

摘 要

水介质具有高的相对介电常数(约 80), 而且具有自我恢复的能力, 在脉冲功率系统中被广泛应用。然而, 由于水介质在零度以下工作时会结冰而影响了其应用, 为了扩展水介质的应用范围, 迫切需要解决这个问题。有研究表明: 乙二醇与水混合后可使冰点降低。本文就水介质中加入乙二醇后冰点的变化进行了探讨; 并以水介质同轴传输线为实验装置, 研究了去离子水/乙二醇混合液的电性能。主要进行了以下三方面的工作:

首先研究了常温下去离子水的电性能。研究表明: 常温下去离子水的相对介电常数约为 80, 经过去离子处理后电阻率可达 $12.58 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$; 当平均击穿时间为 $5.77 \mu\text{s}$ 时, 去离子水的平均击穿场强为 112.18 kV/cm 。证明了水介质具有较强的耐高电压性能; 随着充电速度的加快, 平均击穿场强提高而平均击穿时间则略有缩短。

其次, 研究了常温下去离子水/乙二醇混合液的电性能, 并与去离子水的电性能进行了比较。研究表明: 去离子水中加入乙二醇后相对介电常数稍有下降, 平均击穿场强及电阻率明显提高, 平均击穿时间延长。如浓度为 59.0% 的混合液的相对介电常数为 71.26, 电阻率为 $35.71 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, 当平均击穿时间为 $7.31 \mu\text{s}$ 时平均击穿场强为 142.81 kV/cm , 比去离子水的平均击穿场强提高 35.20%, 平均击穿时间延长 13.51%, 电阻率提高了近 2 倍, 而相对介电常数仅减小了 10.93%。随着混合液浓度的升高, 平均击穿场强提高, 平均击穿时间延长, 电阻率升高, 相对介电常有所降低。

最后, 研究了去离子水/乙二醇混合液的冰点及低温下的电性能。研究表明: 随着温度的降低, 混合液的相对介电常数及电阻率均增大; 随着混合液浓度的增大, 混合液的冰点持续降低。如浓度为 50% 的混合液的冰点已达 -39°C 。

关键词: 去离子水/乙二醇混合液, 相对介电常数, 水介质传输线, 击穿电压, 击穿时间

ABSTRACT

As both insulator and energy storage media, de-ionized water combines the advantages of high relative permittivity (is about 80), self repairability, low cost and ease of handling. However, the application of it is restricted because it will freeze in low temperature. To expand the application of it, it's very exigent to solve this problem. It's fortunate that the freezing point of water can be decreased when the ethylene glycol is added. The changing of the freezing point was studied when the ethylene glycol was added, and the electricity performance of water/ethylene glycol mixtures was also researched in this paper.

Firstly, the electricity performance of de-ionized water was studied by using coaxial transmission line as experimental equipment. It's showed that the relative permittivity is about 80, the resistance ratio is $12.58\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$, the average breakdown strength is 112.18kV/cm when the average breakdown time is $5.77\mu\text{s}$ in normal temperature. It proves that water is good at electricity performance.

Secondly, the electricity performance of de-ionized water/ ethylene glycol mixtures was studied. It's showed that the average breakdown strength and the resistance ratio are improved obviously while the relative permittivity of the mixtures' is decreased a little in normal temperature. At the same time, the average breakdown time is prolonged. For example, the relative permittivity of the mixture of 59.0% is 71.26, which is decreased 10.93% when compared to the water's; the resistance ratio is $35.71\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$, which is improved 2 times. The average breakdown strength is 142.81kV/cm when the average breakdown time is $7.31\mu\text{s}$, which is improved 35.20% when compared to the water's. Seen from the experiments, the average breakdown strength and the resistance ratio are increased while the relative permittivity is decreased when the concentration is improved.

Finally, the freezing point of de-ionized water/ ethylene glycol mixtures and the electricity performance of them were studied in low temperature. It's showed that the relative permittivity and the resistance ratio are increased when the temperature is decreased. Furthermore, the freezing point of the mixture is decreased when the concentration is improved. For example, the freezing point of the mixture of 59.0% is -39°C .

Key words: de-ionized water/ethylene glycol mixture; relative permittivity; water transmission line; breakdown strength; breakdown time

图表目录

图 1.1 典型高斯曲线.....	2
图 1.2 击穿场强与压强关系图.....	2
图 1.3 加入 SF_6 后的击穿电压	4
图 1.4 加入 SF_6 后的有效时间.....	4
图 1.5 等间隙不同电极的 j - v 关系曲线.....	6
图 1.6 等间隙 Au 及 Ni 电极的 j - v 关系曲线.....	6
图 1.7 $\langle M \rangle_{20}$ 与击穿次数的关系曲线.....	6
图 1.8 不同电极材料作用密度对电压的关系曲线.....	7
图 1.9 #304 不锈钢作用密度对电压的关系曲线.....	7
图 1.10 涂有黑腊的电极结构图（左）及电路图（右）	8
图 1.11 Pt 电极 j - v 关系曲线 (a)涂有 0.1 mm 黑腊 (b)涂有 0.5 mm 黑腊.....	8
图 1.12 ε_s 对温度的关系曲线.....	9
图 1.13 磁块在阳极时的最大电压值	10
图 1.14 磁块在阴极时的最大电压值.....	10
图 1.15 不同传输时间下击穿场强与压强的关系曲线.....	11
图 1.16 水中质子运动机制	16
图 1.17 Grotthuss 机制.....	17
图 2.1 实验装置图	19
图 2.2 装置示意图.....	19
图 2.3 水介质传输线装配图.....	19
图 2.4 介质击穿后在内筒外表面留下的毛刺.....	21
图 2.5 用于打磨内外筒的一些器件.....	21
图 2.6 打磨抛光后内筒的效果图.....	21
图 2.7 打磨抛光后外筒的效果图.....	21
图 2.8 分压器和衰减器的定标示意图.....	22

图 2.9 分压器和衰减器的定标波形	22
图 3.1 实验装置等效电路图	23
图 3.2 内外筒间电场强度随半径的变化示意图	25
图 3.3 Ansys 模拟水介质传输线内外筒间的电场分布图	26
图 3.4 当外筒内表面附近存在 5 个微气泡时 Ansys 模拟的水介质传输线内外筒间的电场分布图	27
图 3.5 Ansys 模拟的微气泡附近的电场分布图	27
图 4.1 实验的等效电路图	29
图 4.2 Pspice 模拟的传输线上的电压波形	29
图 4.3 实验得到的传输线上的电压波形	29
图 4.4 去离子水的击穿电压波形图	30
图 4.5 平均击穿电压随充电电压的变化	30
图 4.6 平均击穿时间随充电电压的变化	30
图 4.7 平均有效时间随充电电压的变化	31
图 4.8 实验等效电路图	31
图 4.9 Pspice 模拟的传输线上的电压波形	32
图 4.10 实验得到的传输线上的电压波形	32
图 4.11 浓度为 36.5% 的混合液的击穿波形图	33
图 4.12 浓度为 48.7% 的混合液的击穿波形图	33
图 4.13 浓度为 59.0% 的混合液的击穿波形图	33
图 4.14 浓度为 71.2% 的混合液的击穿波形图	33
图 4.15 充电电压为 20kV 时击穿电压随浓度的变化	34
图 4.16 充电电压为 25kV 时击穿电压随浓度的变化	34
图 4.17 充电电压为 20kV 时击穿时间随浓度的变化	35
图 4.18 充电电压为 25kV 时击穿时间随浓度的变化	35
图 4.19 浓度为 48.7% 时击穿电压随充电电压的变化	36
图 4.20 浓度为 71.2% 时击穿电压随充电电压的变化	36
图 4.21 浓度为 48.7% 时击穿时间随充电电压的变化	36

图 4.22 浓度为 71.2% 时击穿时间随充电电压的变化.....	36
图 4.23 浓度为 48.7% 时有效时间随充电电压的变化.....	37
图 4.24 浓度为 71.2% 时有效时间随充电电压的变化.....	37
图 4.25 充电电压为 20kV 时有效时间随浓度的变化.....	37
图 4.26 充电电压为 25kV 时有效时间随浓度的变化	37
图 4.27 相对介电常数随浓度的变化.....	38
图 4.28 电阻率随浓度的变化.....	38
图 4.29 充电电压为 15kV 时去离子水与混合液击穿电压波形比较.....	40
图 4.30 充电电压为 20kV 时去离子水与混合液击穿电压波形比较.....	40
图 4.31 充电电压为 15kV 时去离子水与混合液平均击穿电压的比较.....	42
图 4.32 充电电压为 20kV 时去离子水与混合液平均击穿电压的比较.....	42
图 4.33 充电电压为 25kV 时去离子水与混合液平均击穿电压的比较.....	42
图 4.34 充电电压为 15kV 时去离子水与混合液平均击穿时间的比较.....	43
图 4.35 充电电压为 20kV 时去离子水与混合液平均击穿时间的比较.....	43
图 4.36 充电电压为 25kV 时去离子水与混合液平均击穿时间的比较.....	43
图 4.37 充电电压为 20kV 时去离子水与混合液平均有效时间的比较.....	44
图 4.38 充电电压为 25kV 时去离子水与混合液平均有效时间的比较.....	44
图 4.39 去离子水与混合液相对介电常数的比较.....	44
图 4.40 去离子水与混合液电阻率的比较.....	44
图 4.41 去离子水和各种浓度混合液 M 值的比较图.....	45
图 4.42 浓度为 70% 的混合液的相对介电常数随温度变化示意图.....	47
图 4.43 浓度为 70% 的混合液的电阻率随温度变化示意图.....	48
表 1.1 去离子水与乙二醇混合液电性能实验数据.....	3
表 1.2 不同电极材料击穿实验数据.....	5
表 4.1 去离子水击穿实验数据.....	30
表 4.2 浓度为 36.5% 的混合液击穿实验数据	33
表 4.3 浓度为 48.7% 的混合液击穿实验数据.....	33
表 4.4 浓度为 59.0% 的混合液击穿实验数据.....	34

表 4.5 浓度为 71.2% 的混合液击穿实验数据	34
表 4.6 停止循环后混合液的电性能随时间的变化	39
表 4.7 充电电压为 15kV 时去离子水与混合液的击穿实验数据	41
表 4.8 充电电压为 20kV 时去离子水与混合液的击穿实验数据	41
表 4.9 充电电压为 25kV 时去离子水与混合液的击穿实验数据	41
表 4.10 去离子水与混合液相对介电常数和电阻率的实验数据	41
表 4.11 去离子水和各种浓度混合液的 M 值	45
表 4.12 不同浓度混合液的冰点实验数据	47
表 4.13 浓度为 70% 的混合液相对介电常数随温度变化的实验数据	47
表 4.14 浓度为 70% 的混合液电阻率随温度变化的实验数据	48

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写过的研究成果，也不包含为获得国防科学技术大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文题目： 去离子水与乙二醇混合液电性能的实验研究

学位论文作者签名： 蒲金飞 日期： 2004 年 12 月 2 日

学位论文版权使用授权书

本人完全了解国防科学技术大学有关保留、使用学位论文的规定。本人授权国防科学技术大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密学位论文在解密后适用本授权书。）

学位论文题目： 去离子水与乙二醇混合液电性能的实验研究

学位论文作者签名： 蒲金飞 日期： 2004 年 12 月 2 日

作者指导教师签名： 刘金亮 日期： 2004 年 12 月 2 日

第一章 绪 论

水具有高的相对介电常数(约 80)，在相同的储能条件下，水介质电容器在体积上可比其他介质电容器小 30~40 倍。同时水介质具有自我恢复的能力，水一旦发生击穿，它可以迅速恢复到初始状态，但油等其他液体介质由于击穿导致炭化从而使性能降低。因此，在脉冲功率系统中常以水介质电容器作为中间储能电容器。

乙二醇又名甘醇，俗称防冻液，为无色透明粘稠液体，具有吸湿性，易燃，其凝固点为 -11.5°C ，它能与水以任意比例混溶。研究表明，乙二醇与水混合后可以降低水介质的冰点，随着乙二醇浓度的增加，其冰点持续下降。当乙二醇浓度达到 68% 时，其冰点可达到 -68°C 。因此去离子水中加入乙二醇可以解决水介质在低温下结冰的问题。

§ 1.1 水介质击穿的研究现状

在脉冲功率器件中我们以水作为绝缘介质，是因为水具有很高的相对介电常数。脉冲功率器件尺寸的大小取决于绝缘介质的储能密度。以平板电容器为例，其电容为：

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / d \quad (1)$$

其中， ε_0 为真空的介电常数($\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$)， ε_r 为绝缘介质的相对介电常数， A 为平板电极的表面积。储存在电容器中的能量为：

$$W = (1/2)CU^2 \quad (2)$$

其中， U 为外加电压。电场强度 E 等于电压 U 除以间距 d ，代入能量方程得到：

$$W = (1/2) \varepsilon_0 \varepsilon_r A E^2 d \quad (3)$$

由能量方程我们得到平板电容器中绝缘介质的储能密度为：

$$V = (1/2) \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \quad (4)$$

可见，电容器中绝缘介质的储能密度与绝缘介质的相对介电常数成正比，同时与绝缘介质中电场强度的二次方成正比（该结论同样也适用于其它类型的电容器）。通过采用具有高相对介电常数的绝缘介质，同时提高它的击穿场强，可以增大绝缘介质的储能密度，从而减小脉冲功率器件的尺寸。因此，我们要求高储能电容器的绝缘介质不仅相对介电常数比较高，而且其耐高电压性能要好。水具有高的相对介电常数(约 80)，比其它的绝缘

介质高 30~40 倍,要将其用作电容器的绝缘介质还要求它具有较高的击穿场强。因此国内外科研人员对水介质的电性能及外界因素对其电性能的影响进行了广泛而深入的研究,具体总结为以下几个方面:

(1) 经典 J.C.Martin 公式

19 世纪 60 年代早期, J.C.Martin 在室温及标准大气压下对水的击穿特性进行了初步的实验研究。并给出了描述实验数据的几个公式。其中最重要的两个为:

$$\text{正电极: } F=0.3/\tau_{\text{eff}}^{1/3} A^{1/10} \quad (5)$$

$$\text{负电极: } F=0.6/\tau_{\text{eff}}^{1/3} A^{1/10} \quad (6)$$

其中 F 为击穿电场强度(MV/cm), A 为有效面积(cm^2), τ_{eff} 为有效时间(μs)。该公式给出在给定有效时间内要使水介质击穿所需要的电场强度,如取 $\tau_{\text{eff}}=1\mu\text{s}$, $A=1\text{cm}^2$, 对于正电极则由第一个方程得出 $F=0.3\text{MV/cm}$, 即当电场强度大于 0.3MV/cm 时正电极将发生击穿。由 Martin 公式可知负电极击穿电场强度为正电极击穿电场强度的两倍。同时 Martin 在实验中测得的击穿场强具有高斯分布特性,如图 1.1 所示。Martin 公式中的 F 值为高斯曲线的最大值,根据 Martin 经验公式计算得到的击穿场强值通常称为 JCM 量值。由曲线看到,击穿场强为 60%JCM 时,水击穿的概率很小。Martin 公式基于实验数据而非理论,它仅适用于面积较小的电极。

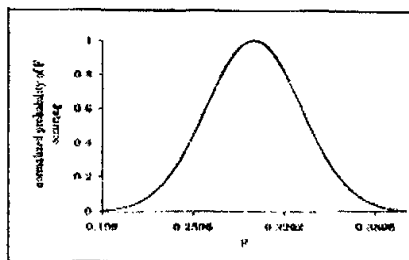


图 1.1 典型高斯曲线

(2) 加压对水介质击穿特性的影响

Abramyan 及 Kornilov^[1]为研究气压对击穿场强和击穿时间的影响进行了大量的工作。他们指出:当气压由 1.7Mpa 上升至 13.4Mpa 时,击穿场强由 360kV/cm 上升到 640kV/cm,提高了近两倍。研究结果表明击穿场强与气压近似呈线性关系,且击穿场强与气压的关系近似为 $24\text{kV}/(\text{cm} \cdot \text{Mpa})$,

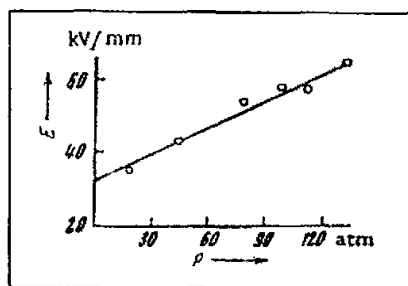


图 1.2 击穿场强与压强关系图

如图 1.2 所示。他们还指出:当气压从 0.3Mpa 上升到 10.1Mpa 时,有效时间 τ_{eff} 从 50ns 上升至 $10\mu\text{s}$ 。

Sincery^[2]研究了气压对击穿场强和击穿时间的影响。当气压从 101Kpa 上升到 308Kpa 时,击穿场强从 218kV/cm 上升到 236kV/cm,有效时间从 $2.9\mu\text{s}$ 上升到 $3.5\mu\text{s}$ 。另外, J. S.

