



全国大学生等离子体科技创新竞赛

——作品研究报告——

多板单介质阻挡放电污水处理装置

参赛学生：代浩东，贵浩，王佳阳，陈玺，陈宇，韩孟媛

指导教师：赵仲勇，何高辉

(西南大学，工程技术学院，重庆，400715)

作品简介

近年来，随着工业的快速发展，废水处理工艺成为全球关注的问题，但目前一些废水处理设备单一且功能不够丰富，污水处理工艺水平也有待提升。因此，开发大规模工业应用的废水处理工艺仍然是一项重大挑战。等离子体技术由于其快速的去除率和环境相容性，被认为是一种很有前途的废水处理技术。为了实现有机废水的自动化处理，设计了一种多板单介质阻挡放电污水处理装置，利用介质阻挡放电生成低温等离子体，最后通过水泵泵入 100mg/L 的亚甲基蓝溶液模拟废水进行实验效果验证。实验结果表明：本作品污水处理效果明显，处理 100 分钟时亚甲基蓝溶液的降解率可达 76.54%，因此可表明本作品具有处理效果彻底、处理过程自动化高、环保性强等特点，故可应用于推广应用于其他种类的有机废水的处理场景之中。

关键词：介质阻挡放电，有机废水，自动处理

联系人：代浩东，联系电话：18183454734，Email：1834889870@qq.com

1 研制背景及意义

1.1 有机废水污染及其降解意义

十九届五中全会提出：“生态文明建设实现新进步，污染物排放总量持续减少，持续改善环境质量，提高资源利用效率，环保与可持续发展的理念在深入我们每个人的意识当中。”有机污水处理作为与良好生态环境直接挂钩的一项，时刻影响着人们的生存与生活。“碳中和”、“碳达峰”作为 2021 全国两会最大的热点之一，在近期引发了社会各界的热议，成为整个社会关注的焦点。而经济便利的废水处理技术也对实现“双碳”目标，走好绿色发展之路具有一定指导性作用。

自改革开放以来，我国的工业化水平高速发展，但是在各个产业链高速发展的背景下，环境污染以及它的保护问题是国家相关部门避不开的话题^[1]。化工行业常被作为衡量一个国家工业化的程度，它的稳定发展必然离不开对工业废水的排放处理^[2]。而大量的工业废水排入环境致使污染日益严重，从而导致食品安全、动物保护和饮用水安全等一系列的民生问题^[3]。目前工业废水具有水量大、水质复杂多变、处理难度高、对环境破坏性大和处理导致二次污染等特征^[4]，它主要包括填埋库所产生的渗滤液、各车间(预处理车间、存储仓库等)所产生的冲洗废水及实验室废水等^[5]。而近几年有机废水被研究者认为是工业废水的重要组成部分之一，它的特点不同于传统的工业废水。有机废水的特点是含有大量种类复杂的有机物、金属离子含量较少和富含卤族元素较多。而根据有机废水的特点，传统的水处理工艺难以分类处理种类冗杂的有机物，在另一方面传统技术在处理卤族元素过程中不可避免会产生一系列的有毒有害物质^[6-8]。如果有机废水未经处理就排放大海，利用生态圈的自我调节能力进行处理，不仅需要的时间周期较长，而且在一定程度上直接危害了人体健康并且严重破坏生态平衡^[3, 5-7]。

综上，废水的处理成为当前相关领域科研工作者的研究热点之一且它的研究进展能促进以下 5 个方面：

(1)改善水质的质量，污水在经过处理后，水质从原来的污染情况通过一次次的过滤和消除，让水的污染程度大幅度下降，让水可以再一次使用。



全国大学生等离子体科技创新竞赛

——作品研究报告——

(2)有机废水的降解能使水资源合理使用,并且使上游地区的用水循环不影响下游水域的水体功能、社会循环不损害自然循环的客观规律,从而维系或恢复城市乃至流域的良好水环境,才是水资源可持续利用的有效途径。

