

从工程电介质进展看前沿课题

屠德民

(西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室 西安 710049)

摘要 叙述工程电介质领域内近几年来取得的进展,重点介绍工程电介质理论的数学基础、固体聚合物绝缘的电击穿理论、纳米电介质、局部放电测量、空间电荷、电缆绕组电力设备、绝缘油、交联聚乙烯电力电缆、超导绝缘、有机电光器件、环境友好绝缘材料、塑料绝缘回收、变频电机绝缘、新材料、陶瓷介质和合成绝缘子方面的研究成果。

关键词: 工程电介质 绝缘 测量 进展

中图分类号: TM21

A General Survey of the Progress in Engineering Dielectrics

Tu Demin

(Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049 China)

Abstract A survey of recent progress in engineering dielectrics at home and abroad is described in this paper. It focuses on the following contents: mathematical basis of the theory of engineering dielectrics, electrical breakdown mechanism of solid polymeric insulation, nano-dielectrics, partial discharge measurement, space charge, power equipment with cable wound, insulating oil, super-conducted insulation, XLPE power cables, organic electroluminescent devices, biodegradable insulation, reclamation of plastic insulation, insulation in inverter-fed motors, new insulating materials, ceramic dielectrics and synthetic insulators.

Keywords: Engineering dielectrics, insulation, measurement, progress

1 引言

工程电介质包括电气工程电介质、电子工程电介质、生物工程电介质、航天电介质和其他特种电介质^[1]。工程电介质的理论基础是电介质物理,它是目前物理学留下的唯一的硬骨,其基础研究涉及物理学中许多概念和原理的更新和重建,对未来科学技术的影响至关重要^[2]。

工程电介质涉及范围广泛,本文不可能面面俱到,仅以电气工程电介质为重点,适当包括一些其他领域中有重大影响的内容,综述最近几年的研究动态和进展。

2 工程电介质理论的数学基础

凝聚态物质的结构既有序又无序,讨论复相构成的非均匀系统的性能——极化、电导、树枝化和击穿,必须使用分形和逾渗两种数学概念。在考虑局部放电、电荷注入、输运及树枝生长中非线性现象,在确定性中存在着内在的随机性,浑沌在解释这些介电现象方面取得了成功^[3]。

击穿是电场把能量转移给介质的结果,在能量转移过程中,存在着正、负反馈两种情况,正反馈增加能量转移;负反馈减少能量转移,能量反馈引起非线性关系。在低场强下,正反两种反馈是平衡的,但当正反馈占主导时,能量转移加速,失控时,介质发生击穿。反馈和变化之间是有时延的,前一事件有时是十分明显的,例如,空隙中的局部放电、电树枝通道中产生的空间电荷,必然影响后继发生的放电情况,这些是击穿中的决定性的浑沌(deterministic chaos),它对击穿的起始条件是无限

收稿日期 2004-07-12 改稿日期 2004-12-15

灵敏的,作者以热击穿、电树枝和局部放电为例讨论了决定性浑沌的情况^[4]。

3 固体聚合物绝缘的电击穿理论

鉴于固体聚合物物质结构的复杂性,公认的电击穿理论至今未形成,曾经提出的击穿模型有:高场强下击穿的电子瀑布模型、跳跃模型、高迁移模型、起伏统计模型、自由体积模型、机械开裂模型、自由基引起空隙的模型、辐射能量转移模型、非辐射能量转移模型和电老化的陷阱理论等。最近发现交联聚乙烯的电老化规律中, $\log t$ 与 $\log F$ 之间没有线性关系 (t 为时间, F 为频率), 而 F 和 $\log t$ 之间是直线关系, 从而提出不同的模型。

(1) Crine 模型。假设电老化是一个热活化过程, 从未老化状态到老化状态, 必须跳过活化能位垒 ΔG , 聚合物中存在着范德瓦斯力结合的弱键 (0.1eV), 在电场的长期作用下, 断裂形成次微孔, 形成活化体积, 材料开始老化, 因此老化速率与活化体积和电场强度的平方成正比。当电场感应的机械力大于断裂的 Griffith 临界值, 分子链断裂, 从能量角度而言, 位垒 ΔG 将下降, 下降值与电场感应力与活化体积的乘积有关, 由此推出跳过位垒, 也就是老化时间的公式^[5]。

