

# 等离子体处理危险废物技术

李 伟<sup>1</sup> 李水清<sup>1</sup> 崔瑞祯<sup>1</sup> 刘 刚<sup>2</sup> 季天仁<sup>3</sup>

(1 清华大学精仪系 2 中国兵器装备研究院 3 电子科技大学高能所)

## 一、引言

将等离子体用于处理各类污染物具有处理流程短、效率高、适用范围广等特点,尤其是对于多氯联苯类(PCB)、氟里昂类等难消解含卤化合物及生物技术产业、农药、医院等的特殊废弃物处理,常规的燃料热源技术的处理效率常不能达到国际规定的标准(PCB的消解效率必须大于99.9999%),并且更高毒性的多氯二苯并二(PCDDs)与多氯二苯并呋喃(PCDFs)的二次污染问题日益引起人们的重视。等离子体既可用于处理废气又可用于处理废水、固体废物、污泥、甚至放射性废物。本章主要介绍等离子体处理固体危险废物,如医疗垃圾等。

## 二、等离子体火炬处理固体废物的工作原理

### (一) 等离子体的概念

等离子体是物质存在的第四态,它是气体电离后形成的,是由电子、离子、原子、分子或自由基等粒子组成的集合体,它具有宏观尺度内的电中性与高导电性。等离子体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快速,尤其有利于难消解污染物的处理。

在人工生成等离子体的方法中,气体放电法比加热的办法更加简便高效,诸如荧光灯、霓虹灯、电弧焊、电晕放电等等。图1是气体通过加热或放电形成等离子体的示意图。

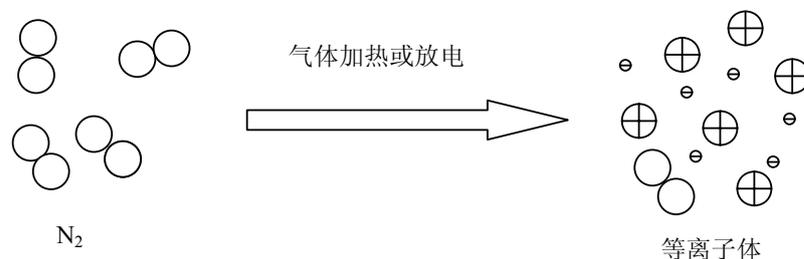


图1 等离子体形成示意图

### (二) 等离子体的分类

按粒子的温度等离子体可分为两大类,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),如图2所示。

冷等离子体的特征是它的能量密度较低,重粒子温度接近室温而电子温度却很高,电子与离子有很高的反应活性。相对地,热等离子体的能量密度很高,重粒子温度与电子温度相近,通常为10000K至20000K的数量级,各种粒子的反应活性都很高,本文后面所提到的等离子体如未特别说明即指热等离子体。

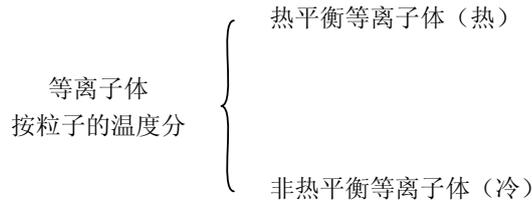


图2 等离子体的分类

### (三) 等离子体的产生方法

热等离子体的产生方法，它包括大气压下电极间的交流(AC)与直流(DC)放电、常压电感耦合等离子体、常压微波放电等。下面介绍微波等离子体炬(microwave plasma torch)：

