

中图分类号: TM924.75

论文编号: 2017303079

U D C: _____

密 级: 公 开

硕 士 学 位 论 文

等离子体灶的设计与性能研究

作者姓名: 吕玉明

学科名称: 机械工程

研究方向: 机器人技术

学习单位: 华北理工大学 学制: 2.5 年 提交日期: 2017 年 12 月 1 日

申请学位类别: 工程硕士

导师 姓名: 李和平 副教授

单位: 清华大学 工程物理系

栾奥天 高工

单位: 唐山弘基传动科技有限公司

论文评阅人: 李书明 教授

单位: 中国民航大学

黄金凤 副教授

单位: 华北理工大学 机械工程学院

论文答辩日期: 2018 年 3 月 6 日

答辩委员会主席: 王兆申 研究员

关 键 词: 等离子体灶; 等离子体发生器; 放电装置; 放电特性

唐山 华北理工大学

2018 年 3 月

Design and Performance Study on The Plasma Oven

Dissertation Submitted to
North China University of Science and Technology
in partial fulfillment of the requirement

for the degree of
Master of Engineering
By
lv Yuming
(Mechanical Engineering)

Supervisor: **Li Heping**
 Luan Aotian

March, 2018

独 创 性 说 明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个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或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北理工大学以外其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。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做了明确的说明并表示了谢意。

论文作者签名：吕玉明 日期：2018年3月8日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解华北理工大学有关保留、使用学位论文的规定，即：已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校有权保留、送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以将学位论文的全部或部分内容采用影印、缩印或编入有关数据库进行公开、检索和交流。

作者和导师同意论文公开及网上交流的时间：

☒ 自授予学位之日起

☐ 自 年 月 日起

作者签名：吕玉明

导师签名：李和平

签字日期：2018年3月8日 签字日期：2018年3月8日

摘 要

煤气灶和电磁炉是日常生活中使用最为普遍的。煤气属于不可再生资源，燃烧会造成环境污染和安全隐患，而电磁炉应用范围也有一定的局限性。等离子体灶兼有了两者大部分的优点，以热等离子体为基础，以电能为直接能源，通过设计一种由脉冲调制电路驱动的放电装置，能够产生类似火炬的等离子体束，具有功率大、绿色环保、节能减排和高效率等众多优点。

对等离子体灶电源系统进行设计，包括主功率源、放电发生电路和升压电路。通过对放电电路进行仿真分析，验证了该电路可以应用到等离子体灶电源系统的可行性。并基于单相放电电路基础，设计了八相放电电路系统。

对等离子体灶实验放电装置进行设计，包括电极设计、发生器结构设计、电极固定板和试验指的设计。通过对铜材电极与石墨电极进行实验对比，确立出以石墨电极为共地极，和以铜材电极为高压极。根据不同结构发生器的优缺点，对等离子体发生器进行升级改造，并最终确立了理想发生器的实验模型。

主要是对实验测量系统进行搭建，分别讨论了放电参数对产生 NO_2 的影响，电场分布对放电噪音问题的影响，电极间距对等离子体射流稳定性的影响，从而研究等离子放电不稳定的现象机理以及噪音产生的原因。并通过试验数据采集，得到各电流和电压大小对等离子体射流的影响规律，并最终获得 220mm 理想长度的等离子体束。验证了该等离子体灶可以成为一种新型的燃烧设备应用于工业和家庭。

图 36 幅；表 5 个；参 58 篇。

关键词：等离子体灶；等离子体发生器；放电装置；放电特性

分类号：TM924.75

Abstract

Gas cookers and induction cookers are the most universal in daily life. Gas is not renewable resources. If it is burning, it will cause environmental pollution and security risks, and the application is also limited. The plasma oven has the both advantages of them, based on the thermal plasma, using the electricity for energy directly. Through the design of a discharge device driven by the pulse modulation circuit, can produce plasma similar torch, with large power, environmental, energy saving and high efficiency, et al.

The power supply system of the plasma stove is designed, including the main power source, the discharge generator circuit and the boost circuit. Through the simulation analysis of the discharge circuit, the feasibility of the circuit can be proved to be applied to the power supply system of the plasma stove. Based on the basis of single-phase discharge circuit, the eight phase discharge circuit system is designed.

The experimental discharge device of the plasma stove is designed, including the design of the electrode, the design of the generator structure, the electrode fixed plate and the design of the test finger. By comparing copper electrode with graphite electrode, graphite electrode as common ground electrode and copper electrode as high pressure electrode have been established. According to the advantages and disadvantages of different structure generators, the plasma generator is upgraded, and the experimental model of the ideal generator is finally established.

Mainly setting up experimental measurement system, respectively discusses the effect of discharge parameters to produce NO_2 , the influence of the noise, the electric field distribution on discharge electrode gap effect on the stability of plasma jet, to study the phenomenon of unstable plasma discharge mechanism and the causes of noise. The influence of the current and voltage on the plasma jet is obtained through the test data, and the plasma beam of the ideal length of 220mm is obtained. It is proved that the plasma oven can be used as a new combustion equipment for industrial and family.

Figure 36; Table 5; Reference 58

Keywords: plasma oven, plasma generator, discharge device, discharge characteristic

Chinese books catalog: TM924.75

目 次

| | |
|-----------------------------|----|
| 引 言 | 1 |
| 第 1 章 绪论 | 2 |
| 1.1 课题背景及意义 | 2 |
| 1.2 等离子体技术概述 | 3 |
| 1.2.1 高温等离子体 | 5 |
| 1.2.2 低温等离子体 | 6 |
| 1.2.3 等离子体发生器 | 8 |
| 1.3 等离子体灶国内外现状及其发展的趋势 | 12 |
| 1.4 本论文的主要研究内容 | 13 |
| 第 2 章 等离子体灶放电装置电源系统研制 | 16 |
| 2.1 电源系统主功率源 | 16 |
| 2.2 发生电路和升压电路设计 | 17 |
| 2.2.1 ZVS 电路分析 | 19 |
| 2.2.2 电路仿真分析 | 19 |
| 2.3 多相发生电路设计 | 20 |
| 2.4 本章小结 | 21 |
| 第 3 章 等离子体灶放电装置系统研制 | 23 |
| 3.1 发生器结构设计 | 23 |
| 3.1.1 电极设计 | 23 |
| 3.1.2 铜电极与石墨电极放电性能对比 | 26 |
| 3.1.3 电极固定板与试验指设计 | 28 |
| 3.2 发生器升级过程 | 30 |
| 3.2.1 同轴发生器 | 31 |
| 3.2.2 尖端发生器 | 32 |
| 3.3 理想发生器模型设计 | 34 |
| 3.4 本章小结 | 35 |
| 第 4 章 等离子体灶放电特性实验研究 | 37 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 4.1 电流和电压大小对等离子体射流的影响规律 | 37 |
| 4.2 放电参数对产生 NO ₂ 影响 | 39 |
| 4.3 电磁场对等离子体射流的影响规律 | 40 |
| 4.4 不同电极间距对等离子体灶放电稳定性的影响 | 43 |
| 4.5 气体检测分析 | 44 |
| 4.5.1 气体检测方案 | 44 |
| 4.5.2 气体检测结果 | 46 |
| 4.6 热效率测量与分析 | 46 |
| 4.6.1 等离子体灶的热效率测量方案 | 46 |
| 4.6.2 实际测量与结果 | 47 |
| 4.7 本章小结 | 48 |
| 结论 | 50 |
| 参考文献 | 52 |
| 致 谢 | 56 |
| 导师简介 | 57 |
| 作者简介 | 58 |
| 学位论文数据集 | 59 |

引 言

随着社会发展需求的增大和科技进步的同时，节能和安全问题越来越受到社会的关注。目前，煤气灶和电磁炉覆盖到了所有家居生活中，但无论是煤气灶还是电磁炉都存在它们不可避免的弊端。煤气灶是家居生活中最为普遍的，以煤气为燃料，有方便快捷等等优点，但煤气也是一种不可再生年能源，按照这样使用下去，能源终会有一天会枯竭，而且煤气的不完全燃烧所产生的一氧化碳也常常造成了安全的隐患。利用电磁炉为加热设备对人体是没有危害的，既可以减少其他燃烧物燃烧所产生的二氧化碳的生成，也相对其他火焰燃烧更具安全性。不过因为加热方式不同，电锅炒相比传统煤气灶要慢很多，烧出来的饭菜味道也要差一些，也易出现粘锅的现象。

长久以来，让电能应用到各个领域，并替代不可再生能源一直是人类的愿望。近年来，国内外的一些高校和研究组相继运用交流和直流的驱动等不同的方式，配合使用不同结构的等离子体发生器，来进行大气压下低温等离子体射流和等离子体灶的研究工作。虽然一些专家和研究人员在关于等离子体高效节能燃气灶方面也取得了相关专利。但由于技术难度较高、设备复杂和操作繁琐等限制条件，都未得到实际性的推广。

为了解决以上技术设备的缺点和不足，本文以低温等离子体为基础，在总结了等离子体研究方面所积累经验的基础上，设计了一种新型的燃烧灶，该燃烧灶基于热等离子体原理，兼有了传统煤气灶和电磁炉优点，同时也有效地改善了它们的不足，并最终获得很好的使用性能。本课题将开展新型燃烧灶设计理论与研究，设计了一种由低电压输入的脉冲调制电路驱动等离子体灶发生器的放电装置，为工业生产和家庭应用提供一种耗能低、功率大、效率高、操作简单、绿色环保喝节能减排的新型燃气灶。通过对输入电压电流和放电电压电流与等离子体束的关系进行研究，以及对各类参数的测量，并最终获得理想长度和功能的等离子体束，且具有多种类似火焰的特性，更加论证了该等离子体灶可以代替传统燃气灶和电磁炉，成为一种新型燃气灶的可行性。

第 1 章 绪论

长久以来，让电能变成可重复利用的替代能源一直是人们的美好愿望，同时，节能和安全问题也越来越受到社会的关注。国内外的一些高校和研究组也对等离子体射流和等离子体灶进行研究工作，但由于技术难度较高、设备复杂和操作繁琐等约束条件，都未得到推广和实际性突破。等离子体燃烧灶基于热等离子体原理，兼有了传统煤气灶和电磁炉优点，同时也有效地改善了它们的不足，可代替传统燃气灶和电磁炉成为一种新型燃气灶。

1.1 课题背景及意义

目前，我全国人口总数为 13.4 亿。虽然人口数量控制得比较稳定，但是人均能源的消耗有成倍的增长的趋势。伴随着经济发展的同时，我国当前的能源需求问题也对全国产生了非常大的压力^[1,2]。在日常生活和工业制造过程中，所使用的燃料大概有天然气、燃油、煤炭和机制有机木柴这四种，能源消耗主要来自煤炭、石油和天然气等。随着社会需求的增多，这些能源的开采量也不断增大，导致这些资源在地球上的储存量慢慢被耗尽，同时大量使用这些燃料，还会造成巨大的环境污染。

从远古时期自然界的天火，到古代时期人类所用的柴火，再到现在的家用的电磁炉和燃气灶，容易看出，在人类的饮食文化当中，火有着不可替代的作用，人类对于“火候”的发掘也是不留余力的。随着制作工艺和制造技术的不断升级，各式各样的设备应用到我们的生活当中，各种家用电器也被人们视为不可或缺的东西，其中电磁炉凭借其独特的优点转变了过去的厨房环境。我们知道燃气灶和电磁炉的工作原理完全不同，燃气灶是以煤气、液化气、天然气为原材料直火加热的厨房设备，燃气灶按其结构可以分为嵌入式灶和台式灶^[3-5]，其中台式灶使用最为普遍。材质上有玻璃、不锈钢和陶瓷面板等，其中最为普遍的玻璃与不锈钢材质；点火方式有脉冲式点火和电子式点火，其中使用最为普遍的为电子点火。燃气灶工作原理是，当打开燃气阀门时，燃气管内的燃气进入灶体，再通过燃气阀的调节开关进入灶头内，由进气孔混合一部分空气。这些混合气体由于压强作用从分火器的火孔中喷出并通过点火装置点燃，形成我们所使用的火焰，从而加热置于锅指甲上的炊具。而电磁炉也称为电磁灶，是一种新兴的厨房设备，是厨房革命的产物，它根据的是磁场感应电流的加热原理，完全区别于原先的燃气灶。由于加热方式不同，热

效率大大的被提升^[6-10]。电磁炉工作过程中，电磁炉内部的加热线圈中通入交流电，由电磁学原理可知，交变电流线圈周围会产生交变电场，交变电场产生的磁力线会穿过放在电磁炉上边的金属锅底，由于金属锅底产生的涡流会生成热量，即电磁炉无需通过明火就可以直接在锅底加热。

同时，燃气灶与电磁炉凭借他们独有的特性被人们使用，但也都存在着不可更改的缺陷。燃气灶是靠一些可燃气体混入空气中的氧气进行直火加热，只有当在空气流通性好且氧气成分充足的情况下，可燃气体才能够做到充分的燃烧。燃气灶使用明火烹饪，观感更加直接，大小火候也可以根据情况随意调节，有利于使用者控制火力，现已称为居家必选厨房设备。但以气体直接燃烧加热，有时在燃烧不充分情况下会产生有害气体，并且还会造成燃气泄漏以及爆炸的危险，使用过程中安全隐患比较大。从运输角度去分析，煤气的运输是通过管道来完成的，同样会造成高额的成本和安全隐患。

电磁炉集安全、环保和节能于一身，由于电磁炉主要是涡流加热，因此无明火和燃烧现象，不会发生泄漏、爆炸和明火烧伤等危险。理论上，电磁炉的高效节能效率可高达 80% 以上，凭借其拥有众多模式的功能，可适用于任何有电的场合，并且操作极其简单，简单几个步骤就能完成。目前电磁炉的最小功率是 120W，最大功率为 2000W，对于那些慢火慢炖和大火大炖的使用并不是很适合。从两者的简单对比可以看出，电磁炉作为一种新兴的厨房设备具有安全、环保、便于操作等优点，更适合居家使用，且实用性更强，而燃气灶作为一种烹饪工具，对于那些要求比较高的使用者来说也是必不可少的。

在总结了电磁炉与燃烧灶的诸多特点之后，用电生火无疑是解决两者缺陷的最优方法。因此等离子体灶成为了现代科学研究工作者们一直探讨的对象。本课题所设计的等离子体灶区别于两种加热装置，但却能解决两者的缺陷问题。

1.2 等离子体技术概述

“等离子体”（Plasma）这一概念是在 20 世纪 30 年代由美国科学家发现并提出来的。物质一般都是以三种状态存在于我们日常生活中，即固态、液体和气态，在一定的条件下，通过输入或者输出能量，三种状态之间可以互相转变^[12-15]。固态被加热会变成液态，液态被加热会变成气态，对于处于气态的物质，当其温度进一步升高时，其中的原子和分子将被电离出来，形成电子和离子组成的体系，物质的这种电离状态就成为了所谓的第四态——等离子体态^[11]，图 1 为四态转变图。等离子

体是一种部分被离子化的气态物质，宇宙的大部分物质都是以这种状态而存在。例如我们所能看到的极光现象、闪电和星云等，在科技展览馆中的电离子魔幻球，也是等离子体的一种，如图 2 所示。

