

## 环境保护中高压脉冲等离子体技术的应用

谢瑞, 刘军, 李武华, 何湘宁

浙江大学电气工程学院, 浙江杭州 310027  
E-mail: zxrd@zju.edu.cn

**摘要:** 高压脉冲等离子体技术在环境工程方面得到了广泛地应用。本文介绍了高压脉冲功率装置的基本构成和国内外脉冲功率技术的研究现状和发展方向, 列举了非平衡态等离子体的特性, 并且通过具体分析高压脉冲等离子体技术在高压除尘和有机废水处理方面的反应机理, 总结出高压脉冲等离子体技术在环境工程具备的优势和重大实际意义。

**关键词:** 脉冲功率技术, 低温等离子体技术, 环境保护, 高压除尘, 废水处理

## HV Pulsed Plasma Technology in Environmental Applications

XIE Rui, LIU Jun, LI Wuhua, HE Xiangning

College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P.R.China  
E-mail: zxrd@zju.edu.cn

**Abstract:** High voltage pulsed plasma technology has been widely used in the environmental engineering applications in recent years. The newest research results and the latest development directions of the pulsed power technology are described in this paper. The characteristics of the non-thermal equilibrium plasma are also listed. Through the analysis of the high-voltage electrostatic precipitator and the organic wastewater treatment with the HV pulsed plasma technology, its advantages in the environmental engineering are summarized.

**Key Words:** Pulsed Power, Non-thermal Equilibrium Plasma, Environmental Protection, High-voltage Electrostatic Precipitator, wastewater treatment

### 1 引言(Introduction)

近年来, 可持续发展成为世界各国研究的热点问题; 只有正确处理和协调经济增长、社会发展和环境保护三者之间的关系, 人类文明才能健康持续地发展。我国现阶段环境形势较为严峻, 长期积累的环境问题尚未解决, 新污染源的出现使生存环境进一步恶化; 环境污染严重已经成为我国经济社会发展中凸显的“四大矛盾”之一<sup>[1]</sup>。

电力电子技术是一门涉及功率变换技术、电工电子技术、自动控制理论等多学科的应用性交叉学科技术<sup>[2]</sup>。等离子体技术是在物理学, 化学, 真空技术, 微观电子学基础上发展起来的新兴交叉学科技术。而电力电子技术中的高压脉冲功率技术, 是产生非平衡态等离子体(低温等离子体)最为常见高效的手段。近年来, 高压脉冲等离子体技术开始广泛应用于静电除尘, 废水废气处理、杀菌消毒等领域。由于具有清洁、高效、节能、无二次污染等优点, 高压脉冲等离子体技术在环境工程中的应用也越来越广泛。

### 2 高压脉冲等离子体技术概述(Summary of the HV Pulsed Plasma)

#### 2.1 脉冲功率技术的构成及发展现状(Composition and Development of the Pulsed Power Technology)

脉冲功率技术其实质是将脉冲能量在时间上进行压缩, 获得较短时间内高峰值功率输出的一种电物理技术<sup>[3]</sup>。它是一门针对强流相对性电子束或离子束研究的新兴科学技术学科, 在其数十年的发展过程中, 广泛应用于高新技术研究, 国防科研和民用工业等众多领域<sup>[4]</sup>。

如图1所示, 脉冲功率装置包括初级能源, 中间储能和脉冲成形系统, 转换系统以及负载, 而高功率脉冲电源是为脉冲功率装置的负载提供电能的装置, 是构成脉冲功率装置的主体<sup>[3]</sup>。



图1 脉冲功率装置

高功率脉冲电源主要由三个部分构成。

1. 初级能源。初级能源种类繁多,按照储能方式的不同主要包括:以电场形式储能的电容器、利用磁场储能电感或者脉冲变压器、具有一定转动惯量的各类机械能发电机、化学能装置、核能装置等。
2. 中间储能和脉冲形成系统。这个系统除了具有储能和成形脉冲的作用之外,有些时候还能起到能量转换的作用。目前常用的储能和脉冲形成系统有:脉冲变压器、脉冲形成线、磁通压缩器(磁放大器)、磁流体发电机的通道发电系统、以及使用机械能的感应发电系统等。
3. 转换系统。它包括了电源内各种转换开关(主要分为闭合开关和断路开关两类)。各种开关根据其应用方式不同可以分布在脉冲电源的不同位置。