(3)改善生态环境、提升城市品位和促进经济发展。因为如果污水不进行治理的话,势必将排放到河流中,这不仅会污染环境,更对人们的生活用水质量带来不利影响。

(4)促进水循环系统。水的自然循环是具有自组织结构的非平衡开放系统,水的社会循环是具有人工组织结构的平衡系统。

(5)保护建筑、工业以及其他设施。众所周知,水对金属设备和管道会产生严重的腐蚀,油田含油污水由于矿化度高,有溶解了不同程度的硫化氢、二氧化碳等酸性气体的溶解氧,这样的水处理和回注地层会对处理设施、回注系统产生腐蚀。

1.2 有机废水分解方式和研究现状

传统有机废水的处理方法有很多,包括物理法、化学法和生物法。例如,活性炭吸附法是最重要的物理方法之一。废水中的有机污染物被活性炭吸收。然而,吸附法存在饱和和二次污染的问题。微生物生物处理法也用于处理有机废水,但生物处理法的效率太低,不能用于处理大量废水。至于化学方法,化学成分比例的设定是困难的,这可能影响废水的处理效果。事实上,除了成本之外,处理效率和降解率是废水处理最重要的指标。上述方法不能同时满足处理效率和降解率的要求。因此,废水的处理目前仍需进一步研究,应提出一些新的废水处理方法。

而最近 20 年来,随着固态半导体技术的发展,高电压绝缘领域中的脉冲电压源的制造技术得到了突破性进展^[10],也因此造就了之前难以实现的高级氧化技术变得越发普遍。在高电压、高重复性、低下降沿时间的瞬态脉冲下,可在废水中发生大量的激发态粒子,使有机物矿化、电离、断键以及电解水而导致一系列自由基链式反应——这些现象使有机污染物降解成二氧化碳和水^[12-13]。等离子体技术相比于传统技术处理污水具有发生大规模链式反应的能力,因此它的普适性是远远高于传统技术的,大大减小在经济方面使用的成本,且它最重要的特点是没有产生和使用二次污染物。因此等离子体技术作为一种新型“电气工程+环境工程”的跨学科融合技术代替传统技术处理了日益复杂的有机废水,它得到了广泛的应用。因此基于放电等离子体的废水处理已经被许多专家所研究。

基于低温等离子体的有机废水处理技术根据放电方式的不同可分为脉冲电晕放电、介质阻挡放电、辉光放电。它们分别的国内为研究现状如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 高压脉冲等离子体技术研究现状

参考文献	研究对象	研究结果
Clements et al ^[14]	针板式反应器曝气状态和无曝气状态的预计穿现象	提高电压、增加脉冲宽度以及阳极极化可以增加流柱的长度,成功实现了水中蒽醒染料的降解脱色率达 80% 以上
Sharma et al ^[15]	考察不同放电形式对苯酚去除的影响	放电形式对苯酚的降解影响很大,火花放电下苯酚的去除率最大,流柱放电下次之电晕放电下苯酚的去除效果最差



全国大学生等离子体科技创新竞赛

——作品研究报告——

Willbreg et al[16]	采用脉中电晕放电对水中的氯酚、二氯苯胺和 TNT 进行降解	结果表明:在 7min 后,约 200 次的高能放电,使这几种有机物的去除率达到 99%
Mizuno et al[17]	去离子水和 NaCl 溶液中进行液电脉中放电杀菌的实验研究	细菌的存活率与电压、脉冲宽度、脉冲放电次数有关
李书杰等[18]	研究了液电效应污水的杀菌净化作用发现两环放电反应	发现所产生的强压力冲击波、强紫外光具有很强的杀菌作用
徐正等[19]	研究了液中放电处理 TNT 废水的可行性及其能量效率关系	认为高压液下放电能较好去除 TNT 废水,并且能效较高

