

热等离子体处理废物技术的进展¹⁾

盛宏至* 李要建^{†, 2)}

* (中国科学院力学研究所, 北京 100190)

[†] (江苏天楹等离子体科技有限公司, 江苏南通 226600)

摘要 随着我国经济的快速发展, 固体废物的年产量显著增加, 焚烧减容后仍产生大量的焚烧残余物, 其中含有重金属、二噁英等有害成份, 对其填埋不仅占用大量土地资源, 而且对土壤和地下水存在二次污染风险等诸多问题, 因而亟需发展具有良好环保效益和社会效益的废物处理新技术. 热等离子体技术在航天技术发展初期, 用于航天再入过程航天器头部防热研究和等离子体对无线电通讯的干扰研究. 之后从军用转向民用, 主要的场景之一是用于环保领域处理废物, 从早期销毁报废武器、化学武器战剂和中低放射性废物开始, 发展到现在, 等离子体技术已经在有机和无机废物处理技术中, 成为有特色的先进技术. 文章介绍了等离子体处理废物技术的原理与特点, 回顾了低温热等离子体技术在处理固体废物中的发展过程, 综述了低温热等离子体处理固体废物技术在基础研究领域和工程应用领域的进展, 对目前等离子体固体废物处理技术应用中存在的问题进行了着重分析, 并提出发展建议, 以此悼念我国应用热等离子体技术的先驱吴承康院士以及他对于热等离子体技术处理废物技术基础研究的关怀和指导.

关键词 等离子体, 废物处理, 气化, 熔融

中图分类号: X7 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-23-372

DEVELOPMENT OF WASTE TREATMENT BY THERMAL PLASMA TECHNOLOGY¹⁾

Sheng Hongzhi* Li Yaojian^{†, 2)}

* (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

[†] (Jiangsu Tianying Plasma Technol. Co. Ltd., Nantong 226600, Jiangsu, China)

Abstract With the rapid development of China's economy, the annual output of solid waste has increased significantly. After incineration and capacity reduction of solid waste, a large amount of incineration fly ash is still produced, which contains heavy metals, dioxins (PCDD/PCDFs) and other harmful components. Pouring the incineration residue in the landfill not only occupies a large amount of valuable land resources, but also has many problems such as secondary pollution risk to soil and groundwater, so it is urgent to develop new advanced waste treatment technologies with good environmental protection and social benefits. In the early stage of the development of aerospace technology, low-temperature thermal plasma technology has been used for the study of the heat protection of the head of the spacecraft in the space re-entry process and the research on the interference of plasma sheath to radio communication. Afterwards, the application of thermal plasma technology shifted from aerospace application to civil use, and treating waste in the environmental protection field is one of its main application scenarios. Starting from the early destruction of scrapped

2023-08-02 收稿, 2023-11-27 录用, 2023-11-28 网络版发表.

1) 科技部固废资源化专项资助项目 (2019YFC1906900).

2) 通讯作者: 李要建, 研究员, 主要从事等离子体技术应用基础研究. E-mail: lyj@cnty.cn

引用格式: 盛宏至, 李要建. 热等离子体处理废物技术的进展. 力学学报, 2023, 55(12): 2981-2996

Sheng Hongzhi, Li Yaojian. Development of waste treatment by thermal plasma technology. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(12): 2981-2996

weapons, chemical warfare agents, low- and medium-level radioactive wastes, and now the development of plasma technology has become a distinctive advanced technology in organic and inorganic wastes treatment technologies. This paper introduces the principle and characteristics of plasma waste treatment technology, reviews the development process of low-temperature thermal plasma technology in the treatment of solid waste, overviews the progress of low-temperature thermal plasma treatment of solid waste technology in the field of basic research and engineering application, focuses on the analysis of the problems existing in the application of plasma solid waste treatment technology, and puts forward development suggestions, so as to mourn the pioneer of plasma science and technology in China, our most respectful Prof. Chengkang WU, the academician of Chinese Academy of Sciences and his advising to the fundamental research for waste treatment by thermal plasma technology.

Key words plasma, waste treatment, gasification, melting

引言

等离子体广泛存在于宇宙空间, 宇宙中 99% 以上的物质都处于等离子体态. 低温热等离子体 (处于热力学平衡或局部平衡的等离子体) 的大规模应用与上世纪中期航天技术发展的再入问题研究有密切关系. 当时航天器再入大气层的高温热环境研究是个突出难点, 中国科学院力学研究所吴承康院士分析了航天器高速返回大气时航天器前部的高温环境的物理特点, 创造性地采用电弧风洞模拟研究航天器再入时的高温烧蚀和通讯中断问题, 开创了我国低温热等离子体应用的新时代. 与此同时, 美国西屋等离子体公司在美国宇航局支持下也开展类似工作, 研发了大功率电弧等离子体发生器, 在结束再入技术研究后, 随即开启了热等离子体技术销毁报废武器、化学武器战剂、放射性废物以及在冶金和能源领域的应用研究, 成为当时等离子体处理废物技术领域的领头羊.

废弃物处理, 就是将复杂多样的无用或有害化合物转化为无害的物质再利用或安全处置, 或者将有害成份如放射性元素或重金属固化稳定在玻璃体内, 以防有害物质浸出进入生态环境. 传统的固体废物处理方法主要包括填埋、固化稳定、热解、焚烧和生物降解等. 但这些传统处理技术存在着诸多不可避免的问题, 例如填埋不仅会造成土地资源的浪费, 还有可能造成严重的土壤和地下水源的二次污染; 热解或焚烧技术在处理过程中不仅可能产生二噁英等污染物, 还会产生富集重金属的飞灰与灰渣. 生物降解技术处理速度慢且处理过程中产生额外的大气污染物^[1-4].

等离子体是物质存在的第 4 种状态, 是由电

子、离子、原子、分子或自由基等粒子组成的集合体, 具有宏观尺度内的电中性与高导电性. 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成份, 使通常条件下难以进行或速度很慢的反应变得十分快速, 尤其有利于难摧毁污染物的处理. 利用等离子体释放的高活性物质以及极高的能量密度的特性处理废弃物, 有利于将有机污染物彻底分解, 将灰渣等无机物变为熔融液态, 冷却后形成玻璃态物质, 其主体结构是由硅氧四面体构成的“长程无序、短程有序”的网状结构, 能够有效固化重金属, 使其不易浸出, 并且处理过程中产生的玻璃体也可作为建筑材料用作路基材料、制砖材料等, 从而达到废弃物的无害化、资源化处理目的.

在国内环保要求日益严格的背景下, 等离子体处理技术作为一种废弃物无害化、减量化、资源化的新途径, 有着巨大的潜在应用前景, 对实现国内经济的可持续发展也有着十分重要的意义.

1 等离子体处理废物基本原理与特点

1.1 等离子体原理

等离子体是处在非束缚态的带电粒子组成的多粒子体系, 其中部分电子与原子核分离, 成为负离子和正离子, 整体呈现正负电荷基本相等的准电中性特点, 根据电子温度与正离子温度差距, 分热力学非平衡等离子体与平衡或部分平衡等离子体两大类, 二者均具有大量活性基, 并各具有相应的能量.

非平衡等离子体的电子温度可高达 30 000 K, 正离子温度接近环境温度, 整体温度不高, 俗称冷等离子体. 也有少数人将其与热等离子体中的低温热等离子体合称为低温等离子体. 一般情况下, 非平衡

等离子体需要在极低气压下维持, 大气压下非平衡等离子体采用高压脉冲、射频和微波放电方式产生. 放电机制包括电晕放电、介质阻挡放电等, 大气辉光、流注放电亦有研究报道^[5-7].

局部平衡等离子体电子温度高达 30 000 K, 正离子温度在 3 000 K ~ 30 000 K 之间, 正负离子达到部分热力学平衡, 为热等离子体中的低温热等离子体, 达到全域热力学平衡的为高温热等离子体. 工业低温热等离子体多数由弧光放电产生, 低电压、大电流, 电弧射流核心区温度在 8 000 K 上下, 射流外部温度为 3 000 K ~ 4 000 K 左右, 反应区温度一般在 1 500 K 以上. 图 1^[8] 给出了各类等离子体的温度和密度等参数的分布空间.

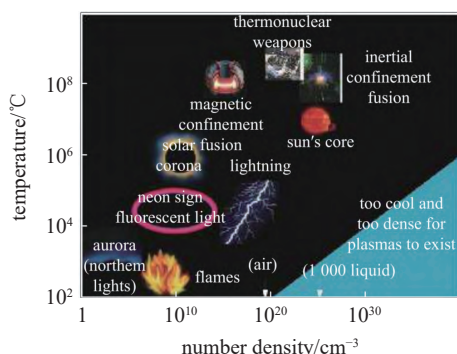


图 1 等离子体参数空间^[8]

Fig. 1 Plasma parameter space^[8]

1.2 用于处理废弃物的等离子体发生器

废弃物主要来源于人类的生活和生产活动过程, 按其组成可分为无机废物和有机废物. 无机废物主要包括焚烧飞灰与底渣、废金属、废玻璃和建筑垃圾等, 有机废物主要有生活垃圾、工业有机废物、污泥和粪便等. 废弃物的种类繁多, 物理化学性质差异极大, 使用等离子体技术处理废弃物时需要针对不同种类的废弃物的特性选择合适的技术方案进行处理.

低温热等离子体可以通过等离子体发生器产生, 放电方式包括直流电弧放电、交流电弧放电、射频电感耦合和微波放电等^[9].

