

# 固体废弃物等离子体热解/气化系统研究进展

唐兰<sup>1</sup>, 黄海涛<sup>2</sup>, 郝海青<sup>1</sup>, 赵矿美<sup>1</sup>

1. 广州大学土木工程学院, 广州 510006
2. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006

**摘要** 近年来,随着节能环保要求的逐步提高,固体废弃物的等离子体热解/气化技术受到越来越多关注。热等离子体具有极高的反应温度、超快的反应速度和高焓,在热解/气化系统中引入热等离子体作为热源,可以显著提高热解/气化强度和效率。因此,固体废弃物等离子体热解/气化处理被认为是具有很大潜力的废弃物处理替代技术之一。本文从固体废弃物等离子体热解/气化系统入手,综述各种系统中使用的反应器类型及研究进展。

**关键词** 热等离子体;热解/气化系统;废弃物处理

**中图分类号** X131.1

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.018

## Plasma pyrolysis/gasification systems for waste disposal

TANG Lan<sup>1</sup>, HUANG Haitao<sup>2</sup>, HAO Haiqing<sup>1</sup>, ZHAO Kuangmei<sup>1</sup>

1. Department of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China
2. Department of Environmental Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

**Abstract** With efficient and reliable torches for the thermal plasma generation becoming available in recent years, the thermal plasma as an energy source for pyrolysis/gasification has attracted much attention, and a special attention is paid to the waste treatment for the resource and the energy recovery. Plasma pyrolysis/gasification systems have unique features such as the extremely high reaction temperature and the ultra-fast reaction velocity as compared to the traditional pyrolysis/gasification systems. The plasma pyrolysis/gasification emerges, therefore, as a novel pyrolysis/gasification technology with a great potential in the solid waste disposal. This paper reviews the fundamental studies of plasma pyrolysis/gasification systems including the direct current (DC) arc plasma system and the radio frequency (RF) plasma system with an emphasis on the reactor design such as the plasma fixed/moving bed reactor system, the plasma entrained-flow bed reactor system and the plasma spout-fluid bed reactor system.

**Keywords** thermal plasma; pyrolysis/gasification systems; waste treatment

固体废弃物的资源化、能源化处理是目前人们关注的热点问题,尤其是有机固体废弃物如废旧橡胶、废旧塑料等,具有巨大的能源及资源回收潜力<sup>[1-5]</sup>。目前用物理方法对它们进行直接回收再处理的处理量有限;焚烧可以利用有机废物中的能源,但会产生SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和其他危险排放物,如二噁英和呋喃等。常规的热解或气化回收技术,由于气体的生成率较低、分解产物种类众多难以分离利用等问题,目前只有少量工业示范应用。

热等离子体热解/气化处理技术由于成本因素,最初主要用于安全处理有毒废物(如放射性的废物)<sup>[6-8]</sup>。将该技术应用用于固体废弃物处理,不仅能有效地减少废弃物体积,还能从废弃物中回收能源和其他资源,近年来,热等离子体有机废弃物的热解处理技术已受到越来越多的关注。过去30年间,出现了很多利用热等离子体技术进行废弃物处理的研究及示范项目,其中涉及的废弃物包括城市固体废弃物<sup>[9,10]</sup>、飞灰<sup>[11]</sup>、医疗垃圾<sup>[12]</sup>、污泥<sup>[13]</sup>等。一些小型的处置固体废弃物的

收稿日期:2014-09-24;修回日期:2014-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51078092)

作者简介:唐兰,副教授,研究方向为能源高效转化利用及建筑节能,电子信箱:tanglan@gzhu.edu.cn

引用格式:唐兰,黄海涛,郝海青,等. 固体废弃物等离子体热解/气化系统研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(5): 109-114.

