 中可以看出，在沙粒荷质比从 $3\times 10^{-8}\text{C/kg}$ 变化到 $15\times 10^{-8}\text{C/kg}$ 时，沙粒电荷量对平板模型的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。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。

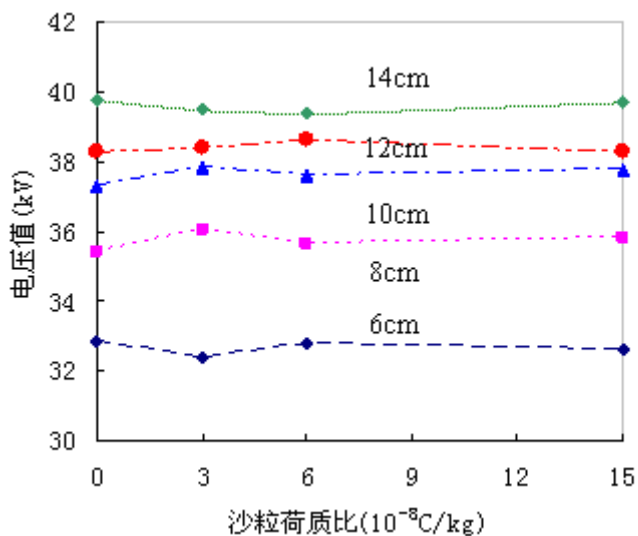


图 4.5 当沙粒带负电荷时平板模型闪络电压与沙尘电荷量的关系

Fig. 4.5 flashover voltage of the flat model as a function of charge of sand dust

4.4 沙粒沉积对平板模型闪络电压的影响

沙粒沉积改变平板模型表面介质特性, 影响平板模型闪络特性, 为了分析沙粒沉积对平板模型沿面放电特性的影响, 进行沙粒沉积量、沙粒含水量对其闪络电压影响的研究。

4.4.1 沙粒沉积量对平板模型闪络电压的影响

图 4.6 为不同闪络距离下, 平板模型闪络电压与沙粒沉积密度的关系。

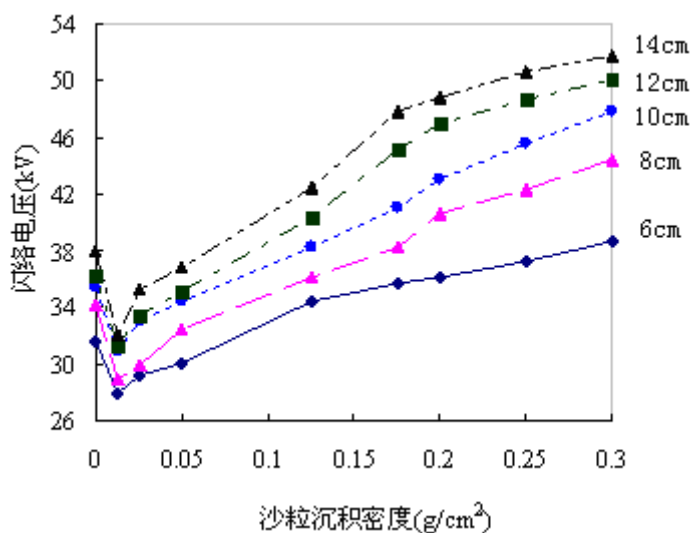


图 4.6 平板模型闪络电压与沙粒沉积量的关系

Fig. 4.6 flashover voltage of the flat model as a function of the deposition density of sand

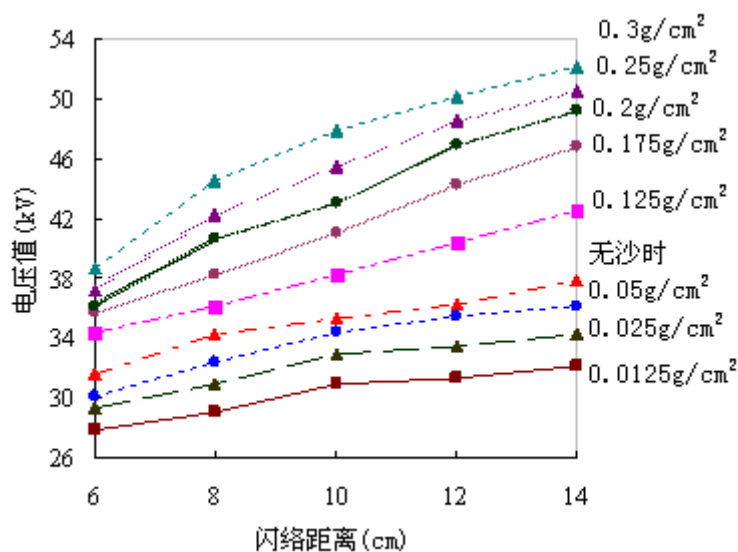


图 4.7 平板模型闪络电压与爬电距离的关系

Fig. 4.7 flashover voltage of the flat model as a function of distance

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, 当沙粒沉积密度小于 $0.05\text{g}/\text{cm}^2$ 时沿面放电电压均小于清洁绝缘表面的放电电压。

4.4.2 沙粒含水量对平板模型闪络电压的影响

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, 为了分析沙粒含水量对其闪络过程的影响, 进行了沙粒含水量对其闪络电压影响的研究。图 4.8 为沙粒沉积密度分别为 $0.03\text{g}/\text{cm}^2$ 和 $0.05\text{g}/\text{cm}^2$ 、距离 d 为 14cm 时平板模型的闪络电压与沙粒含水量的关系,

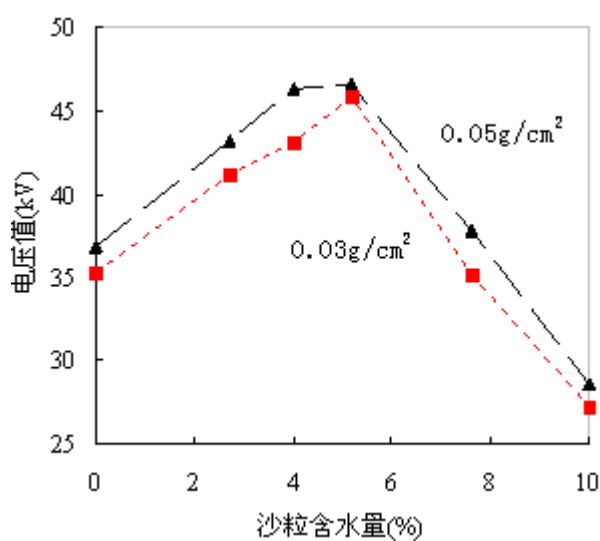


图 4.8 平板模型沿面闪络电压与沙粒含水量的关系

Fig. 4.8 flashover voltage of the flat model as a function of the moisture content of sand

从图中可以看出, 平板模型的闪络电压随着沙粒含水量的增加先升高后降低。当含水量较少时, 泄漏电流较无沙时大, 此时部分电源能量用于沙粒的烘干, 然后才有“无沙带”的形成, 因此其闪络电压比干沙时要高; 当含水量较多时, 由于其湿润程度较大, 泄漏电流的烘干作用不明显, 但从泄漏电流的变化看与污秽放电过程类似, 湿润后沙粒可视为一种特殊的污秽, 此时的闪络电压降低。

4.5 本章小结

① 在有风有沙和有风无沙时, 平板模型的闪络电压随风速的增大而升高, 当风速达到 4.5m/s 后, 平板模型的闪络电压随风速的升高趋势变缓。在相同条件下, 有沙尘时平板模型闪络电压比有风无沙时略低。有沙尘时, 平板模型工频闪络电压比无沙尘时要高。

② 在一定电荷量变化范围内, 平板模型闪络电压受沙尘的电荷量影响很小; 电场仿真研究结果表明: 带电沙粒产生附加电场对平板模型原电场的影响很小。

③ 当沙粒沉积到平板模型后, 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增大先降低后升高, 当沙粒沉积密度小于 0.05g/cm^2 时沿面放电电压均小于清洁绝缘表面的放电电压; 平板模型的闪络电压随着沙粒含水量的增加先升高后降低。

5 沙粒沉积时平板模型沿面闪络过程及机理分析

沙粒的沉积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, 影响平板模型闪络过程, 为了分析沙粒沉积对平板模型沿面放电的影响, 进行了沙粒沉积量和沙粒含水量对平板模型闪络过程影响的研究。试验研究中采用 HG-100K 高速摄像机拍摄了放电过程。

5.1 不同情况下平板模型沿面闪络过程

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, 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形成的发光圈。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。