Mirza 等人^[3]从量子理论出发, 得出液体的击穿场强与 $P^{1/8}$ 近似成线性关系。

Miller^[4]也进行了加压条件下的水击穿实验。其实验表明: 当两电极间距为 1 cm, 气压为 67 个大气压时, 得到击穿场强为 608kV/cm。同时 Miller 的研究也证明 J. S. Mirza 等人的结论是成立的。

(3) 除气程度对水介质击穿特性的影响

Sincery^[2]研究了除气程度对击穿场强和有效时间的影响。他指出, 当除气程度由 0 上升至 90% 时对击穿场强没有明显影响, 但可以影响水介质击穿后的恢复时间。除气程度越高, 因击穿产生的气泡消散的越快, 从而加快水介质的恢复。若不进行除气处理, 水介质的恢复时间通常需要一个小时。

(4) 水介质流速对水介质击穿特性的影响

Sincery^[2]还研究了水介质流速对击穿场强及有效时间的影响。其研究表明: 当流速由 126ml/s 上升到 630ml/s 对水介质的击穿特性无明显影响。他同时发现: 当流速不同时, 电极上的击穿点是不同的, 当流速较低时击穿区域较小, 而当流速较高时, 击穿区域则较大。Sincery 经过研究还发现水阻的变化对水介质的击穿场强没有明显影响。

(5) 添加剂对水介质击穿特性的影响

Fenneman^[5]研究了球板电极下乙二醇对水介质击穿场强、相对介电常数及有效时间的影响。他在室温下测得纯水的击穿场强为 130kV/cm, 当加入 95% 的乙二醇, 温度为 28℃ 时, 击穿场强上升至 270kV/cm, 击穿场强提高了一倍多。他得出: 通过改变浓度及温度, 可以改变击穿场强、相对介电常数及有效时间。如当浓度为 60% 的去离子水与乙二醇的混合液在 -30℃ 时, 相对介电常数为 80; 当浓度为 80% 的去离子水与乙二醇的混合液在 -10℃ 时, 有效时间升至 1ms。表 1.1 给出了 Fenneman 的一些实验数据。

表 1.1 去离子水与乙二醇混合液电性能实验数据

Mixture (%)	T (°C)	ϵ_r	τ_{eff} (ms)	E_{bd} (kV/cm)
0	0	88	0.25	130
40	25	67	0.10	160
40	-11	79	0.40	160
60	30	58	0.18	160
60	-23	77	0.97	140
80	25	49	0.45	210
80	-10	60	1.00	170
95	28	40	0.20	270

中国科学院电工研究所张适昌等人^[6]对乙二醇/水混合物作脉冲形成线的绝缘介质进行了研究,描述了用乙二醇/去离子水混合物作脉冲形成线的绝缘介质时固有时间常数与温度、浓度的关系。当乙二醇/去离子水混合物在 $t < 30^{\circ}\text{C}$, 乙二醇的体积百分比为 50%, 去离子水电阻率 $\rho > 0.18\text{M}\Omega \cdot \text{m}$ 时, 混合物的固有时间常数大于 10ms。

Ovchinnikov 及 Yanshin^[7]在预击穿研究中利用 HCl 来降低水介质的电导率, 他们研究了水介质中加入 HCl 后最大击穿场强及有效时间是否有变化。Magne Kristiansen^[8]通过实验发现 HCl 等化学物质的加入, 可以降低水的电导率, 且随着 HCl 浓度的增加, 击穿场强降低, 而击穿时间延长。HCl 加入后, 一方面, H^+ 数目的增加, 影响了通过产生一个过剩的水合氢分子而导致的电荷转移过程; 另一方面, 质子离开电极表面时被 Cl^- 离子捕获, 从而减少了可能触发放电的质子。

SF_6 因为具有电负性而广泛应用于脉冲功率领域。当电子穿越间隙时它能够俘获能量较低电子, 在火花间隙开关中, 常使用 SF_6 来增加开关的电压阈值。因此研究人员研究了水介质中加入 SF_6 后是否能够提高水介质的击穿电压及有效时间, 他们发现水介质中加入 SF_6 后有效时间有较大幅度的延长。图 1.3 及图 1.4 给出了他们的研究结果。

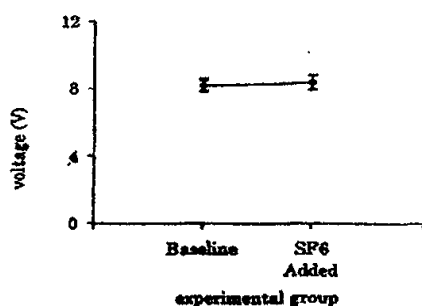


图 1.3 加入 SF_6 后的击穿电压

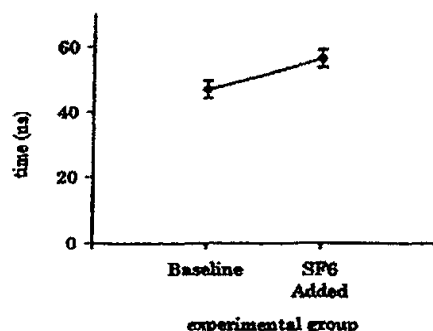


图 1.4 加入 SF_6 后的有效时间

Noyel、Jorat、Derriche 及 Huck^[9]研究了在低温下去离子水/酒精混合液的相对介电常数的变化, 他们给出温度 (T)、酒精摩尔百分比 (x) 及静介电常数 (ϵ_s) 之间的关系式为:

$$\epsilon_s = A_x + \frac{B_x}{T} + \frac{C_x}{T^2} \quad (7)$$

其中, A 、 B 和 C 是由实验条件决定的常数。他们同时指出, ϵ_s 随着酒精的摩尔百分比的增加而减小, 而随着温度的降低 ϵ_s 将变大。当酒精的摩尔百分比为 40%, 温度为 -100

℃时, ϵ_r 达最大值 120。

(6) 电极材料对水介质击穿特性的影响

Zahn、Ohki、Rhoads、LaGasse 及 Matsuzawa^[10]等人研究了不同电极材料对击穿场强的影响。他们研究发现: 不锈钢电极优于铝电极, 它可使击穿场强由 110kV/cm 提高至 125kV/cm, 黄铜电极的击穿场强最高, 可达到 145kV/cm, 而铜电极最稳定, 其平均击穿场强为 135kV/cm。他们还研究了正负电极分别采用不同电极材料时对击穿场强的影响, 其中最重要的发现是当以黄铜为负电极而以铝为正电极时击穿场强达最小值 90kV/cm。他们采用间距为 1cm, 面积为 1m×3.2cm 的平板电极进行击穿实验后得到的数据如表 1.2 所示。

表 1.2 不同电极材料击穿实验数据

Stainless Steel+/Stainless Steel-	Aluminum+/ Aluminum-
110 kV/cm(12times)	110 kV/cm(29times)
115 kV/cm(12times)	115 kV/cm(9times)
120 kV/cm(4times)	120 kV/cm(2times)
125 kV/cm(6times)	
Brass+/Brass-	Copper+/ Brass-
115 kV/cm(9times)	110 kV/cm(10times)
125 kV/cm(10times)	115 kV/cm(8times)
130 kV/cm(1time)	120 kV/cm(1time)
145 kV/cm(2times)	
Stainless Steel+/Aluminum-	Brass+/ Aluminum-
125 kV/cm(4times)	125 kV/cm(22times)
130 kV/cm(14times)	130 kV/cm(13times)
140 kV/cm(2times)	135 kV/cm(2times)
Brass+/Copper-	Copper+/Copper-
110 kV/cm(19times)	135 kV/cm(24times)
Stainless Steel+/ Brass-	Copper+/ Stainless Steel-
115 kV/cm(20times)	110 kV/cm(19times)
120 kV/cm(6times)	115 kV/cm(3times)
Stainless Steel+/ Copper-	Copper+/ Aluminum-
115 kV/cm(19times)	100 kV/cm(19times)
125 kV/cm(2times)	125 kV/cm(2times)
Aluminum+/ Brass-	Aluminum+/ Stainless Steel-
90 kV/cm(19times)	105 kV/cm(20times)
95 kV/cm(17times)	110 kV/cm(1time)
Aluminum+/ Copper-	Brass+/ S tainless Steel-
110 kV/cm(20times)	125 kV/cm(19times)

Szklarczyk、Kainthla 及 Bockris^[11]通过实验比较了铂、铜、铁、镍、金和钴电极材料对击穿场强的影响。铂、铜、钴及铁电极情况下的电流密度与电压之间的关系示于图 1.5。由该图可知：对于图中的四种材料，铜电极具有较好的耐击穿特性。金及镍电极情况下的电流密度与电压之间的关系示于图 1.6。比较图 1.5 及图 1.6 可知：以金作为电极材料效果优于铜电极，而镍电极效果最差。

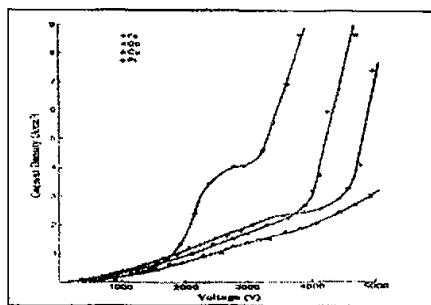


图 1.5 等间隙不同电极的 $j-v$ 关系曲线

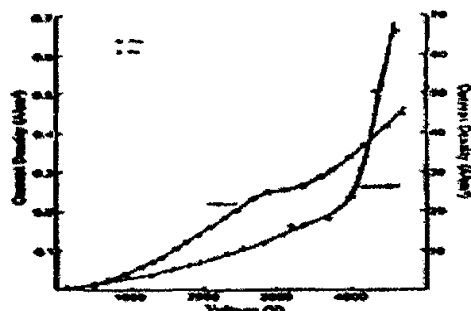


图 1.6 等间隙 Au 及 Ni 电极的 $j-v$ 关系曲线

Fenneman^[12]研究了铜 (Cu)、不锈钢 (SS)、黄铜 (brass) 及铝 (Al) 电极的性能，他利用 J.C.Martin 的关系式 $E_{\max} \tau_{\text{eff}}^{1/3} = M/A^{1/10}$ 测出了各种材料的 M 值 (其中 $E_{\max}$ 为各次击穿时的最大电场强度)，其表达式为：

$$\langle M \rangle_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{\max i} \tau_{\text{eff}}^{1/3} A^{-1/10} \quad (8)$$

Fenneman 通过对各种电极材料进行 200 次击穿实验，并对每 20 次击穿的 M 值取平均后得到图 1.7。通过图 1.7 可以发现铝的重复击穿性能较差。

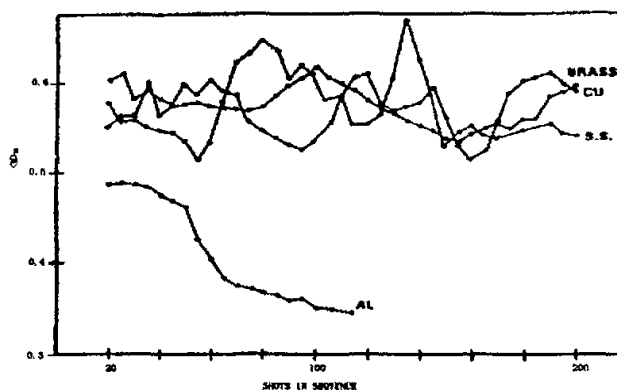


图 1.7 $\langle M \rangle_{20}$ 与击穿次数的关系曲线

Gehman^[13]研究了各种电极材料及它们的作用密度(能量密度与有效时间的乘积)。

图 1.8 给出了铝、阳极氧化铝、黄铜及铜的作用密度曲线,图中还给出了四种材料的击穿电压阈值。由图可见阳极氧化铝的性能优于其他三种材料,其击穿电压阈值较铝提高了近 20%。因此,对材料作阳极化处理有助于提高材料的击穿电压阈值。图 1.9 给出了不锈钢在喷粒(BB)及耐氧电解抛光(EP)处理后的作用密度曲线。钝化处理使不锈钢的表面形成一层氧化铬保护膜,阻止金属离子进入水介质,从而使击穿性能得到改善。由图 1.9 可见,经过处理后的不锈钢性能最好,同时比较图 1.8 及图 1.9 发现不锈钢电极优于其他材料的电极。

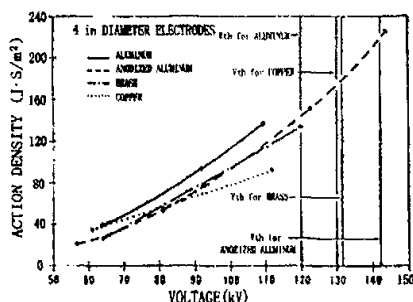


图 1.8 不同电极材料作用密度对电压的关系曲线

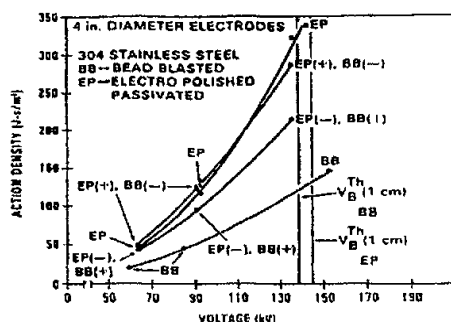


图 1.9#304 不锈钢作用密度对电压的关系曲线

McLoed 及 Gehman^[14]研究了#304、#310、#316、#403 不锈钢及#7075、#5083、#2024、#6061 铝的性能,比较了它们耐高电压的能力。比较得知#430 不锈钢及#6061 铝的性能最好,它们的平均击穿场强达到 170kV/cm。以#304 不锈钢为阳极,而以#2024 铝为阴极时的击穿场强为 145kV/cm;以#304 不锈钢为阴极,而以#2024 铝为阳极时的击穿场强为 100kV/cm。但是将两个电极均在水中浸 23 天后,以#304 不锈钢为阳极、#2024 铝为阴极时的击穿场强与以#304 不锈钢为阴极、#2024 铝为阳极时的击穿场强相同。

(7) 电极形状及极性对水介质击穿特性的影响

Kuzhikin^[15]研究了电极形状及极性对击穿场强及有效时间的影响。他采用一个直径为 0.8cm 的杆状电极和一个直径为 25cm 的平板电极(两者的材料均为不锈钢)。实验中发现:以杆状电极为正电极、平板电极为负电极时,击穿有效时间为 0.5μs;而以杆状电极为负电极、平板电极为正电极时,有效时间增大为 20μs,比前者提高 40 倍,且两者的击穿场强相差 95kV/cm。由此说明:当两个电极不对称时电极的极性是很重要的。

(8) 电极表面涂层对水介质击穿特性的影响

Szklarczyk^[16]研究了当正电极表面涂上石蜡及黑土后对击穿的影响。图 1.10 为扩散电极的几何结构图和电路图，图 1.11 给出了黑土层厚度对电流密度-电压关系的影响。他采用直径为 $100\mu\text{m}$ 的平面端部镍阳极和直径为 0.6cm 的镍阴极，发现当电极表面涂上 0.5mm 的黑土层后击穿场强由 8kV/cm 增至 60kV/cm 。其击穿场强之所以这么低，可能是由于所采用电极的尺寸及两者的间距过小的缘故。

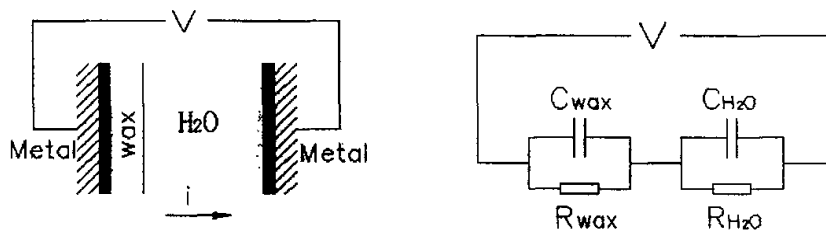
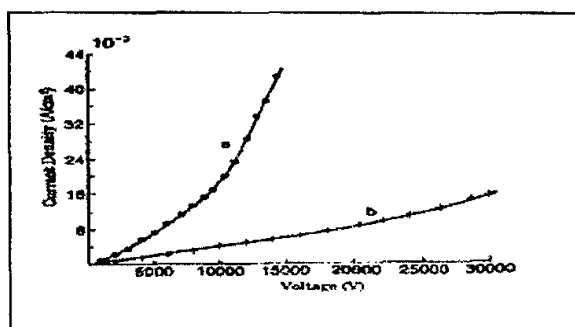


图 1.10 涂有黑腊的电极结构图(左)及电路图(右)

图 1.11 Pt 电极 j - v 关系曲线

(a)涂有 0.1 mm 黑腊 (b)涂有 0.5 mm 黑腊

分析图 1.10 中黑土与水界面的电场，由高斯定律：

$$\int E \, ds = q / (\epsilon_0 \epsilon_r) \quad (9)$$

式中， q 为自由电荷。黑土与水层的电压比为：

$$\frac{V_{\text{wax}}}{V_{\text{water}}} = \frac{l_{\text{wax}} E_{\text{wax}}}{l_{\text{water}} E_{\text{water}}} = \frac{l_{\text{wax}} q / (\epsilon_0 \epsilon_{\text{wax}})}{l_{\text{water}} q / (\epsilon_0 \epsilon_{\text{water}})} = \frac{l_{\text{wax}} \epsilon_{\text{water}}}{l_{\text{water}} \epsilon_{\text{wax}}} \quad (10)$$

由于总电压 $V = V_{\text{wax}} + V_{\text{water}}$ ，得到：

$$V_{\text{water}} = V / \left(\frac{l_{\text{wax}} \epsilon_{\text{water}}}{l_{\text{water}} \epsilon_{\text{wax}}} + 1 \right) \quad (11)$$

也可通过欧姆定律来计算 V_{water} 的值:

$$V_{\text{water}} = i \cdot R_{\text{water}} = i \rho_{\text{water}} l_{\text{water}} / S \quad (12)$$

式中, i 为流经实验器件的电流, S 为平板电极面积。这两种方法计算得到的 V_{water} 值差不多, 为未放置黑土层时的 3 倍多。放置黑土层后水中的储能与未放置黑土层时的储能的比值等于水层电压比值的平方, 因而放置黑土层后储能增加到原来的 9 倍。需要说明的是, 该实验的击穿场强值如此低是因为所采用的电极尺寸和间距较小的缘故; 另外, 采用黑土层提高绝缘场强的方法, 对极小电极表面面积的器件来说是有效的, 但是对大面积电极不具备这样的效应。

Vorov'ev、Kapitonov 和 Kruglyakov^[17]也研究了采用扩散电极后对水击穿产生的影响。他们采用以不锈钢为材料的 CuSO_4 扩散阳极、 FeCl_3 扩散阴极, 其中阳极在上、阴极在下, 电极上开有一些 $2\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 的小孔用于溶液的导入。实验中采用两种不同的溶液, 借助水与两种溶液密度之间的差别而使扩散层靠近电极表面。通过实验他们发现: 当脉冲持续时间小于 $3\mu\text{s}$ 时, 击穿场强由不采用扩散电极时的 $0.3\text{MV}/\text{cm}$ 上升至 $1.3\text{MV}/\text{cm}$; 而当脉冲持续时间大于 $3\mu\text{s}$ 时, 扩散电极的作用不明显。

金属和水的交界面是水击穿发生的区域, 通过抑制电弧的产生, 我们能够把电场上升到更高的量级。也就是说, 可以增加间隙的最大电压, 或者延长发生击穿之前的电压保持时间。不管引发放电的是微气泡还是高场强, 降低电极表面的电场始终是有益的。电极表面的扩散层能够使电极表面的微观结构变得光滑, 从而抑制了电弧的产生, 这便是扩散电极的工作原理。E. V. Yanshin^[18]通过在电极表面附近的液体中建立导电层, 使击穿场强提高了四倍。

(9) 温度对水介质击穿特性的影响

Buttrram 和 O' Malley^[19]的研究表明温度的变化将影响到水介质的电阻率及相对介电常数。在室温下, 水通过净化后其电阻率可达到 $18\text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$; 而将温度降到 0°C 时其电阻率可达到理论的最大值 $80\text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, 此时水的相对介电常数及有效时间可分别达到 90 和 $640\mu\text{s}$ 。

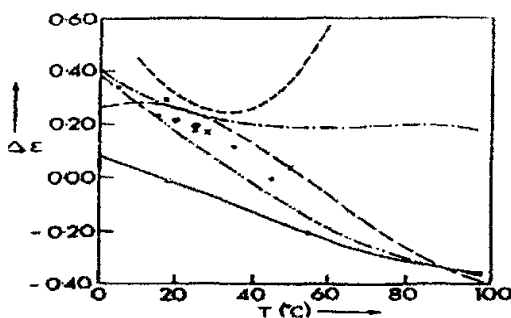


图 1.12 ϵ_r 对温度的关系曲线

Sincerny^[2]在研究中也发现当温度由 8℃ 上升到 33℃ 时, 水的击穿场强由 220kV/cm 提高至 224kV/cm, 有效时间由 2.9μs 延长至 3.1μs。

Hasted^[20]为研究静介电常数 ϵ_s 进行了大量的工作, 发现 ϵ_s 与温度之间有非常复杂的关系。图 1.12 给出了不同研究结果之间的比较, 由图发现他们各自的结果之间有很大的差别。Malmberg 和 Maryott's^[21]给出了 ϵ_s 与温度的另一个解析表达式:

$$\log(\epsilon_{\text{SMM}}) = 1.94404 - 1.991 \times 10^{-3}/T \quad (13)$$

(10) 磁场对水介质击穿特性的影响

Ovchinnikov et al.^[22]及 Yanshin et al.^[23]研究了磁场对水介质击穿的影响。水分子为极性分子, 它具有电偶极矩但没有磁偶极矩, 从本质上说磁场对水分子的极化和运动均不会产生影响。但带电粒子在电极间隙运动时会受到磁场的作用, 磁场作用下带电粒子的运动半径 r 为:

$$r = mv/(qB) \quad (14)$$

其中 m 为带电粒子的质量, v 为带电粒子的运动速度, q 为带电粒子的电量, B 为磁场强度。Ovchinnikov et al. 测到水中电子的速度为 1.5×10^3 m/sec, Yanshin et al. 给出了水中质子的速度为: 40m/sec。当外加磁场很弱时, 电子和质子的运动半径远小于电极间距。他们在研究中发现: 由于磁场的存在, 电极边缘放电的可能性大于电极中央。磁场同时还会影响水分子与质子结合为水合氢离子的过程, 从而影响水介质中电流的通道。磁场对真空中的高压设备有很好的屏蔽作用, 在水介质中存在类似的机制。MagneKristiansen 及 Lynn L. Hatfield 为水介质加上很小的磁场后发现水介质击穿场强有所增大, 如图 1.13 及图 1.14 所示。

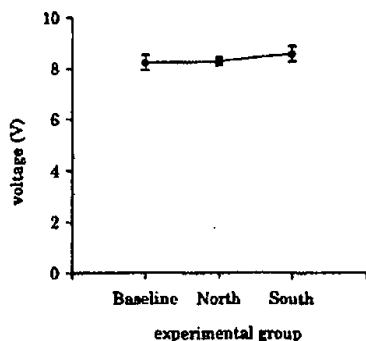


图 1.13 磁块在阳极时的最大电压值

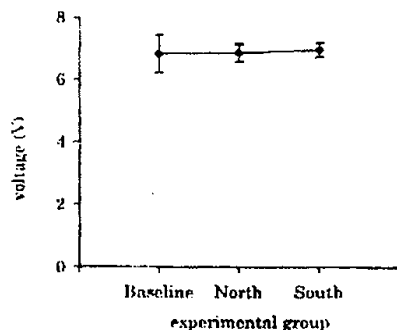


图 1.14 磁块在阴极时的最大电压值

(11) 电极有效面积对水介质击穿特性的影响

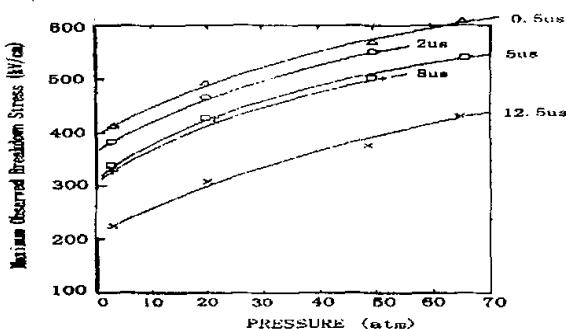
为了验证 Martin 公式, 19 世纪 60 年代后期, 美国海军研究实验室进行了大量的研究。W.H.Lupton^[24]由实验测得了大量的数据, 并导出了击穿场强、有效时间及电极有效面的关系式:

$$\text{正电极: } F \times \tau_{\text{eff}}^{1/3} \times A^{0.058} = 0.23 \quad (15)$$

$$\text{负电极: } F \times \tau_{\text{eff}}^{1/3} \times A^{0.069} = 0.55 \quad (16)$$

该式形式上类似于 Martin 公式, 它们的主要区别在于有效面积的幂指数。Lupton 公式是对 Martin 公式的扩展, 但它没有验证 $\tau_{\text{eff}} > 1\mu\text{s}$ 的情况。

Miller^[4]采用内外筒间距为 1cm、充电电压峰值为 1MV、电极有效面积为 2500cm^2 的同轴传输线模型, 由实验测到 67atm 下电容为 12nF、特征阻抗为 0.5Ω 的水介质传输线的绝缘场强为 608kV/cm, 其数据曲线示于图 1.