(1) 直流电弧放电

电弧放电可分为直流 (DC) 和交流 (AC) 电弧. 直流电弧放电的工作更稳定不易断弧, 工作噪音低, 控制较为容易^[10]. 常用的直流电弧等离子体发生器主要包括自由电弧和射流受控的等离子体炬. 自由电弧一般采用石墨作为电极, 等离子体炬一般采用

金属作为电极, 等离子体工作气体可以是空气、氧气、水蒸气, 也可以是氮气、氩气等惰性气体.

按照电极布置差异划分, 直流等离子体炬可分为非转移电弧和转移电弧两种, 如图 2^[11] 所示.

① 转移电弧

转移弧启动时是负电极与中间正电极起弧, 起弧后再经转移开关将正电极转移到工件上形成等离子体电弧. 转移弧适用于无机类废物等离子体熔融处理, 如固体废物焚烧残余物 (飞灰、危险废物焚烧底渣) 熔融处理和废三元催化剂熔融资源化回收贵金属等^[12].

② 非转移电弧

非转移电弧炬中, 阴、阳极以及电极间所形成电弧在包含在炬内, 正负两极直接起弧, 形成高温高速等离子体射流从炬口喷射出来.

冷等离子体因能量密度不高, 适合气相和液相污染物处理, 例如去除异味、分解挥发性有机物等. 对于固体废物, 尤其是如城市垃圾、医疗废物、卤代烃 POPs、油漆渣和印染污泥等有机固体废物, 需要能量密度更高的低温热等离子体, 可利用炬提供的高温、高活性的高温射流, 将废弃物中有机物彻底分解成含 CO 和 H₂ 等的合成气, 并且有效处理如二噁英 PCDDs、呋喃 PCDFs 和有机卤族化合物等有毒有害物质.

(2) 交流电弧放电

交流电弧放电与直流电弧放电发生器功率相当, 适合于固体废物处理领域. 相比直流电弧放电, 交流电弧放电供电系统更容易, 投资较直流电弧更低, 但交流电弧不如直流电弧稳定, 控制难度更大. 固体废物原料成分复杂, 工作条件苛刻, 对设备稳定

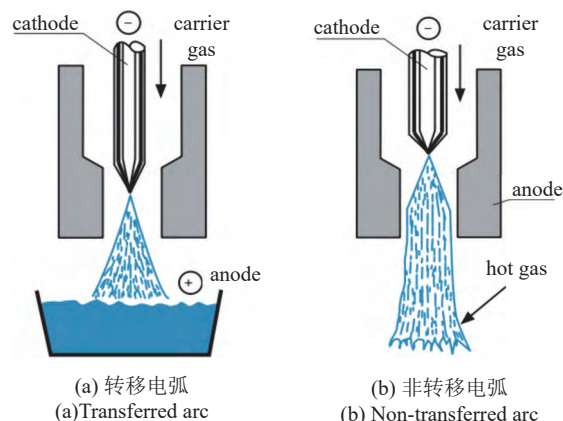


图 2 等离子体炬^[11]

Fig. 2 Plasma torch^[11]

性的需求较高,因此目前在固体废物处理领域,尤其飞灰等离子体熔融处理更多使用直流电弧技术。

(3) 射频电感耦合放电

感应耦合等离子体是给线圈通射频电流,由电流产生交变磁场,从而引起感应电场,在线圈内的通气管道内激发产生等离子体。射频电感耦合等离子体优点包括适应各种反应气氛、无电极消耗及污染、电极寿命长和温度均匀等,缺点是起弧困难和转换效率与功率不高等。目前该技术多应用于检测仪器,如电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)、电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)等,环保领域研究主要集中于甲醛等废气的处理^[13]。

(4) 微波放电

微波是一种介于无线电波和红外辐射之间的电磁波,其可以在谐振腔中形成高频电磁场,从而激发和电离分子,形成等离子体。该技术在半导体和材料加工等多个领域得到应用,在环保领域主要集中在CF₄和三氯乙烯等VOCs废气处理相关研究之中^[14-15]。

综上所述,电弧放电是固体废物处理领域主要的低温热等离子体产生方法。针对不同种类的废物应选择最合适的等离子体发生器。

2 热等离子体处理废物技术历史回顾

2.1 国外等离子体技术发展

采用低温热等离子体处理生活垃圾、医疗废物、卤代烃和印染污泥等有害有机废物时,是将有机物实现无机化的过程,处理电子废物、焚烧飞灰和残渣等含大量重金属的无机废物时,主要是将废物熔融,形成玻璃体加以资源化利用。

在低温热等离子体处理废物技术的发展过程中,美国西屋等离子体公司(Westinghouse Plasma Corp.)的大功率空气等离子体炬较为著名,该公司2007年被加拿大Alter NRG公司收购,Alter NRG又于2015年1月被武汉凯迪收购。美国凤凰公司(Phoenix Solutions Corp.)、瑞典ScanArc和法国Europlasma的等离子体炬也很著名。在废物处理技术方面,加拿大Plasco Energy公司和Pyrogenesis、英国APP和Tetronics、德国Bellwether、美国Retech Systems LLC、Startech和InEnTech等拥有等离子体成套工艺技术,此外日本Takuma(田熊)、三菱、日立造船等在焚烧残渣等离子体熔融应用方面拥有多项业绩。国际典型等离子体项目见表1。

表 1 部分国际典型等离子体项目^[16-23]

Table 1 International typical plasma projects^[16-23]

No.	Project/Customer	Capacity	Feed stock	Location	Data	Technology source
1	Westinghouse Science & Technology Centre	48 t/d	various kind of wastes	Pittsburgh (US)	1984	Westinghouse
2	IHI	60 ~ 80 t/d	MSW incineration ash	Kinuura (JP)	1995	
3	MEPL	72 t/d	hazardous wastes	Pune (IN)	2009	
4	SMSEL	72 t/d	hazardous wastes	Nagpur (IN)	2010	
6	Allied Technology Group, Inc	6 t/d	mixed hazardous waste and radioactive wastes	Washington (US)	1999	InEnTech
7	Asia Pacific Environmental Technologies, Inc	4 t/d	medical waste	Hawaii (US)	2001	
8	Fuji Kaihatsu Ltd	1 t/d	wood and plastic waste	Miyazaki (JP)	2000	Retech
9	Kawasaki Heavy Industries, Ltd.	1 t/d	PCB oil and PCB-contaminated materials	Okinawa (JP)	2003	
12	Global Plasma Technology Limited	4 t/d	medical waste	Kuan Yin (TW)	2004	SIA Radon
13	Zwilag Plasma Plant	200 kg/h	radioactive waste	Würenlingen (CH)	2004	
14	Pluton	250 kg/h	radioactive waste	Moscow (RU)	—	Pyrogenesis
15	Air Force Special Operations Command	3100 t/a	hazardous wastes	Florida(US)	2010	
16	Fiscantieri	50 kg/h	hazardous waste	Viotia (GR)	2004	

续表 1

No.	Project/Customer	Capacity	Feed stock	Location	Data	Technology source
17	BlueOak Ark. Plant	7000 t/a	electronics waste	Osceola (US)	2015	
18	Heesung PM Tech	3500 t/a	spent autocatalyst and industrial catalyst materials	KR	2007	Tetronics
19	German Client	1850 t/a	spent autocatalyst materials	DE	2014	
21	Kolon	15 t/d	MSW incineration fly ash	Yongin (KR)	—	Europlasma
22	CHO Power	82 500 MW·h/a	waste and biomass	Morcenx (FR)	—	
23	Plasma Melting Facility	200 t/a	radioactive waste	Kozloduy (BG)	2018	Belgoprocess
28	Resource Recycling Energy Center	49 t/d	MSW incineration ash	Osaka (JP)	2010	
29	Tokai Village Clean Center	2 × 25 t/d	MSW incineration ash	Ibaraki (JP)	2012	TAKUMA
30	Anan Ecological Park	8 t/d	MSW incineration ash	Tokushima (JP)	2014	
31	Matsumori Factory	80 t/d	MSW incineration ash	Sendai (JP)	2005	
32	Southern Cleaning Center	40 t/d	MSW incineration ash	Fukushima (JP)	2000	Mitsubishi
33	Northern Clearing Factory	30 t/d	MSW incineration ash	Tochigi (JP)	2003	
34	Masuda District Wide Area Clean Center	9.6 t/d	MSW incineration ash	Shimane (JP)	2007	

2.2 国内等离子体技术发展

近年来, 国内相关研究发展很快, 中国天楹异军突起, 在医疗废物、飞灰等危废处理领域取得了丰富成果。

2017 年以前, 国内等离子体固废处理基本处于技术引进以及国产化设备的研发、示范阶段。2004 年中科院力学所等离子体处理废物研究队伍, 基于吴承康院士早年开创的基础, 根据需要解决应用难题, 通过国家基金委和中国科学院立项, 以及自选课题和与企业合作, 开展等离子体废物处理技术的全面基础研究。2010 年, 中国科学院等离子体物理研究所使用 100 kW 等离子体试验平台验证了等离子体飞灰熔融处理工艺的可行性。2013 年, GTS 吉天师公司采用西屋等离子体炬在上海嘉定固废中心建设了 30 t/d 医疗废物 + 飞灰示范项目。2016 年中国天

楹启动了建筑面积达 8000 m² 的全球规模最大的等离子体实验室建设, 构建仿真平台、1 t/d 小试试验系统及配套的分析测试中心, 开展了大量的理论分析、模型构建和试验验证工作。

