

1983年绝缘电介质 学术讨论会论文集



西安交通大学出版社

1983年 绝缘电介质 学术讨论会论文集

西安交通大学出版社

1984. 8.

内 容 简 介

本论文集是根据1983年6月,在西安召开的绝缘电介质学术讨论会上宣读、交流的文章编纂而成的。全书共收论文和报告三十一篇,内容涉及我国近年来在电介质学科领域中研究的新成果、新技术,具有一定的学术水平。

本书可供电介质科学工作者和有关生产、教学以及科研人员使用。

1983年绝缘电介质 学术讨论会论文集

刘 其 昶 主 编

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/16 印张: 11.25 字数: 275千字

1984年8月第1版 1984年8月第1次印刷

印数 1—3000

统一书号: 15340·13

定价: 2.33元

序

1983年6月2日至8日,在西安举行了一次绝缘电介质学术讨论会。这次讨论会是根据第一届全国电介质物理年会的建议,由中国物理学会委托西安交通大学会同桂林电器科学研究所筹备召开的。

在讨论会上,张书缙、顾振军、庞庆铭、蔡兴贤、马乃祥、刘子玉等同志应邀作了出国考察报告或专题学术报告;会议共收到学术报告和论文65篇(大会宣读50篇,书面交流15篇)。这次会议,一方面反映了我国电介质科学工作者努力为四化建设服务,解决了电介质在电工应用中的一些实际问题,另一方面,也反映了我国电介质的基础理论研究工作的不断深入和发展。

会议收到的论文内容极为广泛,从不同方面显示了近年来我国在电工领域电介质研究中的新技术、新成果。与会者普遍反映,这次讨论会无论在论文数量上还是学术水平上,较之1964年在西安召开的电介质理论中心问题学术会议都有较大的提高。为了使科研成果能在更大范围内交流,会议特邀请刘其昶、顾振军、陈国光、王士良、徐传骧、姚熹等同志对提出的论文进行了评论,并由刘其昶同志及徐传骧、任佩余、刘辅宜、伍学正等同志编辑了这本《1983年绝缘电介质学术讨论会论文集》。

本论文集共收论文和报告计三十一篇,内容涉及我国绝缘电介质学术领域的理论探讨,技术成就和发展动向。我们希望这本论文集的出版,对促进我国绝缘电介质研究工作的发展有所裨益。

刘 子 玉

一九八四年六月于西安交通大学

目 录

高分子绝缘材料中的电子现象·····	顾振军	(1)
Electronical Phenomena in Polymer Insulation Materials	Gu Zhengjun	
气体电介质的击穿·····	马乃祥	(5)
Breakdown of Gas Dielectrics	Ma Naixiang	
电负性混合气体绝缘的优越性·····	邱毓昌	(10)
On the Superiority of Electronegative Gas Mixtures	Qiou Yuchang	
论导纳统一运算* ·····	王士良	(17)
On Study of the Unified Operation of Admittance	Wang Shiliang	
有机薄膜低频相对电容率和损耗因数测试技术——接触式电极 ·····	刘耀南 马德才	(21)
The Measuring Technique of Relative Permittivity and Dissipation Factor of Organic Insulating Films at Low Frequency Contact Electrode	Liu Yaonan, Ma Decai	
有机薄膜绝缘材料体积电阻率的测量·····	刘耀南 楚秀娥	(26)
The Measurement of Volume Resistivity of Organic Insulating Films	Liu Yaonan, Chu Xioue	
高频介电温度谱测量技术·····	应竹青 李静一	(32)
The Measurement of the Temperature Spectrum of Dielectric Properties at High Frequencies	Ying Zhuqing, Li Jingyi	
绝缘系统中局部放电电容增量的确定·····	任佩余	(38)
The Determination of Capacitance Increment due to Partial Discharges in Insulation Systems	Ren Peiyu	
铌酸锂双晶的热刺激电流与界面陷阱·····	姚 熹	(46)
TSC and Interface Traps of LiNbO ₃ Bicrystal	Yao Xi	
热刺激电流的测量及其应用·····	吴南屏 史智青	(51)
The Measurement and Application of Thermally Stimulated Current	Wu Nanping, Shi Zhiqing	
聚合物的摩擦接触电现象·····	李 宜 李静一 余 珏	(57)
The Electric Phenomena of Polymer due to Rubbing and Contacting	Li Yi, Li Jingyi, Yu Jue	
ABS/PVC 共混高聚物的热刺激电流松弛谱·····	谢书伸 刘双成 江之桢	(64)
TSC Relaxation Spectra of ABS/PVC Blends	Xie Shushen, Liu Shuangcheng, Jiang Zhizhen	

