

液体介质击穿机理研究进展

黄文力^{1,2}, 孙广生¹, 王珏¹, 严萍¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

Progress in the Study of Breakdown Mechanism about Liquid Dielectric

HUANG Wen-li^{1,2}, SUN Guang-sheng¹, WANG Jue¹, YAN Ping¹

(1. Institute of Electrical Engineering of Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

摘要: 在参阅大量文献的基础上,给出当前液体介质击穿理论的最新进展及成果;电子理论、气泡理论、小桥理论,并且比较分析不同理论的优缺点,指出纳秒脉冲液体击穿机理研究的独特性,供该领域的研究者借鉴。

关键词: 液体介质; 击穿机理; 纳秒脉冲

中图分类号: TM89

文献标识码: A

Abstract: On the basis of referring to amounts of references, this paper summarizes the new progresses and the relevant fruits about the study of breakdown mechanism in liquid dielectric. The breakdown mechanism comes from different theories such as electron theory, cavitation theory and impurity theory. Each theory has different merits and demerits of its own. Then this paper introduces the particularity of breakdown mechanism in liquid dielectric stressed under nanosecond pulses.

Key words: liquid dielectric; breakdown mechanism
nanosecond pulse

1 引言

液体介质作为绝缘材料,以其特有的物理和电特性在电力设备中得到广泛应用。虽然对于液体介质击穿特性的研究已经进行了好多年,取得了大量的成果,但对于液体击穿机理的理解仍然处于较低的水平,目前还没有任何一个机理能够解释所有的实验现象。随着实验技术和观测手段的飞跃发展,人们能够得到更为真实的实验结果,进而推动击穿机理的完善和发展。

20世纪五十年代以后,过滤及除气技术得到极大提高,人们能够得到溶气少的高纯度液体介质,实验结果表明过去普遍认同的小桥(杂质)理论不能够

解释纯净液体介质的击穿;另一方面,光学测量技术在击穿实验中的应用,使人们能够同步观察击穿的发展过程,检测到击穿过程中高能电子的存在,为电离击穿理论从气体应用到液体提供了实验依据;尤其是随着脉冲功率技术的发展,人们利用纳秒高功率脉冲使得液体介质击穿时延进入纳秒量级,极大地减弱了因电压作用时间长以及电极表面物理化学反应对击穿的影响。另外窄脉冲下液体分子和原子的极化效应减弱等纳秒脉冲下液体击穿的特点,使得纳秒脉冲液体击穿特性的研究成为揭示液体击穿机理的重要途径。笔者较为详细地归纳和对比当前液体击穿机理的研究成果,指出纳秒脉冲下液体可能的击穿机理。

2 液体击穿机理

2.1 电子理论

电子从阴极发射,进入液体以后,在足够高的场强下,一些电子能够从电场中得到比它们与液体分子或原子非弹性碰撞损失的更多的能量,这些电子一直被加速到具有足够的能量去电离液体分子或原子,同时空间正离子增强了阴极表面的电场强度,促进电子的发射,电子累积形成电子崩,最终导致液体击穿。

首先是阴极电子发射。阴极表面电子发射的方式是多种的:热发射、光电发射、场致发射及二次发射等^[5],从电子初始发射的角度来看,场致发射与热发射应该是主要的。许多学者认为阴极表面肖特基效应的电子热发射是主要的,但是不能够解释随着温度变化液体介质击穿场强基本不变的事实。在液体介质中,金属表面具有与真空金属表面不同的电势分布,Lewis T J给出液体介质中金属表面电子发

收稿日期:2004-09-20; 修回日期:2004-11-01

基金项目:国家 863 计划、国家自然科学基金资助项目(50437020)