表 2 介质阻挡放电技术研究现状

参考文献	研究对象	研究结果
刘锡三等[8]	对靛蓝胭脂红染料进行了脱色试验	发现当气隙为 30 mm, 电压为 30 kV, 处理时间为 18 min 时, 染料溶液的脱色率可达 95% 以上。
Kui H et al[6]	处理酸性红 27 和橙 2 模拟废水, 研究了降解机理、反应条件和反应动力学	放电功率对降解率有很大影响, 因为它影响 O ₃ 的形成和紫外光强度。当处理初始浓度为 50 毫克/升的酸性红 27 时, 降解能耗为 0.654KJ/mg
Holzer F et al[7]	一种由三个平行同轴单元组成的反应器, 在实验室水平上具有交流电压输入	在实验室水平上具有交流电压输入。在输入功率为 115 瓦、水流量为 150mg / min、初始浓度为 20mg / L 的条件下, 处理 6 分钟后, 2-氯酚、4-氯酚和 2,6-二氯苯酚的去除率分别为 90.7%, 85.4% 和 64.6%

表 3 辉光放电技术研究现状

参考文献	研究对象	研究结果
文岳中等[20]	辉光放电等离子体技术处理曙红 B 模拟印染废水	曙红 B 可降解为 CO ₂ 、和简单无机盐。降解 110 min 后, 脱色率可达 95% 以上, 溶液的酸碱度降低, 说明降解过程中产生了羧酸类物质。动力学常数为 0.0206 min ⁻¹ , 符合一级反应动力学特征

Yan et al[4]

放电等离子体技术降解结晶紫

提高电解液浓度和电压可以提高效果。当溶液中加入浓度为 0.4 mol/L 的 Fe_2 时,5min 后结晶紫的脱色率可 13.64% 提高到 91.36% 在最佳实验条件下, 40min 内脱色率为 93% 降解率为 74%

Hidenori et al[3]

辉光放电等离子体技术降解橙 G 染料废水

溶液中无催化剂 60 min 后,橙 G 的降解率为 71.68% 当 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 存在时, 降解率分别为 92.48% 和 89.69% 化学需氧量去除率分别为 95.85% 和 63.44%

