

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。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 浙江大学 或其他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。

学位论文作者签名：高飞

签字日期：2010 年 1 月 26 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 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和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：高飞

导师签名：



签字日期：2010 年 1 月 26 日

签字日期：2010 年 1 月 26 日

致谢

首先诚挚的感谢两位导师严建华教授和马增益教授。很庆幸能在两位导师的指导下完成博士学位论文工作。他们丰富渊博的科研知识、对科研脉搏的把握、非凡的创新能力，以及平易近人的处事方式使我受益非浅，使我在这些年中获益匪浅。老师对学问的严谨更是我学习的典范。值此本文完成之际，我要向两位导师表示深深的敬意和衷心的感谢。在此祝愿两位导师身体健康！

衷心感谢热能所废弃物研究室岑可法院士、倪明江教授、池涌教授、李晓东教授、蒋旭光教授、杨家林研究员、王飞教授、邱坤赞副教授、金余其副教授、陆胜勇副教授和黄群星副教授在本人学习期间给予的指导和帮助，特别是陆胜勇副教授在课题上所给予的建设性指导和关心。

感谢王勤博士不厌其烦的指出我研究中的缺失，且总能在我迷惘时为我解惑，在实验台建设以及实验过程中的支持和帮助。

同时也要感谢同办公室的兄弟姐妹，两年多的里的日子，办公室里共同的生活点滴，学术上的讨论、言不及义的闲扯……，感谢陈聿博士生、陈春燕硕士生、陈镇超博士生、麻红磊博士生、屠洪斌硕士生、万嘉瑜硕士生、王斌全硕士生、王现顺硕士生、彦士鑫硕士生、张翠玲硕士生、张晓翔硕士生及其他各位师兄、师姐、同学、师弟、师妹的共同砥砺，你们的陪伴让三年的研究生活变得绚丽多彩。

感谢同寝室的包毅硕士生、温亮硕士生、周春光硕士生，感谢你们两年多的陪伴，愿我们的友谊地久天长。

最后，衷心感谢我的父母和亲人！感谢他们多年来给我无微不至的关怀和呵护！

高飞

2010年1月于求是园

摘要

近年来，热等离子体技术作为一种新技术越来越受到人们的关注。它可以用于垃圾焚烧飞灰的处理，与传统的热处理方法相比，热等离子体技术具有更高的温度和能量密度，升温迅速，可以实现飞灰的玻璃化，抑制重金属迁移。

本文介绍了一种自行设计的具有二路进气双阳极特殊结构的热等离子体发生装置，通过等离子体电弧电压诊断系统测量直流等离子体射流的工作情况，并对其产生的直流等离子体电弧的伏安特性、电压气流特性、电弧脉动特性和脉动行为等进行了系统深入的研究，证明了二路进气的稳弧作用及对电极腐蚀的改善。使用喷枪对某垃圾电厂的垃圾焚烧飞灰进行了熔融处理，并用马弗炉熔融处理同种飞灰作为对照。通过分析发现等离子体熔渣的微观结构紧密光滑无空隙。等离子体熔渣对重金属有很好的固定效果，其重金属浸出浓度大大降低，Cd、Cr、Ni、Pb 已无法检出。与马弗炉熔融飞灰相比，热等离子体技术具有更高能量密度，更短的处理时间，其熔渣的硬度明显增加，重金属固定效果有小幅度的提升，重金属浸出特性基本相当。结果显示，热等离子技术是一种处理垃圾焚烧飞灰的有效手段。

关键词：飞灰；二路进气；等离子体；毒性浸出；电弧脉动

Abstract

In recent years, thermal plasma technology has been employed in a wide range of application of industry, and draws more and more people's attention. It also can be used for Municipal waste incineration fly ash treatment. Compared with the traditional heat treatment methods, thermal plasma technology has a much higher temperature and energy density, which helps vitrification of fly ash and inhabitation of heavy metals migration.

In this study, several electric characteristics of the thermal plasma furnace, the core of which was a specially designed two gas inlets double anode plasma torch, were examined by classical means, such as statistic method, fast Fourier transform, etc. This research reveals that the design of two gas inlets weakens the pulsation of plasma arc. Employing the thermal plasma furnace, the fly ash samples collected from a local municipal solid waste incinerator were lessened. What's more, the microstructures and crystalline phases of the produced slag are obviously superior to the original ash. Through employing the thermal plasma treatment, toxicity characteristic leaching procedure results show that the slag has an excellent resistance against leaching of heavy metal ions, as Cd, Cr, Nr, Pb cannot be detected. Muffle furnace have been introduced to dispose the same fly ash as a comparison. The disposing time of the thermal plasma technology is much shorter than that of the muffle furnace disposition and heavy metal immobilization rate has increased. These results indicate that the thermal plasma disposition is an alternative technology with highly efficiency to dispose MSWI fly ash.

Key words: Fly ash, two gas inlets, plasma, TCLP, arc fluctuation

目次

致谢.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
目次.....	IV
插图和附表清单.....	VII
第1章 绪论.....	1
1.1 等离子体概述.....	1
1.1.1 等离子体概念.....	1
1.1.2 等离子体的性质.....	1
1.1.3 等离子体的分类.....	2
1.2 热等离子体技术在废弃物处理中的应用.....	3
1.2.1 热等离子体熔融技术简介.....	3
1.2.2 热等离子体熔融技术的特点.....	6
1.2.3 国外热等离子体技术在废弃物处理中的应用.....	7
1.2.4 我国热等离子体技术在废弃物处理中的研究及应用现状.....	12
1.3 城市生活垃圾及垃圾焚烧飞灰的危害、现状及处理技术.....	13
1.3.1 中国城市生活垃圾的产生情况.....	13
1.3.2 城市生活垃圾处理技术分类.....	15
1.3.3 城市生活垃圾焚烧处理技术.....	16
1.3.4 城市生活垃圾焚烧飞灰.....	17
1.3.5 城市生活垃圾焚烧飞灰的处理技术.....	18
1.3.6 城市生活垃圾焚烧飞灰的热处理技术 ^[42, 44, 50, 52-54]	19
1.4 本文的主要研究内容.....	20
第2章 二路进气热等离子体飞灰熔融系统.....	22
2.1 热等离子体飞灰熔融装置介绍.....	22
2.1.1 热等离子体飞灰熔融系统简介.....	22
2.1.2 二路进气双阳极热等离子体喷枪.....	23
2.1.3 热等离子体飞灰熔融装置的各组成系统.....	25
2.2 等离子体监控系统.....	26

2.3	电弧的产生过程及不同的工作模式.....	27
2.4	分析工具.....	30
2.5	本章小结.....	31
第3章	二路进气热等离子体电弧的电特性研究	32
3.1	热等离子体电弧伏安特性.....	32
3.1.1	单弧模式下的伏安特性	32
3.1.2	一路进气双弧模式下的伏安特性	33
3.1.3	二路进气双弧模式下的伏安特性	35
3.2	热等离子体电弧电压与工作气体流量的关系.....	37
3.2.1	单弧模式下的电弧电压与工作气体流量的关系	37
3.2.2	一路进气双弧模式下的电弧电压与工作气体流量的关系	37
3.2.3	二路进气双弧模式下的电弧电压与工作气体流量的关系	39
3.3	本章小结.....	40
第4章	二路进气热等离子体电弧的脉动特性研究.....	42
4.1	热等离子体电弧脉动特性.....	42
4.2	热等离子体电弧的电压时域信号分析.....	45
4.3	热等离子体电弧的电压频域信号分析.....	47
4.4	电极腐蚀现象研究.....	49
4.5	本章小结.....	50
第5章	垃圾焚烧飞灰熔融处理结果对比	52
5.1	垃圾焚烧飞灰与处理方法.....	52
5.2	飞灰处理结果及比较.....	53
5.2.1	飞灰扫描电子显微镜图像	54
5.2.2	飞灰的重金属迁移特性	55
5.2.3	飞灰的重金属毒性浸出特性	56
5.3	本章小结.....	58
第6章	全文总结和工作展望	59
6.1	本文的主要研究内容和工作总结.....	59
6.2	本文的主要创新点.....	60
6.3	本文的工作展望.....	61
	参考文献.....	62

作者简历及在学期间所取得的科研成果 68

插图和附表清单

图 1.1 热等离子体喷枪的基本结构图	4
图 1.2 转移弧与非转移弧热等离子体示意图	5
图 1.3 等离子体熔融设备示意图	6
图 1.4 日本田熊公司垃圾焚烧飞灰等离子体处理系统流程图	8
图 1.5 热等离子体医疗垃圾处理系统示意图 (日本 Chubu 电力公司)	9
图 1.6 热等离子体放射性废弃物处理系统示意图	10
图 1.7 热等离子体多氯联苯处理系统示意图	11
图 1.8 高频等离子反应系统示意图	12
图 1.9 1999-2008 年中国城市生活垃圾年清运量	14
图 1.10 2003-2008 年填埋、堆肥、焚烧和未卫生处理垃圾在城市生活垃圾总量中所占比例[35, 37-41]	16
图 2.1 热等离子体飞灰熔融系统示意图	22
图 2.2 热等离子体飞灰熔融实验台	23
图 2.3 二路进气双阳极等离子体喷枪结构图	24
图 2.4 等离子体电源示意图	25
图 2.5 热等离子体诊断系统示意图	27
图 2.6 单弧模式及双弧模式示意图	28
图 2.7 单弧模式及双弧模式图像	28
图 2.8 一路进气模式及二路进气模式图像	29
图 3.1 单弧模式下等离子体电弧伏安特性	33
图 3.2 双弧模式下等离子体电弧伏安特性	33
图 3.3 双弧模式下等离子体电弧伏安特性	34
图 3.4 二路进气模式下等离子体电弧伏安特性	35
图 3.5 二路进气模式下氩氮混合气等离子体电弧伏安特性	36
图 3.6 单弧模式下电弧电压-气流曲线	37
图 3.7 双弧模式下等离子体电弧电压-气流曲线	38
图 3.8 二路进气双弧工作模式下等离子体电弧电压-气流曲线	39

图 3.9 二路进气模式下氩氮混合气等离子体弧压-气流曲线.....	40
图 4.1 单弧模式电弧电压标准差	43
图 4.2 双弧模式电弧电压标准差	43
图 4.3 二路进气模式下电弧电压标准差	44
图 4.4 二路进气模式下氩氮混合气电弧电压标准差	45
图 4.5 一路进气单弧模式下电弧电压波形	45
图 4.6 一路进气双弧模式下电弧电压波形	46
图 4.7 二路进气双弧模式下电弧电压波形	47
图 4.8 一路进气单弧工作模式电压脉动 FFT 分析	47
图 4.9 一路进气双弧工作模式电压脉动 FFT 图像	48
图 4.10 二路进气双弧工作模式电压脉动 FFT 图像	49
图 4.11 阳极 II 剖面图对比.....	50
图 4.12 中间件电极腐蚀对比	50
图 5.1 飞灰及其熔渣的实物照片	53
图 5.2 飞灰及其熔渣的实物图及 SEM 图像.....	54
图 5.3 飞灰及其熔渣的重金属含量	55
图 5.4 熔渣中的重金属固化率	56
图 5.5 TCLP 方法选取浸取液的流程图	56
图 5.6 飞灰及其熔渣 TCLP 结果	57
表 1.1 等离子体的分类 ^[3]	3
表 1.2 2003-2008 年中国城市生活垃圾焚烧处理的发展 ^[35, 37-41]	17
表 5.1 飞灰的主要无机成分(w %)	53

1 绪论

1.1 等离子体概述

1.1.1 等离子体概念

等离子体是和固体、液体、气体同一层次物质存在形式。它是由大量带电粒子组成的有宏观空间尺度和时间尺度的体系。

由于在地球的自然环境中,等离子体十分罕见,它只存在于远离地球表面的电离层及其以上空间中或者寿命很短的闪电中,因此人类对它的认识起步较晚,至今不过一百年。1879年威廉·克鲁克斯(William Crookes)在做气体导电实验时,确定放电管中存在物质的第四态(等离子体)。而等离子体(Plasma)这个术语则是1928年由朗缪尔(Irving Langmuir)自生物学中引入。

等离子体和气液固三态组成上最明显的不同之处在于后者都是由电中性的分子或原子组成的,而前者则由原子或分子电离后的电子和离子组成,这些带电粒子可以在空间相当自由地运动和相互作用。虽然有时电子和离子可以相进而复合成中性原子,但同时也存在着中性原子因碰撞或其它原因而电离成电子、离子的过程。这种复合与电离处于动态平衡之中,因此在宏观尺度的时间和空间范围里存在着数量大体不变的大量电子和各种离子。正是因为如此,等离子体的许多性质才明显地和固体、液体、气体不同,有着自己特有的行为和运动规律。在这个意义上往往称等离子体是物质的第四态^[1]。

1.1.2 等离子体的性质

等离子体由原子或分子电离后的电子和离子组成,其中包含自由电子、离子、中性粒子等微观粒子,它具有以下几种基本特点^[2]:

- a) 导电: 由于存在大量带正、负电荷的离子和自由电子,因此等离子体具有很强的导电性;

- b) 电中性: 虽然等离子体由很多带电粒子构成, 但是在一定的时间和空间尺度内, 粒子所带的正电荷数总是与负电荷数相等, 因此等离子体又呈电中性。
- c) 气氛可控: 通过改变形成等离子体的工作气体, 可以形成氧化性、中性或还原性气氛以满足不同的需要。
- d) 可作为离子源和光辐射源: 可以作为一些化学反应中间过程的介质或者用于加速光化学反应的进行。
- e) 与磁场的相互作用: 由于等离子体的导电性, 因此可以使用磁场来控制它的位置、形状和运动轨迹, 这是它与一般气体的显著区别。同时, 带电粒子的运动也可以产生电磁场。

1.1.3 等离子体的分类

按照微观粒子电离程度或宏观温度不同等离子体可以分为高温等离子体和低温等离子体, 其中从热力学平衡的角度又可以将低温等离子体分为热等离子体及非热等离子体, 如

表 1.1 所示^[3]。

在高温等离子体中, 粒子宏观温度可达 $10^6 - 10^8 \text{K}$, 此时原子中的全部的电子将逃出原有轨道而成为自由电子, 电离度可达到 100%, 因此也称为完全电离的等离子体。如由太阳、核聚变和激光聚变等形成的等离子体均属于高温等离子体。而在低温等离子体中, 粒子宏观温度较低, 范围为 $10 - 10^5 \text{K}$ 左右, 此时仅有一部分粒子被电离成为带电的粒子, 而另一部分粒子没有发成电离, 仍然是中性的, 电离度小于 1, 因此也称为部分电离的等离子体。

对于低温等离子体而言, 从热力学平衡或宏观温度的角度又可以将其分为热等离子体和非热等离子体。

a) 热等离子体 它的宏观温度为 $10^3 - 10^5 \text{K}$, 其电子的平均动能和重粒子的平均动能基本相等, 即基本接近于热力学平衡状态, 此时电子的温度基本上等于重粒子的温度, 具有统一的热力学温度。电弧等离子体、高频等离子体、燃烧等离子体、激波等离子体等都属于热等离子体。本研究中所涉及的等离子体就

是这种热等离子体。

b) 非热等离子体 非热等离子体的宏观温度较低，一般在 10^3 以下，电子温度很高，可达 $10^4 - 10^5\text{K}$ ，但是由于重粒子的温度很低，所以反映出来的宏观温度仍然较低。由于该种等离子体宏观温度、电离程度较低，属于稀薄的等离子体，其中粒子间的碰撞很少，远离热力学平衡的状态可以长期存在，这时电子的平均动能大大超过重粒子的平均动能，即电子的温度大于重粒子的温度。低温等离子体的发生方法主要有直流辉光放电电离、无线电波放电电离、微波放电电离、电晕放电电离等。日光灯、霓虹灯中的辉光放电、滑动弧放电等均属于低温等离子体。

表 1.1 等离子体的分类[3]

名称	状态	实例
高温等离子体	宏观温度 $10^6 - 10^8\text{K}$ 完全电离	太阳、核聚变、 激光聚变
低温等离子体	宏观温度 $10 - 10^5\text{K}$ 部分电离	
热等离子体	宏观温度 $10^3 - 10^5\text{K}$ 热力学平衡	高频等离子体 电弧等离子体
非热等离子体	宏观温度 $10 - 10^3\text{K}$ ，电子温度 $10^4 - 10^5\text{K}$ 热力学不平衡	辉光放电 滑动弧放电

1.2 热等离子体技术在废弃物处理中的应用

1.2.1 热等离子体熔融技术简介

热离子体技术利用电弧加热气体(最典型的气体是氩气或氮气)至较高的温度，甚至超过 3000°C ，直至部分粒子发生电离。所形成的热等离子体可被用作特殊应用的可控热源。这些应用包括焊接、切割或废弃物处理。

热等离子体技术用于废弃物热解气化及熔融上时主要可分为直流电弧及高频等离子体两种。前者利用离子冲击阴极从而不断激发电子以提供能量，后者则是利用高频电磁场反复加速电子撞击中性原子或分子所产生的能量。在直流电弧等离子体技术中产生电弧的直流电的阴极一般由含钨的耐高温金属材料构成，阳极一般由铜构成。阳极起到喷嘴的作用，辅助引导等离子体流的方向。在高频等离子体发生器中，两个电极交替扮演阳极和阴极的角色，所以是由相同的材料制成的。目前用于废弃物处理的热等离子体熔融技术主要以直流等离子体作为热源。本研究中所采用的热等离子体技术为直流电弧等离子体技术。

用于产生等离子体电弧的气体包括氮气、氧气、惰性气体(氩气、氦气等)和这些气体的混合物。电极的寿命是备受关注的问题，受到电极材料、所使用的气体和电流大小的影响。电极结构、气体注入方式和喷嘴的设计共同决定了等离子体反应器的形式和加热效率。

在应用于处理废弃物(如垃圾焚烧飞灰)时，热等离子体与废弃物相接触，将废物中的无机部分熔化，形成玻璃态熔渣，将废弃物中有机的和碳氢化合物的部分气化。

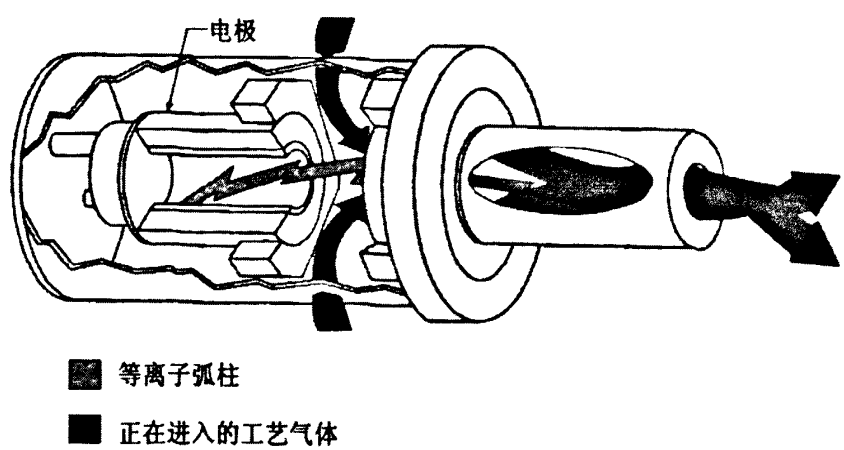


图 1.1 热等离子体喷枪的基本结构图

直流热等离子体是由热等离子体喷枪所产生的，其基本结构如图 1.1 所示^[4]。在等离子体喷枪稳定工作时，热等离子体中电子-离子对的生成速率与结合速率基本相等，两电极间的放电效应达到稳定化。根据电弧产生的方式及阳极位置的

不同，热等离子体电弧可分为非转移弧（non-transferred）与转移弧（transferred）两种。非转移弧等离子体是两个电极都设计于喷枪内，因此，等离子体的发生只存在于喷枪内部，为了处理被加工件，在喷枪中施加高压气体将等离子体电弧从喷枪口吹出，等离子体电弧的起点与终点都仍在喷枪内的两极上（如图 1.2a 所示）。转移弧喷枪中只设有一个电极，另一个电极为被处理废弃物，故等离子体的生成是从喷枪中的电极一直延伸至被处理物（如图 1.2b 所示）。本研究中所使用的等离子体喷枪即为非转移弧喷枪^[5]。