15.

图 1.15 不同传输时间下击穿场强与压强的关系曲线

Miller 同时也导出了均匀场下水击穿场强、气压、电极有效面积及传输时间的关系式为:

$$F = 0.33 \times P^{1/8} \times A^{-1/16} \times t^{-1/3} \quad \text{for } t \leq 1\mu\text{s} \quad (17)$$

$$F = 0.51 \times P^{1/8} \times A^{-1/16} \times t^{-1/3} \quad \text{for } t \sim 2\mu\text{s} \quad (18)$$

$$F = 0.57 \times P^{1/8} \times A^{-1/16} \times t^{-1/6} \quad \text{for } t > 2\mu\text{s} \quad (19)$$

由图 1.15 及 Miller 公式知: 当传输时间 t 大于 $2\mu\text{s}$ 时, 击穿场强对时间的依赖关系小于 $t^{-1/3}$; 击穿场强与压强 P 之间近似为 $P^{1/8}$ 的线性关系; 击穿场强正比于电极有效面积的 $-1/16$ 指数幂。VanDevender^[25]采用有效面积更大的电极, 得到有效面积指数为 -0.06 。

Fenneman 和 Gripshover^[26]采用面积为 3cm^2 的半球和面积为 81cm^2 的平板为电极, 进行非均匀场下的击穿实验, 得到有效面积项指数为 0.108。这与 J. C. Martin 等人实验数据是不一致的, 从而表明了非均匀场与均匀场的击穿情况是有区别的。另外, 他们得到的数据还表明: 当 $\tau_{\text{eff}} \gg 1\mu\text{s}$ 时, 击穿场强对时间的依赖关系小于 $t^{-1/3}$ 。

(12) 电导率对水介质击穿特性的影响

研究人员进行了大量的实验来研究水介质中枝顶的生长与水介质电导率、电极极性之间的关系。

L. G. Kutsenko 和 A. V. Kortnev^[27]在水介质中加入锂氧化物溶液来改变水介质的电导率, 他们的实验结果表明枝顶的生长依赖于水介质中离子的浓度。

Mel'nikov^[28]等人通过在水介质中加入不同浓度的氯化钠溶液来调节电导率, 并使电导率处于 $0.6 \times 10^{-5} \sim 0.2 \text{ S/cm}$ 的范围内。实验中两电极之间的电压从 1kV 上升至 5kV。实验结果表明: 当电导率为 10^{-5} 至 10^{-3} S/cm 时, 枝顶生长的速度约为 $1 \text{ mm}/\mu\text{sec}$, 并与电导率的平方根成反比; 当电导率大于 10^{-2} S/cm 时, 实验中没有观察到枝顶。

Jones 和 Kunhardt^[29,30]在实验中采用了去离子水及浓度分别为 0.001M、0.01M 的氯化钠溶液, 实验中他们发现在这三种介质中枝顶的生长速度没有明显差别。而以蒸馏水及去离子水进行同样的实验时, 在蒸馏水中枝顶由一个电极到达另一个电极比在去离子水中慢了 5ns, 即在去离子水中枝顶的生长要比在蒸馏水中要快。

Alkhimov^[31]等人利用间距为 5mm、直径为 3cm 的半球电极研究了电极极性对枝顶生长的影响。介质电阻率为 $3 \times 10^6 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, 电极间平均电场强度为 $100 \sim 300 \text{ kV/cm}$, 他们发现只有阳极有枝顶出现, 而阴极没有。

Yanshin^[32]等人利用一个不锈钢针状电极和一个黄铜平板电极, 当针状电极为阳极时两电极的间距为 15mm, 当平板电极为阳极时两电极间距为 6mm, 他们在实验中发现: 阳极附近枝顶的生长速度比阴极附近枝顶的生长速度高出约两个数量级; 在阴极附近产生枝顶所需的电场强度是在阳极附近产生枝顶所需电场强度的两倍。

以上实验表明: 水介质中的离子提高了枝顶生长的速度; 阳极附近枝顶的生长速度更快。

§ 1.2 调研小结

从水介质击穿的调研可以看出, 为了提高水介质的电性能, 研究人员进行了大量的研究。水条件的改变影响了水介质的击穿强度、相对介电常数和击穿阈值的有效时间, 通常需要折衷考虑水击穿的这三个基本要素。产生击穿效应的水条件包括: 气压、电极面积、添加剂(乙二醇、酒精、HCl 等)、电极材料、极化、温度、电阻率、磁场、扩散电极等。

由于水介质的击穿存在着各种效应,因此我们可以通过改变气压、电极面积、电极材料、添加剂、温度及磁场等因素来影响水介质的击穿场强、相对介电常数及有效时间。同时,为了得到最佳的电性能,我们需要对这三个参数综合考虑。提高水绝缘场强的许多技术,已经获得了不同程度的成功。有些技术在实验室获得了巨大的成功,但是对实际应用却有多少意义的。然而,这些技术有助于我们探索水击穿的机制和寻找增加绝缘场强的实用技术。

Fenneman 在球板电极条件下的研究结果表明:通过在去离子水中加入乙二醇为解决低温下水结冰的问题提供了一种有效途径,同时还有助于提高水介质的击穿场强。因此,本课题选择同轴传输线条件下的去离子水与乙二醇混合液的电性能作为研究对象是合理的。

§ 1.3 水击穿的物理机制

人们采用各种理论模型,试图解释水击穿的实验现象,主要的理论模型有最初的经典电子模型和热模型,以及近年来发展的质子传输理论。这些模型并不能全面地解释各种实验现象,水击穿过程中,往往同时有几种机制发生作用。而在具体的击穿实验中,其中的一两种机制在击穿过程中发挥主导作用,水击穿的机制还有待进一步的探索。

当作用在绝缘介质中的电场强度足够大时,绝缘介质将发生击穿,如气体中的放电现象。液态介于理想气态和理想固态之间,液态分子具有象气态分子一样的随机运动,它们的位置只有用统计分布来描述;同时液态分子又具有象固态分子一样的紧密性。若单独考虑物质态的密度,则液体击穿倾向于类似固体击穿,有研究表明固体击穿的场发射也在液体击穿过程中发挥了重要作用,且液体和固体的击穿场强在同一数量级。但是,由于液体没有固定的结构,就这一点而言,液体的击穿又倾向于类似气体的击穿,水介质与气体在击穿前具有类似的发光特征及被称作枝顶的细卷须状物。人们同时尝试着把气体放电原理(如平均自由程和电子雪崩等)应用到水介质击穿。一部分人倾向于电子倍增原理:电子碰撞原子导致新电子的产生,新产生的电子又参与碰撞电离,从而产生更多的电子,当电子数目达到一定程度时电子便会越过间隙导致放电,即击穿发生,这便是最初的电子模型,它类似于气体击穿的 Townsend 原理。而另一部分人则认为水介质中的电子不具备气体中电子的某些性质,从而怀疑水介质中碰撞电离的存在。他们倾向于所谓的气泡击穿机制:电极表面由于受到强电场的局部加热使液体汽化形成气泡,由于气泡的击穿场强较低,因

此在一定电场强度的作用下发生击穿并迅速割裂液体,从而导致水介质击穿。离子碰撞产生的焦耳热使水介质由液态转化为气态,此时电子通过碰撞气态水分子使其电离,产生更多的电子,由此造成电子的雪崩过程,当电子数目达到一定程度时电子便会越过间隙,发生击穿,这便是最初的热模型。

然而,电子模型及热模型对很多实验现象均不能提供合理的解释,后来人们发现水介质中电荷的载体是质子而非电子,从而发展了质子传输理论,它类似于半导体中空穴的运动。

总之,为了给出水介质击穿的物理机制,科研人员进行了大量的研究,也提出了很多理论。总体来讲主要有三种模型:经典电子模型、热模型和质子传输模型。这些理论对于我们通过采取措施来提高水介质的击穿性能具有重要意义。

§ 1.3.1 经典电子模型

电子模型基于电子作为载流子,并假定电子在水介质中处于自由状态(该假定是不正确的)或电子能够摆脱阴极的束缚。大部分电子模型假定水介质中存在自由电子,这意味着它们的德布罗意波长比非弹性碰撞之间的距离小得多,也就是说它们存在平均自由程。根据该假定,电子被强电场加速而获得足够的能量来电离一个水分子,该过程重复下去即形成电子雪崩。由于该模型在一些较贵重的液体击穿过程中给出了正确的击穿电压,因此人们认为该模型能够解释水介质的击穿。

然而,早期对于水介质在弱场下电属性的认识并不支持上述观点。首先,在水介质中不存在自由电子:水介质中的任何电子会变成溶剂化物,也就是说它们的德布罗意波长与分子间距在同一量级^[33],且该溶剂化过程发生在 ns 量级^[34]。一旦溶剂化,电子便会在极短的时间内与任何带正电的杂质发生化学结合。这些“自由”电子的唯一来源是阴极,但是这些电子也将被溶剂化。水介质中没有电子来源,即使存在,所谓的“自由”电子也将立即溶剂化。

枝顶在阳极可以在较低电压下形成并生长得更快这一实验事实与电子模型相矛盾。气体击穿理论基于电子的碰撞电离,并预言枝顶在阳极更难产生且生长更慢,恰与水击穿的情形相反^[35]。气体击穿过程中用于描述枝顶生长的一个模型是波前离子化,该理论基于波前电子的扩散(为在枝顶顶端保持高电场)来解释阳极上枝顶生长速度更慢的原因。另外,

Albright 和 Tidman 说明该模型能够预言阳极上枝顶生长的速度^[36]。任何基于气体击穿理论而用于解释水介质击穿的电子模型均预言阴极上枝顶的生长比阳极上枝顶的生长更快，这与水介质的击穿实验是相矛盾的。

总之，无论在理论上还是在实验中均还没有确凿的证据来支持经典电子模型。

§ 1.3.2 经典热模型

热模型基于实验过程中气泡的形成。它与电子模型一样源于电子的雪崩过程。在热模型中，离子碰撞产生的焦耳热使水介质由液态转化为气态，此时电子通过碰撞气态水分子使其电离，产生更多的电子。

当电压加在用水介质隔开的两个电极时，我们将观察到两个现象：其一是在低电压时，两个电极上将出现气泡；当电压较高时，其中的一个电极上将出现树状结构，若两电极间的距离不是很大，该树状结构中一枝（称为枝顶）将达到另一个电极，使电荷迅速由一个电极达到另一个电极，最终使两电极的电势相等。

离子加热机制基于离子流产生的焦耳热，该热量导致水的蒸发，而气态水很容易发生击穿。去离子水存在一定的电阻率，外加电场作用下，离子加热可以使得水温升高。外电场作用下产生的焦耳热：

$$W = P t = U^2 t / (2R) \propto U^2 t / \rho \quad (20)$$

式中， U 为外加电压、 R 为水器件电阻、 ρ 为水的电阻率、 t 为外加电场作用时间。焦耳热作用下水温上升，温度的上升由下式决定：

$$W = Cm \Delta T \quad (21)$$

式中， C 为水的比热容、 m 为水的质量、 ΔT 为水的温升。由上述关系式得到：

$$\Delta T = U^2 t / (2RCm) \propto U^2 t$$

热模型中存在两种观点，其中一种观点基于简单实验观察：当有强电流通过水介质时，电极表面将产生气泡，该现象称为电解。该过程是绝热的，且在水介质与电极表面之间包含了复杂的电子间相互作用。研究人员通过高速照相机发现，在充满微气泡的水介质中产生了枝顶；同时也发现，若在水介质击穿前过早地去掉电压，枝顶分解为微气泡。该观点认为离子流导致的焦耳热使水介质发生了气化，水介质中的离子受到外部电场的作用力及周围水分子的吸引力，其中，摩擦力是焦耳热的来源。但是，有研究表明由该过程所产生

的焦耳热相对于使水介质气化所需的热量是非常有限的。

另一种观点则基于 Jones 和 Kunhardt^[37]在高压 (100kV) 及短的持续时间 (100ns) 下所进行的实验。前人做的许多水击穿实验也没有发现水的汽化这种情形, 一种普遍的观点是: 汽化过程所需的局部能量沉积极高, 而汽化过程的时间尺度极短, 所以, 离子加热无法实现水的局部汽化。他们的研究显示离子电荷载体对水击穿过程没有影响, 对水介质加高压后气泡变得非常小。因而, 他们认为离子加热模型不能用于阐述水介质击穿机制。

在许多击穿实验中, 局部强电场处的水介质并没有发生从液态到气态的宏观状态的转变, 因此电子在液态水介质中也就不具备类似于气体中的性质。因而, 气体放电理论并不适用于水介质击穿, 经典热模型也不能解决水介质击穿的问题。

§ 1.3.3 质子传输理论

研究人员通过实验发现经典电子模型及热模型对水介质击穿均不能提供很好的解释, 为此人们又提出了质子传输理论。

Yanshin、Ovchinnikov 和 Vershinin^[38]把电荷通过水介质间隙的基本传输机制描述为质子运动, 类似于半导体中“空穴”的迁移。

图 1.16 给出了质子是如何运动的, 该图右边为水分子的结构, 且水分子被置于方向向右的电场中; 在该图的左边, 一个 H^+ 与一个水分子相结合形成一个水合氢离子 (H_3O^+)。他们指出: 当电极两端加上电压后, 阳极表面出现空穴, 且表面电荷密度为:

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (22)$$

在空穴出现的同时, 电子从附近的水分子以绝热或非绝热的形式迁移到这些空穴, 从而形成了水合氢离子。通过上述机制, 最终形成了质子运动, 并将电场能转化为热能。该热能使水介质“沸腾”并形成了气泡。

Yanshin 及 Korobeynikov^[39]通过实验研究认为水介质中的气泡是由电极表面的微孔所释放出来的气体形成的, 类似于气穴现象。

Yanshin、Ovchinnikov 和 Vershinin^[40]通过利用 Kerr 效应及等离子体超速扫描照相

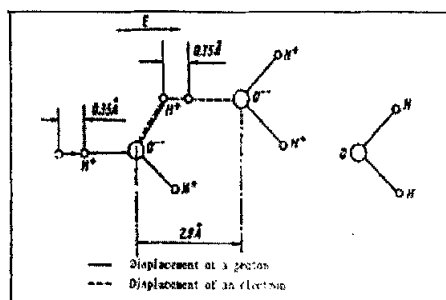


图 1.16 水中质子运动机制

机发现：即使在场强高达 $10\text{kV}/\text{cm}$ 时，阴极附近也没有出现空间电荷。他们认为该现象意味着在水介质中电子的迁移速度是很慢的，在电场强度为 $10\text{kV}/\text{cm}$ 时，电子的迁移速度小于 $1.5 \times 10^5 \text{cm}/\text{sec}$ ；而且，即使在高电场强度的作用下，电子也要与水分子结合为水合氢离子。这些事实均证明 Yanshin 等人关于水介质中携带电荷穿越间隙的载体是质子而非电子的结论是合理的。

现代关于水介质的理论将质子的传输分为四个步骤：氢键的断裂、质子通过量子隧道、溶剂结构的重组以及氢键的再生。经过以上这四个步骤，相邻的两个水分子之间完成了质子的转移。

质子传输理论的基本思想是 Grotthuss^[41] 机制，认为水介质中电荷的载体并不是一个裸露的质子，而应该是 H_9O_4^+ ，图 1.17 给出了 Grotthuss 机制的示意图。由图可知：起初存在一个受氧原子 b 束缚的过剩质子，在其周围仅有三个水分子而不是通常情况下的四个水分子，相邻水分子数目的减少使 H_9O_4^+ 联合体具有平面三角形结构，而不是通常情况下的三维四面体结构。假定存在外加电场的作用，则该过剩质子将受到氧原子 b 和 c 的共同束缚。为了形成电荷的迁移，氧原子 c 必须成为新的 H_9O_4^+ 联合体的中心，也就是说，仅当受氧原子 c 束缚的一个水分子因氢键断裂而脱离氧原子 c 的束缚时，电荷的迁移才能

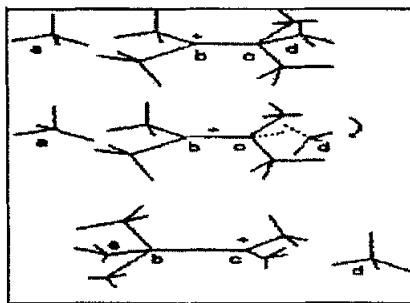


图 1.17 Grotthuss 机制

够发生。氧原子 b 和氧原子 c 之间氢键的断裂将使得氧原子 c 成为新 H_9O_4^+ 联合体的中心。与此同时，在水分子 a 和 b 之间将形成新的氢键，从而使 b 周围的结构重新回到四面体结构。由于质子的跃变是一个非连续过程，因此在 Grotthuss 机制下，电荷的迁移仅能够存在于相邻的水分子之间。

质子传输理论与离子加热理论（即热模型）都是通过热过程来解释水击穿现象，主要的区别在于二者的电荷载体分别为水合氢离子与杂质离子。现代质子传输理论建立在实验及理论的基础上。不幸的是其理论仅仅依赖于量子机械模拟，至今人们还未给出迁移率的解析表达式。