就一般情况而言,高功率脉冲电源的工作过程简述如下:首先将能量储存于初级能源,而后通过中间储能和脉冲形成系统充电,最后经过压缩、脉冲成形或转化等过程后,快速放电给负载。

早在上世纪三十年代,人们就开始尝试使用电容放电产生X射线,这就是功率脉冲技术的起源<sup>[5]</sup>。20世纪40~50年代,阿尔芬,布德凯尔等人提出了高功率脉冲技术,即强流相对性粒子束(Intense Relativistic Particle Beam)的概念<sup>[6]</sup>。1964年,在英国原子武器研究中心的马丁(J. C. Martin)和他的研究小组的不懈努力下,世界上第一台强流相对论性电子束加速器SMOG(3MV,50KA,30ns)研制成功<sup>[7]</sup>。

1972年在美国陆军亨利·台蒙实验室(Hary Diamond Lab.)建成了Aurora模拟器装置,由四台Marx发生器(95级60kV电容器)组成,管电压和管电流分别为14MV和1.6MA,脉宽120ns,效率50%,最大输出功率达到24TW,成本低于10美元/J,成为脉冲功率史上的一个里程碑<sup>[8,9]</sup>。Sandia实验室在1986年1月研制出电压12MV,电流8.4MA,脉宽40ns,能量4.3MJ的脉冲功率装置PBFA-II,这是世界上第一个闯过100TW大关的脉冲功率装置,成为脉冲功率发展史上又一个重要的里程碑<sup>[10,11]</sup>。

除了美国之外,许多国家在脉冲功率装置的研究方面也取得了进展。日本的脉冲功率装置比较有名的有大阪大学的Raiden-IV<sup>[12]</sup>和长岗技术大学1986年建成的ETIGO-II(3MV,400kA,60ns)<sup>[13]</sup>。前苏联建造了许多大型Marx-Blumlein形成线的联合装置,其中典型代表有1985年前苏联原子能研究所建成的Angara5装置(2MV,40MA,90ns)<sup>[14]</sup>和试验物理所的LIU-10M装置<sup>[15]</sup>。而法国原子能委员会建成的Thalie<sup>[16]</sup>和AIRIX装置<sup>[17]</sup>,德国国家核研究中心研制的KAKTUS装置<sup>[18]</sup>,英国的SWARF装置<sup>[19]</sup>,对于

脉冲功率技术的发展,都具有一定的实际意义。

20世纪70年代,在王淦昌教授的领导下,我国的高功率脉冲技术研究正式展开。1971年末,北京高能物理所利用冲击电压发生器和自制油介质Blumlein传输线的500kV装置,首次进行了传输线技术的起步研究,并于1979年建成了当时我国最大的强流脉冲电子束加速器闪光-I,应用于 $\gamma$ 射线模拟源<sup>[20]</sup>。于此同时,中国原子能科学研究院、中国科学院电子研究所和长沙国防科技大学的相继建成了兆伏电压,百千安电流水介质装置。一系列强流脉冲电子束加速器的建成<sup>[21,22]</sup>,为我国在集体离子加速,准分子激光,电磁轨道炮,闪光X射线照相,抗核加固,高功率微波等高新技术领域的研究创造了较好的条件。近年来,中国工程物理研究院应用电子学研究所,核工业西南物理研究院,中国原子能科学研究院核物理研究所,西北核技术研究院等单位对脉冲功率技术有着较为深入的研究,并且取得了一定的成果,为我国功率脉冲研究作出了巨大贡献。

现阶段高功率脉冲电源主要的发展热点主要有:提高储能元件的储能密度<sup>[23,24]</sup>;大功率转换开关的研制<sup>[25]</sup>;功率脉冲技术的高频化、多样化、小型化和低成本化<sup>[26]</sup>;Z-箍缩(Z-pinch)<sup>[27]</sup>和多电平技术在超高功率输出脉冲技术上的应用等等。

## 2.2 等离子体的分类及其主要应用(Classification and Applications of the Plasma Technology)

等离子体是由大量正负带电粒子和中性粒子组成的并表现出集体行为的一种中性气体<sup>[28]</sup>,它具有独特的物理化学特性:导电率很高,粒子动能大,化学性质活泼,易反应;有发光特性等,以上的这些特性使等离子体在某些领域具备独特的应用优势。