(2) 空间电荷模型。也称空间电荷老化模型, 老化可被看成一种反应过程, 反应前后, 反应物和生成物的浓度比决定于自由能, 反应物处在自由能位垒的低谷处, 生成物处在高谷处, 由化学反应动力学的微分方程式, 推出老化的时间关系。空间电荷的存在, 静电能引起反应物自由能的升高, 有利反应物向生成物的转换, 增加老化速率。考虑到空间电荷分布区的范围与储存电荷 Q 的 4 次方成正比, 而储存电荷 Q 与电场强度的关系是幂函数的关系, 即可推出老化的公式^[6]。

(3) 电致机械开裂模型。介质中电致机械应力与电场强度的平方成正比, 介质中存在着以准微观裂缝的缺陷, 裂缝的扩大和传播遵从 Griffith 准则, 在弹性体中, 当裂缝周围介质中储存的能量等于扩大裂缝所需能量, 裂缝就会扩展。在聚乙烯中裂缝发生在球晶边界上, 固有裂缝等于球晶尺寸, 约 $10\mu\text{m}$, 计算出发生裂缝扩展的临界电场强度为 $1\sim 1.6\times 10^9\text{V/m}$, 如裂缝长 $100\mu\text{m}$, 则电场强度降低到 $0.56\times 10^9\text{V/m}$ 。如果材料和电极的界面上有外

来杂质, 界面能量的降低和表面电场强度的提高, 裂缝非常容易扩展, 另一个增加裂缝扩展的因素是空间电荷, 空间电荷增加电场强度。

实际情况中, 发生电老化的电场强度可更低, 这是因为聚合物中存在范德瓦斯的弱键, 此外, 断裂是一个统计过程, 断裂所需热能的概率浓度可以集中到一个键上, 根据概率论推出了寿命公式^[7]。

4 纳米电介质

纳米技术是 21 世纪的主导技术, 纳米材料的尺寸可与电子德布罗意波长、超导相干波长和激子玻尔半径相比较, 电子局限在如此小的空间, 电荷的输运过程受到限制, 纳米体系包含的原子较少, 连续的能带变成分立能带, 量子效应使纳米材料的光、热、电和磁等物理性能与常规材料的有所不同。

在纳米技术驱动下, 微米甚至纳米的介电性能的研究越来越受到重视, 例如分子单层、分子界面和大分子必须详细研究, 相关研究的重点在于了解和探讨协同现象, 协同现象是介电性能的“心脏”, 浑沌和非线性系统中有序的形成正在推动这方面的研究^[8]。在协同作用的、局部结构和动态次序远未平衡的系统中, 纳米范围上电场的影响是头等重要的, 这些电场形成化学位垒梯度、机械力和熵位垒梯度, 认识这些场的相互作用, 就掌握聪明器件近来的发展^[9]。

纳米电介质中界面现象占重要地位, 在金属电极与介质接触情况下, 金属边的准自由电子云从正极性金属部分伸出的距离相当原子距离, 在这种表面上化学和物理力吸附着一层分子和离子, 形成内 Helmholtz 层, 在它的外面介质中, 有一层逐渐衰减的空间电荷层, 界面电场强度高达 10^9V/m , 强烈影响着电极和大块介质之间界面上电子输运, 决定着氧化还原过程, 因此许多介质系统的低频特性可用纳米界面性能来解释。

在电极和介质的界面上横向与垂直方向上电荷的输运过程是非常不同的, 电荷输运发生在离子丰富的空间电荷层内, 调节界面两边的条件, 可获得与场效应晶体管工作相似的现象, 在 LB 多层堆的垂直方向存在着一系列限制电子移动的量子井, 但允许自由电子在 XY 方向上运动, 用外电场或光激励, 使过剩电子在层间位移, 从而形成一个信息储存单元^[10]。在有序的 LB 层的偶极子矩阵的面上

施加横向电场使其定向,也可能做信息处理单元。另一种设想是有极性区和无定区间的界面上有压电效应,可开发纳米级传感器件。

聚合物凝胶体有作为开关、阀门、传感器、换能器和储存元件。电场对水溶性凝胶体影响巨大,50V/m的低电场强度能使水解的聚丙烯酰胺皱缩,各种聚电解质凝胶体在电场强度160V/m下能收缩、振动和弯曲,因此聚合物凝胶体是研制机器人的人造肌肉的材料^[9]。