§ 1.4 本课题的选题依据及研究的主要内容

目前,对脉冲功率系统的总体要求是体积小、结构紧凑,同时能承受较高的电压。因为水具有高的相对介电常数($\epsilon_r=80$),在相同的储能下,水介质电容器体积上比其他介质材料的电容器小30~40倍,而且水的击穿场强较高。因此,国内外对水的击穿特性进行了大量的研究。选择去离子水与乙二醇混合液的电性能作为研究课题,取决于本教研室进一步工作的需要:

(1) 由于我们的调制器有可能要求工作在 0°C 以下,因此将存在水结冰的问题。为此需在去离子水中加入某种添加剂,以防止水结冰。同时要求加入添加剂后不至于降低水的电性能。因此需要对去离子水中加入添加剂后的电性能进行深入的研究。

(2) 提高水的击穿场强对于器件的小型化有重要的意义。如果加入添加剂有助于提高水的击穿场强,将使我们的脉冲功率系统体积更小、结构更紧凑。

为了以上两个目的,本课题选乙二醇作为添加剂进行研究。因为有研究表明乙二醇与水介质混合后降低了水介质的冰点,随着乙二醇水溶液浓度的增加,其冰点持续下降。当乙二醇浓度达到68%时,其冰点可达到 -68°C ;同时期望乙二醇的加入会提高水的击穿场强,从而实现器件的进一步小型化。Fenneman在球板电极条件下的研究结果表明,在去离子水中加入乙二醇为提高水介质的击穿场强及解决低温下水结冰的问题提供了一种有效途径。因此,选择乙二醇作为添加剂进行研究不仅具有重要的现实意义,而且是可行的。

本论文首先对常温常压下去离子水的电性能进行了实验研究,得出了去离子水的击穿电压及击穿时间与充电速度之间的关系。

然后在常温常压下对不同浓度的去离子水/乙二醇混合液的电性能进行了实验研究,其中包括让混合液保持循环及停止循环两种条件下的实验研究,得到了混合液的击穿电压、击穿时间、相对介电常数及电阻率与浓度的关系以及混合液的击穿电压、击穿时间与充电速度之间的关系并将去离子水的电性能与混合液电性能进行了比较。

在常温常压下混合液击穿实验研究的基础上我们还对混合液进行了低温下的电性能研究,得出了混合液的相对介电常数及电阻率随温度的变化关系;同时进行了混合液的冰点实验,得出了混合液冰点与混合液浓度之间的关系,从而验证了在去离子水中加入乙二醇确实降低了水介质的冰点。

第二章 实验装置及实验方法

§ 2.1 实验装置

为了研究水介质及去离子水与乙二醇混合液的击穿特性，我们设计了一套实验装置，其装置图如图 2.1 所示，示意图如图 2.2 所示。

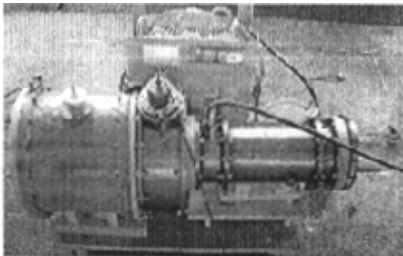


图 2.1 实验装置图

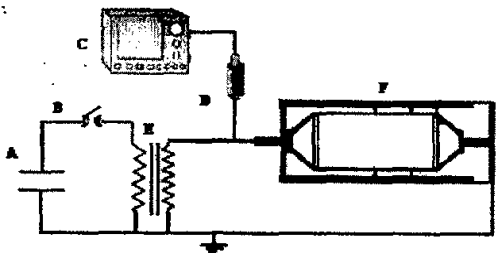


图 2.2 装置示意图

图 2.2 中：A 为 $16\mu\text{F}$ 的储能电容器，B 为开关，C 为示波器，D 为分压器，E 是变压比为 1 : 15 的变压器，其初级和次级电感分别为 $4.13\mu\text{H}$ 和 2.694mH ，耦合系数为 0.739，F 为水介质传输线(内外筒之间充满去离子水或去离子水/乙二醇混合液)。实验中通过充电系统向电容器 A 充电，当达到要求的电压值后开关 B 导通并向变压器 E 放电，通过变压器的升压作用再向水介质传输线充电。在变压器与水介质传输线的连接处我们接一分压器 D，由示波器测量分压器上的电压波形即可得到传输线上的电压波形。实验中外筒接地，内筒充负电。水介质同轴传输线 F 的装配图如图 2.3 所示（图中单位均为 mm）。内外筒均以不锈钢作为材料，内筒通过外筒两端的聚合板支撑。

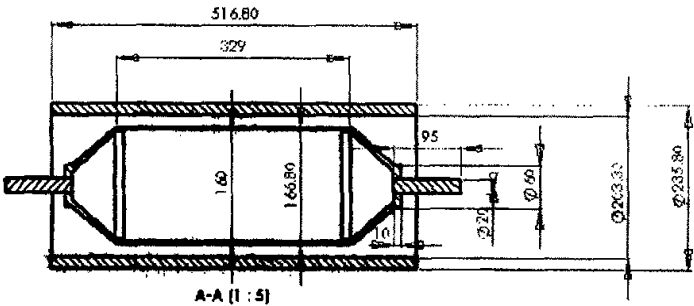


图 2.3 水介质传输线装配图

§ 2.2 实验方法

当作用在传输线内外筒间的电压足够大时, 由于电场强度超过绝缘介质所能承受的最大值, 绝缘介质将发生击穿。如图 2.2 所示, 实验中通过充电系统向储能电容器 A 充电, 当达到要求的电压值后触发开关 B 导通并向变压器 E 放电, 通过变压器的升压作用再向水介质传输线 F 充电, 当水介质传输线上电压超过一定值后, 水介质发生击穿。通过示波器 C 测量传输线上的击穿电压波形, 我们可以得到与绝缘介质击穿性能有关的击穿电压、击穿时间及有效时间。同时通过 RLC 仪测量传输线的电容及电阻我们可以研究绝缘介质的相对介电常数及电阻率。在储能变压器上充不同的电压以产生不同的充电速度, 通过击穿实验来研究水介质的击穿电压、击穿时间与充电速度的关系。

以去离子水与乙二醇的混合液为绝缘介质制作平板电容器, 并尽量满足理想条件, 通过 RLC 仪测量出电容器在不同温度下的电容及电阻, 便得到混合液的相对介电常数及电阻率随温度的变化关系。通过测出不同浓度混合液的冰点, 我们可以得出混合液冰点与混合液浓度之间的关系。

水介质的自放电时间常数 τ_C (μs) 为:

$$\tau_C = RC = \rho\epsilon = \rho\epsilon_0\epsilon_r = \frac{\epsilon_r\rho}{4\pi \times 9 \times 10^{11}} \quad (23)$$

式中, R 为水器件阻抗 (Ω), C 为水器件电容 (nF), ρ 为水的电阻率 ($M\Omega \cdot cm$), ϵ_r 为水的相对介电常数。为了对水介质电容进行有效充电, 必须使它的充电时间远小于 τ_C 。当自放电时间为 $\tau_C/7$ 时, 电压下降 13.3%, 能量损失 25%。一般来说, 水电容的充电时间不能大于 $\tau_C/7$ 。

前人的研究表明击穿场强与充电时间也即充电速度有关, 为研究充电时间对击穿电压的影响, 我们给初级储能电容器充不同的电压, 使通过变压器升压后给传输线中的绝缘介质充电的速率不同。也就是说, 在不同的充电电压下介质被充电到同一电压值时充电时间不同。本实验中选用初级储能电容器的充电电压分别为 15kV、20kV 及 25kV, 通过比较在不同充电电压下的击穿电压波形我们可以得出在相同条件下击穿电压与充电速度的关系。

在实验中, 为了避免传输线及变压器的高压爬电, 我们将水介质传输线和变压器浸入变压器油中。为了减小去离子水及混合液中残留离子对实验的影响, 在实验过程中我们让去离子水及混合液保持循环, 并经过树脂的去离子处理。在每次击穿实验后, 在内筒外表

面及外筒内表面均会出现毛刺（如图 2.4 所示）；将会给接下来的击穿实验带来负面影响，为了减小这种影响。我们每进行五次击穿实验后均用沙盘及羊毛绒（如图 2.5 所示）对内外筒进行打磨抛光处理。打磨抛光后的内外筒分别如图 2.6、2.7 所示。为尽量减小前一次击穿实验对后续实验的不利影响，在每次击穿实验后让水介质循环 10 分钟。

在每一充电电压下均进行五次击穿实验，以它们的均方根值作为实验结果。



图 2.4 介质击穿后在内筒外表面留下的毛刺

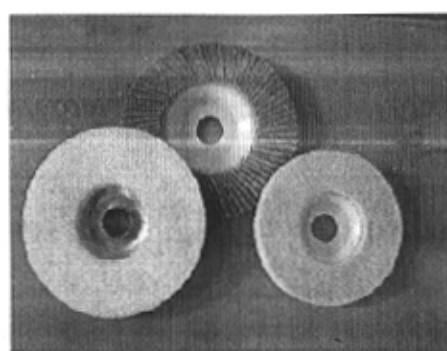


图 2.5 用于打磨内外筒的一些器件

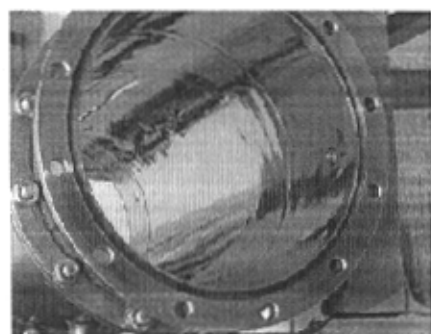


图 2.6 打磨抛光后内筒的效果图

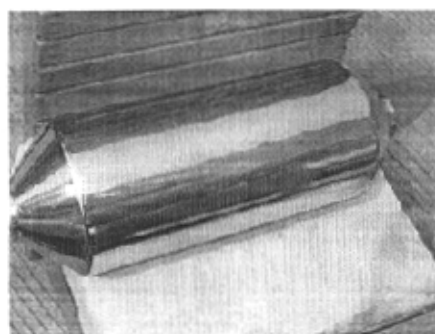


图 2.7 打磨抛光后外筒的效果图

§ 2.3 分压器和衰减器的定标

由于击穿实验是在高电压条件下进行,为了使示波器能够正常工作,实验中采用了分压器和衰减器。为了分别得到分压器和衰减器的分压比和衰减倍数,需要对它们分别进行定标,定标示意图如图 2.8 所示。

定标时采用一台小信号发生器(图 2.8 中右边仪器)、一台示波器(图 2.8 中左边仪器)及带有三通的传输线。由小信号发生器产生的小信号通过三通分流,一路信号未经衰减地通过传输线送至示波器的通道 1,

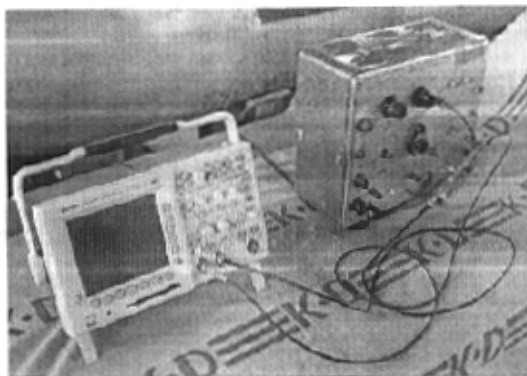


图 2.8 分压器和衰减器的定标示意图

而另一路信号则经过分压器的分压作用或衰减器的衰减作用后由传输线送至示波器的通道 2。从示波器中读出两通道中信号的幅度,两者相比即为分压器的分压比或衰减器的衰减倍数。

图 2.9 示出了通道 1 和通道 2 两路信号的波形。其中位于上面的波形为原始信号波形,单位为 1.00V/格;位于下面的波形为原始信号经过分压器的分压作用或衰减器的衰减作用后得到的波形,单位为 5.00mV/格。由图 2.9 我们可以得出该分压器或衰减器的衰减倍数约为 200。

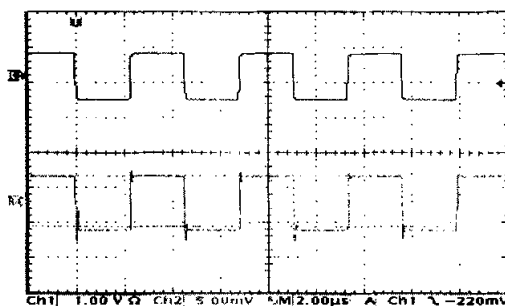


图 2.9 分压器和衰减器的定标波形

由于实验中分压器及衰减器均为水介质器件,易受外界环境的影响。因此,为保证分压器及衰减器的精度和准确性,在实验前后均要对分压器和衰减器进行定标,并以定标值为准。

第三章 理论分析和模拟计算

§ 3.1 电路分析

由装置示意图 2.2 得到实验装置的等效电路图如图 3.1 所示。其中 A 为储能电容器，B 为触发开关，R-wat 和 C-wat 分别为水介质传输线的电阻与电容，R-test、C-test 分别为测试系统的电阻与电容，它们的值由 RLC 仪测得分别为 $17.5\text{k}\Omega$ 、 10pF 。

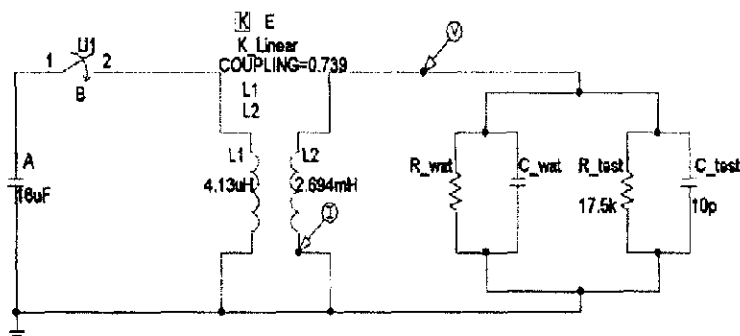


图 3.1 实验装置等效电路图

由图 3.1 可知变压器的初级回路为简单的 L-C 回路。如果不在变压器的次级回路加充电电感，忽略保护电阻、水器件以及电阻分压器的电阻值对电路的影响，则次级回路亦可简化为 L-C 谐振回路。忽略绕阻电容、涡流损耗及绕阻电阻和电感等杂散参量时，变压器的次级电压可简化表示为^[34]：

$$U_2(t) = \frac{k\omega_2^2 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} (\cos(S_1 t) - \cos(S_2 t))}{\sqrt{\omega_1^4 + \omega_2^4 - 2(1-2k^2)\omega_1^2\omega_2^2}} U_0 \quad (24)$$

其中， U_0 为变压器初级回路中储能电容器的初始电压， L_1 、 L_2 分别为变压器初级和次级的电感， k 为变压器的耦合系数， $\omega_{1,2}$ 为两回路的谐振角频率， $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}}$ ， $\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}}$ (C_1 、 C_2 分别为变压器的初级和次级回路的总电容， $C_2 = (C_{\text{wat}} + C_{\text{test}})$)。

$$S_1^2 = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{\omega_1^4 + \omega_2^4 - 2(1-2k^2)\omega_1^2\omega_2^2}}{2(1-2k^2)} \quad (25)$$

$$S_2^2 = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 - \sqrt{\omega_1^4 + \omega_2^4 - 2(1-2k^2)\omega_1^2\omega_2^2}}{2(1-2k^2)} \quad (26)$$

在本实验中, $L_1=4.13\mu\text{H}$, $L_2=2.694\text{mH}$, $k=0.739$, $C_1=16\mu\text{F}$, $C_{\text{test}}=10\text{pF}$ 。将次级电压对时间进行微分即可求得次级电压到达峰值的时间为 $t_m=1.83/\omega_2=1.83\sqrt{L_2C_2}$, 对应的次级回路峰值电压为 $U_{2m}=15.1U_0$ 。

取同轴传输线内筒外径为 r_1 、外筒内径为 r_2 , 其中 $r_1=83.40\text{ cm}$, $r_2=101.65\text{ cm}$ 。传输线的电容 (C) 由两部分组成: 两倒角之间的部分 (C_1) 及同轴线两端的部分 (C_2), 且两者并联, 即 $C=C_1+C_2$, 其中 C 、 C_1 及 C_2 的单位均为 nF 。为了简化计算, 我们将两倒角之间的部分视为理想无限长。根据理想无限长同轴线单位长度的电容计算公式:

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \ln(r_2/r_1)} \quad (27)$$

有:

$$C_1 = \frac{32.9 \times \epsilon_r}{18 \ln(101.65/83.4)} \quad (28)$$

$$C_2 = 2 \int_0^{6.195} \frac{\epsilon_r}{18 \ln[101.65/(83.4 - 8.6l)]} dl + 2 \frac{\epsilon_r}{18 \ln(101.65/30)} + 2 \frac{2.195 \times \epsilon_r}{18 \ln(101.65/5)} \quad (29)$$

$$C = 2 \int_0^{6.195} \frac{\epsilon_r}{18 \ln[101.65/(83.4 - 8.6l)]} dl + 2 \frac{\epsilon_r}{18 \ln(101.65/30)} + 2 \frac{2.195 \times \epsilon_r}{18 \ln(101.65/5)} + \frac{32.9 \times \epsilon_r}{18 \ln(101.65/83.4)} \quad (30)$$

式中 ϵ_r 为介质的相对介电常数。

利用同轴线电阻的计算公式(其中 ρ 为介质的电阻率, L 为传输线的长):

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (31)$$

可计算出实验中所用同轴传输线的电阻。它由四部分组成, 分别以 R_1 、 R_2 、 R_3 及 R_4 表示, 且四部分电阻为并联关系:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi \times 329} \ln \left(\frac{101.65}{83.4} \right) = 9.64 \times 10^{-4} \rho \quad (32)$$

$$R_2 = \left(\int_0^{83.4} \frac{\rho}{2\pi r (9.68 - 0.12r)} dr + \frac{\rho}{2\pi \times 6.195} \ln \frac{101.65}{83.4} \right) + 2 \quad (33)$$

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{101.65}{30} + 2 = 0.097\rho \quad (34)$$

$$R_4 = \left(\frac{\rho}{2\pi \times 2.195} \ln \frac{101.65}{5} \right) = 0.2185\rho \quad (35)$$

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{R_1 R_2 R_3 R_4}{R_2 R_3 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_2 R_3} \quad (36)$$

利用上述关系式通过 MathCAD 对传输线的电容和电阻进行计算得到：当内外筒之间充满去离子水时，电阻率 $\rho = 12.58 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ ，相对介电常数 $\epsilon_r = 80$ ，此时 $R_{\text{wat}} = 10.54 \text{ k}\Omega$ ，电容 $C_{\text{wat}} = 8.5 \text{ nF}$ 。而由 RLC 仪测得 $R_{\text{wat}} = 9.26 \text{ k}\Omega$ ， $C_{\text{wat}} = 8.6 \text{ nF}$ ，可见理论计算结果和测量值非常相近。因此可用实际测量值来估算介质的相对介电常数。

§ 3.2 电场强度分析

将实验中所用同轴传输线视为无限长，当加在内外筒之间的电压为 U 时，两筒间的电场强度分布表达式近似为：

$$E(r) = U / [r \ln(r_2/r_1)] \quad (r_1 < r < r_2) \quad (37)$$

其中 $E(r)$ 为内外筒间半径为 r 处的电场强度。由式 (37) 知：内外筒之间随半径的增大，场强减小；击穿电压越大，击穿场强越大。由于内筒中间部分的 r_1 大于内筒两端的 r_1 ，因此中间部分的场强较两端的要大，从而保证了实验过程中传输线中间部分先击穿。内外筒之间的电场强度随半径的变化由图 3.2 示出。