- FEP 薄膜电晕注入驻极体的研究张国光 董占林 王寿泰 (69)
 Study about Corona Charge Injected FEP Film Electrets
 Zhang Guoguang, Dong Zhanlin, Wang Shoutai
- 高分子薄膜驻极体的电刺激骨生成张国光等 (75)
 Electrically Stimulated Bone Growth with polymer Electret Films
 Zhang Gouguang et al.
- 油浸聚丙烯薄膜的结构参数对物理性能影响的研究
高良玉 李丽琴 谢志高 (78)
 The Study of Structural parameters of Oil Impregnated Polypropylene
 Film on Effect of Physical Properties
 Gao Liangyu, Li Liqing, Xie Zhigao
- 针板电极系统最大场强的计算及其应用倪光正 吴 炯 (85)
 Calculation and Application of the Maximum Electrical Field in
 Needle-Plate Electrodes System Ni Guangzheng, Wu Jiong
- 液氮温度下绝缘材料的性能于凤兰 曹汉强 高秉钧 (91)
 The Properties of Insulation Materials in Liquid Nitrogen
 Temperature Yu Fenglan, Cao Hanqiang, Gao Bingjun
- 高分子材料低温击穿强度的研究王寿泰 朱建新 孙红良 (97)
 The Study of the Breakdown Strength of Polymers in Low
 Temperature Wang Shoutai, Zhu Jianxin, Sun Hongliang
- 真空中沿有机玻璃表面放电的研究郭中华 平家彪 曾大雄 (103)
 Surface Flashover on PMMA Insulators in Vacuum
 Guo Zhonghua, Pin Jiabiao, Zen Daxiong
- 电极表面涂复层对液体介质强电场特性的影响刘辅宜 王友功 (106)
 The Effect of Electrode Coatings on High Field Characteristics
 of Liquid Dielectrics Liu Fuyi, Wang Yougong
- 高分子绝缘材料的击穿于治兴 (111)
 The Breakdown of Polymer Insulating Materials Yu Zhixing
- 液晶应用于高压硅器件击穿特性的研究徐传骧 张少云 (117)
 Liquid Crystal Used to Study the Breakdown Characteristic
 of High Voltage Silicon Devices Xu Chuanxiang, Zhang Shaoyun
- ZnO 压敏电阻器导电模型的实验探讨王士良 刘梅冬 (123)
 Experiment Study of the Conduction Model of ZnO Varistors
 Wang Shiliang, Liu Meidong
- 铁电压电陶瓷的介电温度特性陈 熙 张瑜英 (129)
 The Dielectrical Temperature Characteristic of Ferroelectric and
 Piezoelectric Ceramics Chen Xi, Zhang Yuying
- 压敏电阻器的性能张南法 王 刚 (135)
 The Property of ZnO Varistors Zhang Nanfa, Wang Gang

tgδ——温度谱在漆包线方面的应用	葛正言 张惠敏	(143)
Dielectric Spectrum tgδ-t Applied to Enameled Wire Analysis and Precessing	Ge Zhengyan, Zhang Huimin	
交联聚乙烯(XLPE)电缆中气隙局部放电性能的研究	伍学正 吴 炯	(146)
A Study of the Partial Discharge Behavior of the Voids in Cross-Linked Polyethylene Cable	Wu Xuezheng, Wu Jiong	
聚胺——双马来酰亚胺的转变/松弛行为	谢书仲等	(153)
Transition/Relaxation Behavior of Polyamine Bismaleimioles	Xie Shushen et al.	
求取功能性活化能的统计理论	张盈锁	(160)
A Statistical Theory of Finding out the Functional Energy of Activation	Zhang Yinsuo	
关于体复介电常数测量的一个问题	王评初 张瑜英 陈至立	(164)
A Problem On the Measurement of Bulk Complex Dielectric Constant	Wang Pingchu, Zhang Yuying, Chen Zhili	
电工绝缘用聚合材料的 UL 测试方法介绍	周光戡	(167)
The UL Testing Methods for Polymer Insulating Materials	Zhou Guangkan	

高分子绝缘材料中的电子现象

顾 振 军

一 引 言

高分子绝缘材料是各种不同结构类型的高分子化合物。由于绝缘技术的高速发展,要求人们对各种高分子绝缘材料,在应用中表现的宏观性能,进行更加细致的科学分析,进而了解导致各种宏观性能的微观本质。高分子化学的发展成就指出,对微观现象的认识必须从传统的分子概念逐步扩展至电子概念。因为影响三分子化合物许多性能的结构因素,都有赖于它的电子结构,许多宏观性能的出现都归因于微观的电子过程。

二 电子现象普遍存在

我们从最明显的电子现象开始,依次举例说明绝缘技术中的电子现象普遍存在。

应用高聚物于高压绝缘,特别要注意的是因电子现象而导致树枝化击穿。添加稳压剂以提高绝缘寿命的原理,就是针对可能产生的树枝化现象。为了判断电子的来源是电极注入还是聚合物本身的场致电离,必须阐明化学结构和场致电离的关系,也就是要阐明高分子化合物在高电压下所起的电子结构变化。

高分子化合物的化学结构和电子导电的关系,现今逐渐成为具有实用意义的一个课题。借助于适当的分子结构设计,已能合成出电导率分别处于半导体、导体、光电导体和超导体等范围的聚合物。大量研究表明,在无机半导体材料中,磷化铟(InP)的电子结构可能要比研究了将近20年的砷化镓(GaAs)更有研究价值,更有发展前途。当然,要扩大高分子电导材料的应用范围,无论在理论和实践方面,都还要做很多工作。