在工程电介质方面,正在广泛研究聚合物纳米复合介质的性能,研究结果表明:在电、热和机械性能上,聚合物纳米复合电介质比传统填充聚合物优越,改善的原因是聚合物阵列与纳米填料之间相互作用区的中介特性(mesoscopic characteristics),研究这种中介特性将为电介质和绝缘开辟新的学术领域。

5 局部放电测量

目前用在电力设备绝缘的局部放电中,测量频率不超过10MHz^[11],几十年测量电路基本没有变化,可是局部放电(PD)的模式识别方面取得了重大进展。通过PD脉冲密度、幅值和相位分布进行鉴别^[12],随着计算机技术的提高,智能化技术开始自动识别,模式识别有两种方式:一种是计算机技术结合一定的统计参数确定PD的随机性。一种是使用神经网络,对试验数据不作统计预处理。神经网络分三种,监督训练、非监督训练和固定加权程序。使用多层感觉神经网络可以识别两种或以上PD源的脉冲模式^[13]。

在电力设备的电缆中,不同地点的放电脉冲经过传输发生不同程度的畸变,幅值、上升时间减小和脉冲展宽,给PD模式识别带来困难,这样导致用模糊逻辑识别PD脉冲模式,模糊逻辑程序允许使用明确的数值组去模糊测量的真实值,在模糊逻辑系统中明确的输入变换成模糊数值组,按一定规则运算,输出的数据组再变换成真实数据^[14]。

对PD脉冲高度-相位分布模式,也可进行分形特性的分析,使用分形度和多孔性两个几何参数,分形度是3D脉冲分布表面粗糙度的量度,而多孔性表示几何分形表面的致密性,分形法可区别噪声、电晕和人造空隙放电。应用分形数据和多层感觉神经网络,模式识别率达到98%^[15]。

在强烈干扰条件下,PD放电量较低时,用小波技术相当有效。把神经网络、模糊逻辑和小波变换相结合,分析老化对脉冲的影响很成功^[16]。当使用反传播网络时,神经网络的运行更有效,分类更可靠^[17]。

为了解决在线检测的困难,最近开始研究光纤测量变压器中局部放电的方法;用电光调制器检测高压电缆中的局放放电的方法。PWM电压波下变频电机绝缘中局部放电测量也越来越受到重视。

6 空间电荷

从微电子范围的MOS(金属氧化物半导体)器件到大尺寸的绝缘系统(高压电力电缆,真空管),研究老化和击穿现象常使用极化和陷阱电荷两个概念,然而,陷阱电荷如何影响电气行为,仍是一个公开争论的问题。这些问题的重要性导致国际上专门成立了课题小组来研究它们。由两个技术委员会组成,一个小组是CIGRE测量小组,目的是评估校正和比较各种测量技术,另一小组是IEEE DEIS TC32-13(固体介质中的空间电荷)和32-4(辐射效应),主要研究电荷陷阱-脱陷机理,获得对空间电荷的贮存、老化和击穿间的宏观特性相应的微观或纳米级机理,以此获得空间电荷测量和高压试验结果间的联系。

空间电荷特性也影响介质的一些普通的特性,例如,电荷在介质体内、表面和界面的贮存、附着、摩擦、磨损和异质材料的静接触的电荷输运,电介质和气体、液体相对流动引起的带电,或者与其他固体介质摩擦带电,都影响表面亲水或憎水的电化学反应,从而影响湿气的吸收,控制着水树的引发和生长。

陷阱密度和陷阱能级分布也是一个重要的课题,简单的静电学计算表明,每个原子拥有平均电子数在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 时,将使电场达到 $10^{10} \sim 10^{11}$ V/m。在半导体-氧化物界面的电荷密度已经接近这个值。在含有大量杂质、缺陷及晶界的复杂材料中,局部的电荷密度估计也能达到这个值。电荷陷阱的另一个重要方面是在介质中贮存的能量,将电场作用下的绝缘体的电致伸缩考虑进去,把击穿看作断裂的延伸,那么可将介质击穿强度与其机械断裂强度联系起来。

脱陷的放热效应给理解缺陷形成、老化及破坏

现象带来了新的视野,用很低剂量的电子束轰击绝缘体的实验表明,破坏不是源于电子的轰击,而是电荷脱陷过程;关于石英晶体的实验中,由俄歇电子能谱观察到表面电荷脱陷后表面成分的变化。真空中脱陷通常伴随着粒子发射(电子、离子、光子和声子)和等离子体的扩展。载流子复合过程中声子的发射导致缺陷形成,电子-一空穴对的寿命实验证实了晶格松弛的重要性,以及本征缺陷对形成非本征缺陷的影响。