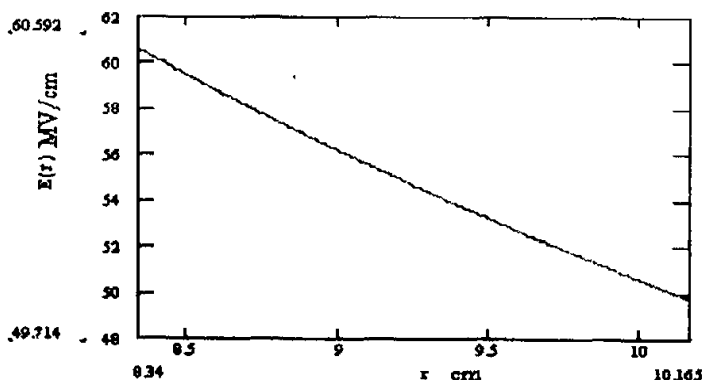


图 3.2 内外筒间电场强度随半径的变化示意图

根据均匀场下击穿的一般结论：负电极击穿场强约为正电极击穿场强的两倍。在本实验中内筒充负电，因此由式（37）得到：要使负电极上的电场强度为正电极的两倍即 $E(r_1) > 2E(r_2)$ ，要求 $r_2 > 2r_1$ 。而实验中 $r_1 = 83.40 \text{ mm}$ ， $r_2 = 101.65 \text{ mm}$ ，即不满足上述条件，因此实验中的击穿发生在正电极，即在外筒。

利用 Ansys 可以模拟出内外筒之间精确的电场强度分布。当内外筒间充满浓度为 48.7% 的混合液（相对介电常数 $\epsilon_r = 73.67$ ）、两筒间电压为 150kV 时，传输线内外筒之间的电场分布如图 3.3 所示。由于传输线为轴对称结构，因此我们仅对传输线的一半截面进行了模拟。当内外筒间充满去离子水或其他浓度的混合液时具有类似的结果。

由图 3.3 可知：内筒外表面的场强最大，为 115 kV/cm 。在内外筒两倒角之间的部分，在同一半径处不同点的场强相等，即为一均匀场。内筒倒角之间部分的场强大于内筒两端的场强，因此倒角之间的部分将先击穿，保证了实验过程中击穿发生在传输线的中间部分而不是发生在两端，从而保证了实验结果的可靠性。同时，电场强度由内筒外表面往外筒内表面随半径的增大而逐渐变小，倒角处由于边缘效应场强略有增大。根据击穿理论知，负电极击穿场强约为正电极击穿场强的两倍（由 J.C.Martin 公式知），而 $r_2 < 2r_1$ ，且实验中外筒为正电极，因此水介质将在外筒内表面附近先击穿。

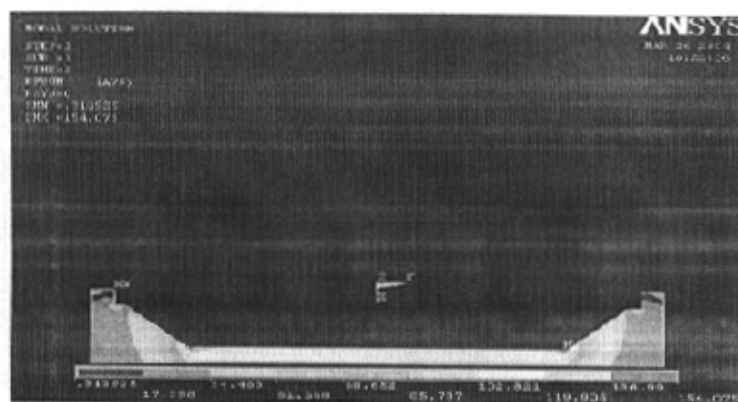


图 3.3 Ansys 模拟水介质传输线内外筒间的电场分布图

当介质中存在微气泡时将影响传输线内外筒之间的电场分布。利用 ANSYS 我们模拟了当外筒内表面附近存在 5 个微气泡时传输线内外筒之间的电场分布，并示于图 3.4。图 3.5 给出了微气泡附近的电场强度分布。

根据电位移矢量的公式:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (38)$$

其中: $\mathbf{D}$ 为电位移矢量, $\mathbf{E}$ 为电场强度, 两者均为矢量。由于在水介质与微气泡界面处电位移矢量不能突变即保持为一衡量, 同时由于水介质的相对介电常数远大于气体的相对介电常数, 因此微气泡中的电场强度远大于水介质中的电场强度, 该结论也可由图 3.5 看出。由于气体的耐击穿性能很差, 因此水介质中残留的微气泡将使水介质的击穿性能恶化。

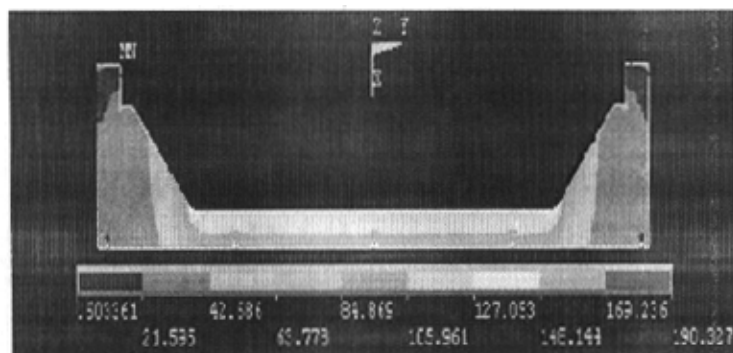


图 3.4 当外筒内表面附近存在 5 个微气泡时 Ansys 模拟的水介质传输线内外筒间的电场分布图

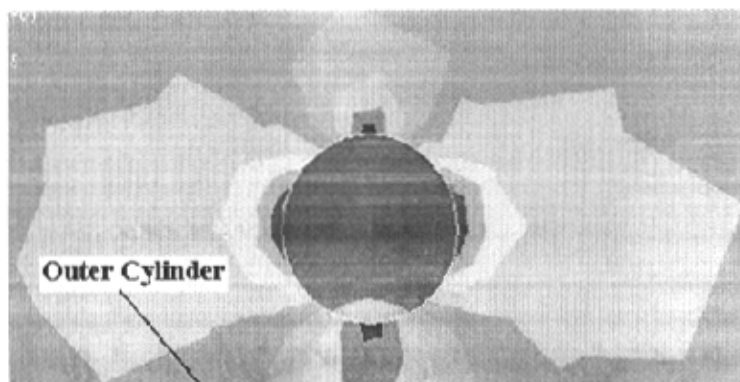


图 3.5 Ansys 模拟的微气泡附近的电场分布图

为保证水介质同轴线在现有实验条件下能够发生击穿, 需要对绝缘场强进行估算。因为为估算, 这儿粗略采用 Fenneman 和 Gripshover^[25]得到的非均匀场下的各种电极材料的 M 值, 电极为不锈钢时, $M \sim 0.60$ 。水介质的击穿场强与水器件的充电时间有关, 根据 ANSYS

模拟计算得到实验中水介质同轴线的电极有效面积约为 1780cm^2 ，有效面积的幂指数近似取-0.10。为了保证在现有实验条件下水器件能够发生击穿，水介质传输线外筒的最大设计场强必须大于水介质在正电极击穿的场强阈值。由 Miller 的水击穿调研结论^[4]，水介质在正电极击穿的场强表达式为：

$$F = 0.60 \times P^{1/8} \times A^{-0.10} \times t^{\beta} \quad (39)$$

其中， A 为正电极击穿的有效面积，对于不同的充电时间 β 取不同的值，如当充电时间为 $6\mu\text{s}$ 时， $\beta = -1/6$ 。根据公式 (39)，我们可以估算出为使水介质同轴传输线正电极发生击穿所需要的场强大小。

第四章 去离子水及去离子水/乙二醇

混合液电性能的实验研究

§ 4.1 去离子水电性能的实验研究

由 RLC 测得传输线的电容 $C_{\text{wat}}=8.6\text{nF}$ 、电阻 $R_{\text{wat}}=9.26\text{k}\Omega$ ，此时水的相对介电常数约为 80，电阻率约为 $12.58\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 。由图 3.1 得到传输线中充满去离子水时的等效电路图如图 4.1 所示。

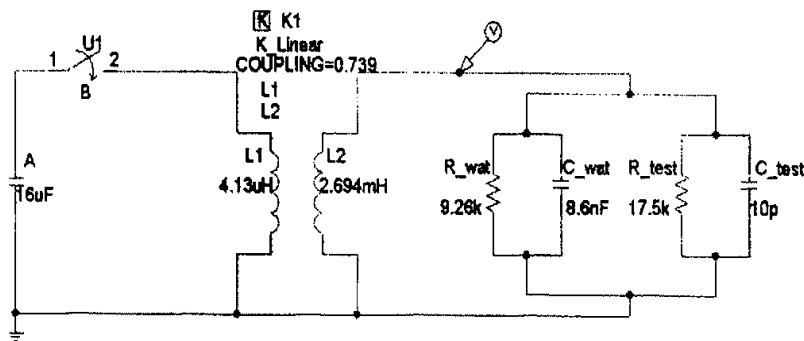


图 4.1 实验的等效电路图

当储能电容器上充电电压为 6kV 时，由 Pspice 对图 4.1 所示的电路进行模拟得到传输线上的充电电压波形如图 4.2 所示。而由实验得到传输线上的充电电压波形如图 4.3 所示。

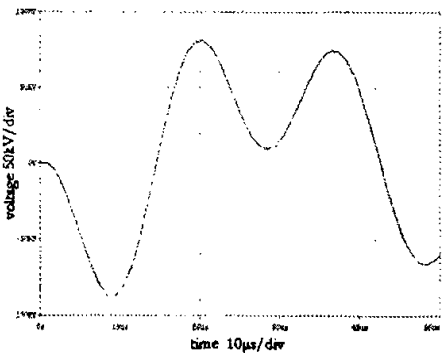


图 4.2 PSPICE 模拟的传输线上的电压波形

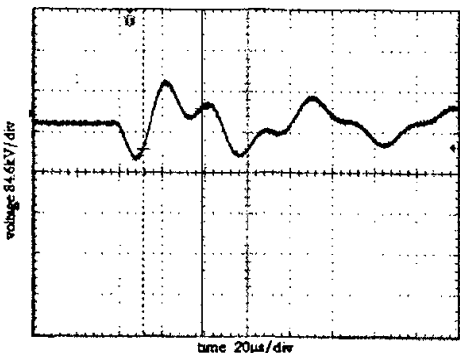


图 4.3 实验得到的传输线上的电压波形

由图 4.2 可知传输线上的峰值电压约为 88kV,达到峰值电压的时间约为 9.6 μs ;由图 4.3 可知传输线上的峰值电压约为 86kV,达到峰值电压的时间约为 9.8 μs 。由比较可知：当内外

筒间充满去离子水时,模拟结果同实验结果是相吻合的。

待去离子水充分循环、电阻率大于 $10\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 后,在常温(约 27°C)常压下分别进行充电电压为 15kV 、 20kV 、 25kV 时的击穿实验,研究去离子水的击穿电压、击穿时间及有效时间与充电电压(即充电速度)的关系。

当充电电压不同时得到的去离子水的击穿电压波形如图 4.4 所示。

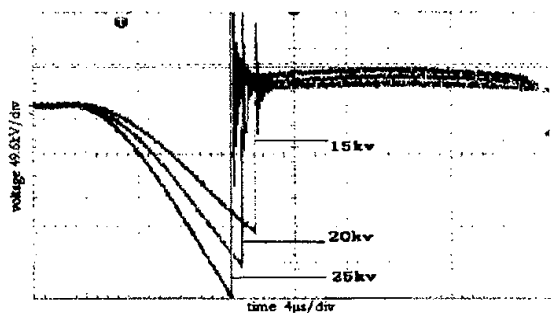


图 4.4 去离子水的击穿电压波形图

在每个充电电压下均进行五次击穿实验,并对五个实验数据取均方根值作为每个充电电压下的实验结果。对实验数据进行处理后,得到数据如表 4.1 所示:

表 4.1 去离子水击穿实验数据

充电电压 (kV)	平均击穿 电压 (kV)	平均击穿 时间 (μs)	平均有效 时间 (μs)	平均电容 (nF)	平均电阻率 ($\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$)
15	177.74	7.23	1.91	8.6	12.58
20	192.78	6.44	1.49		
25	204.74	5.77	1.28		

平均击穿电压、平均击穿时间随充电电压的变化及平均有效时间随充电电压的变化分别如图 4.5、图 4.6 及图 4.7 所示。

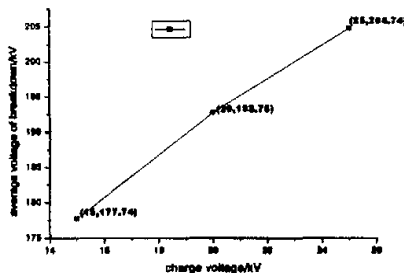


图 4.5 平均击穿电压随充电电压的变化

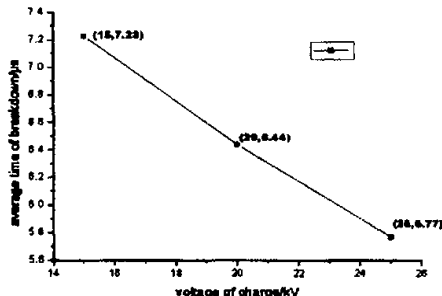


图 4.6 平均击穿时间随充电电压的变化

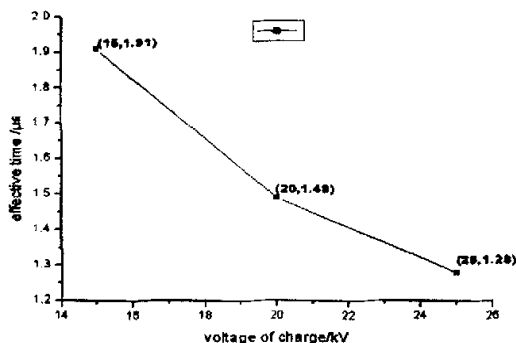


图 4.7 平均有效时间随充电电压的变化

实验过程中, 我们得到在充电电压为 15kV、20kV、25kV 时去离子水的最大击穿电压分别为 197.01 kV、201.96 kV、215.82kV。

由图 4.4、图 4.5、图 4.6、图 4.7 及表 4.1 可知: 平均击穿电压随充电速度的升高而增大, 如充电电压为 25kV 时的平均击穿电压为 204.74kV, 较 20kV 时的平均击穿电压高 6.20%, 较 15kV 时的击穿电压高 15.19%; 同时, 平均击穿时间、平均有效时间随充电速度的升高而减小, 如充电电压为 25kV 时的平均击穿时间、平均有效时间分别为 $5.77\mu s$ 、 $1.28\mu s$, 较 20kV 时的平均击穿时间、平均有效时间分别减小 10.40%、14.09%, 较 15kV 时的平均击穿时间、平均有效时间分别减小 20.19%、32.98%。

可见, 去离子水具有较好的耐高电压性能, 随着充电速度的增大即充电时间的缩短去离子水的击穿电压升高, 同时击穿时间缩短即去离子水在高电压下的保持时间缩短。

§ 4.2 去离子水/乙二醇混合液电性能的实验研究

在相同条件下不同浓度混合液的相对介电常数是不同的。以浓度为 48.7% 的混合液为例, 此时由 RLC 仪测得传输线的电容 $C_{\text{wat}}=7.92\text{nF}$ 、电阻 $R_{\text{wat}}=15.5\text{k}\Omega$ 。由图 3.1 得到传输线中充满浓度为 48.7% 的混合液时实验的等效电路图如图 4.8 所示。

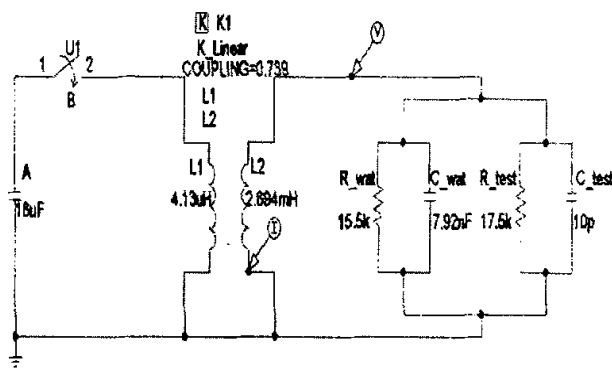


图 4.8 实验等效电路图

当储能电容器上的充电电压为 5kV 时,混合液未发生击穿。用 Pspice 对图 4.8 所示的电路进行模拟得到传输线上的充电电压波形如图 4.9 所示,由实验所得传输线上的充电电压波形如图 4.10 所示。

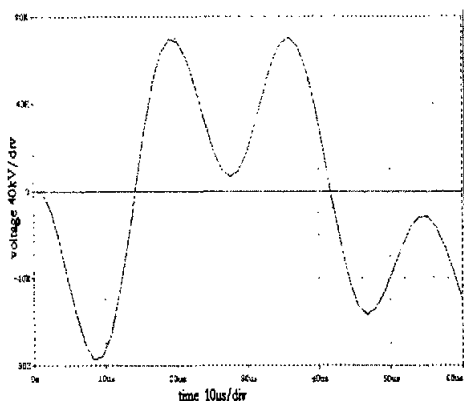


图 4.9 Pspice 模拟的传输线上的电压波形

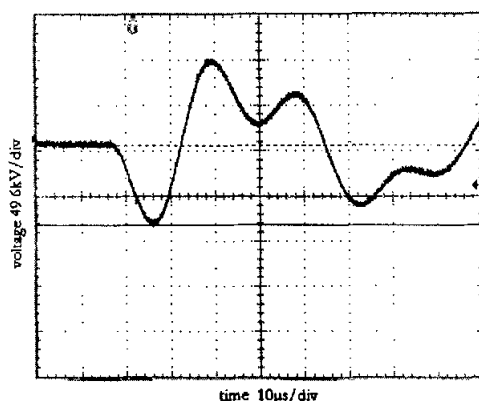


图 4.10 实验得到的传输线上的电压波形

由图 4.9 可知传输线上的峰值电压约为 74kV,达到峰值电压的时间约为 $9.9\mu\text{s}$;由图 4.10 可知传输线上的峰值电压约为 72kV,达到峰值电压的时间约为 $10.2\mu\text{s}$ 。由比较可知:当内外筒间充满 48.7%的去离子水/乙二醇的混合液时,模拟结果同实验结果相吻合。当混合液为其它浓度时模拟结果与实验结果也是相吻合的。

§ 4.2.1 混合液保持循环时电性能的实验研究

将传输线中的混合液通过树脂充分循环,当电阻率大于 $10\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 后分别进行不同浓度混合液的击穿实验。为了便于与去离子水的电性能进行比较,同时验证击穿电压、击穿时间及有效时间与充电速度的关系,我们对每一浓度的混合液均进行充电电压为 15kV、20kV 及 25kV 下的击穿实验。同时通过 RLC 仪测量不同浓度下传输线的电容及电阻,用来研究混合液的相对介电常数及电阻率与混合液浓度的关系。

在不同的充电电压下,浓度为 36.5%、48.7%、59.0%及 71.2%的去离子水/乙二醇混合液的击穿电压波形分别示于图 4.11、图 4.12、图 4.13 及图 4.14。