商业性等离子设备已经运作超过10年<sup>[14]</sup>。本文综述等离子体热解/气化系统及目前的研究进展。

### 1 不同热等离子体发生器(炬)系统

热等离子体热解/气化系统最基本的组成是等离子体发生器,也称为等离子体炬。用于废弃物处理领域且有工业应用

价值的等离子体发生器主要有3种:通过直流/交流放电产生等离子体的电弧等离子体炬(直流电弧等离子体)、采用高频感应放电产生等离子体的高频感应等离子体炬(高频等离子体)、采用大气压下微波放电产生等离子体的微波等离子体炬(微波等离子体)。表1对不同等离子体处理废物的主要特征进行比较。

表1 用于废弃物处理过程的不同类型等离子体比较

Table 1 Comparison of different plasma processes for waste treatment

项目	温度/K	电极腐蚀	等离子体发生器与反应器的冷却	等离子体点燃	等离子体区域	气体流速	固体进料位置	物料对等离子体影响	电源效率/%
直流电弧等离子体	5000~10000	存在*	需要	容易	小	高	等离子体下游	无	60~90
大气压高频等离子体	3000~8000	—	需要	困难	中等	高	等离子体上游	有	40~70
低压高频等离子体	1200~1700	—	不需要	容易	大	低	等离子体上游	有	40~70
微波等离子体	1200~2000	—	不需要	困难	大	低	等离子体上游	有	40~70

注:\* 惰性气体中寿命为1000~3000 h,氧化性气体中为200~500 h。

直流电弧等离子体中,等离子体射流核心的温度可大于10000 K,而边缘温度迅速降低,平均操作温度可达5000 K,热效率高(可高达80%左右),电弧稳定性好,便于操作,适合于大规模工业化生产。但电弧等离子体炬的流动速度快,等离子体射流范围窄,反应物在高温区的停留时间短(0.2~2 ms);电极需要采用水冷却,会消耗一大部分能量;另外,在非氧化性条件下工作,电极的平均寿命约为1000 h;在氧化条件下,平均寿命一般在100~500 h。

高频等离子炬与电弧等离子炬比较有以下特点:1) 由于高频等离子炬的感应电极处于反应体系之外,因此该反应体系不会像电弧等离子炬那样受到阴极杂质的污染,也没有电极腐蚀的问题,无须定期更换电极;2) 等离子体流速可以低至几米每秒,这样低的流速对废弃物热解/气化是有利的,废弃物在高温区有较长的停留时间与反应时间,反应更加充分,避免了反应不完全现象与二次污染;3) 温度场比电弧等离子炬均匀,中心温度较低,不像电弧等离子炬温度剖面为抛物线形,中心温度较高,这个特点使高频等离子体温度场(成矩形剖面)可与电弧等离子体温度场叠加;4) 高频放电等离子体可在空气或氧气条件下工作,大大节约了运行成本,但高频等离子体尤其在大气压下的高频等离子体起弧较难,且高频等离子体易受到进入的废弃物干扰,导致熄弧。

微波等离子体与高频等离子体有很多类似之处,但通常,微波频率信号会产生比(13.56 MHz)高频信号更密集的等离子体且微波等离子体的等离子区域更大。

高频等离子体流具有许多优点,如等离子体体积大,生成的等离子体纯净和较低的等离子体流速等。高频等离子体流也有一些缺点,如难以点火和在某些操作条件下容易灭

弧。而直流电弧等离子体的突出的优势是容易起弧且运行稳定。因此,直流-高频混合等离子体流将可以克服单一的电弧等离子体或高频等离子体流的缺点。Kohtaro等<sup>[15]</sup>开发了一种直流-高频混合等离子体流反应器,该混合等离子体由以下部件组成:电感耦合等离子体炬(6 kW、4 MHz、6 kV、1 A,电感耦合等离子体作为主要的等离子体),安装在电感耦合等离子体炬上的直流电弧等离子体炬(1 kW、50 V、25 A,直流等离子体射流作为补充),直流等离子体射流用来点燃高频电感耦合等离子体并维持其稳定。尽管该混合等离子体具有能克服各自缺陷的优势,但研究表明,直流-高频混合等离子体流的流体结构复杂,直流等离子体射流和高频电感耦合等离子体间会产生强烈作用,这种相互作用会导致高频电感耦合等离子体变得很不稳定,甚至会导致直流-高频混合等离子体流消失。因此,应进一步分析流动结构与直流-高频混合等离子体流特征之间的相互作用。