多年以来,闪络一直被视为非常复杂的现象,实际上只是与电荷陷阱和脱陷有关的事件。有必要再次说明的是击穿结果依赖于实验条件,特别是决定于影响微观(或纳米级)陷阱电荷分布的材料微观结构^[18]。

另一个趋势是通过空间电荷分布的测量,确定电荷陷阱的参数及绝缘的老化程度。研究空间电荷三维分布的测试方法。

7 电缆绕组发电机、风力发电机和变压器

100年来云母、沥青/环氧和油浸纸分别是旋转电机和变压器的主要绝缘,这些绝缘结构中电场分布复杂,局部放电、电晕严重,油浸纸易燃,漏油污染环境,云母资源有限,制造云母带有毒。最近ABB公司以交联聚乙烯电缆制造发电机和变压器的绕组,形成了新型发电机、新型风力发电机和新型变压器。其主要优点是环保性能好、寿命长、原料丰富,绕组中没有过电压。

目前,电缆绕组汽轮发电机的额定电压已达135kV,容量42MVA,电缆绕组水轮发电机额定电压155kV,容量75MVA,电缆绕组变压器电压145kV,容量150MVA^[19-21]。

电缆绕组发电机直接输出高压,免去了传统使用的升压变压器,具有一定的经济意义。如果单独看电缆绕组发电机和变压器,其效率较低,这也许是ABB公司把这些专利卖掉的原因,不过,用有机绝缘、同轴(较)均匀电场的绝缘结构是打破传统绝缘结构的一种尝试。

8 电力变压器的绝缘油

目前高压变压器大都使用变压器油作为绝缘油,最近出现改性或代替变压器油的趋向。

(1) 混合绝缘油。含水量严重影响变压器油

的介电性能,考虑到液体酯有较高的水饱和度,最近,国外经过大量的试验,包括老化试验后,得出结论:采用矿物油和液体酯的混合物更适合用于高压变压器。矿物油中酯的含量越高,混合绝缘液体及其浸渍的固体绝缘的老化速率越低,当用Nomex纸作固体绝缘时,混合的优点更显著^[22-24]。

(2) 菜油。菜油使用在电容器和变压器中有两个原因:①变压器油(矿物油)不能生物降解。②石油产品最终会耗尽。1962~1982年,考虑到菜油有较高的介电常数,蓖麻油、棉籽油首先用于油浸纸电容器,经过研究发现氢化蓖麻油、椰子油和花生油也适用于电气绝缘,1985年美国报告含添加剂的大豆油也可做电容器,1994年发现含有甲基酚的菜油性能较好。

为了把菜油用于变压器,必须改性,菜油的一些成分在相当短的时间内易老化,不饱和度是这些油热不稳定性的指标,变压器中的铜对氧化有催化作用,要加有效抗氧剂,纯化菜油,去除自由离子杂质,使流动性与变压器油可比较,并可用在寒冷的环境中,变压器用菜油已有市场供应,牌号为BIOTEMP^[25,26]。最近又有人提出用棕榈油代替矿物油的试验研究^[27]。

9 交联聚乙烯(XLPE)电力电缆

(1) XLPE电缆外半导体屏蔽层的电阻率。现在电缆生产标准规定外半导体屏蔽层的电阻率不低于 $500\Omega\cdot\text{m}$,在高压XLPE电缆结构中,沿半导体外屏蔽层的轴向上,均匀分布着接地的圆形铜导线,以便在电缆短路时,通过大电流,Boggs^[28]通过有限元法对15kV XLPE电缆的典型结构进行了电场计算,当接地铜导线与半导体屏蔽层不接触长度超过2cm时,在雷电作用下,接地线与半导体屏蔽层之间的空隙中会发生闪络,刺穿外半导体屏蔽层,引起介质击穿,结论是外半导体屏蔽层的电阻 $500\Omega\cdot\text{m}$ 太高,应降低到 $10\Omega\cdot\text{m}$ 。

(2) 改性电缆内屏蔽料提高绝缘介电强度。一般来说,聚合物绝缘的击穿起始于电极与绝缘界面的树枝化,为了提高聚乙烯绝缘的介电强度,日本曾在半导体屏蔽料中加入三油酸甘油酯,改善绝缘界面形态,提高击穿电场强度,但性能不稳定^[29]。最近报道,在半导体屏蔽料中除加入一定的二茂铁衍生物外,再按比例加入表面活性剂和钛耦联

