

# 沿染污介质表面放电的发展与抑制

张仁豫

(清华大学电机系,北京 100084)

**[摘要]** 本文提出交直流电压下沿染污介质表面局部电弧发展方式是不同的,交流电弧发展至闪络的充分条件是,电弧熄灭后能恢复到过零前的状态,一般认为的重燃条件是不够的。提出交直流污闪电压的不同模型,交流电弧过零时有熄灭与不熄灭两种方式,提出不同的补充条件。测得局部电弧在临闪前弧长。弧径和弧温的变化过程,临界点的温度可高达 14 000 K,已达钠元素的全电离点,影响污闪判据的因素是热而不是电场。交直流电压下的放电,都可能存在间隙被电弧桥接,导致污闪电压降低,还会引起直流污闪电压的极性差别。低气压下的染污放电电压随气压而降低,可用指数函数表示,其指数  $n < 1$ ,一般认为  $n$  受电压、结构和污秽度的影响。试验中发现,只当间隙距离不够时,结构和污秽度的影响才明显。文中还介绍了我们研制成的以玻璃纤维为芯棒,高温硫化硅橡胶为伞套的棒型悬式合成绝缘子和低温硫化硅橡胶涂层,都具有优异的耐污性能,已有 10 年安全运行经验,现已形成生产能力。

**[关键词]** 污闪电压,恢复条件,极性效应,临界条件,低气压,合成绝缘子

沿染污介质表面放电是个老课题,起因于输电线路染污绝缘子的闪络。绝缘子通常用瓷或玻璃做成,它不仅承担正常状态下的电和机械负荷,还能承受各种过电压和风雪下的异常载荷;它暴露在大气中,使用条件很苛刻,且使用量极大,常常漫山遍野地运行在人迹罕至的地方。若有事故就引起全线停电,影响很大,且不易修复。为此,在设计中都规定了绝缘子在干、湿状态下的耐受电压和机电联合作用下的破坏强度,使用前还用试验进行检测。为了确保安全,使用中采用很大安全系数,而实际作用载荷仅达规定值的数分之一。恰恰在如此万全考虑下选择的线路绝缘,经常在运行电压下发生闪络。对此,起初认为是不可思议的,后来才认识到由于线路绝缘子在运行中表面蒙受一薄层大气中的尘埃,在雾或毛毛细雨的湿润下,表面形成一薄导电层,导致在运行电压下发生闪络,俗称污闪。虽然此现象在本世纪初已出现,但直至 50 年代 Obenaus 才首先提出污闪的物理模型,认为污闪不同于一般由碰撞电离所引起的气体放电,它是局部电弧沿面逐步延伸的结果。电弧压降与泄漏电流呈负特性关系,可以降低到运行电压之下。后来,Alston 等通过数学处理,认为污闪电压由电弧压降和污层电阻压降两部分组成,从出现局部电弧到完全闪络,要经过一临界点。试验中,在临界点之前,必须电压升高,电弧才能延伸。到临界点时,即使电压不升高,电弧也能自动延伸,他们认为此时能量失去平衡,临界点的电压即闪络电压。这是最早的污闪模型,已为国际上所接受。但到 70 年代,人们认为 Obenaus 的模型只适用于直流,在交流电压下,电弧长度随电流交变而伸缩,当电流过零时,电弧会熄灭,必须电弧重燃,才能完成污闪。因此,交、直流电压下的污闪模型是不同的,交流污闪

本文于 1996 年 2 月 28 日收到。

应补充电弧重燃的条件。还有人认为,临界条件对污闪很关键,把它简单地归之于能量失去平衡是不够的,应说明其物理意义。随着科学技术的发展,研究沿染污介质表面放电,不仅要清理和完善已有的一些理论,还得开展一些新课题。例如,直流输电出现后,能否把多年来对交流污闪的认识和措施直接搬用于直流?高海拔区出现输电线后,能否把大气压对碰撞电离的影响,搬用于低气压下的污闪?高分子材料绝缘子的使用,其耐污性能是否和瓷绝缘子相同?本课题的研究就要回答这些问题。