2017 年以后, 国内等离子体技术研究取得了显著的进步, 等离子体废物处理工程应用项目接连上马, 市场呈现出火热态势。中广核的广东清远 10 t/d 等离子体危废处理示范项目、山东淄博博润的 30 t/d 等离子体气化熔融危废处理项目、光大环保的等离子体垃圾焚烧飞灰熔融处理项目以及中国天楹集团的 40 t/d 等离子体垃圾焚烧飞灰熔融处理项目接连开建, 打开了中国等离子体废物处理技术领域的新篇章。表 2 列出一些国内的典型等离子体项目情况。

表 2 部分国内典型等离子体项目

Table 2 Domestic typical plasma projects

No.	Project	Capacity	Feed stock	Technology	Location	Date	Technology source
1	Shanghai medical waste treatment project	30 t/d	medical waste	plasma torch + gasification and melting	Shanghai	2013	plasma torch from Westinghouse
2	Qingyuan 10 t/d hazardous waste plasma treatment project Dongguan Zhongpu 30 t/d	10 t/d	medical waste	plasma torch + gasification and melting	Qingyuan	2018	
3	comprehensive hazardous waste plasma treatment and disposal project	30 t/d	organic solvents and mineral oil waste	plasma torch + gasification and Melting	Dongguan	2019	China General Nuclear Corporation
4	Wuxi Nengzhihui plasma gasification and melting project	2 × 30 t/d	hazardous waste	rotary kiln + plasma torch + melting	Wuxi	2019	

续表 2

No.	Project	Capacity	Feed stock	Technology	Location	Date	Technology source
5	Hai'an fly ash plasma resource demonstration project	40 t/d	MSW incineration fly ash	electrode + melting	Hai'an	2019	
6	Tongzhouwan fly ash plasma resource project	100 t/d	MSW incineration fly ash	electrode + melting	Tongzhouwan	—	China Tianying
7	Medical waste plasma resource demonstration project	3 t/d	medical waste	plasma torch + gasification and melting	Hai'an	2021	
8	MSW incineration fly ash plasma melting demonstration project	30 t/d	MSW incineration fly ash	electrode + melting	Zhengjiang	2019	China Everbright Environment Group Zhejiang Weibo Environmental Protection Equipment Technology Corporation
9	Liquan hazardous waste disposal project (first-stage)	30 t/d	hazardous waste	plasma torch + gasification and melting	Liquan	—	Xi'an Aerospace Power Engineering
10	Liquan hazardous waste disposal project (second-stage)	100 t/d	hazardous waste	rotary kiln + plasma torch + melting	Liquan	2020	
11	Hazardous waste resource and zero emission disposal research and industrialization project	2 × 100 t/d	MSW incineration fly ash	electrode + melting	Shanghai	—	Tetronics
12	Dongguan Houjie hazardous waste plasma disposal project	30 t/d	MSW incineration fly ash	plasma torch + gasification and melting	Dongguan	—	Eruoplasma

3 热等离子体处理废物技术的基础研究

在基础研究方面,国内外各公司结合项目进行了一定研究,诸如美国乔治亚州立大学等在基础研究方面也取得了许多进展。但是,由于前述国际公司和大学的研究队伍多数基于等离子体发生器技术研发领域,没有系统的废物处理经验和研究积累,所以在等离子体处理废物系统集成方面还存在不少待深入研究的课题。

3.1 中国科学院力学研究所

力学所的等离子体应用研究是在吴承康先生领导下发展的,最初始于航天,后在高温金属(钨、铌)冶炼等领域进行应用基础研究和实践,并扩展到其他非等离子体的工程热物理领域(如燃烧、传热等),在 20 世纪 90 年代后期,又延伸到环保领域,并在化工废料处理方面得到较好的进展,建设了小型设备,用于医疗废物、电子废物、化学战剂和含氯氟危废处理的中试规模工业化设备的研制。

力学所在等离子体处理废物研究方面进行了较为全面的布局:

(1) 炉内温度场、浓度场及流场控制,用还原性气氛控制减少有机氯分解中二噁英、 NO_x 和 SO_x 生成;

(2) 废物中有效成分的回收,反应器内流场控制,将有用物质定向迁移与输送;

(3) 包括前处理的整套处理过程与系统的优化与整体控制技术;

(4) 系统优化设计,提高系统经济性,包括达到能量密度手段降低电耗、加入氧化剂利用有机物热值、利用催化反应降低能耗;

(5) 发展配套的尾气处理系统,等离子体处理的尾气成分一般含有酸性气体,但与燃烧处理的尾气成分差异很大,需优化尾气处理系统参数;

(6) 低成本高效率可靠性等离子体反应器的研制,如石墨坍塌;

(7) 固体残渣形成玻璃体的机理,优化基材配料成分以形成玻璃体,提高玻璃体在自然界中的物理和化学稳定性,降低熔融温度减少能耗,提高玻璃体包容有害成分的能力以减少需填埋的玻璃体总量和熔融能耗,玻璃体再利用的可能等。

这几项研究包括实验研究和数值模拟,内容的确定与进展都与吴承康院士的关怀与指导密不可分,成果在国际上发表后得到专家认可,可作为低温热等离子体处理废物技术发展的指导意见,特别是根据原料化学组分配伍的研究成果,可以采用较少的辅料制备化学性质稳定的玻璃体,减少辅料量和玻璃体渣总量,减少熔融能耗的成果直接用于飞灰处理等工程实践,马上得到效果。

中国科学院力学研究所在 20 世纪 90 年代初就开始废物焚烧和热处理的研究,在交流等离子体用于钨钼等高温金属冶炼技术发展成功后,利用交流氢等离子体设备针对冶金残渣熔融和橡胶中间体等有机废物的分解进行了实验研究,2003 年非典(SARS)期间,提出用等离子体技术处理医疗废物,从

2004 年开始, 开展针对等离子体处理废物的全面研究(研发项目见表 3), 包括有机与无机成分无害化机理, 提高玻璃体对有害元素捕集率(飞灰、化学武器战剂富砷玻璃体等), 改进玻璃体物理化学性质稳定性等基础研究及等离子体发生器和反应器的优化设计. 力学所根据医疗废物、化学品、电子废弃物的物料组成特点, 充分利用等离子体炬和电弧的特性, 控制氧化/还原/中性气氛, 开发两种炉型, 对应 3 条技术路线; 建设了医疗废物、等离子体裂解熔融、等离子体气化三大实验平台(详见表 4), 开展等离子体处理医疗废物、化学武器、持久性有机污染物(POPs)、电子废弃物处理等应用研究.

1945 年日本战败后, 有超过 5 000 吨的化学武器没有妥善处理, 遗留在华, 遍及 14 省数十处, 曾造成多起事故. 日本化学武器战剂的毒剂类型多, 不仅有欧美常用的有机磷类神经毒剂、糜烂性毒剂芥子

气(硫芥、氯芥)、窒息性毒剂光气等, 还有日本参考德国的二苯氯胂研制的二苯胂, 毒性增大了 10 倍. 由于日本遗弃化学武器弹种复杂、规格多、弹体结构复杂, 弹体炸药装量大, 且因日本投降时将化武随意遗弃, 保存条件极差, 弹体锈蚀严重而难于正常拆解, 且弹体敏感度高、易爆炸、污染严重, 因而处理难度很高. 特别由于二苯胂含砷量大, 几乎砷的所有有机化合物和无机化合物均有毒性, 给日本遗弃化武的处理造成很大难题.

中国科学院力学研究所与销毁日本遗弃化武的负责单位合作, 针对日本方面提出的技术方案存在环境后遗症问题, 创新提出“控制引爆 + 还原气氛-砷还原”技术方案, 与防化兵研究院合作进行了窒息性毒气亚当氏气(Adamsite)的等离子体销毁试验, 验证了等离子体销毁化学毒剂的有效性, 并于 2003 年完成 20 kg/h 小型机动式原理性销毁装置.

表 3 中科院力学所团队完成等离子体相关科技项目

Table 3 Plasma related technology projects completed by Institute of Mechanics, CAS

No.	Project	Fund	Agency	Date
1	Experiment of Plasma destruction of Adams gas by plasma metallurgy furnace	Research Institute of Chemical Defence of Chinese People's Liberation Army	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2002
2	Study of combustion characteristics of municipal solid waste	National Natural Science Foundation of China	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	1998—2000
3	Technology and device development of pyrolysis treatment of medical waste via AC plasma	The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2003—2005
4	Study of the plasma pyrolysis treatment of hazardous waste	Chinese Academy of Sciences	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2004—2005
5	The cracking and migration of hazardous substances during the process of plasma pyrolysis	National Natural Science Foundation of China	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2005—2007
6	Plasma waste treatment technology	Chinese Academy of Sciences	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2012—2014
7	Development of solid hazardous waste plasma pyrolysis furnace	Zhonghao Chenguang Chemical Research Institute	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2005—2007
8	30 kW plasma furnace development	Chinese Academy of Sciences	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2007—2009
9	Development of hazardous waste plasma treatment production line	Shenzhen Mikray Environmental Technology Co., Ltd.	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2007—2010
10	Research and development of plasma high temperature metallurgical equipment	Liyun Environmental Technology (Beijing) Co., Ltd	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2012—2015
11	Development of domestic waste plasma gasification furnace for ship	Shanghai Huikai Marine Co., Ltd	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2011—2014

表 4 中科院力学所等离子体相关科研平台

Table 4 Plasma related scientific research platforms of Institute of Mechanics, CAS

No.	Research platform	Agency	Date	Approval agency
1	250 kW three-phase AC plasma arc pyrolysis laboratory with	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2003	Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China
2	30 kW DC plasma arc pyrolysis melting experimental furnace	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2007	Chinese Academy of Sciences
3	Plasma gasifier for ship domestic waste	Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2011	Shanghai Huikai Marine Co., Ltd.