作者简介:黄文力(1974-),男,博士生,从事脉冲功率、高电压技术方面的研究。

射的模型;Auger 电子过程(电子的冷发射)^[3]。

在外加电场作用下,电极表面出现低密度空穴(或气泡)^[3,4],在 Lippmann 效应作用下,液体表面张力被减小,电极表面出现双层空间电荷,在固液接触面出现电位差。表面张力与表面场强的关系见式(1)。

$$\Delta\gamma = - \int_0^\delta \epsilon E^2 dx \quad (1)$$

表面场强分布见图 1。假设双层电荷厚度 δ 为 10^{-9} m,介电常数为 2,则局部电场强度可达到 $10^8 \sim 10^9$ V/m,得到表面张力 $\Delta\gamma$ 在 $-0.2 \sim -18$ mN/m 之间,而一般碳氢化合物的表面张力为 18.4 mN/m,而且液体与金属界面的表面张力比液体的自由表面张力还要小,这表明在强电场下,液体可能丢失掉全部的与金属交界面的表面张力,这大大有利于金属表面电子脱离金属表面进入液体。

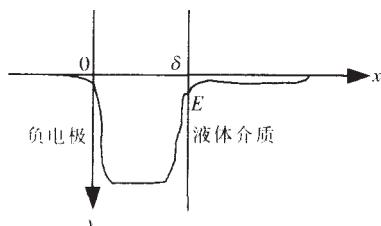


图 1 电极与液体介质表面的电场分布

在负电极,液体中的正离子穿过 δ 厚度的低密度区,到达电极表面,很可能具有低于但接近于金属电极费米能级的能量,与外加电压共同作用,能够引导金属电极电子共振隧道效应,电子从费米能级跃迁到真空能级,电子中和正离子,适放能量,所释放的能量可能经过各种方式消散掉,但是最可能激发费米能级水平以上的电子形成二次电子发射,同时,电子与离子中和更加减少了电极附近低密度区的密度,使得正离子更易于引导金属电极电子隧道效应,而二次电子发射可能引发电子崩,电子崩尾的正电荷也加强了低密度区的电场,所以上述过程构成正反馈。

在正电极,负离子容易穿过低密度区到达正电极,经由电子隧道效应,电子从负离子容易进入金属电极,进而向下过渡到金属电极费米能级水平,适放能量,这些能量进而促使二次电子从费米能级以下跃迁到费米能级以上,空缺电子位置随后被液体分子电子隧道效应所填补,在液体表面留下更多的正离子,加强了空间电荷层的场强,形成正反馈,在足够高的电场强度下,空间电荷层能够出现电子崩,导致液体击穿容易发生。

其次是电子增长产生电子崩。从能量的观点,电子崩产生的标准见式(2):

$$eE\lambda = ch\nu \quad (2)$$

其中: e 为电子的电量, E 为外加电场强度, λ 为电子平均自由程, $h\nu$ 电子碰撞激励液体分子或原子的量

子能, e 依据不同液体的分子结构取不同常数。式(2)表示电子从外电场得到的能量等于激励液体分子(原子)消散的能量,电子如果从外电场得到的能量大于与液体分子或原子非弹撞损失的能量,则能够导致电子崩的产生。另外,在击穿发生前的瞬间,预击穿电流发射大量的光,光子为液体分子的电离提供能量,促进电子崩的发生^[4]。而二次电子发射可能引发电子崩,电子崩尾的正电荷也加强了低密度区的电场,所以,上述过程构成正反馈。正负电极的电子击穿发展过程见图 2。

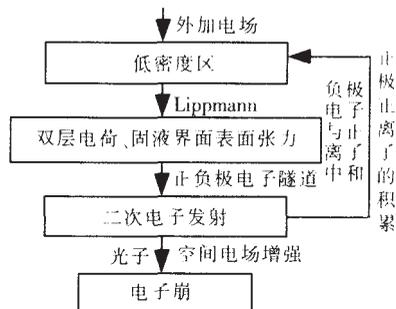


图 2 正负极电子击穿发展过程

2.2 气泡放电

液体介质中由于各种原因产生气泡,在外电场作用下,气泡发展到一个临界长度或者气泡贯穿间隙导致击穿在气泡中发生。对于气泡的产生机理有多种解释。

2.2.1 电流热效应

阴极发射电流密度可以达到 $1 \sim 10$ A/cm²,另外,在流注贯穿间隙前,流注的发展已经产生较高幅值的预电流^[3],这些电流的作用可能在约 0.14 μ s 的时间内产生气泡。从能量的角度分析得到气泡产生的热平衡标准见式(3):

$$AE^n\tau = m [c_p(T_b - T_a) + L_b] \quad (3)$$

式中: A 为依据液体分子结构而变化的常数, n 依据液体分子结构不同在 1.5~2 之间变化, E 为间隙平均电场强度, τ 为时间间隔; m 表示单位液体质量, c_p 为平均比热, $(T_b - T_a)$ 为液体温度变化量, L_b 为气泡的热含量。式(3)左端表示局部液体从电场(外加电场与空间电荷场)中得到的能量,右端表示局部液体气化需要的热能。从(3)式可以看出,气泡的产生与外加电压幅值和电压作用时间、液体种类、间隙距离(电流密度或空间电荷)有直接的关系。