5.1.1 无沙粒沉积时平板模型沿面闪络过程

图 5.1 为闪络距离为 6cm, 表面无沙粒沉积时平板模型的闪络过程。从图中看出, 由于高压电极边缘是圆弧形的, 沿面放电的辉光放电阶段没有出现, 并且由于平板模型的电场除具有切向分量外, 还具有较大的垂直分量, 在电场垂直分量的作用下, 带电质点不断撞击介质表面, 引起局部温度升高, 随着所施电压的升高, 沿着放电通道流过的带电质点增多, 平板表面局部温度升得更高, 在一定电压下, 温度可高达足以引起气体热电离的数值, 通道中带电质点数目就将剧增, 放电就进入滑闪放电阶段, 如图 5.1-4 所示, 这些放电电弧在不同位置出现, 如图 5.1-4、5.1-6 所示, 滑闪放电电弧的长度随外加电压的增加迅速增长, 当滑闪放电电弧到达另一个电极, 形成完全击穿。

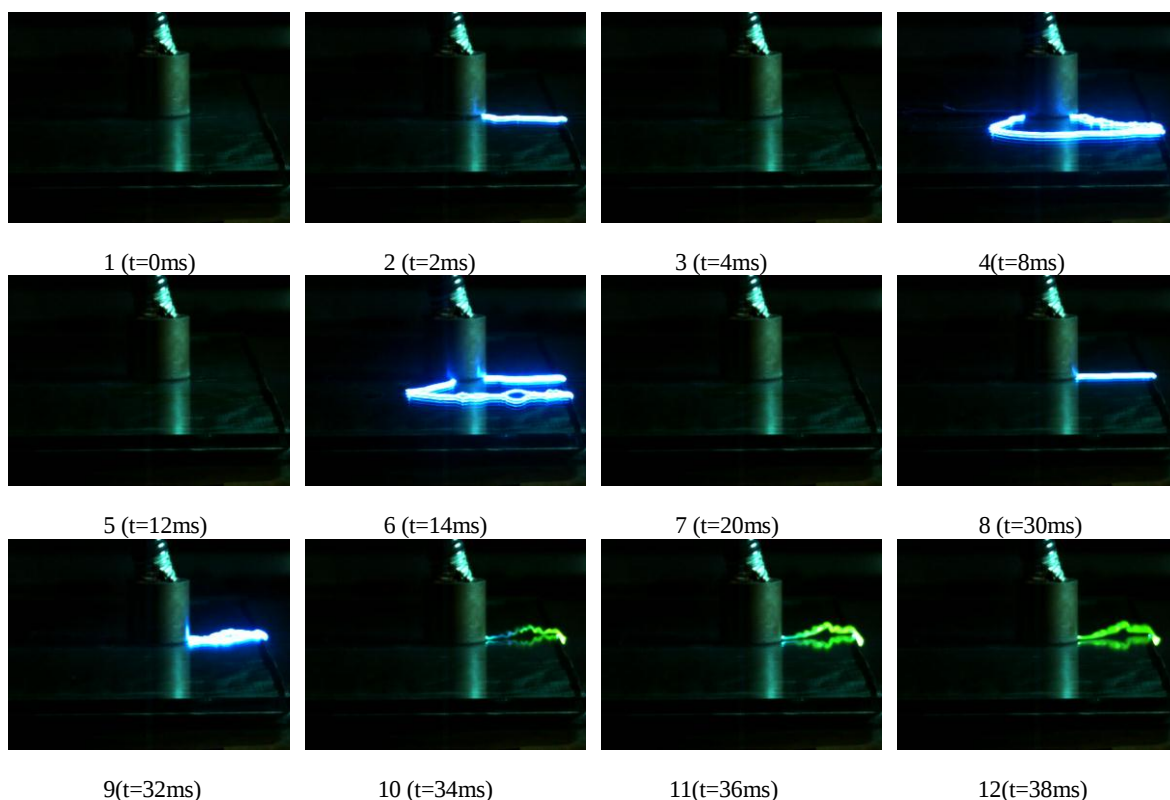


图 5.1 表面无沉积时平板模型的闪络过程

Fig 5.1 The flashover process of flat model

5.1.2 有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 0.0125g/cm^2 、 0.025g/cm^2 、 0.05g/cm^2 、 0.125g/cm^2 、 0.175g/cm^2 、 0.2g/cm^2 、 0.25g/cm^2 和 0.3g/cm^2 。从放电过程可以发现，放电是沿着沙粒与介质的交界面发展，根据放电过程的不同，分为两种情况：沙粒沉积密度小于等于 0.05g/cm^2 和沙粒沉积密度大于 0.05g/cm^2 。

当沙粒沉积密度较小时（即沉积密度小于等于 0.05g/cm^2 ），此时平板模型是具有典型的强垂直分量的极不均匀电场结构，沿介质表面电场分布特性是大部分表面的电场强度是垂直于介质表面的场强分量大于沿介质表面切线方向的场强分量，高压电极附近电场极强，放电首先从此处开始，在电场垂直分量的作用下，带电质点不断撞击有沙粒沉积的平板表面，由于沙粒沉积密度较小，沙粒间以及沙粒与平板表面间隙均较大，此时沙粒的沉积对带电质点的碰撞无明显影响，带电质点不断撞击引起局部温度增高，随着施加电压的增加，带电质点的数目增多，沉积在高压电极附近沙粒将吸附部分带电质点，这些带电沙粒在切向电场力和法向电场力的作用下被慢慢“推开”，形成了“无沙带”，并且无沙区域慢慢变大，如图 5.2-2 到 5.2-8 所示，由于沙的介电常数比空气大，“无沙带”

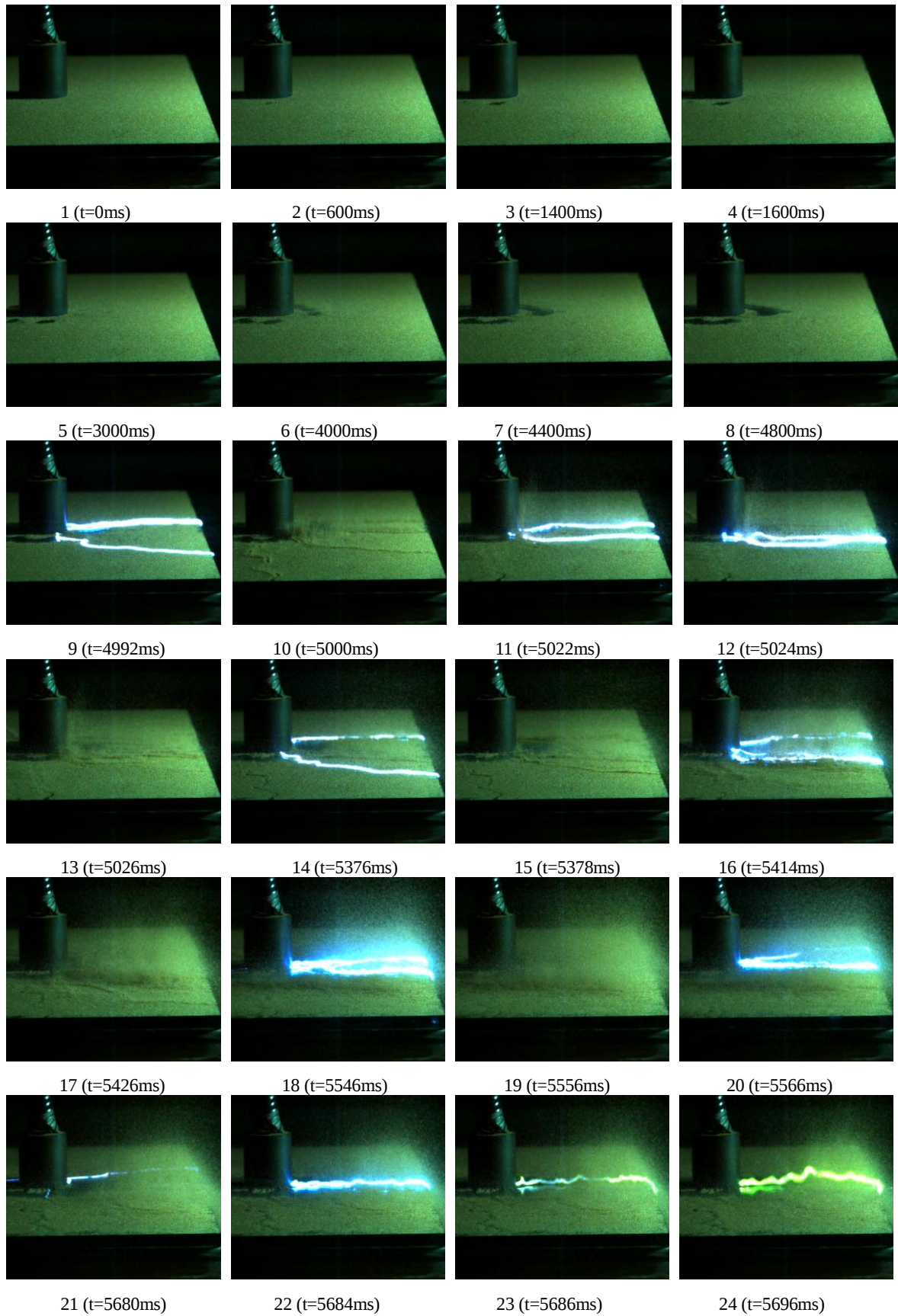


图 5.2 沙粒沉积密度为 0.025g/cm^2 、距离 d 为 14cm 时平板模型闪络过程
 Fig. 5.2 The flashover process of flat model with $d=14\text{cm}$ and $\rho=0.025\text{g/cm}^2$