剂,当电缆的屏蔽层和绝缘同时挤出后,这些成分从半导体屏蔽层中扩散进绝缘的表层中,改变半导体与绝缘的界面上聚乙烯的形态结构,实验结果表明,在一定含量下,可提高聚乙烯的击穿电场强度39%,性能稳定,具有实用化的可能^[30]。

(3)高工作温度的交联聚乙烯电力电缆。目前的XLPE电缆中线芯允许的最大工作温度为90℃,最近日本采用高熔点聚乙烯和半寿命较长的有机过氧化物作交联剂,采用较高温度的挤出工艺,已经研制出电缆线芯最高允许工作温度105℃的XLPE电缆^[31]。

(4)高压直流交联聚乙烯电缆。日本已经研制成±500kV直流XLPE电缆和附件,电缆绝缘具有低空间电荷和高体积电阻率,研究表明高压交联电缆传统使用的添加剂也可用于生产直流高压电缆,但对交联剂、抗氧剂Irganox PS802、抗氧剂Irganox 1035和阻燃剂四种添加剂之间的比例要充分选择,以达到降低空间电荷的目的。此外在工艺上要缩短在高温的加热时间。添加有机和无机添加剂改善聚乙烯的形态,降低空间电荷^[32]。

10 超导绝缘

不久将来超导体和电子器件会商品化,在任何温度下聚合物绝缘对载流导体可起机械支持作用,这是气体和液体绝缘做不到的,聚合物绝缘的介质损耗随温度的降低而降低,与导体发热、从周围流入的热量相比,介质损耗可忽略不计。在低温下非极性聚合物的介电强度比室温下高得多,含有填料的乙丙胶在低温下收缩小,介电性能优越。如果绝缘中有气隙放电,低温下局部放电的危害性比室温下大得多。低密度聚乙烯的树枝起始电压比室温下高6倍^[33],短路树枝特性也大大提高^[34],低温下聚合物的直流和脉冲强度比室温下有所提高^[35]。

11 变频电机绝缘

PMW变频电压上升时间快、高频分量多,一般漆包线很易击穿,绝缘击穿是局部放电、介质发热和空间电荷等因素综合效应引起的,因此改进的漆包线绝缘必须具有耐局部放电、高耐热性和电荷消散功能^[36]。

新型漆包线以聚酰亚胺作基材,绝缘有三层,除传统的基漆和顶漆外,还有一层屏蔽漆,屏蔽漆

由有机和无机复合材料组成,无机成分TiO₂增强新型漆包线绝缘的耐局部放电功能,其作用类似云母,TiO₂的电导率较高、热传导性较好,能降低电荷的积累,避免介质局部过热,这种漆包线机械整体性亦好,可按传统方法绕制电机线圈^[37]。

12 有机电光器件

有机电光器件将是下一代代替液晶的平板显示,有机电光器件的优点是与视角无关,因为它自己发射光线的反应速度快,用低直流电压驱动,器件中不用汞、砷等有毒物质。

器件有三层结构,在两个透明电极间夹一层有机薄膜组成,有机层沉积在作为半透明阳极的ITO电极上,Copper Phthalocyanine (CuP)作为空穴注入层,N,N'-di(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-1,1'-diphenyl-4,4'-diamine (NPD)-αNPD作为空穴输运层,tris(8-hydroxyquinoline) aluminum (ALq3)作为电子输运系统发光层。这种有机发光二极管是可变形显示的,其发光原理是电子空复合发光^[38,39]。

13 生物降解绝缘材料及塑料绝缘的回收

减少对环境的污染,绝缘材料也希望能生物降解,聚乳酸(PLA)(polylactc acid)已经广泛被研究,它是一种可生物降解的聚合物材料^[40,41],为了把这种材料用于电线、电缆绝缘,近来日本作了初步研究,研究表明,PLA在室温下的体积电阻率、介质损耗角正切几乎与交联聚乙烯的一样,脉冲击穿电场强度是交联聚乙烯的1.3倍,在直流电压下,空间电荷比交联聚乙烯的少^[42]。

高密度聚乙烯(HDPE)的废品占城市固体垃圾的30%,把回收的HDPE掺入新的HDPE中可做成低电场强度使用的绝缘材料,当掺入量为75%~100%时电阻率为 $10^{10} \sim 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$,介电强度仅降低17%^[43]。