力学所的等离子体热解炉采用交流等离子体弧技术,以还原气氛为核心,实现高温热解.该系统可以处理气体、液体和固体废物,为工业规模的示范系统(3~5 t/d),采用石墨作为电极和炉衬,适合处理含氯、氟等强腐蚀性的 POPs 和 CFCs.力学所开发的等离子体热解处理 POPs 废物技术于 2006 年在四川省自贡市中昊晨光化工研究院建立了我国第一套日处理 3 t/d 等离子体处理化工固体危险废物的工业规模系统.

3.2 中国天楹

2015 年中国天楹启动等离子体技术研发工作,2016 年利用 5 kW 管式炉、30 kW 等离子体炉进行了飞灰熔融特性分析试验,并建成 8000 m² 的等离子体综合实验室,构建仿真平台、1 t/d 电弧熔融试验系统、3 t/d 等离子体气化熔融医疗废物中试系统及配套的分析测试中心,2017 年和 2018 年开展了大量的理论分析、模型构建和试验验证工作,完成等离子体工艺包开发,2019 年建成 40 t/d 海安等离子体飞灰资源化示范工程,目前是全球唯一以纯飞灰为处理对象的等离子体熔融项目.

3.3 中国科学院等离子体物理研究所

中国科学院等离子体物理研究所利用一座 100 kW 直流等离子体熔融炉研究垃圾焚烧飞灰处理工艺,如图 3 所示.炉体由进料系统、石墨坩埚、

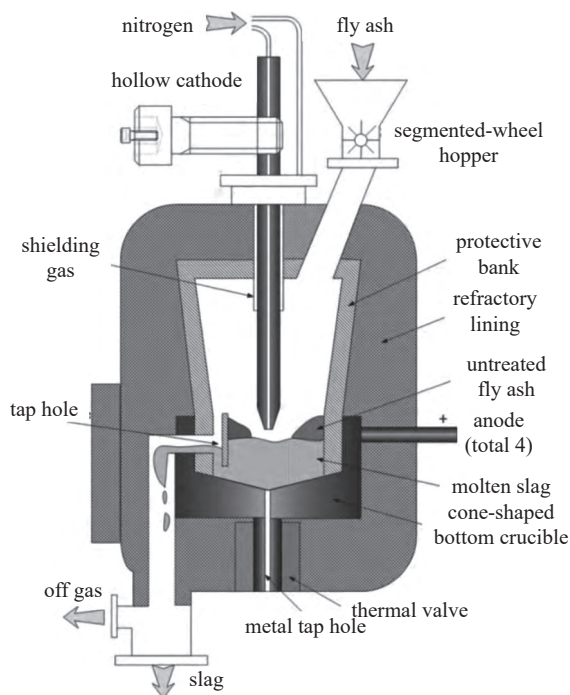


图 3 熔融炉示意图

Fig. 3 Schematic diagram of melting furnace

1 个石墨阴极、4 个石墨阳极、阳极和阴极的水冷系统以及排渣装置等部分组成,等离子体电弧产生的高温将飞灰熔融并将二噁英等有害物分解成小分子,飞灰熔化后从熔融炉排出,并经过水淬形成稳定的玻璃体.在无任何添加剂下,飞灰经热等离子体处理后转变成颗粒状熔渣,体积减小为原始的 1/3,重量减小了 2/3^[24].

3.4 核工业西南物理研究院

核工业西南物理研究院针对低放射性废树脂、石棉等难熔废物,研制了一套 300 kW 等离子体高温焚烧熔融试验台架,如图 4 所示,该试验装置主要由等离子体炬系统、焚烧熔融系统、尾气处理系统和测量控制系统组成.废物在高温等离子体作用下,有机物质分解气化,生成可燃性气体;无机物质被熔化并将放射性核素包裹其中,冷却后形成渗透性极低的玻璃体.通过模拟实验发现,废树脂减容因子大于 50,尾气达到 GB18414—2001 要求,玻璃体强度大于 70 MPa,玻璃体模拟核素浸出率小于 1.0 g/(m²·d)^[25].

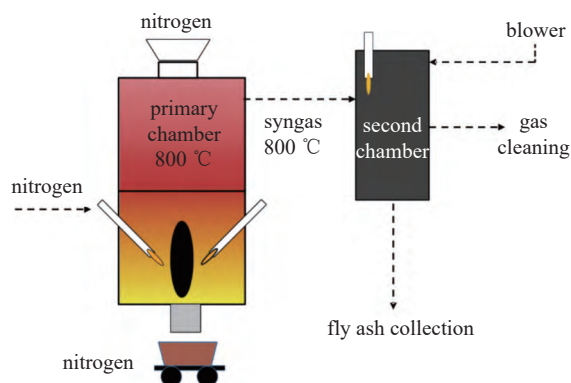


图 4 等离子体焚烧熔融工艺流程图^[25]

Fig. 4 Process flow diagram of plasma incineration^[25]

4 热等离子体处理废物技术的最新进展

废弃物种类繁多,成分也非常复杂.拥有处理范围广、原料适应性强等特点的低温热等离子体技术可以处理绝大多数种类的废弃物,但在处理物理化学性质差异极大的废弃物时,也需要选择合适的工艺技术路线以提高处理效率.图 5 汇总目前废物处理领域应用最广的等离子体处理工艺.本章将从无机类废物处理(飞灰为主)、有机类废物处理以及放射性废物处理 3 个方面介绍热等离子体处理废物技术的最新进展.

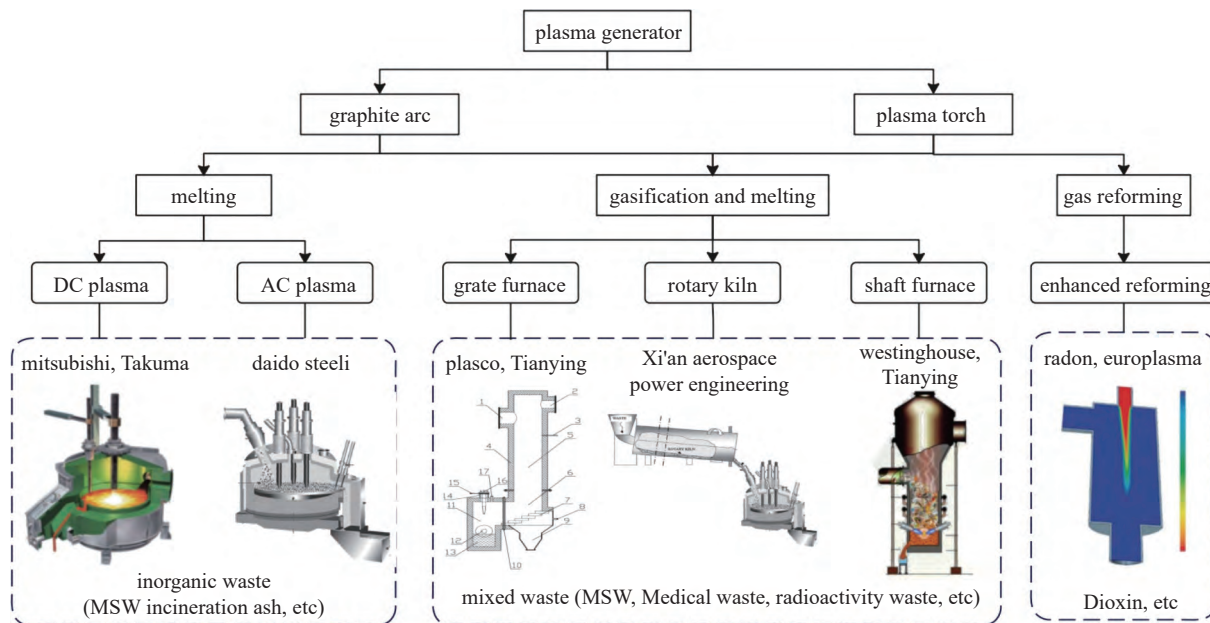


图 5 典型等离子体废物处理技术路线

Fig. 5 Typical technologies for plasma solid waste treatment

4.1 无机类废物等离子体熔融处置及应用进展

国内等离子体熔融处置的无机废物主要以生活垃圾焚烧飞灰和危险废物焚烧底渣为主。焚烧飞灰富含重金属和二噁英类物质,《国家危险废物名录》(2021 版)明确规定其属于危险废物(772-002-18)。现阶段我国飞灰处理主要为螯合固化填埋、水泥窑协同、烧结以及熔融处理技术,这其中填埋是主流方式。螯合固化过程中飞灰是增容的(增加 20%~50%),侵占宝贵土地资源,在人口稠密、经济发达地区难以再建新的填埋场地,且螯合物的长期稳定性有待考验。水泥窑协同处理将增加水泥中的重金属含量,水泥制品服役期满后均会成为建筑废物,飞灰带入的大量重金属无疑将成为未来建筑废物处理和利用的沉重负担^[26],飞灰中较高的氯含量可能使水泥氯含量超标,影响混凝土质量。