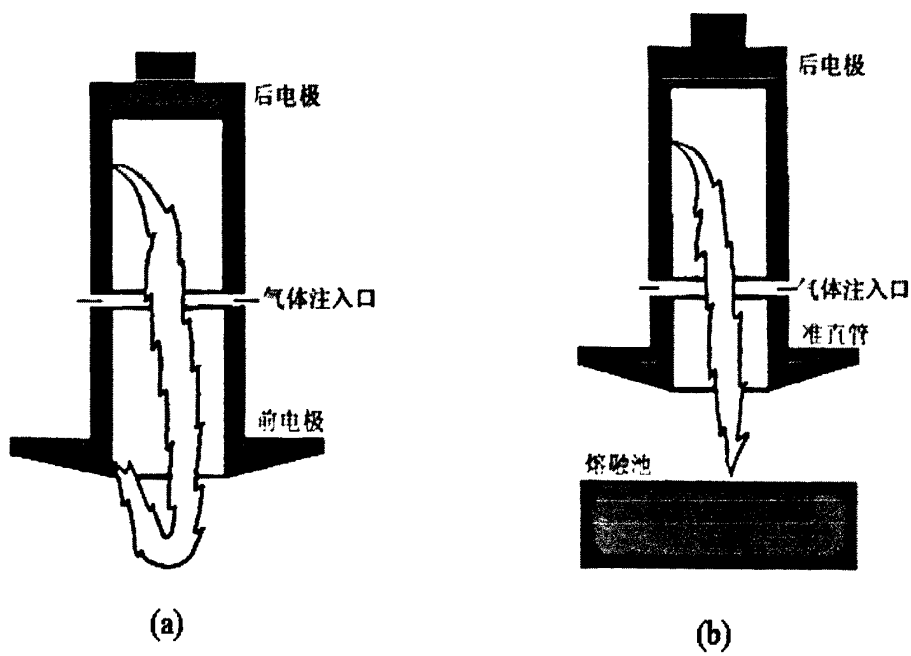


图 1.2 转移弧与非转移弧热等离子体示意图

一般等离子体熔融设备主要由六大系统构成，如图 1.3 所示：1、进料系统；2、等离子体熔融炉体；3、等离子体电弧系统（包括电源供应系统、喷枪传动系统、喷枪冷却系统、仪表控制系统等）；4、二次燃烧室；5.烟气净化及排放系统；6、熔渣排出系统。此外，等离子体熔融设备还包括气体流量控制及供应系统，冷却系统，温度、炉膛的内外压差及废弃物监控系统等辅助系统。

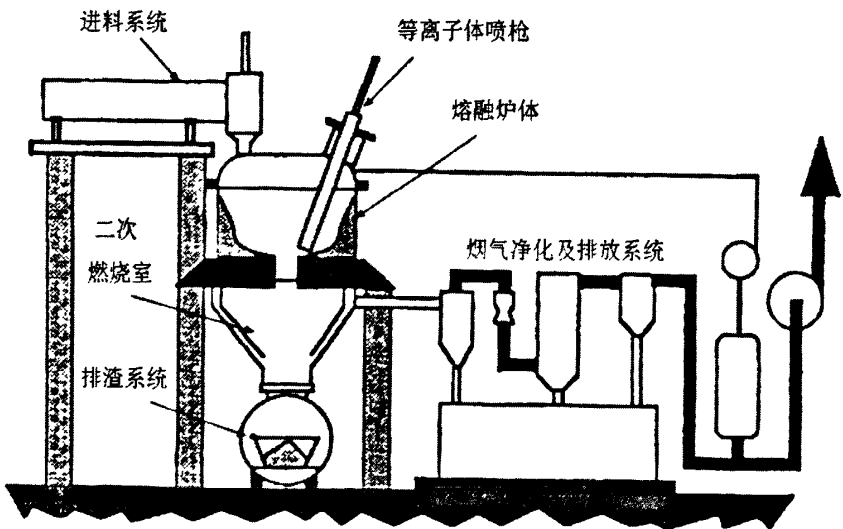


图 1.3 等离子体熔融设备示意图

通常废弃物等离子体熔融处理系统也需配备类似焚烧炉的污染防治设备，以提升其处理能力、安全性及适用性。同时，为避免高温等离子体熔融炉内的气体外逸，炉内气压必须保持在负压状态。当废弃物进入等离子体熔融炉，炉内高温能使废弃物中的有机成分热解气化，然后进入二次燃烧室，滞留时间大于 2 秒，使热解气完全燃烧转换成 CO_2 及 H_2O ，最后再经烟气污染防治装置处理后排放至周围大气。此时废弃物熔融后的熔渣已实现稳定化及无害化，并可作为资源实现再利用。

1.2.2 热等离子体熔融技术的特点

由于热等离子体自身区别于传统气液固三态物质的特点，热等离子体技术用于处理有害废弃物具有其独特的优点：

- a) 热等离子体的高温及其大量的紫外线辐射使其对传统方法难以处理的有毒性危险废弃物有较好的处理效果。
- b) 热等离子体的高能量密度可使其在短时间内快速反应，使得在一个小反应器中处理大量的废物成为可能。
- c) 高温还可以获得很高的冷却速率以抑制亚稳态和非平衡组合成分的出现。

d) 与其他诸如焚烧炉之类的热处理过程相比,即使在频繁的快速启动和关闭时,由于反应器边缘的高热流而可以很快达到过程的稳定状态。

e) 可控参数较多,便于实现整个化学反应过程的控制,增强了得到有销路的副产品的可能性。比如,热等离子体技术所产生的废气可用于制氢,熔渣可用于制备微晶玻璃——一种高档建筑材料。

但是,等离子体处理过程的主要缺点在于以电力作为能源,且存在电极腐蚀现象,与传统设备相比,热等离子体喷枪寿命较短。因此其经济成本较高。此外,与传统过程相比,热等离子体废弃物处理具有较多的控制参数,因此对操作人员及处理过程的控制的要求更高。

1.2.3 国外热等离子体技术在废弃物处理中的应用

近年来,随着工业和经济的持续迅速发展,各种不同类型的固体废弃物的排放量也是逐年递增,由此带来的废弃物的处理处置的难题变得日益严峻和紧迫。如何保护环境、减少污染已经成为全世界各国共同关注的焦点和议题,与此同时,也推动和促进了新产品新技术的开发研制,以便为废弃物的处理处置提供更好的解决方案。热等离子体技术在处理危险废弃物方面具有独特的优势和潜力使其吸引了越来越多的关注,已经开始在废弃物无害化处理领域崭露头角

a) 垃圾焚烧飞灰^[6-11]

近年来日本各大公司积极进行热等离子体熔融处理技术的研发,用于解决垃圾焚烧炉飞灰的问题。最具有代表性的是日本田熊公司。田熊公司自上世纪 90 年代初开始进行用于底渣和飞灰的混合灰渣处理的石墨电极等离子体熔融技术开发,于 1998 年达到每天处理 25 吨垃圾焚烧飞灰的规模。

田熊公司的等离子体熔融技术的电源系统为直流电源,运行时,阴极内(石墨中空电极)通入工作气体,在炉底阳极与石墨阴极间加载电压,并以熔渣作为电介质发生等离子体电弧。由等离子体电弧产生的辐射热、对流传热、电子引起的热传导等,将连续为垃圾焚烧飞灰的熔融提供能量。而熔融所得熔渣同样也是电导体,等离子体电流通过时产生的电阻热,也可被熔融所利用。田熊公司实

现了垃圾焚烧灰渣石墨阴极等离子体熔融处理技术的工业应用。

田熊公司设计的等离子体熔融炉是利用垃圾焚烧炉发电的电力，其系统流程见图 1.4。如图所示，灰渣经进料系统投入等离子体熔融炉进行熔融，在熔融过程中可添加 SiO_2 、 CaO 等助熔剂，以降低飞灰熔融温度。经熔融后所得的熔液，通过水淬装置急速冷却后成为熔渣，再以磁力分选装置后将其中所含的金属颗粒分离回收，剩余的玻璃熔融经过适当的热处理处理后可制成微晶玻璃。烟气经过二次燃烧室后直接进入急速冷却塔和烟气净化处理系统，以抑制二噁英的生成和低沸点重金属排入大气。

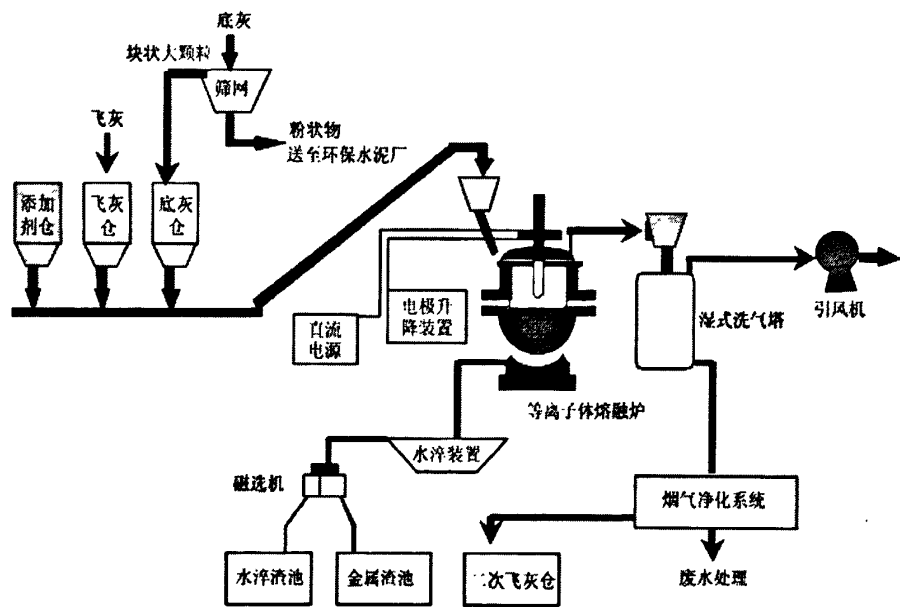


图 1.4 日本田熊公司垃圾焚烧飞灰等离子体处理系统流程图

b) 医疗垃圾^[12-16]

医疗垃圾会携带病菌，甚至携带高传染性病毒。有毒、有害医疗废弃物已成为当今困扰世界的一大难题，而传统的处理方法远远不能满足环保要求。卫生部规定，医疗垃圾不能混同生活垃圾一起处理，也不容许未经处理进行填埋。这些含有大量传染性病毒的垃圾一般仍采用传统的气、煤、油焚烧方法，而采用的焚烧炉处理的医疗垃圾所产生的灰渣在填埋后还会析出重金属、二噁英等污染物，影响土壤、水质，对环境造成二次污染。人畜饮用被污染的水后会迅速感染、蔓延。

热等离子体技术在处理医疗废弃物中显示出不同于传统焚烧技术的优点，主要体现在处理后尾气排放污染物含量低，处理后的残渣以玻璃化的固体形式存在，熔渣的重金属浸出率低。日本 Chubu 电力公司开发了一套基于非转移弧等离子体技术的医疗垃圾处理系统，其系统流程见图 1.5。设计处理量为 500 公斤/天。该系统首先在无氧条件下对垃圾进行热解，然后通过功率 50 千瓦的热等离子体射流把剩下的难熔物质利用等离子体的高温高能转变为化学性质稳定的玻璃状熔渣。经过这样的处理，垃圾减容率可以达到 1/250，不产生焚烧灰渣，重金属直接被固化在熔渣中，并且熔渣具有较强的耐酸耐腐蚀性，熔渣中的重金属浸出率非常低，完全达到 TCLP 的测试标准。

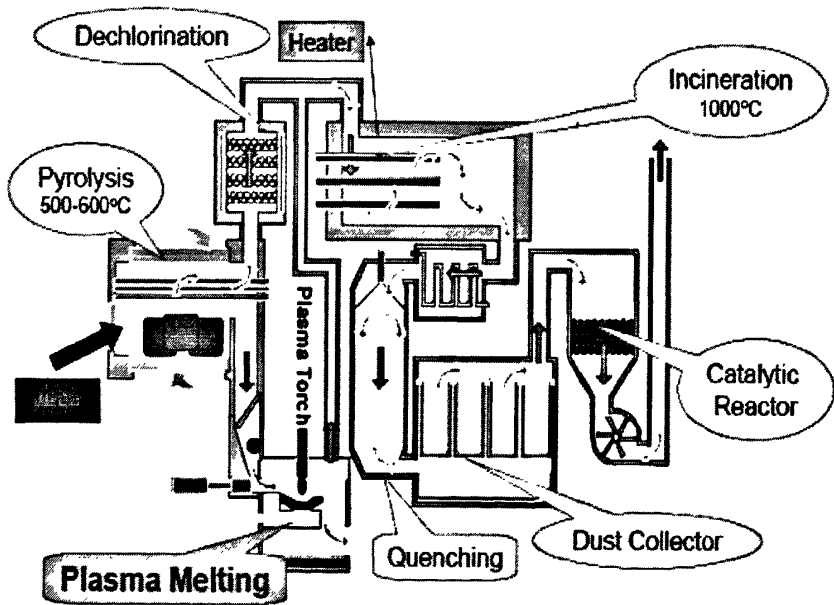


图 1.5 热等离子体医疗垃圾处理系统示意图（日本 Chubu 电力公司）

c) 放射性废弃物^[17-21]

目前，全球核技术的发展已进入新阶段，核技术的应用更加广泛深入，核能发电已成为解决当前世界能源危机的重要途径之一。很多国家已将其列为重点发展的能源，我国也已制定了雄心勃勃的核电发展计划，按照 2007 年公布的《核电中长期发展规划（2005-2020 年）》，到 2020 年，在运行核电装机容量将达到

4000 万千瓦，核电占全部电力装机容量的比重从当时的不到 2%提高到 4%。今年以来，有消息称，2020 年的核电目标有望调整为 8600 万千瓦。核能的开发和利用给人类带来巨大的经济效益和社会效益，同时也产生了大量的放射性废物，给人类的生存环境带来了较大的威胁。因此,如何安全有效地处置放射性废物,使其最大限度地与生物圈隔离,已成为核工业、核科学面临的日益迫切的重要课题,是影响核能持续健康发展的关键因素。

韩国原子能研究中心（KAERI）设计的基于热等离子体技术的放射性污染物减量处理装置。该装置使用石墨电极，处理速率为 200kg/h，其系统流程见图 1.6。这个装置被设计用于处理韩国核电站所排放的低放射剂量废弃物。将废弃物通过切碎机进行预处理，通过螺旋进料器送入该装置熔融室，室内的工作温度为 1400-1900 °C。之后工作气体及熔融室内形成的热解气、气化气均进入热氧化室进行充分反应。尾气的冷却净化系统保障该装置所排出的气体符合环保要求。通过熔融处理后，放射性废弃物以玻璃熔渣的形态存在于废渣之中，质量和体积均大大减小，实现了减量化的要求。在玻璃熔渣中，硅原子所构成的致密的网状结构将放射性物质固化在其中，熔渣的化学性质十分稳定，便于贮存或投入深海。

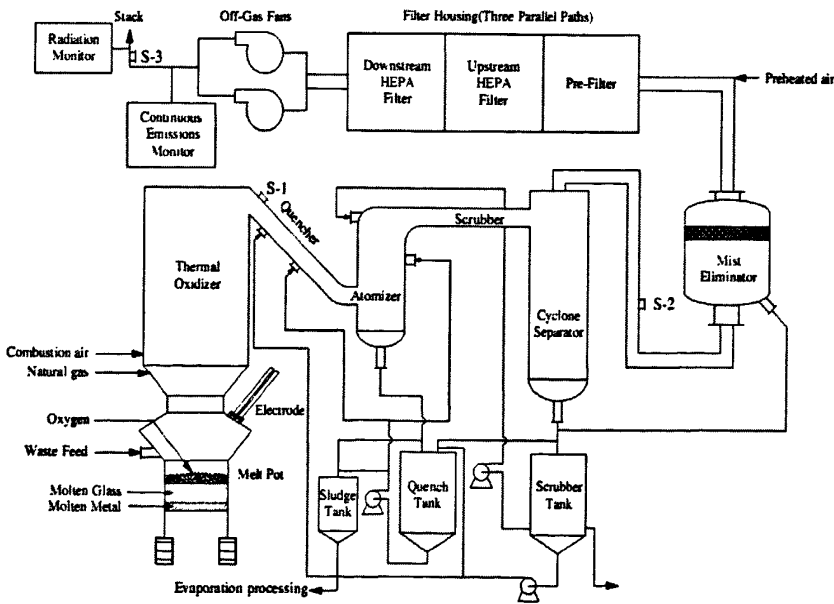


图 1.6 热等离子体放射性废弃物处理系统示意图

d) 多氯联苯(PCBs)^[22-24]

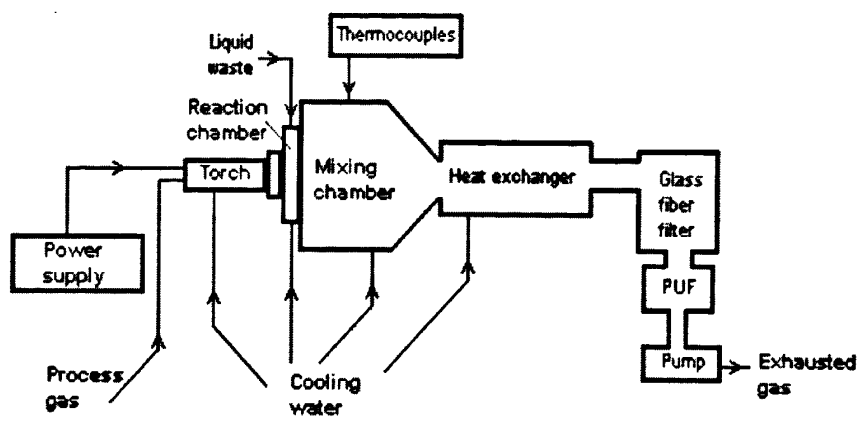


图 1.7 热等离子体多氯联苯处理系统示意图

多氯联苯(PCBs)又称氯化联苯,是联苯苯环上的若干氢原子被氯取代而形成的一类有机氯化化合物的总称。多氯联苯属内分泌干扰物—有害环境激素类物质,对动物和人类的生殖系统、神经系统和免疫系统具有危害作用。多氯联苯可溶于生物的脂肪组织中,并通过食物链浓缩富集。2001 年 5 月,被列为《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》十二种特别有害的持久性有机污染物(POPs)之一,是目前已检测到的环境污染物中最具致癌性的物质之一。图 1.7 是美国西屋公司研制的等离子体热解反应器系统示意图。该反应器采用了功率为 1MW 的非转移弧热等离子体炬。西屋公司的等离子体炬由两个相同直径的圆柱形水冷电极组成,工作气体为空气,系统设计使电弧斑点在磁场的作用旋转,从而降低了电极的损耗。整个反应装置经过优化整合后被安装在一辆拖车上,从而实现在不同废弃物处理场之间的来回作业。日本新日铁公司已经开发出能够对多氯联苯进行有效热分解的等离子体技术,分解率可以达到 99.9999 %甚至更高。

此外,热等离子体技术还可用于处理废旧的印刷电路板、废弃军火、电镀污泥、丙酮)、二氯甲和石棉等。^[25-29]

1.2.4 我国热等离子体技术在废弃物处理中的研究及应用现状

我国在热等离子体废弃物处理技术方面的研究起步较晚，目前仍处于小型试验或中试阶段，距离工业化应用仍有很长的一段路要走。

唐兰等人进行了高频电容耦合热等离子体降解废弃高分子聚合物的研究，建立了一套实验室规模的直流热等离子体热解系统^[30-32]。热等离子体热解系统结构如图 1.8 所示。

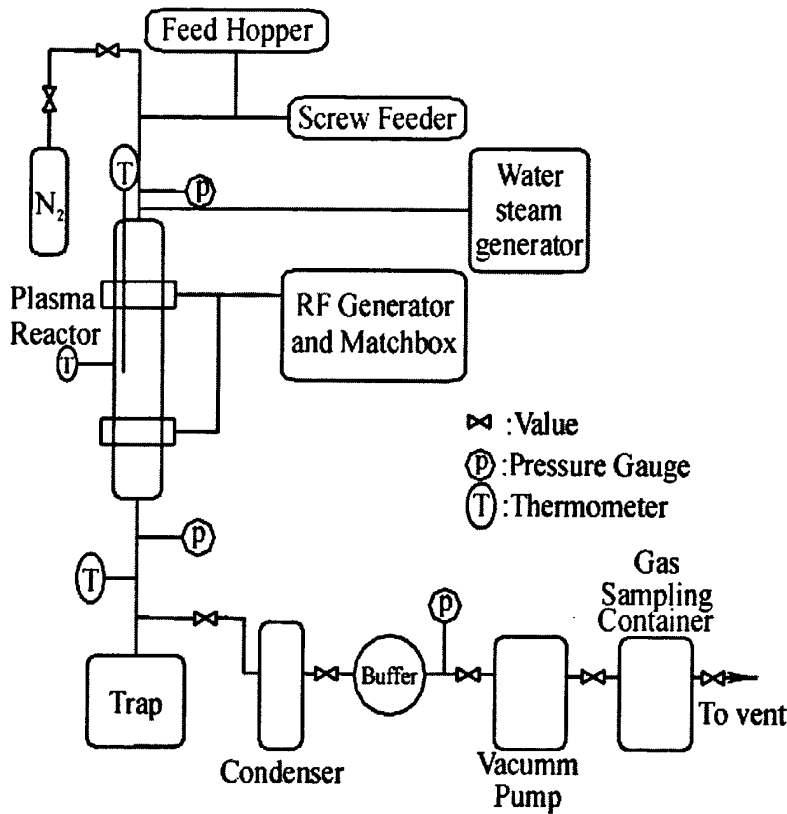


图 1.8 高频等离子反应系统示意图

高频等离子体发生器包括高频等离子体电源与功率匹配器，其中高频等离子体电源功率 0~2000 W 连续可调，频率 13.56 MHz，功率匹配器包括 0~400 pF、0~1000 pF 可调电容各一支及一个电感，具有手动调节网络参数达到匹配的功能。反应器是内径 16 mm、长 500 mm 的石英管，其外环绕两铜电极与高频电源连接，每个电极宽 215 cm，两电极间距可调。当高频电压加在两电极上时，高频能量将通过容性耦合方式耦合入石英管内气体中，产生高频电容耦合等离子