高分子绝缘材料在应用中不可避免地都有些微的电导率存在,传统的概念认为这是由于存在杂质的离子电导,对于这样的提法,现已有越来越多的证据怀疑其真实性。特别是为了提高现有高分子材料的体积电阻率,就不能忽视聚合物的本征电子电导,因而有必要研究化学结构与本征电子电导之间的关系。

高分子绝缘材料在运行中发生的老化过程,实际上是一种缓慢的化学反应,所以也是一种电子现象。通过对这种电子现象的研究,可以了解为什么热老化不同于光老化,以及热氧老化不同于光氧老化。因此它们的防老化机理也就各不相同,同时聚合物本身的组成中,引发出热老化和光老化的有害结构,当然也各不相同。这也是把户外绝缘列成专题研究的原因。户外绝缘要长期接触日光,光要引起材料中的某种电子过程,因此,必须选择适宜户外条件的绝缘材料。例如,用环氧树脂绝缘子代替瓷绝缘子时,环氧配方中应尽量少用苯环组分,它的热稳定性虽好,但光稳定性很差。其原因是由于光引起的电子现象,所以应改用脂环组分。

聚合物与聚合物或与其它材料之间的接触起电,特别是因摩擦而产生静电,也是一种电子过程。为了研究化学结构及功函数之间的关系,除了聚合物的分子结构外,还必须考虑其

电子结构。

在应用聚合物于电子器件的绝缘时,比较突出的是可靠性。以环氧树脂为例,从化学上来讲绝缘的可靠性就是要求各批产品的化学结构完全相同。但是这个要求越出了现有的高分子化学水平。因为即使环氧树脂的配方保持不变,但若固化条件略有不同,所生成的环氧绝缘的化学结构仍不相同,于是便严重地影响了绝缘的可靠性。因此,要求能制订出对于固化条件的些微波动敏感性较小的环氧树脂配方。按照 R. S. Mulliken("Molecular Complex", Interscience, 1969)所提出的电荷转移分子间络合物的概念,双酚 A 环氧中的苯环的 π 电子和连接苯环的氧原子的 n 电子,共轭构成了电子给予体。而苦味酸则由于分子中的三个硝基无论从诱导效应,或从共轭效应来看,都是拉电子基,因而使整个分子成为电子接受体。于是在环氧配方中加进并无固化作用的苦味酸,有助于双酚 A 中的苯环在整个材料中的空间排列。因为借助于电子给予体和电子接受体之间的电子转移,能使它们之间构成弱于主价键的化学键,以固定分子在空间中的排列位置。这就是借助于电子现象来制订对于固化条件敏感性较小的环氧树脂配方。它是与电和光并无联系的电子现象的一种应用。

三 分子的电子结构

因此,对于高分子绝缘材料的微观结构,除了分子结构之外,还要求知道其电子结构,而且电子结构甚至比分子结构更为重要。但是迄今为止,对于电子结构这一概念,还没有一个统一的和普遍接受的定义。因为它不同于分子结构,研究的只是分子内部的结构细节,而电子结构并不涉及电子内部的结构。按照不同的实用要求,对于电子结构的概念可以有各种不同的理解。可以把电子结构表达成整个化合物或其中某一化学键中的电子分布密度,也就是电子存在于某一空间位置的几率。从而可按其电子分布密度的几何形状而区别为 σ 电子、 π 电子和 n 电子,并且把某一化学键区别为富电子和贫电子。这样,就可以使该化学键或分子基因起电子给予体或电子接受体的作用。

电子极化率是表达电子结构的另一种方式。不仅是电场(静电场、直流电场、交变电场、脉冲电场等),就是波长短到像可见光那样的电磁波,也能引起高分子绝缘材料的电子极化。于是可以用来测量电子极化率,从另一角度来研究其电子结构。

也可以用分子轨道理论中的参数来表达电子结构。从分子轨道的基态,研究各个激发态的能量,则可以用不同的电子态的跃迁,来解释电子现象的产生。

还可以用能带理论及其参数禁带宽度来表达电子结构,特别是研究高分子化合物的电子电导。从能带理论可以解释为什么聚乙烯是良好的绝缘材料,但并不能排除其绝对没有电子电导;而对于聚乙炔其禁带宽度已大为减小,但仍不能达到金属那样的电导率。

通过对各种不同电子结构的研究,可以解释和控制高分子绝缘材料中的电子现象。例如,一般的规律是,随着分子结构中共轭体系的扩大,分子轨道数随之增加,并且发生同一能量的分子轨道简并。其结果,将导致最低未占分子轨道(LUMO)和最高占有分子轨道(HOMO)之间的能差降低,使得电子较易激发。这便是为什么热稳定的苯环在光的作用下不稳定的原因。同样,随着共轭体系的扩大,也就是电子非定域区的扩大,它的电子极化率也必然增加,这就是为什么聚苯乙烯的电子极化率大于聚乙烯的原因。对于非定域扩大的化学结构,也可以想像得出,施加了电场之后电子较易活动,因而禁带宽度减小。

