

CNIC-01907  
SIP-0191

# 特种废物等离子体处理技术的应用与研究

兰 伟

(核工业西南物理研究院,成都,610041)

## 摘 要

简单介绍了等离子体的基本概念及其热等离子体废物处理技术的基本原理,从几个方面总结介绍了固体废物等离子体处理技术的应用与研究。与常规处理方法相比较,采用热等离子体特种废物处理技术其先进性和优越性得到进一步显现,成为特种废物处理领域最有发展前途,最引人关注的高科技处理技术之一。文章还简单介绍了作者在实验室热等离子体技术工作中的一些实验结果以及核工业西南物理研究院在引进、吸收、消化、发展国外等离子体炬和在研制等离子体炬新型电源方面所做的一些工作。

**关键词:** 危险废物 等离子体发生器

**Application and Research of Special Waste Plasma  
Disposal Technology**  
(*In Chinese*)

LAN Wei

(Southwest Institute of Physics, Chengdu, 610041)

**ABSTRACT**

The basic concept of plasma and the principle of waste hot plasma disposal technology are simply introduced. Several sides of application and research of solid waste plasma disposal technology are summed up. Compared to the common technology, the advantages of waste hot plasma disposal technology manifest further. It becomes one of the most prospective and the most attended high tech disposal technology in particular kind of waste disposal field. The article also simply introduces some experiment results in Southwest Institute of Physics and some work on the side of importation, absorption, digestion, development of foreign plasma torch technology and researching new power sources for plasma torch.

**Key words:** Dangerous waste, Plasma generator

## 引言

随着经济的快速发展,城市垃圾、工业废弃物和人工合成的各类化学物质正以惊人的速度增长,其中不少是有毒有害的。1998年7月1日实施的《国家危险废物名录》就列出了47类危险废物<sup>[1]</sup>。如何“减量化、无害化、资源化”地处理这些危险废物已成为国际上共同关心的重要课题。危险废物的安全处置方法很多,如填埋法、固化法、各种消毒法、化学处理法、生物技术法和热处理技术等等,其中热处理技术以其应用对象广泛、快速、高效、减量效果好在三废处理领域占了最大的市场。随着热处理技术的广泛应用和许多难处理或特殊的危险废物对处理效率的更高要求,常规的热处理技术已逐步出现不足之处。如体积大、安装费用高、粉尘大、飞灰难处理<sup>[2]</sup>、热效率不高、不能经常开关等,特别是对于PCBs等特殊废物的处理,常规的热处理技术的处理效率很难达到国际规定的要求(如PCBs的消解效率必须大于99.9999%)<sup>[3]</sup>,还有二恶英类物质二次污染的控制问题也日益引起人们的重视。发达国家的研究与应用表明,等离子体技术因其具有高温高导热特性,对污染物有很高的处理效率,尤其适合难处理的污物和有特殊要求的污染物,如PCBs、石棉废物、离子交换树脂废物,其先进性与优越性进一步显现出来,成为特种废物处理领域最有发展前途,最引人关注的高科技处理技术之一。

### 1 基本概念<sup>[4]</sup>及其处理技术的基本原理

等离子体是物质存在的第四态,是由电子、离子、原子、分子或自由基等粒子组合成的电中性集合体,是部分或全部电离的气体。等离子体中的离子、电子、激发态原子、分子及自由基都是极活泼的反应性物种,使通常条件下难以进行或速度很慢的反应变得十分快速,尤其有利于难消解污染物的处理。

根据气体电离度的不同,等离子体可分为高温等离子体和低温等离子体两大类。高温等离子体是电离度接近100%的完全电离等离子体,其中心温度可达上亿度。低温等离子体又可分为热平衡等离子体(或热等离子体)与非热平衡等离子体(或冷等离子体)。热等离子体是指各种粒子的温度几乎相等,温度约为5 000~20 000 K的等离子体,冷等离子体是指电子温度为 $10^4\sim 10^5$  K,粒子温度约为室温至几百 K的等离子体。

等离子体废物处理技术的基本原理是:等离子体由工作气体放电产生,由等离子体发生器形成等离子体射流。待处理废弃物以一定的形式进入等离子体射流中,经过一系列物理化学反应,处理产物以一定的物质形态被回收、利用或达标排放。图1是等离子体废物处理技术基本原理示意图。