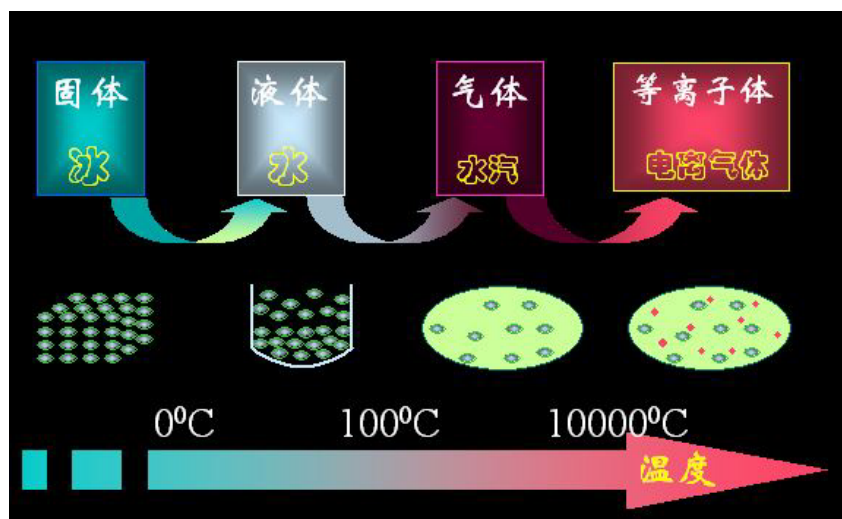


图 1 四态转变图

Fig.1 Four state transition diagrams

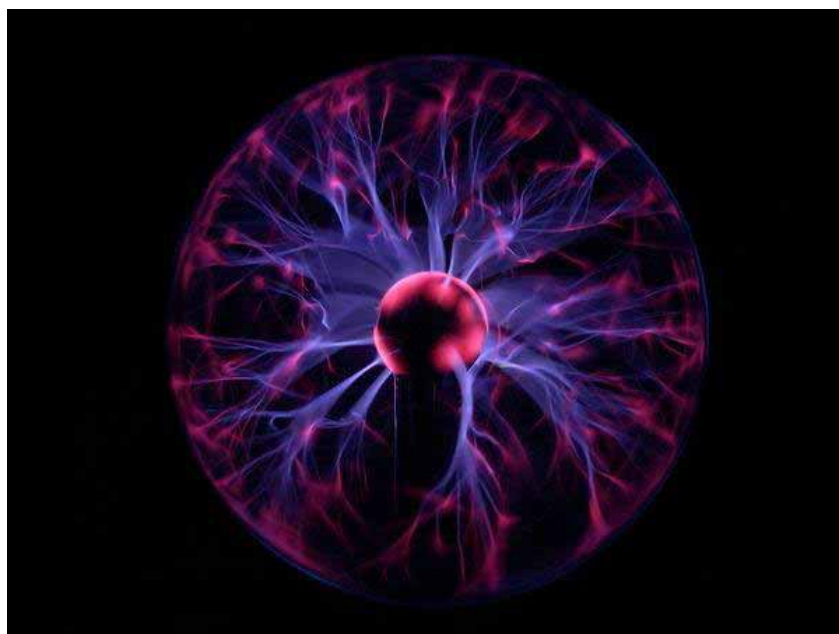


图 2 电离子魔幻球

Fig.2 Magic sphere of electric ion

对于等离子体产生方式有很多，但就自然界而说，其产生等离子体的方式主要是两种，一种是热致电离，就是用加热的方法使气体电离。另一种是光辐射电

离，但光辐射电离在我们日常生活中很难实现。随着等离子体技术不断提高和发展，大量和不同类别的等离子体可以通过人工来获取，例如最常见的气体放电法和通过射线进行辐射的方法。等离子体的种类很多，不同种类的等离子体特性也不尽相同。通常我们会根据等离子体的宏观温度将其分为两大类：低温等离子体和高温等离子体。而对于低温等离子体，可以将其细分为热等离子体（Thermal Plasma）和冷等离子体（Cold Plasma）两类。本课题所有的理论基础都是来自于热等离子体，即等离子体灶属于低温等离子体的应用范畴。

1.2.1 高温等离子体

高温等离子体具有较高的宏观温度，所有原子的电子都会吸收很高的能量，因此高能电子会脱离原子核的束缚，使得原轨道上的所有电子都变成自由电子。该等离子体的状态是完全电离的等离子体^[16]，其宏观温度都大于 106K。太阳和核聚变之类的，也都属于高温等离子体范畴。

人类社会发展的基础资源都离不开能源，在人类发展的当今社会，大家普遍关注的热点问题都离不开能源问题。如何保持经济的可持续增长和发展与能源消耗源问题成为所有国家面临的重要挑战。经过各国开发和科学实践经，各国认识到只有大规模的使用太阳能和开发核能，才能解决人类的能源危机。众所周知，要想发展太阳能，需要大量的太阳能板去发电，这样会占用地球上大量的面积，并不是最理想的能源替代方式。所以核能才是解决能源问题最关键的技术。

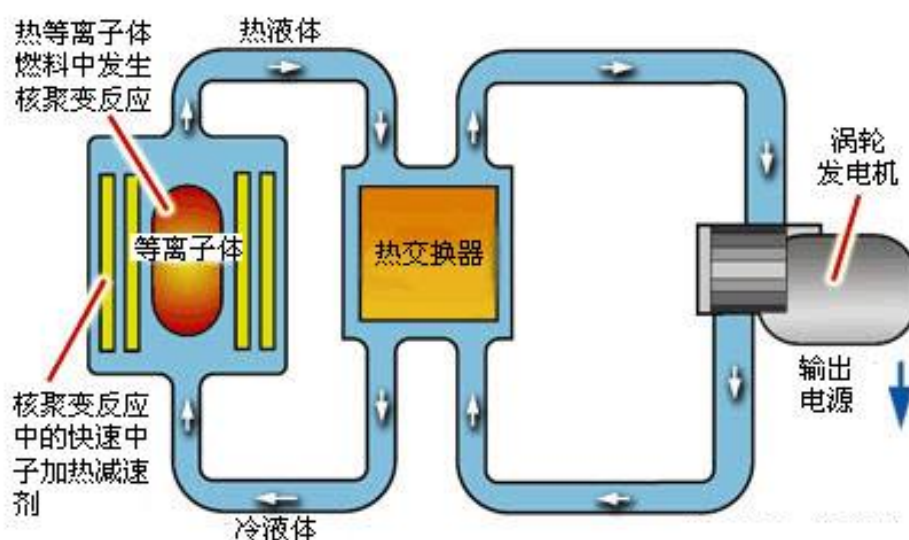


图 3 高温等离子体应用

Fig.3 The application of high temperature plasma

核能可以分两种，一种是由轻核聚变为重核所释放的能量，另一种是由重原子核裂变所释放出来的能量。核裂变能现已成为人类能源的一个重要组成部分，因为裂变所需要的重金属元素在全球的储量是非常少的，例如铀等元素。而传统的裂变反应堆会产生的核废料具有很强放射性的，对生物体会造成很剧烈的辐射损伤，同时核废料的处理装置的安全运行和军事应用问题等种种因素都限制了核裂变的继续发展。废料的处理不当和核能技术的滥用，都会对地球造成毁灭性的伤害。核聚变能区别于核裂变能的另一种核能形式，目前还没有被商用化，核聚变反应的流程如图 3 所示。核聚变能是通过氢的同位素氘（D）和氚（T）在高温高压下发生聚变反应而产生的，核聚变所需的燃料消耗很少，且燃料的在地球上的资源也是很丰富的，其中大量氘在海底被发现，在地球含量是非常丰富的，声称取之不尽，用之不竭。氚也可以通过成熟的技术途径进行大量生产，最重要的基本无污染，因此核聚变是最适合人类社会可持续增长和发展的能源。聚变能的大规模使用早已被氢弹的成功爆炸所证实，但作为广泛使用且需求稳定的能源，核聚变反应必须是绝对的稳态可控的。因此受控核聚变技术一旦被应用，将会为世界提供无比丰富理想能源。这也就是为什么发达国家不留余力的发展核聚变研究的根本原因，拥有了核能也就拥有了无比雄厚的资源，核聚变能的应用也将最终解决人类能源危机。核聚变所产生的能量将大部分转换为电能，等离子灶是以电能为输入能源，即属于可再生能源的应用范畴。

1.2.2 低温等离子体

对于低温等离子体来说，也被称为部分电离等离子体^[17]。原因是输入能量不够高，只有其中一些原子或分子被电离成等离子体态。从热力学平衡的角度分析来看，这种等离子体可以分为非平衡等离子体，也被称为冷等离子体^[18]。另一种是热平衡等离子体，通常也被称为热等离子体，虽然大多数冷等离子体的宏观温度与室温相似，但是由于该等离子体存在大量活跃的自由基和高能量电子的原因，常常会促进一些常温下不易发生的反应发生。等离子体灶电弧放电所产生的就是热等离子体。热等离子体相对冷等离子体具有较高的宏观温度。等离子体中的电子温度与其离子温度相差不大，也就是说，电子的平均动能接近于粒子的平均动能，而等离子体则近似于热平衡。通常人们会通过高频放电离子化和高压直流放电等方式产生热等离子体。其中电弧热等离子体和冲击等离子体等都属于热等离子体范畴。

热等离子体的辐射、电离、分离和其他过程都与反过程相平衡。主要用于通

过大电流放电产生电弧，使气体加热和电离化，其中包括非转移电弧、自由燃烧弧和转移电弧。1808 年，Davy 和 ritter 第一次在两个水平的碳电极之间点燃等离子体。1921 年，beck 开创了一个电弧技术广泛应用的可能性，创造了一个大的电流碳弧(也称为 beck 弧)。到 30 年代，Elenbass 等人开发出高压汞灯，通过建立了电弧能量平衡方程、电场强度、电弧半径和电流等参数之间的关系，计算弧柱内的温度场分布，并且发表了放电电弧有关的弧柱理论，为电弧弧柱的理论和技术的发展做出了巨大贡献并且为之后的等离子体技术奠定了理论基础。在我国，热等离子体技术从 60 年代开始就有相关的研究，起初是对空间相关的研究，在此期间，为了克服航天器进入大气层时的“热障”和飞行器在高速飞行过程中引起的信号干扰和中断，他们对等离子体进行了大量的实验和相关的基础理论研究，大规模空间研究项目极大地促进了热等离子体技术的发展。一直到了 80 年代和 90 年代，我国开始把重点逐渐转向了以空间科学和技术为中心材料的基础研究。最具代表性的就是从 1KW 到 10MW 的等离子火炬已经被开发出来。对于等离子体的相互作用和有关化学方向的研究，直到 80 年代早期才开始。虽然一些领域已经存在成功的应用，例如，特殊的微粉合成、电弧焊接和电弧切割等离子体等。电弧断路器和弧光灯的成功发展，使得我们对电弧的基本认识做出了巨大的贡献。

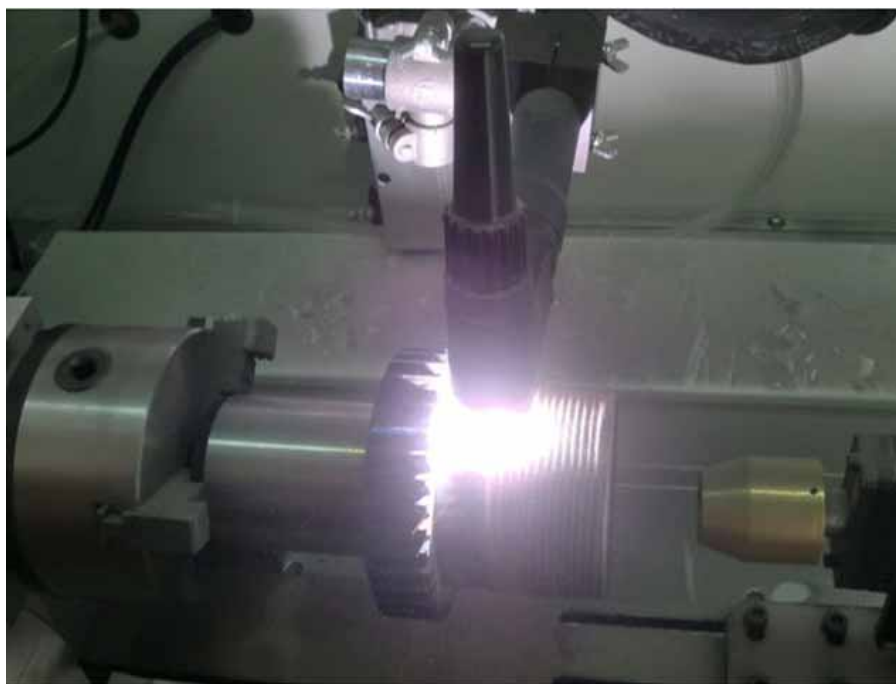


图 4 等离子体电镀处理

Fig.4 The plasma electroplating process

电弧热等离子体具有高能量密度、高亮度、高导电性、能量集中、方便控制和高导热性等特点，在工业中具有很强的实用性，在各种工业领域中越来越受到广泛的应用且正变得越来越重要。例如电弧和热等离子弧在机械处理方面（如焊接、切割、绘画、表面处理等）、化学工业方面（如纳米粉末合成）、冶金、电力和环保方面（如臭氧发生器、燃料、汽车尾气处理、废气处理、等离子体垃圾焚烧废物处理等）。除了这些比较普通的热等离子技术的应用外，热等离子体技术还涉及到一些尖端的应用领域：

- 1) 热等离子体微粉的合成，特别是纳米级粉的合成。
- 2) 热等离子电镀技术，见图 4，包括等离子喷涂、电弧喷涂和等离子化学蒸汽沉积(TPCVD)技术。
- 3) 热等离子处理废物，如图 5 所示，特别是有毒废物的处理。
- 4) 热等离子体萃取冶金技术。
- 5) 热等离子冶金，包括大型炉的熔化和重熔。

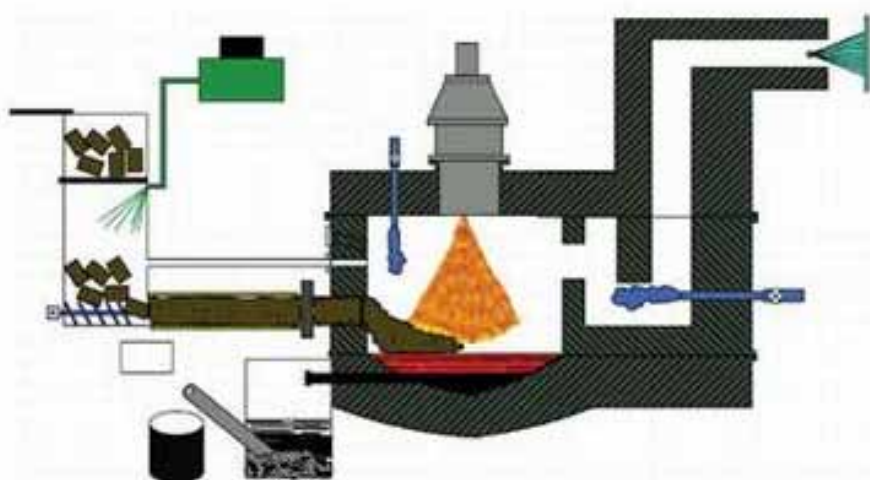


图 5 等离子体废物处理技术

Fig.5 The technology of plasma treatment the waste

1.2.3 等离子体发生器

热等离子体发生器(Thermal Plasma Generator)又称之为等离子体枪，是指能够将电能转换为热能的发生装置，并能够产生和维持一定的温度且输出稳定的等离子

体^[27-31]。但等离子体本身具有很高的化学性，属于不稳定状态。那么由电弧等离子体发生器所产生出的等离子体，更是一种具有强大功能的流体，正因为等离子体本身的特性，也正是热等离子体技术得到广泛应用的前提和基础。等离子体发生器在不同使用情况下有着不同的设计要求。实验室主要进行原理性研究，则要求对等离子体参数调节范围比较宽。而工业化装置的要求则是热离子体发生器要具有效率高功率大、寿命长和操作稳定可靠等特点。从某种意义上讲，热等离子体发生器是一切等离子体研究和技术应用的关键，发生器的水平就决定了等离子体技术的应用水平^[32-35]。

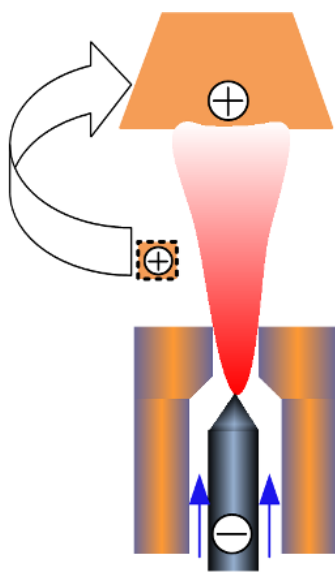


图 6 直流电弧等离子体发生器

Fig.6 DC arc plasma generator

热等离子体一般温度为 10^4K ，主要是通过高频感应耦合放电和电弧放电产生。产生电弧等离子体的驱动电源即可以是交流电源，也可以是直流电源^[40-49]。因交流电源的间歇放电特性，电流存在过零点瞬间，所以在使用交流放电过程中，电弧放电瞬间和放电过程容易产生灭弧现象，综合各种电源放电的特性，产生电弧放电等离子电源大多为直流电源。随着放电功率的增加，将交流电转换为直流电的成本也成倍增加。因此，在进行例如大量的高危污染物熔融处理时多采用交流电源放电产生的等离子体，不适合使用直流电源放电产生的电弧等离子体。通过交流放电所产生的等离子体的电源种类有多种类型，有最常见的交流电弧焊电源、KHZ 交流电源和高压电源等。在核工业中，印永祥和西南物理研究所的其他人员将 7kV 高压和 50HZ 的交流电施加在两个放电电极上，并进行了辉光放电，产生了高化学

性的等离子体，能和液相物质进行反应，但在放电过程中，会出现电弧熄灭和电弧会被重新引燃的现象，这也是由于交流电源的间歇特性引起的。因此，用交流放电来产生电弧等离子发生器是相对比较少的。然而，交流放电也有着特殊的优点，相比直流放电电源其内部结构相对简单，并且也有着低成本和低电极烧蚀的优点，交流放电正逐渐引起人们的注意。下面介绍几种比较常见的交直流电弧等离子体发生器。

如图 6 所示，为直流转移型电弧等离子体发生器^[39]，该等离子体发生器需要一个放电极进行辅助引弧，放电后的电弧将会转移到阳极处理。该结构多用于氩弧焊中，工作时将工件与地极相连接，然后通过氩弧焊枪产生的等离子体来焊接两种相同材质的材料。