### 2 不同的等离子体热解/气化反应器系统

表2对一些涉及等离子体热解/气化的实验研究及示范工程系统进行汇总<sup>[16-37]</sup>,从表2可以看出,等离子体热解/气化系统,特别在示范项目,大多采用固定床/移动床反应器,其次是载流床反应器,只有少量研究使用等离子体喷射/流化床反应器。

#### 2.1 等离子体固定/移动床反应器

等离子体固定/移动床反应器是等离子体反应器中最简单的类型,一般包括熔渣池、无机物熔融液出口和气体出口,如图1所示<sup>[16]</sup>。对于等离子体固定床反应器,固体废弃物被预先放置在熔渣池中心(图1(a)),而对于等离子体移动床反

表2 不同的等离子体热解/气化反应器系统

Table 2 Different plasma pyrolysis/gasification reactor systems

反应器	等离子体源	应用	输入/输出	参考文献
等离子体移动床	直流电弧等离子体	废弃物处理	城市固体废弃物/气态碳氢化合物	Beck <sup>[16]</sup>
等离子体固定床	直流电弧等离子体	废弃物处理	固体废弃物/气态碳氢化合物	Vaidyanathan <sup>[17]</sup>
等离子体固定床	直流电弧-射频混合等离子体	废弃物处理	焦炭处理	Nishikawa <sup>[18]</sup>
等离子体载流床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	煤/C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Bittner <sup>[19,20]</sup>
等离子体载流床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	煤/C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , 气态碳氢化合物	Bond <sup>[21]</sup>
等离子体载流床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	煤/C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Nicholson <sup>[22]</sup>
等离子体载流床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	煤/C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Patrick <sup>[23]</sup>
等离子体载流床	射频等离子体	碳氢化合物热解	聚丙烯/丙烯, 气态碳氢化合物 聚乙烯/乙烯, 气态碳氢化合物	Guddeti <sup>[24,25]</sup>
等离子体载流床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	生物质/气态碳氢化合物, CO, CO <sub>2</sub>	Zhao <sup>[26]</sup>
等离子体载流床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	废轮胎/气态碳氢化合物	Chang <sup>[27]</sup>
等离子体载流床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	聚丙烯/气态碳氢化合物	Tang <sup>[28]</sup>
等离子体载流床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	废轮胎/气态碳氢化合物, CO, CO <sub>2</sub>	Huang <sup>[29]</sup>
等离子体载流床	射频等离子体	碳氢化合物热解	秸秆/气态碳氢化合物, CO, CO <sub>2</sub>	Wen-Kai Tu <sup>[30,31]</sup>
等离子体喷动床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	煤/气态碳氢化合物, CO, CO <sub>2</sub>	Bal <sup>[32]</sup>
等离子体喷动床	直流电弧等离子体	碳氢化合物热解	油菜籽/气态碳氢化合物, CO, CO <sub>2</sub>	Emome <sup>[33]</sup>
等离子体喷动床	直流电弧等离子体	材料加工处理	金属粉末粒化	Tsukada <sup>[34]</sup>
等离子体喷动床	直流电弧等离子体	材料加工处理	表面碳化	Kojima <sup>[35]</sup>
等离子体流化床	射频等离子体	碳氢化合物热解	重油/气态碳氢化合物 CO, CO <sub>2</sub>	Motallebi <sup>[36]</sup>
等离子体喷动流化床	直流电弧等离子体	矿物加工处理	钒矿石/钒	Munz <sup>[37]</sup>