## 1 交、直流电压下沿染污介质表面的基本放电过程

在输电线路中运行的绝缘子链表面沉积一薄污层后,在雾或毛毛雨的天气中,污层受潮变成一导电层,表面泄漏电流增大,在电流密度较大部位,表面场强较大,可能出现放电,当电流较小时,属辉光放电;随着污层电导率的增大和泄漏电流的增加,放电形式由辉光转变成电弧。电弧长度受作用电压所决定,而运行电压是恒定的,因此电弧长度其实是随泄漏电流的增大而延伸。在直流电压下,电弧长度随电流的稳定增大而单调延伸(图1);但在交流电压下,由于电流是交变的,电弧长度也随之伸缩(图2),甚至有时可能熄灭。电弧熄灭后,放电过程随之结束。但在有利条件下,电弧可能重新出现,叫做重燃。如条件不利,则重燃后的电弧再次熄灭,或维持几周,逐周衰减至熄灭。除非重燃后的电弧能逐周增长或至少恢复到熄灭前半周的长度,放电过程才能继续下去。所以,恢复才是交流污闪的充分条件,重燃只是恢复的前提。重燃又可分两种情况:一种情况下电流过零时电弧不熄灭,过零后电流随即上升;另一种情况是电流过零时电弧熄灭,除非电压上升到足以使电弧重燃。在电弧熄灭的一小段时间内电流保持为零,这段时间被称作“零休”。显然,在有零休状态下的污闪电压较高。

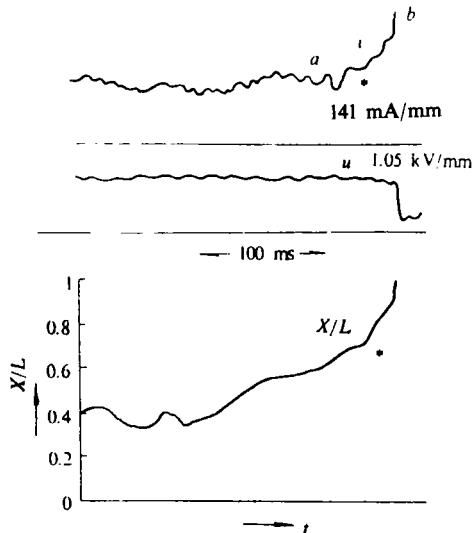


图1 直流污闪过程及其相应弧长的示波图

$u$  是试验中的作用电压

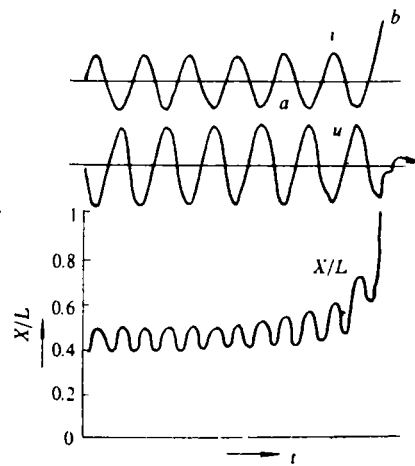


图2 交流污闪过程及相应弧长的示波图

此图弧未灭,照像时  $X/L = 0.4$

我们认为直流污闪模型,即原 Obenaus 模型如式(1),修正后的交流污闪模型及补充的恢复条件如式(2),(3)及(4)。

$$U = 140X_c I^{-0.67} + R(X_c)I \quad (1)$$

$$U_m = 140X_c I_m^{-0.67} + I_m R(X_c) \quad (2)$$

$$U_m = 531 L/I_m \quad \text{无零休} \quad (3)$$

$$U_m = 1050 X_c/I_m \quad \text{有零休} \quad (4)$$

上式中  $U$  代表维持电压,  $I$  为泄漏电流, 脚注  $m$  代表辐值,  $L$  代表泄漏距离,  $X_c$  代表临界弧长,  $R(X_c)$  代表除临界弧长外的剩余污层电阻。