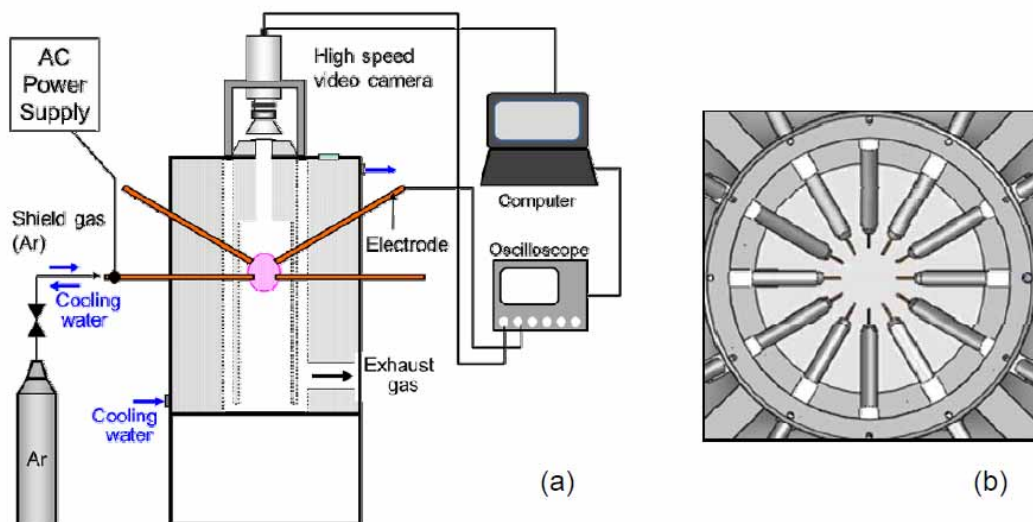


图 7 12 相交流电弧放电示意图

Fig.7 Schematic diagram of 12-phase AC arc discharge

交流电弧热等离子体发生器有如图 7 所示的由工频交流弧焊电源产生的多相交流等离子体发生装置^[36-38]。其中包括电弧放电真空腔、12 个放电极和提供的交流电源。这 12 个电极间隔 30°均布放置，将 12 个电极分为两层阵列，上下分别有六个电极，这些电极材质采用的是直径为 6mm 的钨电极。真空腔是选用不锈钢材质，在放电过程中，为降低电极和腔体的高温，每个电极和腔体内部都通有冷却水循环冷却，并且在该实验中真空腔室内充满氩气。

该设备的输入功率为 66KW，电压为 200V，电流为 380A。每个电极的放电电压为 21~24V，电流为 85~155A。该放电参数下产生的电弧等离子体直径为 100 毫米左右。单相交流电弧和 12 相交流电弧放电过程中电压和电流在随时间变化的曲线分别如图 8 和图 9 所示。图 8 中，当电流为零时，电压达到最大值，放电电弧很有可能在此时熄灭。可见，单相交流电弧放电是极其不稳定的。图 9 所示的 12 相交流电弧放电过程中的电压和电流波动性很小，所以通过于单相交流电弧放电相比，12 相交流电弧放电有着更加稳定的放电效果，因此也能生成稳定的电弧等离子体射流。

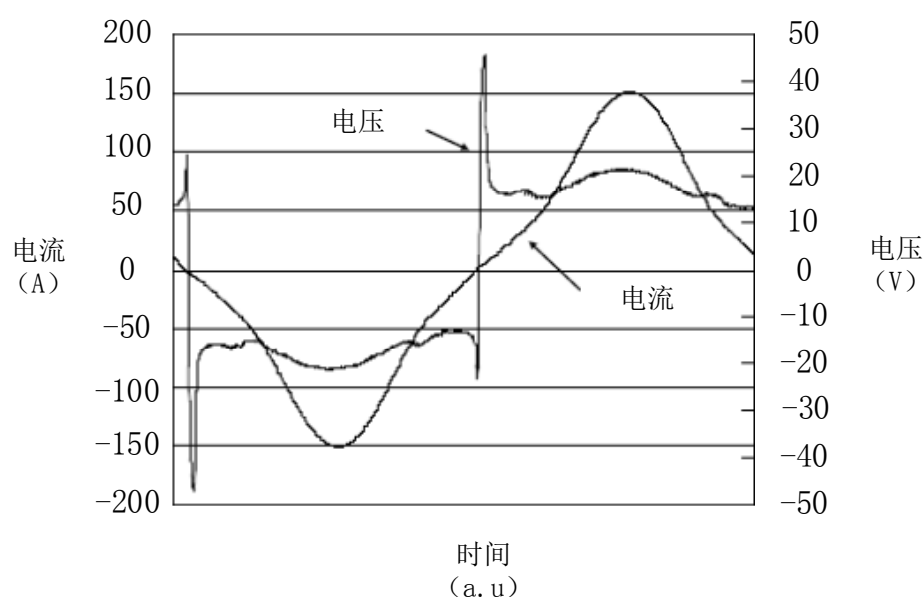


图 8 单相交流放电电压和电流的伏安特性曲线

Fig.8 The volt ampere characteristic curve t of single-phase AC discharge process

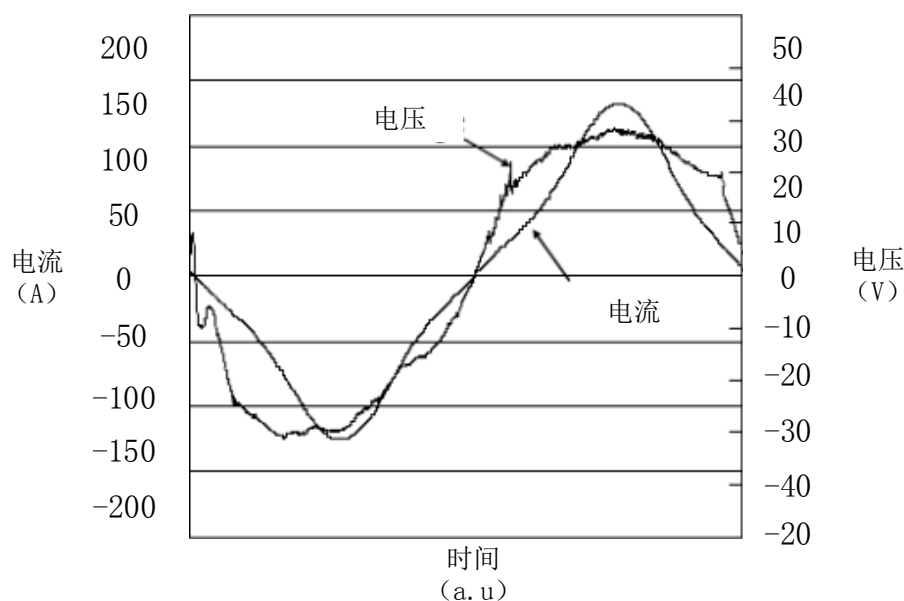


图 9 12 相交流电弧放电电压和电流伏安特性曲线

Fig.9 The volt ampere characteristic curve of 12-phase AC discharge process

本课题所设计的等离子体灶电弧放电实验装置启发于以上两种放电装置，主要区别在于放电的驱动电路和放电环境的不同。等离子体灶的放电电路是以零电压开关（Zero Voltage Switch, ZVS）为核心电路，通过升压电路进行引弧放电，并且等离子体灶放电环境为普通大气压下。

1.3 等离子体灶国内外现状及其发展的趋势

近年来，国内外的一些高校和研究组相继运用直流和交流多种驱动方式，配合各种各样结构的等离子体发生器，来进行大气压下低温等离子体射流和等离子体灶的研究工作，一些专家在关于等离子体高效节能燃气灶方面也取得了相关专利^[53-55]，图 10 所示为相关科技人员研发的等离子体燃烧装置。



图 10 等离子体燃烧装置

Fig.10 The combustion device of plasma

但由于技术难度较高、设备复杂和操作繁琐等限制条件，都未得到实际性的推广与应用。目前等离子灶具还处于萌芽阶段，国内外的一些高校和研究院对其研究和开发甚少，从目前的专利情况看，国内等离子灶具专利只查到了一篇，并且只对其特定的实验装置做了技术保护，在技术方面还有很大的挖掘空间。等离子灶具的研发公司也只有海弘农耀斑科技发展有限公司，并且也没有做出实际产品，还处于研发阶段。因为推动到高压包的升压电路有多种多样，并且发生器也有各式各样。

1.4 本论文的主要研究内容

随着科技进步发展，能源问题越来越迫在眉睫，为了让电能成为可再生的替代能源，并有效解决电磁炉和燃气灶的缺陷，本文设计以电能为直接能源的燃烧灶，设计了包括电源系统（主功率源、升压模块）、电弧放电主体部分（发生器模块）、数据采集系统、气体检测系统、热效率测量系统，图 11 为整个方案的系统图。

电源系统部分包括主功率源和升压模块部分，是整个实验装置的最核心的部分，为整个发生装置提供功率源。电源系统以 ZVS 为核心电路，通过推动高压包产生高压放电。通过对发生器结构的设计、搭建和调试等实验过程，并最终完成整

个等离子体灶的制作。并通过实验验证该等离子体灶的可行性和优越性。其他系统作为整个装置的辅助系统，为等离子体灶提供理论和技术基础。

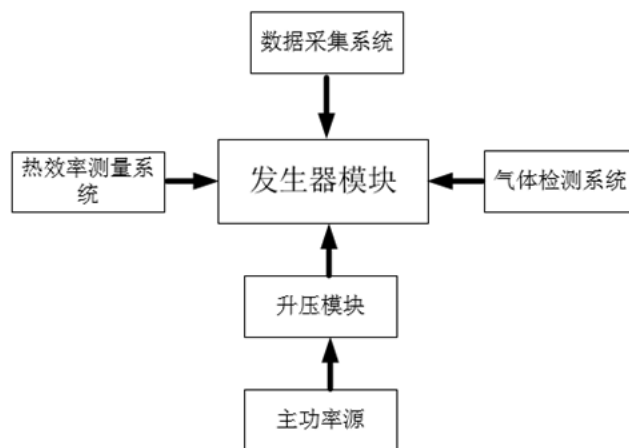


图 11 方案系统图

Fig.11 Scheme system diagram

本论文各部分的安排如下：

第二章对等离子体灶电源系统进行搭建。对主功率源、放电发生电路、升压电路等进行设计，并对单相放电电路的仿真分析以及多相放电电路设计。

第三章进行等离子体灶实验装置的设计，包括对发生器结构设计、电极设计、进气系统设计、不同材料的电极对比、电极固定板设计。根据不同结构发生器的优缺点，又展开了对实验过程中对等离子体发生器的升级改造过程，并确立了理想发生器的是实验模型。同时也进行了单相的放电实验分析，对比石墨电极与铜材电极的放电效果和烧蚀情况，进而获得该实验下的最优放电材质。然后进行八相交流电弧放电实验装置设计。

第四章主要对等离子体灶进行实验数据的测量，等离子体灶引弧放电实验过程中，通过有关知识和实验分析得出，放电的参数直接影响着有害气体的排放，讨论放电参数对产生 NO_2 影响，通过 ANSYS 对等离子体灶放电极构的有限元分析后，得出放电电极的电场分布，讨论电场分布对噪音问题的影响，不同电极间距对等离子体放电稳定性的影响，从而研究等离子射流不稳定现象的机理以及噪音产生的原因，并通过一系列的试验数据采集，得到输入直流电流电压和弧电流电压大小对等离子体射流的影响规律。对于所研制的新型燃烧装置，证明了其可行性之后，同样

的就是对其进行气体和热效率检测与分析。因为在该放电条件下，有可能还会产生其他有害气体。同美的牌电磁炉进行实验对比，比较两者热效率高低，从而发现现如今存在的问题，以至于更好的解决问题，提高等离子体灶的各方面性能。

第 2 章 等离子体灶放电装置电源系统研制

本实验电源是以零电压开关为基本电路。利用 AC-DC 主功率源将工频交流电转换为直流电压，提供给 ZVS。核心的控制思想是通过控制电路产生具备相应条件的脉冲高压，经由变压器输出端的高压极和接地极，通过发生器激发引弧放电。设计使用的等离子体灶电源系统，包含主功率源、升压模块（脉冲驱动电路、调节电路和升压电路）和多相放电电路。

2.1 电源系统主功率源

为了满足等离子体灶持续、稳定、可调的功率输入要求，根据开关电源的工作原理，选用了一种可提供稳定的电压电流源，即等离子灶主功率电源，如图 12 所示。该功率源不仅具有欠压保护和负反馈控制基本功能，而且还具有过压过流过温保护等功能。是等离子体灶的理想功率源。



图 12 主功率源

Fig.12 The main power source

1) 功率源体积小、效率高

传统的稳压电源都会有一个或多个很大的散热器，电源的体积就会随之增大，原因是稳压源的调整管是通过串联方式连接在电源输入与负载输出之间的，这样就会使得输入和输出电压差转换成了调整管上的热损耗。同时通过软开关等技术减小

了电源的开关损耗，使得功率源的转换效率高达 90%以上。

2) 自适应能力更强

等离子体灶主功率源实现转换能量的比例关系是通过调节其占空比来调整的，对于不同的输入电压和输出负载都能通过调节达到稳压输出的目的，因此该功率源能够在无论在电网突变情况下，或者在电网电压变动幅度较大和输出电压变动幅度较大下都可以安全稳定的工作。

3) 可产生所需求的输出功率

等离子体灶主功率源是一种电能转换装置，在其工作状态时，整体电路结构不变的情况下，就可对电流和电压进行双向调节，故可以产生变换的输出功率。这一输出特点迎合了所有用电设备变化功率的使用要求。

4) 输出稳定、安全

普通的稳压电源在输入和输出的电压差值较大的情况下，使得内部的功率调整管被击穿而破坏，导致输出端的电压突然变高，会造成输出端的负载损坏，以至于造成巨大的损失。但该等离子体灶主功率源在功率管损坏的情况下时，为了防止输出端出现过压和过流现象，主控制回路会发车停止作用动作，关断主输入电路。同时，整个控制回路为了能够充分的保护输出端负载，也设计具有过电流保护、过电压保护和跳载保护功能等，这对于设备和工作人员的安全都提供了保障。

综上所述，该功率源适宜作为该等离子体灶的稳压电源，也是一种性能优越的电能转换装置。在以往实验之前的 24V 和 1000W 电源的功率已经不能满足实验要求，因此在此基础上，我们对此做出了升级，在满足功率和各种性能要求下，该电源可以在 0-60V，0-84A 之间调动，更加方便了实验的采集数据工作。即可以通过电压电流旋钮调节，根据不同试验状态下的电流电压，计算输出功率等数据。

2.2 发生电路和升压电路设计

本实验电源是以 ZVS 即零电压开关为基本电路^[50-52]，电路和实物如图 13 和图 14 所示。利用了开关电源将市电 AC220V 转换成 DC24V，提供给 ZVS。核心的控制思想是通过控制电路产生具备相应条件的脉冲直流高压，再通过电子发射装置激发引弧放电。零电压开关的特点是无论在开关管关断和开关管导通时，开关管两端的电压都为零。因此使得其在开关瞬间的功率也为零，这样便可以实现较低的开关损耗。这种谐振电源普遍应用到我们日常生活中，例如 LLC 电源和电磁炉等。而其他的硬开关损耗要比这种谐振电源大很多，例如我们常使用充电器电源等。虽然

ZVS 具有高效率的优点，但是 ZVS 同样也存在一个缺陷，例如家庭中所用的电磁炉，当小功率加热使用时，就会出现断续的加热状态，很难让其稳定加热。只有把功率调到很大时，电磁炉才能持续加热。原因就是小功率加热使用时无法达到谐振状态。但是对于我们常用的充电器的那种硬开关的电源，无论是满载或者空载都可以达到持续震荡的状态。