区域内电场强度比有沙区域要大,其区域内很容易发生放电。随着施加电压的继续升高,当超过某临界值后,会出现浅紫色、明亮得多的电弧,这些局部电弧在玻璃板不同的位置上交替出现,如图 5.2-9 到图 5.2-20 所示,在试验过程中,可观察到电弧的重燃和熄灭,并且当电弧熄灭后,电弧经过的通道上沉积的沙粒将向上运动,如图 5.2-9 到图 2-5.10 所示,这是由于产生电弧时沙粒带上一定的电荷,这些带电沙粒在平板模型电场的强垂直分量作用下运动,形成如图 5.2-17 和 5.2-19 所示的沙粒跳动现象,随着施加电压的进一步升高,当局部电弧发展到接地极,电弧通道变成黄色,导致沿面完全闪络。

当沉积密度较大(即沉积密度大于 $0.05\text{g}/\text{cm}^2$)时,此时平板模型是具有典型的强垂直分量的极不均匀电场结构,沿介质表面电场分布特性是大部分表面的电场强度是垂直于介质表面的场强大于沿介质表面切线方向的场强,由于沙粒沉积密度较大,沙粒间以及沙粒与平板表面间隙均较小,此时沙粒的沉积对带电质点的碰撞过程有明显影响,在电场垂直分量的作用下,带电质点在撞击平板表面过程中,由于沙粒的阻碍,局部温度的升高不足于引起气体热电离,带电质点不会剧增,随着施加电压的升高,高压电极和接地极附近电场足够大,导致高压电极和接地极附近的空气分子的碰撞电离,从而在高压电极和接地极附近出现兰紫色的电弧,如图 3-2 所示,电弧产生后,高压电极

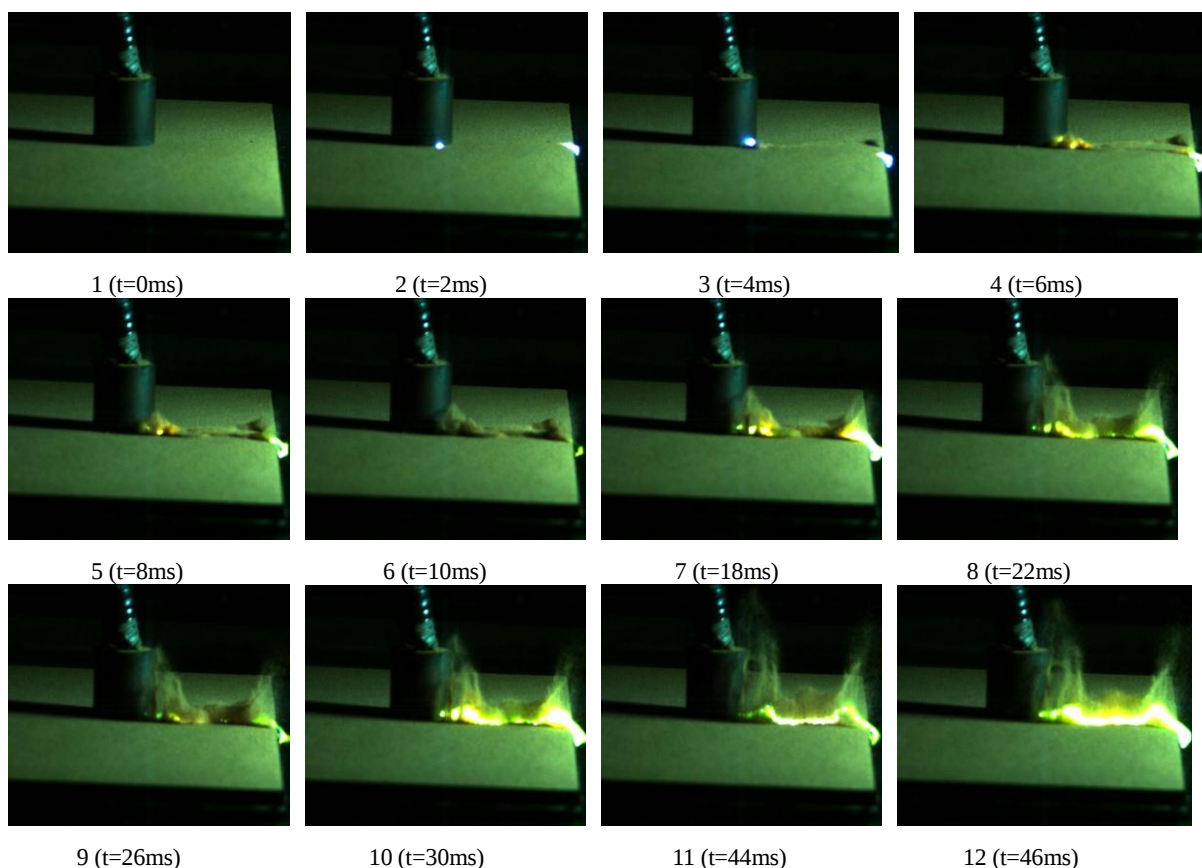


图 5.3 沙粒沉积密度为 $0.25\text{g}/\text{cm}^2$ 、距离 d 为 10cm 时平板模型闪络过程

Fig. 5.3 The flashover process of flat model with $d=10\text{cm}$ and $\rho=0.25\text{g}/\text{cm}^2$

和接地电极附近沙粒带上了一定的电荷，这些沙粒在平板模型电场的强垂直分量作用下运动，形成如图 5.3-5 和 5.3-6 所示的沙粒跳动现象，继续升高电压，当超过某临界值后，电弧的颜色由兰紫色转变成黄色，如图 5.3-4 所示，电弧的长度随着外加电压的增加而迅速增大，当电弧贯穿两极时，形成完全闪络。沙尘绝缘表面放电过程中均会出现电弧通道上方“跳起”的沙粒，并伴随着“噼噼啪啪”的爆炸声，跳起的沙粒浓度较大似乎是弥漫在电弧通道上方的“沙尘暴”。在放电过程中，随沙粒沉积密度的增大，这种沙粒现象就更加明显。