## 2 临界状态的物理意义

沿染污介质表面放电的起始阶段, 发展比较缓慢, 但到一定瞬间, 电流电弧都发生突变, 立即发生闪络。此瞬间的电弧长度叫临界弧长 ( $X_c$ ), 电流叫临界电流 ( $I_c$ ), 临界瞬间的电压即污闪电压。可见, 临界状态因何发生, 对闪络有重要意义。Alston 等从 Obenaus 模型作数学处理后, 定义临界状态为失稳点。Hampton 从试验结果认为, 临界点是当单位弧长压降等于单位剩余污层电阻压降的瞬间, 所以不必增加电压, 电弧能自动发展。但一般认为他们都没说清物理意义。Jolly 认为, 临界点是当局部电弧头部电场强度超过空气击穿场强, 但此说无实验证明。我们认为, 局部电弧发展不外受电场和热的两种作用。为了弄清临界点的真正物理意义, 首先用模拟电荷法计算了局部电弧与污层接触面在临界点的头部最大场强, 当污层电导率为  $125 \mu\text{S}$  时仅  $3.2 \text{ kV/cm}$ , 当污层电导率为  $20 \mu\text{S}$  时, 可增大至  $8.4 \text{ kV/cm}$ , 在与空气接触面则为  $7 \text{ kV/cm}$ 。这些结果都远小于空气击穿场强  $30 \text{ kV/cm}$ 。我们又实测了局部电弧沿染污玻璃板发展时情况: 临界状态时头部前  $3 \text{ cm}$  距离内的平均场强仅  $0.5 \text{ kV/cm}$ , 测到此时的电弧发展速度为  $186\text{—}337 \text{ m/s}$ 。这都说明临界状态时仍为局部电弧延伸而非空气击穿。

我们基于谱线相对强度的原理还测量了发展中局部电弧的温度; 又建立了旋转扫描光学系统, 测量了弧柱截面的温度分布并与磁带记录仪与快速像机同步, 测得弧温  $T$ , 弧长  $L$  和弧径  $D$  与作用电压  $U$  和泄漏电流  $I$  的相应关系

如图 3。从图可看到局部电弧在临界点的温度高达  $14\,000 \text{ K}$ , 达钠原子的全电离点。不同电解质的临界温度是否分别达到相应原子的全电离点, 由于没有用  $\text{NaCl}$  以外的电解质作上述实验, 不可作武断结论。但从污闪试验结果看, 不同电解质时的污闪电压与原子全电离点的顺序是一致的。由于电弧临界点温度很高, 弧柱电压当然降低, 与 Hampton 的看法也是符合的。

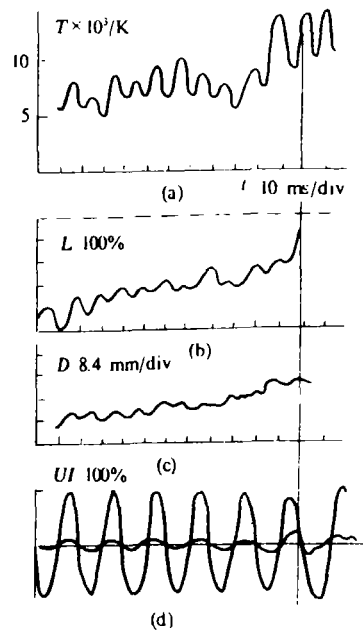


图 3 弧温、弧长和弧径与作用电压和泄漏电流的相应关系

### 3 绝缘子空气间隙的弧络及其影响

虽说沿染污介质表面放电是局部电弧沿表面的逐步延伸,但在具体绝缘子上,电弧不一定紧贴表面,可能它桥接某些间隙:如绝缘子下表面的棱间隙,下一个绝缘子的铁帽与上一个绝缘子的棱尖间隙,两片绝缘子伞裙间的间隙等。发生空气间隙桥接不是由于场强太高,而是由于电动力或热浮力导致间隙被电弧桥接,一部分泄漏距离被短路,当然污闪电压降低。我们在真实绝缘子上和玻璃板模型上的试验结果都证明这种情况在交直流电压下都能发生。防止弧络的根本办法是间隙距离不能太小,若为了增大泄漏距离,导致间隙距离太小,结果适得其反,污闪电压不能增大,反而减小。