以临界水回收交联聚乙烯的方法,用临界水处理有毒和无毒元素的废物,材料在蒸汽压力曲线图中有固、液和气三相,三相的交点称为临界点在这种状态上的物质称超临界流体,用水作流体特别适合于分解化学物质,并对环境的影响降到最小,水的超临界点是647K和22.1MPa,用临界水方法回收的交联聚乙烯可重新制造电线电缆^[44]。

14 新材料

(1) 高热传导环氧树脂。现在电气元件发热量大, 迫切需要改善环氧树脂的散热性, 从原理上看, 绝缘树脂的热传导的媒体是声子, 声子传导决定于结晶度, 声子散射发生在无定形体的界面上, 通过控制纳米结构, 使宏观的无定形结构中存在着微观的晶体结构, 可以降低散射, 提高热传导。作者研制成一种高有序结构的环氧树脂, 在近晶结构的晶格面中晶格间距离 4nm, 决定于不同的结构因素^[45], 这种新型环氧树脂的热传导率比普通环氧树脂高 2~5 倍。

提高环氧树脂热传导的另一种是同时加入两种填料——碳黑和硝化硼, 试验结果表明: 加入两种填料环氧热传导率为 3.5W/m·K, 单使用一种填料的只有 2W/m·K^[46]。

(2) 新型电解电容器。固体电解钽电容器主要用于计算机和移动通信工业中, 因体积小、可靠性高, 为了迎接将来的挑战, 必须寻找能代替紧张物资钽的替代品, 铌与钽有相似的化学、物理性能, 但价格较低, Nb₂O₅ 与 Ta₂O₅ 相比有较高的介电常数。作者研制了以铌作为具有纳米尺寸的电介质氧化层的电解电容器, 在此电容器中无定形纳米介质铌的五氧化物由阳极氧化形成, MnO₂ 阴极压在石墨银漆上^[47]。

15 陶瓷介质

在手机中作为微波应用的介电材料必须降低尺寸、重量, 必须有高 Q 值和高介电常数。过去的陶瓷介质的焙烧温度与电极材料(铜、银)相比太高, 最近研制了低温度陶瓷介质(LTCCs), 可用在多层集成电路中, 虽然 MLCCs 多层基片电容器焙烧温度也低, 但介损太大, 因此 Bi_{0.95}Sb_{0.05}NbO₄ 陶瓷受到重视^[48]。以 CoO, Y₂O₃ 掺杂的 BaTi₄O₉ 陶瓷有一定的优越性^[49]。

16 合成绝缘子

全世界的电力单位正在逐渐接受 HV 合成绝缘子, 在北美, 新装的高压绝缘子中合成绝缘子已占 60%~70%, 合成绝缘子比陶瓷、玻璃绝缘子的优点是重量轻、机械强度高, 在严重的污染和潮湿环境中具有较高的耐电强度。可是, 因使用期不长, 其

寿命、可靠性还不清楚, 也许在严酷条件下, 合成绝缘子会腐蚀、开裂, 发生干带电弧(dry band arcing), 导致击穿^[50]。

现在做合成绝缘子的材料有: 乙丙橡胶(EPR), 乙烯丙烯二元单体(EPDM)、硅橡胶(SIR)、和环氧树脂。试验表明, 在污染条件下, SIR、EPR 和环氧树脂的合成绝缘子比陶瓷绝缘子好, 但 EPDM 绝缘子(34.5~500kV)性能不好, 会穿孔, 损坏裙边^[51]。EPR 绝缘子又比环氧树脂好^[52]。在污染环境高温固化 SIR 绝缘子闪络电压比 EPR 和 EPDM 的高^[53]。在 HVDC 和 HVAV 和长时期运行中 SIR 性能稳定^[54]。经自然老化后, 涂室温固化 SIR 陶瓷绝缘子的表面憎水性没有 SIR 合成绝缘子的好^[55]。