体。试验中为获得两个等离子体区域,还采用了两组电极并联的结构。在高频 N_2 等离子体热解过程中,所得气体产物主要成分为 H_2 、以及 C_2H_2 、 C_2H_4 等低碳烃,采用水蒸汽等离子体热解气化时,水蒸汽等离子体中参与反应的水蒸汽量有 20% 左右, C 转化率提高,气体产物成分产量有明显改善,气体产物主要成分为 H_2 、CO 等。

在 Chang J.S.等人^[33]的等离子体热解试验中采用的是氢/氩直流热等离子体,载气中氢/氩含量分别为 10% H_2 ~90% Ar、5% H_2 ~95% Ar 或纯 Ar。 N_2 也可作为直流热等离子体的载气。氢/氩等离子体与 N_2 等离子体的最大区别在于, N_2 等离子体的温度(2500~3500 K)比氢/氩等离子体(1500~1800 K)高得多, 可使热解反应更为完全;另外,作为大气中的主要成分, N_2 的制备也更方便且廉价,有利于大规模的工业化。

胡真等人^[34]针对二战期间日本侵略军在我国遗弃的大量化学武器的危害性,进行了热等离子体技术销毁含砷毒剂的实验。所采用的热等离子体处理固体废弃物的实验装置主要由等离子体发生器、等离子体旋转炉、二次燃烧炉、冷却器、文丘里喷淋塔和洗涤喷淋塔等设备组成。利用该装置对日本遗弃化武红弹和红筒装填物二苯氯砷和二苯氰砷进行了销毁实验,并用 GC-MS 法对销毁产物进行分析。结果显示,经处理后未检测出二苯氯砷和二苯氰砷,根据分析方法的检出下限计算出的二苯氯砷和二苯氰砷的销毁去除率均高达 99.9999%。对熔渣进行砷的浸出毒性实验显示,浸出液中砷的质量浓度均低于 0.03mg/L,远低于我国固体废物砷的浸出毒性鉴别标准值 115mg/L。但是,等离子体炉在销毁含砷有机毒剂时,固砷效率很差,因此要发挥等离子体技术的优势,还必须加强固砷方法的研究。

1.3 城市生活垃圾及垃圾焚烧飞灰的危害、现状及处理技术

1.3.1 中国城市生活垃圾的产生情况

城市生活垃圾是固体废物的一个种类,城市生活垃圾主要指在城市日常生活中或者为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废弃物。其中大部分来自居

民的生活与消费、市政建设和维护、商业活动、市区的园林绿化及市郊的耕种生产、医疗和旅游娱乐场所。包括一般性垃圾、人畜粪便、厨房弃物、污泥、垃圾残渣和灰尘等固体物质，其构成主要受城市的规模、性质、地理条件、居民生活习惯、生活水平和燃料结构、季节等的影响。

随着社会经济的迅猛发展，城市生活垃圾已成为社会的一大公害，其造成的污染是世界各国环境保护中亟待解决的难题之一。近年来，我国城市生活垃圾污染问题也日趋严重，对城市的环境及卫生状况带来极严重的危害，城市生活垃圾的产生量也在快速地增长，如图 1.9 所示，近十年来，中国城市生活垃圾清运量增长迅速，相比 1999 年，2008 年城市生活垃圾清运量增长 35%，已增加至 1.54 亿吨^[35]。

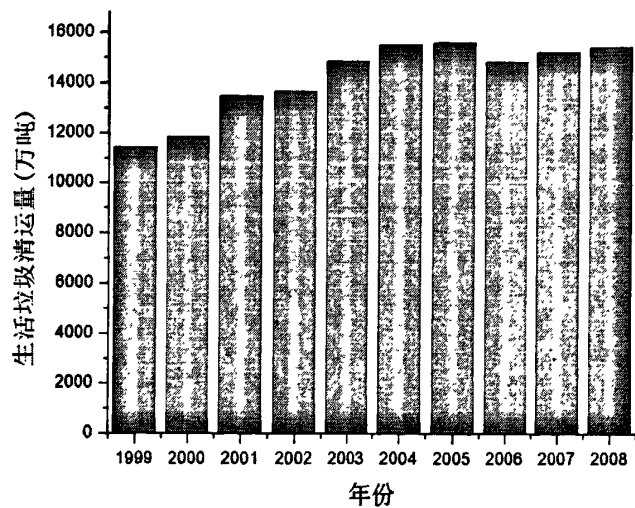


图 1.9 1999-2008 年中国城市生活垃圾年清运量

城市生活垃圾如不加妥善收集、利用和处理处置，将会污染大气、水体和土壤，影响市容市貌，使人们的生活居住环境质量下降，甚至危害人类健康。如不妥善处理，城市生活垃圾将造成下列危害^[36]：

a) 浪费土地资源 城市生活垃圾中一般含有 10%~15%的可回收利用的物质。另外，垃圾的露天堆放和填埋，要占用大量的土地资源。许多城市在郊区设

置的垃圾堆放场, 侵占了大量的可耕地面积, 使可耕地短缺的矛盾更加突出。

b) 影响卫生, 传播疾病 城市生活垃圾若不能及时从市区清运或简单堆放在市郊, 往往会造成垃圾遍布、污水横流、蚊蝇孳生, 散发臭味, 还会成为各种病原微生物的孳生地 and 繁殖场, 影响周围环境卫生和危害人体健康。

c) 产生渗出液, 污染水环境 生活垃圾渗出液属高浓度污水, 会严重污染水体和土壤, 而且其中的污染成分在土壤中的迁移过程十分缓慢, 经过相当长的时间才能发现, 且具有很大的危害性。

d) 污染大气, 发生爆炸事故 国内已发生多起垃圾堆着火和填埋场基地建筑物中甲烷气引起的爆炸事故。堆放的城市生活垃圾, 经微生物分解作用能产生大量甲烷气体, 引起火灾, 发生爆炸事故。

1.3.2 城市生活垃圾处理技术分类

城市生活垃圾产生于城市日常生活中或者城市日常生活提供服务的活动中, 必须遵循可持续发展的原则, 通过安全卫生、技术可靠、经济适用的处理技术, 实现城市生活垃圾的减量化、资源化和无害化。目前常用的垃圾处理方法主要有垃圾卫生填埋、堆肥和焚烧。

a) 卫生填埋是从传统的堆放和填地处理处置发展起来的一项最终处置技术, 将垃圾在选定的合适场所, 填埋到一定高度后, 加上覆盖材料, 让其经过长期的物理、化学和生物作用达到稳定状态。

b) 堆肥技术是将垃圾送入机械消化机中, 利用微生物在合适的条件下对城市生活垃圾中的有机物进行降解, 使之变成稳定的腐殖土。将其中的有机可腐物转化为土壤可接受的有机营养物, 为农业提供适当的腐殖土, 解决土壤板结问题, 并维持了自然界物质的良好循环, 基本实现垃圾的无害化、资源化。

c) 焚烧是指在高温条件下, 垃圾中的可燃成分与空气中的氧进行剧烈的化学反应, 放出热量, 转化成高温的燃烧气和量少而稳定的固体残渣, 同时杀灭病毒细菌的方法。但是, 垃圾的焚烧处理不可避免的会产生大量垃圾焚烧飞灰, 如果处理不当, 可能会造成二次污染。

1.3.3 城市生活垃圾焚烧处理技术

由于我国人口的增长，城市的扩容，可用的土地越来越少，垃圾焚烧处理技术日益成为未来重要的城市生活垃圾处理手段。

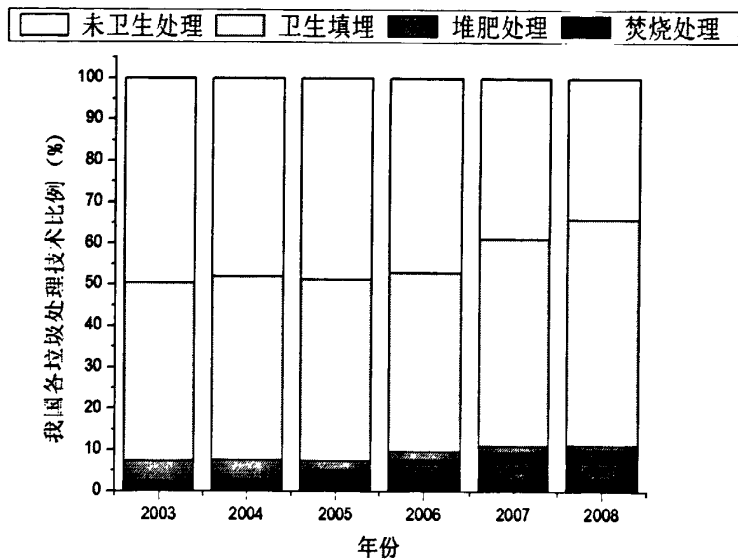


图 1.10 2003-2008 年填埋、堆肥、焚烧和未卫生处理垃圾在城市生活垃圾总量中所占比例[35, 37-41]

如图 1.10 所示，目前我国的城市生活垃圾的处理方式主要以填埋为主。但随着城市生活垃圾的累积量越来越大，对高效率的城市垃圾处理方式的需求越来越迫切，并且由于我国城市用地面积紧缺和垃圾产量的急剧增加，填埋和堆肥因其处理周期长和占地面积广，已不能满足我国日益严峻的生活垃圾处理问题。这种矛盾在经济较发达、人口密度较大的东部沿海地区的很多城市尤为突出。由于焚烧处理方式具有占地面积少、处理周期短、极好的减容减量效果等特点，近几年来，焚烧在城市生活垃圾处理中所占的比例越来越重。从图 1.10 可以看出，焚烧在垃圾处理中所占的比例逐年增加，从 2003 年的 2.5% 迅速增加到 2008 年的 10.2%，已经成为我国第二大垃圾处理技术。

表 1.2 2003-2008 年中国城市生活垃圾焚烧处理的发展 [35, 37-41]

年份	2003	2004	2005	2006	2007	2008
焚烧厂数量	47	54	67	69	66	74
焚烧处理能力(吨/日)	15000	16907	33010	39966	44682	51606
焚烧处理量(万吨)	369.9	449	791	1137.6	1435.1	1569.7

在我国城市生活垃圾的处理技术中，焚烧占有越来越重要的地位。在 2008 年，我国的城市生活垃圾焚烧能力为 1569.7 万吨，占我国城市生活垃圾清运总量的十分之一，从表 1.2 中可以看出，在 2003~2008 这六年间，城市生活垃圾焚烧厂逐年稳步增加，从 2003 年的 47 座增加至 2009 年的 74 座。日焚烧处理能力从 1.5 万吨，增长至 5.1 万吨，年焚烧处理量从 369.9 万吨增长至 1569.7 万吨，均实现了跨越式的发展。 [35, 37-41]

1.3.4 城市生活垃圾焚烧飞灰

垃圾焚烧处理后，最终的产物是排放的烟气和焚烧残渣。我国通常把焚烧灰渣分为底渣和飞灰两种，底渣包括炉排渣和炉排间掉落灰，有些焚烧厂也将锅炉灰与炉排渣混合收集处置。底渣主要由熔渣、黑色及有色金属、陶瓷碎片、玻璃和其它一些不可燃物质及未燃有机物组成。而垃圾焚烧所产生的焚烧飞灰，一般包括布袋除尘器飞灰和吸收塔飞灰（干法或半干法吸收塔）。飞灰中也含有烟道灰（在焚烧室内产生并排出，在加入化学药剂前被去除的颗粒物，包括烟道气冷却后冷凝下来的挥发物）、加入的化学药剂及化学反应产物。

随着垃圾焚烧事业在国内的迅速发展，垃圾飞灰的产量也呈明显增加的趋势。生活垃圾焚烧处理后产生的固体残渣大约占垃圾重量的 10%~25%，其中底渣及飞灰的比例根据炉型的不同有较大区别，在循环流化床内由于炉内垃圾处于悬浮流化状态，烟气流速高，造成其飞灰量约为炉排炉的 3-4 倍 [42] 。

1.3.5 城市生活垃圾焚烧飞灰的处理技术

由于生活垃圾焚烧处理速度快,占地面积少,减量化和无害化效果显著,因此,在我国用地紧张、生活垃圾处理压力大的城市率先得到了应用。但是城市生活垃圾在焚烧过程中容易产生二次污染,而飞灰是二次污染的主要载体。由于飞灰中含有可被水浸出的 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Cr 等多种有害重金属物质和盐类,还富集了高浓度的具有最强毒性的二恶英有机污染物,《国家危险废物名录》已经明确规定生活垃圾焚烧飞灰为危险废物,即编号为 HW18,飞灰的处置必须严格按照危险废物的标准进行。垃圾焚烧飞灰的处理方式很多,这里对固化稳定化处理技术、化学处理与热处理技术这三种应用最为广泛的处理技术进行简单的介绍^[43]。

固化稳定化处理技术^[44-47]

水泥固化稳定化是目前最常用的飞灰处理技术。该技术是将飞灰和水泥均匀混合形成固态,经水化反应后形成坚硬的水泥固化体,同时将飞灰中有害重金属包覆在固化体中,从而达到降低飞灰中危险成分浸出的目的。一般较常利固化稳定化包括水泥固化、塑料固化、沥青固化、石灰固化等,经过固化稳定化处理后的产物,若满足浸出毒性标准或者资源化利用标准,最终可以进行安全填埋处置或进行资源化利用。

水泥固化因其设备、操作要求简单和固化费用相对较低而得到广泛应用。水泥固化是以水泥作为危险废弃物的固化剂,把飞灰和水泥按一定的比例混合,然后加入适量的水,经水化反应后成为坚硬的水泥固化物。但水泥固化处理后增容量大,而且如果飞灰中含有阻碍水泥正常凝结的成分时,常会发生固化体强度低、有害物质浸出率高等问题。

石灰固化是指以石灰、粉煤灰、水泥窑灰以及熔矿炉炉渣等具有波索来反应(Pozzolanic Reaction)的物质为固化基材而进行的危险废物固化/稳定化的操作。在适当的催化环境下进行波索来反应,将废物中的重金属成分吸附于所产生的胶体结晶中。石灰固化飞灰所得结构体的强度不如水泥固化,很少单独使用。

沥青固化、塑料固化技术等也是传统的危险废物固化方法,但由于技术和

经济原因很少应用于生活垃圾焚烧飞灰的处理。

化学处理技术^[44, 48, 49]

化学处理技术是利用化学药剂通过化学反应使有毒有害物质转变为低溶解性、低迁移性及低毒性物质的过程。用药剂稳定化技术处理危险废物,可以在实现废物无害化的同时,达到废物少增容或不增容,从而提高危险废物处理处置系统的总体效率和经济性。同时,可以通过改进螯合剂的结构和性能使其与废物中危险成分之间的化学螯和作用得到强化,进而提高稳定化产物的长期稳定性,减少最终处置过程中稳定化产物对环境的影响。药剂固化稳定化的研究很多,但填埋场或经处理后飞灰的再利用的环境条件与飞灰固化稳定化时的条件相差很大,因此,一些长期的环境效应还有待于长期的监测数据和研究结果的验证。由于加入的化学稳定药剂价格较贵,因此处理成本较高,操作较复杂,另外对二恶英和溶解盐的稳定作用较小。

热处理技术^[44, 50, 51]

热处理技术是目前国内外一项比较先进的垃圾焚烧飞灰无害化资源化处理技术,相对于水泥固化和化学处理而言,热处理无害化程度彻底、产品稳定性高、运行费用适中、减量显著、并可以实现资源化利用,因此垃圾焚烧飞灰熔融成为近年来固体废物处理领域新的研究热点。

1.3.6 城市生活垃圾焚烧飞灰的热处理技术^[42, 44, 50, 52-54]

热熔融处理技术主要是将飞灰或混合入适当含量的添加剂的配灰,在 1000℃以上的高温下,对飞灰进行熔融处理,飞灰中的有机物发生热解、气化及燃烧,熔融所得熔渣为由 Si-O 网状结构组成的玻璃基体,重金属则被有效的包裹在此种网状结构中,使得玻璃熔渣中的重金属浸出率极低。熔融处理有较好的减容的效果,熔渣的密度较高,体积比处理前的飞灰明显减小。在高温熔融处理过程中,飞灰中的二恶英等有机污染物可有效地被消解,得到的熔渣可以作为路基材料、微晶玻璃的基础玻璃、混凝土骨料、沥青骨料等,达到资源再利用的目的。目前

已成功地研制出多种类型的熔融炉,并投入到实际运用中。根据使用能源的不同,主要可分为燃料式与电力式两大类。

燃料式熔融炉主要是利用燃料燃烧放热使灰渣熔融,经该炉处理后灰渣中二噁英等有机物在高温下分解率达 90%以上,但相对于电力式熔融炉来说能耗较大,若是在炉内能添加一些木屑等物质,将能减小能耗,由于在处理过程中使用了燃料,尾气排放中 NO 和 CO 等二次污染物含量要比电力式熔融炉高。燃料式熔融炉主要包括表面熔融炉、旋回流熔融炉、焦炭床熔融炉和内部熔融炉四种。

电力式熔融炉不仅能耗要比燃料式熔融炉小,而且二次污染排放量少,主要有电弧式熔融炉、电阻熔融炉、感应式熔融炉和等离子体熔融炉四种。目前电力式熔融炉中以电弧式和电阻式居多,这主要由于等离子熔融技术起步晚,而且一次性投资大,如果等离子体炬费用降低,等离子熔融技术将具有更加广阔的应用空间,成为熔融技术的主流。

1.4 本文的主要研究内容

垃圾焚烧飞灰熔融技术在其发展初期,熔融炉炉型主要以燃料式为主,而近年来,随着人们对等离子体技术研究的不断深入,基于其高温高能量密度等特点,等离子体熔融技术受到越来越多的关注。

热等离子体技术作为一种近年来在工业中得到了广泛应用的新技术,它可以用于垃圾焚烧飞灰的处理。与传统的热处理方法相比,热等离子体技术具有更高的温度和能量密度,可以实现飞灰的玻璃化,抑制重金属迁移,并有高强度紫外线辐射伴随产生,这对于二噁英等有机危险废弃物的处理具有更好的效果。对热等离子体技术在工作中的许多基本参数,如电子激发温度、脉动特性、伏安特性等国内外相关研究也取得了许多结果,但是等离子体设备性能仍不够可靠、电极腐蚀等问题并没有彻底解决,这些影响了热等离子体飞灰处理设备的寿命,增加了它的处理成本,限制了这种技术的进一步推广应用。

本研究自行设计了一种具有二路进气双阳极特殊结构的热等离子体喷枪作为等离子体发生装置,将其应用于垃圾焚烧飞灰的熔融处理研究。为了解二路进

气双阳极特殊结构的等离子体发生装置的工作特性,本文通过等离子体电弧电压监控系统测量直流等离子体射流的工作情况,利用经典的信号处理工具,通过对喷枪可控参数,如载气成分、载气流量和电弧电流的调节,重点研究了不同喷枪工作模式直流等离子体射流的伏安特性、电弧电压-气流特性。通过对电弧电压的标准差分析,电压信号的时域分析,并使用傅里叶变换分析电弧电压信号,并以此为依据证明了二路进气的稳弧作用。对不同工作模式下电极腐蚀的情况进行分析,证明了二路进气对电极腐蚀的改善。

本文中使用热等离子体熔融装置对某垃圾电厂的一种布袋除尘器飞灰进行了熔融处理,并用马弗炉熔融处理同种飞灰作为对照。通过比较分析熔渣的微观结构及 TCLP 的测试,发现等离子体熔融对垃圾焚烧飞灰中的重金属有很好的固定效果,使其重金属浸出浓度大大降低,说明热等离子技术是一种处理垃圾焚烧飞灰的有效手段。