染污绝缘子在直流电压作用下,除了燃烧作稳定单调延伸外,还有极性效应。国际上普遍认为绝缘子的负极性污闪电压较低,但按我们的试验结果,认为不能一概而论。绝缘子链的污闪电压的确在负极性下较低,但对棒型支柱绝缘子的污闪电压,正极性的比负极性的低,此外,单片盘型悬式绝缘子的污闪电压就不一定是负极性比正极性的低。可见,这不仅是极性的定义问题:如对绝缘子链加在下面脚上的电压为负极性时称为负极污闪电压,对棒型支柱绝缘子加在上法兰盘上的电压为正极性时称为正极性污闪电压。我们用玻璃圆板代表绝缘子的瓷盘,用空心不同高度的铝筒代表钢脚铁帽,测得不同极性下的直流污闪电压如图4和图5所示。图示正极性时污闪电压与板间距离没有关系,负极性的污闪电压随板间距离而升高。说明负极性时电弧桥络间隙,间隙大弧柱就长,所以电压高;10 cm 间隙时,两种极性的污闪电压差不多。负

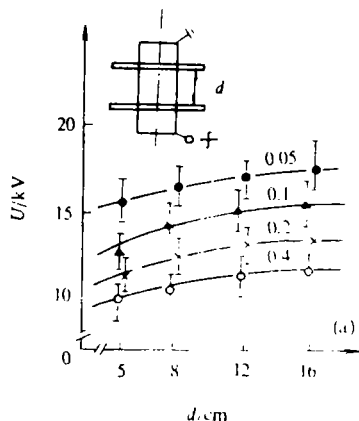


图4 正极性污闪电压与板间距离的关系

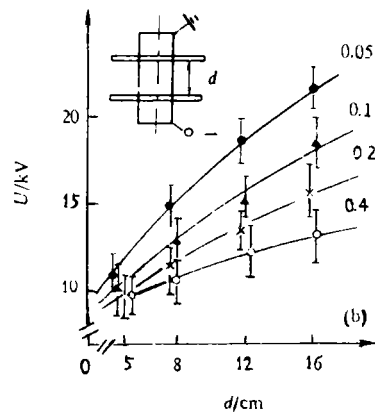


图5 负极性污闪电压与板间距离的关系

极性下绝缘子链污闪电压较低,可能是目前绝缘子盘间隙都小于10 cm的缘故。从国外和我们的试验来看,在直流放电后,总是在相对正电位一面上出现一清洁区,一般认为这是由于表面染污层物质受正电极排斥所致。在一块大致均匀的染污表面上,清洁区上的电场较强,容易出现局部电弧。负极性绝缘子链和正极性支柱绝缘子上的清洁区都在上表面,上表面上的局部电弧容易上飘,较易形成弧络。对单片盘形悬式绝缘子来讲,虽负极性时清洁区在上,但无间隙可被短路,污闪电压不可能降低甚至还能增高一些。

#### 4 气压对沿染污介质表面的影响

凡是气体放电,都受大气三要素:气压、温度和湿度的影响,试验中所测得的放电电压都要按标准进行校订。但以往对污闪电压是不校订的。鉴于人工污闪试验多在蒸汽雾中进行,不做温度和湿度校订是可以理解的,至于气压只能归之于不清楚。但近年来已在高海拔区建立起输电线路和变电站,对这个问题就不能再忽视了。目前,国际上认为低气压下污闪电压与气压的关系可表示为 $U=U_0(P/P_0)^n$ ,式中 $P_0$ 是标准大气压, $P$ 为试验时的气压, $U_0$ 和 $U$ 分别为 $P_0$ 和 $P$ 时的污闪电压,指数 $n$ 是污闪电压随气压的降低率,一般认为它是电压、结构形状和污秽度的函数。总的来讲,研究的绝缘子种类不多,数据较少,对影响 $n$ 值的原因也缺少解释。我国国土的80%处在1000 m海拔以上,西北和西南地区已建立330 kV和500 kV输电线路,形势迫使我们积极展开这方面的研究。