等离子体熔融飞灰处理技术通过高温在还原性气氛下彻底分解有机氯,摧毁二噁英,熔化配伍飞灰再急冷形成玻璃体,重金属键结固化于玻璃体中难以浸出,根本上使飞灰无害化。随着技术的不断成熟完善和试点项目的成功运行,等离子体熔融飞灰处理技术逐渐受到国家及社会的关注,并从研发走向工程应用。“等离子体熔融资源化利用技术”入选国家生态环境科技成果转化综合服务平台固废领域应用推广技术和《“无废城市”建设先进适用技术汇编》目录(2019 年第一批、2022 年第二批)。在《国

家先进污染方式技术目录(固体废物和土壤污染防治领域)》(2020 年)中提到等离子体熔融技术能够实现飞灰玻璃化,最终可形成满足建材资源化要求且稳定的玻璃态渣。2019 年国家科技部固废资源化专项 4.7-固废焚烧残余物稳定化无害化处理技术与装备(2019YFC1906900)中也将焚烧残余物高温熔融玻璃化列为其中一项子课题,足见科技部对飞灰熔融处理技术的重视。在标准方面,江苏省市场监督管理局 2019 年 2 月发布国内首项针对生活垃圾飞灰熔融处理的地方标准《生活垃圾焚烧飞灰熔融处理技术规范》(DB32/T3558—2019),2021 年 9 月又发布了《沥青路面用熔融固化体集料通用技术规范》(DB32/T4081—2021),规定了熔融固化体粗集料、细集料用于沥青道路路面的定义、规格、基本技术要求等内容。2021 年底,国家市场监督管理总局和国家标准化委员会联合发布了国家标准《固体废物玻璃化处理产物技术要求》(GB/T41015—2021),从此为飞灰熔融玻璃体的资源化利用奠定了标准依据。2022 年中国标准化研究院、生态环境部固体废物与化学品管理技术中心、中国天楹联合提出的《固体废物焚烧残余物熔融处理技术规范》获得研制立项,其是《固体废物玻璃化处理产物技术要求》(GB/T41015—2021)的延伸,按计划 2024 年完成研制。随着标准逐步完善和运行成本下降,等离子体熔融飞灰处理技术将迎来规模化应用,创造更长

久稳定的环保效益和社会效益。

等离子体飞灰熔融处理技术主要采用石墨电弧(包括直流和交流)和等离子体炬,代表性的公司主要包括中国天楹、光大环保、Tetronics、日本田熊、大同特殊钢株式会社和 Europlasma 等。

4.1.1 石墨电弧熔融

(1) 中国天楹

中国天楹发展了石墨电弧和等离子体炬两种技术,在飞灰熔融方面已完成双电极电弧等离子体成套装备研制,工艺采用配伍造粒成型后入炉,物料被等离子体电弧加热至 $1300\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$,飞灰中含有的二噁英等有毒有害有机物被彻底摧毁,液相熔体经水骤冷后形成稳定化玻璃体,净化后烟气可满足 GB18484—2020 和 EU/75/2010 排放标准;工艺废水经深度净化后蒸发结晶,得到盐类副产物,实现废水近零排放。工艺流程如图 6 所示。

(2) 光大环保

光大环保自 2015 年以来开始飞灰等离子体熔融研究,先后进行了大量的小试试验(500 g/h, 50 kg/h, 500 kg/h),在镇江建设了 30 t/d 飞灰等离子体熔融科研示范项目,采用单电极熔融,底电极从炉子底部穿入的电极(正极)之间,用氮气作为等离子体工艺气体。工艺包括前处理及上料系统、等离子体熔融系统、二燃室和烟气净化系统。飞灰和添加剂配伍后造粒,送入等离子体熔融炉迅速熔融。本项

目采用传统危险废物焚烧干法脱酸工艺,所产生的 30%~40% 二次飞灰仍需进一步处理^[27]。

(3) Tetronics

Tetronics 公司 1964 年成立于英国牛津郡,致力于等离子体的研发和工业项目集成。Tetronics 公司基于其等离子体冶金经验,发展了灰渣等离子体熔融技术,采用单电极,工作过程中电弧由顶部电极转移至飞灰熔体中进行加热熔融,石墨电极功率可达 2.75 MW^[11,28],其技术在日本和上海获得应用。Tetronics 公司等离子体熔融炉如图 7 所示。

2019 年,上海朴玛引进 Tetronics 技术,在上海化学工业区建设 200 t/d 等离子体危废资源再生及趋零排放处置研究及产业化项目,项目拟安装两套等离子体危废处置系统,分别用于处理焚烧处置残渣(30 000 t/a)和表面处理废物及其他废物(30 000 t/a)。等离子体炉烟气经“尾气燃烧室+余热回收及 SNCR 脱硝装置+急冷塔+活性炭喷射+布袋除尘+两级脱酸+烟气冷却脱水+活性炭吸附装置+烟气蒸汽加热器”多级烟气处理系统处理后排放;涉重废水采用除氟+还原+中和+絮凝沉淀+活性炭高效吸附的工艺进行处理进入车间排放口。该项目旨在为等离子体炉运行过程中记录运行数据,为等离子体技术推广积累经验,目前尚在建设中^[29]。

(4) 日本田熊

日本田熊(Takuma)公司拥有等离子体熔融多

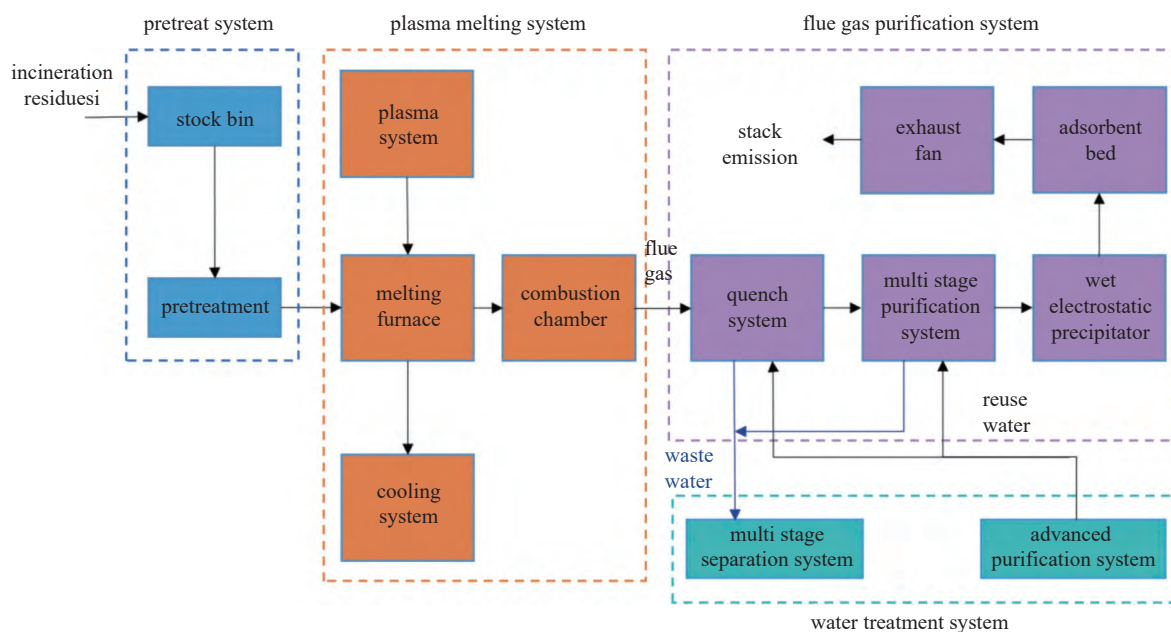


图 6 中国天楹飞灰熔融工艺流程图

Fig. 6 Process flow diagram of CNTY fly ash melting process

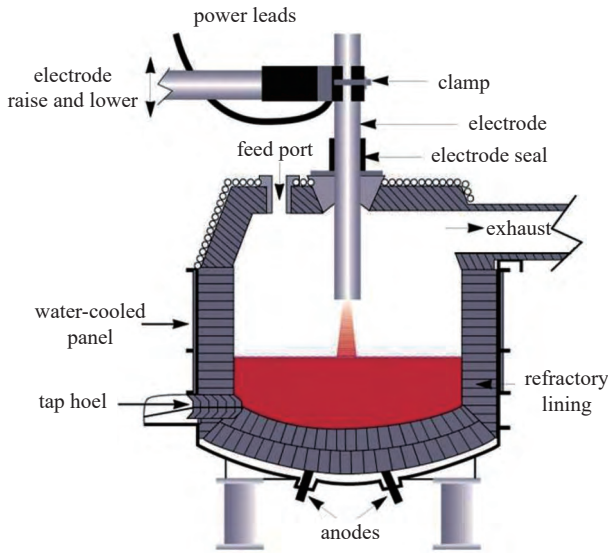


图 7 Tetronics 公司等离子体炉
Fig. 7 Plasma melting furnace of Tetronics

项业绩, 可将垃圾焚烧炉渣与飞灰熔融为可回收利用玻璃体渣. Takuma 公司采用“主副电极 + 底电极”设计, 核心加热是通过主电极和底电极, 副电极布置于靠近出渣口, 提高出渣口处热负荷并增强局部熔渣的流动性, 防止排渣过程中熔渣凝固而导致堵塞. 熔融炉内保持还原性气氛, 熔融炉排出的尾气含有高浓度可燃气体 (CO, H₂) 并在燃烧室中完全燃烧, 高温熔体排出后经水淬形成碎粒状的玻璃态渣, 出渣口通入加热后的氮气, 防止炉气从出渣口逸出 (图 8)^[23].