2 二路进气热等离子体飞灰熔融系统

2.1 热等离子体飞灰熔融装置介绍

2.1.1 热等离子体飞灰熔融系统简介

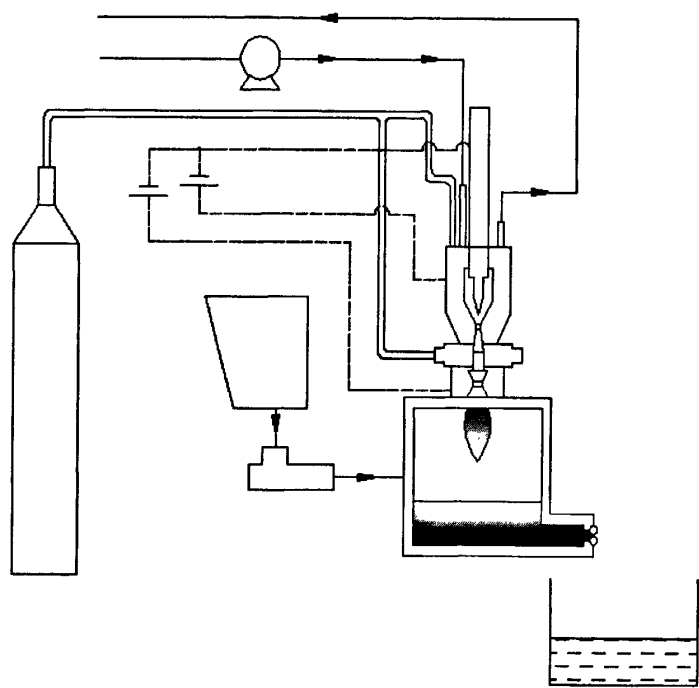


图 2.1 热等离子体飞灰熔融系统示意图

本研究中所使用的热等离子体飞灰熔融系统如图 2.1 所示。等离子体系统主要包括如下几个部分：二路进气双阳极等离子体喷枪、直流等离子体电源、高频发生器、等离子体喷枪水冷却系统、载气控制系统及等离子体熔融炉体。这些子系统之间的优化整合对于整个等离子体系统稳定高效运行具有非常重要的作用。

等离子体的电源共两组，均采用三相交流电经整流滤波后得到的直流电源，启动第 1 组电源及第 1 路进气，接通高频发生器，在阴极和阳极 I 之间加载高频高压，可点燃第 1 个电弧，此时电弧较短且不稳定；启动第 2 组电源在阴极和阳极 II 之间加载电压，点燃第 2 个电弧，此时电弧的长度和亮度增加且燃烧稳定；引入第 2 路工作气体，此时电弧的长度和亮度进一步增加且燃烧更加稳定。和传统的等离子体喷枪相比，二路进气双阳极的设计，通过电弧的拉长及进气的分配提高了电弧电压和功率，且电压的波动幅度较小，起到了很好的稳弧效果。

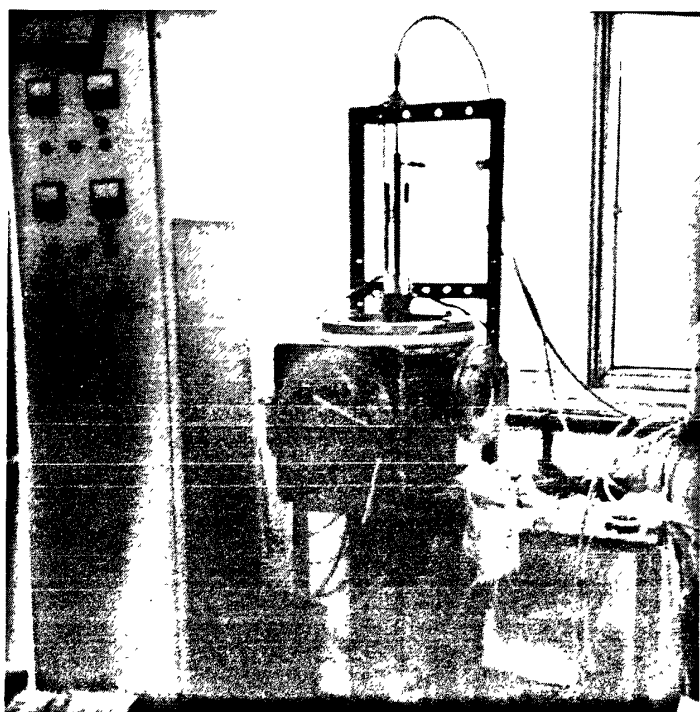
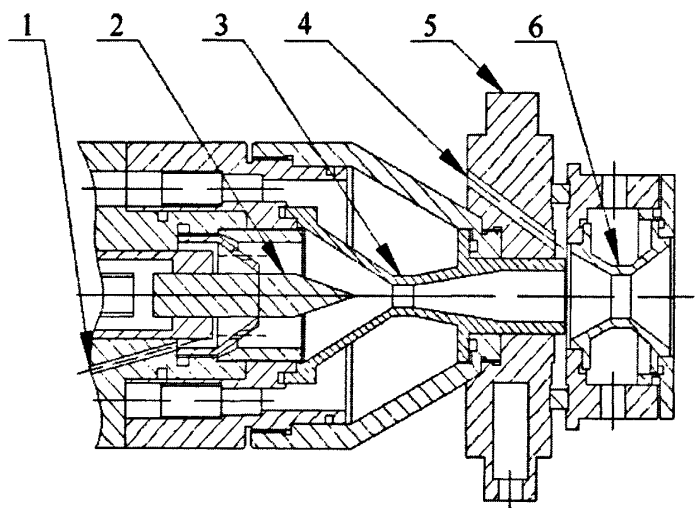


图 2.2 热等离子体飞灰熔融实验台

2.1.2 二路进气双阳极热等离子体喷枪

我们设计了一套具有二路进气双阳极结构的新型等离子体喷枪，结构如图 2.3 所示。在喷枪出口处的等离子体射流温度可以达到 10000 K 以上^[55]。喷枪设计使用的载气可以是氩气 Ar、氮气 N₂ 或者氩氮混合气体。电弧的功率(3~8 kW)取决于喷枪工作模式、电弧的电流，载气的成分和载气流量。电弧的宏观工作温度可达到 1500℃。

区别于传统的直流电弧类等离子体发生器，该等离子体喷枪由一根具有圆锥尖头的阴极，两个拉法尔型的阳极，及两路进气装置构成。在喷枪中两个拉法尔型铜阳极被放置在阴极尖端下游轴向上的不同位置处，两个阳极可单独工作，也可同时工作。第一路气体通过一个气体分离器进入阳极 I，第 2 路气体则通过中间件上的斜孔直接进入阳极 II。这些独特的结构设计使得等离子体喷枪的具有多种不同的工作模式，可调节性大大增强，等离子弧的弧长增加，功率升高，并且具有很好的稳弧作用。这些创新性的设计能够使喷枪产生非常稳定的、高亮度、低噪音、加长的大气压直流等离子体射流。



1.一路进气口 2.阴极 3.阳极 I

4.二路进气口 5.中间件 6.阳极 II

图 2.3 二路进气双阳极等离子体喷枪结构图

阴极

阴极前端为直径 10 mm 的钨钨棒（2%钐），后端为同样直径的铜棒，具有圆锥尖头。阴极尖端和阳极 I 孔道距离为 3 mm~5 mm。采用水冷却。

阳极 I

阳极 I 基本结构为拉法尔型喷嘴，材料为紫铜，会聚面半角 30°，发散面半

角 8.3° ，孔道直径 5 mm，孔道长 5 mm。采用水冷却。

阳极 II

阳极 II 基本结构为拉法尔型喷嘴，材料为紫铜，压缩角 26.57° ，孔道直径 10 mm，孔道长 5 mm。采用水冷却。

中间件

位置介于两个阳极之间，和阳极 I 通过螺纹连接相连，中间件和阳极 II 通过石英玻璃圆环绝缘。中间件上有第二路进气口，用来加入第二路工作气体。采用水冷却。

电极的材料和尺寸对等离子体射流的特性有着非常大的影响。石英玻璃圆环保证了两个阳极之间较好的绝缘性能。

2.1.3 热等离子体飞灰熔融装置各组成系统

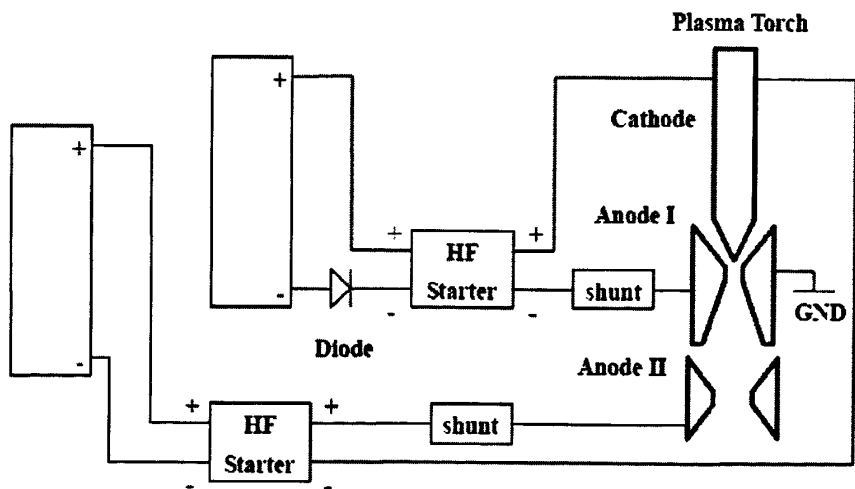


图 2.4 等离子体电源示意图

等离子体电源系统

等离子体电源用来点燃和维持等离子体电弧的正常工作。在我们的试验中, 等离子体电源采用工业三相交流电经整流滤波得到的直流电源, 主要工作参数为, 第一组电源的空载电压为 45V, 输出电流 50~215A; 第二组电源的空载电压 85V, 输出电流 50~215A。

高频发生器

在我们的试验中, 高频发生器的作用是在电路中提供高频高压脉冲, 使阴极尖端和阳极 I 喷嘴之间产生火花放电, 从而点燃第一个电弧。电源及高频发生器系统布置如图 2.4 所示。

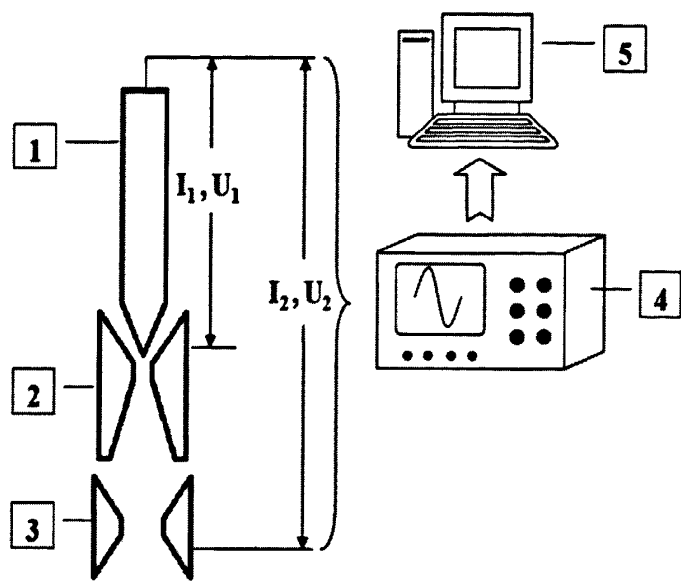
水冷却系统

为了使等离子体喷枪工作在一个稳定的状态, 并且减小电极的高温腐蚀和烧损, 需要对喷枪各个部件进行有效地冷却。在我们的设计中, 三个电极 (阴极, 阳极 I, 阳极 II) 和中间件均采用独立水冷系统。四路冷却水系统的流量通过电磁流量计 LD-10Y 进行控制, 主要技术参数特征, 测量范围 80~400L/h, 流速范围 0.3~12m/s, 测量精度 $\pm 1\%$ 。冷却水的总流量为 800 L/min。

载气控制系统

载气流量通过气体质量流量控制器 (型号: D07-9E/ZM) 与流量显示仪 (D08-8C/ZM) 配套控制, D07-9E/ZM 质量流量控制器的主要性能指标为, 流量规格 50SLM, 准确度为 $\pm 2\%$ F.S(Full Scale), 线性为 $\pm (0.5\sim 2)\%$ F.S, 重复精度为 $\pm 0.2\%$ F.S。在本文的试验中, 只使用纯氩气和氩气氮气混合气体作为等离子体喷枪的载气。

2.2 等离子体监控系统



1.阴极 2.阳极 I 3.阳极 II 4.示波器 5.计算机

图 2.5 热等离子体诊断系统示意图

等离子喷枪阴极和两个阳极之间的电压 U_1 , U_2 和电流 I_1 , I_2 通过数字式示波器（美国 Tektronix 公司的 TDS 2024B 数字储存示波器（DSO））采集，并通过 RS-232 总线和计算机相连，主要的特征参数：四通道，带宽 200MHz，最快的采样速率 2GS/s，记录长度为 10k；电压探头采用 P2200 10X-1X 200 MHz 可切换无源探头，电流探头采用 TCP 303 探头和 TCPA 300 放大器组合。

2.3 电弧的产生过程及不同的工作模式

我们的试验中涉及到几种不同的等离子体喷枪的工作模式，根据使用阳极数量不同，可分为双弧模式和单弧模式，见图 2.6 所示。根据进气方式不同又可分为一路进气模式和二路进气模式。

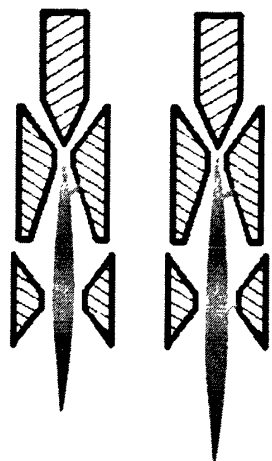


图 2.6 单弧模式及双弧模式示意图

单弧模式

电弧的点燃过程如下：启动第一组电源,接通高频发生器，在阴极和阳极 I 之间加载高频高压产生火花放电，点燃第一个电弧，此时电弧较短伴有较大噪音，且亮度较暗。电弧通过阴极斑点和唯一的阳极斑点(位于阳极 I 的壁面上)来维持。单弧模式的示意图和照片分别由图 2.6 图 2.7 所示。

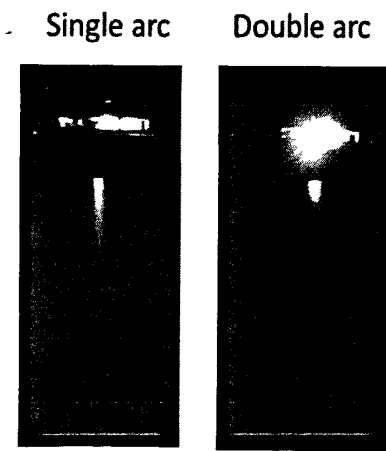


图 2.7 单弧模式及双弧模式图像

双弧模式

在点燃第一个电弧之后，启动第二组电源在阴极和阳极 II 之间加载电压，直

接点燃第二个电弧,此时电弧的长度、亮度和稳定性都明显增加且噪音减弱。和传统的等离子体喷枪相比,双阳极结构的特殊设计,通过拉长弧长提高了电弧的电压和功率,并且电压的脉动幅度较小,起到了很好的稳弧效果。随着第二个电弧的点燃,无论是电弧的长度,亮度还是射流稳定性均明显地提高。在双弧模式下,电弧通过一个共同的阴极斑点和两个独立的阳极斑点(分别位于阳极 I 和阳极 II 的壁面上)来维持。

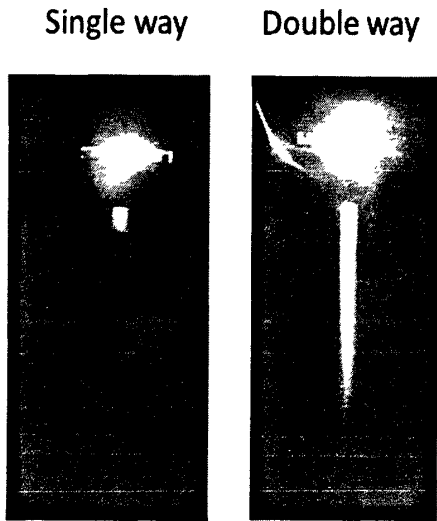


图 2.8 一路进气模式及二路进气模式图像

一路进气模式

一路进气模式指的是常规的传统进气模式,工作气体从阴极后方进去,通过匀气装置后,经过阳极 I、阳极 II 后排出,如图 2.3 所示。在这种工作模式下,工作气体会被阳极 I 电弧、阳极 II 电弧电离加热。

二路进气模式

二路进气模式在一路进气模式的基础上增加了一路进气。这一路工作气体通过中间件上的斜孔直接进入喷枪,如图 2.3 所示,气体只经过阳极 II,不经过阳极 I。引入第二路工作气体后,等离子体电弧的长度和亮度进一步增加且燃烧更

加稳定, 噪音进一步减轻, 有利于电极腐蚀现象的改善。

2.4 分析工具

为了充分地理解等离子体中所涉及的物理机制和过程, 透过原始的试验数据发现更为直观的定性、定量信息, 对测量所得到的不同信号进行定量分析或比较或二次计算是非常必要的。在这里我们从统计学角度定义了一些用来描述等离子体测量信号 $V(t)$ 的特征参量:

信号平均值

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n V_i(t)$$

信号的标准差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}$$

快速傅立叶变换 (FFT)

傅里叶变换能将满足一定条件的某个函数表示成三角函数(正弦和/或余弦函数)或者它们的积分的线性组合。对于信号而言, 傅立叶变换可以将信号从时域转到频域, 从带有噪声的原始时域信号中提取出频率分量。频域的概念, 能够体现出脉动的行为, 是信号处理常用的工具。通常, 我们很难从原始的时域信号中分辨出频率的信息。对于一个时域信号 $V(t)$, 傅立叶变换 $F(v)$ 可以定义为:

$$F(\omega) = F[V(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

FFT 是计算离散傅里叶变换的一种快速算法。快速傅里叶变换是 1965 年由 J.W.库利和 T.W.图基提出的。采用这种算法能使计算机计算离散傅里叶变换所需

要的乘法次数大为减少，特别是被变换的抽样点数 N 越多，FFT 算法计算量的节省就越显著。本文中 FFT 均由 MATLAB 实现。

2.5 本章小结

在这一章中介绍自行设计的热等离子体飞灰熔融装置。装置的核心是一种具有二路进气双阳极特殊结构的热等离子体喷枪。在本章中对喷枪及热等离子体飞灰熔融装置的各组成部分进行了详细说明，并介绍了后续试验中使用的等离子体监控系统和数据处理方法。

3 二路进气热等离子体电弧的电特性研究

近年来,热等离子体技术已经在工业中得到了广泛的应用,但是,等离子体喷枪仍存在电极腐蚀,喷枪寿命短,效率低下,系统可靠性差等问题,这阻碍了热等离子体技术的进一步发展,并限制了这一技术在更多潜在领域中的应用。因此,对等离子体内在特性和过程处理中的基本物理现象的研究显得尤为重要,也是目前国内外的研究热点。对热等离子体技术在工作中的许多基本参数如电子激发温度、脉动特性、伏安特性等国内外相关研究也取得了许多结果^[56-61]。

3.1 热等离子体电弧伏安特性

伏安特性是等离子体电弧最重要的电特性之一。电弧电压和电流之间的关系表征了电弧弧柱获得或损失能量的机制。它不仅能直观地反映等离子体电弧的工作稳定情况,而且基本地反映了等离子体供电电源与等离子体电弧之间的能量转移情形。

等离子体电弧的伏安特性主要取决于等离子体炬的结构设计及它的输入源,许多研究工作者对电弧的电压电流特性进行过大量的研究^[58, 62-64],他们的研究结果表明,伏安特性特性主要受如下参数影响:两电极之间的间隔、喷嘴的直径与通道长度、电极的材质、载气的成分及流量、输入的功率与电流以及冷却水的效果等等。通常认为自由电弧的伏安特性是下降的,而当电弧受到阳极壁面的压缩或工作在大电流时,伏安特性可能会出现上升的趋势。本文主要从等离子体的输入源方面:等离子体喷枪的工作模式、电源的输入电流、氩气的流量及氩氮混合气的比例,来研究等离子体的电压电流特性。

3.1.1 单弧模式下的伏安特性

图 3.1 是在分别保持稳定的一路氩气流量 12L/min、14 L/min、16 L/min,热等离子体在单弧模式下工作得到的。阳极 I 电弧电压 U_1 受电流的影响十分明显。随着电弧电流从 70 A 增加到 100 A 增大,阳极 I 电弧电压 U_1 存在着明显地上升