按照热力学平衡分类,一般将等离子体分为高温等离子体(Complete Thermal Equilibrium Plasma)、热等离子体(Local Thermal Equilibrium Plasma)和低温等离子体(Non-Thermal Equilibrium Plasma)三类<sup>[29,30]</sup>。其中低温等离子体又称为非热力学平衡等离子体,其中的电子温度可以达到 $10^4\text{K}$ 以上,而离子和中性粒子的温度只有300K~500K左右<sup>[31-32]</sup>,从而形成热力学上的非平衡性。由于低温等离子体的系统温度比较低,一般应用于处理熔点较低的物体,如半导体刻蚀,材料表面改性,纺织领域等,同时也可以使用在废气污水处理,臭氧发生等场合<sup>[33-34]</sup>。

目前实验室中常用的低温等离子体产生形式按照放电形式的不同主要可以分为图2所示的几类。其中除了微波放电和低压辉光放电是在低气压条件下



图2 低温等离子体分类

形成，其他几种放电形式均为常压下产生。由于低温等离子体的种类繁多，其产生方法和途径也多种多样，常见的主要有外加电场法、光电离和激光辐射电离法、射线辐照法和加热法等。而高压脉冲等离子体技术由于其便捷高效的优点，成为目前最常使用的低温等离子体发生技术。

### 3 高压脉冲等离子体技术在环保中的应用 (High-Voltage Pulsed Plasma Technology in Environmental Applications)

#### 3.1 高压脉冲等离子体技术应用于高压静电除尘(HV Pulsed Plasma Technology in ESPs)

传统高压直流静电除尘系统的工作原理示意图如图3所示，除尘系统的放电极和集尘极连接在直流高压电源的两侧。由于在实际应用中，除尘效率和粉尘的比电阻有较为直接的联系，直流高压静电除尘存在的问题：高比电阻粉尘导电率很小，很容易积聚在集尘极上，附着在尘粒上的大量电荷难以通过集尘极释放出去，将积累在积尘层表面，这就使积尘层表面电势变得足够高而在某些局部产生反电晕，从而导致相反极性的离子被注入电晕场，影响了电子和负离子继续被集尘极所吸附，使粉尘的收集率大大降低。而比电阻较小的尘粒，由于电导率很高，很容易向集尘极释放负电荷并转而带上正电荷，而受到带负电荷的电极所产生的电场力作用，被重新推入气流中；而当这类粒子进入气流之后，又很快释放出正电荷并被负电荷饱和，再次向正电荷的集尘板移动。因此比电阻小的粉尘颗粒对于静电除尘器来说也比较难以去除。因此传统的高压静电除尘系统容易受尘粒的比电阻的限制而影响除尘效率。

如果将除尘系统的供电电源由直流高压方式改变成为脉冲高压方式，则能很好的解决以上的问题：一方面，如图4所示，高压脉冲能产生电晕流贯穿两极板间，并可以延伸到积尘层内部的收集电极，击穿高比电阻的积尘层，从而使层上积聚的电荷被释放，保持积尘层表面的电中性，抑制极板间反电晕的发生，提高了除尘效率。另一方面，极板间的脉冲高压电场能产生大量的高能电子，产生能量较强分布均匀的流光分布在放电空间内，和单一的直流电晕相比较，高压脉冲产生的流光放电能电离更多的气体分子，产生大量的 $\cdot\text{O}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{HO}_2$ 等活性自由基和 $\text{O}_3$ 等强氧化性的分子，其主要反应方程式有：

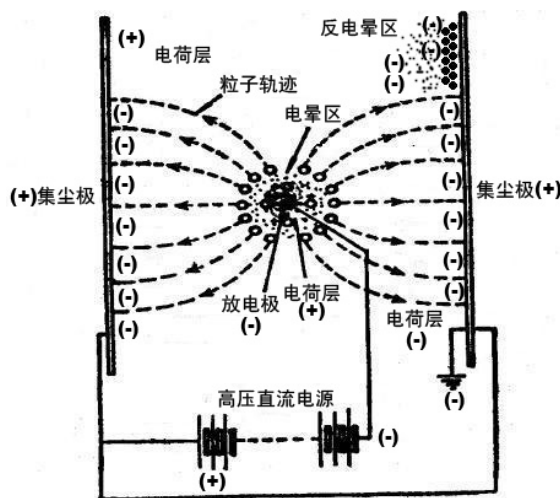
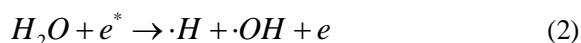