2 研究方案及实现过程

2.1 系统设计概述

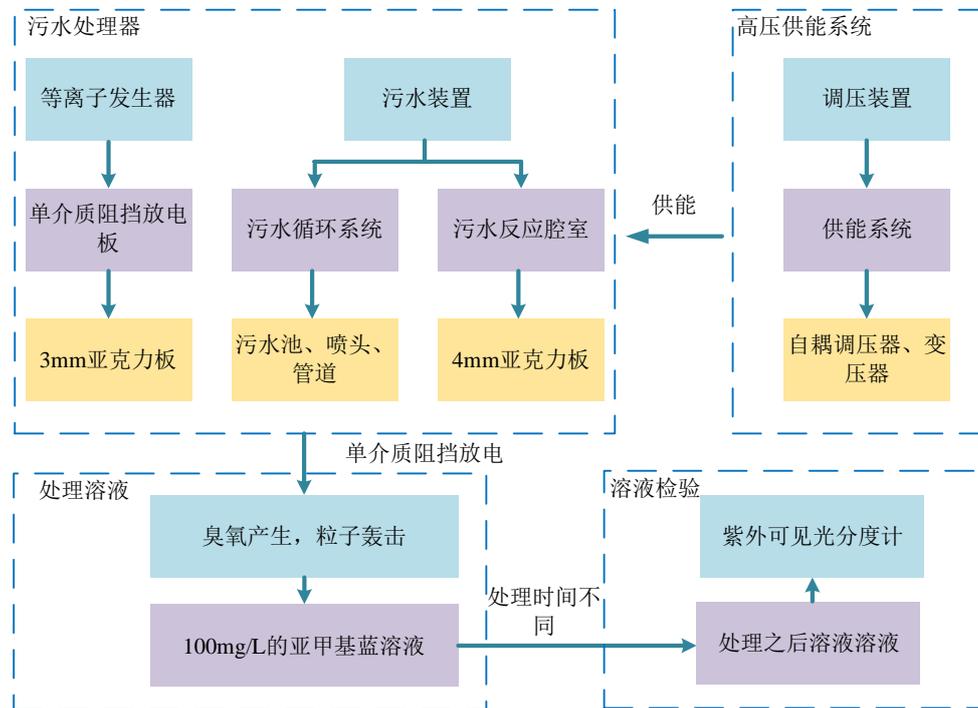


图 1 系统结构图

本作品总体系统设计方案如图 1 所示, 本装置采用介质阻挡放电技术, 利用低温等离子体生成强氧化物, 进而与亚甲基蓝溶液进行化学反应将其降解。

系统主要包括: 自耦调压器、变压器、污水处理器, 其中污水处理器由等离子体发生器、污水循环系统以及污水反应腔室组成, 等离子体发生器由单介质阻挡放电室构成, 污水循环系统又由污水池、12V 水泵、直径 5mm 的 PVC 进水管、直径 8mm 的 PVC 排水管和喷头所构成, 污水反应腔室则由 4mm 亚克力板组成。

污水处理的具体过程为: 由自耦调压器及变压器输入高压到等离子发生器中, 利用单介质阻挡放电产生强氧化物自由基包括: $OH\cdot$ 、 O_3 、 $HO_2\cdot$ 、 $HO_3\cdot$ 、 O_2 等, 再将待处理污水由水泵经进水管从喷头喷入污水反应腔进行处理, 再通过排水口流回污水池, 从而实现污水的循环处理。



全国大学生等离子体科技创新竞赛

——作品研究报告——

2.2 介质阻挡放电的原理和实现方法

(1) 介质阻挡放电的原理

介质阻挡放电又称为无声放电，其结构是在两电极中间插入绝缘介质(或在高压电极覆盖绝缘介质，或在两电极中间放置绝缘介质，或在两电极上都覆盖绝缘介质)，当在两电极施加足够高的交流或脉冲电压，高压形成的强电场首先使气隙中的自由电子加速，当电场足够强时，足够多的自由电子被加速到一定速度并且有足够的平均自由行程，就会引起碰撞电离，在气隙中放电产生大量的高能电子、离子、活性基和激发态分子等极高化学成分的粒子，这些足够高的能量使得其他分子激发、电离和离解，发生一系列的化学反应^[21]。

(2) 实现方法

本作品采用 3mm 的亚克力板作为绝缘介质，其相对介电常数 ϵ 为 3.5，长宽分别为 198mm、100mm 中心贴有铝箔制作的圆角电极，高压电极和低压电极之间由一块亚克力板和气隙组成，即为单介质阻挡放电，共组成 9 个并排的放电反应室，电源采用 MLTC-50/20 输出 50Hz 连续可调的高压交流电。通过电源在电极对之间输入 18kV 的 50Hz 高压交流电实现单介质阻挡放电，从而生成低温等离子体。

3 研究结果与分析

3.1 工作时间对溶液中的亚甲基蓝降解率的影响规律

为了确定本作品的工作效率，考察亚甲基蓝降解率随工作时间的变化规律，首先配制 100mg/L 的亚甲基蓝纯溶液作为待处理污水源，然后开启系统开始工作，并且每工作 20min 取样一次，一共取样 5 组，利用双光束紫外可见分光光度计 TU-1901 进行样本测量。

