

城市固废垃圾热解气化制氢技术研究及进展

程健¹, 宫玉柱², 李维虎², 李丹丹³, 陶文娟²

¹西安热工研究院有限公司, 陕西 西安

²华能山东发电有限公司众泰电厂, 山东 泰安

³新泰光大环保能源有限公司, 山东 泰安

收稿日期: 2024年4月17日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

热解气化技术是利用缺氧、高温、气化等方法将固废垃圾资源进行减量无害化的处理技术。本文阐明了垃圾热解气化制氢的基本原理和特性指标, 以及热解气化过程中物料的热值粒径、含水率和温度、气化剂、灰熔点等对垃圾气化制氢的影响规律; 重点介绍了垃圾气化热解气化-焚烧、热解气化-熔融两种热解气化工艺; 指出了垃圾热解气化制氢技术在减碳降碳、经济性方面的优势, 并对固废垃圾制氢的应用前景进行了展望。垃圾热解气化将成为未来生活垃圾处理及氢能领域新的发展方向。

关键词

固废垃圾, 热解气化, 制氢

Research and Progress on Hydrogen Production Technology through Pyrolysis Gasification of Urban Solid Waste

Jian Cheng¹, Yuzhu Gong², Weihu Li², Dandan Li³, Wenjuan Tao²

¹Xi'an Thermal Power Institute Research Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Zhongtai Power Plant, Shandong Power Generation Co., Ltd. Huaneng Group, Tai'an Shandong

³Xintai Guangda Environmental Protection Energy Co., Ltd., Tai'an Shandong

Received: Apr. 17th, 2024; accepted: May 24th, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

Thermal decomposition and gasification technology is considered one of the most promising

文章引用: 程健, 宫玉柱, 李维虎, 李丹丹, 陶文娟. 城市固废垃圾热解气化制氢技术研究及进展[J]. 化学工程与技术, 2024, 14(3): 211-221. DOI: 10.12677/hjct.2024.143023

technologies for solid waste resource utilization, reduction, and harmless treatment. This review summarizes the basic principle and characteristic indicators of hydrogen production through garbage pyrolysis gasification, as well as the influence of the calorific value and particle size, moisture content and temperature of react, gasification agents, ash melting point, etc. On the hydrogen production through garbage gasification during the pyrolysis gasification process; Then, two typical waste gasification methods are introduced systematically, including the gasification incineration method and the gasification melting method. Finally, the advantages waste pyrolysis gasification technology in carbon reduction and economic efficiency are pointed out, and the application prospects of hydrogen production from solid waste are discussed. The pyrolysis and gasification of waste will become a new development direction in the field of domestic waste treatment and hydrogen energy in the future.

Keywords

Solid Waste, Thermal Decomposition and Gasification, Hydrogen Production

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市固废生活垃圾是一种可再生资源，具有较高的利用价值，但目前城市生活垃圾以焚烧和填埋为主，资源化利用较低。焚烧尽管可以实现固废垃圾的减量化，但仍存在二次污染。垃圾焚烧发电站均配备尾气处理、飞灰处理设备，活性炭吸附的二噁英重金属需要螯合填埋，造成二次污染。垃圾热解气化技术在贫氧高温条件下可以生成含氢、甲烷、一氧化碳等成分的高品质合成气，贫氧还原条件可有效遏制二噁英的生成和氮氧化物的排放，被认为是具有良好发展潜力的城市固废生活垃圾处理技术[1]。

近年来，固废垃圾热解气化制氢以其低碳环保优势获得广泛关注[2]。我国的《氢能产业发展中长期规划(2021~2035年)》提出，到2035年形成氢能多元应用生态。利用城市生活垃圾中的生物质能制氢符合“双碳”目标要求，另一方面能够助推垃圾处理减量化、资源化、无害化，缓解局部资源短缺导致的制氢瓶颈[3]。

20世纪90年代，美国、日本、英国、加拿大等发达国家就开始了城市固废生活垃圾热解气化制氢技术的研究。国内在固废垃圾处理主要集中在焚烧处置方式，在制氢方面的研究主要集中在餐厨垃圾厌氧发酵、超临界水气化制氢、生物质热解制氢等领域，缺乏综合性的热解气化制氢示范项目。本文对城市生活垃圾作为原料制备氢气的技术研究进展进行了梳理总结，明确了温度和含水率、气化介质、灰熔点等对制氢产率和气化设备的影响，并对热解气化以及制氢技术的研究进展进行了综述，能够为我国固废垃圾热解制氢技术创新和产业发展提供参考依据。