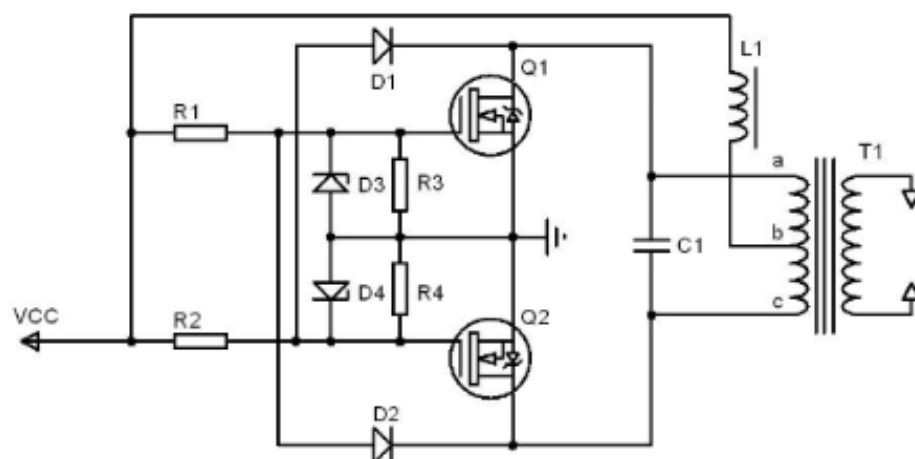


图 13 ZVS 基本电路电路图

Fig.13 The basic circuit of ZVS circuit diagram

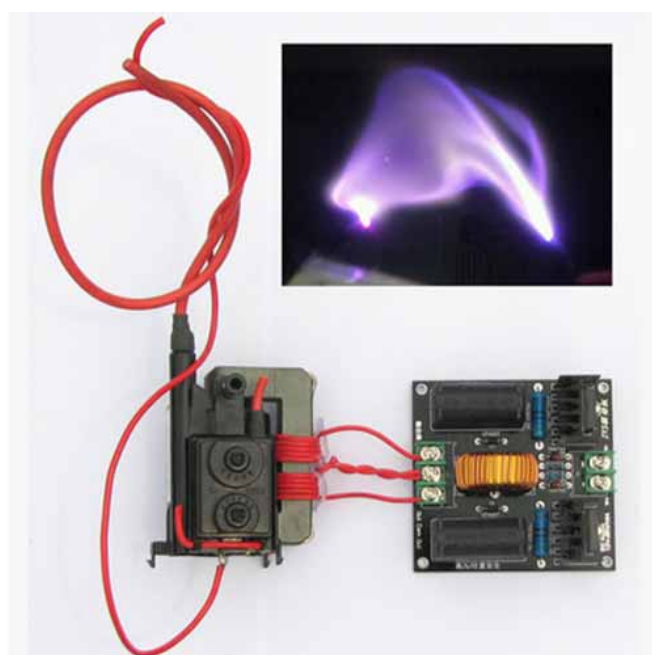


图 14 ZVS 实物图

Fig.14 The photos of ZVS

2.2.1 ZVS 电路分析

对 ZVS 升压电路的设计基础源于三点式电感振荡电路。根据图 13 的原理图可知，变压器初级端的电容 C1 和电感 L1 发生谐振作用，这便形成了典型的电感三点式振荡电路。由于变压器 T1 的初级线圈中存在中心抽头，所以可以将其可视为两个电感，因此电路中就存在了一个电容和两个电感。电路中的两个开关管，由于都满足“源同栅反”的条件，使得电压都是以正弦的规律来变化的。其中的电感 L1 起到一定的限流作用，可以防止电路的电流峰值过大，达到保护电路的作用。电路中的电阻 R1 和 R2 有着类似电感 L1 的作用，防止通入开关管 Q1 和 Q2 电流过大，造成电路损坏。而电阻 R3 和 R4 的是用来确保 MOS 管可靠关断的。通过对电路的振荡频率进行分析，可知该电路的振荡频率跟电感 L1 和电容 C1 有关的。该升压电路所产生的高频高压正弦波可以使得离子体灶发生器正常放电。对于升压电路的变压器 T1 来说，本次试验主要通过对高压包进行适当的变压器变比来实现安全可靠放电。

2.2.2 电路仿真分析

在研发过程中，通过仿真辅助设计来验证该方案的可行性，可以提高电路设计的成功率。首先对该电路做 protues 的电路模拟仿真，并得到 Interactive analysis 交互式图表分析图见图 15。仿真分析图中 VCC=15V，均采用与实验同型号的元器件，并放置 TR1 (S1)、C2 (1)、Q1 (D)、L1 (2) 电流探头与 TR1 (S2)、Q1 (Z)、Q1 (G)、Q2 (Z)、Q2 (G) 电压探头，图 4 为仿真电路图。

根据电路仿真可以得出，在 MOS 管进行状态转换时，对应的漏极电压基本为零，电路即实现“软关断”功能，达到了我们预期的设计要求。同时通过了这样一个谐振开关的发生电路，便将直流电转换为了高频交流电。该升压电路所生成的高频交流电通过高压包推动产生高频高压正弦波，通过等离子体发生器引弧放电，其中高频高电压不仅需要合适的匹配电路生成，更需要通过合适的变压器变比来实现。以往的电弧等离子体源将直流电转换成交流电需要耗费很大的能源，而且功率越大耗能也将会成倍增加。但该等离子体灶巧妙地运用了以上发生电路，大大降低了能源的浪费，并提高了整体效率。

该电路的振荡频率由电容和电感决定。计算公式为:

$$f = 1 / (2\pi\sqrt{CL}) \quad (1)$$

式中:

C —谐振电容 $C2$;

L —回路的总电感。

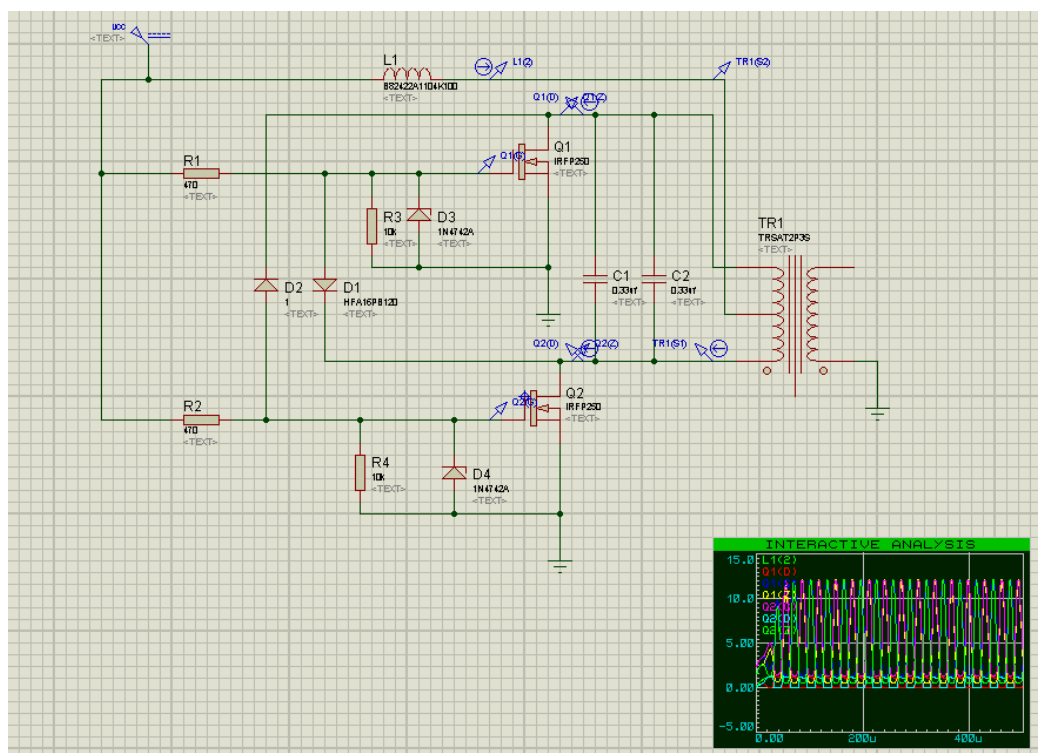


图 15 交互式图表分析图

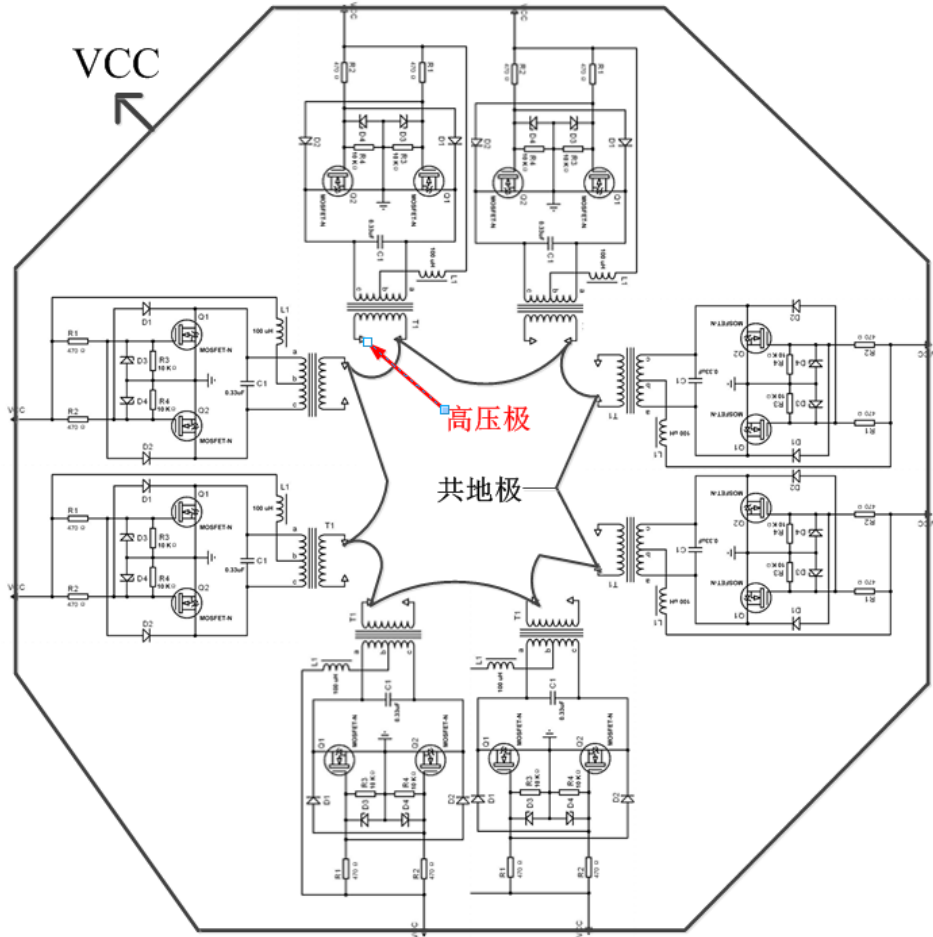
Fig.15 The Interactive analysis diagram

在该电路系统中,得出主电路工作的中心频率约为 40kHz,在稳定放电时脉冲幅度峰值最高可达 20kV,保证了等离子体灶在工作过程中可以减小电路的发热损耗,实现等离子体灶稳定可靠的工作。

2.3 多相发生电路设计

通过对单相 ZVS 进行放电实验研究,可以确定该电路下放电功率较小、等离子体射流短和易熄弧等缺陷。无法实现大体积等离子体束和大面积的燃烧。本实验装置的电源系统是以 8 个 ZVS 为主功率源,采用八个高压包分别为对应的 8 个电极提供高电压供电。

在单相交流电弧放电的基础上，增加到 8 相共同放电，电路如图 16 所示。同单相电弧放电相比，8 相产生的等离子体射流更加稳定，且功率也是单相的 8 倍之多，产生的等离子体射流长度和面积更大，在 8 相的基础上，如果实验需要，还可以扩充到更多相交流电弧放电。



备的核心，为等离子体灶提供功率输入。该电源系统以 ZVS 为核心，根据其特性，设计了发生电路和升压电路，同时为了优化整个电路系统，对单相电路进行仿真分析，通过对各参数进行研究，根据电流、电压和功率的输出条件，进行 8 相电路的设计，以至于合理搭配功率源和升压电路，产生我们所需的等离子体束。

第3章 等离子体灶放电装置系统研制

本章节主要进行等离子体灶实验装置的设计，包括对发生器结构设计、电极设计、进气系统设计、不同材料的电极对比、电极固定板和试验指设计。发生器按其结构可以分为尖端式（轴线式）和同轴式，按阵列方式，尖端式又可以分为分散式和共地式（共阴式），本实验先是对两种放电结构进行实验对比，确定了以尖端式为放电方式之后，又进行分散式和共地式的实验对比，最终以共地式为最终放电方式。考虑到了方便和经济型，电极固定板采用聚四氟材质。为了得到更好的放电效果，对铜材电极和石墨电极进行实验参数对比，针对其不同的优缺点和各自的特性，选取铜材为高压极，石墨为共地极。根据不同结构发生器的优缺点，又展开了讨论了实验过程中对等离子体发生器的升级改造过程，并确立了理想发生器的是实验模型。

3.1 发生器结构设计

电弧等离子体发生器是指能产生维持一定温度且输出稳定的等离子体发生装置。不同结构和不同放电方式的等离子体发生器对于所产生的等离子体特性有着决定性的作用，同时发生器的水平也决定了等离子体技术的应用水平。等离子体灶发生器包括放电电极、固定装置和供气系统。等离子体发生器按电极的阵列结构和电弧在发生器中的位置可以分为尖端式和同轴式，又可以将尖端式分为分散式和共地式。

3.1.1 电极设计

等离子体放电电极使用最为普遍的为针-针的电极结构和针-板电极结构。图 17 和图 18 分别为两种放电结构图。针-针电极结构是由两个尖端电极构成，两电极可以根据不同材质和实验要求一个针电极接接地端，另外一个电极接高压端。结构布置时通常会将两针尖相对，由于尖端的局部电场比较强，两针尖之间的间隙更易击穿，从而发生放电现象。这种电极的结构通常会运用到纳米材料的制备中和等离子体点火装置中。针-板电极结构是由一个尖端电极和平板电极构成，根据等离子体放电特性，通常会将针电极接高压端，平板电极接接地端，结构布置时通常会将针电极的尖端正对平板电极，通过击穿针-板之间的间隙，达到放电的目的。这种电

极的结构常用到对工件进行等离子放电加工中，针电极接高压端，被加工件作为接地电极，通过两电极间所产生的等离子体对工件进行烧蚀加工。

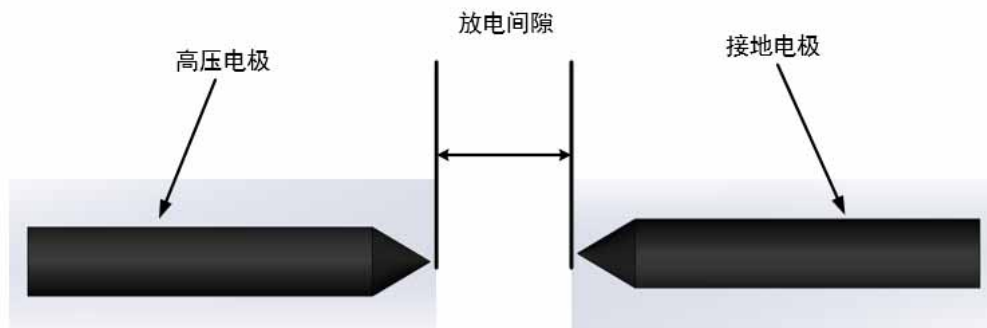


图 17 针-针放电结构

Fig.17 The needle - needle discharge structure

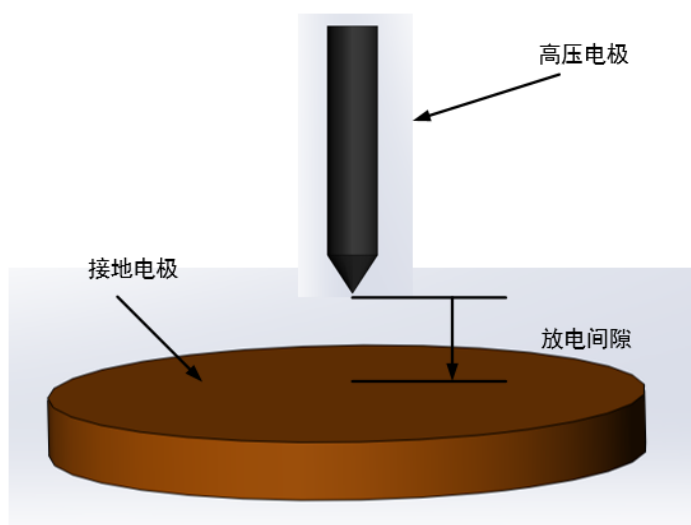


图 18 针-板放电结构

Fig.18 The needle - board discharge structure

目前，国内外对等离子体放电的推广和应用已有大量的报道，但是对等离子体放电相关的诊断却只是少量的数据。为了进一步探寻等离子体的放电特性，得到不同放电条件下的等离子体参数，所有放电都是在普通标准大气压下进行的，并将参数数据列于表 1。由表 1 可得到结论，对于等离子体放电的约束条件很少，并且放电频率、放电电压和放电电流的条件也是相当宽的，放电电压可以在几十 V 到几

万 V 范围内进行，放电电流可以从几 mA 至几十 A 内进行，其放电频率也可以从普通工频至上万 HZ 之间进行。因此，这么广范围的放电条件也会导致放电所产生的等离子体参数也是不尽相同的，对应不同的放电条件，其气体温度也是可以从 300 到 6000K 范围内变化。正是由于等离子体放电可以在不同放电条件进行以能够产生不同参数等离子体，使得等离子体放电技术可应用于各种不同的工作领域。

表 1 不同放电条件下的等离子体参数

Table 1 The plasma parameters under different discharge conditions

| 放电电极 | 频率 /kHz | 电流峰值 /A | 电压峰值 /kV | 电子密度 /cm ⁻³ | 电子温度 /eV | 气体温度 /K |
|------|------------|------------|-------------|------------------------------------|-------------|------------|
| 针-针 | 30 | 35 | 8.3 | 10 ¹³ ~10 ¹⁶ | - | 1000~6000 |
| | 0.05 | 20 | 5 | - | - | 400~800 |
| | - | 6~48 | 1 | 5·10 ¹⁶ | 0.7 | 2000 |
| 针-板 | - | 0.1 | 22 | 10 ¹³ | - | 300 |
| | 0.2 | 60 | - | 10 ¹⁷ | 1.5 | - |
| | 0.04 | - | - | (2~9) 10 ¹⁷ | 3~9 | - |