5.1.3 沉积污秽时平板模型沿面闪络过程

当平板模型表面沉积污秽时，其闪络过程属于污秽绝缘的闪络过程，一般分为三

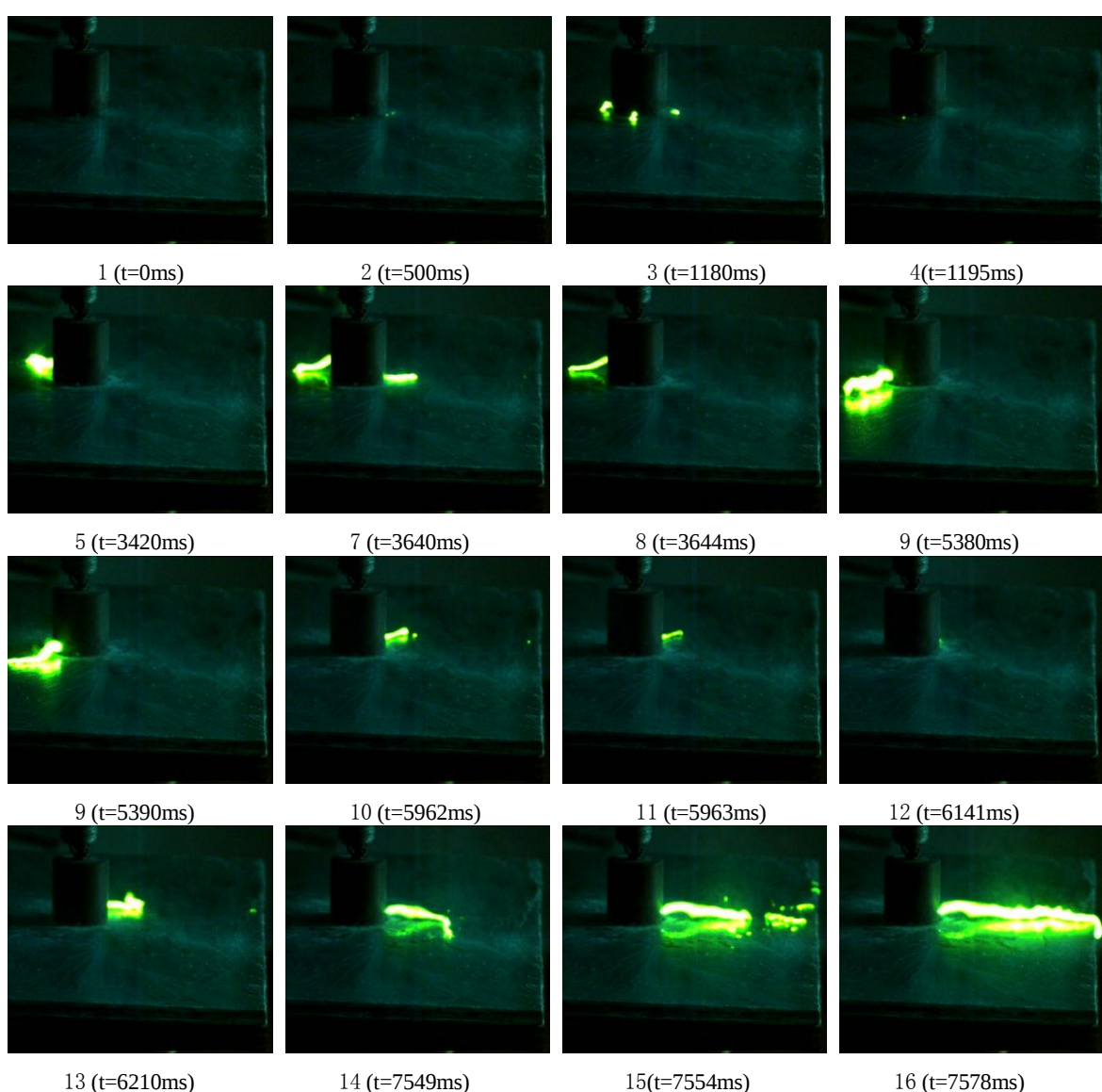


图 5.4 盐密(ESDD)和灰密(NSDD)为 $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$ 和 $1.2\text{mg}/\text{cm}^2$ 、距离 d 为 14cm 时平板模型闪络过程

Fig.5.4 The flashover process of flat model with $\rho_{\text{ESDD}}=0.2\text{g}/\text{cm}^2$, $\rho_{\text{NSDD}}=1.2\text{g}/\text{cm}^2$

个阶段，第一，污层受潮，泄漏电流增大，在电流密度较大的地方形成干区；第二，在所施电压下，干区击穿同时产生局部电弧；第三，电弧沿湿污表面延伸，最终使整个绝缘表面闪络。

图 5.4 为闪络距离为 14cm、盐密和灰密分别为 $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$ 和 $1.2\text{mg}/\text{cm}^2$ 时平板模型污秽闪络过程。高压电极周围的泄漏电流密度较大，由于电流的烘干作用，首先在高压电极附近出现干燥带，并产生局部兰紫色的电弧，如图 5.4-3 所示，电流过零后电弧明显熄灭，如图 5.4-12 所示，随着施加电压的继续升高，电弧的长度逐渐增加，这些局部电弧在玻璃板不同的位置上交替出现，如图 5.4-13、5.4-14 和 5.4-15 所示，当电弧贯穿两极时，导致沿面完全闪络。

从放电机理上分析可知，平板表面无沙粒沉积时，在电场垂直分量的作用下，带电质点在撞击平板表面过程中，引起局部温度升高，随着电压增加，沿着放电通道流过的带电质点增多，平板表面局部温度也就升得更高，在一定电压下，温度可高达足以引起气体热电离得数值，通道中带电质点数目就将剧增，从而导致沿面的闪络；有沙粒沉积时，当沉积密度较小，由于沙粒间及沙粒与平板之间间隙较大，沙粒对带电质点的碰撞过程无明显影响，并且带电质点产生后将被附近沙粒吸附，这些带电沙粒在电场力的作用下运动，形成如上面图中所示的“无沙区域”；当沙粒沉积密度较大时，沙粒的沉积对带电质点的碰撞有明显影响，阻碍带电质点的碰撞，不易形成“无沙区域”，当施加电压继续升高，高压电极附近电场足够大时，导致高压电极的空气分子的碰撞电离，在高压电极附近出现局部电弧，随着所施加的电压升高，当超过某临界值后，当电弧贯穿两极时，形成完全闪络。而当平板表面沉积污秽时，首先是污层湿润以及泄漏电流的产生，在电流密度大的地方产生干燥带，伴随干燥带的形成而产生局部电弧，局部电弧沿平板表面发展直到跨接整个表面而完成闪络。从闪络电压值上看，有沙粒沉积时，由于沙粒的运动要消耗一部分能量，因此在相同情况下比无沙粒沉积时要高。

5.2 沙粒含水量对平板模型沿面闪络过程的影响

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，为了分析沙粒含水量对其闪络过程的影响，进行了沙粒含水量对其放电过程影响的试验研究。

图 5.5、5.6、5.7 分别为沙粒含水量为 2.7%、5.2%和 10%、沉积密度为 $0.05\text{g}/\text{cm}^2$ 、爬电距离 d 为 14cm 时绝缘平板模型的闪络过程。随着含水量的增加，沙粒与沙粒、沙粒与介质之间的粘附力的增加。在施加电压的初始阶段，与干沙相比不容易形成无沙区域，并且随着含水量的增加“无沙带”的形成更加困难。当沙粒含水量为 2.7%时，随着施加电压的增加，泄漏电流增加，高压电极附近会逐渐出现沙粒沿面运动的现象，一些沙粒被“推开”，但被推开的沙粒量比干沙情况下少，如图 5.5-3 所示。继续升高电压，当

超过某临界值后, 出现浅紫色、明亮的电弧, 这些电弧在玻璃板不同的位置上交替出现, 如图 5.5-4 到 5.5-16 所示, 当电弧放电达到接地极, 变成黄色电弧时形成沿面完全闪络, 放电现象与干沙时类似。

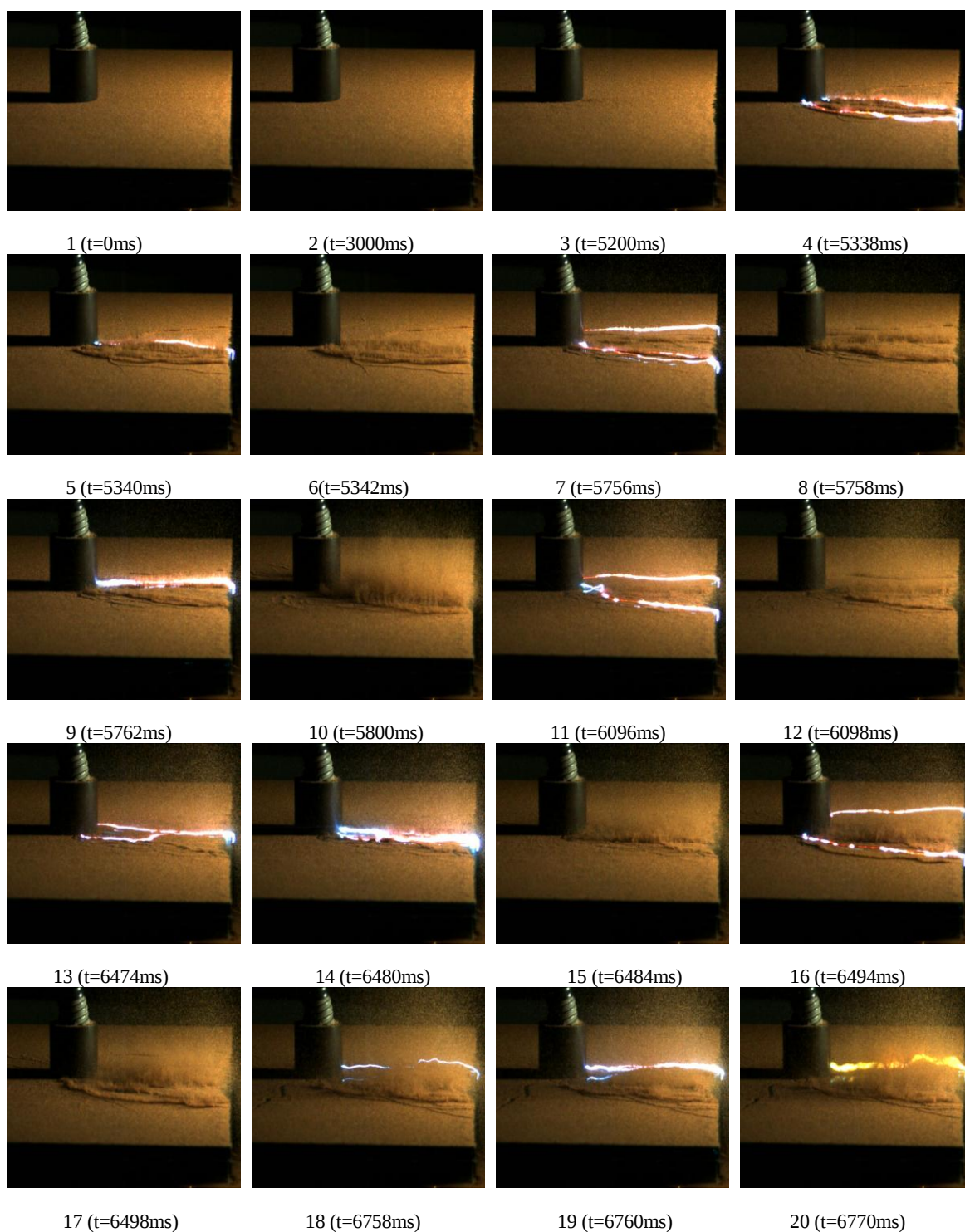


图 5.5 沙粒沉积密度和含水量分别为 0.05 g/cm^2 和 2.7% 、距离 d 为 14cm 时平板模型闪络过程

Fig. 5.5 The flashover process of flat model with $d=14\text{cm}$ 、 $m=2.7\%$ and $\rho=0.05\text{g/cm}^2$