参考文献

- 1 王寿泰. 工程电介质的发展前景分析. 学习园地, 1998, 35
- 2 李景德, 陈敏. 物理学中的第二片大沙漠——电介质物理学. 中山大学学报论丛, 1998 (2): 208~213
- 3 雷清泉. 工程电介质最新进展. 北京: 科学出版社, 1999
- 4 Dissado L A. Deterministic chaos in breakdown does it occur and what can it tell us? IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 7(5): 752~762
- 5 Jean-Pierre Crine. Aging and polarization phenomena in PE under high electric fields. IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, 2002, 9(5): 697~703.
- 6 Dissado L A, Mazzanti G, Montanari G C. The role of trapped space charges in the electrical aging of insulating materials. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(5): 496~506
- 7 Lewis T J. Polyethylene under electrical stress. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(5): 717~729
- 8 Bruce H Stewart, Thompson J M. Nonlinear Dynamics and Chaos. John Wiley, Chichester, 1986
- 9 J Lewis T. Nanometric dielectrics. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 812~824
- 10 Donovan K J, Scott K, Sudiwals R V, et al. Determin-

- ation of parallel and perpendicular intermolecular tunneling rates in two langmuir-Bodgett Quantum Well System, *Thin Solid Films*, 1994, 1 (244): 985~989
- 11 Bartnikas R. Partial discharges, their mechanism, detection and measurement, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, 9 (5): 763~808
 - 12 Kelenm A. Trends in PD diagnostics: when new options proliferate, so do old and new problems. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1995, 1 (2): 529~534
 - 13 Cashin C, Wiesmann H J. PD recognition with knowledge-based preprocessing and neural networks, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1995, 2: 578~589
 - 14 Gupta M M, Yamakawa T. *Fuzzy Logic in Knowledge Based Systems*, Amsterdam: North Holland Press, 1998
 - 15 Candela R, Merelli G, Chifani R S. PD recognition by means of statistical and fractal parameters and a neural network. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, 7: 87~94
 - 16 Hudon C, Batnikas R, Werthemer M R. Effect of physic-chemical degradation of epoxy resin on PD behavior. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1995, 2: 1083~1094
 - 17 Kai Gao, Kexiong Tan, Fuqi Li, et al. PD pattern recognition for stator bar models with six kinds of characteristic vectors using BP network. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, 9(389)
 - 18 Damamme G, Le C Gressus, De Reggi A S. Space charge characterization for 21th Century. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997, 4 (5): 558~584
 - 19 Mars Leijon. Introducing PowerformerTM—A breakthrough in electric machines and applications in system. Yokohama, 1999, 11: 16~17
 - 20 Jaksts A, Leijon M, Nilsson L, et al. A major breakthrough in transformer technology. *CIGRE*, 2000: 12~101
 - 21 Mats Leijor, Lars Gertmar, Jan Martinsson, et al. Breaking conventions in electrical power plants. *CIGRE*, 1998: 11/37~03
 - 22 Issouf Fofana, Volker Wasserberg, Hossein Borsi et al. Retrofilling conditions of high-voltage transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2001, 17 (2): 17~30
 - 23 Fofana, V. Wasserberg, H Borsi et al. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers—Part 1: Investigation of mixed liquids. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 18 (3): 18~31
 - 24 Fofana, Wasserberg V, Borsi H et al. Ballellenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers—Part 2: Impreghated paper insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 18(4): 5~16
 - 25 Ommen T V. Vegetable oils for liquid-filled transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 18 (1): 6~11
 - 26 Bertrand Y, Hoang L C. Vegetable oils as substitute for mineral oils. *Proc of the 7th ICPADM. June 1-5. 2003, Nagoya*: 491~500
 - 27 Suwarno F, Suhariadi S, Imsak L. Study on the characteristics of palm oil and its' Derivatives as liquid insulating materials. *Proc. of the 7th ICPADM. June 1-5, 2003, Nagoya*: 495~499
 - 28 Steven A. Boggs 500Ω-m—Low enough resistivity for a cable ground shield semicon?. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2001, 17 (4): 26~32
 - 29 Okamoto T, Ishida M, Hozumi N. Dielectric breakdown affected by the lamella configuration in XLPE insulation at a semiconducting interface. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, 1989, 24: 599~607
 - 30 Gao L Y, Guo W Y, Tu D M. Interfacial microstructure and withstand voltage of polyethylene for power cable. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10 (2): 233~239
 - 31 Yamada H, Nakagawa S, Katakai S, et al. Development of Heat-resistant XLPE cable and accessories. *Proc. of the 7th ICPADM, June 1-5, 2003, Nagoya*: 776~781
 - 32 Hanley T L, Burford R O, Fleming R J, et al. A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2003, 19 (1): 13~24