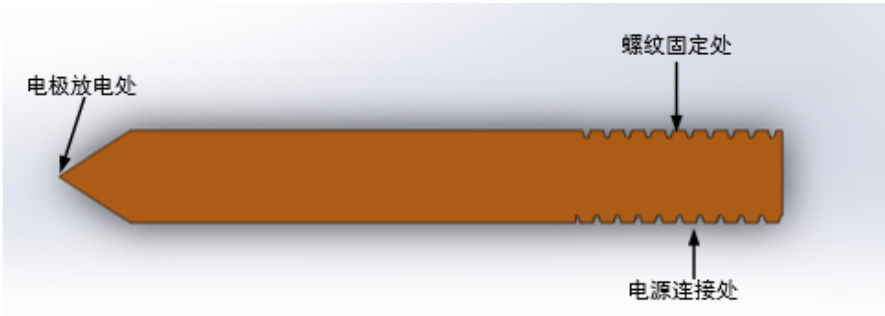


图 19 高压电极

Fig.19 The high voltage electrode

等离子体灶放电电极的结构选择为尖端放电形式，即为针-针式放电结构，放电电极分为高压极和接地极，高压电极结构如图 19 所示，接地电极结构如图 20 所示，高压极连接电路的高压端，接地极连接电路的接地端。根据其各自性能电极采用的是铜材电极和石墨电极。如图所示。每个电极通过电极固定板与高压包输出端

连接，接地电极通有进气管，用于通入气体，加剧等离子体放电反应，可以将等离子体束吹向外侧。

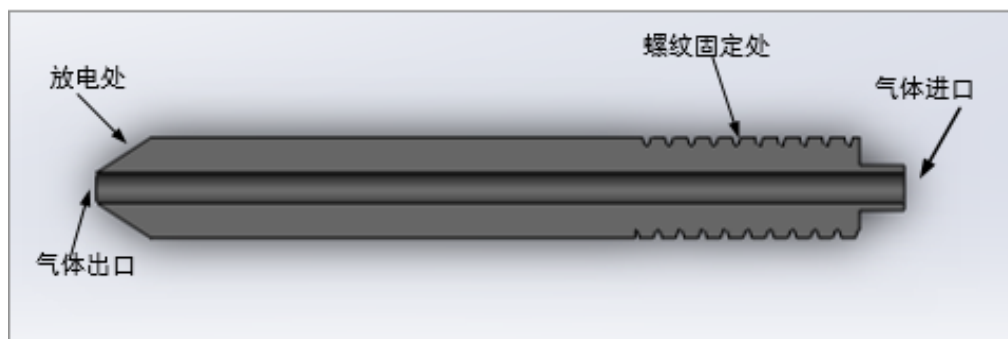


图 20 接地电极

Fig.20 The grounding electrode

3.1.2 铜电极与石墨电极放电性能对比

选择恰当的材料分别作为高压极和接地极材料可以有效的提升等离子体灶发生器的寿命和放电性能。纯铜和石墨都凭借其各自的放电优点，应用到不同的技术领域。纯铜具有的致密性高、方便加工和热传导率高等优点，而且其电阻率很低，是放电电极的理想材料。石墨属于一种非金属材料，与铜材有着类似的导电特性和热传导率材料，并且相比铜材有着更高的熔点，两种材料物理特性见表 2。

表 2 铜与石墨物理性能对比

Table 2 The comparison between copper and graphite

| 材质 | 体积密度 g/cm ³ | 熔点（气化点） ℃ | 热传导系数 w/mK | 电阻率 Ω.m | 热膨胀率 10 ⁻⁶ K |
|-------|---------------------------|--------------|---------------|----------------------|----------------------------|
| 铜 Cu | 8.9 | 1083℃ | 401 | 1.7×10 ⁻⁸ | 17 |
| 石墨 Gr | 1.8 | 3500℃ | 70~100 | 13×10 ⁻⁶ | 3~5 |

由上表中可以看出，石墨的气化温度可高达 3500℃，具有优良的耐高温特性，在放电过程中，高热使其损耗非常小，而且石墨具有一个优良的物理特征，损耗会随着峰值电流的上升而下降，且耐电蚀强度好，更适宜用于制备共地极。铜的导电性能更好，铜的损耗是随着峰值电流的增加而增加的，承受高峰值电流的能力较差，但铜的导热性能更好，所以更适宜作为高压极。

在放电的参数结构方面分析来看，铜材以大脉宽和小峰值电流的脉冲组合为结合方式。石墨相对于铜材相比脉宽很小，大脉宽对电极的损耗具有明显的抑制作用，所以铜材与石墨的电流损耗特性恰恰相反，如若石墨放电时采用较大脉宽放电，会出现负损耗的状况，原因是石墨材质的会因为脉宽减少而增加的损耗起到了一个相互弥补的作用，电极的负损耗太大的话会对材质造成极大的破坏，是我们不愿意看到的。在放电的初始阶段，材质的端面损耗可以根据参数的合理选择控制在0.2%以内，这种低损耗的状态基本可以视为无损耗放电条件。当材质处于中阶段和高阶段时，电极的损耗会随着脉宽条件的减小反而增大，由于石墨材料的选材不同，因此其制造工艺也不相同，通常将石墨分为若干个不同品种，不同类型的耐损耗性能也有很大的差别。石墨材质的等级划分是根据其内径来区别开来的，因此是石墨的损耗也与其组织粒径有直接关系，参考资料表明，石墨的粒径越小，其密度就越高，则耐损耗的性能也就越强。但石墨属于一种颗粒结构的物质，尖端处的颗粒会因为放电作用使其脱落下来，这种损耗也是我们经常遇到的，图 21 为铜材和石墨材质放电损耗图，可以清晰地看到，石墨材质的损耗基本上都是属于这种颗粒脱落而造成的。目前，用于放电电极的材质多为石墨和铜材这两大类，也是实验中最普遍应用的，但对于一些特殊的实验要求，可以选择钨作为放电电极，多为铜钨和银钨等。

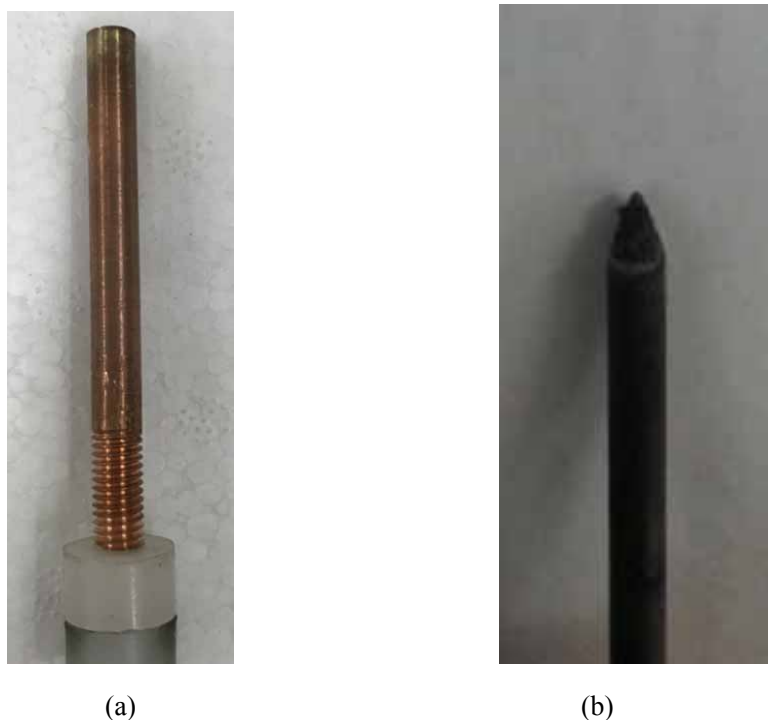


图 21 两种电极的放电损耗

Fig.21 The discharging losses of two electrode

根据放电的不同综合要求选择不同材质的放电电极，同时混用放电电极也能达到电极的性能互补。该实验所选择的石墨材质为网上求购的石墨棒加工而成，由于石墨是一种人工制品，其不同品种的放电效果也是不同的，在石墨的选用方面需要大量实验的对比，其中对于石墨材质放电性能的研究也在各国实验室火热的进行中，尤其是在国外一些先进的成型放电设备中，对是石墨的脉冲性能进行了大量的实验，例如日本 Makino 等公司曾设计出适益石墨放电的脉冲电路，具有超低损耗等特点。除了在对电路设计上，针对于石墨材质的研究方面，日本的公司也研制了许多优良性质的石墨，例如东洋碳素公司，曾先后研制了颗粒度很小的 TTK 系列放电专用的石墨材质，考虑到目前石墨比铜材具有更大的优势，今后的实验放电的材质有从铜材质转向石墨材质的趋向。放电的电极材料金属铜是一种纯度比较高的电解铜。从电极的组织结构方面分析，纯铜的晶体是连续性的组织结构，相比石墨具有致密性高和可塑性强等放点优点，而石墨的组织结构呈颗粒状，结构中存在着大量的微细空间，相比铜材热膨胀系数较小。由于石墨是颗粒组织结构，因此其组织不具连续性密度比较低质地偏硬呈脆性、而且铜电极机械结构也更加稳定。因此本文决定采用铜为高压电极材料，石墨为共地电极材料。

3.1.3 电极固定板与试验指设计

每个电极通过固定装置按照合理分布方式阵列，高压放电易导致各电极的物质被击穿，所以对各电极的固定材料需要有一定的绝缘强度，为了满足电极固定板的材料和工艺需求，同时考虑到了实验加工的方便与经济性，最终采用聚四氟为材料的电极固定板如图 22，配对的每个电极带有螺纹，可与电极固定板固定，并可以调节各电极高度。但聚四氟板并不具备耐高温的特性，所以无法满足长时间的放电要求。

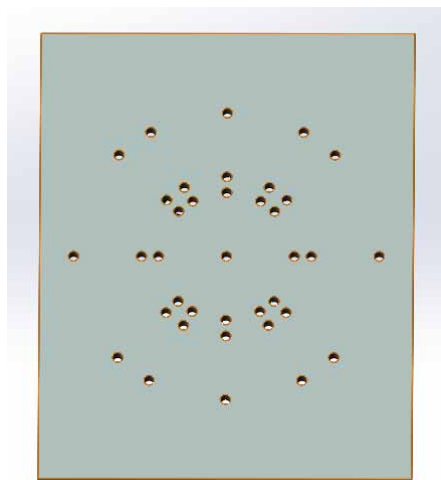


图 22 电极固定板

Fig.22 The electrode plate

在进一步的实验过程中，为了保证具有一定的防触电的保护性能，尤其是在放电过程中需要对工件进行移动和调节以及后续实验中对等离子实验测量的时候，都需要对试验锅进行抓取和移动，这种工具称为试验指，试验指按图 23 加工，试验指应不能碰触到带电部件，除了部分绝缘部位外其余地方都为金属材料。

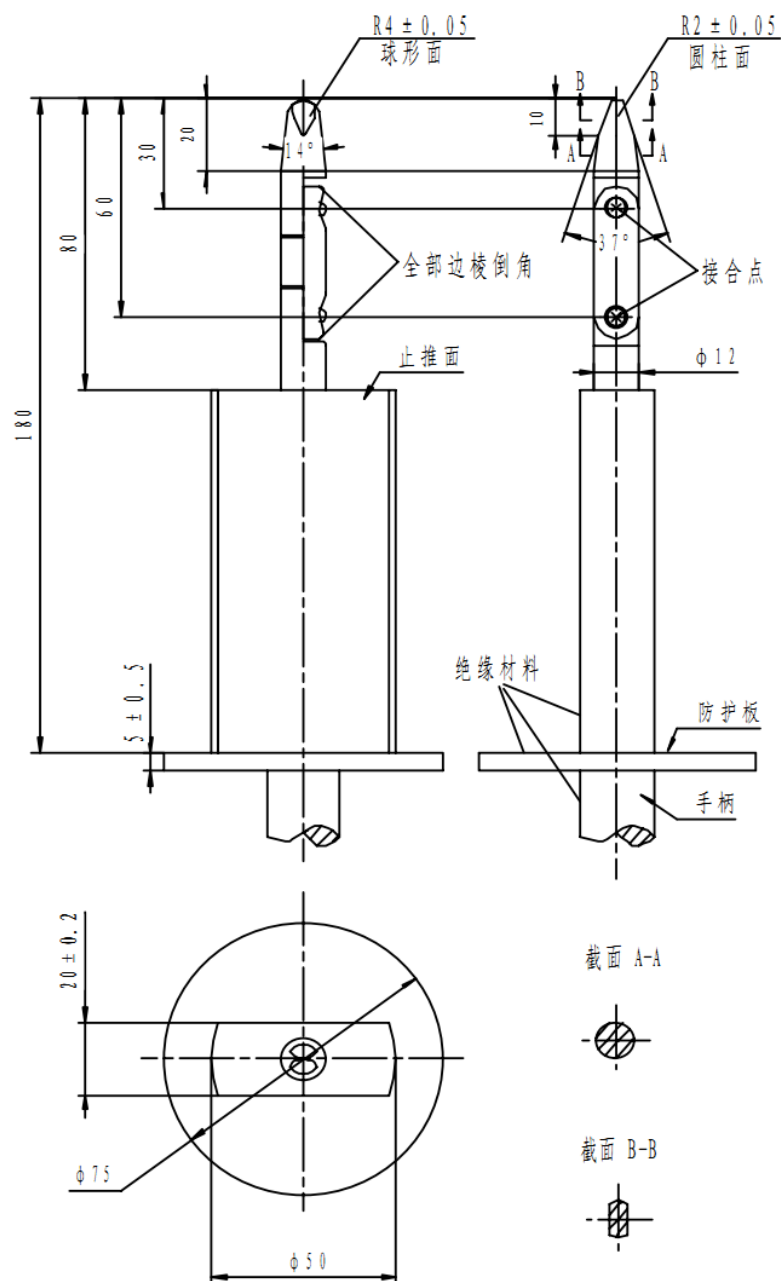


图 23 试验指工程图

Fig.23 The engineering drawing of test finger

3.2 发生器结构优化

等离子体灶的核心部分一个是电源系统，另一个就是发生器。发生器的合理与否直接影响着放电效果，甚至是实验的成功与否。所以实验过程中，不断地对等离子体灶发生器进行升级设计，实验初期，我们选择单相电路的同轴发生器，由于放电电极只有一组，功率不足 100W，使得获得的等离子体束很小，难以实现所要求

的大功率且大等离子体束放电。即使阵列多个同样的发生器，也很难形成均匀且类似火炬的大等离子体束。在后期的实验中，放弃同轴式等离子体发生器设计方案，改为尖端式方案。

3.2.1 同轴发生器

图 24 为实验初期所设计使用的同轴等离子体发生器剖面图，考虑到了加工方便与经济性，阴极选用铝材，阳极选用铜材，并可以通过同轴塞调节上下的高度。同轴塞选用具有一定的绝缘特性的聚四氟材质，并带有进气孔，通往空气泵，作用于等离子体电弧上，可以将内部的等离子体束吹出，从而获得足够大的等离子体束。高压电极与接地极间平行且留有一定的间隙，通过调节高压极相对于同轴塞的高度，从而调节高压极与接地极的放电相对位置。

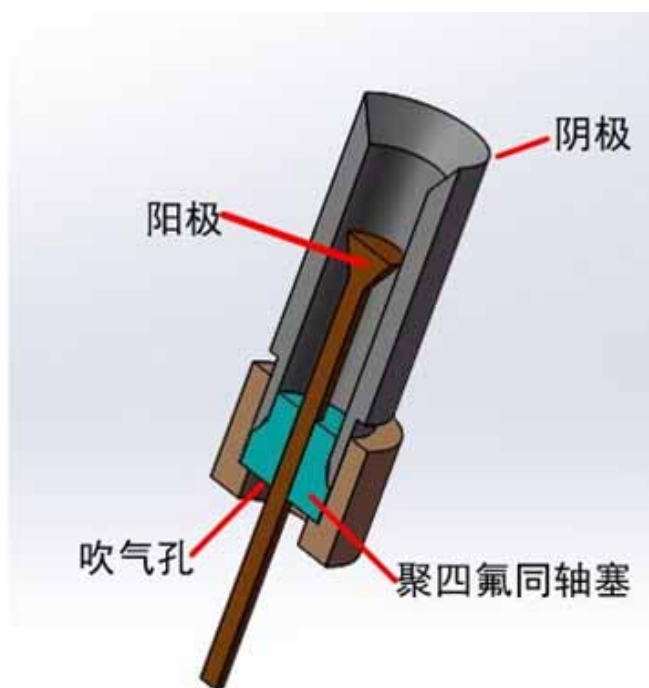


图 24 同轴等离子体发生器

Fig.24 The coaxial plasma generator

通过大量的调节与实验，确定在该等离子体发生器下很难形成我么预期效果。原因是在该电路的驱动条件下，高压极与接地极间的放电位置在两电极的电场强度最集中的位置发生，难以形成一定范围面积的放电，并且无论如何调节实验参数，放电功率始终在 200W 之内，不能满足大功率的试验要求。通过这个失败的实验，得到的最重要结论就是，在该等离子体灶的驱动电路条件下，要想实现足够强的等