当沙粒含水量为 5.2%时，由于高压电极附近电场极强，放电首先从此处开始。随着施加电压的增加，高压电极附近一些沙粒被弹开，如图 5.6-3 所示。电压升高，更多沙粒被弹开，在玻璃板表面形成无沙斑，如图 5.6-6 所示，由于沙粒湿润，沙粒与沙粒、沙粒与玻璃板之间的吸附力变大，被弹开的沙粒比干沙时要少，继续升高电压，当超过某临界值后，出现浅紫色、明亮得多的电弧，当电弧达到接地极，浅紫色变成黄色电弧形成完全闪络。

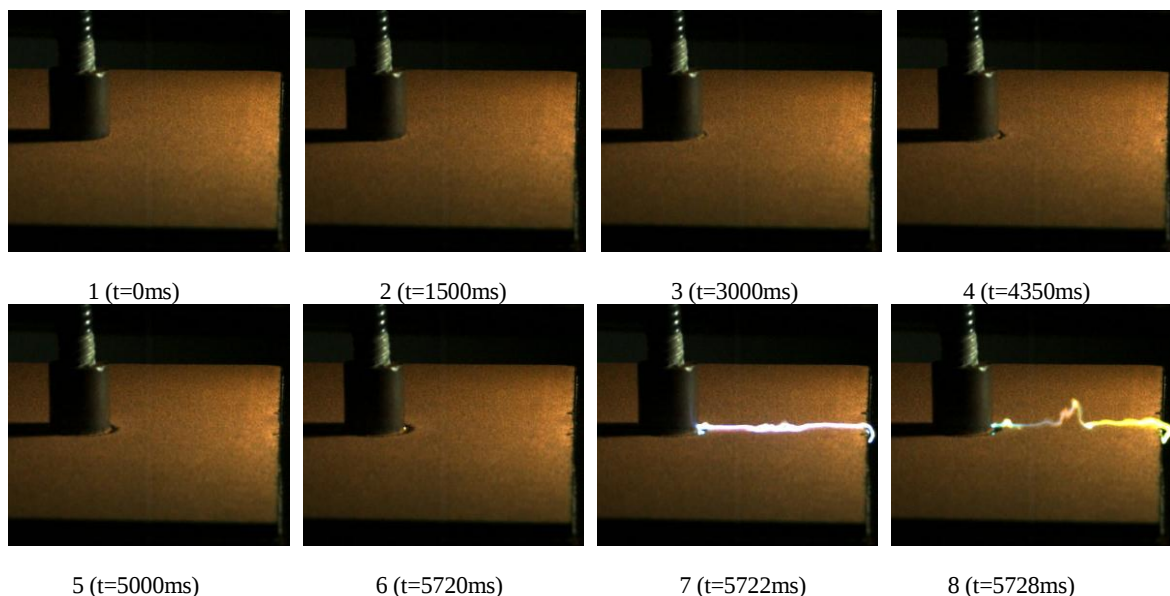


图 5.6 沙粒沉积密度和含水量分别为 0.05 g/cm^2 和 5.2%、距离 d 为 14cm 时平板模型闪络过程

Fig. 5.6 The flashover process of flat model with $d=14\text{cm}$ 、 $m=5.2\%$ and $\rho=0.05\text{g/cm}^2$

当沙粒含水量为 10%时，由于沙粒含水量较大，平板模型表面比较湿润，放电过程中泄漏电流的变化过程明显。根据泄漏电流的变化将闪络过程分为以下阶段：在施加电压的初始阶段流过平板模型的泄漏电流幅值为 $15\sim 20\text{mA}$ ，没有明显的放电现象；当表面的泄漏电流幅值为 $100\sim 120\text{mA}$ 时，在电极两端出现了淡黄色的局部电弧，如图 5.7-6 所示；进一步升高电压，泄漏电流也在增加，出现了局部电弧熄灭、重燃和发展，如图 5.7-9、5.7-10、5.7-11 和 5.7-12 所示，泄漏电流幅值为 $200\sim 450\text{mA}$ ；当电压超过某临界值后，局部电弧发展成全面闪络，泄漏电流幅值达到 500mA 。

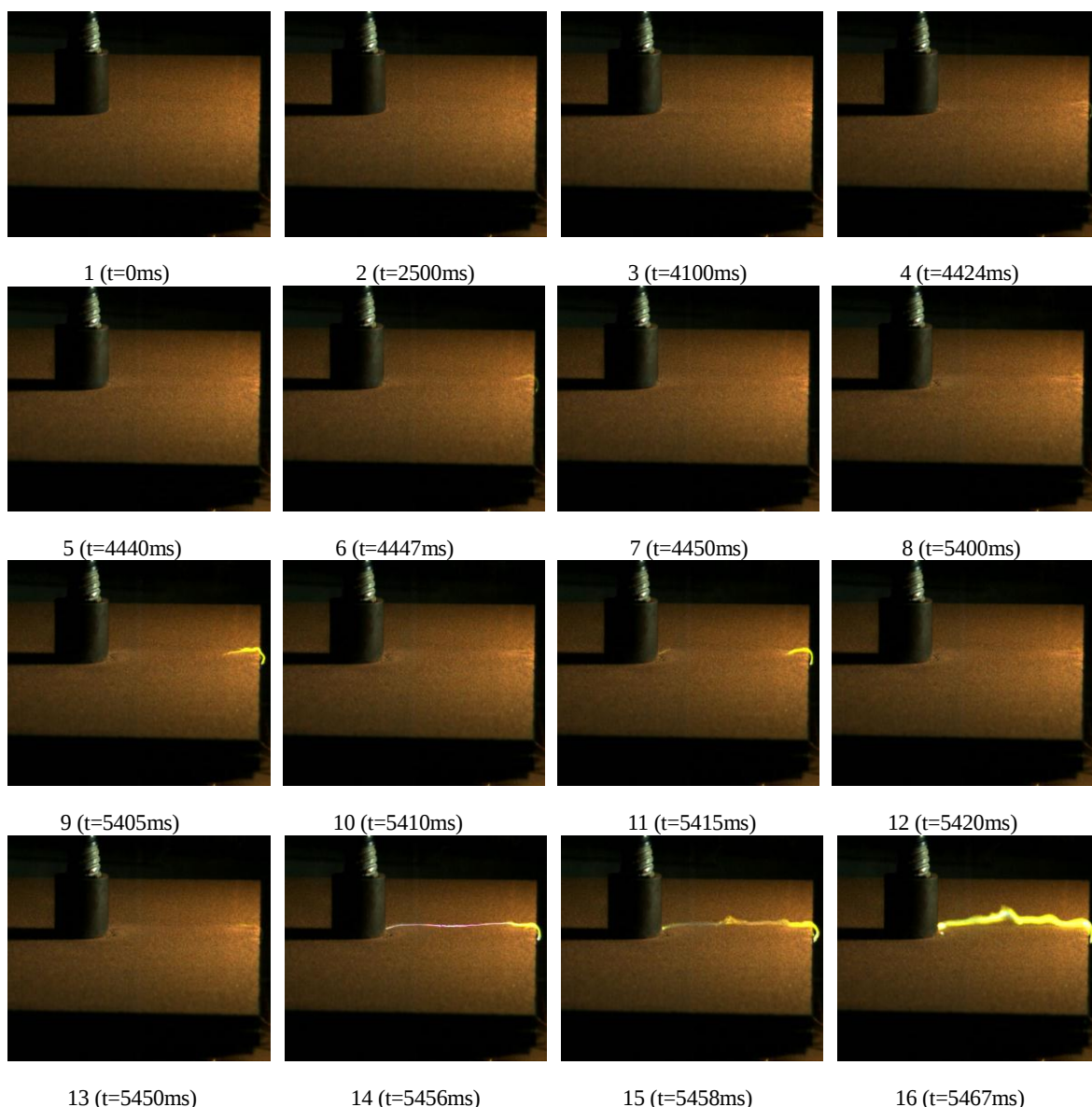


图 5.7 沙粒沉积密度和含水量分别为 0.05 g/cm^2 和 10% 、距离 d 为 14cm 时平板模型闪络过程

Fig. 5.7 The flashover process of flat model with $d=14\text{cm}$ 、 $m=10\%$ and $\rho = 0.05\text{g/cm}^2$