由碰撞电离引起的空气间隙放电电压与气压成正比关系,即上式中 $n=1$ ;对染污表面放电电压,一般认为 $n<1$ ,且直流下比交流下小。我们在 $\Phi 50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 的有机玻璃罐中,用人工污秽试验方法,做染污玻璃板表面上的交直流伏安特性试验,罐内气压可在20—101 kPa范围内调节。发现,气压变化对静态电弧压降无明显影响,对发展中电弧压降有较明显影响。在交流试验中,发现单位长度电弧的延伸需要有最低功率增量 $C$ 。不同气压下的 $C$ 是不同的,可表示为 $C=526.7(P/P_0)^{0.75}$ 。所以,在低气压下发展中电弧的交流峰值伏安特性可表示为

$$E_m=526.7(P/P_0)^{0.75}I_m^{-1}$$

在大气压下的试验已指出,发展中电弧弧长的增长必须伴有输入功率的增长。为什么在低气压下,弧长的增长所需要的功率输入反随气压而减少呢?我们认为,在恒定电压下,只当弧柱储藏能量有增量,才能导致长度有增量。弧柱储存能量是输入能量与散失能量之差,低气压下由于对流能散失减少,所以输入能量可随气压的降低而减少。一般把交直流电压下的散失能量看作常数;至于输入,直流下是常数,交流下是交变的。所以,气压的降低对交流的影响比对直流大。在染污玻璃板表面上的直流污闪电压受气压影响较小,交流污闪电压受气压影响较大,如下式所示。

$$U_{dc}=U_0(P/P_0)^{0.16}, U_{ac}=U_0(P/P_0)^{0.29}$$

在 $2\text{ m}\times 1.5\text{ m}\times 2\text{ m}$ 铁皮雾室内,用人工污秽试验法对各种类型的绝缘子测试其污闪电压,雾室内的气压可在40—101 kPa范围内调节,所试绝缘子包括标准型盘形悬式绝缘子,棒型支柱绝缘子,有普通型的和耐污型的,还有特制的无棱盘形绝缘子和无伞棒形绝缘子。污闪电压与气压的关系仍为指数函数,降低率 $n$ 值是有差别的,如表1,2所列。电压对 $n$ 的影响已

表1 不同类型绝缘子的降低率 $n$

绝缘子类型	降低率 $n$
直流标准型绝缘子	0.2—0.3
交流标准型绝缘子(普通型)	0.44—0.5
交流标准型绝缘子(耐污型)	0.55
棱或伞间不存在弧络的交流绝缘子	0.37

如前述,结构和污秽度对  $n$  的影响,主要看是否存在弧络。气压降低及污秽度加重都可能使电弧上飘,容易弧络。若间隙距离足够大,污秽度对  $n$  的影响不明显,通常对在不同污秽度下的  $n$  值可用平均值表示。当间隙距离不够大,不同污秽度下的  $n$  值是不同的,其实  $n$  与  $\frac{U}{U_0}$  有关,在不同污秽度下的  $n$  值可能呈倒 U 字形变化(见表 2)。

表 2 不同污秽度下棒型支柱绝缘子的降低率  $n$

等值盐密	mg/cm <sup>2</sup>	0.03	0.05	0.1	0.2	0.4
绝缘子类型	ZS-35/400	0.43	0.57	0.70	0.55	0.40
	ZWS-35/400	0.47	0.48	0.80	0.84	0.63

## 5 抑制污闪的方法

污闪是局部电弧逐步延伸的结果,多少年来都把增长绝缘子的泄漏距离作为提高污耐压的基本措施。通常以每单位标称电压下的泄漏距离值 mm/kV 来判断线路的耐污能力,俗称爬距。增大爬距的方法是有一定限度的,当污秽度太大时可能效果不显。也可改用提高污层电阻率的方法来抑制局部电弧的发展。污层电阻率既与污秽度有关,也与表面上的水分有关。假若使绝缘子表面变成憎水性的,表面水分不浸润成水膜而分散成颗颗小珠,则污层电阻率大大提高,泄漏电流大大减少,当然污闪电压大大提高。可惜,常用的瓷或玻璃绝缘子表面都是亲水性的,不能达到此目的。近年来生产的高温硫化硅橡胶表面是憎水的,并有较高的耐漏电能力。我们在实验室内研制成的以环氧玻璃纤维棒为芯棒,高温硫化硅橡胶为伞套的 100—500 kV 棒形悬式合成绝缘子,具有重量轻,强度高,耐污能力好,价格合理而为运行部门所采用。这种材料的表面憎水性可迁移到污层的表面,当因放电和水浸而使憎水性暂时降低时,一旦外界因素消失,憎水性又能恢复。所以这种绝缘子在运行中不必清擦而长期保持高耐污能力,在国内已有 10 年的运行经验。同时,我们又研制成低温硫化硅橡胶涂层,表面也有强憎水性,有迁移和恢复能力,可用于已有线路的瓷和玻璃绝缘子,也已有 10 年运行经验。这两种产品对提高线路绝缘水平,保证安全运行,有重大的经济和社会效益。