趋势。

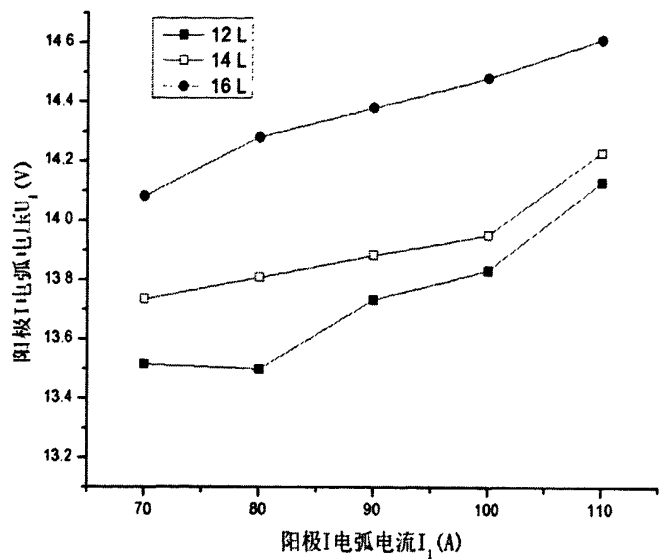


图 3.1 单弧模式下等离子体电弧伏安特性

3.1.2 一路进气双弧模式下的伏安特性

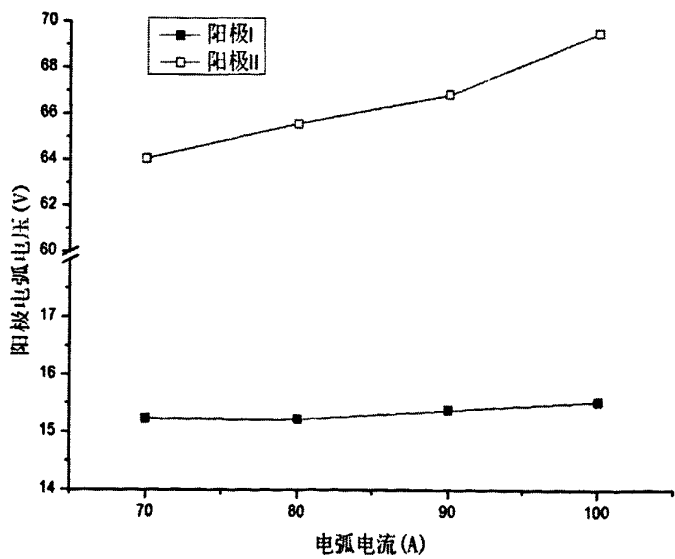


图 3.2 双弧模式下等离子体电弧伏安特性

图 3.2 是在保持稳定的一路氩气流量 14 L/min，双弧模式下使电弧电流 I_1 和 I_2 保持同步的增加得到的。电弧电压 U_1 , U_2 受电流的影响较大，随着电流的增大而上升，阳极 II 电弧电压 U_2 其中上升的幅度较大，阳极 I 电弧电压 U_1 而幅度较小。

一般认为普通的等离子喷枪，等离子体的伏安特性为明显的下降特性^[5]。电流上升的同时，弧柱截面和电导率也同时上升，由于 $R = L/(\sigma S)$, $U = IR$ ，使电阻的下降比例比电流的上升比例更大，最终导致电弧电压的下降。但从图 3.1、图 3.2 可以看出，等离子体喷枪的伏安特性都是呈上升趋势的。这是因为在我们的试验中，由于阳极内径较小，机械压缩效应和热压缩效应的存在较为明显，电弧弧柱的截面积受到限制，即弧柱的截面积变化不大，因此等离子体伏安特性呈现为上升曲线。

此外，从能量平衡的角度进行分析，电弧温度的提高使恒定的电流下等离子体电源必须提供更多的能量才能维持电弧的运行以保持能量平衡。Osaki 等人在试验中也观察到呈上升趋势的伏安特性曲线^[65]。М.Ф.Жуков 也指出当室壁限制了弧柱直径随电流增加而增大的时候，在电弧的伏安特性中可能出现上升部分^[66]。

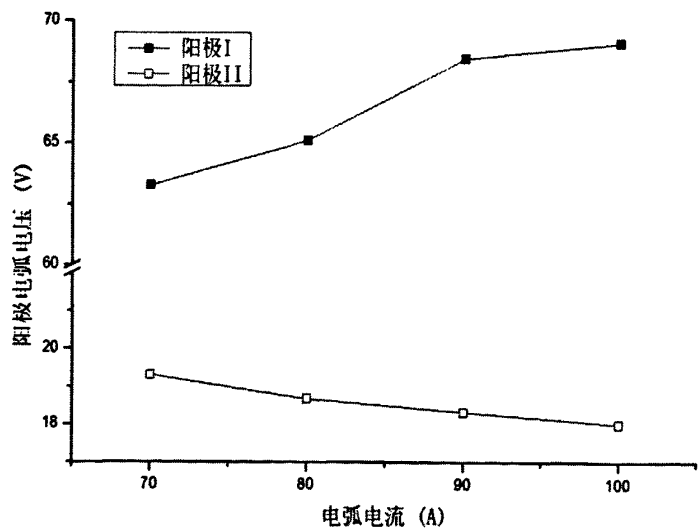


图 3.3 双弧模式下等离子体电弧伏安特性

图 3.3 是在保持稳定的一路氩气流量 14 L/min，双弧模式下使 I_1 和 I_2 保持同步的增加得到的，通过改变阴极尖端与阳极 I 的距离，使阳极 I 电弧电压提升。从图中可以发现， U_2 受电流的影响较大，随着电流的增大而上升，而 U_1 随着电流的增大而缓慢下降。图 3.3 中通过提升 U_1 提高了电弧功率进而提升了电弧温度，较高的电弧温度会使热压缩效应得到了克服，电弧横截面积随之增大，因此此时阳极 I 电弧电压 U_1 的伏安特性出现了下降的趋势。

3.1.3 二路进气双弧模式下的伏安特性

图 3.4 是在保持稳定的一路氩气流量 14 L/min，引入第二路氩气流量 4 L/min，在双弧模式下使 I_1 和 I_2 保持同步的增加得到的。从图中可以发现， U_2 受电流的影响较大，随着电流的增大而上升， U_1 随着电流的增大而缓慢上升。可见图 3.4 中等离子体的电弧伏安特性曲线与图 3.2 中的变化趋势相当，可见二路进气的引入对于电弧伏安特性的影响不大。

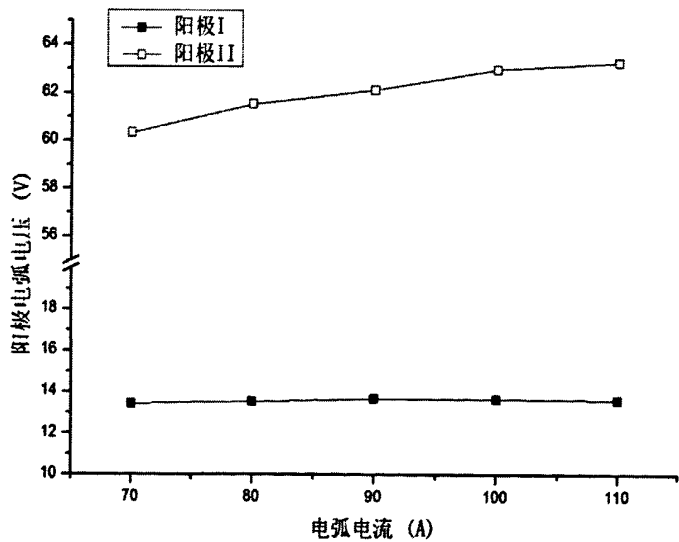


图 3.4 二路进气模式下等离子体电弧伏安特性

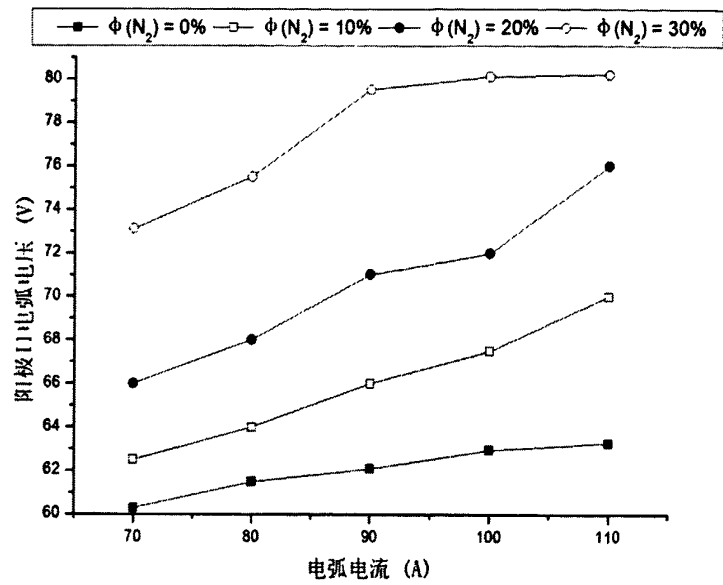


图 3.5 二路进气模式下氩氮混合气等离子体电弧伏安特性

氮气作为工作气体的等离子体喷枪工作特性，与氩气有较大区别，氮气具有较高的电离电位，虽然引弧特性不好，但价格便宜，使用氮气作为工作气体可以有效的降低处理成本。因此，本研究在等离子体的载气为氩气和氮气的混合气体的情况下，分析了混合气体中不同的氮气比例对电弧电压、及等离子体伏安特性的影响。

在双弧模式下引入二路进气，并且在二路进气中加入不同体积分数的氮气，分别为 10%、20%和 30%，保持二路进气氩氮混合气体的总流量稳定在 4 L/min 不变，然后对它们的伏安特性进行分析，结果如图 3.5 所示。

从图 3.5 中可以发现，相比氩等离子体电弧的伏安特性，氩氮等离子体的伏安特性的斜率更大。保持电流不变时，随着氮气体积比例的增加，电弧电压急剧地上升。当二路进气中的氮气体积分数分别为 0%、10%、20%、30%时，电弧电流从 70A 上升至 100A，电弧电压变化幅度分别为 4.9%、12.0%、15.2%、9.7%。这说明氮气的加入对电弧电压的提高作用非常明显。30%氮气的变化幅度较小是由于电源输出功率有限，此时的电弧电压已接近电源空载电压 85V。

和纯氩等离子体射流相比，氩氮混合气等离子体射流的平均电压更高，这是由于氮气是双原子气体，相对于单原子气体氩气需要更多的能量使其发生离解生

成氮原子，另一方面这是因为氮气的导热系数比氩气高，对弧柱的热压缩效应更为明显，因此电弧电压高。当在氩气中加入适量的氮气，使产生的等离子体射流长度增加，电压升高，功率增大。

3.2 热等离子体电弧电压与工作气体流量的关系

3.2.1 单弧模式下的电弧电压与工作气体流量的关系

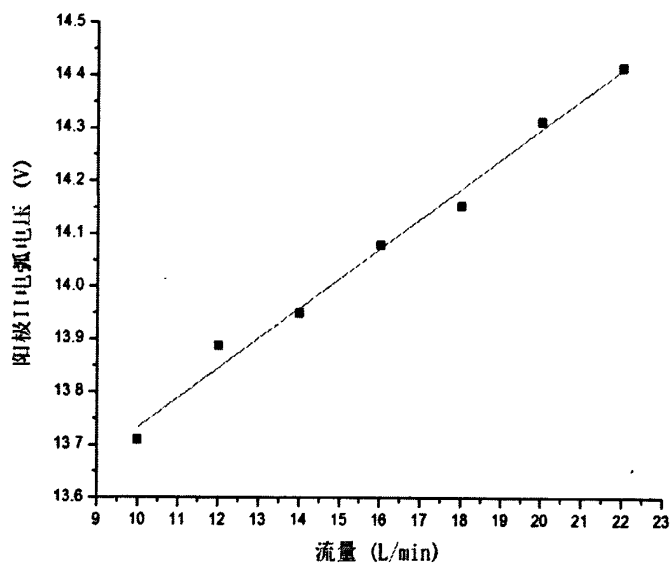


图 3.6 单弧模式下电弧电压-气流曲线

在单弧模式下，保持电源的输入电流在 $I_1=100A$ ，调整一路氩气的流量在 $10L/min\sim22L/min$ 之间变化，试验得到的弧压信号阳极 I 电弧电压 U_1 ，如图 3.6 所示。从图中可以发现，阳极 I 电弧电压 U_1 与随进气量的增加逐渐上升，二者基本呈线性关系。

3.2.2 一路进气双弧模式下的电弧电压与工作气体流量的关系

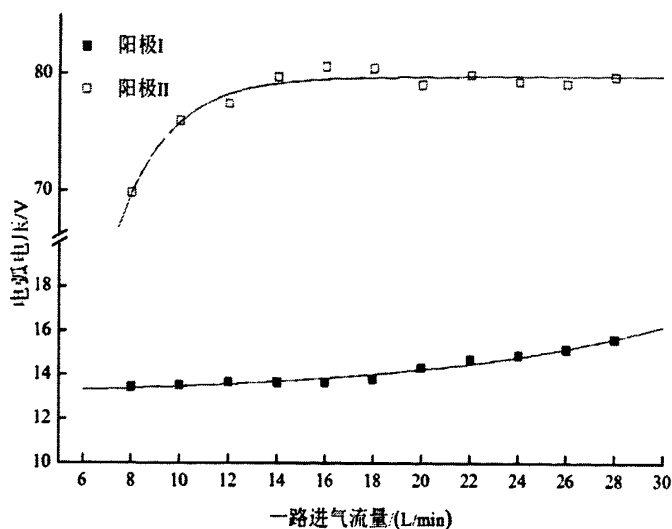


图 3.7 双弧模式下等离子体电弧电压-气流曲线

图 3.7 显示的是在一路进气双弧工作模式下, 调整一路氩气的流量在 8~28 L/min 之间变化, 所得到的阳极 I、阳极 II 电弧电压 U_1 , U_2 。阳极 I 电弧电压 U_1 与进气量基本成线性上升关系, 阳极 II 电弧电压 U_2 随气流增大到一定程度后进入平台期, 之后基本保持不变。

从图 3.6、图 3.7 中可以发现, 阳极 I 电弧电压 U_1 与进气量的关系二者基本一致。这可能是在气流的作用下, 阳极斑点向下游移动, 导致电弧长度增加, 进而使电弧电阻升高, 电弧电压也随之升高。另一方面, 从能量平衡的角度来看, 更多的气体需要更多的能量来加热, 也就需要更高的电场强度提供能量。这现象跟 Ramasamy 等人的^[63]报道相符合。

由图 3.7 可以发现, U_2 的变化与 U_1 的变化趋势不相同, U_2 没有随着氩气流量的增大单调地升高, 而是在升高至一定程度时进入了一个相当平缓的平台期。造成这种现象的原因, 这可能是由于阳极 II 的长度较短, 阳极 II 电弧所能够伸长的范围有限, 并且外界冷空气的对电弧温度、电离程度的影响进一步限制电弧的伸长, 当阳极斑点下移时与卷吸得冷空气相遇, 导致斑点缩回, 电弧弧柱长度增加有限。并且由于阳极喷嘴颈部直径较小, 在机械压缩效应和热压缩效应的作用下, 电弧横截面积增大的范围有限。另一方面等离子体电源输出功率有限, 无

法提供更多的能量，用于工作气体的电离。

3.2.3 二路进气双弧模式下的电弧电压与工作气体流量的关系

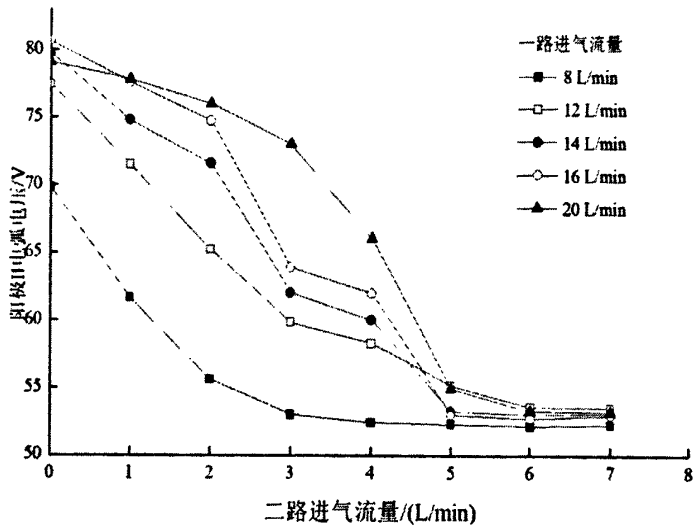


图 3.8 二路进气双弧工作模式下等离子体电弧电压-气流曲线

这种现象可能是多种因素共同作用的结果。首先由于中间件处具有极高的宏观温度，引入二路进气后，氩气会迅速电离，直接提高了阳极 II 内部带电粒子密度，使得电导率大幅度提高。其次，二路进气的引入会使喷枪内部流场、温度场发生改变，引入更多的工作气体，气体的增多可以抵消热压缩效应增强带来的截面积损失。虽然，二路进气的引入会使电弧伸长，但由于阳极 II 的长度较短和外界冷空气，电弧弧柱长度增加有限。在这些因素的影响下，阳极 II 电弧电压成随二路进气的增加而下降，呈现出了与一路进气显著不同的趋势。

通过对两种不同的工作模式下的弧压气流曲线的分析可以发现，在一路进气双弧工作模式时，电弧电压在氩气进气量大于 14 L/min 时上升幅度有限，功率已基本达到峰值，从节省工作气体的角度考虑，氩气进气量不宜高于 14 L/min。在二路进气双弧工作模式时，可以看到电弧电压随二路进气的增多而不断降低，因此在电弧工作稳定的情况下，应尽量减少二路进气。

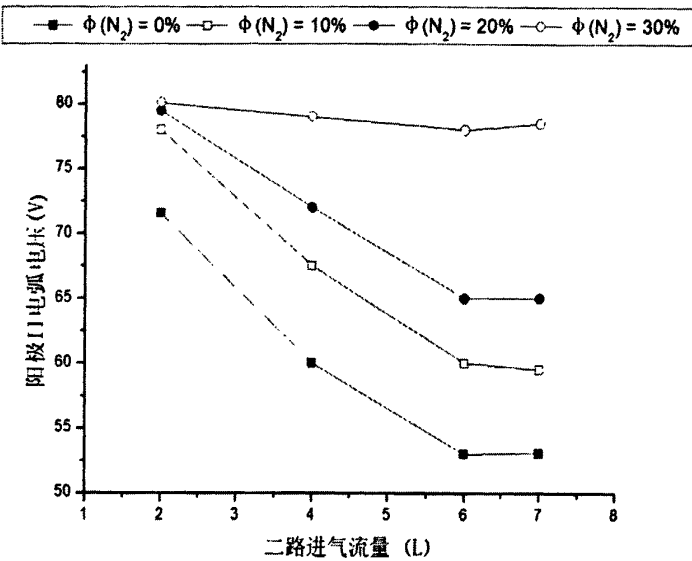


图 3.9 二路进气模式下氩氮混合气等离子体弧压-气流曲线

在双弧模式下，保持电源的输入电流在 $I_1 = I_2 = 100\text{A}$ ，保持一路氩气的流量在 14 L/min 不变，引入二路进气，在第二路进气中加入不同体积分数的氮气，分别为 10%、20%和 30%，保持二路进气氩氮混合气体的总流量稳定在 4 L/min 不变，试验得到的弧压信号阳极 I 电弧电压 U_1 ，如图 3.6 所示。

从图中可以发现，二路进气模式下氩氮混合气等离子体电弧电压-气流曲线的变化趋势与氩气的相似，均随着二路进气量的增大而降低。由于氮气是双原子气体，相对于单原子气体氩气需要更多的能量使其发生离解生成氮原子，氩氮混合气的等离子体电弧电压随二路进气中氮气的增多而升高。二路进气为 30% 的氮气时，由于等离子体电源功率有限，因此变化幅度不大。

3.3 本章小结

测量了等离子体射流的电信号参数，利用经典的信号处理工具，通过对喷枪可控参数，如载气成分、载气流量和电弧电流的调节，重点研究了不同喷枪工作模式直流等离子体射流的伏安特性、电弧电压-气流特性。得到如下结论：

与传统等离子喷枪不同，本文设计的等离子体喷枪的伏安特性大部分呈上升

趋势的。这是由于阳极内径较小,压缩效应的存在较为明显,电弧弧柱的截面积受到限制,因此等离子体伏安特性呈现为上升曲线。

在一路进气模式下时,阳极 I 电弧电压随进气量增加而增大,阳极 II 电弧电压没有随着氩气流量升高至一定程度时进入了一个相当平缓的平台期。二路进气的对阳极 II 电压 U_2 的影响与一路进气相反,呈下降的趋势,且下降的斜率随着一路进气的增加而降低,但最终趋于一致,进入了相对平缓的区域。

二路进气模式下氩氮混合气的引入会使电弧电压显著升高。一方面由于氮气需要更多的能量使其发生离解,另一方面因为氮气的导热系数较。当在氩气中加入适量的氮气,使产生的等离子体射流长度增加,电压升高,功率增大。二路进气为 30% 的氮气时,由于等离子体电源功率有限,因此变化幅度不大。

4 二路进气热等离子体电弧的脉动特性研究

等离子体电弧射流均存在着一定程度的脉动。引起等离子体电弧脉动的因素是多方面的：首先，等离子体供电电源一般为大功率直流整流电源，这种电源的电压输出中不可避免的含有一定的交流分量。其次，由于电弧在等离子体弧室内的大尺度分流造成的阳极斑点在阳极的通道内壁上的滑动也会导致电弧发生脉动。再次，阳极出口的等离子体电弧与周围的空气的温度、密度形成强烈的反差，从而产生对周围空气的卷吸，使电弧产生强烈地脉动。等离子体电弧的脉动会随着工作气体流量、进气方式、电弧电流、电压的变化而变化，往往造成阳极壁面严重的腐蚀，从而影响了电极的使用寿命^[58, 59, 67-74]。