### 2 城市垃圾的等离子体处理技术——“PPV工艺”介绍

这里介绍一种比传统垃圾焚烧法更先进的城市垃圾处理技术——应用等离子体弧处理(Plasma Pyrolysis Vitrification——PPV)<sup>[5]</sup>城市固体垃圾发电装置技术。

“PPV工艺”是由美国GPSG公司发展起来的等离子体垃圾处理发电技术,已在美国、意大利、日本等地得到商业化应用。图2为描述垃圾处理的PPV技术的工艺流程示意图。

PPV工艺是指:等离子体发生器产生极高温(3 000~4 000 ℃)离子状态的空气等离子体,被处理垃圾在高温等离子体反应区中通过高温和高效的能量转移,有机物由大分子裂

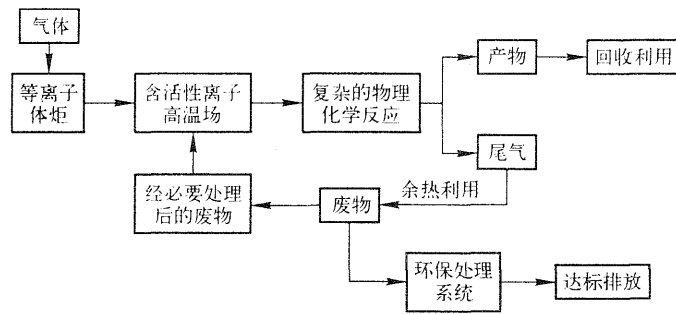


图1 等离子体废物处理技术基本原理示意图

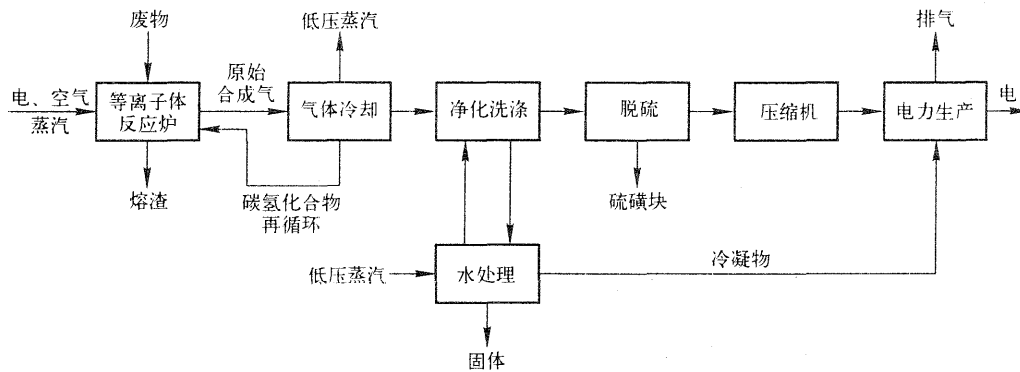


图2 垃圾处理的PPV技术的工艺流程示意图

解成小分子,同时无机物被熔化。通过注入一定质量具有特殊性质的蒸汽,由已知的化学平衡反应,形成了一种类似在煤气发生器中产生的广泛用于厨房用气的“蓝色气体”的气体——实质上是一氧化碳和氢气的合成气体。

由于通过等离子枪注入反应器中的气体只含有燃烧需要气体的2%,而且在进入反应器之前,通过压缩,垃圾中包含的空气已减到最少,因此不会有燃烧过程发生。这样,通常的垃圾处理焚烧法生成的有毒化合物在源头就被减到最低程度了,即PPV工艺:

- (1) 不会排出有毒气体如二恶英,呋喃等;
- (2) 不会排放包含重金属(镉,汞,铅等)的灰尘;
- (3) 不会留下包含未燃烧的材料和重金属的残渣或灰烬。

因此,通过PPV流程仅有两种产物生成:

- (1) 含在城市生活垃圾中的所有有机元素被转化成主要含33% CO和53% H<sub>2</sub>的合成气,合成气中还含有少量氮气、二氧化碳和甲烷;
- (2) 非有机元素被熔化并且转化成融化状的熔岩,即一种完全惰性和无毒性、渗透性极低的玻璃体物质,其中的重金属已经变得毫无活性。