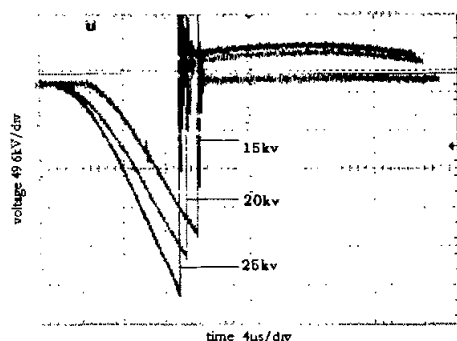


图 4.11 浓度为 36.5% 的混合液的击穿波形图

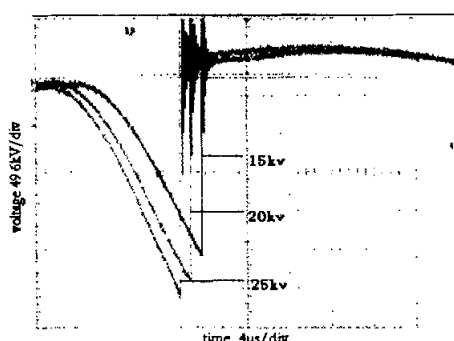


图 4.12 浓度为 48.7% 的混合液的击穿波形图

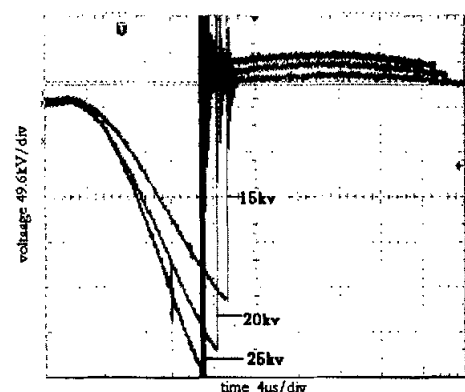


图 4.13 浓度为 59.0% 的混合液的击穿波形图

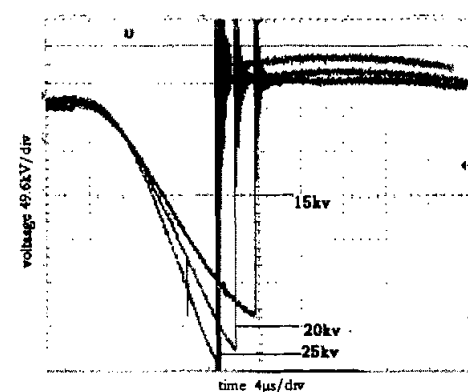


图 4.14 浓度为 71.2% 的混合液的击穿波形图

同样, 对于每个浓度的混合液, 在每个充电电压下均进行五次击穿实验, 并对五个实验数据取均方根值作为每个充电电压下的实验结果。对实验数据进行处理后, 得到浓度为 36.5%、48.7%、59.0% 及 71.2% 的混合液的实验数据分别如表 4.2、表 4.3、表 4.4 及表 4.5 所示:

表 4.2 浓度为 36.5% 的混合液击穿实验数据

充电电压 (kV)	平均击穿 电压 (kV)	平均击穿 时间 (μ s)	平均有效 时间 (μ s)	平均电容 (nF)	平均电阻率 ($M\Omega \cdot cm$)
15	200.94	7.73	2.12	8.06	15.63
20	214.18	6.67	1.62		
25	221.09	6.20	1.39		

表 4.3 浓度为 48.7% 的混合液击穿实验数据

充电电压 (kV)	平均击穿 电压 (kV)	平均击穿 时间 (μ s)	平均有效 时间 (μ s)	平均电容 (nF)	平均电阻率 ($M\Omega \cdot cm$)
15	238.11	7.89	2.22	7.92	21.74
20	251.67	7.00	1.67		
25	268.36	6.35	1.52		

表 4.4 浓度为 59.0%的混合液击穿实验数据

充电电压 (kV)	平均击穿 电压 (kV)	平均击穿时间 (μ s)	平均有效 时间 (μ s)	平均电容 (nF)	平均电阻率 ($M\Omega \cdot cm$)
15	240.16	8.10	3.10	7.66	35.71
20	260.63	7.31	1.88		
25	274.43	6.44	1.61		

表 4.5 浓度为 71.2%的混合液击穿实验数据

充电电压 (kV)	平均击穿 电压 (kV)	平均击穿 时间 (μ s)	平均有效 时间 (μ s)	平均电容 (nF)	平均电阻率 ($M\Omega \cdot cm$)
15	244.01	8.11	3.12	7.36	40.01
20	267.94	7.37	1.92		
25	278.72	6.47	1.62		

实验中，浓度为 36.5%、48.7%、59.0%及 71.2%的混合液在充电电压为 20kV 时的最高击穿电压分别为 220.82 kV、256.21 kV、276.21 kV、280.67 kV；在充电电压为 25kV 的最高击穿电压分别为 232.82kV、286.01kV、292.34kV、298.56kV；浓度为 36.5%、48.7%、59.0%及 71.2%的混合液在充电电压为 20kV 时的最高击穿时间分别为 6.82 μ s、7.38 μ s、7.48 μ s、7.52 μ s；在充电电压为 25kV 时的最高击穿时间分别为 6.52 μ s、6.58 μ s、6.64 μ s、6.76 μ s。

由实验数据得到：在充电电压为 20kV、25kV 时，平均击穿电压随浓度的变化分别示于图 4.15、图 4.16。

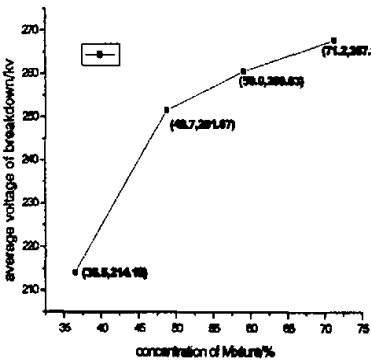


图 4.15 充电电压为 20kV 时
击穿电压随浓度的变化

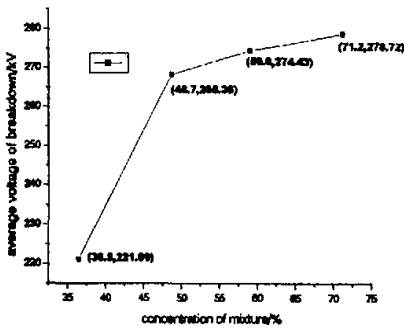


图 4.16 充电电压为 25kV 时
击穿电压随浓度的变化

由图 4.15、图 4.16 可知：在相同的充电电压即相同的充电速度下，平均击穿电压随浓度的升高而增大，同时随着浓度的升高增幅减小。如在充电电压为 20kV 时，浓度为 71.2%

的混合液的平均击穿电压较浓度为 36.5%的混合液的平均击穿电压提高 25.10%，较浓度为 48.7%的混合液的平均击穿电压提高 6.46%，较浓度为 59.0%的混合液的平均击穿电压提高 2.80%；在充电电压为 25kV 时，浓度为 71.2%的混合液的平均击穿电压较浓度为 36.5%的混合液的平均击穿电压提高 26.06%，较浓度为 48.7%的混合液的平均击穿电压提高 3.86%，较浓度为 59.0%的混合液的平均击穿电压提高 1.56%。从而可知：在相同条件下，通过增大混合液的浓度可以提高混合液的击穿电压。

在充电电压为 20kV、25kV 时，平均击穿时间随浓度的变化分别示于图 4.17、图 4.18。

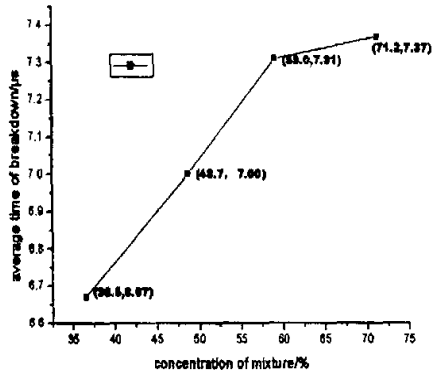


图 4.17 充电电压为 20kV 时
击穿时间随浓度的变化

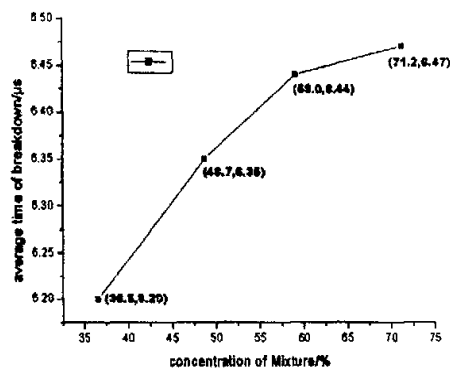


图 4.18 充电电压为 25kV 时
击穿时间随浓度的变化

由图 4.17、图 4.18 可知：在相同的充电电压即相同的充电速度下，平均击穿时间随浓度的升高而延长，同时随着浓度的升高增幅减小。如在充电电压 20kV 时，浓度为 71.2%的混合液的平均击穿时间为 $7.37\mu\text{s}$ ，较浓度为 36.5%的混合液的平均击穿时间延长 10.49%，较浓度为 48.7%的混合液的平均击穿时间延长 5.29%，较浓度为 59.0%的混合液的平均击穿时间延长 0.82%；在充电电压 25kV 时，浓度为 71.2%的混合液的平均击穿时间为 $6.47\mu\text{s}$ ，较浓度为 36.5%的混合液的平均击穿时间延长 4.35%，较浓度为 48.7%的混合液的平均击穿时间延长 1.89%，较浓度为 59.0%的混合液的平均击穿时间延长 0.47%。因此，在相同的充电速度下随着浓度的升高混合液在高电压下耐高电压的时间延长，即在相同的电压下需要更长的时间才能使混合液击穿。

对于浓度为 48.7%和 71.2%的混合液的平均击穿电压随充电电压的变化由图 4.19、图 4.20 给出。

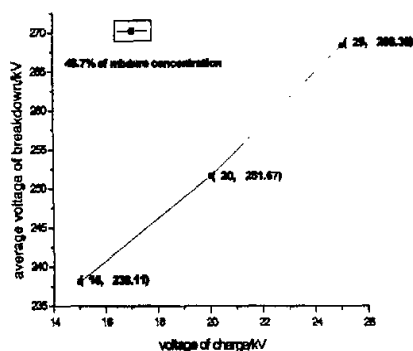


图 4.19 浓度为 48.7% 时击穿
电压随充电电压的变化

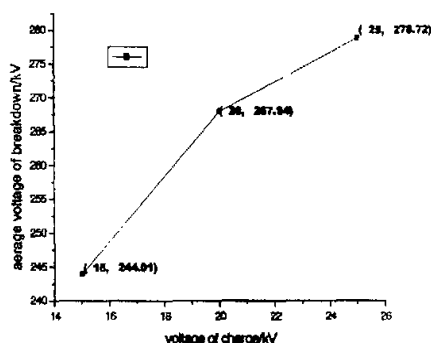


图 4.20 浓度为 71.2% 时击穿
电压随充电电压的变化

由图 4.19、图 4.20 可知：在相同的浓度下，充电电压越高混合液的平均击穿电压越高，即充电速度越快混合液越难击穿。如对于浓度为 48.7% 的混合液，在充电电压为 15kV、20kV 时的平均击穿电压分别为 238.11kV、251.67kV，而在充电电压为 25kV 时其平均击穿电压为 268.36kV，比在充电电压为 15kV、20kV 时的平均击穿电压分别提高 12.7% 及 6.63%；对于浓度为 71.2% 的混合液，在充电电压为 15kV、20kV 时的平均击穿电压分别为 244.01kV、267.94kV，而在充电电压为 25kV 时其平均击穿电压为 278.72kV，比在充电电压为 15kV、20kV 时的平均击穿电压分别提高 14.22% 及 4.02%。可见，在相同浓度下，充电速度越快混合液的击穿电压越高，同时随充电速度的加快平均击穿电压的增速减慢。

对于浓度为 48.7% 和 71.2% 的混合液的平均击穿时间随充电电压的变化由图 4.21、图 4.22 给出。

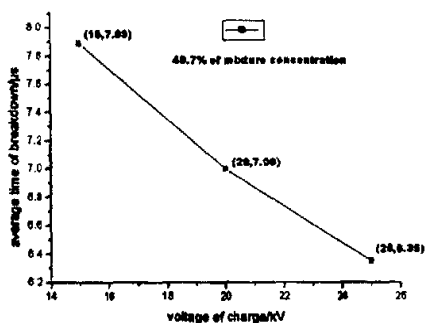


图 4.21 浓度为 48.7% 时击穿
时间随充电电压的变化

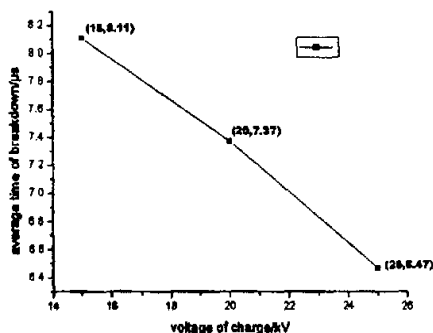


图 4.22 浓度为 71.2% 时击穿
时间随充电电压的变化

由图 4.21、图 4.22 可知：在相同的浓度下，充电电压越高混合液的击穿时间越短，即充电速度越快混合液将在更短的时间内击穿。如对于浓度为 48.7% 的混合液，在充电电压

为 25kV 时其平均击穿时间为 $6.35\mu\text{s}$ ，比充电电压为 15kV 及 20kV 时的平均击穿时间分别缩短 19.25%、9.29%；对于浓度为 71.2% 的混合液，在充电电压为 25kV 时其平均击穿时间为 $6.47\mu\text{s}$ ，比充电电压为 15kV 及 20kV 时的平均击穿时间分别缩短 20.22%、12.21%。由此可见：在相同的浓度下，充电速度越快则混合液在越短的时间内击穿。

在混合液浓度为 48.7%、71.2% 时有效时间随充电电压的变化分别示于图 4.23、图 4.24。

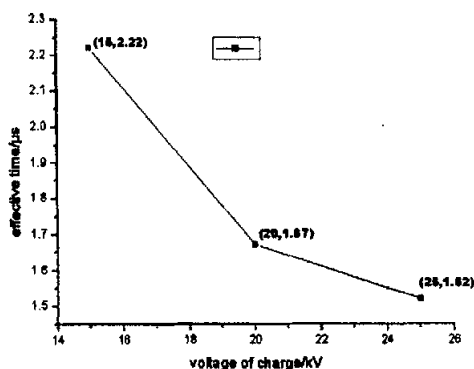


图 4.23 浓度为 48.7% 时有效时间随充电电压的变化

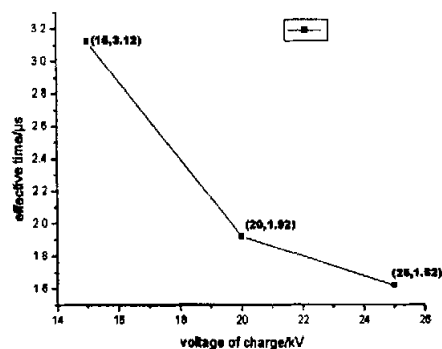


图 4.24 浓度为 71.2% 时有效时间随充电电压的变化

由图 4.23、图 4.24 可知：在相同的浓度下，充电速度越快，平均有效时间越短。如对于浓度为 48.7% 的混合液，在充电电压分别为 15kV、20kV、25kV 时平均有效时间分别为 $2.22\mu\text{s}$ 、 $1.67\mu\text{s}$ 、 $1.52\mu\text{s}$ ；对于浓度为 71.2% 的混合液，在充电电压分别为 15kV、20kV、25kV 时平均有效时间分别为 $3.12\mu\text{s}$ 、 $1.92\mu\text{s}$ 、 $1.62\mu\text{s}$ 。

在充电电压分别为 20kV、25kV 时，平均有效时间随浓度的变化由图 4.25、图 4.26 给出。

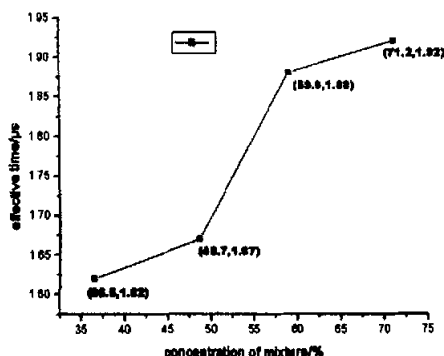


图 4.25 充电电压为 20kV 时有效时间随浓度的变化

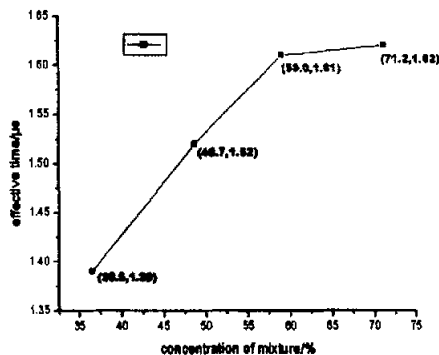


图 4.26 充电电压为 25kV 时有效时间随浓度的变化

由图 4.25、图 4.26 看出：在相同的充电电压下，随着浓度的增大，平均有效时间有所增大。如充电电压为 20kV 时，浓度为 71.2% 的混合液的平均有效时间为 $1.92\mu\text{s}$ ，比浓度为 59.0%、48.7%、36.5% 的混合液的平均有效时间分别延长 2.13%、14.97%、18.52%；充电电压为 25kV 时，浓度为 71.2% 的混合液的平均有效时间为 $1.62\mu\text{s}$ ，比浓度为 59.0%、48.7%、36.5% 的混合液的平均有效时间分别延长 0.62%、6.58%、16.55%。

图 4.27、图 4.28 分别给出了相对介电常数及电阻率随浓度的变化。

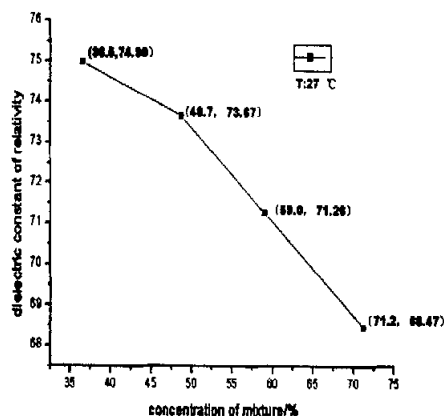


图 4.27 相对介电常数随浓度的变化

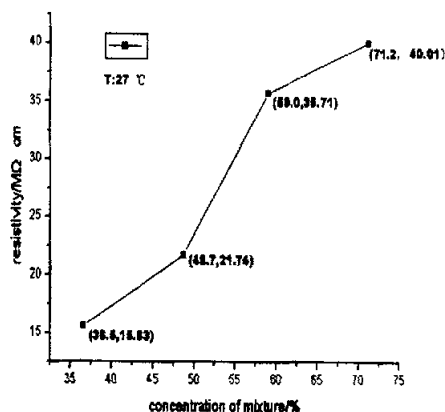


图 4.28 电阻率随浓度的变化

由图 4.27 可以看出：随着浓度的升高混合液的相对介电常数有所下降。当浓度为 59.0% 时混合液的相对介电常数为 71.26，比浓度为 48.7% 及 36.5% 的混合液的相对介电常数分别减小 3.27%、4.96%；当浓度为 71.2% 时混合液的相对介电常数为 68.47，比浓度为 59.0%、48.7% 及 36.5% 的混合液的相对介电常数分别减小 3.92%、7.06%、8.68%。可见，混合液中乙二醇的浓度越高混合液的相对介电常数越低，但随着混合液浓度的升高，混合液的相对介电常数下降不多。

同时由图 4.28 可知：混合液的电阻率随混合液浓度的升高而增大。浓度为 71.2% 的混合液的电阻率为 $40.01\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ，较浓度为 59.0% 的混合液的增大 12.04%，较浓度为 48.7% 的混合液的增大 84.04%，而比浓度为 36.5% 的混合液的电阻率增大了 1.5 倍。

由以上分析可知：去离子水/乙二醇混合液具有较高的击穿电压。随着浓度的增大，混合液的相对介电常数虽稍有下降，但混合液的击穿性能却有明显改善。同时充电速度也会影响混合液的击穿特性，充电速度越快，混合液的击穿电压越高，但在更短的时间内击穿。

§ 4.2.2 混合液停止循环后电性能的实验研究

以上实验我们均是在混合液保持循环的条件下进行的,混合液通过树脂循环后去除了其中绝大部分的残留离子。为了考察混合液中残留离子对混合液的电性能是否有较大的影响,我们将混合液停止循环并以浓度为 71.2% 的混合液作为绝缘介质,在充电电压为 20kV 下通过实验研究了混合液的击穿电压、相对介电常数及电阻率随时间的变化。