分析放电现象可知：随着沙粒含水量的增加，沿介质表面流过的泄漏电流增加。当含水量较小时，由于电流的烘干作用较明显，在高压电极附近泄漏电流密度大会出现“干燥区”，沙粒在电场的作用下仍然会出现“无沙带”，电弧通道的上方仍是沙粒跳起形成浓密的沙尘；当含水量增大时，泄漏电流的烘干作用不明显，沙粒间的粘附作用大，没有明显的干燥区域，因此不易形成“无沙带”。随着电压的升高，泄漏电流逐渐增大的现象明显，与污秽放电现象类似，并且没有明显的沙粒跳起的现象。

5.3 有沙粒沉积时平板模型表面电场特性分析

为了分析沙粒沉积和“无沙带”的形成对平板模型电场分布的影响，采用 COMSOL Multiphysics 基于有限元数值方法建立了平板模型的三维静电场计算模型，爬电距离为

10cm，施加电压 30kV。

图 5.8、5.9、5.10 为有、无沙粒沉积时平板模型的总电场、法向电场和切向电场分布图，从图中可以看出，沙粒的沉积并没有改变平板模型的电场分布，有沙粒沉积时，平板模型的电场强度比无沙粒沉积时略高。

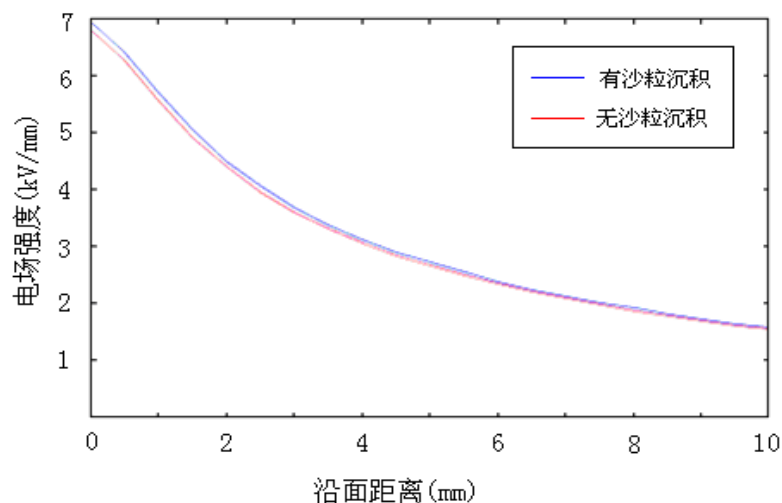


图 5.8 有无沙粒沉积时平板模型的总电场分布图

Fig. 5.8 The Electric Field Distribution of flat model

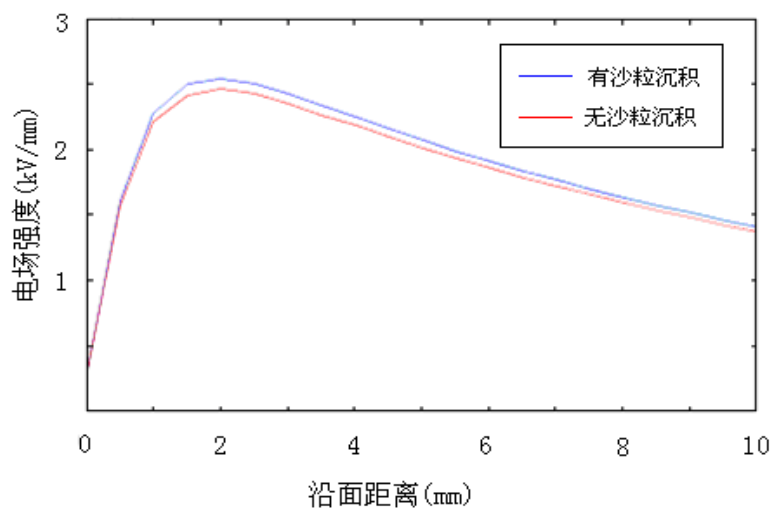


图 5.9 有无沙粒沉积时平板模型的法向电场分布图

Fig. 5.9 The normal electric field Distribution of flat model

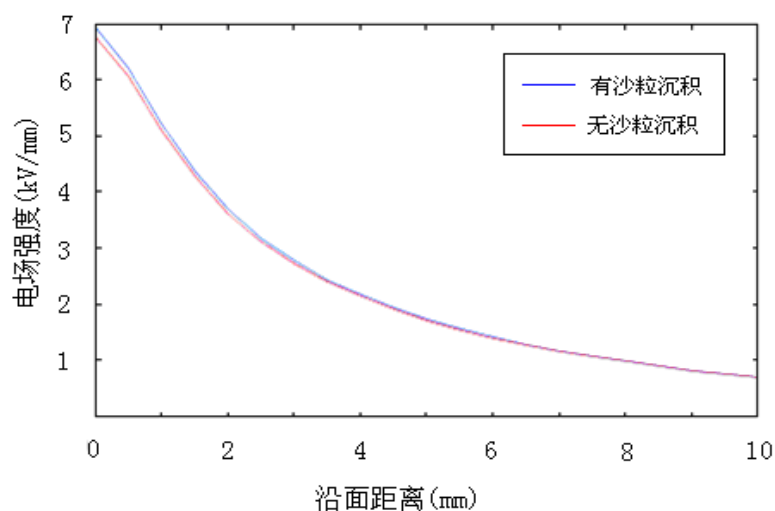


图 5.10 有无沙粒沉积时平板模型的切向电场分布图

Fig. 5.10 The tangential electric field Distribution of flat model

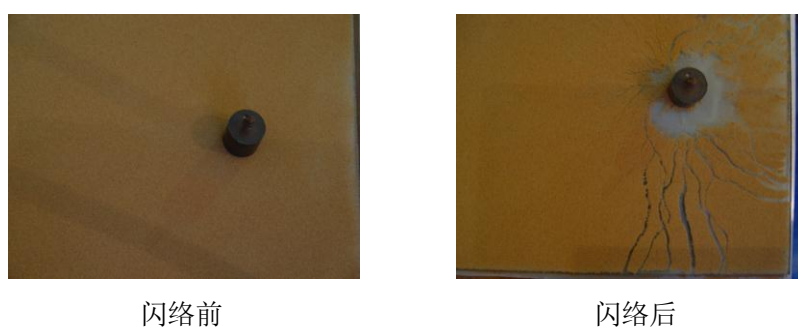
图 5.11 沙粒沉积密度为 $0.025\text{g}/\text{cm}^2$ 时平板模型闪络前后对比图Fig. 5.11 The contrast chart before and after flashover of flat model with $p=0.025\text{g}/\text{cm}^2$ 图 5.12 沙粒沉积密度为 $0.05\text{g}/\text{cm}^2$ 时平板模型闪络前后对比图Fig. 5.12 The contrast chart before and after flashover of flat model with $p=0.05\text{g}/\text{cm}^2$

图 5.11、5.12 为闪络距离为 14cm 时，沙粒沉积密度分别为 $0.025\text{g}/\text{cm}^2$ 和 $0.05\text{g}/\text{cm}^2$ 时平板模型闪络前后对比图。图 5.13 为有沙粒沉积时平板模型的电场分布图，从图中可以看出，有沙粒沉积时，平板模型是典型的具有强垂直分量的极不均匀电场结构，沿介质表面

电场分布特性是大部分表面的电场强度是垂直于介质表面的场强大于沿介质表面切线方向的场强。

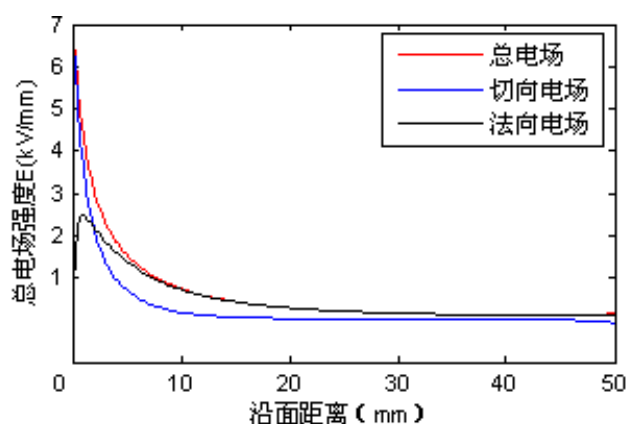


图 5.13 平板模型的总电场、切向电场和法向电场分布图

Fig. 5.13 The Electric Field Distribution of flat model

在电场垂直分量的作用下，带电质点不断撞击介质表面，当沙粒沉积密度较小时，由于沙粒间以及沙粒与平板之间的间隙较大，沙粒的沉积对碰撞过程无明显影响，随着电压增加，沿着放电通道流过的带电质点增多，电极附近的沙粒会吸附一些带电质点，这些带电沙粒会在电场力的作用下沿表面和垂直于介质表面的方向运动，特别是在高压电极的附近，切线方向的场强较大，推动了沙粒沿介质表面的运动，使其表面形成无沙区域，如图 5.11、5.12 所示，无沙区域的形状和大小与沙粒沉积密度有关。