从化学发展的历史来说,化学式原是用来表达化合物的分子结构的。但是通过上面对于电子结构的各种表达方式的分析,也可设想化学式还可以用来表达化合物的电子结构。从上

面的例子来看，由于化学式可以清晰地表达出共轭体系，因而通过它也可以粗略地估计出该化合物的光稳定性、电子电导可能性以及电子极化率数值的大小等。

但是由化学式估计电子结构时，还应注意到其它的具体事实。例如，上述的共轭或非定域必须在同一平面内才能有效地发挥作用。所以四氯乙烯和四氟乙烯由于氯和氟隶属于周期表中的同一族，似乎应该具有相同或相似的电子结构，但实际上并非如此。固然，氟原子和氯原子都有较大的拉电子效应，使乙烯的双键成为贫电子化学键，但氟原子的 n 电子还能和四氟乙烯的 π 电子共轭产生共轭效应，从而使共轭效应超过诱导效应，四氟乙烯于是便成为富电子的电子给予体。而四氟乙烯则由于氯原子体积膨大，四个氯原子已不可能和两个碳原子位于同一个平面上，共轭效应并不能产生，尽管它也具有 n 电子。所以，四氯乙烯乃是贫电子的电子接受体。我们从这样的分析中可以看出，四氯乙烯可成为有效的洗涤剂，因为它可以接受一般油脂中由氧原子提供的 n 电子，从而产生电荷转移以达到洗涤油腻的目的；而四氟乙烯则不能产生这种电子现象，因为它根本不是电子接受体。

四 电子现象的研究分析

电子现象既不局限于控制高分子绝缘材料的电性和光性，而且可扩大于化学性能、物理性能以至于机械性能的控制。因此，电子现象的研究，可能成为进一步调节和控制高分子绝缘材料性能的关键。

最根本的研究方法当然是量子化学的基础研究，进行波方程的计算，以便从根本上来了解电子的基本参数。现有的量子化学尽管达到了一定的水平，但还没有达到可以足够解决很多实际问题的程度。现在可能的途径是，进行适当的假定和简化，以导出有实际应用价值的电子性能参数。

比较易于取得效果的方法，是对宏观性能进行半经验的估计，从而间接地来判断电子特性。例如，宏观性能中的折射率便是一个比较易于进行研究的参数。众所周知，有机化合物的克分子折射率，可以通过经验方法的加成来进行估计。至少根据不同化合物的折射率的估计，可以明确化学结构和电子极化率之间的关系，以从侧面来了解各种结构的化合物可能产生的电子过程。

现在已有很多实验方法和技术，从最新的各种谱线分析，一直追溯到古老的实验，都可以对电子现象作出适当的观察。不同的实验方法，可以对电子结构的不同表达方式提供直接有用的线索。

例如，紫外吸收光谱和各种紫外发射光谱，就是研究电子现象很有用的实验工具。因为紫外光谱能证明不同能量的各个分子轨道的存在，并且可以核对分子轨道间每一跃迁所需的能量。

光电子能谱是能进一步了解化合物中电子结构的实验工具。它能测出化合物中各种不同的电子所含有的电离能，从而可以了解化合物中每一种电子所含有的能量，以确定它所处的轨道。

即使是最普通的可见光，在适当的场合也可用来研究电子现象。碘溶解在苯、酒精和丙酮中，已知都不是简单的惰性溶剂溶解，过程中都有电荷转移。碘是电子接受体，而这些溶剂却都是电子给予体。如果没有电子移动，得到的碘溶液应呈淡紫色。因此，根据这些碘溶液红色的深浅，便可以判断各自电荷转移的程度。

除对折射率可以用半经验法进行估计和计算之外，还可以进行直接测量。此外，还可以

在适当的情况下进行旋光性的测量以对折射率进行核对。旋光性的关键在于不对称，而不对称的关键在于电子极化率的差异。所以用旋光性来研究电子极化，有些类似于用测 $\text{tg}\delta$ 的方法来研究偶极极化。

关于分子内电子密度的分布，可用传统的偶极矩测定来进行研究。数学家和物理学家往往认为整个分子的偶极矩，是其各个化学键的偶极矩的矢量和。但事实上实测的结果往往并不都是如此。实测结果之所以有时会偏离矢量和，乃是由于其中发生了某些估计之外的拉电子效应和推电子效应。使用核磁共振谱，根据化学位移，还可以观察在比较复杂的情况下各个化学键的电子密度分布。

还有很多现代测试工具，可以用以研究化合物的电子结构，其关键是针对所研究的电子现象选用现有的合适方法。

气体电介质的击穿

马 乃 祥

西安交通大学

一 前 言

气体电介质在人类的生产和生活中应用十分广泛。它是三大介质材料之一，因为到处有它，所以大大影响了液体、固体电介质发挥它们固有的优良特性。

气体电介质是物质第四态——等离子体的母体。

气体电介质不单是绝缘材料，它在高电压和强电流作用下又是发光材料和发热材料。它还是多功能的且易于转变功能的少有的能源材料。

因此，研究气体介质的击穿理论，是一个不可忽视的基础科研课题。

二 经典理论的贡献

经典的放电理论——汤逊理论和流注理论是本世纪初建立的。汤逊理论以电子碰撞电离为基础，它能说明巴申定律，按下式计算气体击穿电压：

$$U_d = f(p^d) = \frac{B p^d}{\ln \left[\frac{A p^d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]} \quad (1)$$