在混合液充分循环后(此时由 RLC 仪测得相对介电常数为 68.47,电阻率为 $40.01 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)停止循环,在此条件下进行充电电压为 20kV 的击穿实验。同时,我们通过 RLC 仪实时测量传输线的电容及电阻,以研究混合液的相对介电常数及电阻率随时间的变化。由实验得出浓度为 71.2% 的混合液的击穿电压、击穿时间、相对介电常数及电阻率随时间的变化如表 4.6 所示。

表 4.6 停止循环后混合液的击穿电压、击穿时间、
相对介电常数及电阻率对时间的变化

时 间		击穿电压 (kV)	击穿时间 (μs)	相对介电常数	电阻率($\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$)
循 环 后		267.94	7.37	68.47	40.01
停 止 循 环	15 分钟后	223.34	6.24	67.69	37.74
	45 分钟后	208.12	6.16	67.69	34.01
	90 分钟后	197.96	6.01	67.68	32.05
	150 分钟后	196.27	5.94	67.68	31.15
	450 分钟后	192.89	5.91	67.74	26.53
	720 分钟后	186.97	5.80	67.92	25.66
	1200 分钟后	189.71	5.86	68.01	24.81
	1800 分钟后	188.66	5.84	67.91	24.29
	2400 分钟后	184.43	5.79	67.67	24.27
	3000 分钟后	188.66	5.85	67.69	24.28

由表 4.6 可知:随着时间的推移,混合液的击穿电压、击穿时间及电阻率均有减小的趋势,如停止循环 720 分钟后的击穿电压、击穿时间及电阻率比停止循环 15 分钟后的分别降低 16.28%、7.05%、32.01%。但在停止循环 1200 分钟以后它们的变化均不大,如停止循环 3000 分钟后的击穿电压、击穿时间及电阻率比停止循环 1200 分钟后的仅分别降低

0.55%、0.17%、2.14%。由表 4.6 我们也注意到在停止循环后混合液的相对介电常数随时间的变化基本保持为一常数,如停止循环 15 分钟后的相对介电常数比保持循环时的仅降低 1.14%,此后相对介电常数几乎没有变化。

比较表 4.5 及表 4.6 可知将混合液停止循环后对其电性能产生了一定的影响,也即混合液中残留的离子使混合液的电性能有所降低。如浓度为 71.2% 的混合液在停止循环 15 分钟后的击穿电压、击穿时间、相对介电常数及电阻率比保持循环时的分别降低 16.65%、15.33%、1.14%、5.67%。可见混合液中残留的离子对混合液的电性能产生了较大的负面影响,它使击穿电压及电阻率下降较快,同时使击穿时间也有所降低,但对混合液的相对介电常数几乎没有影响。因此,只有让混合液持续不断地经过树脂的去离子处理,去除掉混合液中的残留离子才能使混合液保持较好的电性能。

§ 4.3 去离子水与混合液电性能的比较

本课题的目的在于考察去离子水中加入乙二醇后在解决低温下水介质结冰的问题的同时是否提高了水介质的击穿性能,因此有必要在实验研究的基础上将去离子水与混合液的电性能进行比较。图 4.29、图 4.30 分别给出了充电电压为 15kV、20kV 时,常温下去离子水与不同浓度的混合液的击穿电压波形的比较图。

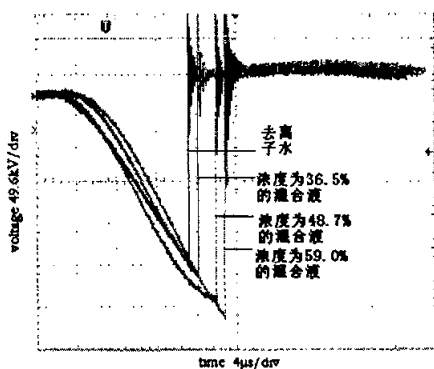


图 4.29 充电电压为 15kV 时去离子水与混合液的击穿电压波形比较

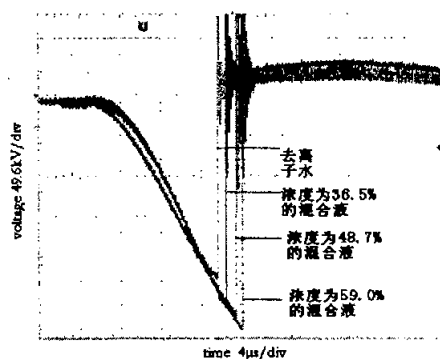


图 4.30 充电电压为 20kV 时去离子水与混合液的击穿电压波形比较

表 4.7、表 4.8 及表 4.9 分别给出了充电电压为 15kV、20kV、25kV 时去离子水与不同浓度混合液的击穿实验数据,表 4.10 给出了去离子水与不同浓度混合液相对介电常数和电阻率的实验数据。

表 4.7 充电电压为 15kV 时去离子水与不同浓度的混合液的击穿实验数据

	击穿电压 (kV)	击穿时间 (μ s)	有效时间 (μ s)
去离子水	177.74	7.23	1.91
浓度为 36.5% 的混合液	200.94	7.73	2.12
浓度为 48.7% 的混合液	238.11	7.89	2.22
浓度为 59.0% 的混合液	240.16	8.10	3.10
浓度为 71.2 的混合液	244.01	8.11	3.12

表 4.8 充电电压为 20kV 时去离子水与不同浓度的混合液的击穿实验数据

	击穿电压 (kV)	击穿时间 (μ s)	有效时间 (μ s)
去离子水	192.78	6.44	1.49
浓度为 36.5% 的混合液	214.18	6.67	1.62
浓度为 48.7% 的混合液	251.67	7.00	1.67
浓度为 59.0% 的混合液	260.63	7.31	1.88
浓度为 71.2 的混合液	267.94	7.37	1.92

表 4.9 充电电压为 25kV 时去离子水与不同浓度的混合液的击穿实验数据

	击穿电压 (kV)	击穿时间 (μ s)	有效时间 (μ s)
去离子水	204.74	5.77	1.28
浓度为 36.5% 的混合液	221.09	6.20	1.39
浓度为 48.7% 的混合液	268.36	6.35	1.52
浓度为 59.0% 的混合液	274.43	6.44	1.61
浓度为 71.2 的混合液	278.72	6.47	1.62

表 4.10 去离子水与不同浓度混合液相对介电常数和电阻率的实验数据

	相对介电常数	电阻率 ($M\Omega \cdot cm$)
去离子水	80.00	12.58
浓度为 36.5% 的混合液	74.98	15.63
浓度为 48.7% 的混合液	73.67	21.74
浓度为 59.0% 的混合液	71.26	35.71
浓度为 71.2 的混合液	68.47	40.01

在充电电压为 15kV、20kV 及 25kV 时，去离子水与不同浓度混合液平均击穿电压的比较分别如图 4.31、图 4.32、图 4.33 所示。

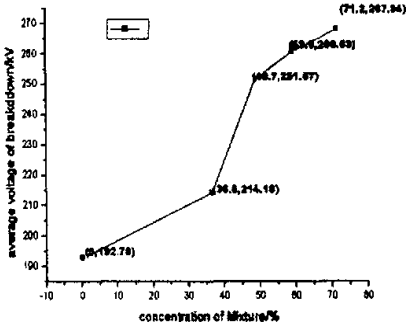


图 4.31 充电电压为 15kV 时去离子水与混合液的平均击穿电压的比较

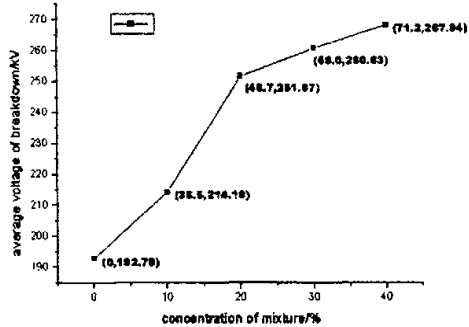


图 4.32 充电电压为 20kV 时去离子水与混合液平均击穿电压的比较

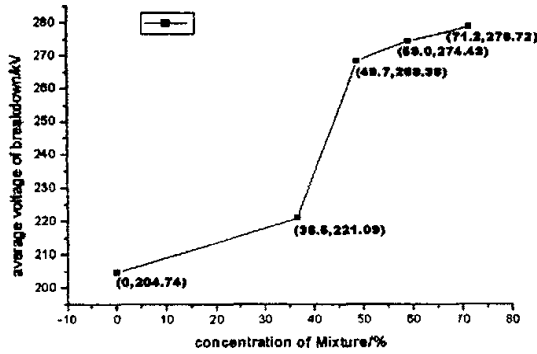


图 4.33 充电电压为 25kV 时去离子水与混合液的平均击穿电压的比较

由表 4.7、表 4.8、表 4.9 及图 4.31、图 4.32、图 4.33 可知：在相同的充电电压下，混合液的平均击穿电压较去离子水的平均击穿电压有明显提高，且随着浓度的升高，平均击穿电压提高的越明显。如在充电电压为 15kV 时，浓度为 48.7% 的混合液的平均击穿电压比去离子水的平均击穿电压提高 33.97%，浓度为 71.2% 的混合液的平均击穿电压比去离子水的平均击穿电压提高 37.28%；在充电电压为 25kV 时，浓度为 48.7% 的混合液的平均击穿电压比去离子水的平均击穿电压提高 31.07%，浓度为 71.2% 的混合液的平均击穿电压比去离子水的平均击穿电压提高 36.13%。由此可见，通过在混合液中加入乙二醇可以改善水介质的耐击穿性能，且浓度越高效果越明显。

在充电电压为 15kV、20kV 及 25kV 时, 去离子水与不同浓度混合液的平均击穿时间的比较分别如图 4.34、图 4.35、图 4.36 所示。

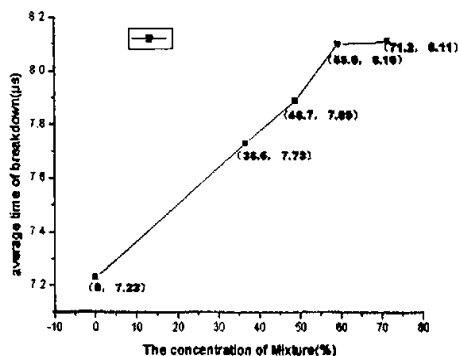


图 4.34 充电电压为 15kV 时去离子水与混合液平均击穿时间的比较

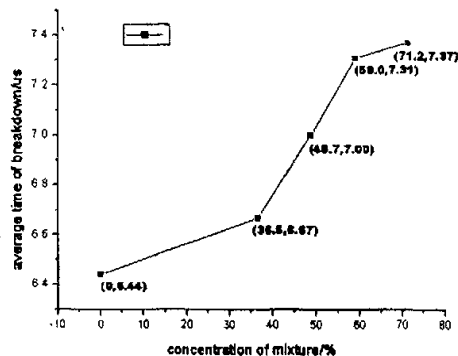


图 4.35 充电电压为 20kV 时去离子水与混合液的平均击穿时间的比较

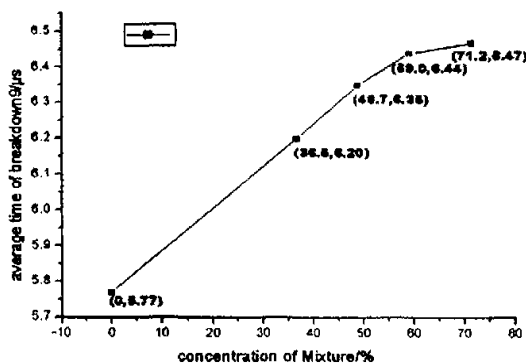


图 4.36 充电电压为 25kV 时去离子水与混合液平均击穿时间的比较

由表 4.7、表 4.8、表 4.9 及图 4.34、图 4.35、图 4.36 可以看出: 在相同的充电电压下, 混合液的平均击穿时间较去离子水的平均击穿时间有所延长, 也就是说, 在相同的充电电压下, 去离子水在更短的时间内击穿。如在充电电压为 15kV 时, 浓度为 48.7% 的混合液的平均击穿时间比去离子水的平均击穿时间提高 9.13%, 浓度为 71.2% 的混合液的平均击穿时间比去离子水的平均击穿时间提高 12.17%; 在充电电压为 25kV 时, 浓度为 48.7% 的混合液的平均击穿时间比去离子水的平均击穿时间提高 10.05%, 浓度为 71.2% 的混合液的平均击穿时间比去离子水的平均击穿时间提高 12.13%。可见, 通过在去离子水中加入乙二醇还可以延长水介质耐高电压的时间。

在充电电压为 20kV、25kV 时, 去离子水与不同浓度混合液的平均有效时间的比较分别如图 4.37、图 4.38 所示。

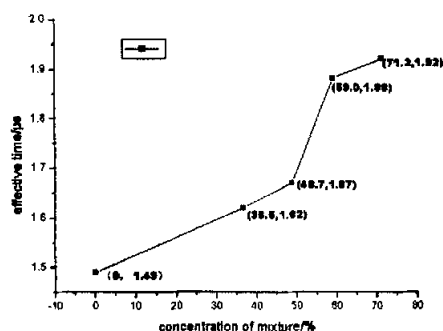


图 4.37 充电电压为 20kV 时去离子水与混合液的平均有效时间的比较

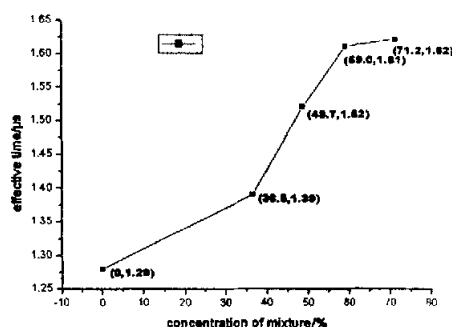


图 4.38 充电电压为 25kV 时去离子水与混合液平均有效时间的比较

由表 4.7、表 4.8、表 4.9 及图 4.37、图 4.38 可知: 混合液的平均有效时间大于去离子水的平均有效时间, 在相同充电电压下, 随着浓度的升高混合液的平均有效时间与去离子水的平均有效时间之间的差值增大, 如在充电电压为 20kV 时, 浓度为 48.7% 的混合液的平均有效时间比去离子水的平均有效时间延长 12.08%, 浓度为 71.2% 的混合液的平均有效时间比去离子水的平均有效时间延长 25.86%; 充电电压为 25kV 时, 浓度为 48.7% 的混合液的平均有效时间比去离子水的平均有效时间延长 18.75%, 浓度为 71.2% 的混合液的平均有效时间比去离子水的平均有效时间延长 26.56%。可见, 去离子水中加入乙二醇延长了水介质的有效时间。

去离子水与不同浓度混合液的相对介电常数及电阻率的比较可分别由图 4.39 及图 4.40 看出。

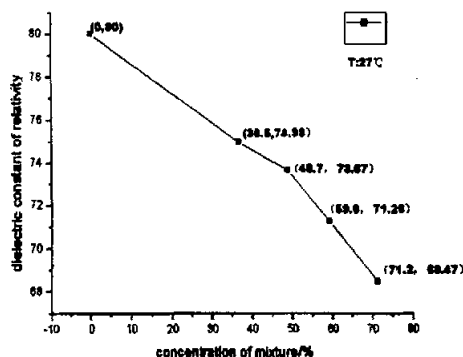


图 4.39 去离子水与混合液相对介电常数的比较

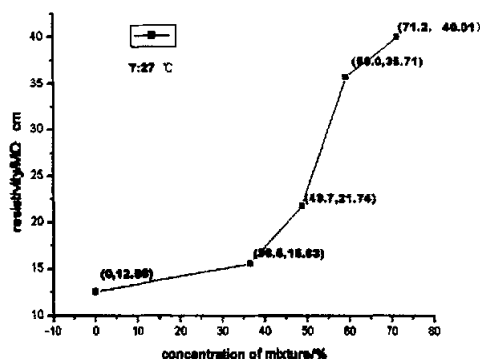


图 4.40 去离子水与混合液电阻率的比较

由表 4.10 及图 4.39 可以看出：由于乙二醇的加入，降低了水介质的相对介电常数，且随着乙二醇的浓度升高，相对介电常数下降得越多。如浓度为 36.5% 的混合液的相对介电常数为 74.98，比去离子水的相对介电常数降低 6.28%；而当浓度升到 71.2% 时，混合液的相对介电常数下降为 68.47，较去离子水的相对介电常数降低了 14.41%。

由表 4.10 及图 4.40 知：混合液的电阻率明显大于去离子水的电阻率，且随着浓度的升高混合液的电阻率上升很快。如去离子水的电阻率为 $12.58\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ，浓度为 36.5% 的混合液的电阻率为 $15.63\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ，较去离子水的电阻率提高 24.24%；当浓度升至 71.2% 时，混合液的电阻率比去离子水的提高了近两倍多。

由 J.C.Martin 的关系式：

$$E_{\max} \tau_{\text{eff}}^{1/3} = M/A^{1/10} \quad (40)$$

其中 $E_{\max}$ 为击穿场强， τ_{eff} 为有效时间， M 为一与绝缘介质特性及电极（如极性、形状等）有关的常数， A 为电极的有效面积（本实验中电极有效面积为 1780cm^2 ）。利用实验得到的击穿场强我们可以根据公式（40）计算出去离子水和各种浓度混合液的 M 值，具体数据如表 4.10 所示，其中 M 值均为平均值。去离子水和各种浓度混合液的 M 值的比较示于图 4.41。

表 4.11 去离子水和各种浓度混合液的 M 值

绝 缘 介 质	绝 缘 介 质 的 M 值
去离子水	0.283
浓度为 36.5% 的混合液	0.350
浓度为 48.7% 的混合液	0.398
浓度为 59.0% 的混合液	0.401
浓度为 71.2% 的混合液	0.415

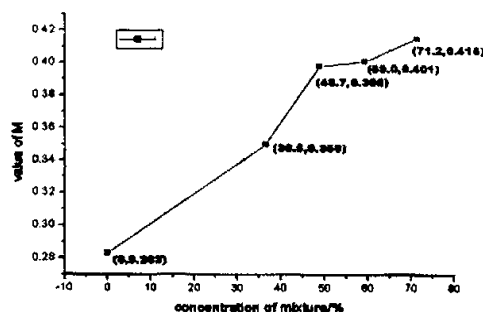


图 4.41 去离子水和各种浓度混合液 M 值的比较图

由表 4.11 及图 4.41 可以看出,混合液的 M 值较去离子水的要大,如浓度为 48.7%的混合液的 M 值较去离子水的 M 值大 40.62%,浓度为 71.2%的混合液的 M 值较去离子水的 M 值大 46.67%。随着混合液浓度的增大, M 值也增大,如浓度为 71.2%的混合液的 M 值比浓度为 48.7%的混合液的 M 值大 4.30%。

由以上去离子水与混合液的电性能的比较可知:在去离子水中加入乙二醇一方面提高了击穿电压、延长了击穿时间,另一方面又使水介质的相对介电常数有所降低。同时我们也可以看出,相对于加入乙二醇提高了击穿电压、延长了击穿时间而言,乙二醇使水介质的相对介电常数降低只是一个次要方面。去离子水中加入乙二醇虽然使相对介电常数稍有降低,但却明显提高了去离子水的击穿特性,提高了水介质的击穿电压,延长了击穿时间和有效时间,同时也使电阻率明显增大,总得来说加入乙二醇使水介质的电性能有了明显改善。同时,为了使混合液保持较好的电性能,我们必须让去离子水持续不断地经过树脂的去离子处理。

重写储能密度公式:

$$V=(1/2)\epsilon_0\epsilon_rE^2$$

由上式可知:储能密度与电场强度的二次方成正比,且正比与相对介电常数的一次方。由于乙二醇的加入使击穿电压即击穿场强得到明显提高,而相对介电常数仅稍有降低,而水介质的储能密度得以提高,为器件的进一步小型化创造了条件。