由于沙的介电常数比空气大，无沙区中电场强度比有沙区域要大，图 5.14 为介质表面沙粒均匀分布和高压电极附近有 2mm 的“无沙带”平板模型的电场分布。从图中可以看出，高压电极附近有“无沙带”时的周围电场强度比没有“无沙带”大，电场强度最大值由 6.94kV/mm 变化到 7.3kV/mm，增大 5.2%。图 5.15、5.16 分别为高压电极附近有无“无沙带”时平板模型的切向电场和法向电场分布图。比较可得：形成无沙带后，切向电场在无沙和有沙区域中重新分布，无沙区域的电场强度增大，最大值由 6.92kV/mm 变化到 7.29 kV/mm，增大 5.3%，在 2mm 无沙斑外的有沙区域中切向电场相应减小；法向电场在无沙斑与有沙区域相交处由于介质特性的改变明显增大，电场强度最大值由 2.46kV/mm 变化到 4.53kV/mm。

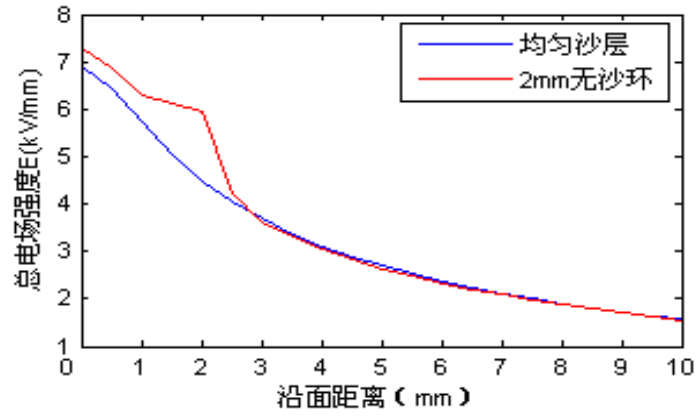


图 5.14 平板模型的总电场分布图

Fig. 5.14 The Electric Field Distribution of flat model

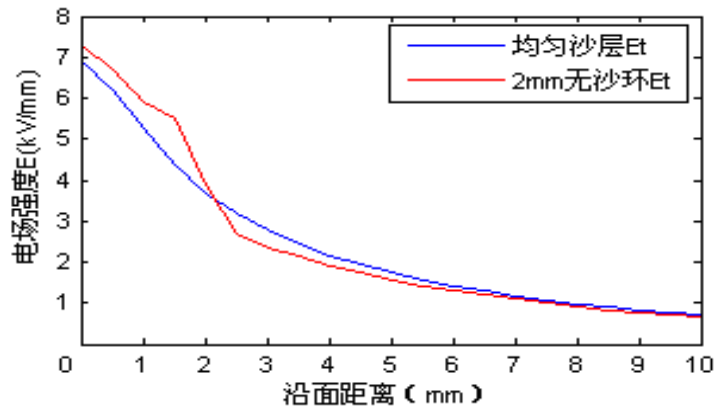


图 5.15 平板模型的切向电场分布图

Fig. 5.15 The tangential electric field Distribution of flat model

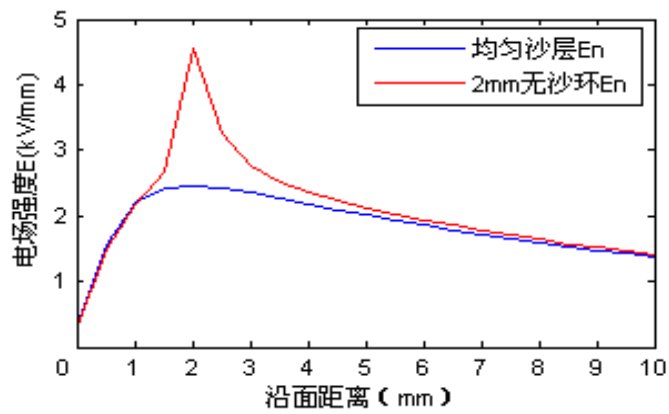


图 5.16 平板模型的法向电场分布图

Fig. 5.16 The normal electric field Distribution of flat model

由于无沙区域的电场强度较有沙区域大，更容易产生局部放电，图 5.17、5.18 分

别为闪络距离为 12cm、14cm，沙粒沉积密度为 $0.05\text{g}/\text{cm}^2$ 时，平板模型局部放电图，当其作用大于沙粒对电弧发展的阻碍作用时，沿面放电电压比无沙时要低。

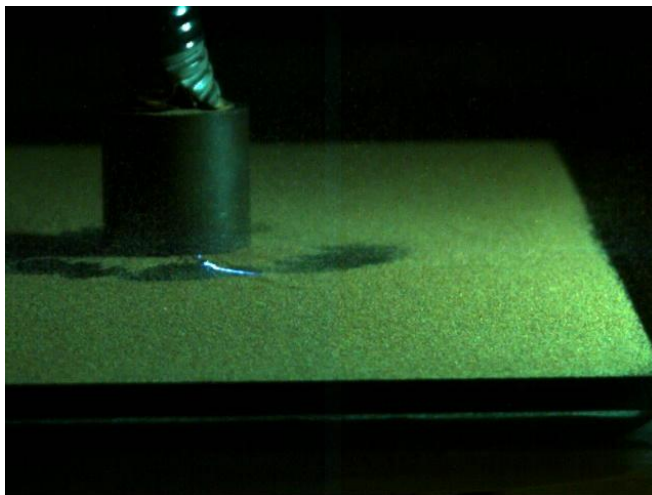


图 5.17 闪络距离为 12cm 时平板模型局部放电图

Fig. 5.17 the Partial discharge of flat model with $d=12\text{cm}$

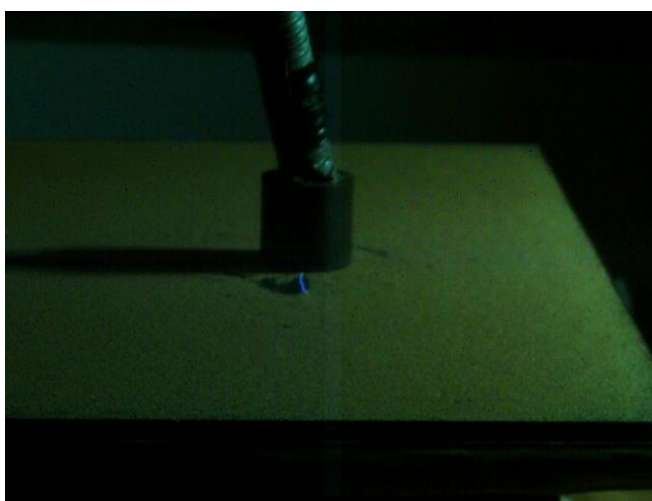


图 5.18 闪络距离为 14cm 时平板模型局部放电图

Fig. 5.17 the Partial discharge of flat model with $d=14\text{cm}$

沙尘的沉积改变平板模型表面介质特性，影响了平板模型沿面放电过程。沙粒在整个放电过程中起阻碍电弧发展的作用。当沙粒沉积密度较小时，由于在闪络过程中形成无沙斑，改变介质表面的电场分布，无沙区域的电场强度较有沙区域大，当其作用大于沙粒对电弧发展的阻碍作用时，沿面放电电压比无沙时要低。当沙粒沉积密度较大时，在闪络过程中不会出现明显的无沙斑，随着电压的升高，沙粒在电场的作用下出现强烈的跳动，电源的能量一部分用于维持电弧的燃烧，另一部分消耗在沙粒的运动中，沙粒

阻碍着电弧向前发展，在电弧通道的上方出现浓密的沙粒，随着沙尘量的增加，这种现象更加明显，导致了沿面闪络电压的升高。

5.4 本章小结

由于沉积的沙粒改变平板模型表面介质特性，影响了平板模型沿面放电过程，沙粒在整个放电过程中起阻碍电弧发展的作用，当沙粒沉积密度较小时，在闪络过程中形成无沙区域，在无沙区域更容易产生局部放电，有利于闪络的发展，当其作用大于沙粒的阻碍作用时，沿面放电电压比无沙时要低；当沙粒沉积密度较大时，在闪络过程中不形成无沙区域，由于沙粒的阻碍作用，沿面放电电压比无沙时要高。随着沙粒含水量的增加，沿介质表面流过的泄漏电流会增加，当含水量较小时，由于电流的烘干作用较明显，在高压电极附近泄漏电流密度大会出现“干燥区”，沙粒在电场的作用下仍然会出现“无沙带”，电弧通道的上方仍是沙粒跳起形成浓密的沙尘；当含水量增大时，泄漏电流的烘干作用不明显，沙粒间的粘附作用大，没有明显的干燥区域，因此不易形成“无沙带”。随着电压的升高，泄漏电流逐渐增大的现象明显，与污秽放电现象类似，并且没有明显的沙粒跳起的现象。