2.2.2 离子间的静电斥力

非极性液体大多以分子或原子形态存在,电子极化反应是液体分子或原子在电场中的主要表现^[2,10],在液体的预击穿阶段,电子被发射到液体中以后,易于与分子或原子或杂质结合形成离子,正空穴可能电离产生离子,在外电场的作用下,杂质分子也可能分解为离子,处于过渡阶段的单极子,二元或三元粒子也易于转化为离子,离子态在非极性液体介质的

击穿过程中起着重要的作用^[10,11]。Kao K C认为离子间的静电斥力能够导致微气泡的形成^[8],为电子提供足够长的自由程,积累足够的能量碰撞电离,最终产生电子崩,击穿发生。

2.2.3 液体震荡导致气泡产生

在液体预击穿流注发展阶段,流注通道的发展产生强烈的液体震荡波,以声速或超声速传播^[4,7],显然液体介质的波动造成液体中气泡的产生。

2.3 杂质击穿

工程用液体电介质总是或多或少地含有一些杂质。例如油中常因受潮而含有水分,此外还含有油纸或布脱落的纤维。由于水和纤维的介电常数很大,使它们容易极化而沿电场方向定向排列。如果定向排列的纤维贯穿于电极间形成连续小桥,则由于水分及纤维等的电导大而引起泄漏电流增大、发热增多,促使水分汽化、气泡扩大;如果纤维尚未贯穿整个电极间隙,则由于纤维的介电常数大而使纤维端部油中电场显著增高,高场强下油电离分解出气体形成气泡;气泡电离并因发热而扩大,电离的气泡排成气体“小桥”。工程用液体电介质的击穿最后发生在气体通道中^[2,5]。

另外,液体中杂质的存在加强了液体中电场分布的不均匀性,杂质在电场中被极化,在接近电极的时候,可能增强电极表面的电场强度,引发液体的局部放电,导致击穿的进一步发生。

3 讨论

电子电离击穿理论最早来源于气体放电,然后被应用到液体击穿中,随着实验水平和测量技术的提高,得到了越来越多实验结果的支持:

(1)预击穿阶段流注的发射光检测到高能(>2.5 eV)电子的存在,液体分子或原子的电离能在 $9\sim 21$ eV之间,考虑到液体分子在电场中的极化,电离可能小于 9 eV,也就是说,液体击穿中分子或原子的场电离是可能的;

(2)一些气体液化态($\text{CO}_2, \text{SF}_6, \text{己烷}$ 等)的击穿场强在临界状态下保持一致,表明气体和液体可能具有相同的击穿机理;

(3)液体中电负性附加物(容易吸附电子)的加入,使得电子在更短的行程内被捕捉,更快形成离子,另外直接提高了液体中离子的浓度,极大地提高了流注的速度^[15]。

(4)在液体中加入少量(约 0.05 mol/l)的低电离成分物质,正流注的外形表现为更多的细丝,速度增加为原来的 3 倍,可能暗示着电离过程的增强^[6]。

另一方面,电离理论也遇到了许多不能解释的实验现象,最主要的是液体击穿场强液体静压力有关^[8,13,14],液体的击穿场强随着液体静压力的增加

而提高,而静压力的增加基本上不会引起液体体积的变化,也就是说,如果存在液体的电离击穿过程,电子崩的形成应该不被影响,这是液体击穿电离理论不能解释的;另外,低电离附加物的引入并不影响负流注的特性及速度,这也与电离理论相抵触。