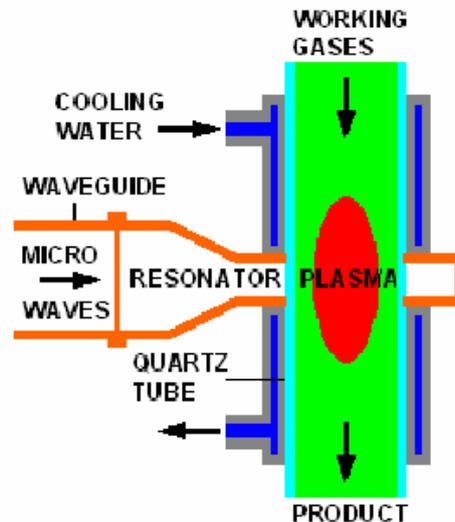


图3 微波等离子体火炬的工作原理示意图

如图 3 是所示，微波等离子体炬 (MPT) 是一种开放结构的等离子体源，是由金钦汉等于 1985 年首先提出来，目前实验室常用的微波源是 2.45GHz，MPT 炬管是一个直接耦合的同轴波导微波谐振腔，腔内存在着固定的电场和磁场分布，而这种特定的能量分布维持了等离子体放电，将一段同轴线一端短路，另一端开路，就构成了同轴谐振腔。MPT 炬管的内管和中管是相连通的终端短路活塞的存在使其成为一个同轴微波谐振腔，同轴谐振腔有三种耦合方式：直接耦合，电容耦合和电感耦合。直接耦合又称为电导耦合，其方法是在同轴腔外导体上开孔，将同轴传输线（天线）的内导体直接连接同轴腔的内导体上，MPT 炬管就是采用的这种方式。当炬管顶端到调谐活塞端面的距离是  $\lambda/4$  的奇数倍时（一般为  $3\lambda/4$ ），顶端的电场为最强，就可在顶端形成和维持等离子体。图 4 是电子科技大学高能所的微波等离子体火炬系统，微波的工作频率为 2.45GHz，磁控管产生的微波通过波导系统、三端调配和短路活塞耦合到同轴传输线（天线），并在离内管端口几厘米的地方形成特定的电磁场分布，从而使空气等工作气体电离形成等离子体火炬，图中的等离子体火炬的火焰长度只要几厘米，它的主要应用是金刚石薄膜、材料的表面改性、化学分析、纳米材料制备、废物处理等。

微波等离子体的参数：

工作频率：	2450 ± 50MHz	输出功率：	1.0—2.0kW
工作范围：	100 Torr 至大气压	波导接口：	BJ-26

微波等离子体炬设备组成：

磁控管提供能源

微波能从波导谐振腔引出

微波传输系统

喷嘴

微波等离子体火炬作为处理医疗垃圾系统可行性还值得进一步研究，因为它不仅可以利用等离子体火炬冲击、分解垃圾，还可以利用微波高效的热作用进行医疗垃圾的热解，达到高效的废物处理。

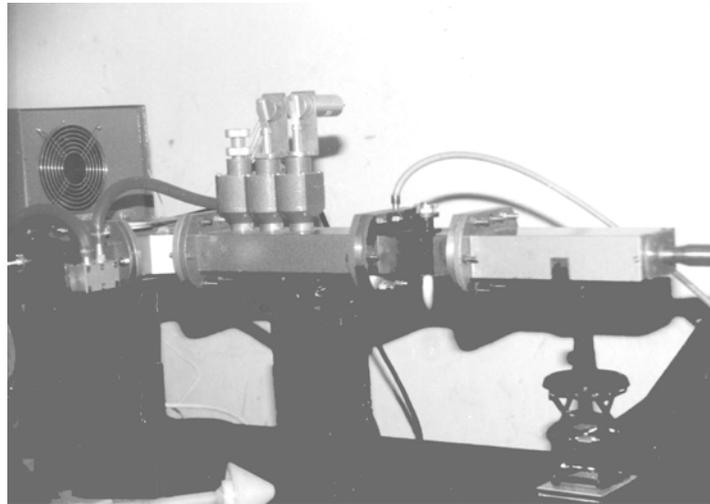


图4 微波等离子体炬实物照片

## 二、等离子体技术在环境污染处理上的应用

### (一) 等离子体技术处理废物的特点

利用大功率等离子体处理危险有害的废弃物和一般的焚烧方式大不一样，等离子体火炬的中心温度可高达摄氏 2~3 万度，火炬边缘温度也可达到 3 千度左右。当高温高压的等离子体去冲击被处理的对象时，被处理物的分子、原子将会重新组合而生成新的物质，从而使有害物质变为无害物质，甚至能变为可再利用的资源。因此等离子体废物处理是一个废料分解和再重组过程，它可将有毒有害的有机、无机废物转成有价值的产品。等离子体高温分解特性是：第一，温度越高产生的分子的分子量越小；且C/H比越高，炭沉积为烟灰；第二，高温分解的许多产物的化学反应随温度降低而降低。炭，氢，氯在 300°C左右容易形成致癌物质：二氧(杂)芘，呋喃等，由于等离子体在处理废物时温度高，不易形成致癌物质，所以可以达到“零排放”。