流注理论说明在高气压，不均匀场中电子碰撞形成电子崩，当崩内电子数量发展到一定值时 ($e^{ad}=10^8$) 产生大量的光电离，这时放电进入一个新的阶段，由光子引出的大量电子崩的汇集形成放电流注，故称为流注理论。用它可以说明汤逊理论不能解释的一些工程实际问题。

上述经典理论的建立，帮助人们认识到以短间隙中碰撞电离为主的暗放电阶段，和以光电离为主的放电阶段的放电机理，由此便产生了一系列的放电器件(表1)。

三 近年来放电理论的发展

放电理论的发展包括原有理论的深化和新提出的理论模型两个方面。

(一) 原有理论的深化

1. 在暗放电阶段主要是初始电子的产生和电子的增长规律。

(1) 初始电子的产生不只是碰撞电离，也不是每次碰撞就实现电离，电离在许多场合还是可逆的。放电的发展是带电粒子的产生和消失的动态平衡过程。

例如近年来高频击穿机理接近找到一个适用于各种气压和各种频率的统一的理论，其基本出发点就是引入了吸附这一电离的逆过程后得出的，其理论计算与实验数据已基本吻合如图1。

表1 气体放电理论的应用举例

理论 应用 过程 实例	电子——电子崩——流注——先导——电弧
	暗放电阶段(碰撞电离为主) 光放电阶段(光电离为主) 热放电阶段(热电离为主)
P < 1 [大气压]	计数器 电光源 高能粒子探测器 高频真空器件 离子源 大功率电力整流元件 激光器 等离子聚焦装置
P = 1 [大气压]	电火花加工 流光室 喷涂技术 高压绝缘子串的 { 湿放电 除尘器 污层放电 高压架空线的无线电干扰和电量损耗 静电的防治与应用 高源高压电器 (长间隙放电机理) 沿面放电的机理 电力系统的防雷(消雷器)(避雷器) 飞行物体天线的防雷
P > 1 [大气压]	静电加速器 标准电容器 全封闭电器(SF ₆) 在流动 气体中 气动激光器 电气体发电 飞行物体的消电 电推进 提高热传导系
P < 10 ⁻⁵ [毫米汞柱]	场发射离子显微镜 受、控、热、核、反、应 电子束 离子束机 X射线高速摄影机 真空开关 冶金电弧炉
	电能利用 技术物理 材料科学 国防科学

本表在于提供理论与实用相对应的一个概貌,将放电过程划分为三个阶段二个转折点,是以该阶段电离的主要形式为根据的,按气压大小再作分类是为了便于识别。

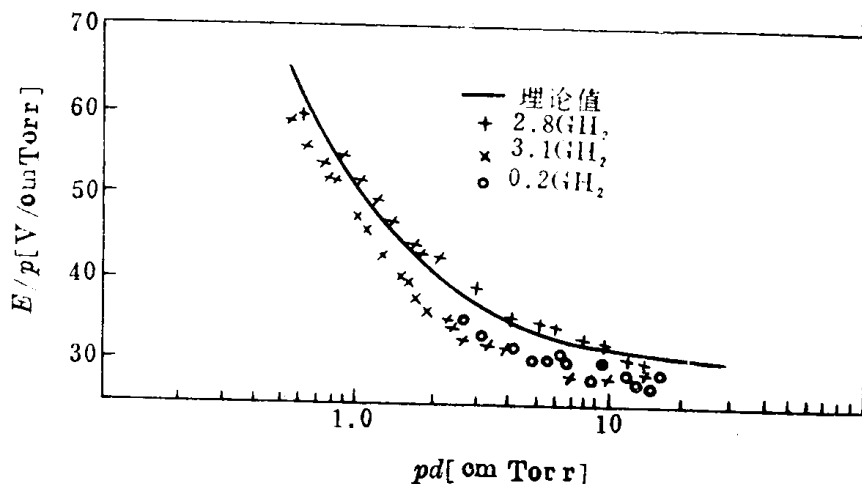


图1 高频下空气的击穿规律(附着理论和实测比较)

(2) 电子的增长规律

近年来我们不仅知道,电离与气体粒子的电子能级有关,而且应用统计力学和概率理论可以知道电子能量的分布和碰撞几率使理论计算具有良好的精确度。 α 是汤逊理论在定量上的关键参量,图2示出[1]理论推导与实验数据的符合,说明人们已经掌握了电子在电场作用下的运动规律,从而可以更好地控制放电的起始阶段,这是很有实用价值的。