气泡理论可以很好地解释液体击穿场强随液体静压力上升而提高的实验现象:压力增加,液体的沸点提高,单位液体的气化能增加,同时气泡的运动(扩展)也受到影响,气泡中存在的电离过程也随压力的增加而减弱,从而导致击穿场强的提高。但是在脉冲电压下,气泡的形成与发展时间(比较长)可能不足于导致气泡的产生,当脉冲电压增长率为 4 kV cm^{-1} ns $^{-1}$ 时,液体介质的击穿场强和击穿时延变得与液体静压力无关,另外液态氩的亚毫秒击穿场强也显得与静压力无关^[12],这些事实与液体击穿的气泡机理相抵触。

在单次纳秒脉冲下,因电压作用时间极短,离子对击穿的贡献很小,气泡形成需要的时间可能大于液体的击穿时延,液体分子或原子的极化效应减弱,液体中可能的杂质也不能够按电场方向排列成线导引击穿,所以,电子击穿理论在纳秒级液体击穿中起着主导作用。因为液体的击穿场强与脉冲电压的宽度有极大的关系,击穿场强随脉冲电压宽度的减小迅速增加^[12,18],在极高的电场下,液体分子或原子能够直接场电离产生电子崩导致击穿,这个击穿过程还需进一步的研究;重频纳秒脉冲与单次的差别在于击穿过程必须考虑空间载流子的记忆效应^[16,18,19],以及对击穿统计时延的影响和液体分子或原子的极化程度。该课题组正在对纳秒级脉冲液体介质击穿特性进行深入的研究。

4 结语

液体介质因为其复杂的物理及化学性质,到目前为止,仍然没有形成类似气体的成熟的击穿模型和机理解释,不论电离还是气泡机理都只能片面解释局部的实验现象,液体介质击穿机理尚需进一步的研究,因为液体击穿实验现象受实验条件影响显著,也许不同实验条件下的击穿本质上应该由不同的机理来解释,对于一般的液体击穿实验,在击穿不同的阶段,也许应该由不同的机理来解释,或者说不同的击穿机理在不同实验条件下的击穿过程中占据着不同的比重。

高压纳秒脉冲具有显著特点:电压幅值高,作用时间极短,因电压作用时间长引起电极表面的物理化学反应被极大减弱,另外纳秒脉冲使得液体击穿的击穿时延进入纳秒范围。高压纳秒脉冲(单次、重频)的特点有助于对液体击穿物理本质的理解(电子的场电离、气泡的形成时间、液体分子和原子的极化

效应等),所以纳秒脉冲液体介质击穿特性研究是揭示液体击穿机理的重要途径。

参考文献:

[1] 杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

[2] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[3] T J Lewis. The electrode-liquid Interface under High Fields [C]. Proceeding of 14th International Conference on Dielectric Liquids, Graz, 2002.

[4] E O Forster. Research in the Dynamics of Electrical Breakdown in Liquid Dielectrics [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1980, 15(3): 182-185.

[5] A H Sharbaugh, J C Devins, S J Rzd. Progress in the Field of Electric Breakdown in Dielectric Liquids [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1978, 13(4): 249-276.

[6] H M Jones, E E Kunhardt. Development of Pulsed Dielectric Breakdown in Liquids [J]. Phy. D.A ppl. Phys., 1995 (28): 178-188.

[7] J C Devins, S J Rzd, R J Schwabe. Breakdown and Prebreakdown Phenomena in Liquids [J]. J.Appl.Phys., 1981, 52(7): 4 531-4 545.

[8] K C Kao, P C Mamath. Time-dependent Pressure Effect in Liquid Dielectrics [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1970, 5 (3): 64-68.

[9] I L Pankratieva, V A Polyansky. Bipolar-charged Layers Adjacent to Electrodes in Nonpolar Low-conducting Liquids[C]. Proceeding of 13th International Conference on Dielectric Liquids, Nara, 1999.

[10] W F Schmidt. Electrons, Holes, and Ions in Non-polar Dielectric Liquids [C]. Proceeding of 13th International Conference on Dielectric Liquids, Nara, 1999.

[11] A Alj, A Denat, J P Gosse, et al. Creation of Charge Carrier in Nonpolar Liquids[J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1985, 20 (2): 221-231.