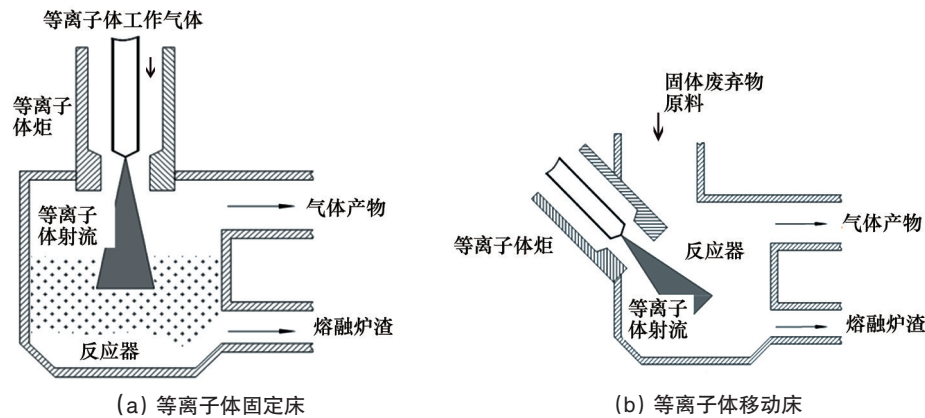


图1 等离子体固定/移动床

Fig. 1 Plasma fixed and moving bed reactor

反应器,废物通过反应器顶部或侧面的入口由进料装置输入反应器内(图1(b)),在等离子体作用下,金属和灰在反应器的底部形成熔融液体流出,有机部分气化为气体,从反应器的顶部逸出。

等离子体热解/气化系统示范项目大多采用固定床/移动床反应器<sup>[16,17]</sup>,2002年,美国在日本建成一个中试规模的固体废弃物等离子体热解处理工厂,该项目采用移动床反应器。目前工厂每天处理约300 t生活垃圾,可以产生4.3 MW·h的电

力。一些需要反应物和等离子体射流长时接触的研究,也使用固定床反应器<sup>[18]</sup>。然而,等离子体固定/移动床反应器中,废弃物与等离子体持续接触直至热解或气化反应完全生成最终产物,因此某些需要获得中间生成产物的反应无法使用该类反应器。

## 2.2 等离子体载流床反应器

有关等离子体热解的实验研究中大多采用传输型稀相反应器(下行式载流床反应器),如图2所示<sup>[19-31]</sup>。

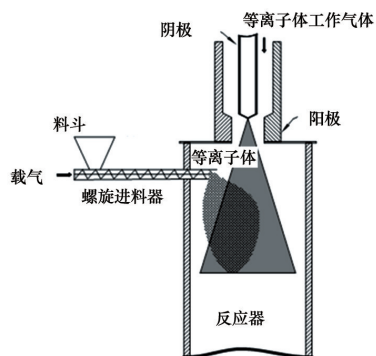


图2 等离子体载流床

Fig. 2 Plasma entrained-flow bed

在等离子体下行式载流床反应器中,等离子体射流首先被喷射入反应器内,需要处理的固体废弃物粉末从反应器侧面被喷射入反应器并进入等离子体射流尾焰中。由于等离子体射流从核心到边缘处的温度梯度非常大,因此固体原料的加热及冷却速率可高达  $10^6$  K/s。因此,等离子体载流床反应器被认为是新颖、具有潜力的多相流反应器。工业或研究中的典型应用主要有:1) 利用等离子体载流床反应器热解煤生成乙炔,获得了煤洁净利用合成化学物质的新方法<sup>[19-21]</sup>;2) 聚合物解聚生成高附加值产物(如聚丙烯解聚为丙烯)<sup>[24,25]</sup>。

当采用等离子体载流床反应器热解煤制备乙炔时,煤以煤粉的形式通过载气带入等离子体中或者直接喷入电弧发生裂解生成乙炔,为防止乙炔在高温下进一步分解,必须将该产品气体快速冷却。目前的研究成果主要集中在煤的物化性质及反应气氛对乙炔产率的影响。Bittner 和 Baumann 等<sup>[19,20]</sup>采用挥发分含量在 22%~48% 的 13 种煤进行实验发现,挥发分含量在 32%~39% 的煤乙炔产率最高。Bond 等<sup>[21]</sup>采用氩等离子体在 4000℃ 下进行煤热解实验,热解所得气体主要是氢气、乙炔和一氧化碳,当在等离子体中引入氢气时,裂解气体的主要成分是乙炔,而且煤的转化率也有提高。到目前为止,由于 Nicholson 等<sup>[22]</sup>的建议,这个过程还没有被商业化。一些公司一直致力于煤炭热解在试验工厂的实验(如 Patrick 等<sup>[23]</sup>等),但目前的研究发现一些关键问题尚未得到解决,如煤粉加入等离子体射流中时,会在等离子体喷嘴处造成结焦,阻碍系统连续运行。因此,该技术还未得到成功商业化应用。