6 结论

① 自建了模拟扬沙天气的模拟试验装置,该装置可模拟不同风速、沙尘的电荷量和沙尘浓度的扬沙天气。

② 通过进行沙尘对空气间隙工频击穿特性影响的大量试验研究和理论分析,得出:在有风有沙和有风无沙时,间隙的击穿电压随风速的增大而增大,当风速达到 6m/s 后,间隙的击穿电压随风速的增大趋势变缓,在相同条件下,有沙尘时间隙击穿电压与有风无沙时几乎一致;并且在一定电荷量变化范围内,间隙击穿电压受沙尘的电荷量影响很小;有沙尘时,间隙的击穿电压受电极表面沙粒沉积得影响较大,而受间隙之间沙粒得影响很小。

③ 以平板模型为研究对象在工频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理论分析,得出:在有风有沙和有风无沙时,平板模型沿面闪络电压随风速的增大而增大,当风速达到 4.5m/s 后,间隙的击穿电压随风速的增大趋势变缓;在一定电荷量变化范围内,平板模型沿面闪络电压受沙尘的电荷量影响很小;当沙粒沉积到平板模型后,随着沉积量的增加,平板模型沿面闪络电压随沙粒沉积密度的变化存在着极小值,当沙粒沉积密度小于 $0.05\text{g}/\text{cm}^2$ 时沿面放电电压均小于清洁绝缘表面的放电电压;平板模型的闪络电压随着沙粒含水量的增加先升高后降低。

④ 提出了沙尘表面的沿面闪络机理。认为沿面闪络过程中无沙区域的形成以及在电场的作用下沙粒的运动决定了沿面闪络的电压。当沙粒沉积到平板模型表面后,改变平板模型表面介质特性,影响了平板模型沿面放电过程,沙粒在整个放电过程中起阻碍电弧发展的作用,当沙粒沉积密度较小时,在闪络过程中形成无沙区域,在无沙区域更容易产生局部放电,有利于闪络的发展,当沙粒沉积密度较大时,不易形成无沙区域,由于沙粒的阻碍作用,沿面放电电压比无沙时要高;随着沙粒含水量的增加,沿介质表面流过的泄漏电流会增加,当含水量较小时,由于电流的烘干作用较明显,在高压电极附近泄漏电流密度大会出现“干燥区”,沙粒在电场的作用下仍然会出现“无沙带”,电弧通道的上方仍是沙粒跳起形成浓密的沙尘;当含水量增大时,泄漏电流的烘干作用不明显,沙粒间的粘附作用大,没有明显的干燥区域,不易形成“无沙带”。随着电压的升高,泄漏电流逐渐增大的现象明显,与污秽放电现象类似,并且没有明显的沙粒跳起的现象。

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、袁涛老师等实验室老师及众多同学的帮助，在此一并感谢！

还要深深地感谢我的父母和妹妹，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。

感谢在百忙之中评阅论文及参加答辩的各位专家、教授！

吴亮

2008 年 5 月于重庆大学

参 考 文 献

- [1] 邱昌荣, 严璋, 冯允平. 高电压绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [2] 杨保初, 刘晓波. 高电压技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2001.
- [3] 孙才新. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [4] 张文元, 施围. 高电压工程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
- [5] 李芳. 风沙电研究的现状及展望[J]. 地球科学进展, 2002.8, Vol.17, No.4:572~575.
- [6] 黄宁. 风沙流中沙粒带电现象的实验测试[J]. 科学通报, 2000.10, Vol.45, No.20:2232~2235.
- [7] 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, Vol.34, No.1:77~86.
- [8] 张鸿发. 沙尘暴电效应的实验观察研究[J]. 地球物理学报, 2004.1, Vol.47, No.1:47~53.
- [9] 张鸿发. 风沙起电的风洞实验研究[J]. 高原气象, 2002.8. No.4:402~407.
- [10] 屈建军. 沙尘暴电效应的实验测量研究[J]. 地球物理学报, 2004.1, Vol.47, No.1:47~53.
- [11] 屈建军. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. 中国科学, 2003.6, Vol.33, No.6:593~601.
- [12] 俎瑞平. 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, 2004.4, Vol.24, No.5:534~538.
- [13] 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, Vol.18, No.1:109~115.
- [14] 董治宝. 中国风沙物理研究[J]. 中国沙漠, 2005.11, Vol.25, No.6:795~815.
- [15] M . I . Qureshi, A.A. Al-Arainy and 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.
- [16] A.A. Al-Arainy and 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.
- [17] M . I . Qureshi, A.A. Al-Arainy and 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.
- [18] M . I . Qureshi, A.A. Al-Arainy and 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.

- [19] M . I . Qureshi, A.A. Al-Arainy and 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.
- [20] M . I . Qureshi, A.A. Al-Arainy and N.H. Malik. PERFORMANCE OF PROTECTIVE ROD GAPS FOR MEDIUM VOLTAGE NETWORKS IN THE PRESENCE OF DUST PARTICLES UNDER LIGHTNING IMPULSES[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, Octobcr ,1999, 14(4):1311-1315.
- [21] Mohamed M.Awad, Hassan M.Said, Bahaa A. Arafa etc. Effect of Sandstorms With Charged Particles on The Flashover and Breakdown of Transmission Lines[C]. CIGRÉ (2002).
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 马乃祥. 长间隙放电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [26] Zhong Yu, Zongren Peng. 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. June 2006, 542-545.
- [27] Schmidt D S ,Schmidt R S. Electrostatic force on Saltating sand[J].J.Geophys,Res,1998, 103(4):8997~9001.
- [28] 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.
- [29] 陈济. 导电颗粒对绝缘子表面电场和电荷积聚影响的研究[D]. 硕士论文.华北电力大学, 2006.5.
- [30] Ricardo w.s.garcia, Ronaldo Bosignoli and Edegard Gomes Jr. INFLUENCE OF THE NON-UNIFORMITY OF POLLUTION DISTRBUTION ON THE ELECTRICAL BEHAVIOR OF INSULATORS[C]. Proceedings of the 3rd international conference on properties and applications of dielectric materials. Japan(1991).
- [31] M. Akbar, F. Zedan. PERFORMANCE OF HV 'I RANSMISSION LINE INSULATORS IN DESERT CONDITIONS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, January, 1991, 6(1) :429-438.
- [32] 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.

- [33] 汪讽. 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面闪络影响的研究[D]. 博士论文. 西安交通大学, 2003.
- [34] 李晓峰. 污秽绝缘表面电导特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2001, No.2:3~6.
- [35] 李晓峰. 绝缘子表面电导特性的研究及仿真[J]. 高电压技术, 2001.6, Vol.27, No.3:67~71.
- [36] 蒋兴良, 舒立春. 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, 2005.7, Vol.25.14, No.3:158~163.
- [37] 廖雅萍. 我国沙尘暴灾害初步研究[J]. 中国生态农业学报, 2001.6, No.2:54~56.
- [38] 王琳莉. 关于扬沙和浮尘天气现象的探讨[J]. 浙江气象, 2003.2, Vol.24, No.2:47~49.
- [39] 陈秀春. 沙尘暴天气的探讨[J], 山东省农业管理干部学院学报. 2006.2, Vol.22, No.3:159~164.
- [40] 王凌. 北方沙尘天气频繁[J]. 气象, 2006.7, Vol.32, No.7:126~127.
- [41] MUKHERJEEP. K, AHMEDA. 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 李武峰. 直流绝缘子串污秽闪络特性研究[J]. 电网技术, 2006.8, Vol.30, No.15:21~24.
- [45] 武利会. 海拔 2500m 以下污秽绝缘子直流流闪络特性及机理研究[D]. 硕士论文. 重庆大学, 2003.5.
- [46] 赵智亮. 海拔 4000m 以上空气间隙和绝缘子串放电特性及电压校正研究[D]. 硕士论文. 重庆大学, 2003.5.
- [47] 蒋兴良. 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, 2005.7, Vol.25, No.14:158~163.
- [48] 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.
- [49] 郑晓静. 风沙运动研究中的若干关键力学问题[J]. 力学与实践, 2003.4, Vol.25, No.2:1~6.

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, 吴亮. 沙尘环境对电力系统外绝缘电气特性影响研究分析[J]. 高电压技术, 2008.1, Vol.34, No.1:16~20.