图3 高压直流除尘原理图

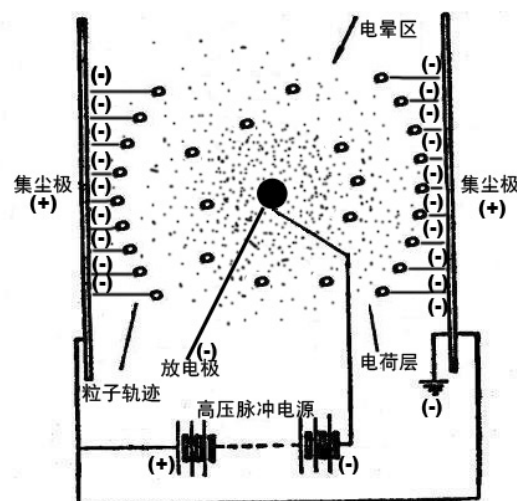
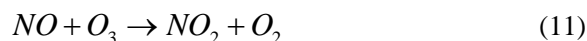
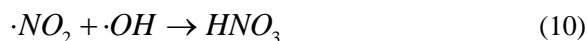
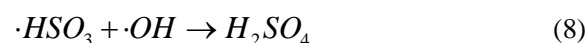


图4 高压脉冲除尘原理图



此时电除尘器除了对粉尘离子有静电吸附作用之外，还产生了大量等离子体能与烟气中含有的 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 分子引发相应的氧化还原反应，并在外加氨气的作用下最终产生硫酸盐和硝酸盐，从而起到了脱硫脱硝，去除有害气体的作用，其主要反应方程式包括：





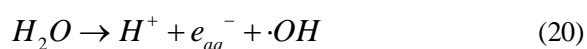
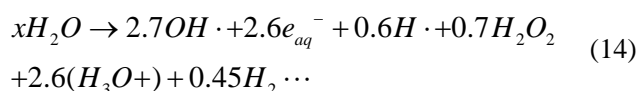
除此之外,在同样的电压等级下,高压脉冲电源比直流高压电源更加节能,这一点也是高压脉冲电源除尘成为研究热点的主要原因。

近年来,有人提出除尘电源采用高压脉冲叠加直流基压的工作方式,将微尘收集过程分无脉冲和有脉冲两个阶段,把高压直流除尘和高压脉冲除尘两种方式的优点结合起来,不仅能高效率的除去废气中的粉尘粒子,同时也能很好地起到脱硫脱硝的作用<sup>[35]</sup>。

### 3.2 高压脉冲等离子体技术在废水处理上的应用(HV Pulsed Plasma Technology in Wastewater Treatment)

高压脉冲电源由于输出电压波形具有陡前沿,窄脉冲的特点<sup>[36]</sup>,施加于液相内非平衡的电极之间,极易使处理对象的分子结构发生改变,其质量较轻的电子能瞬间获得能量而加速,而离子由于其相对较重的质量无法瞬间加速。电子获得能量后变为高能自由电子,在运动过程中,很容易与水中其他分子碰撞,引发一系列水相化学过程,产生大量如 $H_2O_2$ 、 $\cdot O$ 和 $\cdot HO_2$ 等活性粒子,在液相或者气液相交界面处形成等离子体,加速水中的有机物分子降解过程。

液相等离子体放电可以根据其放电形态不同分为液相电弧放电和液相电晕放电两种状态,两种状态下等离子体活性粒子产生的主要方程式有<sup>[37-38]</sup>:



高压脉冲激励产生的大量活性粒子和自由基与废水中含有的有害物质(主要包括难以降解的有毒有机物分子和溶解于水的氨氮、磷酸盐等)发生一系列复杂的水合、氧化和还原反应,从而达到净化废水的作用。

气液相等离子体放电和液相直接放电相比,除了液相放电产生的自由基和活性粒子外,在气液交界面上能形成大量的氢自由基 $\cdot H$ 和羟基自由基 $\cdot OH$ ,还有高能水合电子 $e_{aq}^-$ ,放电生成物种类和数量要多于液相放电,因而放电效率和废水处理效果也会有较大的提高。