目前主要是通过对等离子体射流的电信号参数（如电压、电流和电弧功率等），光强和噪声信号进行时域和频域分析来研究等离子体射流的脉动特性。近年来，Delair 等人已经对低压超音速双弧氮等离子体射流的电弧脉动和气体动力学行为进行了深入研究，结果表明等离子体的高频脉动的产生是由于电弧弧柱的声波使电弧弧室产生赫姆霍茨共振引起的^[68]。Brilhac 等人从电弧电压、电流、射流光强和噪声信号的脉动入手，研究了直流等离子体发生器的气体动力学行为。他们的研究发现等离子体射流的电、光、声信号的频谱分析图中都出现了一个固定的特征频率，这一频率是由于电弧阳极斑点在阳极表面做有规律的往复运动产生的^[69]。

本文通过等离子体电弧电压监控系统测量直流等离子体射流的工作情况，通过对电弧电压的标准差分析，电压信号的时域分析，并使用傅里叶变换分析电弧电压信号，并以此为依据证明了二路进气的稳弧作用。对不同工作模式下电极腐蚀的情况进行分析，证明了二路进气对电极腐蚀的改善。

4.1 热等离子体电弧脉动特性

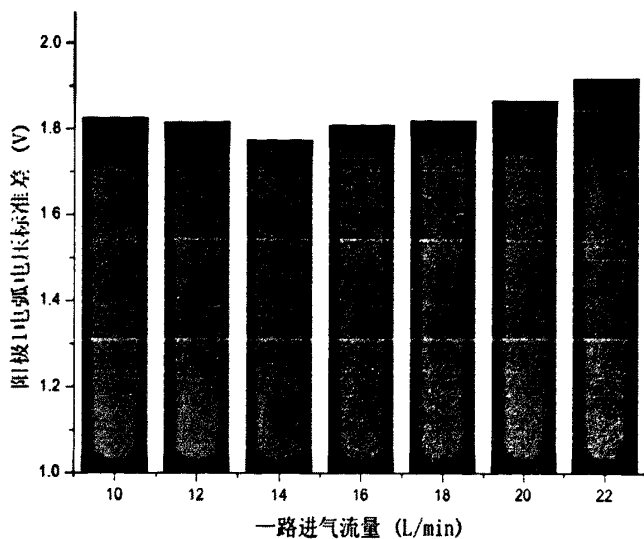


图 4.1 单弧模式电弧电压标准差

在单弧模式下，保持电源的输入电流在 $I_1=100\text{A}$ ，调整一路氩气的流量在 $10\text{L/min}\sim 22\text{L/min}$ 之间变化，试验得到的弧压信号阳极 I 电弧电压 U_1 的标准差，如图 4.1 所示。从图 4.1 中可以发现，阳极 I 电弧电压 U_1 的标准差首先随着气流的增加而逐渐下降，当一路进气流量增大到 14L/min 后，标准差又呈显著地上升的趋势。

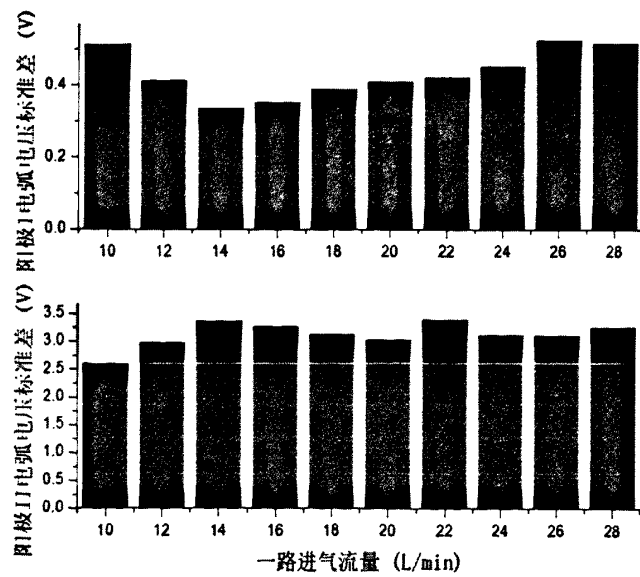


图 4.2 双弧模式电弧电压标准差

在双弧模式下,保持电源的输入电流在 $I_1=I_2=100\text{A}$,使一路氩气的流量在 $10\text{L/min}\sim 28\text{L/min}$ 之间变化,得到电弧电压信号在不同气流量下标准差。从图 4.2 中可以看出,阳极 I 电弧电压 U_1 的标准差,随着气流的增加首先逐渐下降,当气体流量增大到 14L/min 后,相对脉动幅度又呈显著地上升的趋势,并且与图 4.1 中单弧模式下,阳极 I 电弧电压标准差明显下降,说明阳极 I 电弧脉动在双弧模式下得到了改善;阳极 I 电弧电压 U_2 的标准差的变化没有特别的规律,综上分析,在保持电流 $I_1=I_2=100\text{A}$ 时,等离子体射流最稳定工作的流量范围是 14L/min ,这跟试验中观察所得的判断相符,在上述范围的流量下,等离子体射流很稳定,弧长基本不变,噪音比较小。

图 4.3 显示的是等离子体喷枪工作在双弧工作模式下在中间件处引入第 2 路工作气体后,保持一路氩气的流量在 14L/min ,二路氩气的流量在 $0\sim 8\text{L/min}$ 之间变化,所得到的阳极 II 电弧电压信号 U_2 标准差。由图中可以发现,随着二路进气的引入并增加,阳极 II 电弧电压信号 U_2 标准差呈下降的趋势,在 5L/min 取得最小值。可见,二路进气对阳极 II 的电弧脉动有明显的改善。

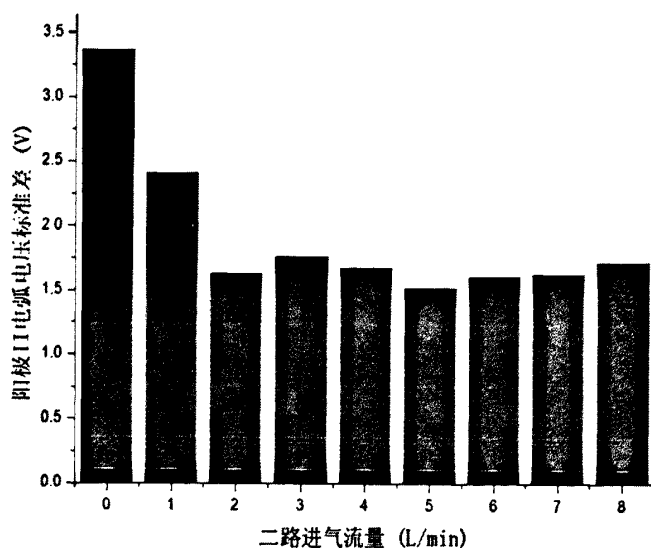


图 4.3 二路进气模式下电弧电压标准差

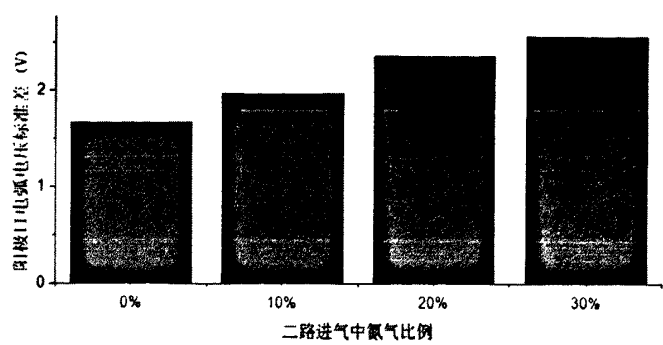


图 4.4 二路进气模式下氩氮混合气电弧电压标准差

在双弧模式下，保持电源的输入电流在 $I_1=I_2=100\text{A}$ ，保持一路氩气的流量在 14 L/min 不变，引入二路进气，在第二路进气中加入不同体积分数的氮气，分别为 10%、20%和 30%，保持二路进气氩氮混合气体的总流量稳定在 4 L/min 不变，试验得到的弧压信号阳极 I 电弧电压信号 U_1 的标准差，如图 4.4 所示。

由图 3.9 可知，相比纯氩等离子体的弧压，氩氮混合气等离子体的弧压显著地增大了。这是因为氮气是双原子分子。但是，从图 4.4 还可以发现，随着氩氮混合气体中氮气比例的增加，电弧电压升高的同时，而且电弧波动幅度也发展得更为强烈，Venkatramani 等人的研究结果与此相符^[75]。

4.2 热等离子体电弧的电压时域信号分析

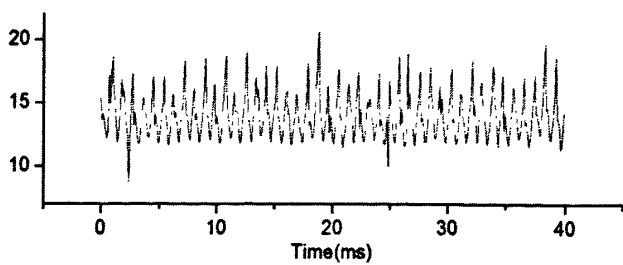


图 4.5 一路进气单弧模式下电弧电压波形

图 4.5 所示的电压波形是在以下操作条件下得到的，单弧模式，载气为纯氩

气，流量为 14 L/min，电流 $I_1=100\text{ A}$ 。从图中可以看出，波形曲线的形貌存在剧烈波动，在时间段 0~40ms 之间，可以清楚地发现曲线包含多个周期，并且波峰到波谷之间的波动程度较大。

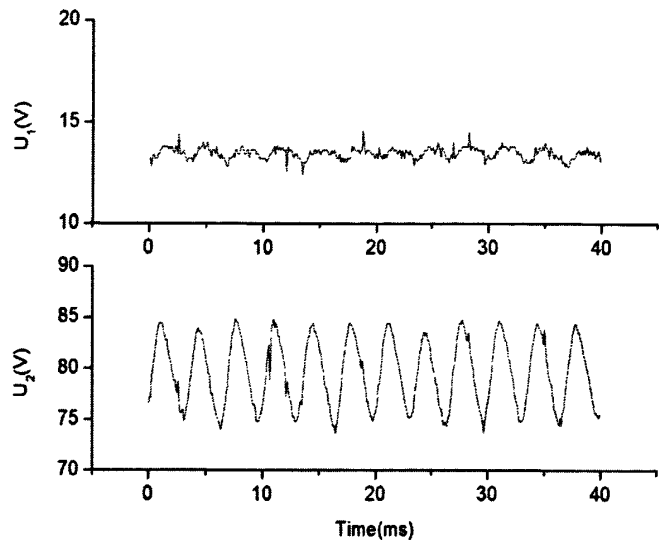


图 4.6 一路进气双弧模式下电弧电压波形

图 4.6 所示的电压波形是在以下操作条件下得到的，双弧模式，载气为纯氩气，流量为 14 L/min，电流 $I_1=100\text{ A}$ ， $I_2=80\text{ A}$ 。从图 4.6 中可以看出， U_1 波形曲线的波动明显减轻。说明双弧模式比单弧模式电弧工作更为稳定。 U_2 波形曲线类似正弦曲线，并且 U_1 波形曲线中也存在近似的波动，说明在双弧模式下，阳极 I 和阳极 II 中的电弧有可能同步工作。在时间段 0~40ms 之间 U_2 波形曲线存在 12 个周期，说明 U_2 存在频率为 300Hz 的脉动。

引入 4 L/min 的氩气作为二路进气后，在电流 $I_1=I_2=80\text{ A}$ 时得到阳极 I、阳极 II 电弧电压波形，如图 4.7 所示。 U_1 、 U_2 波形曲线已不存在明显的正弦波动，阳极 I 和阳极 II 中的电压脉动基本同步。 U_2 的波动程度也有所减轻。

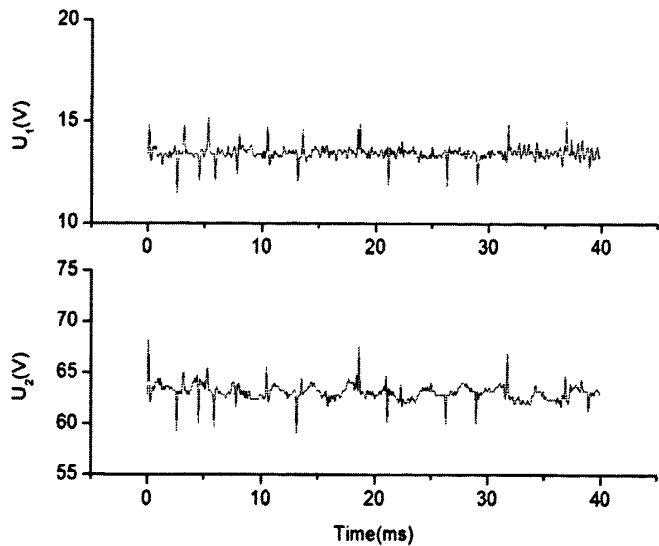


图 4.7 二路进气双弧模式下电弧电压波形

4.3 热等离子体电弧的电压频域信号分析

本文通过观察分析等离子体电弧电压特点，并对信号进行快速傅里叶变换 (FFT)，分析了等离子体电弧的脉动频率与及在不同频率下的脉动强度。

图 4.8、图 4.9、图 4.10 分别是热等离子体喷枪处于一路进气单弧，一路进气双弧，二路进气双弧三种的工作模式下，保持稳定的第一路进气氩气流量为 14 L/min 时的阳极 I 所得到的电弧电压 FFT 图像。

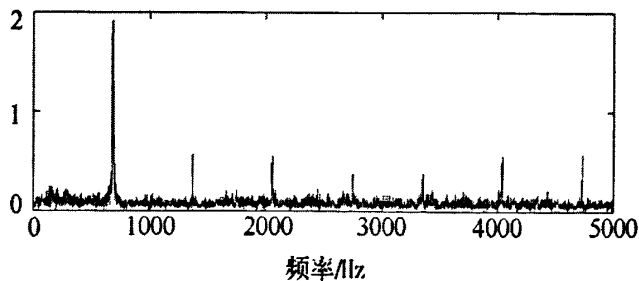


图 4.8 一路进气单弧工作模式电压脉动 FFT 分析

从图 4.8 中可以发现，在单弧模式下电弧电压的脉动频率可分为两类：第一

类是低频区的，在 680 Hz 处出现很强的峰值；另外一类在高频区，有 7 个较小的波峰分别出现在 1360 Hz，2040 Hz，2720 Hz，3400 Hz，4080 Hz，4760 Hz。在单弧模式下，等离子喷枪工作时伴随有 90 dB 左右的高频噪音，等离子体电弧伸出喷口长度约 3-5 cm，且不稳定。

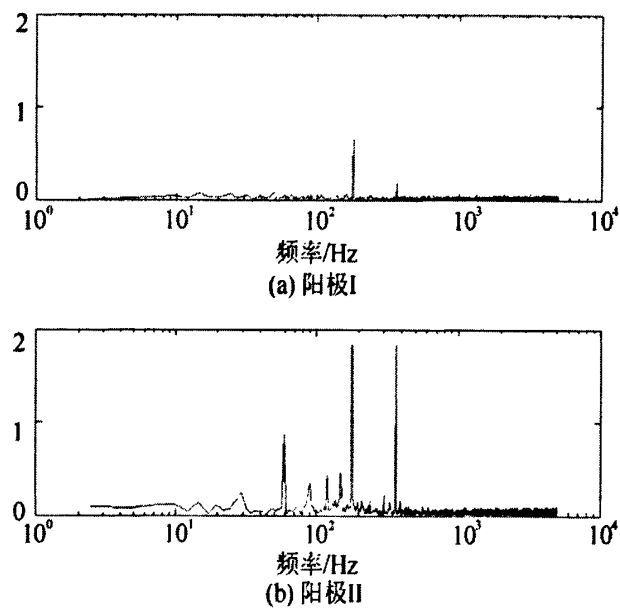


图 4.9 一路进气双弧工作模式电压脉动 FFT 图像

图 4.9 是在双弧模式单路进气模式下，阳极 I、阳极 II 电弧电压 FFT 图像。经过图 4.9a 与图 4.8 进行对比，可以明显的发现阳极 I 在较高频率下的波动明显减轻。但阳极 I 在低频处又出现了 150 Hz，300 Hz 的新波动，这与图 4.9b 中阳极 II 的电弧脉动频率完全一致，这可以说明阳极 I 中 150 Hz，300 Hz 频率的电弧脉动是由阳极 II 的点燃而引起的，此时双阳极脉动频率相同，二者处于同一种工作状态。通过阳极 II 的点燃，等离子喷枪进入双阳极工作模式，工作时的噪音明显减轻，约为 75 dB。等离子体电弧伸出喷口长度大大增长，约为 20 cm，但仍存在工作不稳定的情况，亮度和长度均有明显的波动。

此时，我们在中间件处引入第 2 路氩气作为工作气体，使其流量为 4 L/min，得到阳极 I、阳极 II 电弧电压 FFT 图像图 4.10。与图 4.9 相比，图 4.10a 与图 4.10b 中的波峰明显减少，说明阳极 I 和阳极 II 处的电弧脉动进一步减轻。由图 4.10b 中可以发现，150 Hz 及其谐波 300 Hz 处的波动始终存在，这可以说明给阳极 II

供电的电源 II 有可能存在着 150 Hz 的固有波动。在双弧二路进气工作模式下，工作时的噪音显著减轻，约为 55 dB 左右，等离子体电弧伸出喷口长度约为 20 cm，且亮度和长度均基本保持稳定。

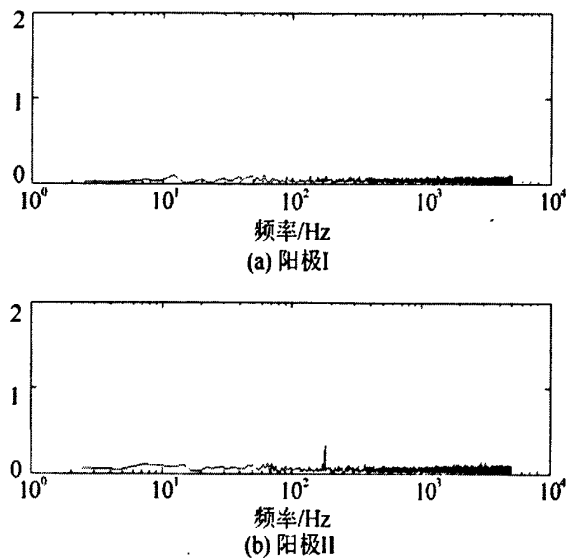


图 4.10 二路进气双弧工作模式电压脉动 FFT 图像

4.4 电极腐蚀现象研究

在其他参数均一致的情况下，使等离子体喷枪在分别在一路进气、二路进气模式下工作相同的时间，之后取出二者的阳极 II 和中间件，其中阳极 II 沿中轴线剖开，实物对照如图 4.11、图 4.12 所示。在图 4.11 中，左侧一路进气模式下的阳极 II 内壁凹凸不平，存在较为严重的电极腐蚀现象，而右侧二路进气模式下的阳极 II 的内壁相对平滑，电极腐蚀现象较轻。图 4.12 中中间件处的对比则更为明显，左侧一路进气模式下工作的中间件上出现了较大的腐蚀凹坑，深度约为 2mm，在凹坑还有由熔融的铜材料构成的突起。而右侧二路进气模式下的中间件则没有发现明显的电极腐蚀痕迹。可见在二路进气工作模式下，热等离子喷枪的工作更为稳定，电极腐蚀较轻，有利于热等离子喷枪的寿命的提高，降低危险废弃物处理的成本。

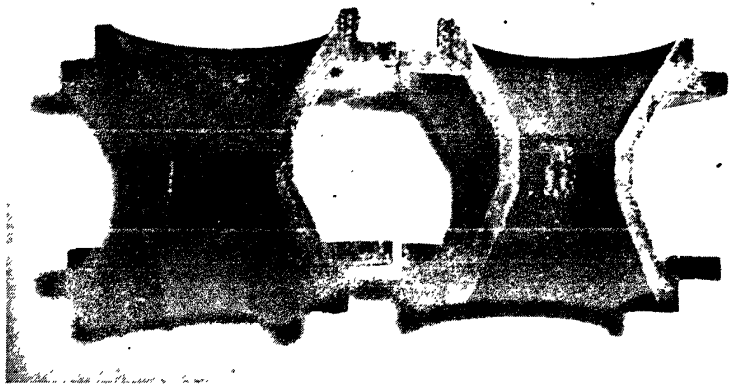


图 4.11 阳极 II 剖面图对比



图 4.12 中间件电极腐蚀对比

可见在二路进气工作模式下，热等离子喷枪的工作更为稳定，电极腐蚀较轻，有利于热等离子喷枪的寿命的提高，降低危险废弃物处理的成本。

4.5 本章小结

热等离子体电弧射流均存在着不同程度的脉动。这与等离子体电源、电弧阳

极斑点在阳极内壁上的滑动等因素有关。本章中通过对电弧电压的标准差分析,电压信号的时域、频域分析,发现通过双弧模式的引入,可以有效的抑制了高频脉动,使产生的等离子电弧更加稳定,脉动减弱,弧长增加,噪音减弱。在二路进气工作模式下,热等离子喷枪的工作更为稳定,电弧脉动进一步减弱。从电极腐蚀的情况看也有明显改善。这有利于热等离子喷枪的寿命的提高,降低危险废弃物处理的成本。