2. 城市固废垃圾的资源化属性及气化特点

2.1. 城市固废垃圾的资源化特性

城市固废和生活垃圾里蕴含着巨大的资源潜力。统计结果表明，随着生活水平的不断提高，我国城市固废生活垃圾中的高热值可燃物的比例在逐年增加，大大高于垃圾焚烧炉的最低设计热值水平，北方地区如山东和河南的垃圾热值分别为5983 kJ/kg和6259 kJ/kg，南方地区如广东、江苏和浙江的垃圾热值

范围为 7400 kJ/kg~8000 kJ/kg。城市混合生活垃圾中含有大量可以回收利用的饮料瓶、金属、纸皮等可再生资源, 均可回收处理再利用; 以厨余垃圾为主的易腐垃圾含量占比高达 40%~60%, 可作为生物质能源进行利用; 其中占比最大的为高热值可燃物, 可通过分选制备成为“可替代燃料(RDF/SRF)”以减少燃煤使用、节约能源。“可替代燃料(RDF/SRF)”作为城市垃圾减量化、无害化、资源化的崭新途径, 其燃烧效率和化石燃料相近, 但碳排放量更低(表 1), 而且绿色环保、物美价廉。

Table 1. Comparison of calorific value and CO₂ emissions between alternative fuels (RDF/SRF) and fossil fuels
表 1. 可替代燃料(RDF/SRF)和化石燃料的热值和 CO₂ 排放对比

燃料	热值(MJ/kg)	二氧化碳排放系数(产生 CO ₂ t/燃料 t)
煤炭	25	2.41
石油焦	33	3.34
燃油	42	3.16
RDF	16.8	1.02
SRF	20	0.64

城市固废生活垃圾的元素分析组分主要包括 C、H、O、N、S、Cl 等元素(表 2), 尽管固废垃圾的含碳量比煤炭低, 热值低于一般煤炭[4]; 但固废垃圾中的 H/C、O/C 比高于煤炭, 生活垃圾的挥发分含量高于煤炭, 另外, 生活垃圾中热转化的 N、S 污染物相对较少。以上特点决定了城市固废生活垃圾更加适宜采用热解气化方式进行减量化无害化处理。

Table 2. Physical property data of solid waste
表 2. 固废垃圾物性数据

		垃圾	煤
工业分析%	水分	47.28	6.5
	固定碳	9.28	71.07
	挥发分	54.2	5.01
	灰分	36.52	23.92
元素分析%	Cd	35.05	70.54
	Hd	4.11	1.44
	N	2.14	0.74
	Cl	0.55	
	S	0.23	1.17
	O	21.4	2.19
热值 KJ/kg		12,056	25,000

2.2. 固废垃圾热解气化原理

垃圾的热解是指在 300°C~800°C 无氧或缺氧的条件下, 将固废垃圾中有机组分的大分子催化分解发生断裂, 产生小分子气体、焦油和残渣有机物, 其中小分子气体中就包含了氢气。热解反应温度在 200°C 及以下时, 固废垃圾在炉内进行干燥, 所含水分将逐渐挥发; 在 300°C~800°C 无氧或者缺氧的情况下, 固废垃圾中的有机物吸收热量发生热解反应, 固废垃圾中的内在水分析出, 纤维素、蛋白、脂肪等物质的大分子断裂分解成为小分子气体、焦油类有机液体以及固体状态的碳化合物[4]。

气化是在超过 800℃ 的高温条件下, 用气化剂(水蒸气、二氧化碳、空气、氧气等)将有机物高温分解转化为包含氢气、一氧化碳、甲烷等可燃性气体成分的过程。900℃ 以上温度条件下, 长链碳氢化合物和焦油等有机液体完全转化为 CO、H₂、CH₄ 等有效气体; 1300℃ 以上温度条件下, 气化灰渣熔融为玻璃态 [5]。热解气化过程中主要发生化学反应如图 1 所示。

热解过程中随温度升高, 有机组分逐渐发生热裂解, 大分子量的有机物裂解成小分子量的氢、甲烷、一氧化碳、丙酮、醋酸、焦油、生物炭等。热解温度越低, 产气量越低。因此, 气化制氢相较于热解制氢技术更具优势。