气液相等离子体废水处理常用的反应器类型包括气液分层式,水中鼓泡式和雾化放电式。

气液分层式气液相放电的反应器结构如图5所示。高压电极和地电极分别加在反应器两侧,而反应器上部为气体,下部为液体,气液之间有较为明显的分界线。

气液分层式反应装置结构较为简单,高压电极的形式多样,常见的有针电极、线电极和板电极等。由于分子结构的差异,放电主要在气相中产生,产生的 $O$ 、 $H$ 、 $OH$ 自由基, $O_2$ 、 $H_2O_2$ 分子等活性离子通过气液相分界面作用于液体,同时伴随着高能电子的轰击、紫外线的光化学作用,从而对液相中存在的废弃

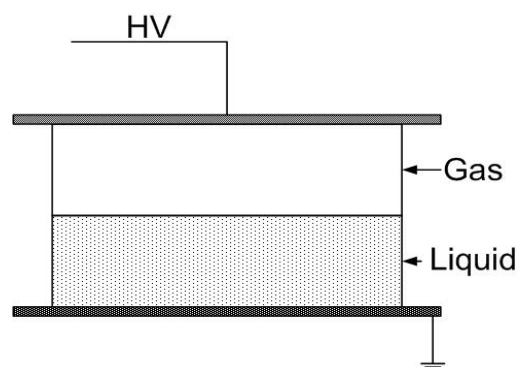


图5 气液分层反应器结构图

有机物起到了分解氧化的作用。但由于等离子体通过气液分界面处理液体的距离有限,因而需要注意液相层的厚度不能太厚,或者可以采用循环搅拌的方式改善处理效果。

水中鼓泡式(水中吹气)反应器指的是在液体中用针管式鼓泡,射流器,曝气头或者液气混合泵等设备在液相中产生大量微小气泡,在此液气混合体中产生放电的形式,反应器结构图如图6所示<sup>[39]</sup>。

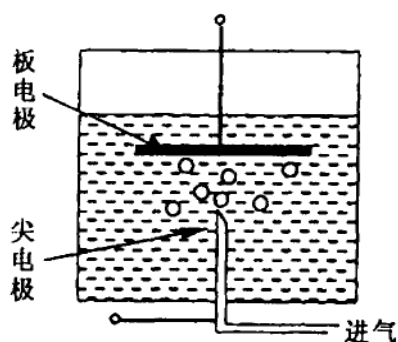


图6 水中鼓泡反应器结构图

单纯的液相放电需要造成液体局部高温气化,然后在气泡中产生传统意义上的气相放电过程,因而液相放电必然消耗大部分能量用于产生气泡。而水中鼓气反应器则是人为提前造成大量的气泡,既提供了气体放电的发生场所,又有利于气体放电的快速产生,节省了产生气泡的能量损耗。这种放电方式的放电效果与通入液体中气泡的大小、气泡的存留时间、气水比和通入气体性质都有较大的关系。

喷雾式放电其本质是一种气体放电的扩充形式:将被处理的液体分散成微小的液滴,掺杂在空气中进行放电。反应器典型结构如图7所示。

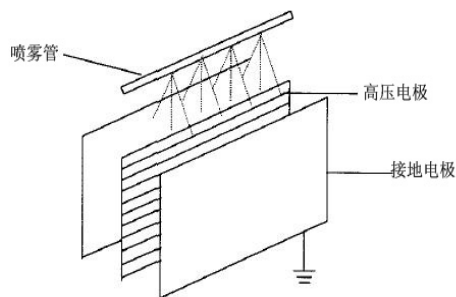


图7 雾化放电反应器结构

由于微液滴的荷电规律,雾化放电在气体中的击穿场强大大低于液相直接放电的击穿电压;而且由于液滴的荷电,拉伸极化而产生电晕放电,放电的起始电压甚至低于同样间距下的气体放电。同时因为雾状液滴的表面积非常大,因此当等离子体通道或者流注

产生后,活性粒子与高能电子和处理液接触面积大了几个数量级,十分有利于有机物分子的降解。所以雾化放电的处理效果是几种气液相反应器结构中最好的,但是雾化放电的装置较为复杂,并且单位时间处理的水量有限,因而在工业上的应用也相对有限。

由于介质阻挡放电更加容易实现水气在放电过程中结合,它利用放电过程中加入绝缘介质的优越性,使之能更好的和诸如静电喷雾和水中鼓泡等反应器结构配合,产生均匀的放电形式,达到更好的处理效果。因而在以上几种气液相等离子体废水处理反应器的基础上,可延伸出多种气液相介质阻挡等离子体放电反应器。