§ 4.4 混合液冰点及低温下电性能实验研究

去离子水在具有高相对介电常数的同时,还具有较高的冰点。因此当水介质调制器用于低温条件下时,将存在结冰的问题。有研究表明,乙二醇与水混合后可以降低水介质的冰点,随着乙二醇浓度的增加,其冰点持续下降。当乙二醇浓度达到 68%时,其冰点可达到-68℃。

乙二醇的冰点为-13℃,水的冰点是 0℃,为了验证去离子水中加入乙二醇可以使水介质的冰点降低,我们对浓度为 30%、50%及 70%的混合液进行了冰点实验。同时,低温下温度对混合液的相对介电常数及电阻率的影响也是我们所关心的,因此我们也研究了低温下混合液的相对介电常数及电阻率随温度变化的趋势。为此,我们制作了三个小电容器,它们分别以浓度为 30%、50%及 70%的混合液(混合液均经过循环)作为绝缘介质,通过

监测不同电容器内的混合液是否结冰，可以研究不同浓度混合液的冰点；通过测量电容器在不同温度下的电容值和电阻值，我们可以研究混合液的相对介电常数、电阻率及它们随温度变化的趋势。实验是在学校附近的一个冷库中进行，它能提供的最低温度约为-50℃。实验中，由于浓度为 30%、50%的混合液分别在-24℃及-39℃已结冰，不利于低温下混合液相对介电常数及电阻率的研究，因此我们选择浓度为 70%的混合液作为研究对象，因为该浓度的混合液在实验条件下始终未结冰。

将混合液循环好后进行冰点实验，实验数据如表 4.12 所示。

表 4.12 不同浓度混合液的冰点实验数据

浓 度	冰 点
30%	-24℃
50%	-39℃
70%	在实验条件下未结冰

由表 4.12 可以看出，去离子水中加入乙二醇后确实降低了水介质的冰点，而且随着混合液浓度的升高，水介质的冰点持续降低。

浓度为 70%的混合液的相对介电常数随温度变化的实验数据及相对介电常数随温度变化的示意图分别示于表 4.13 及图 4.42。

表 4.13 浓度为 70%的混合液相对介电常数随温度变化的实验数据

温 度	35℃	0℃	-10℃	-20℃	-30℃	-40℃	-45℃
相对介电常数	65.08	70.24	72.38	74.21	75.45	76.02	77.53

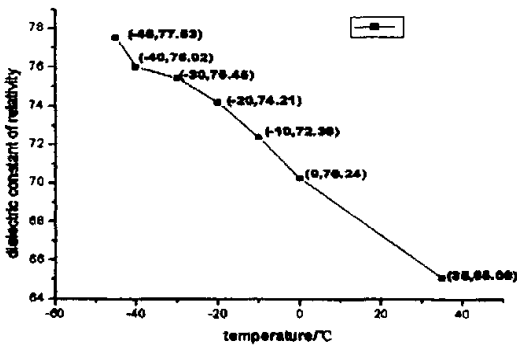


图 4.42 浓度为 70%的混合液的相对介电常数随温度变化示意图

由表 4.13 及图 4.42 可知：随着温度的降低，混合液的相对介电常数增大。对于浓度为 70% 的混合液，在温度为 -45°C 时相对介电常数约为 77.53，比温度为 0°C 时的相对介电常数增大 10.38%，比温度为 -20°C 时的相对介电常数增大 4.47%。可见，降低混合液的温度可以提高其相对介电常数。

浓度为 70% 的混合液的电阻率随温度变化的实验数据及电阻率随温度变化的示意图分别示于表 4.14 及图 4.43。

表 4.14 浓度为 70% 的混合液电阻率随温度变化的实验数据

温 度	35°C	0°C	-10°C	-20°C	-30°C	-40°C	-45°C
电阻率	37.68	39.21	40.36	41.89	42.27	43.01	43.16

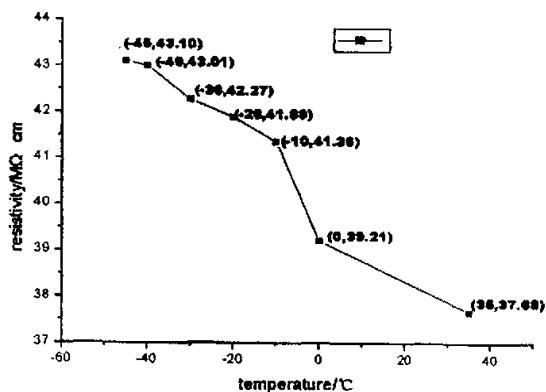


图 4.43 浓度为 70% 的混合液的电阻率随温度变化示意图

由表 4.14 及图 4.43 可知：混合液的电阻率随着温度的降低而增大。对于浓度为 70% 的混合液，在温度为 -45°C 时电阻率约为 43.10，比温度为 0°C 时的电阻率增大 9.92%，比温度为 -20°C 时的电阻率增大 2.89%。可见，降低混合液的温度可以提高其电阻率。

由以上实验可以看出：在去离子水中加入乙二醇确实降低了水介质的冰点，而且随浓度的升高水介质的冰点持续降低；同时，混合液的相对介电常数及电阻率均随温度的降低而增大。

§4.5 实验误差分析

在我们进行实验的过程中,许多主观或客观的因素均会给我们的实验带来一定的误差,造成实验数据具有一定的不确定度。

实验过程中我们所使用的示波器、RLC 仪及电导率仪本身存在测量精度的限制,同时在读数过程中存在读数误差。实验中所用分压器及衰减器均为水介质电阻,它们受环境的影响较大,同时在定标过程中也存在一定的误差。由于本实验的周期很长,因此实验环境(如温度)存在一定的变化,实验中我们所使用的分压器中采用了水电阻,温度对它的影响较大,同时温度的改变会影响水介质的电阻率,这些均会对实验造成一定的影响。水器件的充电电压波形为阻尼振荡波,水击穿电压是一个满足高斯分布的区域值,因而实验不能工作在电压幅度变化缓慢的充电条件下。

水介质发生击穿后,水介质同轴传输线的内筒外表面及外筒内表面均会产生毛刺。由于客观原因,我们不可能对每次击穿后的内筒外表面及外筒内表面进行打磨抛光处理,因此造成相同条件下实验数据存在一定的不确定度。

将(37)式对传输线的内筒外径 r_1 及外筒内径 r_2 进行微分得到:

$$dE(r) = \frac{U}{r \left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right)^2} \left(\frac{1}{r_2} dr_2 - \frac{1}{r_1} dr_1 \right) \quad (41)$$

由式(41)知:如果 r_1 、 r_2 两者之一或两者均发生了改变,内外筒间的场强将发生变化。如当 r_1 保持不变, r_2 改变 1mm 时,半径为 r 处的场强将变化约 4.97%。由于实验过程中我们在每进行 5 次击穿实验后便对内筒外表面及外筒内表面进打磨抛光处理,使 r_1 及 r_2 发生了细微改变,从而改变了内外筒间的场分布,由此也会给我们的实验引入误差。

根据实验数据我们得到:由于以上各种原因而给实验数据引入的不确定度约为 $\pm 9\%$ 。

第五章 主要结论及今后工作展望

去离子水的电性能实验研究表明：去离子水具有良好的耐高电压性能，随着充电速度的增大即充电时间的缩短，去离子水的击穿电压升高，同时击穿时间缩短即去离子水在高电压下的保持时间缩短。

不同浓度混合液的电性能实验研究表明：混合液具有很好的耐高电压性能，在相同浓度下，随着充电速度的增大即充电时间的缩短混合液的击穿电压升高，同时击穿时间缩短即去离子水在高电压下的保持时间缩短；在充电电压即充电速度相同时，混合液的击穿电压随浓度的增大而提高，击穿时间随浓度的增大而延长。同时，混合液的相对介电常数随浓度的增大而降低，而电阻率则随浓度的增大而变大。

通过混合液的低温实验看出：混合液的相对介电常数及电阻率均随温度的降低而增大；随浓度的增大，混合液的冰点持续降低。

通过比较去离子水和混合液的电性能，我们得出：在去离子水中加入乙二醇虽然使相对介电常数稍有降低，但却明显的提高了水介质的击穿电压和击穿时间，同时还增大了水介质的电阻率。另一方面，乙二醇的加入降低了水介质的冰点，从而解决了水介质在较低温度下结冰的问题。可见，在去离子水中加入乙二醇改善了水介质的电性能。

由于时间仓促，同时受实验条件所限，许多工作尚未完善，有待于进一步的研究。具体来说，主要有以下几个方面：

1. 由于实验条件所限，本课题对低温下混合液的研究仅限于研究了混合液在低温下的相对介电常数和电导率。在条件成熟时，有必要进一步进行低温下混合液的击穿实验，对混合液的电性能进行全面深入的研究。
2. 本课题仅对混合液的电性能进行了实验研究，对实验结果没有给出物理解释，探索水介质中加入乙二醇后击穿电压提高、相对介电常数下降的物理机制具有重要意义。
3. 本课题中去除混合液中残留离子采用了通过树脂循环的方法，不利于脉冲功率系统的进一步小型化。探索去除混合液中残留离子的新方法，以取代现有的采用树脂去除混合液中残留离子的方法，对于脉冲功率系统进一步小型化具有重要意义。

致 谢

首先感谢我的导师刘金亮高级工程师几年来的培养、关心及对论文工作的悉心指导，从论文的选题到实验数据的分析与讨论处处凝聚着导师的心血。刘老师渊博的知识、敏锐的洞察力、活跃的学术思想及严谨的学术作风给我留下了深刻的印象，并时刻鼓励着我崇尚科学、勇于创新，使我受益匪浅。

这里要特别感谢杨建华博士，课题的开展、实验的顺利进行及论文的修改均得到了杨博士的大力支持与帮助。感谢张自成同学，作者在实验过程中得到了他的大力协助，同时在课题的理论分析及实验方案的设计过程中得到了他许多有益的建议。

感谢实验室的谭启美高工、王勇老师、冯加怀、周相等实验室的工作人员，感谢他们为课题的顺利完成给予的大量无私帮助和辛勤劳动。

感谢 206 教研室的所有老师和同学，感谢他们在学习和生活中给予的热情帮助和支持。

最后要特别感谢我的家人，正是他们的理解、支持和奉献给予了我无穷的动力和战胜困难的勇气！

硕士期间发表论文

- [1] 蒲金飞, 刘金亮, 杨建华, “微秒级负充电时去离子水与乙二醇混合液电性能的实验研究”. 第九届高功率粒子束学术交流会, 2004.8
- [2] 蒲金飞, 刘金亮, 杨建华, “微秒级负充电时不同浓度去离子水与乙二醇混合液电性能的实验研究”. 强激光与粒子束 (已录用, 并定于年内发表).

参考文献

- [1] Abamyan, E. A., V. A. Kornilov, et al., "Megavolt Energy-Concentrating Device, " Soviet Physics - Doklady, Vol.16, No.11, pp.983, May, 1972.
- [2] Sincerny, P. S., "Electrical Breakdown Properties of Water for Repetitively Pulsed Burst Conditions, " Proceedings of the 3rd IEEE International Pulsed Power Conference, pp.222-225, June, 1981.
- [3] J. S. Mirza, C. W. Smith, and J. H. Calderwood, "Bubbles, Pressure and Pre-Breakdown in Insulating Liquid, " Proceedings of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids. 193, July, 1972.
- [4] A. Richard Miller, "High Energy Density, Low Impedence Capacitors Using Pressured Water as Dielectrics, " San Diego, California 92123, pp.471-473.
- [5] Fenneman, D. B., "Pulsed High-Voltage Dielectric Properties of Ethylene Glycol/Water Mixtures, " Journal of Applied Physics, Vol.53, No.12, pp.8961-8968, December, 1982.
- [6] 张世昌等, "乙二醇水混合物作为脉冲形成线绝缘介质的研究".高电压技术, 第 23 卷第 12 期, pp.13-15.
- [7] Ovchinnikov, I.T., and Yanshin, "Relaxation of Proton Conduction in water in strong Pulsed electric Fields " Soviet Physics-Technical Physics, Vol.19, No. 12, pp. 1431-1432, December, 1984
- [8] Magne Kristiansen, and Lynn L. Hatifield, "High Voltage Water Breakdown Studies, " Technical Report, Texas Tech University, Pulsed Power Lab, pp.51-53, January, 1998
- [9] Noyel, G. A, L. J. Jort, O. Deriche, and J. R. Huck, "Dielectric Properties of Normal Supercooled Water Obtained in Alcohol/Water Mixtures," IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, No.6, pp. 1136-1143, December, 1992.
- [10] Zahn, M., Y. Ohki, K. Rhoads, M. LaGasse, and H. Matsuzawa, "Electro-Optic Charge Injection and Transport Measurements in Highly Purified Water and Water/Ethylene Glycol Mixtures, " IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. BI-20, No.2,

pp.199-211, April, 1985.

- [11] Szklarczyk, M., R. C. Kainthla, and J. O' M. Bockris, "On the Dielectric Breakdown of Water: An Electrochemical Approach, " Journal of Electrochemical Society, Vol.136, No.9, pp.2512-2520, September, 1980.
- [12] Fenneman, D. B., and R. J. Gripshover, "Experiments on Electrical Breakdown in Water in the Microsecond Regime, " IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. PS-8, No. 3, pp.209-213, September, 1980.
- [13] Genman Jr., V. H., D.B. Fenneman, and R. J. Gripshover, "Electrode Surface Effects on Unipolar Charge Injection in Cooled Liquid Dielectric Mixtures, " Digest of Technical Papers – 4th IEEE Pulsed Power Conference, pp.316-322, June, 1983.
- [14] Mcleod, A. R., and V. H. Gehman, Jr., "Water Breakdown of Stainless Steel and Aluminum Alloys for Long-Charging Times, " Digest of Technical Papers – 6th IEEE Pulsed Power Conference, pp.57-59, 1987.
- [15] Kuzheckin, I. P., "Investigation of the Breakdown by Rectangular Voltage Pulses of a Liquid in an Inhomogenous Field, "Soviet Physics-Technical Physics, Vol, 11, No. 12, pp. 1585-1589, June, 1967.
- [16] Szklarczyk, M., R. C. Kainthla, and J. O' M. Bockris, "On the Dielectric Breakdown of Water: An Electrochemical Approach, " Journal of Electrochemical Society, Vol.136, No.9, pp.2512-2520, September, 1980.
- [17] Vorov'ev, V. V., V. A. Kapitonov, and E. P. Kruglyakov, "Increase of Dielectric Strength of Water in a System with 'Diffusion' Electrodes, " JETP Letters, Vol. 19, No. 2, pp.58-59, January, 1974.
- [18] Ovchinnikov, I. T., V., K. V. Yanshin, and E. V. Yanshin, "Use of the Kerr Effect to Study Pulsed Electric Field Near a Sharp Point in water, " Soviet Physics – Technical Physics, Vol. 23, No. 12, pp.1487-1489, December, 1978.
- [19] Buttram, M., and M. O'Malley, "Breakdown of Water Under Long Term Stress, " Digest of Technical Papers – 4th IEEE Pulsed Power Conference, pp.327-330, 1983.
- [20] Hasted, J. B., Water a Comprehensive Treatise, Volume 1, The Physics and Physical

- Chemistry of Water, Chapter 7,"Liquid Water: Dielectric Properties," Edited by Felix Franks, Plenum Press, New York, NY, pp.255-309,1972
- [21] Ovchinnikov, I. T., and E. V. Yanshin, "Relaxation of Proton Conduction in Water in Strong Pulsed Electric Fields, " Soviet Physics – Technical Physics, Vol. 29, No. 12, pp.1431-1432, December, 1984.
- [22] Ovchinnikov, I. T., V., K. V. Yanshin, and E. V. Yanshin, "Use of the Kerr Effect to Study Pulsed Electric Field Near a Sharp Point in water, " Soviet Physics – Technical Physics, Vol. 23, No. 12, pp.1487-1489, December, 1978.
- [23] Yanshin, E. V., S. M. Korobeynikov, I. T., Ovchinnikov, S. G. Sarin, K. V. Yanshin, V. M. Kopylov, and A. V. Klepikov, "Physical Processes Limiting the Pulse Energy Release in Liquid Dielectric, " Proc. Tenth IEEE Pulsed Power Conference, pp.574, June, 1995.
- [24] R. A. Eilbert and W. H. Lupton, "Extrapolation of AWRE Water Breakdown Data, " NRL Internal Report.
- [25] J. P. Vandevender, "Short pulse electrical breakdown strength of H₂O, " in Proc. Int. Pulsed Power Conf., Lubbock TX, Nov. 1976.
- [26] Fenneman, D. B., and R. J. Gripshover, "Experiments on Electrical Breakdown in Water in the Microsecond Regime, " IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. PS-8, No. 3, pp.209-213, September, 1980.
- [27] L.G. Kutsenko and A.V. Kortnev, "Pulse Breakdown in Aqueous Solutions of Lithium Chloride," Ukrainian Physics Journal 12(9),1490-1494(1967).
- [28] N.P. Mel'nikov, G.A. Ostroumov, and M.Yu stoyak, " The Development of an Electric Discharge in Aqueous Electrolytes," Soviet Physics Doklady 8(2), 176-1789(1963).
- [29] H.M. Jones and E.E.Kunhardt, " Prebreakdown Current in Water and Aqueous Solutions and their Influence on pulsed Dielectric Breakdown,"Journal of Applied Physics 78(5),3308-14(1995).
- [30] H.M. Jones and E.E.Kunhardt, "Development of Pulsed Dielectric Breakdown in

- Liquids,"Journal of Physics D 28(1),178-88(1995).
- [31] A.P.Alkhimov,V.V.Vorob'ev,V.F.Klimkin,A.G..Ponomarenko,and R.I.Solution,"The Development of Electric Discharge in water,"Soviet Physics.-Doklady 15(10),959-961(1991).
- [32] E.V.Yanshin,I.T.Ovchinnikov,and Yu.N.Vershinin,"Optical Study of Nanosecond Prebreakdown in water ,"Sov. Phys. Tech. Phys.18(10),1301-1306(1974).
- [33] E. J. Hart and M Anbar, "The Hydrated Electron, " Wiley – Interscience, New York, 1970.
- [34] J. Schnitker and P. J. Rossky, "Excess Electron Migration in Liquid Water, " J. Phys. Chem. 93, pp.6965-6969, 1989.
- [35] Y. P. Raizer, "Gas Discharge Physics, " Springer – Verlag, New York, 1991.
- [36] N. W. Albright and D. A. Tidman, "Ionizing Potential Waves and High Voltage Breakdown Streamers, " Phys. Fluids 15(1), pp.86-90, 1972.
- [37] Jones, H. M., and E. E. Kunhardt, "Monte Carlo Investigation of Electron-Impact Ionization in Liquid Xenon," Physical Review B,Vol.48, NO. 13, pp.9382-9387,October 1993.
- [38] Yanshin, E. V., I. T. Ovchinnikov, and Yu. N. Vershinin. "Optical Study of Nanosecond Prebreakdown Phenomena in Water, " Soviet Physics – Technical Physics, Vol. 18, No. 10, pp.1303-1306, April, 1974.
- [39] Yanshin, E. V., K. V Yanshin, S. M. Korobeynikov,"Space Charge and Pre-Breakdown Bubbles Formation Near Point Electrodes Under Pulse Voltage," Conference Record. Eighth International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, pp. 194-198,July, 1984.
- [40] Ovchinnikov, I. T., K. V. Yanshin, and E. V. Yanshin, "Investigating Prebreakdown Fields in Water by means of the Keer Effect," Soviet Physics-Technical Physics, Vol. 19, No. 2, pp. 294-295, August, 1974.
- [41] N. Agmon, "The Grotthuss mechanism, " Chemical Physics Letters 244, pp.456-462, 1995.