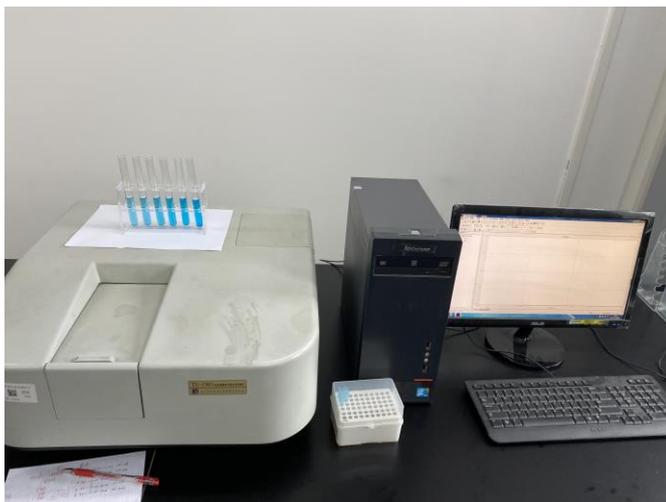


图 2 TU-1901 样本检测

将样本按照 16 倍等比例稀释后得到 TU-1901 的测试样本，然后依次进行测量，将结果分组保存于计算机中。样本吸光度的对照图如图 3 所示。

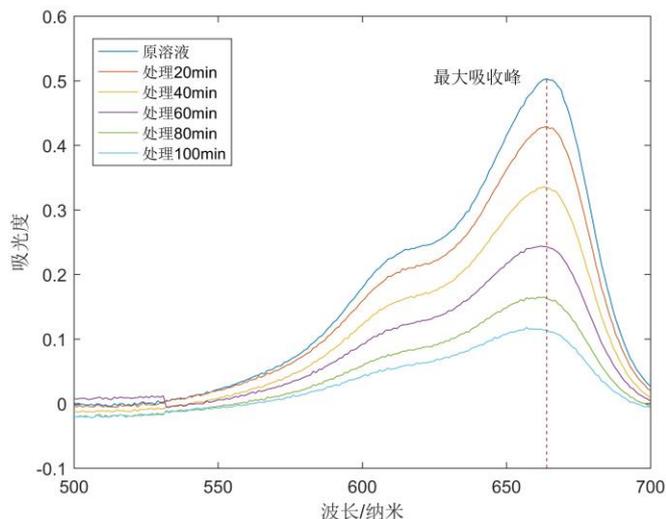


图 3 样品吸光度对比图

图 3 中最大吸收峰所对应的波长为 664nm 即为亚甲基蓝的紫外吸收波长。由此可见，亚甲基蓝的最大吸光度随着处理时间的增加逐渐下降，利用 TU-1901 所测数据计算得到实际样本的亚甲基蓝降解率和溶液浓度置于表 4 中。

表 4 亚甲基蓝浓度和降解率对照表

时间/min	0	20	40	60	80	100
最大吸光度	0.503	0.429	0.336	0.244	0.165	0.118
浓度/mg·L ⁻¹	100.000	85.288	66.799	48.509	32.803	23.459
降解率/%	0	14.71	33.20	51.49	67.20	76.54

由表 4 可知，在处理时间达到 100 分钟之后，溶液中的亚甲基蓝浓度显著降低，从原溶液的 100mg/L 降至 23.459mg/L。利用已知数据对期望浓度曲线进行线性回归拟合，如图 4 所示。由图 4 可知，预计在时间达到 120 分钟之后，亚甲基蓝的浓度低至 5% 以内。

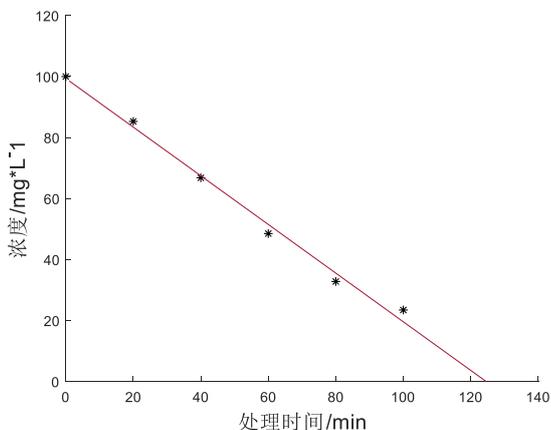


图 4 期望浓度变化曲线

4 作品创新及特色



全国大学生等离子体科技创新竞赛

——作品研究报告——

(1) 模拟污水处理过程，并实现了污水自动化处理。污水通过喷口形成污水雾从而与反应腔中的强氧化物反应模拟污水厂处理过程，实现污水的循环处理，提高处理效率。并且只需在污水池中倒入污水，并给系统提供正常工作电压即可实现污水处理过程，不需要额外提供处理剂。

(2) 采用多板（电极）介质阻挡放电，降解率高，无二次产物。污水经过本装置处理之后，由于强氧化物的作用，将使之彻底分解为无污染的无机小分子化合物。相比于利用化学试剂反应处理方法，此方法降解效果更好，更没有二次污染物产生。