图3为PPV工艺中等离子体反应室部分结构示意图。

气化室为一个圆筒体,内部安装了耐火材料三氧化二铝砖。垃圾通过压缩和进料系统从反应室顶部进入反应炉中,通过安装在反应室下部分的等离子体枪来提供所需能量。

与当前使用的其他技术相比,PPV技术具有四大优势:

(1) 它是一种无污染的环保技术。仅产生与“水煤气”一样的合成气体,再无其他毒性的气体产生,没有灰尘和废炉渣生成,仅仅产生与玄武岩相似的一种玻璃体材料(完全没有活性和毒性),它可以用作建筑原料。

(2) 它是一种很经济的技术。与传统焚烧技术相比,在具有相同处理能力情况下,PPV 技术的投资和运行费用可以节省 20%~40%,并且能获得更多的能量。

更经济主要是由于有以下因素:

1) PPV 技术中,垃圾在热处理前不需要特殊的分类和分离装置;

2) PPV 技术产生的合成气体比同量垃圾焚烧产生的合成气体少得多,因此,装置较小,成本较低。

(3) 它是一种应用广泛的技术。等离子体反应装置能处理城市生活垃圾、医用垃圾、轮胎、PVC 和其他工业有毒有害物质。

(4) 它能很方便地进行调节。等离子体枪能在它输出功率的 30%~110%之间工作,因此,当垃圾量发生变化时等离子体枪能毫无困难地进行功率调节。

GPSG 公司声称,用此技术可日处理 1 000 t 城市垃圾(热值 5 MJ/kg),所产生的燃气可发电,功率为 20 MW,除了等离子发生器用电外还有余电出售。

### 3 化学武器及其污物的等离子体销毁技术<sup>[6,7]</sup>

二战后,侵华日军在我国遗留下数量庞大的化学武器,这些化学武器本身具有易爆和剧毒的特性,至今仍在继续威胁着人们的安全,例如 2003 年齐齐哈尔市的“8·4”毒剂伤人事件的有毒化学物质为“芥子气”,就是侵华日军遗弃的化学毒剂,该事件涉及 43 名受害者,其中一人死亡,致残多人且留下后遗症。经过 60 年的时间,这些被遗弃在中国的化学武器其中一部分已经锈蚀,渗漏严重,致使地下水与土壤受到污染,所以对这些遗弃化学武器进行销毁具有必要性和迫切性。

对化学武器的销毁要求十分广泛,除化学弹药和毒剂外,还有各种化学武器包装物、被污染的防护用品、土壤等物料。这些废物用一般的焚烧技术,有的可以彻底销毁,但不能做到在一个焚烧炉内所有的化学武器废物能被综合彻底的销毁<sup>[6]</sup>(这需要建若干个不同功能类型的焚烧炉)。要做到综合彻底的销毁,热等离子体技术是较好的化学武器销毁技术之一,它能在一个炉子内销毁处理除炸药以外的各种销毁对象。此外它还有如下显著特点:第一,高能粒子碰撞有毒物质的分子,即使是难以降解的物质经热等离子体处理后也可以变为无毒物质;第二,经热等离子体处理,可以产生没有活性和毒性的不可滤沥的玻璃化熔渣,因此热等离子体技术尤其适合处理含砷的化学毒剂及含重金属的物质。