为选择性地获得中间产品和避免不必要的电极杂质污染,Guddeti 等<sup>[24,25]</sup>开发了感应耦合等离子体(ICP)载流床反应器结合快速淬灭(冷却速率 1000 K/s),用于解聚高分子生成有高附加值的聚合物单体。研究表明,聚合物种类、等离子体功率、中心气体的流速、粉末输入速率、淬灭气体流速等都是生产气体蒸汽过程中影响碳氢化合物产量的关键工艺参数。聚丙烯解聚的转化率约为 78%,主要气体产物是丙烯(93.7%)。但使用该装置解聚聚乙烯时,气体产物大多是丙烯(53.4%)和乙烯(22.2%)的混合物。为获得比例更高

的乙烯产物,Guddeti 等还将开展关于停留时间变化、其他类型的淬冷系统的实验研究。

此外,为研究不同时间的热解程度和分析等离子体热解过程不同阶段的产物,Zhao 等<sup>[26]</sup>用电弧等离子体载流床反应器进行了生物质热解实验,Chang 等<sup>[27]</sup>进行了废轮胎热解研究,Tang 等<sup>[28]</sup>、Huang 等<sup>[29]</sup>进行了废塑料、废轮胎热解的研究,Tu 等<sup>[30,31]</sup>进行了生物质的热解研究。载流床反应器的主要缺点是由于固体废料与等离子体射流接触时间很短,能源利用率非常低,辐射、对流及热传导损失都不可避免。

### 2.3 等离子体喷动/喷动流体床反应器

等离子体-喷动床结合了等离子体技术和喷动床装置,原理与标准的喷动床类似,主要区别是喷动床倒锥体下部连接等离子体炬,喷动气流由等离子体射流代替,等离子体射流既作为喷动气流又作为热解或气化的热源,见图 3<sup>[32]</sup>。

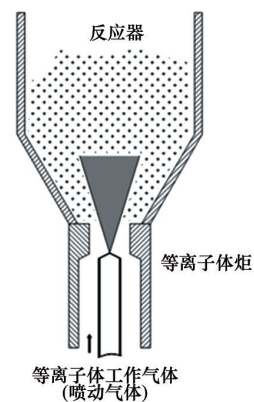
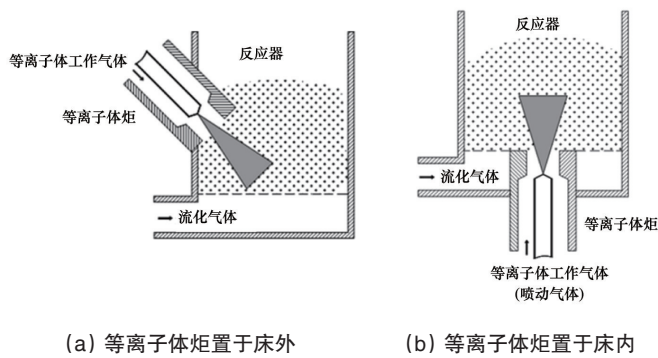