等离子体分解有机废物可得到氢气及一氧化碳，并可通过一个附属设备提取。它们可以用作化学原料去生产其它产品，如聚合物或其他化学产品。氢气是十分有价值的商业气体，可应用在多种制造日用品的工艺中，例如：氨及塑料、药物、维生素、食油等。它亦可为燃料电池提供能量。燃料电池被广泛认为是未来解决污染问题的洁净能源。从无机废物中得到的可再用的产品包括可用于冶金工业的合成金属，可用于建筑及研磨材料的玻璃状的硅石。

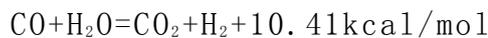
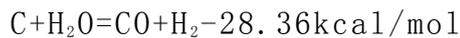
几乎所有废料均可被等离子体处理并转换成有用的产品。等离子体火炬处理废物有如下特点：

- 可以处理有毒、有害危险及非危险废物，包括有机的、无机的、气体、液体及固体。
- 能够完全地、安全地将有毒废料转化成无毒且有使用价值的产品。
- 符合最严格的排放标准，减容率高。

许多有毒有害的物质是不能焚烧的，例如 PCBs、农药、杀虫剂等等，而使用等离子系统则可以安全地处理并且可以随时启动和停机，而等离子设备的减容量非常高，其它处理设备做不到的。正因为如此，用电量方面较多，这是造成运行成本较高的主要原因，因焚烧炉的减容量最大 90%，以处理量 1000 吨/日为例，每天要有 100 吨的含有重金属的底灰须填埋或再经等离子系统处理(日本就专为焚烧炉的底灰处理购置了等离子系统)。

存在的问题：

由于设备的特殊性，其制造成本较高，用电运营成本高。但如在大规模运营中可以收回氢气，这是当今和今后最需要的清洁能源，而且价值很高。下面三式是等离子体处理废物时的主要反应式。



### (二) 等离子体火炬处理固体废物的应用

等离子体火炬，尤其是电弧等离子体火炬在医疗垃圾的应用已经开始，美国、日本、加拿大等发达国家和地区进行等离子体处理废物的研制和商品化进程已经进行几年时间，并已经开始了商品化应用。

下面是微波等离子体火炬处理固体废物的应用设想，利用它可处理：城市固态垃圾、淤泥、工业固废以及液态有机垃圾等。等离子体分解有机废物可得到氢气及一氧化碳，并可通过一个附属设备提取。它们可以用作化学原料去生产其它产品，如聚合物或其他化学产品。氢气是十分有价