5 应用前景及分析

5.1 效果及推广

本作品利用介质阻挡放电产生低温等离子体，从而生成强氧化物来进行污水的处理。实验结果表明：污水处理效果明显且无任何二次污染物产生，对于工业处理废水具有一定的指导性意义；虽然本实验只对亚甲基蓝溶液进行了实验处理，但是对于像亚甲基蓝一样具有还原性的有机废水都具有推广意义。并且本作品具有处理效果彻底、处理过程自动化高等特点，故可应用于印染厂、食品加工厂、皮革厂、造纸厂等排放大量有机废水的场合之中。综上所述，此项技术完全有大规模运用于工业的潜力，并且有利于“双碳”中和目标的实现。同时，本装置针对生物法难降解的有机废水具有良好的处理效果，故可推广至有害或难以生物降解的有机废水的处理环节之中^[19]。

参考文献

- [1] Chung, K. T., Stevens, et al. Degradation of azo dyes by environmental microorganisms and helminths[J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 1993.
- [2] Yan K, Hui H, Cui M, et al. Corona induced non-thermal plasmas: fundamental study and industrial applications[J]. JOURNAL OF ELECTROSTATICS, 1998.
- [3] Hidenori A, ヒデノリ アキヤマ, 秀典 秋山. Streamer discharges in liquids and their applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5):646-653.
- [4] Yan W. Research on wastewater treatment using pulsed high voltage[J]. Techniques and Equipment For Enviro.poll.cont, 2002.
- [5] Hoeben W, Veldhuizen E, Rutgers W R, et al. The degradation of aqueous phenol solutions by pulsed positive corona discharges[J]. Plasma Source Sci Tech, 2000, 9(3):361.
- [6] Kui H, Koprivanac N, Locke B R. Decomposition of phenol by hybrid gas/liquid electrical discharge reactors with zeolite catalysts[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 125(1-3):190-200.
- [7] Holzer F, Locke B R. Multistage Gas/Liquid Electrical Discharge Column Reactor For Advanced Oxidation Processes[J]. Ind.eng.chem.res, 2008, 47(7):2203-2212.
- [8] 刘锡三.高功率脉冲技术[M].北京：国防工业出版社，2005.
- [9] 李正瀛.脉冲功率技术[M].北京：北京电力出版社，2005.
- [10] D. Wang, J. Qiu and K. Liu, All-Solid-State Repetitive Pulsed-Power Generator Using IGBT and Magnetic Compression Switches,[J].IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(10): 2633-2638.
- [11] Wang H J, Jie L I, Quan X. Decoloration of Acid Orange 7 Dye Aqueous Solution by a Multi-Needle-to-Plate High Voltage Pulsed Discharge Plasma System[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2005.
- [12] Xu H, Yang W, Zhou J, et al. Treatment of Wastewater from Azo Dye Production by Electrolysis[J]. ENVIRONMENTAL PROTECTION OF CHEMICAL INDUSTRY, 1999.
- [13] Li S. The Experimental Study on Decolorization of Dye Wastewater with Pulse Corona Discharge[J]. CHINESE JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE, 1996.
- [14] Clements J S, Sato M, Davis R H. Preliminary Investigation of Prebreakdown Phenomena and Chemical Reactions Using a Pulsed High-Voltage Discharge in Water[J]. IEEE Trans.ind.appl, 1987, 23(2):224-235.
- [15] Sharma A K, Locke B R, Arce P, et al. A Preliminary Study of Pulsed Streamer Corona Discharge for the Degradation of Phenol in Aqueous Solutions[J]. Haz.waste Haz.mater, 1993, 10(2):209-219.
- [16] Willberg D. M, Lang P S, Hoechemer R H, et al. Degradation of 4-Chlorophenol, 3,4-Dichloroaniline, and 2,4,6-Trinitrotoluene in an Electrohydraulic Discharge Reactor[J]. Environ.sci.technol, 1996, 30(8):2526-2534.
- [17] Mizuno A, Hori Y. Destruction of living cells by pulsed high-voltage application[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1988, 24(3):387-394.