## 6 结束语

沿染污介质表面的放电是个老课题,遗留下一些有待解决的理论和实际问题。随着工业技术的发展,不仅日显重要,而且又枝生出一些新课题。受国家自然科学基金和产业部门的资助,我们历时 10 年,通过 5 名博士生和 10 名硕士生的努力,把这个课题从机理到技术,从交流到直流,从正常地区大气压到高海拔区低气压,从无机材料到有机材料,作了比较系统和全面的研究,取得了一些成果。1988 年在清华大学主办第二届国际电介质材料性能和应用会议时,有位外国朋友对我说,你是否有许多研究生,才把这件苦活系统化和理论化了。其实,早在 30 年前,我就接触此课题了,当时满头黑发,待到现在能向国家汇报点成绩时,已是两鬓皆斑,不禁深感一个人想学到点知识,做出点成绩确实不易!先哲庄周曾言,“其生也有涯,其知也无涯,以有涯及无涯,殆矣”。他只看到个体之有限,作出悲观结论。现在我们有了研究生制度,建立了自然科学基金,一届届的研究力量是无穷尽的,以无穷逐无涯,是一定可以有成的。

## 参 考 文 献

- [1] Obenaus F. Fremdschichtueberschlag und krieche weglänge. *Deutsche Elektrotechnik*, 1958, (4):135—136.
- [2] Alston L L, Zwoledziowski S. Growth of discharges on polluted insulation. *PIEE*, 1963, **110**(7).
- [3] Rizk F A M. Mathematical models for pollution flashover. *ELECTRA*, 1981, **78**:71—103.
- [4] Clavier P, Porcheron Y. How to choose insulators for polluted areas. *IEEE Trans. PAS*, **92**(2):1122.
- [5] 关志成, 张仁豫. 染污绝缘子在直流电压下的污闪条件分析. *清华大学学报(自然科学版)*, 1986(2):59—68.
- [6] 关志成, 张仁豫. 染污绝缘子在交流电压下的污闪条件分析. *清华大学学报(自然科学版)*, 1986(3):30—39.
- [7] Hampton B F. Flashover mechanism of polluted insulation. *PIEE*, 1964, **111**(5):985.
- [8] Jolly D C. Contamination flashover Part I: Theoretical aspects. *IEEE PAS*, 1972, **91**:2437.
- [9] Zhang Renyu, Tan Kexion, Li Shunyuan. The study on critical condition of pollution flashover. in *Proc. of the 2nd Asian Conference on Electric Discharge*, Kyushu, 1989.
- [10] Zhang Renyu, Guan Zhicheng. A study on the differences between the flashover voltage of contaminated insulators under ac and dc voltages. *Conference Record of the International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Xi'an K3, 1985.
- [11] Zhang Renyu, Zhu Deheng, Wang Xiaotao. Configuration effect on the flashover on polluted insulators. *IEEE EI*, 1990, **25**(3):575.
- [12] 张仁豫, 薛家麒, 赵铁斌. 气压对染污绝缘子交流闪络特性的影响, *高电压技术*, 1987(4):19.
- [13] Xue Jiaqi, Zhang Renyu, Zhang Xinghai. DC flashover characteristics of the contaminated insulators under low pressure. *Proc. of the 2nd ICPADM*, Beijing, 1988.
- [14] Huang Chaofeng, Guan Zhicheng, Zhang Renyu. Influence of air pressure on ac flashover of polluted post insulators. in *Proc. of the 8th ISH*, 1993.
- [15] 梁曦东. 500kV 合成绝缘子的研究. 清华大学博士研究生论文, 1990.
- [16] 贾志东. 高压绝缘子防污闪涂科的研究. 清华大学硕士研究生论文, 1992.