德国 Munster 第二销毁厂于 1998 年建成了等离子体技术化学武器销毁系统,其处理工艺流程如图 4 所示<sup>[7]</sup>。

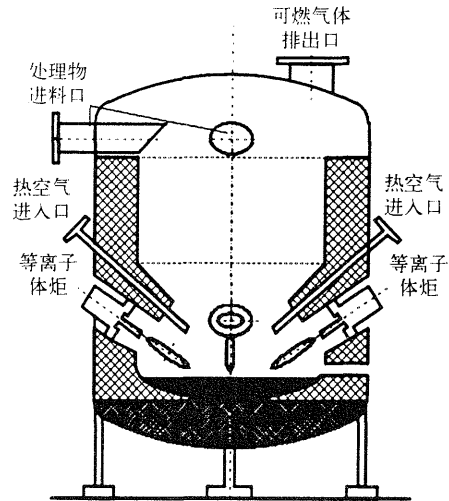


图 3 等离子体反应室部分结构示意图

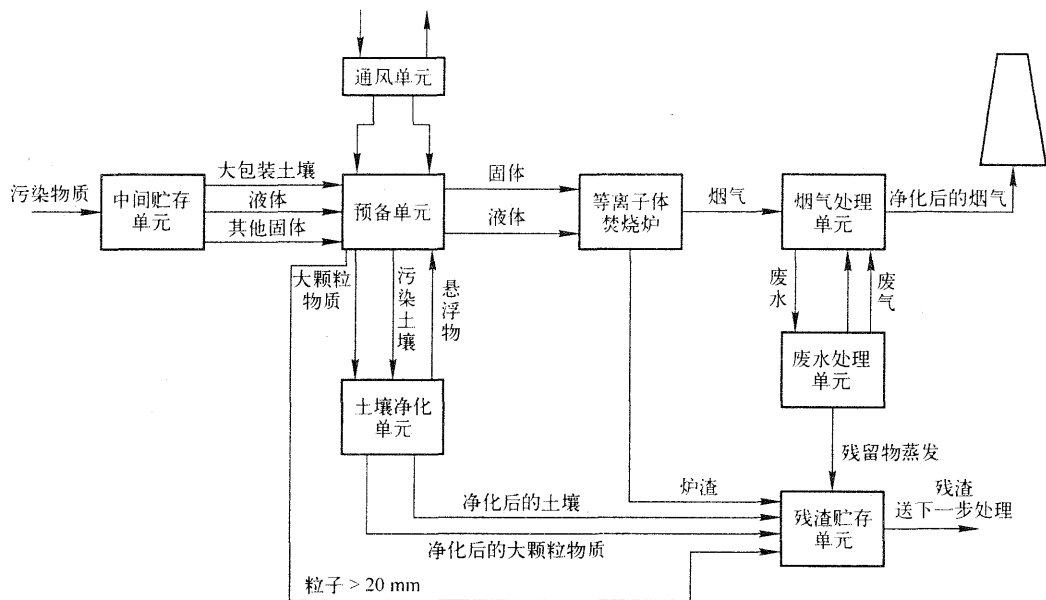


图4 等离子体技术化学武器销毁系统工艺流程示意图

将预处理得到的固体、液体分装处理后分别送入旋转等离子体反应室。这个等离子体炉以一个 1.2 MW 的转移电弧等离子体炬作为热源。其高能密度和高温使得毒剂完全分解、其他物质完全熔融。

#### 4 热等离子处理低放射性废物及其他固体废物

核电站、医院、同位素生产与应用和核化学、放射化学实验等过程中都不可避免地产生大量的低放射性固体废物，如浓缩液、废树脂、检修废物和过滤器等物质。为了减少这些废物的体积、稳定其中的放射性物质，一般需将废物分为可燃物、非可燃物和金属。可燃物用焚烧炉处理，然后将焚烧灰与水泥混合后放入容器中存储；非可燃物可通过压缩或直接进入固体容器中；金属熔化后放入容器里。这种处理方法有两个缺点：第一，必须将不同的废物分开，用不同的设备处理；第二，不能一步同时完成废物的减容与玻璃化。而等离子体技术却可以用一个设备在一个过程中完成可燃物的焚烧、将非可燃物玻璃化为玻璃体熔块或金属锭。

台湾的原子能研究所(INER)<sup>[8]</sup>建立了一套处理放射性废物10 kg/h的等离子体炉，其所产生的玻璃化熔块具有很高的抗压强度及很高的浸出指数。在日本有许多已运行多年的等离子体热处理装置用作松山、本田、川崎等焚化炉飞灰玻璃化处理。一座用于把石棉废物玻璃化的工厂坐落于波尔多，由属于法国电力公司的 INERTAM 公司管理<sup>[5]</sup>。西班牙已建造一座试验性的等离子体工厂来处理石棉、核电站低放射性废物(如离子交换树脂)等危险废物<sup>[1]</sup>。