截止 2019 年, Takuma 公司已在日本建成垃圾焚烧底渣及飞灰熔融处置项目十余个, 具有代表性的项目为 2002 年在北海道建成的 140 t/d 的等离子体飞灰熔融项目以及 2012 年在茨城县建成的 2 × 25 t/d 的等离子体飞灰熔融项目.

(5) 大同特殊钢株式会社

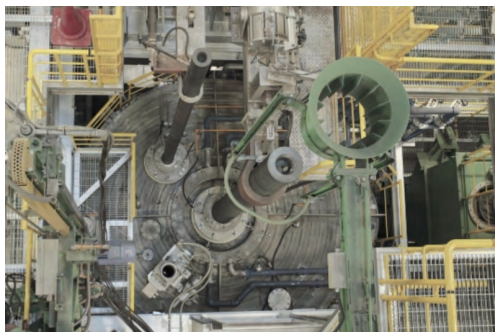


图 8 日本田熊公司等离子体炉^[23]
Fig. 8 Plasma melting furnace of Takuma^[23]

大同特殊钢的飞灰熔融技术源于工业炉窑冶炼特殊钢技术, 其采用交流电弧技术, 自 1978 年开始研发, 发展了世界上第一个“电弧熔炼”的城市生活垃圾焚烧灰渣熔融系统“DAP”. 1991 年, 在日本大宫市建成 2 × 250 t/d 的电弧灰熔融炉^[30].

4.1.2 等离子体炬熔融

(1) Europlasma

法国 Europlasma 的等离子体技术从航天发展而来, 重点发展了等离子体炬技术, 以及熔融炉和气化炉装备. 1992 年, 在法国莫桑克斯建成废石棉等离子体炬熔融, 1996 ~ 2007 年在法国瑟农建成了 10 t/d 飞灰等离子体熔融系统, 并展开了长期的试验性运行, 随后在日本和韩国获得多处应用, 2017 年被引入中国, 在东莞厚街建成了 30 t/d 飞灰等离子体熔融系统.

Europlasma 在法国瑟农的飞灰等离子体炬熔融炉如图 9 所示, 等离子体炬功率为 500 kW, 以空气作为工作气体, 利用高温等离子体射流加热熔融飞灰, 处理能力 10 t/d, 能耗约 1300 kWh/t^[11, 31].

(2) 美国凤凰公司

美国凤凰公司 (Phoenix Solutions Corp.) 成立于 1952 年, 曾用名 FluiDyne Engineering Corp. 该公司一直致力于航空航天的前沿研究. 1993 年, FluiDyne 重组为 Phoenix Solutions Co, 并成为等离子加热系统领域的参与者之一, 其炬产品在全球范围内获得应用, 尤其在日本灰渣熔融方面业绩较多, 用户包括川崎重工、荏原和神户制钢等^[11], 具体项目包括川崎重工千叶市 36 t/d 灰渣熔融 (2002 年) 和荏原米

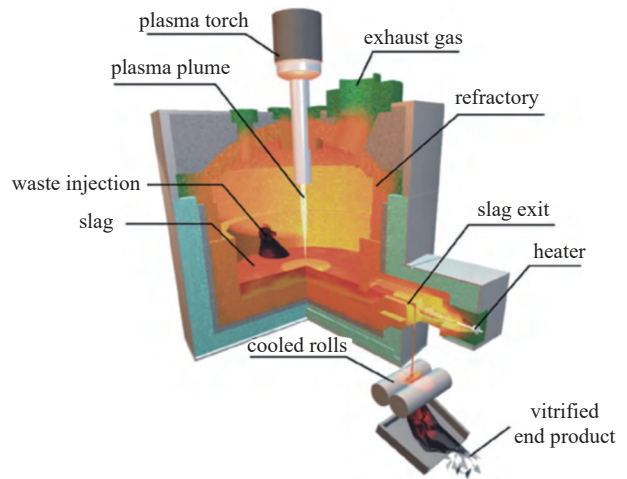


图 9 Europlasma 公司等离子体炉
Fig. 9 Plasma melting furnace of Europlasma

子市 30 t/d 灰渣熔融 (2002 年) 等。

4.2 有机类废物等离子体气化处理及应用进展

医疗废物、污泥、工业有机危险废物等通常通过焚烧进行减容无害化处置, 但是焚烧产生的大约 20% ~ 30% 的炉渣和飞灰仍属于危险废物, 需要安全填埋最终处置。因此, 需要通常使用等离子体气化熔融技术可将有机废物在等离子体提供的极高温度条件下, 高效转化为合成气与无机玻璃体渣, 实现有机废物的无害化、资源化利用^[32]。

(1) 等离子体竖炉气化熔融

等离子体气化熔融较为经典的炉型是竖炉, 最具代表性的是美国西屋等离子体公司, 国内吉天师能源科技、中广核、中国天楹和西安航天源动力等公司的竖炉炉型。美国西屋等离子体公司 2000 年前后在日本、印度、美国等地建造多座生活垃圾和危险废物等离子体处理工厂, 其中印度普恩建造的危险废物处理工厂是全球首例等离子体危险废物熔融处理项目, 于 2009 年成功运行^[33-34]。2013 年, 上海市固废处置中心与吉天师能源科技 (上海) 有限公司引进西屋等离子体炬建造了国内首套 30 t/d 的医疗废物和飞灰等离子体气化熔融处理示范项目。2020 年, 中国天楹在海安市建造了 2 t/d 医疗废物等离子体气化熔融示范项目, 并实现长周期连续运行。

等离子体竖炉主要包括气化熔融炉和等离子体炬系统。物料在炉内自上而下经历干燥段、热解段、还原段、氧化段和熔融段后形成无机熔渣排入气化熔融炉, 物料中有机物则在等离子体形成的高温中裂解与氧化形成 CO、H₂ 等合成气从炉体上部进入后处理系统。气化熔融竖炉结构相对简单, 有毒污染物在等离子体形成的 1200 °C ~ 1600 °C 高温中彻底分解, 产生的可燃合成气, 净化后可制氢或通过内燃机/燃气轮机发电, 无机熔渣形成的玻璃体则可作为建材利用, 实现废物的无害化、资源化利用。但同时, 由于气化熔融竖炉结构简单, 干燥段、热解段、还原段、氧化段和熔融段均在竖炉中完成, 反应过程控制难度高, 工况波动较大。

(2) 回转窑 + 熔融炉等离子体气化熔融

目前危险废物领域最为成熟的焚烧处理技术是回转窑焚烧。为解决焚烧残渣问题, 西安航天源动力开发了与回转窑在线结合的等离子体熔融炉, 旨在除去未燃尽炭及有机物, 并将无机成分熔融形成玻

璃体, 烟气并入回转窑烟气处理系统之中^[35-36]。

该技术涉及回转窑焚烧和等离子体熔融两个系统的工艺耦合, 极大增加了回转窑焚烧配伍 (灰分) 和运行控制难度, 玻璃体产品性能不稳定、系统整体稳定性不足影响回转窑焚烧生产等问题。

(3) 竖炉 + 炉排 + 熔融炉等离子体气化熔融

传统的竖炉在一个反应器内发生干燥、热解、气化、氧化和熔融多个过程, 传热传质复杂, 工艺稳定控制难度高。通过对上述反应过程进行解耦, 实现对干燥、热解、气化、氧化和熔融精细控制, 提高系统稳定性, 降低污染物排放, 降低能耗。中国天楹提出竖炉 + 炉排 + 熔融炉等离子体气化熔融技术。将该竖炉气化熔融中的干燥段、热解段、还原段、氧化段和熔融段分解在竖炉、炉排和熔融炉 3 段中进行, 物料进入竖炉后经历干燥段、热解段和还原段后在炉排上与空气接触进行氧化反应, 反应残渣随后由炉排排入熔融炉中由等离子体加热分解残余有机物并将无机物熔为熔渣^[37]。相较于单一的竖炉, 该炉型通过解耦, 使熔融炉相对独立, 熔融炉高度低于竖炉, 石墨电弧或等离子体炬均可使用。

竖炉 + 炉排 + 熔融炉等离子体气化熔融技术拥有以下优势: (1) 将气化熔融的 5 段反应区解耦在 3 个反应区进行, 减少了不同反应段之间的影响, 提高了系统稳定性; (2) 便于更精确控制各反应段, 有利于降低能耗; (3) 污染物排放低。但同时, 由于该技术采用炉排结构增加系统的复杂性, 导致建造和维护成本较高。

4.3 放射性废物等离子体处置及应用进展

碳达峰、碳中和将促使能源体系向绿色低碳转型, 核电作为零碳排放的电能源类型, 在我国能源结构中具有不可替代的作用。核电站运行及退役过程中会产生大量的放射性废物 (以低放为主), 放射性废物的安全处置对于支撑整个核电发展战略具有重要的实际意义。

放射性废物传统的处置方式为压缩、超级压缩、水泥固定预处理后填埋。放射性废物处理技术主要有热泵技术、等离子体/热解焚烧、蒸汽重整、超临界水氧化、催化电化学和高级氧化等技术。热泵、超临界水氧化等仅适用于废水、废液、树脂等有限类型废物。蒸汽重整、焚烧等热处理技术虽然可以实现相对高减容比 (只适用于有机类废

物), 但是处理废物类型有限, 且处理后灰渣稳定性低, 仍需水泥固定增容后进行最终处置. 亟需高减容比、先进环保的热处理技术.