全国大学生等离子体科技创新竞赛

——作品研究报告——

- [18] 李树杰, 张毅. 液电效应处理污水的实验研究[J]. 中国微生态学杂志, 1996(01):63-64.
- [19] 许正, 夏连胜, 刘晓春. 脉冲等离子技术降解 TNT 初步研究[J]. 火炸药学报, 1999, 22(4):57-59+56.
- [20] 文岳中, 姜玄珍, 吴墨. 高压脉冲放电降解水中苯乙酮的研究[J]. 中国环境科学, 1999, 19(005):406-409.
- [21] 石峰, 王昊. 气体放电等离子体及应用的研究进展[J]. 真空与低温, 2018, 24(2): 80-85.

作品附件

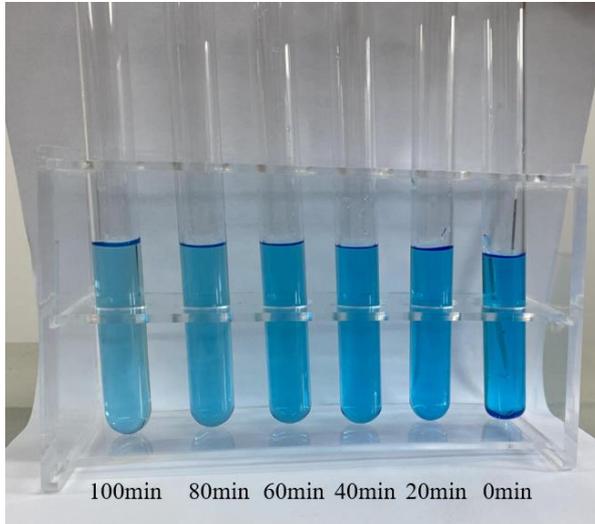


图 4 溶液处理图



图 5 单介质放电板结构图

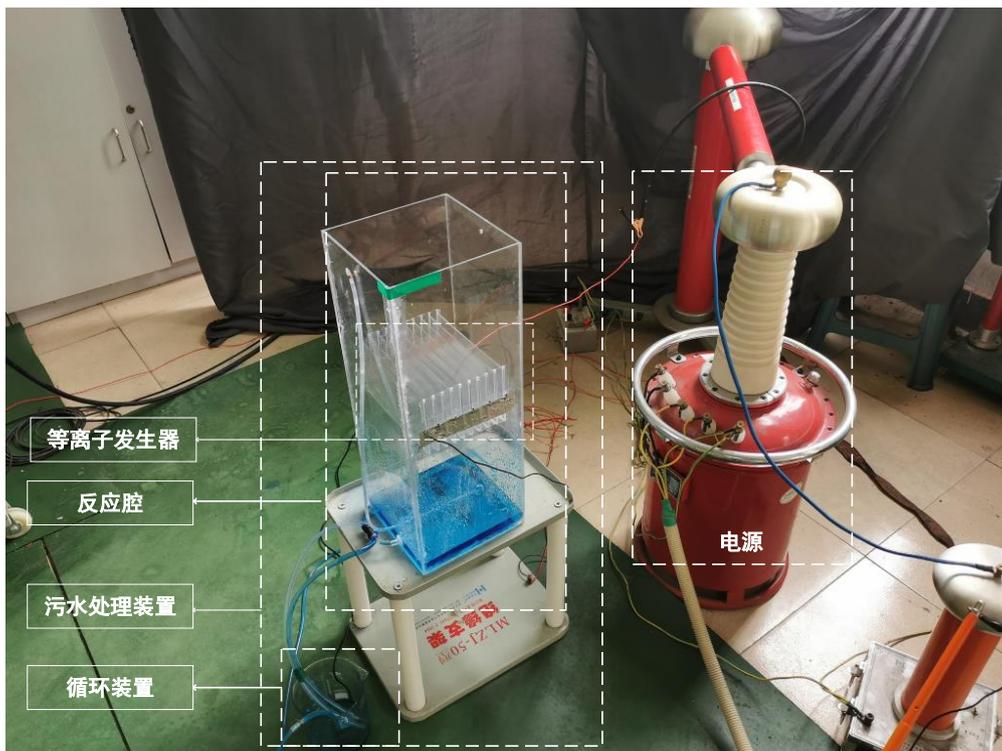


图 6 装置结构图