[12] R WCrowe. Formative Time Lag in the Electric Breakdown of Liquid Hydrocarbons[J]. J. Appl. Phys., 1956, 27(2): 156-160.

[13] E M Hizal, S Dincer. Breakdown Time Lags and Prebreakdown Phenomena in Transformer Oil, Effects of Hydrostatic Pressure [J]. Journal of Electrostatics, 1982, 12: 333-343.

[14] A Beroual. Electronic and Gaseous Processes in the Prebreakdown Phenomena of Dielectric Liquids [J]. J. Appl. Phys., 1993, 73(9): 4 528-4 533.

[15] A Beroual, R Tobazeon. Prebreakdown Phenomena in Liquid Dielectrics [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1986, 21 (4): 613-627.

[16] 王珏, 邵涛, 严萍, 等. 重频纳秒高压脉冲下变压器油击穿特性的研究 [C]. 第9届全国高功率粒子束学术交流会, 2004.

[17] J M Lehr, F J Agee, Copeland R, et. al. Measurement of the Electric Breakdown Strength of Transformer Oil in the Sub-nanosecond Regime [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(6): 857-861.

[18] A Vorobyov, V Ushake, V Bagin. Electrical Strength of Liquid Dielectrics at Voltage Pulses of a Nanosecond Duration, Elektrotechnika, 1971(7): 55-57.

[19] 孙广生, 邵涛, 严萍, 等. 高压纳秒脉冲下气体放电研究进展[C]. 西安: 第9届全国工程电介质学术会议, 2003.

(上接第 127 页)

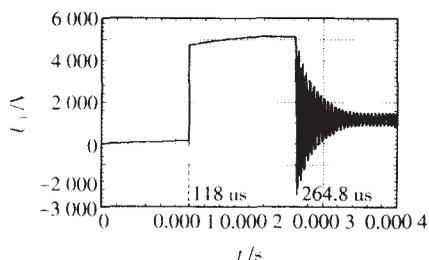


图7 快熔电压

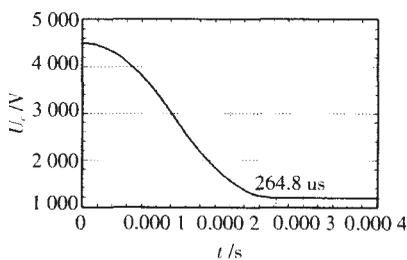


图8 电容 C1 上电压

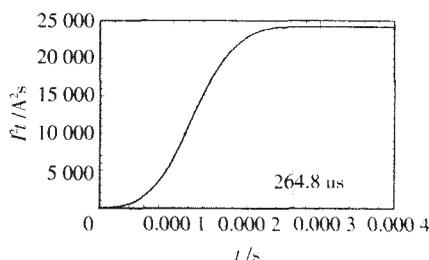


图9 电流 F 对时间积分 Ft 能量曲线

分析系统直通短路故障的基础上,得到一种便于快熔选择的简化计算电路。通过方便地计算电路参数,验证所选快熔能否达到保护IGCT器件的目的。针对6 kV/1 000 kW的高压变频器,选定快熔,计算表明能够在短路故障时正确保护逆变器桥臂上的IGCT组件。根据快熔的模型,通过matlab仿真验证了简化电路计算选择快熔的有效性。

参考文献:

[1] 韩安荣. 通用变频器及其应用 [M](第2版). 北京: 机械工业出版社, 2000.

[2] P k steimer, J K steinke, H E Gruning. A Reliable Interface-friendly Medium-voltage Drive with Based on the

Robust IGCT and DTC Technology [C]. Industry Applications Conference, 1999. Thirty-fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE, Phoenix, Arizona, October, vol.3, 1 505-1 512.

[3] J F Palma, C Mulertt, S Duong, et al. IGBT Characterisation for their Protection by Fuses [DB/OL]. Power Electronics and Drive System, Proceedings of International Confer, 1995(1): 59-64.

[4] S Duong, C Schaeffer, L L Rouve, et al. Fuses for Power IGBT-converters [DB/OL]. Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the IEEE, 1994(2): 1 336-1 343.

[5] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明, 等. 高压变频器中IGCT的快熔保护[J]. 高电压技术, 2003, 29(1): 8-10.