离子体束，必须通过增加放电电极的间距和增大放电功率，所以这种结构的放电方式被遗弃，最终选择尖端式。

3.2.2 尖端发生器

尖端发生器可以分为分散式与共地式。图 25 为实验初期的共地式发生器。实验中 4 个 ZVS 系统的阴极（接地极）相连接集中于中间，高压电极阵列于阴极四周。可以清楚地看到，等离子体束最大可达到 130mm 长，此时功率为 800w 左右。为了进一步提高实验效果，改变了阵列结构，将共地式改为分散式，如图 26 为分散式放电结构。实验中采取六个阵列的 ZVS，每个 ZVS 独自成为放电单元，阵列于一个圆周上，放电过程中电极周围所产生的电场磁场会对其他放电电极产生影响，并且相互干扰大，熄弧现象明显，图 27 为放电过程中的熄弧现象，所以很难实现共同引弧放电，也很难形成一整团等离子体束。所以，分散式这种放电方式也被放弃。

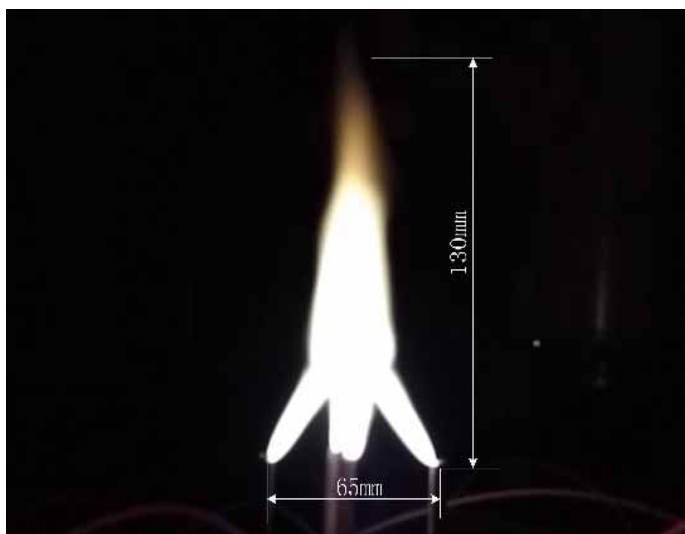


图 25 4 相交流放电过程中的效果图

Fig.25 The effect of 4-phase AC discharge process

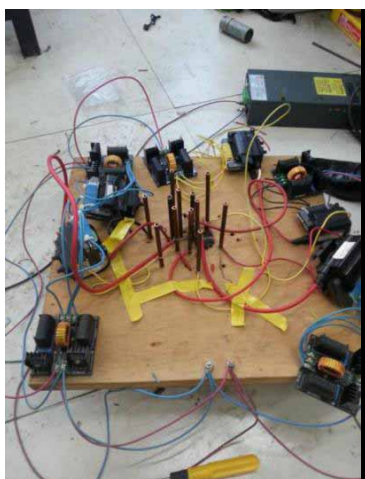


图 26 6 相等离子体灶发生器结构图

Fig.26 The Structure diagram of 6-phase plasma oven generator



图 27 6 相交流放电过程中的效果图

Fig.27 The effect of 6-phase AC discharge process



图 28 8 相等离子体灶的发生器结构图

Fig.28 The Structure diagram of 8-phase plasma oven generator

经过多次调试，最终实验决定采用共地式放电方式，图 28 为实验中期的共地式放电结构，实验中 8 个 ZVS 系统的接地极相连接集中于中间，选用石墨为放电材质，高压电极选择铜材为放电电极材质，阵列于阴极四周，各电极通过固定螺母与电极固定板相连接，电源线从点击下方引入，电极可以自由调节高度。

3.3 理想发生器模型设计

经过大量的设计与试验，加上各方面的改进，最终确立了一种由低电压输入的脉冲调制电路驱动等离子体灶发生器的放电装置，即等离子体灶模型如图 29 所示，等离子体灶内部结构如图 30 所示。等离子体灶模型同现有的放电装置有了很大的改进，具体方案和创新点如下：

1) 高压电极改变角度，使其在空间有一个向上的角度。通过大量的实验分析发现，尖端放电的放电位置发生在两个电极电场密度最集中的部位，而且如果两电极放电位置不是两电极相对距离最近的位置，就会发生放电偏移现象，也会导致放电不稳定，甚至导致放电终止。因此放电电极在安装过程中，可以让高压极倾斜于平面有一个向上的倾角，以至于可以使高压电极与接地极尖端共对，拉近两者的相对距离，可以大大提高放电稳定性和改善射流现象。同时灶内布有隔绝板，用来降低放电过程中的共用同道现象。

2) 阴极和高压极的尖端设计不相同，根据图 30 可以看出，高压极可以采用圆锥结构，中间的电极采用稍微复杂一点的结构，比如类似狼牙棒的结构，在电极上制作若干个尖端，以利于它与周围高压电极间的放电，电场的分布也会更加合理一些。实验中发现，放电过程中有通道共用现象，即多相放电混为单相，这也是放电不稳定的一个因素之一。

3) 共地极放电时，地极温度要比高压极高很多，实验中发现单纯靠接地极的通风通道很难形成理想的电弧射流风貌，所以要在地极下方安装铝制散热片，并在下部加装散热和鼓风风扇，即通过图 30 的散热风扇，来进行底部进气，来实现电极中心和周围同时进气，以控制电弧高温区的分布和整个合成电弧射流的形貌。不仅对于灶体散热有一定帮助，而且可以提高整体热效率。

4) 将电源系统与放电装置系统集成化，不仅可以减少整个等离子体灶的体积，也可以实现方便控制的功能。可以通过图 30 的调节旋钮就可以控制大小火候。

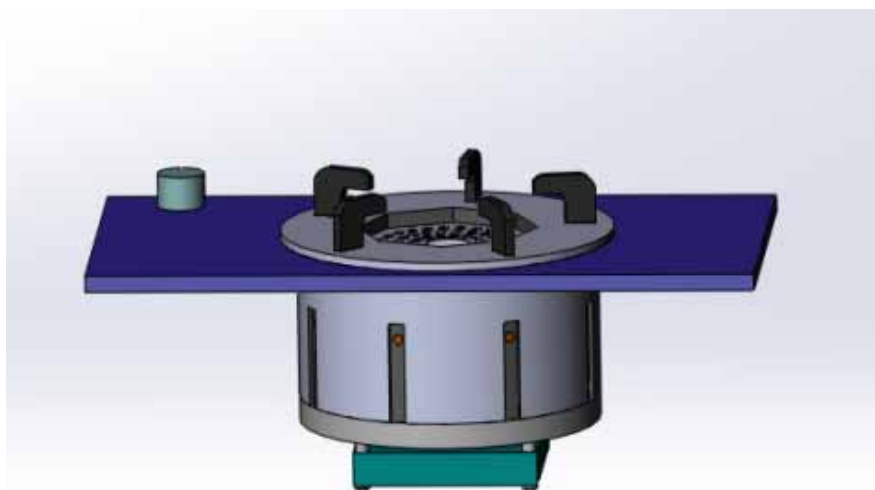


图 29 等离子体灶模型

Fig.29 The plasma oven model

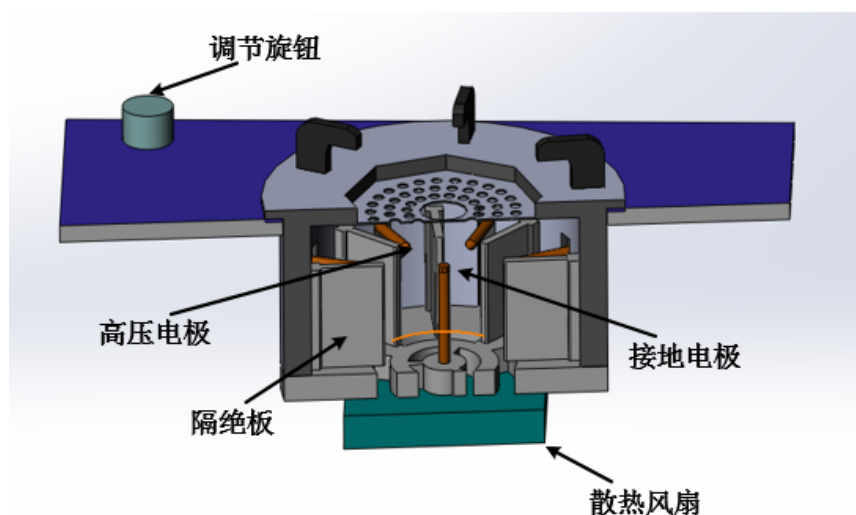


图 30 等离子体灶模型

Fig.30 The plasma oven model

3.4 本章小结

本章节进行等离子体灶实验装置的设计，说明了不同发生器的结构的特点，以及各自放电特性，在确定使用尖端放电结构为等离子体灶的放电结构之前，对同轴式也进行了大量的设计和实验，并最终决定实验采用共地式放电结构。放电实验过程中高压极连接电路的高压端，接地极连接电路的接地端。通过大量的实验和文献

所知，由于石墨材质相比铜材有更好的耐高温和导电性能等，因此本文决定采用铜为高压极材料，石墨为共地极材料。电极固定板采用聚四氟材质，后期试验的电极固定板可以采用耐高温、绝缘性强的材质，例如陶瓷等材质，实验效果会更好。为了弥补现阶段设备的不足之处，最终确立了一种由低电压输入的脉冲调制电路驱动等离子体灶发生器的放电装置即等离子体灶模型，它在现有发生器的基础上，进行了大量的改进，其中包括高压电极改变角度，使高压极倾斜于平面有一个向上的倾角，以至于可以使高压极与接地极尖端共对。阴极和高压极的尖端设计不相同，以利于它与周围高压电极间的放电，同时对灶体底部和电极中心同时进气，来控制电弧高温区的分布和整个合成电弧射流的形貌。

第 4 章 等离子体灶放电特性实验研究

本章对等离子体灶实验测量系统进行了搭建，以及一些特性参数的测量。包括输入电流电压大小和放电电流电压大小对等离子体射流的影响规律，放电参数对产生 NO_2 影响，电场的分布对噪音问题的影响，探讨了放电不稳定的因素，和一些相应的解决方法。实验过程中，分别对不同参数下的放电进行信息采集，总结出不同电极的间距对等离子体射流放电稳定性的影响。通过对比等离子体灶与普通电磁炉两者热效率，总结现状下的等离子体灶的不足和待改进之处。并在等离子体放电过程中进行气体测量分析，探讨等离子体灶的气体排放标准。并最终证实等离子体灶的可行性和优越性。

4.1 电流和电压大小对等离子体射流的影响规律

接通电源，开关电源的电压调节旋钮从零开始调节，当输入直流电压值为 $0\sim 14\text{V}$ 时，未见任何放电现象。当电压增加到 15V 左右时，便可以实现引弧放电，不断增加电压电流，功率随之增加，反应更加剧烈，等离子体束越大，放电效果越明显。当达到该电路的额定功率时 1800W 时，停止继续增压。在这个过程中，对不同电压电流的放电数据进行采集。如图 31 和图 32 为分别在 5 组不同输入直流电压情况下捕捉得到的电弧射流形貌。



(a) 15V 20A



(b) 18V 30A



(c) 20V 40A



(d) 25V 50A

图 31 不同输入电压和电流的放电效果图

Fig.31 Discharge effect of different voltage and current

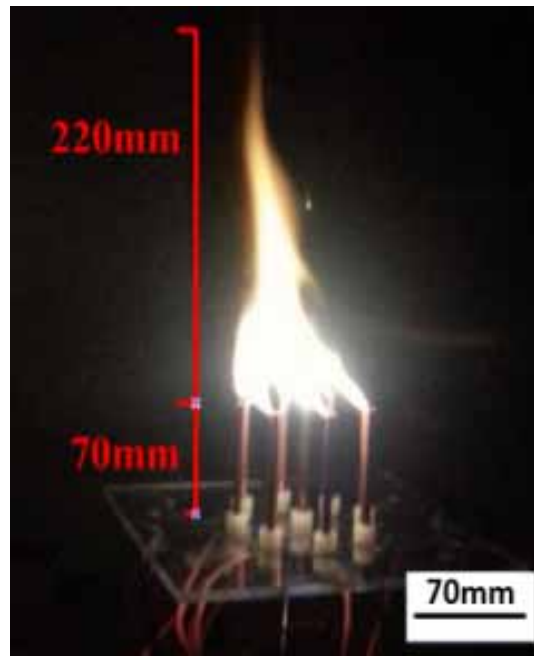


图 32 等离子体灶的最大功率放电效果图

Fig.32 The discharge effect of plasma oven with maximum power

实验发现，电弧电流的大小和系统输入的电流和电压的大小直接影响着等离子

体射流长度。在放电过程中，数字示波器的电流探头选用 300:5 的交流互感器，将高压探头置于输出电路系统的高压端，接地引脚接接地端测量放电电压。获得了在输入电流为 20A、30A、40A、50A 和 60A 情况下的放电电流电压的有效值，由于示波器无法同时捕捉得到 8 相输出端的数据，并且每相放电电路均为并联结构，即将捕捉得到的电流有效值的 8 倍视为总的弧电流，得到等离子体束与电压和电流之间的关系见表 3。从图 32 可以观察到，该等离子灶放电系统所产生的等离子体射流长度最大可达到为 22cm，火焰覆盖面积可到达 0.14m²。

表 3 等离子体束与电压和电流的关系

Table 3 The relation between the plasma beam and current and voltage

| 等离子体束 mm | 30 | 70 | 120 | 160 | 220 |
|-----------|------|------|------|-----|------|
| 输入电压 V | 15 | 18 | 20 | 24 | 30 |
| 输入电流 A | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 弧电压有效值 kV | 19.6 | 20.1 | 20.5 | 22 | 24.3 |
| 弧电流有效值 mA | 13.4 | 24.4 | 36 | 48 | 68.6 |

通过数据分析可知，等离子体束的长度会随着放电的电压和电流的增大而变长，同时可以通过调节输入直流电压控制等离子体灶的放电电流和电压。这是由于等离子体中的高能电子会随着输入功率的升高而增加，放电脉冲的强度和数量也会随之增加，导致射流长度变大即等离子体束变长。实验过程中，输入功率最大可达到 1800W，同时可以获得 220mm 理想长度和功能的等离子体束，且具备同火炬一样的燃烧与加热功能。

4.2 放电参数对产生 NO₂ 影响

电弧放电会产生微量 NO₂，具有特殊的甜味，该气体不溶于水。属于毒性气体，一旦人接触到的二氧化氮的浓度超过 150mg/m³，一段时间后会恶出现恶心、咳嗽和身体乏力等中毒现象。但是氮氧化物在许多应用技术上也是必不可少的，例如常见的电镀加工、染剂色料的制作、油漆加工和采矿过程中。对于不同的工作场合，二氧化氮的允许范围也是不同的。同样，该等离子体灶作为一种家用和工业使用的燃烧装置，尤其是操作人直接接触的设备，更应该避免或减少 NO₂ 的出现。所以，如果能在等离子体灶放电过程中，仅仅通过控制电弧放电的一些参数，就可以减少或者抑制等离子体灶放电过程中 NO₂ 的产生，对于等离子体灶实现推广和

使用具有重大的意义。对于等离子体放电参数的研究方法有很多，最为普遍的有探针法、激光法和光谱法等等^[56]。以上方法都仅仅对实验过程中进行测量和分析，存在一定的局限性，也只得到几个参数或参数量的大小，却无法提供放电过程中部分参数和全部参数的变换过程。因此，本文通过 ANSYS 软件分别对不同电压电流和不同弧长的等离子体温度场进行简单分析，通过理论数据得到等离子体灶在普通大气压下放电电弧 NO₂ 产生的原因，为在该系统下电弧放电以及等离子体灶技术提供科学的理论基础和根据。

放电电弧产生 NO₂ 的原因主要涉及到等离子体性质层面，放电电弧所产生的热平衡等离子体中存在非热平衡等离子体，也就是热等离子体中掺杂着冷等离子体。同时，热平衡等离子体在局部范围内温度分布不均也是造成电弧放电产生 NO₂ 的原因。本节主要从热等离子体局部范围内温度分布不均的方面，分析放电参数对产生 NO₂ 浓度相关问题。通过软件对电弧等离子体数值模型进行分析时，进行了如下的基本假设：

- 1) 放电电弧是连续、对称和稳定的。
- 2) 放电电弧的流动处于层流状态。
- 3) 放电电弧是处于局域热动态平衡(LTE)的。
- 4) 放电电弧辐射重吸收相比于总辐射损耗，是可以忽略不计的，即假设放电电弧是光学薄的。
- 5) 由于电弧的粘性效应，电弧的热损耗也可以忽略不计。