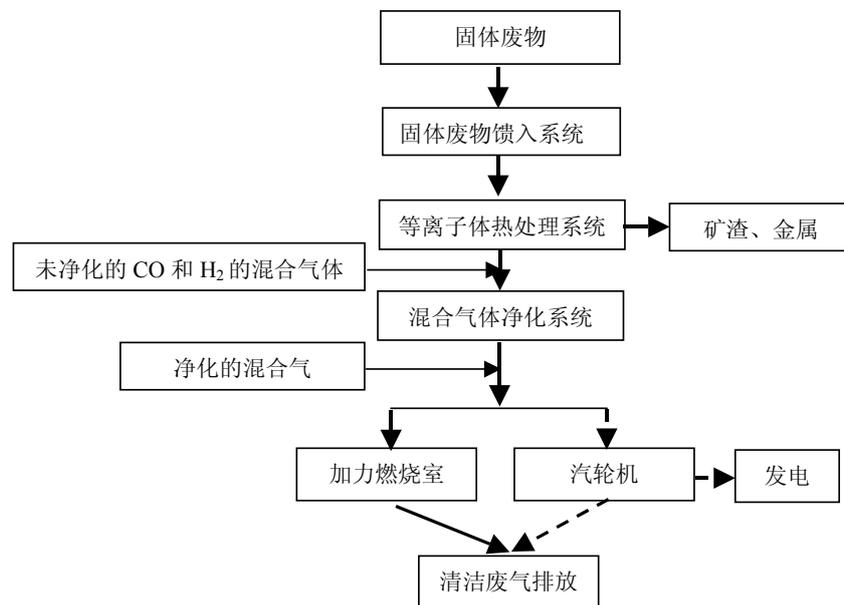


图5 等离子体处理废物的系统框图

值的商业气体，可应用在多种制造日用品的工艺中，例如：氨及塑料、药物、维生素、食油等。它亦可为燃料电池提供能量。燃料电池被广泛认为是未来解决污染问题的洁净能源。从无机废物中得到的可再用的产品包括可用于冶金工业的合成金属，可用于建筑及研磨材料的玻璃状的硅石。

图 5 是等离子体处理废物的流程示意图，在等离子体热处理系统中，主要设备是两台等离子体火炬，即第一气化室和第二气化室。

在处理废物时，垃圾首先被切碎并注入第一气化器（如图 5 所示等离子体热处理系统）。工作温度在 1800—1900K，300KW。减容比高：90%甚至 95%以上。产生的等离子体火炬可以很快使有机物分解成一氧化碳和氢，无机物则变为玻璃状的硅石。

第二气化室（图 5 中的加力燃烧室）等离子体火炬可对第一气化室中合成气体中的一些残留微粒和一些碳氢化合物再进一步进行分解处理。

通过第二气化室处理后的混合气体经过净化系统后，成为只含 $H_2$ 和 $CO$ 的混合气体，加力燃烧室在 1000°C 温度环境下对 $H_2$ 和 $CO$ 的混合气体进一步进行处理，以确保无有害的混合物产生，比如二氧化苣和呋喃等，最后排放到空气中。当然也可以取消加力燃烧室而利用这些混合气体去驱动汽轮机发电。

在第一气化器中垃圾的无机物部分熔化成玻璃状的无污染的炉渣如图 6，炉渣可安全用于建筑材料，根据不同的用途，炉渣可复原为各种形式。

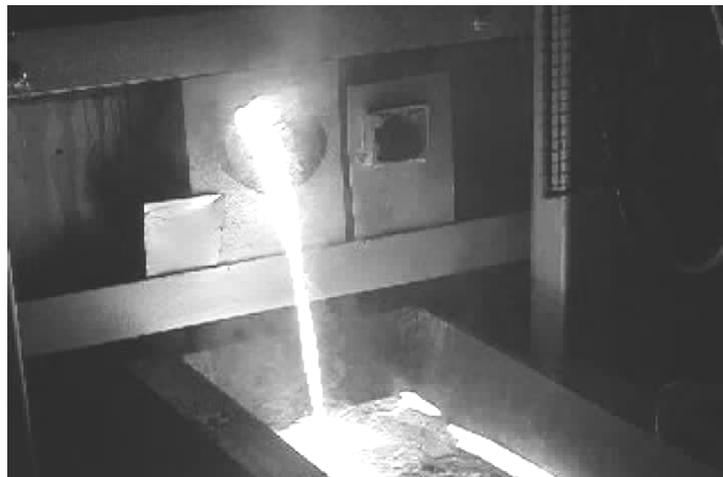


图6 第一气化室处理后的玻璃化炉渣

### 三、等离子体处理废物的前景

与其他有竞争力的废物处理过程相比，热等离子体处理废物比较昂贵。而在一些特殊类型的有毒废物处理问题上热等离子体处理具有独特的优势，因此等离子体主要用于焚烧炉难于处理的废物，包括被污染的陶瓷废物、高熔点金属、需要治理的含有毒挥发成分的废气等。等离子体进行废物处理的主要缺点在于以电力作为能源，经济成本高。此外，与传统废物处理方式相比，等离子体过程具有更多的过程控制参数，从而在过程控制中要求自动化程度很高。看来对于这种大规模的设备仍然缺乏一个坚实的工程基础。