(3) 空间电荷的作用

空间电荷的作用集中表现在电子崩的形成和造成电场畸变对放电发展的影响上。

电子崩在首尾两端形成的高场强,使电子崩的尾端(向阴极流注)场强随时间的增长反

而比头部(向阳极流注)增长得快(图3)[2]。造成向阴极流注的生长速度变得很大,这在实验中已得到证实。

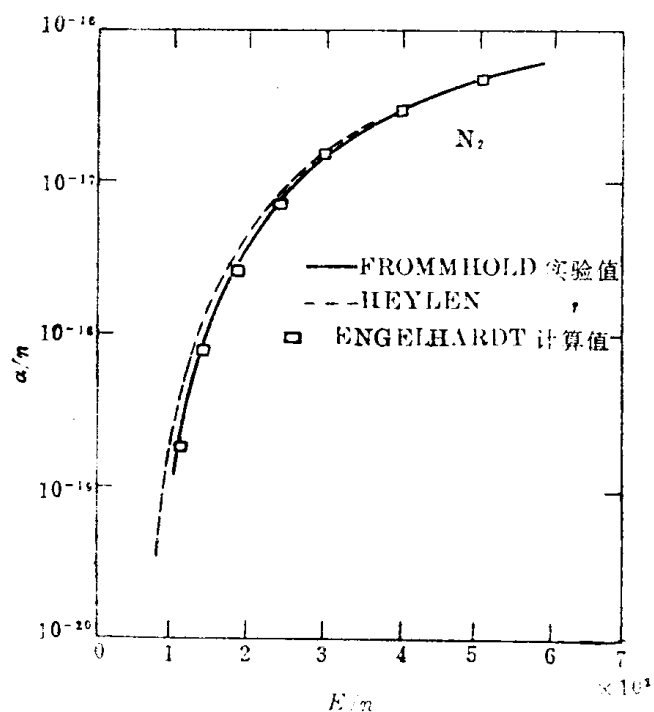


图2 N_2 中 α 随 E 的变化(n 为单位体积内的分子数)

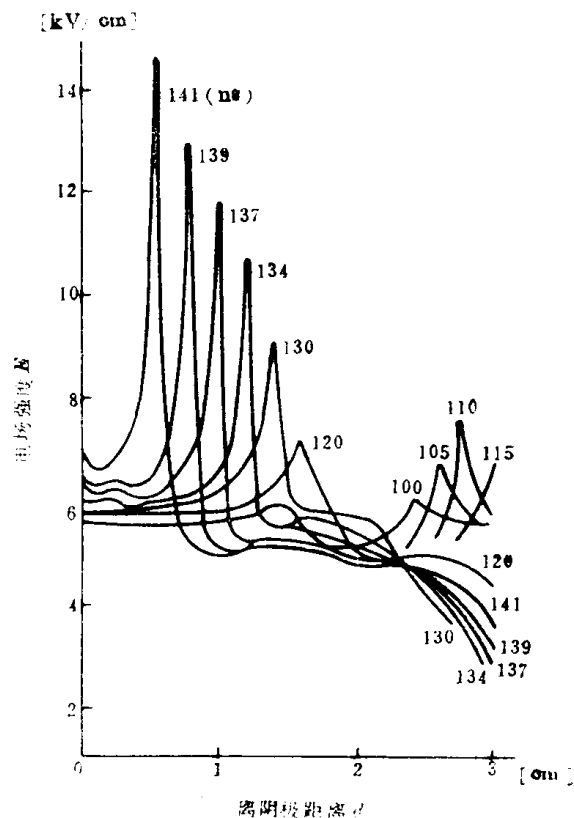


图3 不同时间下的电场分布 N_2
 $p=0.12 \text{ atm}$, $E/p=4.7 \times 10^5 \text{ V/m} \cdot \text{atm}$

2. 光放电阶段

暗放电发展到一定阶段就出现光现象,微观过程是电子崩头部电荷密集超过一定限度时,便出现光子。找出这一跃变的临界条件是很有实用价值的,它将对电光源技术和激光技术等产生重大影响。过去用实验揭示了这一突变的本质,并计算出了突变的条件为 $\alpha d = 20$,但是要达到这一条件的前提是外界电场的大小,这个电场是原来空间的电场和电子崩本身空间电荷造成的电场的叠加值。图4就是根据图3在 E 足够大时达到了发光的条件,从而得出的光输出图。流注的形成起源于光电子,对光电子的形成机理有人正探索[3]。