## THE DEVELOPMENT AND PREVENTION OF ELECTRIC DISCHARGE ALONG A CONTAMINATED SURFACE

Zhang Renyu

(*EE Department, Tsinghua University, Beijing 100084*)

**Abstract** In this paper the different pattern of developing arc along a contaminated dielectric surface is described. A modified model of ac pollution flashover is presented in which the recover condition of an extinguished arc was considered as the full condition for ac pollution flashover. The temperature of developing arc at critical moment as high as 14 000 K is measured and a hypothesis is presented that the factor influences the criterion of pollution flashover is heat but not electric stress. Regardless of ac or dc pollution flashover there might exist the arc bringing between gap clearance on the insulator if its distance is not enough. The arc bringing not only decreases the pollution flashover voltage, but also may change the polarity of discharge. Under low atm. pressure the pollution flashover voltage decreases with the pressure because the minimum input energy required for developing is to lengthen the decrease. The descending rate  $n$  is a function of voltage type, the shape of insulator and the severity of pollution, but the effect of severity

shows strongly only if the gap clearance is not enough. The composite insulator with umbrellas made of silicon rubber vulcanized under high temperature and the coating for ceramic insulator made of silicon rubber vulcanized under low temperature are developed in our laboratory. They both have water repelent surface and excellent antipollution ability.

**Key words** pollution flashover voltage, recover condition, polarity effect, critical condition, low atmosphere pressure, composite insulator

· 公 告 ·

## “九五”首批重大项目开始受理申请

国家自然科学基金委员会根据我国经济建设和社会发展的需要、科学发展的趋势和基础性研究工作的特点,在“九五”期间继续设立国家自然科学基金重大项目,这些重大项目将按照《国家自然科学基金“九五”重大项目管理办法》组织实施。国家自然科学基金委员会将按照“依靠专家、发扬民主、择优支持、公正合理”的原则对所有申请组织评审和论证,择优进行资助。为使重大项目的申请有的放矢,请各单位的申请者注意以下各点:

(1) 申请前,请认真阅读《国家自然科学基金“九五”重大项目管理办法》。

(2) 申请指南中仅含有研究领域、科学目标,主要研究内容,受理申请的科学部和拟资助金额。项目的名称,课题的设置,每个课题的名称及研究目标,研究内容等均由申请者提出。

(3) 每个重大项目均由紧密围绕项目总体目标,相互配合,有机联系的若干课题组成,欢迎科学界在开展学术研讨的基础上联合组织重大项目的整体申请,项目申请填写《国家自然科学基金重大项目联合申请书》及所含课题申请书,课题申请书的格式与填写要求与科学基金面上项目相同。同时也欢迎申请者在指南的研究领域范围内单独申请某一研究方向的相关内容。“九五”“重大项目联合申请书”采用新的格式,需要者请向我委员会综合局重大项目处索取。

(4) 每份申请(项目和课题)的评审费为100元,汇至国家自然科学基金委员会机关服务中心,开户银行为北京海淀区工商银行北太平庄分理处,帐号:144502—60。

(5) 接受申请时间为1996年8月15日至1996年8月31日。

国家自然科学基金“九五”首批拟资助的重大项目的研究领域:(1) 太阳磁场、速度场和空间太阳望远镜方案;(2) 手性药物的化学与生物学;(3) 环境友好石油化工催化化学与化学工程;(4) 挖掘生物高效利用土壤养分的潜力保持土壤环境的良性循环;(5) 中国沿海典型增殖区有害赤潮发生动力学及防治机理;(6) 内蒙古草原土壤—植被—大气相互作用;(7) 淮河流域能量与水份循环;(8) 中国近海海洋生态系统动力学与生物资源的持续利用;(9) 超高压变质作用与碰撞造山动力学;(10) 有机/聚合物光电信息材料及器件;(11) 知觉信息的基本表达及其无创性认知成象;(12) 金融数学、金融工程及金融管理。