- 33 Kosaki M, Shimizu N, Horii K. Treeing of polyethylene at 77K. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1977, 12: 4045
- 34 Shimizu N, Kosaki M, Horii K. Space charge effect on local electric breakdown of polyethylene at 77K. J. Appl. Phys. 1997, 48: 2191~2195
- 35 Kosaki M. Super electrical insulation of polymers in cryogenic region. Proc. of the 7th ICPADM, June 1-5, 2003, Nagoya: 9~15
- 36 Yin Weijun. Failure mechanism of winding insulation in inverter-fed motors. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13 (6): 18~23
- 37 Yin Weijun. Dielectric properties of an improved magnet wire for inverter-fed motors. Electrical Insulation Magazine, 1997, 13 (4): 17~23
- 38 Tanaka K, Fujita S. Preparation and electrical characteristics of organic electroluminescent devices. proc. of 7th ICPADM, June 1-5, 2003, Nagoya: 45~48
- 39 Yamada K, Tamino K, Mori T, et al. Organic lightemitting diode using semi-transparent anode for flexible display. Proc. of 7th ICPADM, June 1-5, 2003. Nagoya: 49~56
- 40 Gebelein C, Canaher C. Biotechnology and Bioactive Polymers. New York: USA Plenum Press, 1994
- 41 Tajisu Y, Shikinami Y, Date M, et al. Huge optical rotatory power of uniaxially oriented film of poly-L-lactic acid. J. Materials Sci. Lett, 1999, 18: 1785~1988
- 42 Nakagawa T, Nakiri T, Hosoya R, et al. Electrical properties of biodegradable polylactic acid film, Proc. of 7th ICPADM, June 1-5, 2003, Nagoya: 499~502
- 43 Cruz S A, Zanin M. Evaluation of the incorporation of recycled material in the dielectric properties of high density polyethylene, Proc. of 7th ICPADM, June 1-5, 2003, Nagoya: 503~505
- 44 Watanabe S, Komura K, Nagaya S, et al. Development of cross-linked polymer material recycling technology by supercritical water. Proc. of 7th ICPADM, June 1-5, 2003, Nagoya :595~598
- 45 Takezawa Y, Akatsuka M, Farren C. High Thermal Conductive Epoxy Resins with Controlled High Order structure, Proc. of 7th ICPADM, June 1-5, 2003, Nagoya: 1146~1149
- 46 Okamoto T, Sawa F, Tomimura T, et al. properties of high-thermal conductive composite with two Kinds of Fillers, Proc. of 7th ICPADM, June 1-5, 2003, Nagoya: 1142~1145
- 47 Fischer V, Stomer H, Gerthsen D, et al. Niobium as new material for electrolyte capacitors with nanoscale dielectric oxide layers. Proc. 7th ICPADM, June 1-5, 2003, Nagoya: 1134~1137
- 48 Young-Hie Lee, Eui-Sun Choi, Ki-Won Ryu, et al. Microwave dielectric properties of $(\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05})\text{NbO}_4$ ceramics with sintering temperature. Proc. of 7th ICPADM, June 1~5, 2003, Nagoya: 769~772
- 49 Eui-Sun Choi, Moon-Kee Lee, Young-Hie Lee, et al. Proc. of 7th ICPADM, June 1~5, 2003, Nagoya: 773~775
- 50 Reuben Hacham. Outdoor HV composite polymeric insulators. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6: 557~585
- 51 Houlgate R Gm, Switt D A. Composite rod insulators for ac power lines: electrical performance of various designs at a coastal testing station. IEEE Trans. on Power Delivery, 1990(5): 1944~1955
- 52 Olivira S M, deTourrel C H. Aging of distribution composite insulators under environment of electrical stress, IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 5: 1974~1977
- 53 DeTourrell C H, Lambeth P J. Aging of composite Insulators: Simulation in a fog chamber. IEEE Trans. on Power Delivery, 1990(5): 1978~1983
- 54 Vlastos A Em, Gubansk S M. Surface structural changes of naturally aging silicone and EPDM composite insulators., IEEE Trans. on Power Delivery, 1990(5): 888~900
- 55 Gubanski S M, Vlastos A E. Wettability of naturally aged silicone and EPDM composite insulators, IEEE Trans. on Power Delivery, 1990(5): 1527~1535

 作者简介:

屠德民 男, 1936年生, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为聚合物击穿机理及空间电荷测量。