图3 等离子体喷动床

Fig. 3 Plasma spouted bed

Jurewicz 等<sup>[33]</sup>以油菜籽为原料,在等离子体喷动床中进行了气化生物质制备合成燃料的研究。结果显示,该系统除具有一般等离子体热解的优势之外,采用喷动床装置之后,反应速率比快速热解更快,能量利用效率达 60%。但由于等离子体的超高温,某些颗粒在流动过程中,容易发生熔融、结块与团聚等,导致等离子体-喷动床底部颗粒循环变差、形成流动死区甚至停止喷动<sup>[34,35]</sup>,对此,文献中一般采用引入流化气流解决<sup>[36,37]</sup>。一种是在喷动床基础上引入流化气流,将等离子体炬没入流化床中;另一种将等离子体炬置于流化床装置外部,如图 4 所示。Flamant 等<sup>[38]</sup>研究了等离子体-喷动床内的传热情况,结果显示,由于辐射及对流换热导致的热损失只占进入喷动床的等离子体总能量的 10%。根据计算的轴向热传导率( $\lambda_a$ )和径向热传导率( $\lambda_r$ ),发现喷动床反应器轴向上的传热非常快,轴向热传导率比填充床中增大约 3 个数量级。因此,用于燃烧或气化的喷动-流化床反应器,可以提供更高的混合速率,克服喷动床和流化床的局限性,使固体和液体更好地接触,使流体分布产生最小程度的死区,改善流动质量和传热特性。



(a) 等离子体炬置于床外

(b) 等离子体炬置于床内

图4 等离子体喷动流化床

Fig. 4 Plasma spout-fluid bed reactor

表3总结了以上3类反应器的特征:1)对等离子体固定床/移动床反应器而言,可处理大块废弃物,但气固接触程度

一般,固体停留时间长,温度控制及转化效率一般,但是,固定床/移动床反应器结构简单易于工业化;2)涉及等离子体热解/气化的实验研究中主要采用下行载流床装置,即将物料喷入等离子体尾焰,这一方法的优势是固相等等离子体中的停留时间短,可获得较高的加热及冷却速率。非常适用于需要超高温及超短接触时间的反应(例如煤等离子体热解制乙炔)。但这类反应器能量利用效率低,对流及辐射热损失较大,物料难以进入等离子体核心区域,受限于物料停留时间,只能处理粉末;3)相比于其他等离子体载流床、固定床热解反应器,由于等离子体-喷动流化床中固体流化介质及反应物料的存在,进入喷动流化床中的等离子体射流的辐射与对流热损失大大降低,提升整个体系的热效率。另外,由于物料在喷动流化床中循环流动,不仅能处理大颗粒物料,更能使物料进入等离子体核心区域,充分利用等离子体热能。但是目前关于二者结合在一起的特性研究还较少。

表3 不同等离子体反应器系统的特征

Table 3 Main features of plasma reactor systems of different designs

项目	应用现状	固体进料颗粒尺寸	气固接触与混合	固体停留时间/s	温度控制	转化效率	工业化潜力
等离子体固定/移动床	简单易行,示范工程中经常采用	大块物料	中等	> 1	中等	中等	良好
等离子体载流床	实验研究中经常采用	细颗粒	差	< 0.01	良好	低	中等
等离子体-喷动流化床	结构与操作相对复杂	中等大小颗粒	良好	0.1~1	中等	高	有限

### 3 等离子体热解技术前景展望

国内外现有的利用热等离子体技术进行废弃物处理的规模装置主要应用于处理高危废弃物和燃烧废弃物的灰渣,其一是因为热等离子体的超高温可以彻底分解这些高危废弃物中的有毒物质。另外,由于高危废弃物如医疗垃圾中含有大量的细菌性病毒,有一定的空间污染、急性病毒传染和潜伏性传染的特征,必须对其进行安全处理,因此高危废弃物的处理受处理成本高低的影响不大。

但就经济性考虑,利用等离子体热解/气化技术直接进行固体废弃物处理还存在一些问题:

1) 等离子体反应系统采用高品位的电能作为能源,维持平衡热等离子体状态需要较高电耗。

2) 平衡热等离子体的超高温会产生热损失引起能量利用率低。

3) 气体产物的再利用价值与固体产物碳的利用率较低。

这些问题影响了等离子体热解过程的经济性,阻碍等离子体热解技术的大规模工业化使用。等离子体热解技术对一般固体废弃物的应用阶段首先需要采用合适的等离子体系统,提高过程的能量利用效率;其次是通过提高碳利用率、产物附加值等提高等离子体热解技术的经济性。