Robinson等使用了气液分层的反应器形式,通过介质阻挡的放电方式,研制出了新型的Taylor锥形臭

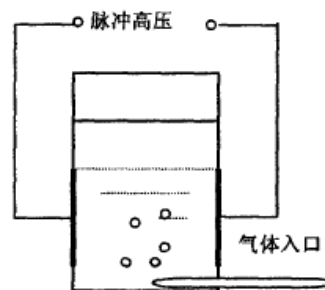


图8 液相鼓气式臭氧发生器

氧发生器,可以达到12000ppm的臭氧浓度<sup>[40]</sup>。

Satoshi等利用图8所示的液相鼓气反应器方式的臭氧发生器,从底部充入氧气时,尾气可以达到300PPM的臭氧浓度,臭氧浓度产生效率为40g/KWh<sup>[41]</sup>。

高压脉冲电源在污水处理,尤其是有机物污水处理方面,能量利用率比较高,控制方便,清洁无二次污染,体现出较为明显的优势,具有广阔的应用前景<sup>[42-43]</sup>。需要说明的是,在废水处理的电化学过程中,由于分子电离和电子跃迁的同时会产生超声波、冲击波、局部高温、紫外线等一系列物理效应,这些效应也能促使有机物的降解<sup>[44-45]</sup>。

#### 4 小结(Conclusions)

脉冲功率技术由于其“慢充快放”的特性,逐渐成为产生非平衡态等离子体的高效手段。高压脉冲等离子体技术在环境工程(高压除尘、废气废水处理)中得到了越来越广泛的应用。

与传统直流高压除尘相比,脉冲高压除尘系统不仅能抑制反电晕的形成从而提高除尘效率,并能有效去除废气中包含的SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>分子,同步实现了除尘和脱硫脱硝。而高压脉冲等离子体废水处理为废水处理提供了新的思路:高能量利用率、清洁无二次污