电弧放电模拟结果显示，高压电极的电流密度和接地极的电流密度与电弧弧长有关，高压电极上的电流密度大小随着电弧弧长的增长而变大，相反，接地电极的电流密度会随着弧长的增长而减少。在电弧弧长的增大的同时，放电电弧的局部温度场分布差异性和分布不均匀性也变得特别大，而且弧柱的边界温度也会随着电弧增长越来越高。所以，实验中可以通过增加电弧放电电流的方法，通过控制电弧弧柱的最低边界温度在某个适当范围之内。来抑制或减少在等离子体灶放电过程中 NO₂ 的生成。

4.3 电磁场对等离子体射流的影响规律

实验中最大的问题就是伴随放电随之产生的噪音，放电噪音是由于放电不稳定所造成的。在等离子体灶放电过程中，各电极间放电会出现共用放电通道现象，也就是说，每一个高电压和阴极都不能单独分离成一个放电通道，而是混入其他放电

通道中。这也可能是引起噪音的原因之一。

通过麦克斯韦方程组（Maxwell）可以对电磁场理论进行描述。科学领域上对所有电磁学问题的研究就是对麦克斯韦方程组进行研究，同时麦克斯韦方程组也是解释所有宏观电磁学现象的科学根据和一组基本方程^[57]。其中包括对电磁学现象等的验证和求解。麦克斯韦方程可以通过积分形式或者以微分形式使用，本节主要运用它们的微分形式。针对于普通的时变场，可以通过 Maxwell 方程组写成以下形式：

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{法拉第定律}) \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (\text{麦克斯韦—安培定律}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{高斯定律}) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{磁场高斯定律}) \quad (5)$$

式中：

\vec{E} —电场强度，V/m；

\vec{D} —电位移矢量，C/m²；

\vec{H} —磁场强度，A/m；

\vec{B} —磁感应强度，Wb/m²；

\vec{J} —电流密度，A/m²；

ρ —电荷密度，C/m³。

另一个方程为连续方程，它表示电荷守恒，写成：

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (6)$$

式（2）~（6）中只有其中三个是独立方程，其他两个方程可以从三个独立方程中导出，则被称为相关方程或辅助方程。其中前三个方程式或者前两个方程及最后一个方程，都可被选作这种独立方程。

因为麦克斯韦方程组当中存在三个相互的独立方程，而其他两个方程可以看成辅助意义的方程，由于未知量的个数大于独立方程的个数，因此三个相互独立的方程便以不定解的形式存在。但是当场量之间的本构关系被确定之后，无解的

Maxwell 也就成为了有解的形式。对于简单媒质，它们是：

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (7)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (8)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (9)$$

式中：

ϵ —介电常数，F/m；

μ —磁导率，H/m；

σ —电导率，s/m。

当对电磁场进行计算的时候，通常会把电场变量和磁场的变量分开去计算，只有这样，问题才能得到简化，化简运算之后，会得出一个磁场偏微分方程和另一个独立的电场偏微分方程。其中两个量一个标量电势 ϕ ，另一个是矢量磁势 A ，其中对于两个量有如下的定义：

标量电势有如下定义：

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (10)$$

矢量磁势有如下定义：

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (11)$$

通过式（10）和（11）所给出的标量电势能和矢量磁势，可以通过计算可知两个量是符合法拉第电磁感应定律和高斯磁通定律的，如果继续将这两个电磁定律与安培环路定律和高斯电通定律相结合运用，就会得到电场和磁场的偏微分方程如式（12）和（13）所示：

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad (12)$$

$$\nabla^2 \phi - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\sigma} \quad (13)$$

式中：

∇^2 —拉普拉斯算子。

式(12)和(13)具有相同的表达形式,两者是相互对称的,对他们的求解的方法也是相同的。通常可以采用有限元法,将两个方程进行化简求解,从而可以得出磁势场和电势的场分布值,最后可以通过对其处后续理,解得储能和磁感应强度等电磁场物理量。

通过对等离子体灶放电装置的电磁场仿真分析中得出结论,造成放电不稳定和放电噪音这种现象的原因是放电电极产生的电场相互干扰,或者周围的气流干扰。在放电电场是一个不均匀的电场时,或局部电场的分布不均性增加时,最大的电场强度要相比周围平均电场强度高很多。所以在不均匀电场的存在下,气隙被击穿时电场的极性效应表现的更加明显,就会有较长的放电延迟现象出现。电弧的脉动推动了空气的振动,从而导致噪音的产生。该电路的驱动频率在 30kHz~50kHz 之间,电源的驱动频率可能会对放电的稳定性产生影响,但电源频率与电弧脉动的频率一般并不相同。需要进一步试验去调整电源驱动频率以及发生器的结构。

4.4 不同电极间距对等离子体灶放电稳定性的影响

电极的不同放电间距,所需要的击穿电压和功率也是不同,维持稳定放电的电流也是不同的。实验中发现电极的间距增大后,等离子体灶的 8 相电极共同放电转变成了各相轮流的不稳定的放电,当把 8 相改为 6 相放电时,可有效改善这种情况,这说明功率不足也是造成等离子体灶放电不稳定的原因之一。

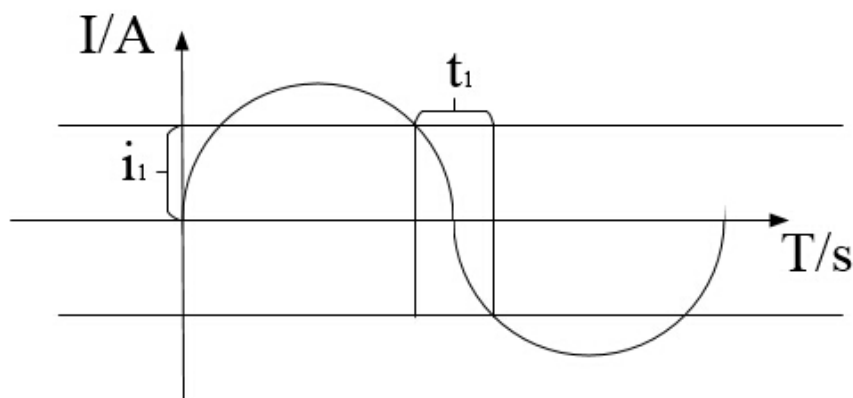


图 33 等离子体灶放电过程中电流与过零时间的关系示意图

Fig.33 Diagram of the relationship between the current and the zero crossing time in the plasma oven discharge process

等离子体灶放电输出的是交流电,根据交流电的特点可知,电流会从零点开始到达最大值,在反向达到零点,不断循环这个过程。因此每相电极间都在完成起弧

-熄弧-又复燃的循环过程。在放电过程中，等离子体射流会随着两放电电极的间距增加变得更大，如图 33 所示，放电电流 i_d 也会跟着增大，对应的过零时间 t_1 也随之增长，使得放电电弧在电流过零的瞬间，还没有完成电弧重燃这个阶段，导致电弧熄灭。当放电电弧长度较小时，所需要的电流 i_d 也会随着减小，对应的时间 t_1 也就缩短了。电弧在电流过零的时候能够完成重燃，电弧就不会熄灭。

因此等离子体放电出现脉动的现象也是造成放电不稳定的因素之一，这也是为什么交流放电在早期并没有得到大量关注的原因。除了增加输入功率外，也可以缩小两放电电极之间的间距，都可以改善放电不稳定的和脉动现象。

4.5 气体检测分析

等离子体灶在放电燃烧过程中，会伴随产生很多有害气体，其中包括 NO_x 、CO 和臭氧等。所以需要气体分析仪对实验中火焰周围的气体进行测量，同时实验严格要求气体排放量即 CO 排放在 60ppm 以下， NO_x 排放总量在 60ppm 以下。

4.5.1 气体检测方案

具体步骤如下：

- 1) 将灶具打开并调节至最大功率。
- 2) 将罩子罩在灶具上面，见图 34，使灶具火焰位于其几何中心。
- 3) 使灶具稳定运行 20 分钟后，使用测量分辨率不低于 2ppm，且相对精度不低于 5%的相应气体测量仪，并按相应正确使用方法测量图中所示目标点相应气体浓度。
- 4) 每五分钟读数一次，连续计数 10 次，分别计其测量浓度为 C_1 、 C_2 、 C_3 C_{10} 。
- 5) 在罩子的四个侧孔中心处再分别测量浓度，记为 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{14} ，四个罩子为宽高均为 50mm 且沿周围均匀分布的方孔。
- 6) 求各数值平均值，计为检测气体的平均浓度 $C_{均}$ 。
- 7) 将 $C_{均}$ 与 C_1 、 C_2 、 C_3 C_{10} 各项数据对比，若全部数据与 $C_{均}$ 的差值都在 10%以内，则认为 $C_{均}$ 有效。
- 8) 再把 $C_{均}$ 的均值作为最终测量数值 $C_{测}$ ，否则回到第 1 步重新测量直到获得符合要求的 $C_{测}$ 。

等离子体灶目前还处于开发状态，考虑到经济和方便性，用于测量氮氧化物的

仪器为 XLA-BX-NOX 便携式气体检测仪，是全新的一款检测仪，图 35 为气体检测仪的实物图，该检测仪广泛的应用于冶金、化工、制药和汽车尾气等各个领域。用于测量部分常见气体的仪器为普通的工业煤气报警仪，主要用于检测硫化氢、臭氧和氨气。

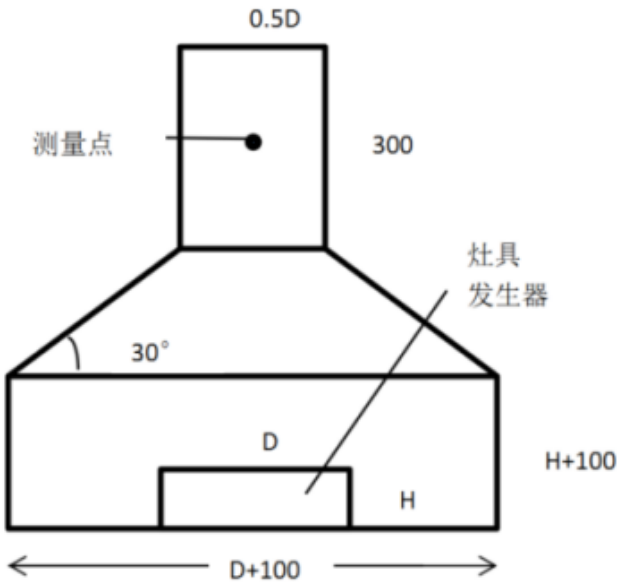


图 34 罩子安装方法

Fig.34 Cover installation method



图 35 气体测量仪

Fig.35 The Gas detector

4.5.2 气体检测结果

在放电功率为 2000W 时，即为最大放电状态，来进行气体测量，实验中，将气体分析仪的测量口分别放入罩子的测量口，按照具体气体检测方案操作，并明确记录测量值。测量结果显示，氮氧化物主要是 NO₂，浓度为 6.50ppm，O₃ 值为 1.45ppm，未检测到 CO 和其他有害气。

数据显示，所测气体排放量的测量值都在要求值之内，了等离子体灶在气体排放方面达到了国际灶类排放量标准，更加证明了等离子体灶的可行性和研究的意义。

4.6 热效率测量与分析

对于所有的加热装置，输出功率都会小于输入功率。对于等离子体灶和燃气灶来说，真正意义上的使用功率又会小于输出功率，不同的加热方式，效率损失又会很大，所以有必要对等离子体灶和电磁炉进行数据对比。

4.6.1 等离子体灶的热效率测量方案

1) 选择与灶具加热面积尺寸匹配的锅架，并置于灶上，热效率实验装置安装方法，见图 36。

2) 点燃燃烧器并调整到合适状态。

3) 用金属锅装水并置于锅架上如图 36，水的初始温度取室温多 5℃，截止加热温度定为水初温多 30℃。加热过程中，当水温在设定的初始温度前 5℃时就开始搅拌，使水的温度分布更加均匀，减小测量误差。当水温到达初温即开始计时，当水温比初始温度高 25℃时再开始搅拌，同样也是为了减小测量误差。当水温达到截止温度时关闭灶具，不断搅拌后测量水温，所达到的最高温度作为最终温度。并通过式（14）计算实测热效率。

$$\eta = M \cdot C \cdot (t_2 - t_1) / P \quad (14)$$

式中：

t_1 —水初温；

t_2 —水最终温度；

M —被加热的水的质量，kg；

C —水的比热容；

P —输入功率，W。

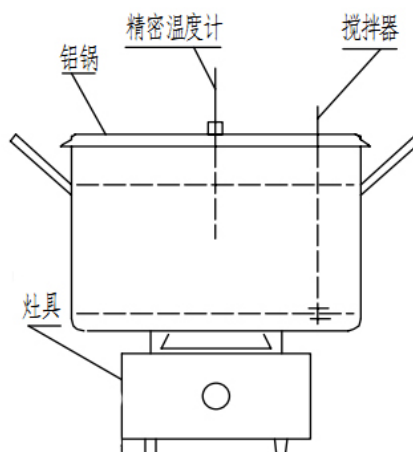


图 36 热效率实验装置

Fig.36 Thermal efficiency experiment device

对等离子体灶热效率的测量实验需要在相同条件下最少进行两次，且每次的实验数据值与每次的测量平均值误差保持在 5%以内，若测量值满足以上要求，即把平均值作为实际热效率值，如果不满足以上条件，需继续实验，一直达到以上要求为止。

用于对比热效率的仪器为美的 C21-WK2102 型号的电磁炉，测量仪器包括玻璃管温度计和时间测量采用电子表。

4.6.2 实际测量与结果

取 2.5 千克的自来水为加热对象，室温 24 度，由于离子体灶也为最大功率 1800W，所以将电磁炉调节到最大功率为 1800W，按照具体效率测量方案操作，并明确记录测量值，对比情况如表 4 所示。

表 4 等离子灶与电磁炉热效率对比

Table 4 The thermal efficiency comparison between plasma and Induction cooker

| | 水的质量/kg | 输出功率/W | 热效率/% |
|-------|---------|--------|-------|
| 电磁炉 | 2.5 | 1800 | 91 |
| 等离子体灶 | 2.5 | 1800 | 74 |

可以看出，在现有条件下测量的热效率，等离子体灶是明显低于电磁炉的，因为影响热效率的因素很多，例如日常燃气灶的火势大小也会对热效率产生影响，因此等离子体束的大小也会对热效率产生影响。需要通过调节电极和输入功率对等离

子体束进行合适调整，同时包括对发生器的设计，升压电路的设计，以及等离子体灶体设计等等。

4.7 等离子体灶的性能分析

对等离子体灶进行实验数据采集并整理，得到如表 5 所示的等离子体灶各相性能标。等离子体灶具有功率可调性，最大也可以得到 1800W 的功率输出，虽然等离子体灶的热效率明显低于日常所用的电磁炉，但是热效率值仍能达到 70%以上，同时等离子体灶的有害气体排放量是明显低于国家标准。等离子体束的长度和体积也达到了一定的标准。通过各种数据可以看出，等离子体灶的各种硬性指标已经满足我们日常所需，在对等离子体灶进行后续优化之后，各种性能会得到进一步的完善。

表 5 等离子体灶的各项详细指标
Table 5 The detailed standard of the plasma oven

| 项目/单位 | 具体参数及要求 |
|-------------------------|---------------|
| 最大功率/ W | 1800 |
| 整体热效率/ % | 74 |
| 温度调节范围/ °C | 200~1200 |
| 温度调节精度/°C | 50 |
| 火炬长度/ cm | ≥4 |
| 加热面积/ m² | ≥0.14 |
| 电源方案要求 | 仅采用一个电源 |
| CO 排放/ ppm | ≤60 |
| NO ₂ 排放/ ppm | ≤60 |
| 系统输入/ V | AC 220 (±10%) |
| 系统输入/ Hz | 50~60 |
| 用电安全 | 符合 |
| 介质 | 空气 |

4.8 本章小结

本章进行了等离子体灶实验测量系统的搭建和一些参数的测量。实验可知放电

电流和电压的有效值大小是影响等离子体射流长度的一个决定性的因素，而输入电压和电流与放电电压和电流也成正比关系。分别在 5 组不同输入直流电压情况下的放电效果图，得到等离子体束大小与各电压和电流之间的关系。实验数据显示，等离子体射流的大小会随着外加于电极上电压的有效值的增大而变大。实验中得到的输入功率最大可达到 1800W，在此输入功率上，可获得 220mm 理想长度和功能的等离子体束。实验中可以通过增加电弧放电电流的方法，通过控制电弧弧柱的最低边界温度在某个适当范围之内，来抑制或减少在等离子体灶放电过程中 NO_2 的生成。为了增加放电的稳定性，除了增加输入功率外，也可以缩小两放电电极之间的间距，都可以改善放电不稳定的和脉动现象。等离子体灶气体排放的测量数据显示，放电产生的气体中 NO_2 的浓度为 6.50ppm， O_3 值为 1.45ppm，未检测到 CO 和其他有害气体。通过对比实验计算，等离子体灶的热效率略低于家用煤气灶，并总结了等离子灶各项性能指标。