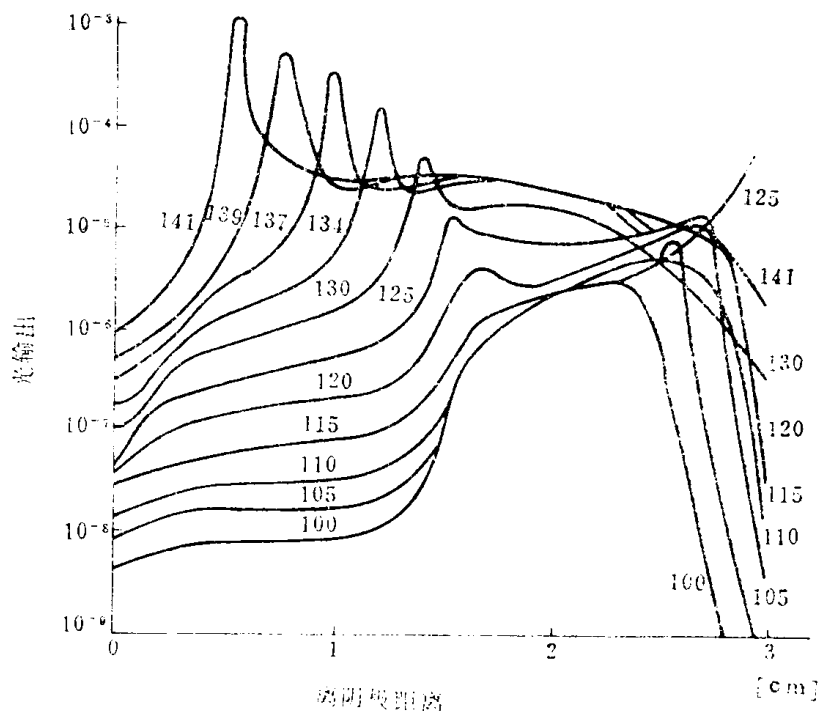


图4 相应于图3 E 造成放电的光输出

3. 热放电阶段

热放电阶段是流注强烈发展的结果。在短间隙中, 这一现象一般发生在流注通道到达对面电极(即火花击穿)后, 如果电源能供应充分的电流, 那就转变成电弧放电。在长间隙内, 流注通道还远离对面电极时就出现了这一放电阶段, 人们称转变后的预放电形式为先导。

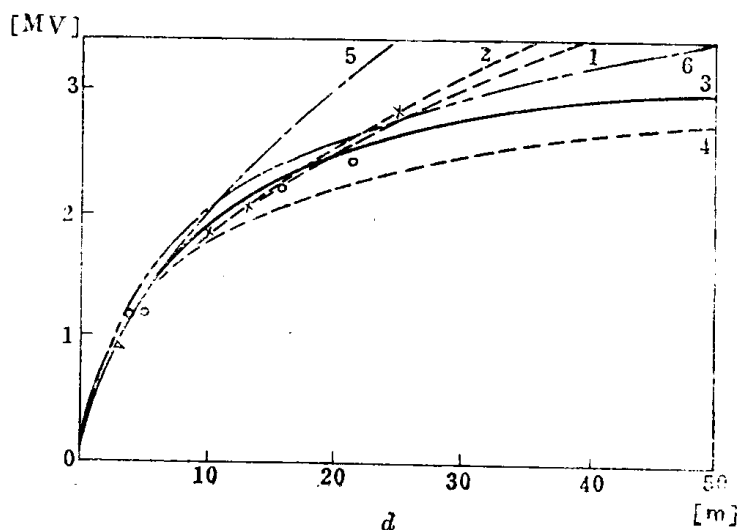


图 5 正棒对板的临界火花电压
1、2——Water; 3——Gallet; 4——Lemke; 5——Paris;
6——Aleksandrov 各种点号为实测值

因为先导的出现基于热游离, 通道上的压降很低(100kV/m 左右), 作用电压的绝大部分将加在间隙的余下部分。大大提高的场强使放电迅速发展, 因而先导出现后放电间隙的击穿电压——间距特性曲线有饱和趋向, 这对超高压输电线路的建设是极不利的。近年来在总结大量实验数据的基础上, 向电力设计部门提供了不少比较好的经验公式(图5)[4]。由图5可以看出: 在10米以内, 所有经验公式与实测数据都比较接近。

(二) 新提出的一些理论模型

近年来由于负电性气体的应用, 和超高压输电线路长间隙的出现, 在基础理论方面对有效电子的产生和第二个转折点(先导形成条件)进行了比较集中的研究。

1. SF_6 中的理论模型

(1) 由于 SF_6 存在强烈的电子附着作用, 其电离系数是原汤逊电离系数与附着系数之差, 定量关系为[5]:

$$\alpha - \eta = \bar{\beta} E - K p \quad (2)$$

这里 $\bar{\beta} = 27.8 [\text{kV}]^{-1}$

$$K = 2460 [\text{bar cm}]^{-1}$$

其流注形成的条件为

$$(\alpha - \eta)d = 10.5 \quad (3)$$

且随压力而变, 相应的击穿电压值为:

$$U_d = 0.67 + 88 (pd) \quad (4)$$

当 pd 在 $4 \times 10^{-2} \sim 3 \text{ bar cm}$ 之间适用, 即 U_d 在 $1 \sim 250 \text{ kV}$ 范围内。

(2) 体积——时间法则[6]

Boeck 提出, 当电压升高造成间隙击穿, 不仅要考虑产生有效电子需要一定的时间, 而且在间隙中具有足够场强的区域必须占有一定大小的体积。由此, 可以计算出间隙伏秒特性的包络线。

2. 在长间隙放电方面

(1) Lemke 的模型[7]

Lemke 认为, 击穿在流注区前沿到达对面电极时发生, 此时击穿电压为先导上的压降与

流注上压降之和，其计算公式为：

$$U_d = U_L + U_s = E_{0L}a_L + E_{0s}a_s \\ = E_{0L}a_0 \ln[s/a_0 + \ln(s/a_0)] + E_{0s}a_0[1 + \ln(s/a_0)]$$

这里只有 a_0 是表征不同间隙的特性参数。任一间隙做一次击穿试验即可求出它的 a_0 。 E_{0L} 和 E_{0s} 分别代表先导和流注的平均场强，它们是常数，因此改变间距 s ，即可算出击穿特性曲线。