5 垃圾焚烧飞灰熔融处理结果对比

垃圾焚烧飞灰中含有较高浓度的 Cd、Pb、Cu、Ni、Zn 和 Cr 等多种有害重金属物质,并且吸附了毒性很高并且在环境中难以降解的持久性有机污染物二恶英/呋喃(PCDD/Fs)。重金属对生态环境具有极严重的危害,且无法被微生物分解,一旦进入食物链,将在生物体内富集,并最终进入位于食物链终端的人类体内。尽管 Cu、Zn 等一部分重金属是生命活动所需要的微量元素,但是大部分重金属如 Hg、Pb、Cd、Cr 等并非生命活动所必须,而且所有重金属超过一定浓度对人体均有毒。重金属与人体内的蛋白质及酶等发生强烈的相互作用,使它们失去活性,并可在人体的某些器官中富集,造成慢性中毒,严重危害人类健康^[76-83]。《国家危险废物名录》规定生活垃圾飞灰为危险废物,即编号为 HW18,飞灰的处置须按照危险废物的标准进行,如果条件允许,可在不污染环境的情况下进行综合利用^[84,85]。

本章将使用热等离子体熔融炉对飞灰进行处理并且以马弗炉熔融飞灰作为对照,通过扫描电镜、重金属固化分析和重金属毒性浸出检验处理效果。

5.1 垃圾焚烧飞灰与处理方法

在本研究中选用了来自华东地区某一城市生活垃圾焚烧厂的飞灰作为研究对象。该厂采用流化床工艺焚烧垃圾,飞灰通过布袋除尘器收集。采用了英国马尔文仪器有限公司 Mastersizer2000 粒度分析仪对飞灰进行了分析,粒径分布范围为 0.45~420.37 μm , D_{50} 为 54.15 μm 。飞灰中可燃有机成分的质量分数为 8.64%,化学成分通过 X 射线能量色谱仪(EDX, GENESIS 4000)测得,结果如表 5.1 所示。其中最为主要的成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 。由于 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 的含量较高,这种飞灰在不加入添加剂的情况下可以实现玻璃化。

表 5.1 飞灰的主要无机成分(w %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
48.87	17.84	10.32	5.86	1.88
K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	SO ₃
1.77	1.54	1.44	0.88	0.70

将飞灰置于刚玉坩埚之中，放置在等离子体电弧之下，熔融 20 min 之后用水迅速冷却，可得到黑色玻璃状熔渣。本研究中使用马弗炉熔融同种飞灰作为对照。将同量飞灰样品置于马弗炉之中，升温至 1350 °C 并保温 2 h，之后用水迅速冷却。

5.2 飞灰处理结果及比较

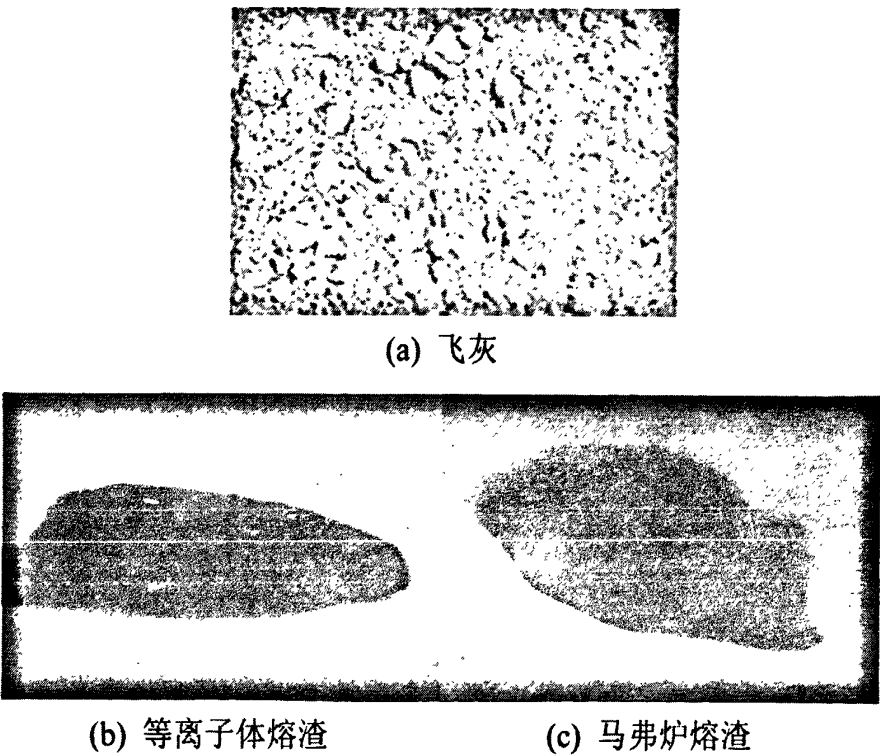


图 5.1 飞灰及其熔渣的实物照片

将飞灰置于等离子体电弧之下，熔融 20 min 之后用水迅速冷却，得到黑色玻璃状熔渣，如图 5.1b。该熔渣表面光滑，质地坚硬，密度为 $2.80\times 10^3\text{ kg/m}^3$ ，维氏硬度可达到 6.0 GPa，质量减少为飞灰的 86.0%。当使用马弗炉熔融飞灰时，需在升温至 1350 °C 并保温 2 h 后用水迅速冷却才可得到类似熔渣，如图 5.1c 所示。马弗炉熔渣密度为 $2.79\times 10^3\text{ kg/m}^3$ ，维氏硬度为 4.4 GPa，质量减少为飞灰的 84.5%。由此可见，通过热等离子体方法熔融的熔渣的硬度明显高于传统热处理的生成的熔渣。并且马弗炉熔融相同飞灰所需时间远大于热等离子体熔融。这说明本技术具有能量密度高，处理速度快的优点。

5.2.1 飞灰扫描电子显微镜图像

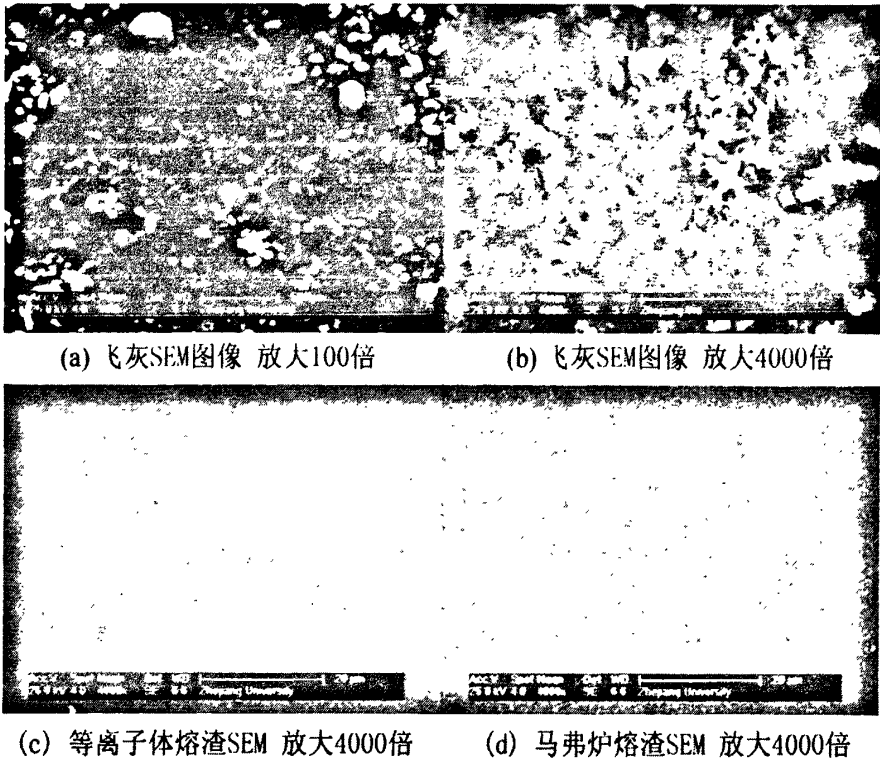


图 5.2 飞灰及其熔渣的实物图及 SEM 图像

通过场发射扫描电子显微镜(FSEM, SIRION-100)比较飞灰和两种方法熔融后的熔渣的微观结构。图 5.2a、图 5.2b 中飞灰的微观结构十分复杂，内部布满了大小空隙，外形极不规则，而图图 5.2c 及图 5.2d 中熔渣却与之恰好相反，他

们的微观结构紧密光滑无空隙，整体呈现良好的均一性，与熔融之前的飞灰以呈现出了显著的区别。这种紧密光滑的结构使飞灰可以用于微晶玻璃的制备^[86-89]。

5.2.2 飞灰的重金属迁移特性

将飞灰及熔渣用玛瑙研钵磨至 200 目左右的粉末，然后置于 105 ℃的烘箱中干燥 24 h，保存备用。固体粉末重金属含量测定的消解方法：称取约 0.1 g 样品放入消解罐，加入 3 ml HNO₃+2 ml HF+1 ml HClO₃ 的消解液，在 180 ℃下消解 12 h，最后用去离子水定重到 95g。将消解后的飞灰及熔渣样品耦合等离子体质谱仪（ICP-MS，Agilent7500a）测量重金属浓度，得到的结果如图 5.3 所示。

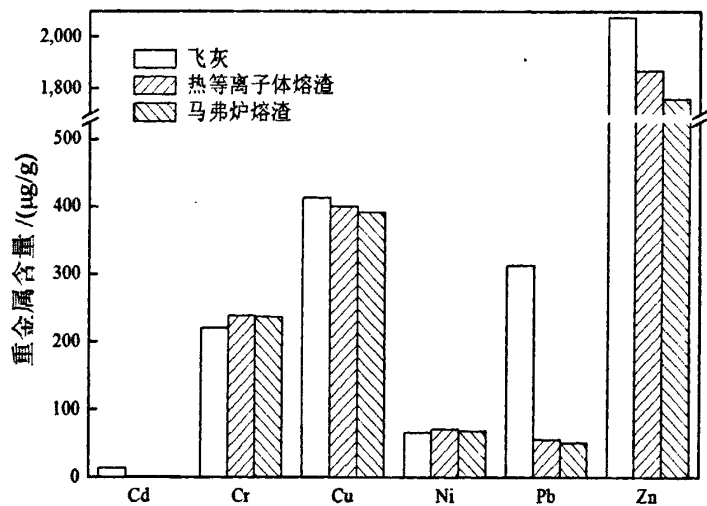


图 5.3 飞灰及其熔渣的重金属含量

从图 5.3 中可以得知，飞灰中 Cr、Cu、Pb、Zn 的含量较高，而 Cd、Ni 含量较少。Cd、Cu、Pb、Zn 在熔融之后含量均有所降低，而 Cd 和 Ni 的含量略微升高。为了更明确的评价飞灰熔融过程中重金属的固化与挥发，对熔渣中重金属固化率进行了分析，如图 5.4 所示其计算公式为：

$$\text{重金属固化率} = \frac{(100 - \text{熔融失重率}) \times \text{熔渣中重金属含量}}{\text{飞灰中重金属含量}}$$

Cr、Cu、Ni、Zn 的固化率均在 80%左右，而 Cd、Pb 的固化率较低。这说明 Cd 和 Pb 均为易挥发性金属，固化的难度较大。通过热等离子体熔渣及马弗炉熔渣的比较可以发现，各种重金属的固化率均有所提高，说明热等离子体熔融技术具有更好的重金属固化效果。由于热等离子体熔融技术具有更高的能量密度使飞灰熔融的时间大为缩短，因此重金属没有足够的时间进行挥发。

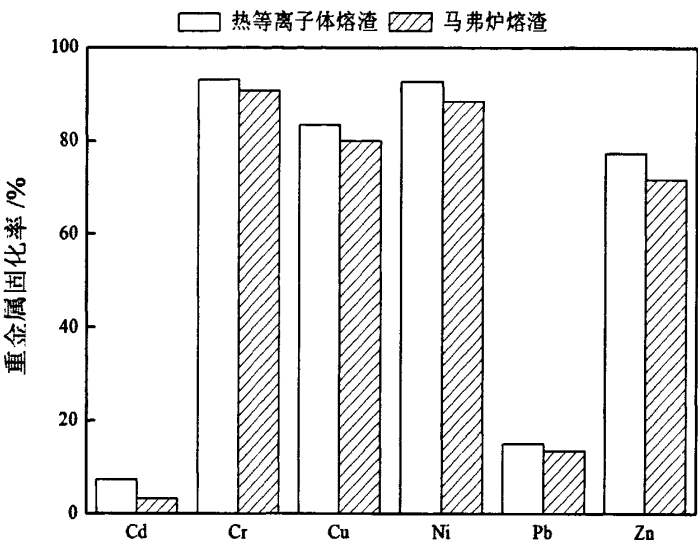


图 5.4 熔渣中的重金属固化率

5.2.3 飞灰的重金属毒性浸出特性

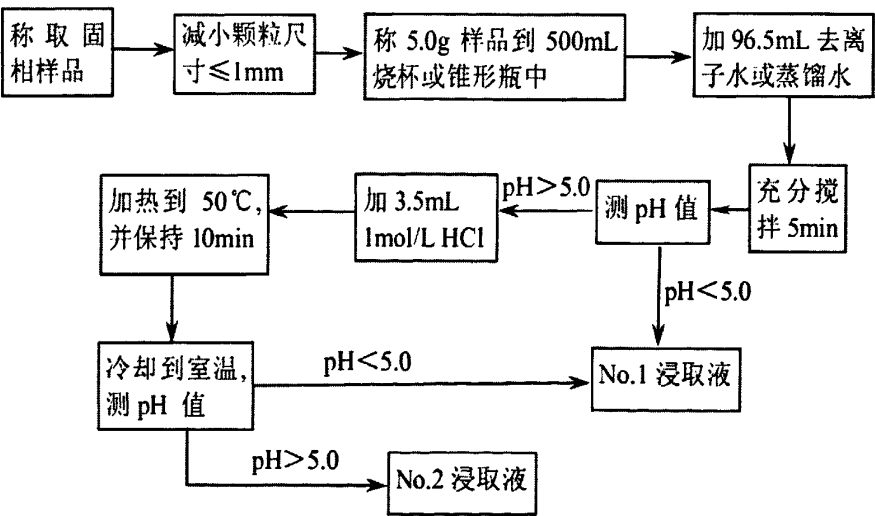


图 5.5 TCLP 方法选取浸取液的流程图

本论文采用美国 EPA 制定的重金属浸出方法 TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)。该方法涉及到两种浸取液：No.1 浸取液由冰醋酸 (CH_3COOH) 和氢氧化钠 (NaOH) 溶液配成, pH 值为 4.93 ± 0.05 ; No.2 浸取液由冰醋酸 (CH_3COOH) 配成, pH 值为 2.88 ± 0.05 。所以在对飞灰进行毒性浸出试验前, 需要确定选择哪一种浸取液。而浸取液的选择需要按照规定的程序来确定, 具体见图 5.5。

飞灰及熔渣经过上述的试验步骤, 确定 TCLP 浸出方法所要求的都为 No.2 浸取液, 浸取液是 PH 值为 2.88 ± 0.5 的冰醋酸(CH_3COOH)溶液。称取一定质量的样品, 以固液比 1 g: 20 mL 的比例添加浸取液, 然后在转速为 30 ± 2 r/min 的翻转式振荡器中在室温($20\text{ }^\circ\text{C}$)下振荡 18 ± 2 h, 最后通过孔径为 $0.6\text{-}0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的微孔滤膜进行过滤, 得到澄清的浸出液。通过电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, Agilent 7500a)对 TCLP 浸出液进行分析, 得到的重金属浓度如图 5.6 所示。

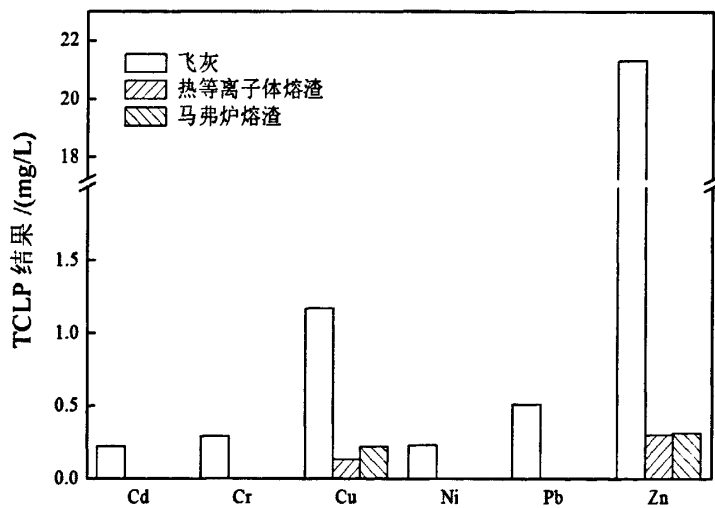


图 5.6 飞灰及其熔渣 TCLP 结果

热等离子体及马弗炉所生成的熔渣中的各种重金属浸出浓度均大大降低。其中, Cd、Cr、Ni、Pb 经过飞灰熔融处理后已无法检出, Cu、Zn 在两种熔渣的浸

出结果中都存在少量残留,但其浸出浓度也已经大幅度降低。这说明两种熔渣对重金属有很好的固定效果,其重金属浸出浓度远远低于熔融前。Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 五种重金属的在热等离子体及马弗炉所生成的熔渣中的浸出浓度基本相当。热等离子体熔渣中 Cu 的浸出浓度比马弗炉熔渣中的略低。Tu Xin 等人将此技术应用于炉排路飞灰的处理,结果显示在熔渣中 Pb、Ni、Cd 已无法检出, Ni、Cu、Zn 浸出浓度分别为 0.018 mg/L, 0.025 mg/L, 0.021 mg/L, 可见此技术对于该种炉排炉飞灰中的重金属具有更好的固定效果^[90]。

5.3 本章小结

本章通过使用热等离子体熔融炉对飞灰进行处理并且以马弗炉熔融飞灰作为对照,通过扫描电镜、重金属固化分析和重金属毒性浸出检验处理效果。得到如下结论。

热等离子体飞灰熔渣的微观结构紧密光滑无空隙,整体呈现良好的均一性,这与熔融前的垃圾焚烧飞灰呈现出了明显的区别。熔渣对重金属有很好的固定效果,其重金属浸出浓度远远低于熔融前。结果显示,热等离子技术是一种处理垃圾焚烧飞灰的有效手段。

与作为传统热处理技术的马弗炉熔融相比,热等离子体技术具有更高能量密度,更短的处理时间,其熔渣的硬度明显增加,重金属固定效果有小幅度的提升,重金属浸出特性基本相当。从处理时间上看,热等离子体技术相对于传统热处理技术有较大的进步,从处理结果而言,热等离子体技术相对于传统热处理技术也具有一定优势。

6 全文总结和工作展望

6.1 本文的主要研究内容和工作总结

本文介绍了自行研制的具有二路进气双阳极特殊结构设计的等离子体喷枪,并对其产生的直流热等离子体电弧的伏安特性,电压气流特性、电弧脉动特性和脉动行为等进行了系统深入的研究,同时对等离子体喷枪可控参数,如载气成分、载气流量、电弧电流、喷枪工作模式对射流的影响进行了分析探讨。在此基础上使用此装置对飞灰进行处理并且以马弗炉熔融飞灰作为对照,通过扫描电镜、重金属固化分析和重金属毒性浸出检验处理效果。得到如下结论。

文中等离子体喷枪的伏安特性大部分呈上升趋势的,这与传统的热等离子体喷枪有明显区别。这是由于电弧受到明显的机械压缩效应和热压缩效应,电弧弧柱的截面积变化不大,因此等离子体伏安特性呈现为上升曲线。在一路进气模式下时,阳极 I 电弧电压随进气量增加而增大,阳极 II 电弧电压没有随着氩气流量升高至一定程度时进入了一个相当平缓的平台期,这可能与阳极斑点向下游移动的幅度有关。二路进气的对阳极 II 电压 U_2 的影响与一路进气相反,呈下降的趋势,且下降的斜率随着一路进气的增加而降低,但最终趋于一致,进入了相对平缓的区域。这可能与喷枪内部等离子体电导率,流场、温度场的改变有关。