随着对固体、液体污染废物处理的要求，发展了多种等离子体处理技术，其中最具有代表性的有等离子体电弧炉(Plasma Arc Furnace)<sup>[9]</sup>与等离子体离心式反应器(Plasma Centrifugal Furnace)<sup>[10]</sup>。针对难处理的液体污染物(如废溶剂、PCBs、农药废液等)及气体污染物

(如氟利昂类、化学毒气、生物制剂等)的完善处理,新型的等离子体技术得到发展,较有代表性的技术是澳大利亚的 PLASCON™ 技术<sup>[11]</sup>和法国的电感耦合等离子体流化床反应器技术(Plasma Fluidized-bed Reactor)<sup>[12]</sup>。

## 5 造纸黑液的等离子体处理技术<sup>[13]</sup>

我国等离子体处理废弃物的研究是从造纸黑液的处理开始的。等离子体黑液处理技术是将黑液浓缩并脱水后送入等离子体炉,其中有机物在等离子体高温条件下快速裂解为可燃气和碳,无机碱则基本以原成分析出。黑液等离子体处理的半工业实验使用 80 kW 的空气等离子体发生器,处理黑液流量 210~240 kg/h。从处理结果看,产生的可燃气体中没有 SO<sub>2</sub>, SO 和 H<sub>2</sub>S 等有害成分,消除了二次污染。表 1 是处理后得到的固体粉末成分,表 2 是处理后得到的气体成分。

表 1 处理后得到的固体粉末成分

NaOH	NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> S	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	C	SiC <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
2.8%	25.68%	1.33%	5.07%	0.11%	38.67%	0.40%	0.40%

表 2 处理后得到的气体成分(体积分数)

N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
39.75%	28.45%	30.088%	0.206%	1.001%	0.54%

## 6 等离子体废物处理技术的关键技术和有关研究

### 6.1 等离子体发生器及其特种电源

等离子体发生器的稳定性、功率、能量利用效率是决定一项等离子体技术成功与否的关键。用于环境污染物处理的等离子体发生器主要有三种类型:(1)转移弧;(2)非转移弧;(3)电感耦合等离子体。在转移弧等离子体系统中,待处理污染物作为电弧的一个电极,因此必须是可导电物质或在熔融状态下是可导电的,例如工业粉尘固体污染物等。转移弧等离子体的能量利用率较高,但因处理对象的限制,在难处理环境污染物消解领域应用较少。电感耦合等离子体具有特殊的环状加热结构,应用这一特性进行污染物处理是一项新兴的研究课题,它的无电极消耗,可应用氧气等优点使之具有很好的发展前景。在结构上它可以取代非转移弧等离子体,对污染物的处理可以采用外加热式与注入式。但电感耦合等离子体发生器的电耦合效率低(≤50%),功率扩大也有困难(目前功率不超过 300 kW),在工业应用上受到一定限制<sup>[13]</sup>。非转移弧等离子体炬是目前发展得较成熟的一项技术,等离子体在炬体内的电极间发生,由工作气体吹出形成一火炬,作用于待处理污染物,污染物也可由一导管吹入等离子体中心受热。该技术适用于固体、液体及气体污染物的处理。该类型等离子体发生器功率范围广(从几十 kW 到几十 MW),阴极寿命可达几百小时以上,是将来污染物等离子体处理技术发展的重要方向。

核工业西南物理研究院在 20 世纪 90 年代从俄罗斯引进大功率长寿命非转移弧直流等

离子体发生器,通过消化吸收已掌握了制造等离子体发生器的关键技术,并成功研制了300 kW,200 kW,100 kW和50 kW等系列的直流非转移弧等离子体发生器,阴极寿命可达200 h左右。

核工业西南物理研究院在国内率先研发出等离子体发生器高频逆变特种电源,与传统晶闸管电源相比,高频逆变技术具有体积小、效率高、稳定性好、响应速度快等优点。目前核西物院开发的50 kW高频逆变等离子体电源的转换效率大于90%,接近国际先进水平,远大于传统晶闸管电源60%的最好转换效率。