(2) 等值半径模型[8]

Carrara 提出球板间隙的击穿电压是三个分量之和： U_1 ——先导起始电压， $\bar{u}\Delta U_1$ ——先导发展过程中的电压增量， ΔU_s ——统计的电压增量。电晕向先导过渡的第一分量 U_1 起着主要的作用，它具有明确的物理过程。模型的特点是把 U_1 时的流注区看作一个具有等值半径的球电极， U_1 看成是这个球对板的间隙的预放电起始电压，继之按先导通过余下空间所需时间求出 ΔU_1 。 ΔU_s 是表示分散性的附加量。这一计算方法的优点是，可由基本电极形状的试验结果，外推到其它电极形状。

(3) 相似定律[9]

由 Harada 提出：同一种间隙不同间距下的 U 曲线具有相似性，不同空气相对密度下的击穿电压——间距曲线亦具有相似性。从而可求出任意大气条件下，各种波形时击穿电压间距曲线。

(4) 滑闪模拟模型[10]

Winkelkemper 从先导预放电和滑闪火花具有相似的物理特性出发，由 Sprang 证实了这一设想。在直径 1.4 米的滑闪装置上，用低电压能求得长达 20 米以上的放电特性曲线。

以上仅仅指出了对工程应用有直接效果的几个主要理论模型。

我们知道，长间隙的击穿电压，主要决定于先导预放电的特性。因此，近年来在研究先导特性方面，Hutzler 和 Gallimberti 进行了实验和理论计算，而 Kekez 对先导起始条件的研究结果是令人鼓舞的，因为先导起始的意义在于获得高温等离子体形成的定量条件，它能更好的利用等离子体为人类服务。

希望气体电介质的击穿机理的说明也有助于对液、固体介质的击穿机理的探讨。

参 考 文 献

- [1] Engellardt A. G 等: Phys. Rev. 133 (1964) A 375.
- [2] Darice A. J. 等: PIEEE 118 (1971) 816.
- [3] Teich. T. H. Zeitschrift für Physik 199, 378—394 (1967).
- [4] Meek & Craggs Electrical Breakdown of Gases Fig. 5.66.
- [5] Pedersen. A 等: IEEE PAS-91 (1972) № 4. pp. 1597—1601.
- [6] Boeck. W. ETZ—A Bd. 96 (1975) H. I. S. 300—305.
- [7] Lemke, E. Elektr. Inform. Energietechnik Leipzig 3 (1973) 4 pp. 186—192.
- [8] Carrara, G. IEEE PAS-95 (1976) № 2. pp. 512—524.
- [9] Harada. H. IEEE PAS-97 (1978) № 2. pp. 342—348.
- [10] Sprang, H. D. Diss TU Berlin 1981.

电负性混合气体绝缘的优越性

邱 毓 昌

西安交通大学

一 引 言

SF_6 气体在高压电器制造业中已得到广泛应用, 而 SF_6 混合气体虽有 30 余年的研究史, 但至今却很少应用于工业产品。通常认为, SF_6/N_2 有提高工作气压和降低成本的优点, 但其耐电强度 (在总压力相同时) 却逊色于纯 SF_6 。后一结论对于实验室条件下加工的小面积试样电极是正确的[1], 但并不适用于工业装置。

由于工业装置的电极面积很大, 表面缺陷是难以避免的。因此, “面积效应” 不可忽视。这是因为击穿电压随面积增大而降低, 且击穿概率密度不再按正态分布而服从韦布尔极值分布规律[2]。这种现象通常用弱点理论来解释。

设单元电极面积在某一电压下击穿概率为 P_i , 则面积为 A 的电极系统可看作 A 个弱点绝缘的并联, 其击穿概率为 P_A 。

$$P_A = 1 - \prod_{i=1}^A (1 - P_i) = 1 - (1 - P_i)^A \quad (1)$$

若 $P_i \ll 1$, 则

$$P_A \approx AP_i \quad (2)$$

可见, 在同一电压水平下, 大面积电极系统击穿概率远大于小面积试样电极。换言之, 对于同一击穿概率来说, 大面积系统的击穿电压比小面积试样要低。

虽然 SF_6 和混合气体中都有面积效应问题, 但各种气体对电极表面缺陷的敏感程度不同, 因而实际装置中各种气体的优劣顺序可能与在小面积试样中不同。

二 均匀场和不均匀场中电负性气体击穿的不同特点

电负性气体自持放电的流注判据为:

$$\int_0^{x_c} (\alpha - \eta) dx = K \quad (3)$$

式中 α —— 电子碰撞游离系数;

η —— 电子附着系数;

x_c —— $\alpha - \eta = 0$ 处座标。若整个间隙中 $\alpha - \eta \geq 0$, 则 $x_c = d$ (d : 极间距离);

K —— 常数。对于 SF_6 , $K = 10.5$ [3]。

由图 1 可见, 对多数强电负性气体, 在 $\alpha - \eta = 0$ 附近可写出下式

$$\frac{\alpha - \eta}{p} = \left[\frac{E}{p} - \left(\frac{E}{p} \right)_0 \right] \quad (4)$$