### 4 结论

等离子体固体废弃物热解/气化技术随当今世界环境问题的日益严峻而得到迅速发展,本文简述了利用等离子体进行固体废弃物处理的基本过程,介绍了应用于固体废弃物处理的各种等离子体热解/气化系统的特点。直流电弧等离子体固定/移动床反应器系统由于其结构简单,易于操作控制,是等离子体热解/气化技术工业化应用及示范项目中最常用的系统。而目前涉及等离子体热解/气化技术的实验研究中多采用直流电弧或高频等离子体下行式载流床反应器,采用该系统可以获得相对高的加热速率及冷却速率,但这类系统中由于固体废料与等离子体射流接触时间很短,能源利用率非常低,热损失大。等离子体-喷动流化床中辐射与对流热损失小,整个体系的热效率得以提高,能处理颗粒物料,是较有发展前景的等离子体热解/气化系统之一。

虽然近几年来此领域取得了重要研究进展,但要进行工业化应用仍然面临了许多重要的技术挑战。为使得这一技术能得以商业化,必须进一步改善该技术的处理速度、能量利用效率、系统压降、副产物产生及利用效率等。随着国内外处理固体废弃物的立法日益严格及废物处理传统技术上的局限性,利用等离子体技术回收能源和材料的技术越来越

引人关注。所有这些都是需要创新的等离子体热解/气化系统设计和不断发展。

参考文献 (References)