## 6.2 有关技术研究

在我国,近年来等离子体发生器、反应器及诊断研究一直在进行,也取得了一系列进展。(1)对电弧与磁场之间、电弧与气流和电弧与器壁之间的相互作用,高温气体的击穿特性等进行了理论与数值模拟<sup>[13]</sup>。(2)模拟分析了自由电弧温度、速度、电势场分布,把模拟结果与用电荷耦合器件技术的光谱法等离子体温度测量数据进行了比较,理论和实验符合得较好<sup>[14]</sup>。(3)对不同用途的等离子体反应器的基本过程进行了研究,用数值模拟了反应器中的温度场、速度场、粒子的浓度场、固体颗粒及传热与运动阻力、运动轨迹等,并进行了相应的试验研究<sup>[15]</sup>。

## 7 结 论

综上所述,特种废物的等离子体处理技术具有如下优点:(1)无污染,反应产物仅为可燃气和一种类似玄武岩的完全没有活性和毒性的玻璃体。(2)体积小,等离子体炬的高温、高熔、高速特性使得在一个小反应器处理大量的废物成为可能;等离子体处理技术产生的合成气体比同量废物焚烧产生的合成气体少得多,因此,尾气处理装置较小。(3)可快速开关和方便调节,与传统热处理技术相比,等离子体炬的高热流使反应器很快达到过程的稳定状态,从而使设备可以频繁地快速启动和关闭;当废物处理量发生变化时等离子体枪能毫无困难地进行功率调节。(4)应用广泛,等离子体反应装置能处理城市生活垃圾、医用垃圾、轮胎、PVC和其他工业有毒有害物质,尤其适合处理石棉废物、PCBs、废离子交换树脂、化学武器等有毒有害混合废物。

等离子体发生器的稳定性和能量转换效率是决定一项等离子体技术成功与否的关键,高频逆变等离子体电源的开发成功大大提高了热等离子体技术经济竞争能力。热等离子体技术的上述优点和高频逆变等离子体电源的开发成功,使其在特种废物处理领域有着广泛的市场前景。

## 参 考 文 献

- 1 李金惠,等编. 危险废物管理与处理处置技术. 北京:化学工业出版社,2003. 15~20
- 2 Chen X, Badie J M. Chemical Engineering Science, 1997, 52(23):4381
- 3 王小如,等. 应用热等离子体技术处理污染物的研究进展. 化学通报,1999(4):1~6
- 4 Hu Zhen, et al. Application of thermal-plasma technology in waste treatment, Proceeding of International Symposium on Solid Waste Incineration and Flue Gas Cleaning Technologies, Fuzhon. China, 2002. 32~36
- 5 Garibaldi P zza. 基于等离子弧技术的变废为能装置. 中意环保合作项目国际研讨会论文集,北京,2001年7月. 179~187.



- 6 郑玉琪,薛孟强. 化学武器的销毁技术(译文第四集),1998,4:201
- 7 张霞,夏治强. 化学武器的销毁技术(译文第三集),1998,4:34~38
- 8 Eschenbach R C. JOM,1996,48(6),49~52
- 9 Ondrey G, Fouhy K. Plasma arcs sputter-new waste treatment. Chemical Engineering, 1991,98(12): 32~35
- 10 U. S. Department of Energy. Environmental Assment for Retch Inc. 's Plasma Centrifugal Furnace Evaluation. 1991, 1~19
- 11 Murphy A B, McAllister T. Combined fluid dynamic and chemical kinetic modeling of plasma waste destruction. Proceedings of 13th International Symposium on Plasma Chemistry, Beijing:Peking University Press,1997. 1754~1759
- 12 Coulibaly K, Genet F, et al. Control of phosgen species formation during the destruction of a halocarbon waste ina plasma spouted-bed reactor. Proceedings of 13th International Symposium on Plasma Chemistry, Beijing:Peking University Press,1997. 1721~1726
- 13 等离子体物理学科发展战略研究课题组. 核聚变与低温等离子体. 北京:科学出版社,2004. 186
- 14 邵其均,何煜,等. 直流等离子体弧温度测量与模拟计算结果的比较,物理学报,1999,48(9):1691~1700
- 15 李和平,陈熙. 等离子体反应器中传热与流动的三维数值模拟. 工程热物理学报,2001,22(3):324~327