根据国际原子能机构 (IAEA) 于 2006 年颁布的放射性废物处理技术报告, 等离子体技术适用于所有类型中低放射性废物处理 (包括可燃废物和不可燃废物), 对原料预处理要求低, 具有无害化更彻底、减容化程度高、熔融玻璃体稳定和占地面积小等特点^[38].

等离子体技术在国际上广泛应用于放射性废物的处理, 2000 年以来美国、法国、德国、日本和俄罗斯等国家建设多座等离子体放射性废物处理厂, 证明了等离子体技术处理放射性废物的技术和商业可行性.

等离子体处理放射性废物的炉型可分为 3 类, 分别为等离子体离心熔融炉、等离子体竖炉和等离子体倾倒式熔融炉, 上述 3 种炉型详细对比见表 5.

(1) 等离子体离心熔融炉

等离子体离心熔融炉典型应用案例是瑞士 Zwiilag 项目 (技术来源: 美国 PACT), 处理能力 200 ~ 300 kg/h, 本项目工艺路线为“等离子体离心熔融炉 +

二燃室 + 余热锅炉 + 冷却塔 + 酸洗塔 + 湿电除尘 + 烟气再热 + 高效过滤器 + 碱洗塔 + 烟气再热 + SCR”, 本项目优点为采用整桶进料, 降低对预处理的要求, 但采用离心熔融炉可靠性差, 出渣口易堵塞, 且含核素废水处理难度高^[39].

(2) 等离子体竖炉气化熔融炉

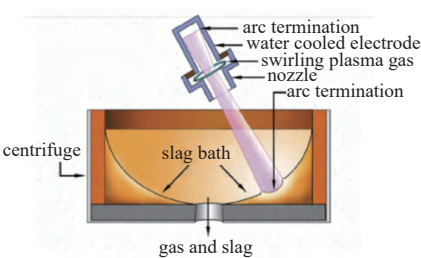
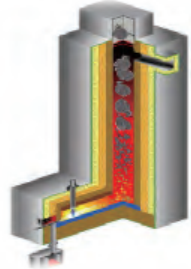

等离子体竖炉气化熔融炉典型应用案例是俄罗斯核电站项目 250 kg/h (技术来源: 俄罗斯 RADON), 本炉型与危险废物等离子体竖炉气化熔融炉类似, 工艺路线为: “等离子体竖炉气化熔融 + 二燃室 (等离子体增强焚烧) + 急冷塔 + 布袋除尘 + 洗涤塔 + 冷冻除水 + 烟气再热 + 高效过滤器”. 本炉型的优点为能量利用效率高, 缺点为需要复杂的预处理分拣、系统进行打包进料处理, 增加了工作人员风险; 熔融炉对金属含量接受度低、出渣口易损坏和堵塞; 采用先脱湿法酸后脱核素烟气净化工艺, 含核素废水处理难度大; 烟气净化无 SCR 脱硝, NO_x 排放存在超标风险^[40].

(3) 等离子体倾倒式熔融炉

等离子体倾倒式熔融炉最先由保加利亚核电站

表 5 典型的中低放射性废物等离子体炉型

Table 5 Typical plasma furnaces dealing with low- and medium-level radioactive waste

Parameter	Zwiilag	SIA RADON	Kozloduy
type	centrifugal rotary melting furnace	shaft melting furnace	dumping melting furnace
furnace structure			
capacity	200 kg/h for combustible waste or 300 kg/h for inorganic waste	250 kg/h	65 kg/h
operation data	2004	2002	2018
feed stock	mixed waste (organic & inorganic)	mixed waste (organic & inorganic)	mixed waste (organic & inorganic)
feeding method	whole 200 L-drum	package	200 L-drum with crushing pretreatment
plasma torch	1.2 MWPC	2 × 150 kW	500 kW Europlasma
flue gas purification	waste heat boiler + quench tower + acid pickling tower + wet electrostatic precipitator + flue gas reheat + HEPA filter + alkali washing tower + flue gas reheat + SCR	quenching tower + bag filter + scrubbing tower + freezing water removal + flue gas reheat + HEPA filter	waste heat boiler + bag filter + HEPA filter + scrubbing tower + flue gas reheat + SCR
emission standard	EU 2000/76/EC	—	EU 2000/76/EC

应用(技术来源:比利时 Belgoprocess),处理能力 65 kg/h, Belgoprocess 在项目设计、建设、实施过程中充分借鉴其多年放射性废物焚烧炉、烟气净化工程经验和 Zwilag 等离子体离心熔融炉经验教训,采用“桶装进料+等离子体倾倒式熔融炉+二燃室+余热锅炉+布袋除尘+高效过滤器+洗涤塔+烟气再热+SCR 脱硝”工艺.该炉型可以接受整桶或整桶破碎进料,采用倾倒式间歇出渣,等离子体炬装机功率 500 kW,该炉型对物料适应性高,设备可靠性高;烟气净化采用余热锅炉+除尘,先除核素后湿法脱酸工艺,废水处理系统不含核素,工艺简单.缺点是倾倒式机械结构复杂,熔融炉能耗高^[41].

中国天楹利用医疗废物等离子体气化熔融系统,模拟中低放射性废物对玻璃体配方、耐火材料等开展了试验研究,并在此基础上完成工艺包开发.

5 存在的问题和解决建议

低温热等离子体处理废物技术能够实现固体废物的无害化、资源化利用,具有长久稳定的环保效益和社会效益,目前发展中还存在如下问题.

(1) 核心技术尚未完全突破.低温热等离子体技术的核心装备之一是等离子体发生器,国内有单位掌握了 100~300 kW 等离子体炬技术,但 2 MW 级别的大功率炬还在开发当中,需假以时日攻克;另一核心装备等离子体炉,目前还缺少成熟的大吨位炉型,熔池接触部位尤其是气液交界面渣线的耐材寿命还很有限,需要长周期研发逐步延长寿命和单炉处理能力.

(2) 应用基础研究有待加强.等离子体处理废物的物理化学和流动传热过程非常复杂,目前关于炉内的传热传质与化学反应流动研究较少,熔体与耐火材料相互作用和侵蚀机理研究不足,现有研究成果尚不能满足等离子体炉设计需要,亟需高校科研院所与工业界联合开展相关应用基础研究,以从顶层指导等离子体工艺与炉体的创新开发与优化设计.

(3) 投资运行成本仍然较高.等离子体技术整体设备成本和运行成本较高^[42],用来处理常规方法难以很好解决的遗弃化学武器、中低放射性废物和高毒高含卤素化工废物等是经济可行的,在处理飞灰、医疗废物等方面已经证明技术可行性,但仍需要继续推动技术进步降低运行成本,以与竞争性技术取得综合优势.

为解决低温热等离子体处理废物技术面临问题及促进其未来发展,提出如下建议.

(1) 践行技术科学思想,构建产学研用一体的技术攻关力量,突破卡脖子关键技术瓶颈,包括大功率等离子体炬、低能耗等离子体炉、高功率高效率 IGBT 电源、抗侵蚀耐高温长寿命耐火材料、智能监测与自动控制等,实现系统能够长期连续稳定安全环保的运行,推动整体工艺及核心装备的技术成熟度达到 TRL9.

(2) 研制相关配套标准,促进技术专利化、专利标准化、标准产业化,尤其是要制订能够发挥等离子体技术优势的技术规范,避免简单套用现行的焚烧标准,同时推动升级相关标准,使之能够引领行业技术进步,更好地响应国家生态文明发展战略需要.特别地,要加强生活垃圾焚烧飞灰资源化技术及其产物的环境风险评估和评价标准研究,确保飞灰是在真正无害化前提下的资源化,其资源化产物在被利用的全生命周期内对生态环境都是安全的,重金属等有害物质不会大量释放到自然环境之中,通过建立环境风险评估和评价准则,能够评价不同工艺对生态环境负责的程度,便于甄别和推广.

(3) 统筹规划建设项目,科学匹配废物代谢和能量供给,创造合理的项目边界条件,既能发挥等离子体技术长处,又能经济运行.在废物代谢方面,可利用等离子体反应活性以及高温特性,协同处理多种类型废物,加以优化配伍,在达到节省物料、节能降耗和开源创收三重目的,如飞灰可与废活性炭、高含硅危险废物和化工废盐等协同;在能量供给方面,等离子体技术主要能量消耗是电能和蒸汽,项目可规划在能源容易获取的地方,尤其是对于飞灰熔融项目,可紧挨生活垃圾焚烧厂乃至作为配套车间建设,大幅降低项目投资和运营成本.

(4) 出台配套支持政策,鼓励等离子体技术发展,包括在税收、财政、绿色基金和绿色债券等方面予以支持.

6 总结

等离子体熔融技术对固体废物的处理应用十分广泛,可以用于各种类型的有机、无机废物的无害化、资源化利用,其环保安全性和资源化优势能够实现更长久稳定的环保效益和社会效益.

等离子体废物处理技术在国外已经取得了应

用, 国内虽然起步较晚, 但近年来也取得了长足进步, 中国天楹、中广核等公司均在致力于等离子体技术开发和产业化应用, 技术成熟度到了商业化应用程度. 但也应认识到, 目前等离子体项目的投资和运行成本仍然偏高, 对于中低放射性废物、遗弃化学武器等难以处理的特种废物而言不是瓶颈, 但对飞灰、生活垃圾等来说, 仍需依靠综合的技术经济性获取竞争优势.