- [1] Sharma V K, Mincarini M, Fortuna F, et al. Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment- Review[J]. *Energy Conversion and Management*, 1998, 39(5): 511-528.
- [2] Ko D C K, Mui E L K, Lau K S T, et al. Production of activated carbons from waste tire- process design and economical analysis[J]. *Waste Management*, 2004, 24(9): 875-888.
- [3] Santos A S F, Teixeira B A N, Agnelli J A M, et al. Characterization of effluents through a typical plastic recycling process: An evaluation of cleaning performance and environmental pollution[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2005, 45(2): 159-171.
- [4] Alter H. The recovery of plastics from waste with reference to froth flotation[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2005, 43(2): 119-132.
- [5] Akpanudoh N S, Gobin K, Manos G. Catalytic degradation of plastic waste to liquid fuel over commercial cracking catalysts: Effect of polymer to catalyst ratio/acidity content[J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2005, 235(1-2): 67-73.
- [6] Moustakas K, Fatta D, Malamis S, et al. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 123(1-3): 120-126.
- [7] 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.
- [8] Tzeng C C, Kuo Y Y, Huang T F, 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.
- [9] Byun Y, Namkung W, Cho M, et al. Demonstration of thermal plasma gasification/vitrification for municipal solid waste treatment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(17): 6680-6684.
- [10] Yang L, Wang H, Wang H, et al. Solid waste plasma disposal plant[J]. *Journal of Electrostatics*, 2011, 69(5): 411-413.
- [11] Pan X, Yan J, Xie Z. Detoxifying PCDD/Fs and heavy metals in fly ash from medical waste incinerators with a DC double arc plasma torch [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(7): 1362-1367.
- [12] Chu J P, Hwang I J, Tzeng C C, et al. Characterization of vitrified slag from mixed medical waste surrogates treated by a thermal plasma system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1998, 58(1-3): 179-194.
- [13] Mountouris A, Voutsas E, Tassios D. Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(8): 2264-2271.
- [14] Ruj B, Ghosh S. Technological aspects for thermal plasma treatment of municipal solid waste—A review[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 126: 298-308.
- [15] Kawajiri K, Sato T, Nishiyama H. Experimental analysis of a DC-RF hybrid plasma flow[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 171(1-3): 134-139.
- [16] Beck R W Inc. City of Honolulu reviews of plasma arc gasification and vitrification technology for waste disposal[R]. [2003-01-23] [http://www.opala.org/pdfs/solid\\_waste/arc/PlasmaArc.pdf](http://www.opala.org/pdfs/solid_waste/arc/PlasmaArc.pdf).
- [17] Vaidyanathan A, Mulholland J, Ryu J, et al. Characterization of fuel gas products from the treatment of solid waste streams with a plasma arc torch[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82(1): 77-82.
- [18] Nishikawa H, Ibe M, Tanaka M, et al. A treatment of carbonaceous wastes using thermal plasma with steam[J]. *Vacuum*, 2004, 73(3/4): 589-593.
- [19] Bittner D, Baumann H. Relation between coal properties and acetylene yield in plasma pyrolysis[J]. *Fuel*, 1985, 64(10): 1370-1374.
- [20] Bittner D, Wanzl W. The significance of coal properties for acetylene formation in a hydrogen plasma[J]. *Fuel Processing Technology*, 1990, 24: 311-316.
- [21] Bond R L, Galbraith I F, Ladner W R, et al. Production of acetylene from coal, using a plasma jet[J]. *Nature*, 1963, 200(12): 1313-1314.
- [22] Nicholson R, Littlewood K. Plasma pyrolysis of coal[J]. *Nature*, 1972, 236(5347): 397-400.
- [23] Patrick A J, Jr, Gannon R E. A 1MW prototype arc reactor for processing coal to chemicals[M]. Lancaster: Technomic Publishing Company Inc, 1985: 144-154.
- [24] Guddeti R R, Knight R, Grossmann E D. Depolymerization of polypropylene in an induction- coupled plasma (ICP) reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2000, 39(5): 1171-1176.
- [25] Guddeti R R, Knight R, Grossmann E D. Depolymerization of polyethylene using induction coupled plasma technology[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2000, 20(1): 37-63.
- [26] Zhao Z L, Huang H, Wu C Z, et al. Biomass pyrolysis in an argon/hydrogen plasma reactor[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2001, 1(5): 197-199.
- [27] Chang J S, Gu B W, Looy P C, et al. Thermal plasma pyrolysis of used old tires for production of syngas[J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 1996, A31(7): 1781-1799.
- [28] Tang L, Huang H, Wu C Z. Pyrolysis of polypropylene in a nitrogen plasma reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(6): 1145-1150.
- [29] Huang H, Tang L, Wu C Z. Characterization of gaseous and solid product from thermal plasma pyrolysis of waste rubber[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 19(37): 4463-4467.
- [30] Tu W K, Shie J L, Chang C Y, et al. Products and bioenergy from the pyrolysis of rice straw via radio frequency plasma and its kinetics[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(6): 2052-2061.
- [31] Tu W K, Shie J L, Chang C Y. Pyrolysis of rice straw using radio-frequency plasma[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(1): 24-30.
- [32] Bal S, Musiaiski A, Swierczex R. Gasification of coal fines in a laboratory plasma- chemical reactor with a spouted bed[J]. *Koks Smola Gaz*, 1971, 16(5): 123-128.
- [33] Emome A I, Jurewize T. Fuel synthesis for solid oxide fuel cells by plasma spouted bed gasification[C]. 14th International Symposium on Plasma Chemistry, Prague, The Czech Republic, 2-6 August, 1999.
- [34] Tsukada M, Goto K, Yamamoto R H, et al. Metal powder granulation in a plasma- spouted/fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 1995, 82(3): 347-353.
- [35] Kojima T, Matsukata M, Arao M, et al. Development of a plasma jetting fluidized bed reactor[J]. *Le Journal de Physique IV*, 1991, 2 (C2): 429-436.
- [36] Motallebi C, Permin J F, Amoureux J. Catalytic Hydrocracking of heavy hydrocarbon in plasma spouted bed reactor[C]. 10th International Symposium on Plasma Chemistry, Bochum, Germany, 4-9 August, 1991.
- [37] Munz R J, Mersereau O S. A plasma spout-fluid bed for the recovery of vanadium from vanadium ore[J]. *Chemical Energy Science*, 1990, 35 (8): 2489-2495.
- [38] Flamant G. Hydrodynamics and heat transfer in a plasma spouted bed reactor[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1990, 10(1): 71-85.

(编辑 田恬)