结 论

随着全球现代化建设的深入，人类对于能源的依赖性和需求性也越来越强。以煤气灶和电磁炉为家庭烹饪设备已经覆盖到了整个日常生活中。煤气属于不可再生资源，燃烧会造成环境污染和安全隐患。电磁炉应用范围也有一定的局限性。在总结了等离子体研究方面所积累经验的基础上，我们提出了一种由多相交流电弧放电的燃烧灶，即等离子体灶。

本论文独立完成了对等离子体灶装置研发过程，包括原理研发、电路研发、机构的设计、装配与组装、功能的调试和实验过程等。等离子体灶包括主功率源、升压模块、发生器模块、数据采集系统、热效率测量系统、气体检测系统和辅助系统。并对等离子体灶进行了实验平台的搭建，进行等离子体放电实验。主要内容和结论如下：

本论文主要对等离子体灶的电源系统进行了设计，该电源系统以 ZVS 为核心电路，根据其特性，设计了发生电路和升压电路，同时为了优化整个电路系统，对单相电路进行仿真分析，通过对各参数进行研究，根据电流、电压和功率的输出条件，进行 8 相电路的设计，以至于合理搭配功率源和升压电路，产生我们所需的等离子体束。研制了等离子体灶实验装置。通过大量的实验和文献对比，由于石墨材质相比铜材有更好的耐高温和导电性能等，因此本文决定采用铜为高压极材料石墨为共地极材料。电极固定板采用聚四氟材质。为了控制电弧高温区的分布和整个合成电弧射流的形貌，改良现有等离子体灶的实验效果，设计了等离子体灶的模型图。

完成了等离子体灶实验测量系统的搭建，分别在 5 组不同输入直流电压情况下的放电效果图，得到各电流与电压大小对等离子体射流的影响规律。输入功率最大可达到 1800W，并可获得 220mm 理想长度和功能的等离子体束。同时讨论了放电参数对产生 NO_2 的影响。可以通过提高放电电流的方法，控制等离子体化学反应所需要适当温度，达到抑制放电过程中 NO_2 的产生。通过对电磁场的分布对等离子体放电的影响的研究，得出放电电极产生的电场相互干扰和周围的气流干扰，是放电不稳定的因素。同时可以通过增加输入功率和减小放电电极的间距，可以降低等离子体放电时的脉动现象，来降低放电不稳定性。测量结果显示，排放气体中 NO_2 的浓度为 6.50ppm， O_3 值为 1.45ppm，未检测到 CO 和其他有害气体。虽然等离子体灶的热效率略低于家用煤气灶，但还是可以通过后续的实验来提升各项指标。

本论文虽然完成等离子体灶实验装置的搭建，但是距离实际性的推广还有一定的距离，并且在设计和进行实验时发现了许多不足之处。在起始放电阶段无法实现自动放电，需要人工干预才能实现引弧放电。原因是在未放电阶段的输出电压达不到气体击穿电压，只有通过近距离的电极的诱导放电为过渡阶段，实现一定距离间距放电。后期可以通过伺服电极控制电极移动，实现不同距离电极的放电，一方面可以实现自动引弧放电，另一方面，不同间距的电极放电也会产生不同强度的等离子体束。并且电极固定板聚四氟材质的耐高温性和绝缘性是有一定限度的，但对于长时间的放电，聚四氟材质被烧蚀坏。在放电过程中，也存在共用放电通道现象。所有的问题可以通过所设计的等离子体灶模型来解决，但实现模型的现实化，是要付出一定的成本和长时间设计周期。国内外各高校和研究团队也正在对等离子体灶进行大量的实验和研究，相信，通过我们共同努力，等离子体灶终有一天会成为人类生活中必不可少的家庭设备。

参考文献

- [1] 石刚, 陈忱. 经济增长与不可再生能源消费的实证分析[J]. 中央财经大学学报, 2008, 10(9):56-60.
- [2] 刘芳荣. 浅谈替代石油能源产业的现状与发展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 7(4):244-244.
- [3] 宋会娟, 张吉光. 厨房用燃气灶节能与环保的分析与发展[J]. 中国住宅设施, 2010, 7(5):44-45.
- [4] 蔡少波. 中国家用燃气灶控制器产业发展战略研究[D]. 上海财经大学, 2010.
- [5] 李兆坚, 江亿. 家用燃气灶热效率特性测试分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(3):368-374.
- [6] 崔胜男. 当今国内市场电磁炉产品设计现状分析[J]. 青春岁月, 2015, 11(20):64.
- [7] 吕田. 商用电磁炉行业的中国发展之路[J]. 中国食品, 2015, 6(8):106-107.
- [8] 鲁军. 话说电磁炉[J]. 初中生学习七彩, 2014, 8(11):4-5.
- [9] 罗平. 电磁炉电路设计原理与维修案例剖析[C]. 中国家用电器技术大会, 2001.
- [10] 程彬, 张胤铭. 电磁炉基本原理及检修[J]. 科学咨询, 2015(5):53-54.
- [11] 朱元右. 等离子体技术在废水处理中的应用[J]. 工业水处理, 2004, 24(9):13-16.
- [12] 许根慧. 等离子体技术与应用[M]. 化学工业出版社, 2006.
- [13] GOLDSTON R J, RUTHERFORD P H. Introduction to plasma physics[M]. CRC Press, 2010.
- [14] Cao Z, Cui C H, Liu D Q, et al. Plasma Science and Technology[J]. 2005, 7(1):26-32.
- [15] Zhao K J, Dong J Q, Yan L W, et al. Physics of Plasmas[J]. 2007, 14(2):122-301.
- [16] RICHARD D, HAZELTINE, GERALD A, et al. The Advanced Tokamak [J]. Science 7 August 1998, 10(7):783-786.
- [17] 孟月东, 钟少锋, 熊新阳. 低温等离子体技术应用研究进展[J]. 物理, 2006, 35(2):140-146.
- [18] 江南. 我国低温等离子体研究进展(II)[J]. 物理, 2006, 35(3):130-139.
- [19] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 科学出版社, 1986.
- [20] 陈熙. 热等离子体传热与流动[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [21] Gui Min XU, Yue MA, Guan Jun ZHANG. DBD plasma jet in atmospheric pressure argon[J]. 2008, 36(4):1352-1353.
- [22] W X Pan, Z Y Guo, X Meng, et al. Fluctuation characteristics of Arc voltage and Jet flow in a non-transferred DC plasma generated at reduced pressure[J]. 2009, 18(4):6-12.

- [23] Kambara M, Hamai Y, Yagi H, et al. Nano cluster assisted high rate epitaxy of silicon by mesoplasma CVD[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(9):5529-5532.
- [24] L W Chen, Y SHIBUTA, M KAMBARA, et al. Nanocluster Dynamics in Fast Rate Epistaxis under Mesoplasma Condition[J]. Chemical Physics Letters, 2013, 18(564):47-53.
- [25] 于锦禄, 何立明, 丁未等. 丝电弧等离子体强化超声速点火和燃烧[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 7(6):511-515.
- [26] 刘晓明, 刘春园, 邹积岩等. 交流与直流真空电弧等离子体特性比较分析[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(10):1203-1208.
- [27] 刘小伟, 张伯尧, 杨仕友等. 同轴等离子体发生器电弧运动轨迹数值分析与计算[J]. 机电工程, 2012, 4(6):700-704.
- [28] 关有俊, 鲍卫仁, 吕永康等. 电弧等离子体发生器特性的研究[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(2):118-120.
- [29] Y YAO, M M HOSSAIN, T W ATANABE. a multi-phase aC arc discharge and its application in in-flight thermal treatment of raw glass powder[J]. Chemical Engineering Journal, 2008(129):390-397.
- [30] TSUGIO MATSUURA, KEIJI TANIGUCHI, TAKAYUKI WATANABE. A new type of arc plasma reactor with 12-phase alternating current discharge for synthesis of carbon nanotubes[J]. Thin Solid Films, 2007(515):4240-4246.
- [31] TANAKA, M IKEBA, T Liu, et al. Electrode Temperature Measurements of Multi-phase AC Arc by High-speed Video Camera[J]. 2012, 406(1):2008.
- [32] Hao ZHANG, Gui Qing WU, He Ping LI. Volt-ampere and Thermal Characteristics of A Direct-current Dual-jet Plasma Generator[J]. IEEE Transactions a Plasma Science, 2009 (39): 1129-1135.
- [33] 陈仨, 查俊, 周志鹏等. 用于煤粉点火的电弧等离子体发生器性能研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(12):1301-1304.
- [34] 王争论, 成剑, 栗保明等. 高压受限电弧等离子体发生器实验研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2003, 27(2):117-121.
- [35] 黎林村, 夏维东. 电弧等离子体发生器中传热与流动的数值模拟[C]. 全国等离子体科学技术会议, 2007.
- [36] 李辉. 电弧等离子体中的阴极区模型及辅助加热电弧等离子体发生器的研究[D]. 中国科学技术大学, 2000.
- [37] 殷凤良, 胡绳荪, 李力等. 等离子体发生器的数值模拟方法[J]. 机械工程学报, 2007,

- 43(9):156-160.
- [38] 丁天英, 刘景林, 朱爱民等. 火花放电电极结构及其等离子体反应器[J]. 核聚变与等离子体物理, 2014, (3):282-288.
 - [39] 苏运波, 孙智兴, 李占贤等. 六相交流电弧放电装置电源系统设计及性能测试[J]. 机械工程与自动化, 2016, (4):181-183.
 - [40] ZHAO P, NI G H, JIANG Y H, et al. Destruction of Inorganic Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash in A DC Arc Plasma Furnace[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181:580-585.
 - [41] Ni G H, Zhao P, Jiang Y M, et al. Verifications of MSWI Fly Ash by Thermal Plasma Melting and Fate of Heavy Metal[J]. Plasma Science and Technology, 2012, 6(9):62-65.
 - [42] Qin WANG, Jing hua YAN, Xin TU, et al. Thermal Treatment of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash Using DC Double Arc Argon Plasma[J]. 2009, 13(88):955-958.
 - [43] 殷凤良, 胡绳荪, 李力等. 等离子体发生器的数值模拟方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9):156-160.
 - [44] 关有俊, 鲍卫仁, 吕永康等. 电弧等离子体发生器特性的研究[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(2):118-120.
 - [45] 李和平, 王志斌, 乐沛思等. 平板型与同轴型等离子体发生器射频大气压辉光放电特性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(7):1588-1594.
 - [46] TSUGIO MATSUURA, KEIJI TANIGUCHI, TAKAYUKI WATANABE. A New Type of Arc Plasma Reactor with 12-phase Alternating Current Discharge for Synthesis of Carbon Nanotubes[J]. Thin Solid Films, 2007(515):4240-4246.
 - [47] Yao Chun YAO, KAZUYUKI YATSUDA, TAKAYUKI WATANABE. Characteristics of Multi-Phase Alternation Current Arc for Glass In-Flight Melting[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2009, 29:333-346.
 - [48] MANABU TANAKA, Ya Ping LIU, YOSUKE TSURUOKA. Experimental Investigation of In-flight Melting by Hybrid Heating of Multi-phase Alternating Current Arc with Oxygen Burner for Alkali-free Glass Raw Materials[J]. Thin Solid Films, 2012, 523:67-71.
 - [49] Tanaka M, Tsuruoka Y, Liu Y, et al. Stability analysis of multi-phase AC arc discharge for in-flight glass melting[J]. Current Applied Physics, 2011, 11(5):S35-S39.
 - [50] 朱思思, 杨建湘, 张伟亮, 等. 基于零电压开关技术的逆变式电子束焊机电源的研究[J]. 电子世界, 2016(11):95-98.
 - [51] 张鑫, 曹沛, 马英麒等. 一种基于零电压开关的脉冲调制等离子体激发系统的研究[J]. 科

- 学技术与工程, 2016, 16(22):64-68.
- [52] 苏少侃, 阮新波, 叶志红. 自激式 LLC 谐振变换器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12):85-92.
- [53] 李平, 穆海宝, 喻琳等. 低温等离子体辅助燃烧的研究进展、关键问题及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(6):2073-2083.
- [54] 卢驭龙. 等离子体火炬装置及具有等离子火炬装置的等离子灶. 中国发明专利, 专利号: 201520148920.8.
- [55] 路运龙. 等离子体高级节能燃烧灶. 中国发明专利, 专利号: 201220317525.4.
- [56] 胡辉, 杨旗, 包斌等. 基于 ANSYS 的空气电弧放电等离子体温度数值模拟[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(2):20-28.
- [57] 王颖, 徐诚, 张晓娟等. 关于现代电磁场理论的探讨[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(8):802-808.
- [58] 杨晓欣, 蒋文英. 电火花加工用主流电极材料(石墨-铜)的放电性能对比分析研究[C]. 全国特种加工学术会议, 2009.

致 谢

光阴似箭，岁月如梭，转眼间研究生的两年半时即将过完。华北理工大学的学习和生活对我影响深刻，这几年从中学习到了许多知识和人生哲理。同时对那些引导我、帮助我和激励我的人心存感激。

首先我要感激我的导师李和平和栾奥天，他们不仅是我的学习导师，更是我的人生导师。在这里年中，两位导师都是对我默默地帮助和鞭策。尤其是在本论文的完成过程中，两位导师为我指点迷津，让我在此基础上学得了更多的理论知识，这其中注入了两位老师的大量心血。正是导师孜孜不倦的教诲及亲情般的关怀使我最终顺利完成了毕业论文。尤其是李占贤老师时常教导我如何为人处世，如何处理家庭关系。并指点我选择一份好的工作。他是我的人生导师更是我的恩人。

感谢我的室友刘扬、戚东达和苗壮同学，感谢他们在生活中的帮助和体谅。感谢孙佳涛、董珈皓、薛建奇、王凯鹏和王洪凯等同学，让我的研究生的生活充满了意义，感谢他们陪我一起走过两年多的时光，即将别离，也是万般不舍，希望我们在未来工作都能取得好的成绩。感谢师兄于江涛师兄的帮助和支持，在完成论文过程中为我提供了大量指导意见。

最后还要感谢在百忙之中抽出宝贵时间为我评阅论文的专家。

导师简介

李和平（1973-）：男，汉族，山西大同人；博士，副研究员/博士生导师；美国 IEEE 高级会员，中国电子学会高级会员，中国电子学会应用磁学分会第九届委员会委员及其生物磁学学组副主任委员。

目前主要从事气体放电等离子体特性的基础研究及其在离子引出、生物医学、节能环保等领域的应用研究工作，得到了国家自然科学基金（重点/面上/国际合作交流项目）、北京市自然科学基金、北京市科委科技项目、航空科学基金、日本 JST CREST、韩国 KIST 国际合作项目以及与科研院所和企业的横向合作课题等经费的资助。SCI 检索论文 50 篇，国家发明专利 8 项。“电弧热等离子体体系中三维效应的研究（第一完成人）”获得 2007 年度教育部科学技术奖—自然科学二等奖。

企业导师简介

栾奥天（1972-）：男，汉族，内蒙赤峰人，本科学历，高级工程师；1991.09-1995.07 毕业于华东理工大学机械设计与制造专业，获学士学位；毕业后至今，一直从事汽车传动产品的设计、研发工作，历任唐山爱信齿轮责任有限公司主管工程师，浙江中马汽车变速器股份公司（含盐城中马汽车零部件有限公司）技术开发部副部长、开发部部长、副总经理、唐山弘基传动科技有限公司副总经理；

近年来，发表论文 3 篇，获得发明专利 1 项，实用新型专利 20 项；先后主持研发国家星火计划项目 1 个，省重点高新技术产品开发项目 1 个。获中国齿轮行业协会科技进步成果一等奖 1 项；省高新技术产品 1 项；市高新技术产品 2 项；个人获河北省科技成果完成者、温岭市连续两届“专业技术拔尖人才”等荣誉。

联系方式：

作者简介

吕玉明，男，生于 1991 年 10 月 8 日，汉族，辽宁省朝阳人。

2010.9~2014.7：辽宁科技大学信息技术学院自动化专业读本科，获学士学位；

2015.9~今：华北理工大学机械工程专业，攻读硕士学位。

在学期间发表论文和著作：

吕玉明，于江涛，李占贤. 等离子体灶的设计与性能研究[J]. 机械工程与自动化, 已录用.

学位论文数据集

| | | | |
|--|------------|-----------|----------|
| 等离子体灶；等离子体发生器；放电装置；放电特性 | | 等离子体灶 | TM924.75 |
| 460.5030 | 2017303079 | 公开 | |
| 华北理工大学 | | 硕士 | |
| 等离子体灶的设计与性能研究 | | 中文 | |
| 资源形式： [文本 (√)] [图像 (√)] [视频 ()] [音频 ()] [其他 ()] | | | |
| 推荐形式 application/msword; application/pdf | | | |
| 吕玉明 | | 华北理工大学 | 10081 |
| 机械工程 | 机器人技术 | | 2.5 年 |
| 2017. 12.1 | | | |
| 李和平 | 副教授 | 清华大学工程物理系 | |
| 唐山曹妃甸渤海大道 21 号 | 063210 | | |
| | | | 2018.3.6 |
| 华北理工大学 | | 唐山 | |
| 工学硕士 | 2018 | | |
| 56 | A4 | | |
| 注：共 37 项，其中标明（可选）项可不填，必填数据 24 项。 | | | |