当前我国生态文明建设进入新阶段, 建设美丽中国被摆在强国建设、民族复兴的突出位置. 随着环保标准的提高以及等离子体技术进步和规模化发展, 等离子体项目投资和运行成本将会下降. 此外, 我国提出 2030 年碳达峰、2060 年碳中和, 在此宏伟目标下大力发展风光新能源和核电, 新能源装机大规模增长, 随着新型电力系统的构建完成, 未来绿电成为主流, 电价会逐步下降, 叠加能耗双控向碳排放双控转变新要求, 等离子体技术以绿电为能量来源, 也将迎来历史性的发展机遇.

参 考 文 献

- 1 Sauve G, Acker KV. The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: A life cycle assessment of proper reference cases to support decision making. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110216
- 2 Lin ZZ, Wang Z, Hu Y, et al. Mechanical properties of cement-solidified oily sludge. *Environmental Engineering Science*, 2017, 34(8): 607-615
- 3 Zhang J, Zhang S, Liu B. Degradation technologies and mechanisms of dioxins in municipal solid waste incineration fly ash: A review. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 119507
- 4 Lim SL, Lee LH, Wu TY. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 111: 262-278
- 5 孟月东, 钟少锋, 熊新阳. 低温等离子体技术应用研究进展. *物理*, 2006, 35(2): 7 (Meng Yuedong, Zhong Shaofeng, Xiong Xinyang. Advances in applied low-temperature plasma technology. *Physics*, 2006, 35(2): 7 (in Chinese))
- 6 Dobsław C, Glocker B. Plasma technology and its relevance in waste air and waste gas treatment. *Sustainability*, 2020, 12(21): 8981
- 7 Schiavon M, Torretta V, et al. Non-thermal plasma as an innovative option for the abatement of volatile organic compounds: A review. *Water Air Soil Pollut.*, 2017, 288: 1-20
- 8 李平, 张君, 魏晓峰. 等离子体光学的研究现状与发展前景. *强激光与粒子束*, 2020, 32(1): 11 (Li Ping, Zhang Jun, Wei Xiaofeng. Plasma optics technologies: State of the art and future perspective. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(1): 11 (in Chinese))
- 9 杜长明. 等离子体处理固体废物技术. 北京: 化学工业出版社, 2017 (Du Changming. Plasma Technology for Solid Waste Treatment. Beijing: Chemical Industry Press, 2017 (in Chinese))
- 10 Gomez D, Amutha R, et al. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2): 614-626
- 11 Joachim H, Anthony BM. Thermal plasma waste treatment. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(5): 053001
- 12 Bonizzoni G, Vasallo E. Source: Plasma physics and technology industrial applications. *Vacuum*, 2002, 64(3-4): 327-336
- 13 熊举坤. 感应耦合放电等离子体治理甲醛的实验研究. [博士论文]. 广州: 广东工业大学 (Xiong Jukun. Experimental study of treatment of formaldehyde by RF discharge. [PhD Thesis]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011 (in Chinese))
- 14 李瑞娜. 常压下微波等离子体去除三氯乙烯的研究. [硕士论文]. 大连: 大连海事大学, 2011 (Li Ruina. Investigation of trichloroethylene treatment by atmospheric microwave plasma. [Master Thesis]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011 (in Chinese))
- 15 柴清志. 常压微波驻波放电等离子体降解 CF₄ 的研究. [硕士论文]. 大连: 大连海事大学, 2021 (Cai Qingzhi. Degradation of CF₄ by microwave standing wave plasma at atmospheric pressure. [Master Thesis]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011 (in Chinese))
- 16 Byun Y, Cho M, Hwang SM, et al. Thermal plasma gasification of municipal solid waste (MSW)//Gasification for Practical Applications, Yun Yongseung ed., 2012
- 17 Fabry F, Rehmet C, Rohani V, et al. Waste gasification by thermal plasma: a review. *Waste and Biomass Valorization*, 2013, 4: 421-439
- 18 Tendler M, Rutberg P, Van Oost G. Plasma based waste treatment and energy production. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2005, 47(5A): A219
- 19 Ducharme C. Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes. [PhD Thesis]. Earth Engineering Center, Columbia University, 2010
- 20 Prado ESP, Miranda FS, de Araujo LG, et al. Thermal plasma technology for radioactive waste treatment: A review. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2020, 325: 331-342
- 21 Heep W. The ZWILAG interim storage plasma plant: technology to handle operational waste from nuclear plants//International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation. 2007: 1173-1178
- 22 Lifanov FA, Sobolev IA, Dmitriev SA, et al. Vitrification of low and intermediate level waste: Technology and glass performance//Proc. WM'04 Conference, 2004: 10
- 23 管子豪, 丁银贵, 刘风华等. 日本生活垃圾焚烧灰渣处理技术现状及趋势. *中国资源综合利用*, 2022, 2: 040 (Guan Zihao, Ding Yingui, Liu Fenghua, et al. Current situation and trend of domestic waste incineration ash treatment technology in Japan. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 2: 040 (in Chinese))
- 24 Zhao P, Ni R, Jiang R, et al. Destruction of inorganic municipal solid waste incinerator fly ash in a DC arc plasma furnace. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1-3): 580-585
- 25 程昌明, 童洪辉, 兰伟等. 模拟放射性废树脂热等离子体处理系统设计及试验分析. *高电压技术*, 2013, 39(7): 1584-1589 (Cheng Changming, Tong Honghui, Lan Wei, et al. Design and experimental analysis of thermal plasma processing system for simulative radioactive resin waste. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(7): 1584-1589 (in Chinese))
- 26 Yang Z, Tang S, Zhang Z, et al. Characterization of PM 10 surrounding a cement plant with integrated facilities for co-processing of hazardous wastes. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186:

- 831-839
- 27 胡明, 虎训, 徐鹏程. 垃圾焚烧飞灰等离子熔融过程中二噁英的控制技术. *工业加热*, 2022, 51(11): 54-58 (Hu Ming, Hu Xu, Xu Pengcheng. Control technology of dioxin in plasma vitrification process of waste incineration fly ash. *Industrial Heating*, 2022, 51(11): 54-58 (in Chinese))
- 28 Deegan DE, Chapman CD, Bowen C. The production of shaped glassceramic materials from inorganic waste precursors using controlled atmospheric DC plasma vitrification and crystallisation. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2003, 7(3): 367-372
- 29 Rani DA, Gomez E, Boccaccini AR, et al. Plasma treatment of air pollution control residues. *Waste Management*, 2008, 28(7): 1254-1262
- 30 李润东. 城市垃圾焚烧飞灰熔融过程的机理研究. [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2002 (Li Rundong. Study on the mechanism of melting process of municipal solid waste incineration fly ash. [PhD Thesis]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002 (in Chinese))
- 31 Park HS, Kim SJ. Analysis of a plasma melting system for incinerated ash. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2005, 11(5): 657-665
- 32 孙成伟, 沈洁, 任雪梅等. 等离子气化技术用于固体废物处理的研究进展. *物理学报*, 2021, 70(9): 14 (Sun Chengwei, Shen Jie, Ren Xuemei, et al. Research progress of plasma gasification technology for solid waste treatment. *Acta Phys Sin*, 2021, 70(9): 14 (in Chinese))
- 33 Gandhi H. Plasma gasification: from a dirty city to a heavenly place and from waste solids to clean fuel. *Int J Innov Res Sci Technol*, 2015, 1: 18-24
- 34 Willis KP, Osada S, Willerton KL. Plasma Gasification: Lessons learned at eco-valley WTE facility//*North American Waste-to-Energy Conference*. 2010, 43932: 133-140
- 35 周云端, 胡安宝, 王东东等. 基于热解和等离子熔融多工艺协同危险废物处置技术研究和应用. *环境科技*, 2021, 34(6): 45-48 (Zhou Yunduan, Hu Anbao, Wang Dongdong, et al. Study and application on multiprocess synergy disposal of hazardous waste based on pyrolysis and plasma melting technology. *Environmental Science and Technology*, 2021, 34(6): 45-48 (in Chinese))
- 36 张春飞, 周云端, 刘丹等. 多工艺协同危险废物处置技术运行实例及经济性分析. *环境科技*, 2022, 35(2): 42-46 (Zhang Chunfei, Zhou Yunduan, Liu Dan, et al. Study and application on multiprocess synergy disposal of hazardous waste based on pyrolysis and plasma melting technology. *Environmental Science and Technology*, 2022, 35(2): 42-46 (in Chinese))
- 37 刘国梁, 杨帆, 杨华等. 固体废物玻璃化处理产物标准化思考与建议. *环境与可持续发展*, 2021, 46(5): 128-139 (Liu Guoliang, Yang Fan, Yang Hua, et al. Thoughts and suggestions on the standardization of solid waste vitrification products. *Environment and Sustainable Development*, 2021, 46(5): 128-139 (in Chinese))
- 38 IAEA. Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste. Viena: IAEA. 2006: 6-7
- 39 Heep W. The ZWILAG plasma facility “five years of successful operation”//*International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation*. 2010, 54525: 141-147
- 40 Sobolev IA, Dmitriev SA, Lifanov FA, et al. High temperature treatment of intermediate-level radioactive wastes-sia radon experience//*WM2003 Conference*, February 23-27, 2003
- 41 Jan D. The innovative plasma tilting furnace for industrial treatment of radioactive waste//*WM2014 Conference*, March 2-6, 2014
- 42 Li J, Liu K, Yan S, et al. Application of thermal plasma technology for the treatment of solid wastes in China: An overview. *Waste Management*, 2016, 58: 260-269