二路进气模式下氩氮混合气的引入会使电弧电压显著升高。一方面由于氮气是双原子气体,相对于单原子气体氩气需要更多的能量使其发生离解生成氮原子,另一方面这是因为氮气的导热系数比氩气高,对弧柱的热压缩效应更为明显,因此电弧电压高。当在氩气中加入适量的氮气,使产生的等离子体射流长度增加,电压升高,功率增大。二路进气为 30% 的氮气时,由于等离子体电源功率有限,因此变化幅度不大。

第二个阳极的引入使喷枪可以在双弧模式下工作,这种模式具有很好的稳弧作用,有效地减弱了高频脉动,使产生的等离子电弧更加稳定,弧长增加,噪音减弱。在二路进气工作模式下,热等离子喷枪的工作更为稳定,电弧脉动进一步

减弱。从电极腐蚀的情况看也有明显改善。这有利于热等离子喷枪的寿命的提高,降低危险废弃物处理的成本。

通过使用热等离子体熔融炉对飞灰进行处理并且以马弗炉熔融飞灰作为对照,通过扫描电镜、重金属固化分析和重金属毒性浸出检验处理效果。得到如下结果。热等离子体飞灰熔渣的微观结构紧密光滑无空隙,整体呈现良好的均一性,这与熔融前的垃圾焚烧飞灰呈现出了明显的区别。熔渣对重金属有很好的固定效果,其重金属浸出浓度远远低于熔融前。结果显示,此热等离子技术是一种处理垃圾焚烧飞灰的有效手段。与作为传统热处理技术的马弗炉熔融相比,热等离子体技术具有更高能量密度,更短的处理时间,其熔渣的硬度明显增加,重金属固定效果有小幅度的提升,重金属浸出特性基本相当。从处理时间上看,热等离子体技术相对于传统热处理技术有较大的进步,从处理结果而言,热等离子体技术相对于传统热处理技术也具有一定优势。

6.2 本文的主要创新点

本文自行设计了具有二路进气双阳极特殊结构设计的等离子体喷枪,并对大气压直流等离子体射流的电弧脉动行为、电特性等进行了系统的研究,并将等离子体电弧技术对城市生活垃圾焚烧飞灰进行熔融处理,取得了一些重要的研究结果和结论。

- a) 和传统的等离子体喷枪相比,具有创新性的二路进气设计使此喷枪具有新的特点:提供了更多的喷枪运行模式,根据使用阳极数量不同,可分为双弧模式和单弧模式,在保证喷枪稳定工作的前提下,有效增加了电弧电压和功率,有效的增加了等离子体电弧的长度和亮度,极大的降低了等离子体喷枪的工作噪音,减弱了电极腐蚀,延长了工作寿命。
- b) 率先对几种不同模式下运行的等离子体射流进行了诊断对比研究,得到的结果较有意义,对同行和实际的工业应用具有参考和启示作用,对等离子体伏安特性,电弧电压气流特性进行了分析,并研究了其产生变化的原因。
- c) 率先通过使用热等离子体熔融炉对飞灰进行处理并且以马弗炉熔融飞灰作

为对照,通过扫描电镜、重金属固化分析和重金属毒性浸出检验处理效果。结果显示熔渣化学性质稳定。与作为传统热处理技术的马弗炉熔融相比,热等离子体技术具有更高能量密度,更短的处理时间,其熔渣重金属固定效果有小幅度的提升,重金属浸出特性基本相当。从处理时间上看,热等离子体技术相对于传统热处理技术有较大的进步。

6.3 本文的工作展望

虽然在应用热等离子体技术处理垃圾焚烧飞灰方面尽管取得了一些研究成果,但依然有许多方面需要作进一步的研究:

- a) 对尾气及熔渣的综合利用进行研究,对熔渣的某些理化特性、机械力学特性还需要进一步试验分析。将熔渣转化成为具有高附加值的产品,实现资源的回收利用,同时降低等离子体处理的成本。
- b) 下一阶段可以扩大热等离子体技术处理的范围,利用其处理医疗垃圾、放射性废弃物、电子废弃物等危险废弃物。利用等离子体技术处理废弃物涉及物理、能源、环境、分析化学等多学科交叉,因此各个领域之间的合作交流会对这一学科的发展起到非常重要的作用。
- c) 对现有等离子体熔融试验装置进行放大,开发大功率的等离子体系统,完成从实验室规模向工业应用的转化。在国际上,已有一些公司开发出兆瓦级的等离子体系统,但是在国内,目前还没有这样的应用。大功率等离子体熔融系统具有很好的规模效益,可以有效的降低飞灰熔的融处理成本。

参考文献

- [1] 马腾才. 等离子体物理原理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1988.
- [2] 潘新潮. 直流热等离子体技术应用于熔融固化处[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [3] 唐兰, 黄海涛. 等离子体环保技术的研究进展[J]. 世界科技研究与发展. 2004(03): 64-70.
- [4] 布鲁纳 C. R. 等离子体-电弧及其他热处理技术: 应用于持久性有机污染物[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [5] 周庆生. 等离子喷涂技术[G]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982: 3-30.
- [6] Tu X, Wang Q, Yu L, et al. Diagnostic of novel atmospheric plasma source and its application to vitrification of waste incinerator fly ash[J]. ENERGY & FUELS. 2008, 22(5): 3057-3064.
- [7] Wang S, Liang K. High infrared radiance glass-ceramics obtained from fly ash and titanium slag[J]. CHEMOSPHERE. 2007, 69(11): 1798-1801.
- [8] Park Y J, Heo J. Corrosion behavior of glass and glass-ceramics made of municipal solid waste incinerator fly ash[J]. WASTE MANAGEMENT. 2004, 24(8): 825-830.
- [9] Polettini A, Pomi R, Trinci L, et al. Engineering and environmental properties of thermally treated mixtures containing MSWI fly ash and low-cost additives[J]. CHEMOSPHERE. 2004, 56(10): 901-910.
- [10] Sheng H W, Huang B X, Zhang J, et al. Production of glass from coal fly ash[J]. FUEL. 2003, 82(2): 181-185.
- [11] Cerqueira N, Ghiloufi I, Barthelemy B, et al. Heavy metals volatility under transferred arc plasma[J]. PROGRESS IN PLASMA PROCESSING OF MATERIALS 2001. 2001: 761-768.
- [12] Yan J H, Zhu H M, Jiang X G, et al. Analysis of volatile species kinetics during typical medical waste materials pyrolysis using a distributed activation energy model[J]. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. 2009, 162(2-3): 646-651.
- [13] Chen T, Yan J H, Lu S Y, et al. Characteristic of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in fly ash from incinerators in China[J]. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. 2008, 150(3): 510-514.
- [14] Liu B, Kikuchi M, Li H P, et al. Dual torch plasma arc furnace for medical waste treatment[J]. PLASMA SCIENCE & TECHNOLOGY. 2007, 9(6): 709-712.
- [15] Huang J J, Guo W K, Xu P. Thermodynamic study of water-steam plasma pyrolysis of medical waste for recovery of CO and H₂[J]. PLASMA SCIENCE & TECHNOLOGY. 2005, 7(6): 3148-3150.

- [16] Park H S, Lee B J, Kim S J. Medical waste treatment using plasma[J]. JOURNAL OF INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY. 2005, 11(3): 353-360.
- [17] Min B Y, Kang Y, Song P S, et al. Study on the vitrification of mixed radioactive waste by plasma arc melting[J]. JOURNAL OF INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY. 2007, 13(1): 57-64.
- [18] Yasui S, Amakawa T, Adachi K. Evaluation of plasma melting method for treatment of low level miscellaneous solid wastes - Influence of atmospheric gases on material properties of treated waste forms and behavior of radionuclides[J]. JOURNAL OF THE ATOMIC ENERGY SOCIETY OF JAPAN. 1999, 41(1): 39-47.
- [19] Tzeng C, Kuo Y, Huang T, et al. Treatment of radioactive wastes by plasma incineration and vitrification for final disposal[J]. Journal of Hazardous Materials. 1998, 58(1-3): 207-220.
- [20] Bingham P A, Hand R J. Vitrified metal finishing wastes I. Composition, density and chemical durability[J]. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. 2005, 119(1-3): 125-133.
- [21] Castellote M, Menendez E, Andrade C, et al. Radioactively contaminated electric arc furnace dust as an addition to the immobilization mortar in low- and medium-activity repositories[J]. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY. 2004, 38(10): 2946-2952.
- [22] Nishikawa H, Ibe M, Tanaka M, et al. Effect of DC steam plasma on gasifying carbonized waste[J]. VACUUM. 2006, 80(11-12): 1311-1315.
- [23] Kim S W, Park H S, Kim H J. 100 kW steam plasma process for treatment of PCBs (polychlorinated biphenyls) waste[J]. VACUUM. 2003, 70(1): 59-66.
- [24] Konstantinov A D, Johnston A M, Cox B J, et al. Photolytic method for destruction of dioxins in liquid laboratory waste and identification of the photoproducts from 2,3,7,8-TCDD[J]. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY. 2000, 34(1): 143-148.
- [25] Heberlein J, Murphy A B. Thermal plasma waste treatment[J]. JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS. 2008, 41(0530015).
- [26] Bo Z, Yan J H, Li X D, et al. Plasma assisted dry methane reforming using gliding arc gas discharge: Effect of feed gases proportion[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY. 2008, 33(20): 5545-5553.
- [27] Chae J O, Knak S P, Knak A N, et al. Oyster shell recycling and bone waste treatment using plasma pyrolysis[J]. PLASMA SCIENCE & TECHNOLOGY. 2006, 8(6): 712-715.
- [28] Kezelis R, Mecius V, Valinciute V, et al. Waste and biomass treatment employing plasma technology[J]. HIGH TEMPERATURE MATERIAL PROCESSES. 2004, 8(2): 273-282.
- [29] Szuszkiewicz J, Mizeraczyk J, Dors M. Plasma treatment of rubber waste[J]. HIGH TEMPERATURE MATERIAL PROCESSES. 2001, 5(3): 345-348.
- [30] 唐兰, 黄海涛. 塑料在高频等离子体中的热解气化研究[J]. 广州大学学报(自然科学版).

- 2007(01).
- [31] 唐兰, 黄海涛, 吴创之. 聚丙烯等离子体热解与管式炉热解对比研究[J]. 化学工程. 2005(04).
- [32] 唐兰, 黄海涛, 吴创之. 等离子体热解处理废轮胎实验研究[J]. 环境科学与技术. 2004(06).
- [33] Chang J S, Gu B W, Looy P C. Thermal plasma pyrolysis of used old tires for production of syngas[J]. Journal of Enviromental Science and Health. 1996, A31(7): 1171-1176.
- [34] 胡真, 刘初平, 束富荣, 等. 热等离子体技术销毁日本遗弃化武红弹装填物研究[J]. 安全与环境学报. 2006(06).
- [35] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2009[G]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [36] 逢磊, 倪桂才, 闫光绪. 城市生活垃圾的危害及污染综合防治对策[J]. 环境科学动态. 2004(2): 15-16.
- [37] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2008[G]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [38] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2007[G]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [39] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2006[G]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [40] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2005[G]. 北京: 中国统计出版社, 2005.
- [41] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2004[G]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [42] 李建新, 王永川, 严建华. 城市垃圾焚烧飞灰资源化利用前景分析[J]. 电站系统工程. 2008, 24(1): 9-12.
- [43] 何品晶, 章骅, 王正达, 等. 生活垃圾焚烧飞灰的污染特性[J]. 同济大学学报(自然科学版). 2003(08).
- [44] 张瑞娜, 赵由才, 许实. 生活垃圾焚烧飞灰的处理处置方法[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版). 2003(01).
- [45] 金漫彤, 董海丽, 楼敏晓, 等. 土壤聚合物固化飞灰与水泥固化的比较研究[J]. 硅酸盐通报. 2008(05).
- [46] 宋珍霞, 王里奥, 林祥, 等. 城市垃圾焚烧飞灰特性及水泥固化试验研究[J]. 环境科学研究. 2008(04).
- [47] 魏国侠, 刘汉桥. 医疗垃圾焚烧炉飞灰水泥固化体的浸出特性研究[J]. 环境卫生工程. 2009(01).
- [48] Shibakawa S, Osumi K. Fly ash stabilization technology with chemical agent in RIP[C]. 1996.
- [49] Sukandar, Padmi T, Tanaka M, et al. Chemical stabilization of medical waste fly ash using chelating agent and phosphates: Heavy metals and ecotoxicity evaluation[J]. WASTE MANAGEMENT. 2009, 29(7): 2065-2070.
- [50] 杜英智, 张蕾, 高轩. 垃圾焚烧炉灰渣熔融处理技术的研究进展[J]. 能源工程. 2006(01).

- [51] Park Y J, Heo J. Vitrification of fly ash from municipal solid waste incinerator[J]. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. 2002, 91(1-3): 83-93.
- [52] 胡小英, 田书磊, 王琪, 等. 飞灰热处理过程中基本特性研究[J]. 环境工程学报. 2007(12).
- [53] 田书磊, 王琪, 汪群慧, 等. 焚烧飞灰热处理过程中重金属挥发特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版). 2007(09).
- [54] 王琪, 田书磊, 汪群慧, 等. CaCl₂对垃圾焚烧飞灰热处理特性的影响 [J]. 环境科学研究. 2006(05).
- [55] Yan J. H., Dai S. L., Li X. D., 等. Emission spectroscopy diagnosis of the radicals generated in gas-liquid phases gliding arc discharge[J]. SPECTROSCOPY AND SPECTRAL ANALYSIS. 2008, 28(8): 1851-1855.
- [56] Singh N, Razafinimanana M, Hlina J. Characterization of a dc plasma torch through its light and voltage fluctuations[J]. Journal of Physics D: Applied Physics. 2000, 33(3): 270-274.
- [57] Duan Z, Heberlein J. Arc instabilities in a plasma spray torch[J]. 2002, 11(1): 44-51.
- [58] 严建华, 屠昕, 马增益, 等. 大气压直流氩等离子体射流工作特性研究[J]. 物理学报. 2006(07).
- [59] 潘新潮, 严建华, 马增益, 等. 直流双阳极等离子体特性的研究[J]. 动力工程. 2008, 28(1): 132-136.
- [60] 修士新, 金黎, 王季梅. 大电流真空电弧特性的研究与分析[J]. 电网技术. 1997, 21(6): 29-33.
- [61] 周庆生, 周立. 对提高等离子喷枪的热焓和热效率因素的分析[J]. 中国制造业信息化. 1989(05).
- [62] Ramasamy R, Selvarajan V, Perumal K, et al. An attempt to develop relations for the arc voltage in relation to the arc current and gas flow rate[J]. Vacuum. 2000, 59(1): 118-125.
- [63] Ramasamy R, Selvarajan V. Current-voltage characteristics of a non-transferred plasma spray torch[J]. The European physical journal. D. 2000, Vol.8,no.1,2000.
- [64] Pan W, Meng X, Wu C, et al. Experimental Study on the Thermal Argon Plasma Generation and Jet Length Change Characteristics at Atmospheric Pressure[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2006, 26(4): 335-345.
- [65] Osaki K, Fukumasa O, Kobayashi A. High thermal efficiency-type laminar plasma jet generator for plasma processing[J]. Vacuum. 2000, 59(1): 47-54.
- [66] ж у к о в м ф. 热等离子实用动力学[M]. 北京: 科教图书出版社, 1981.
- [67] Planche M P, Coudert J F, Fauchais P. Velocity Measurements for Arc Jets Produced by a DC Plasma Spray Torch[J]. 1998, 18(2): 263-283.
- [68] Delair L, Tu X, Bultel A, et al. Helmholtz behaviour of a nitrogen plasma arc chamber[J]. High Temperature Material Processes. 2005, 9(4): 581-596.

- [69] Brillhac J F, Pateyron B, Coudert J F, et al. Study of the dynamic and static behavior of de vortex plasma torches: Part II: Well-tye cathode[J]. 1995, 15(2): 257-277.
- [70] 屠昕, 陆胜勇, 严建华, 等. 大气压直流双阳极等离子弧脉动特性研究[J]. 中国电机工程学报. 2006(20).
- [71] 屠昕, 陆胜勇, 严建华, 等. 大气压直流氩等离子体光谱诊断研究[J]. 光谱学与光谱分析. 2006(10).
- [72] 屠昕, 严建华, 马增益, 等. 基于 $N_2 \rightarrow (B \sim 2\Sigma_u^- \rightarrow X \sim 2\Sigma_g^-)$ 的电弧等离子体振动温度和转动温度测量[J]. 光谱学与光谱分析. 2006(12).
- [73] Pan W X, Guo Z Y, Meng X, et al. Fluctuation characteristics of arc voltage and jet flow in a non-transferred dc plasma generated at reduced pressure[J]. PLASMA SOURCES SCIENCE & TECHNOLOGY. 2009, 18(4).
- [74] Zhao W H, Tian K, Liu D, et al. Fluctuation phenomenon analysis of an arc plasma spraying jet[J]. CHINESE PHYSICS LETTERS. 2001, 18(8): 1092-1094.
- [75] Venkatramani N. Industrial plasma torches and applications[J]. Current science. 2002, 83(3): 254-262.
- [76] Bipp H P, Wunsch P, Fischer K, et al. Heavy metal leaching of fly ash from waste incineration with gluconic acid and a molasses hydrolysate[J]. CHEMOSPHERE. 1998, 36(11): 2523-2533.
- [77] Bournonville B, Nzihou A, Sharrock P, et al. Stabilisation of heavy metal containing dusts by reaction with phosphoric acid: study of the reactivity of fly ash[J]. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. 2004, 116(1-2): 65-74.
- [78] Jakob A, Stucki S, Struis R. Complete heavy metal removal from fly ash by heat treatment: Influence of chlorides an evaporation rates[J]. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY. 1996, 30(11): 3275-3283.
- [79] Lee M G, Cheon J K, Kam S K. Heavy metal adsorption characteristics of zeolite synthesized from fly ash[J]. JOURNAL OF INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY. 2003, 9(2): 174-180.
- [80] Singh A, Sharma R K, Agrawal S B. Effects of fly ash incorporation on heavy metal accumulation, growth and yield responses of Beta vulgaris plants[J]. BIORESOURCE TECHNOLOGY. 2008, 99(15): 7200-7207.
- [81] Wang K S, Chiang K Y, Lin K L, et al. Effects of a water-extraction process on heavy metal behavior in municipal solid waste incinerator fly ash[J]. HYDROMETALLURGY. 2001, 62(2): 73-81.
- [82] Yang G, Tsai C M. A study on heavy metal extractability and subsequent recovery by electrolysis for a municipal incinerator fly ash[J]. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. 1998, 58(1-3): 103-120.

- [83] Yunsheng Z, Wei S, Wei S, et al. Synthesis and Heavy Metal Immobilization Behaviors of Fly Ash based Gopolymer[J]. JOURNAL OF WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY-MATERIALS SCIENCE EDITION. 2009, 24(5): 819-825.
- [84] 薛军, 王伟, 汪群慧. 传统酸浸和微波酸浸处理飞灰重金属的效果及重金属的形态变化特征[J]. 环境科学HJKZ. 2008(02).
- [85] 张接信, 王陆军. 固体废物焚烧炉飞灰中重金属萃取研究[J]. 环境工程学报HJJZ. 2007(10).
- [86] Furlani E, Bruckner S, Minichelli D, et al. Synthesis and characterization of ceramics from coal fly ash and incinerated paper mill sludge[J]. CERAMICS INTERNATIONAL. 2008, 34(8): 2137-2142.
- [87] Erol M, Kucukbayrak S, Ersoy-Mericboyu A. Characterization of coal fly ash for possible utilization in glass production[J]. FUEL. 2007, 86(5-6): 706-714.
- [88] Qian G R, Song Y, Zhang C G, et al. Diopside-based glass-ceramics from MSW fly ash and bottom ash[J]. WASTE MANAGEMENT. 2006, 26(12): 1462-1467.
- [89] Cheng T W, Chu J P, Tzeng C C, et al. Treatment and recycling of incinerated ash using thermal plasma technology[J]. WASTE MANAGEMENT. 2002, 22(5): 485-490.
- [90] Tu X, Wang Q, Yu L, et al. Diagnostic of Novel Atmospheric Plasma Source and Its Application to Vitrification of Waste Incinerator Fly Ash[J]. Energy & Fuels. 2008, 22: 3057-3064.

作者简历及在学期间所取得的科研成果

高飞, 男, 山东济宁人, 现就读与浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 工程热物理专业, 研究方向为热等离子体污染物处置。

教育经历:

2000年9月——2003年6月 山东省济宁市第一中学

2003年9月——2007年6月 山东大学热能与动力工程专业

2007年9月至今 浙江大学工程热物理专业

硕士期间发表论文

1. 热等离子体喷枪在垃圾焚烧飞灰处理中的应用; 高飞, 马增益, 王勤, 陆胜勇, 严建华; 环境污染与防治. (录用)
2. 利用热等离子熔融垃圾焚烧飞灰的研究; 王勤, 严建华, 潘新潮, 池涌, 高飞; 浙江大学学报工学版. (录用, EI)