染、多种效应综合作用,推动了污水处理系统的小型化和高效化。

## 参考文献(References)

- [1] 陆军. 我国资源环境现状与产业发展趋势[J]. 中国科技投资, 2009, 49(1): 49-50.
- [2] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 王莹. 高功率脉冲电源[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.
- [4] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [5] John A. Nation. Particle Accelerators[M], 1979.
- [6] Budker G. I. Symposium on High Accelerators[C]. Geneva, 1956.1.
- [7] Martin J. C. Internal Report[R]. Nanosecond Pulse Techniques SSWA/JCM/703/27,AWRE,England,1970.
- [8] Martin T. H. etc. Summary of the Hermes Flash X-ray Program[R], 1969, SC-RR-69-421.
- [9] Bernstien B. and Smith I. Aurora. An Electron Accelerator[J], IEEE Trans. Nucl. Sci., 1973, NS-20,294.
- [10] Martin T. H. etc. PBFA-II, A 100TW Pulsed Power Driver for ICF[C], Proc. 5<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conference 155, 1985.
- [11] Martin T. H. etc. PBFA-II, The Pulsed Power Characterization Phase[C], Proc. 6<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conference 255, 1987.
- [12] Nakai S. Laser and Ion Beams Fusion Research Program[J], Laser and Particle Beam 1983.1(1).
- [13] 范如玉. 日本脉冲功率技术考察[C].1985 年全国高功率粒子束学术会论文集,1985.
- [14] Bepichev H. G. Nanosecond Intense Electron Beam Accelerator – Angara[C], 1983, Instr. Exp. Tech. 1983.6,1-4.
- [15] Pavlovskii A. I. Powerful Electron Accelerator LIU – 10 Report[R], Academy SSSR 1980; 250(5):11-18.
- [16] Chevallier J. etc. Pulsed Electron Beam Generators Operating in C.E.A. Energy Storage, Compression and Switch[M], Edit by V. Nardi etc, 1983. 31.
- [17] Eyharts P. etc. Status of the AIRIX Induction Accelerator[C], Proc. of International Particle Accelerator Conference 1210, 1995.
- [18] Dams J. etc. KAKTUS – A 24MV/240TW Pulsed Power Generator Concept[C], Proc. 11<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conference 25, 1997.
- [19] Herbert H. G. and Martin J. C. Some Pulsed Power Improvements to SWARF – A Flash X-Ray Machine[C], Proc. 4<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conference 598, 1983.
- [20] 王淦昌. 高功率粒子束及其应用[J]. 强激光与粒子束, 1(1):p1, 1989.
- [21] 邱爱慈等. 闪光-II 强流脉冲电子束加速器[J]. 强激光与粒子束, 1991,3(3):340.
- [22] 张寿云等. 10MeV 感应直线加速器[C], 中国高功率粒子束十年文集, 1995:35.
- [23] Бакулин Ю. Б. Игуп I, II[C], П. Т. Э., (2):p34, 1979.
- [24] 蒯斌等. 强光-I 长脉冲  $\gamma$  射线二极管[C]. 第八届全国高功率粒子束会议文集, 2001:3-35.
- [25] 刘振, A.J.M.PEMEN, E.J.M.van HEESCH, G. WINANDS, 闫克平. 新型多开关脉冲功率技术[J]. 科技导报, 2008, 12(26): 76-83.
- [26] 王勳, 邓建军, 谢卫平. 脉冲功率与等离子体应用技术的最新动态[J]. 爆轰波与冲击波, 2004, 1(3): 42-45.
- [27] Cook D. etc. New Developments and Applications of Intense PRS at Sandia[C], Proc. 11<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conference, 1997, 25.
- [28] 甄汉生. 等离子体加工技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [29] T. J. M. 博伊德等. 戴世强等译. 等离子体动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [30] Fridman A. Chirokov A. and Gutsol A. Non-thermal atmospheric pressure discharge[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2005, 38: 1-24.
- [31] Penetrante B. M., B. J. N., and Hsiao M.C. Kinetic analysis of nonthermal plasma used for pollution control[J]. Jpn.J:Appl. Phys., 1997, 36(1): 5007-5017.
- [32] 白希尧, 白敏东, 张芝涛. 非平衡等离子体化学研究进展[J]. 中国基础科学, 2003,6: 30-37.
- [33] Akiyama, R.H.a.H. Air pollution control by electrical discharges[J]. IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation, 2000, 7: 654-683.
- [34] Takaki K., et al. Effect of electrode shape in dielectric barrier discharge plasma reactor for NOx removal[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(1): 32-38.
- [35] Senichi Masuda and Hideyuki Nakao. control of NOx, by positive and negative pulsed corona discharges[J], IEEE Trans. on Industry Application, 1999, 26(2): 374-383.
- [36] 李胜利, 向浩, 李劲. 实验用 ns 级脉冲高压电源的研制[J], 高电压技术, 2000, 26(1): 14-16.
- [37] Petrier C., Lamy M. et al. Sonochemical degradation of phenol in dilute aqueous solution: comparison of the reaction rates at 20-487kHz[J], Journal of Physical Chemistry, 1998, 98: 10514.
- [38] Tomiyasu H., Fukutomi H. et al. Kinetics and mechanisms of ozone decomposition in basic aqueous solutions[J], Inorg. Chem, 1985., 24: 2964-2985
- [39] Clements J. S. Preliminary Investigation of Prebreakdown Phenomena and Chemical Reactions Using a pulsed High-voltage Discharge in Water[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, 1A-23(2): 224-235.
- [40] Robinson J. A., Bergougnou M. A., et al. Castle GSP, Inculet II[C]. IEEE IAS Ann. Meeting, 1997, 3: 1791-1802.
- [41] Satoshi I., Tomoaki M., Saburoh S. Ozone generation by a discharge in bubbled water[C]. J. Appl. Phys. 1999, 38: 4601~4604.
- [42] 李冬黎, 何湘宁. 形变功率脉冲电源作用下印染废水处理研究[J], 浙江大学学报(工学版), 2005, 35(6): 887~890.
- [43] 胡敏. 电脉冲技术在电凝聚法污水处理和微弧氧化领域的应用[D]. 杭州: 浙江大学 2008.
- [44] Barb W. G, Baxendale J. H., et al. Reaction of ferrous and ferric ions with hydrogen peroxide, Part I, The ferrous ion reaction[J], Trans. Faraday Soc. 1951, 47: 462-500.
- [45] 吴祖成, 李伟. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 系统光催化氧化降解苯酚废水[J], 化工学报, 2001,52(3): 277-280.