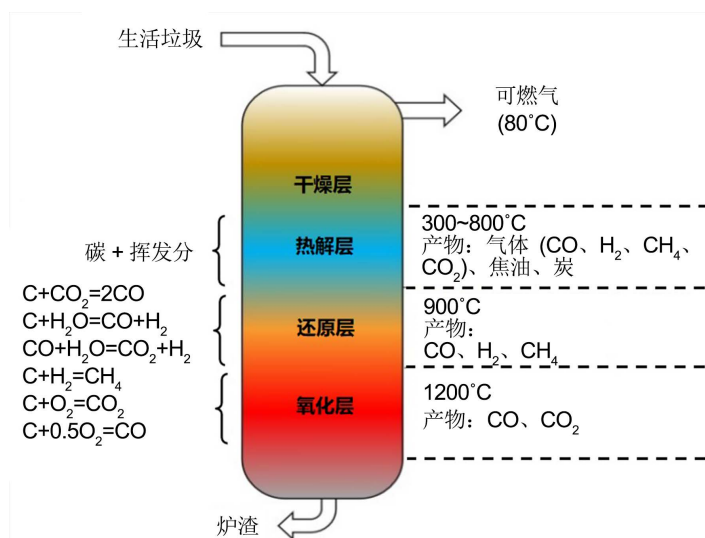


Figure 1. Principles of pyrolysis and gasification of solid waste

图 1. 固废垃圾热解气化原理

2.3. 热解气化制氢特性指标

垃圾热解气化后的碳转化率[6] (CCE, Efficiency of Carbon Conversion)、低位热值[7] (LHV, Lower Heating Value)和气体产率(Y, yield of gas)是评价气化反应的重要指标, 计算方法如下[8] [9]。

2.3.1. 低位热值 LHV

固废垃圾热解气化产生的可燃性气体成分主要是一氧化碳、甲烷、氢气。式中 LHV 是产气的低位热值, kJ/m³; ϕ_{CO} 、 ϕ_{H_2} 、 ϕ_{CH_4} 分别代表了一氧化碳、氢气、甲烷的体积分数%。

$$\text{LHV} = 126.3\phi_{\text{CO}} + 108.0\phi_{\text{H}_2} + 358.3\phi_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

2.3.2. 碳转化率(CCE)

垃圾热解气化后产生的合成气里的碳与原始垃圾里的碳的质量之比。 ω_c 是生活垃圾的碳质量分数%; M_{MSW} 是生活垃圾质量 kg; $M_{\text{C,Solid}}$ 是气化后剩余固体碳的质量 kg。

$$\text{CCE} = \frac{\omega_c \times M_{\text{MSW}} - M_{\text{C,Solid}}}{\omega_c \times M_{\text{MSW}}} \quad (2)$$

2.3.3. 气体产率

垃圾气化后的产气在标况下的体积与参加气化反应的垃圾质量之比。气体产率为 Y, 单位 Nm³/kg, y 是产气在标况下的体积 m³; M_{MSW} 是生活垃圾质量 kg。

$$Y = \frac{y}{M_{MSW}} \quad (3)$$

2.3.4. 灰渣的黏温特性

灰渣的黏温特性是影响高温气化炉稳定运行关键因素[10]。固废垃圾热解后的灰渣熔融后液态排渣将种种的重金属等有害物质固化与玻璃态渣中实现无害化处理。影响黏温特性的主要因素是热解灰渣的成分。固废垃圾热解灰渣含 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 等碱性组分，和 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Tl_2O_2 等酸性组分，碱性氧化物有降低黏度的作用。 SiO_2 和 Al_2O_3 含量高灰渣黏度就高， CaO 、 Fe_2O_3 含量越高，灰渣的黏度及灰熔点越低[11]。

2.4. 固废垃圾热解气化影响因素

2.4.1. 物料热值和粒径

生活垃圾分类前的湿基低位热值平均值为 7173 kJ/kg，可达到焚烧的设计要求。垃圾分类后，厨余垃圾等部分含水量高的成分被分离，含水量减少后热值大大提高，更容易满足垃圾热解气化熔融工艺的设计要求。当分类后的垃圾热值高于 11,900 kJ/kg 时，垃圾不需要干燥其自身能量就可维持垃圾热解气化阶段所需能量。

物料形状和粒径是影响物料间传热的重要因素，主要通过改变物料间的传热速率来改变热解进程，主要影响物料的升温速率及产气率。较大的颗粒比表面积能够保证颗粒间热量传递的均匀性和充分性。较小颗粒的物料从表面传热到中心的时间更少，产生的热解气易与热解区分离，易发生二次裂解，产生较多的可燃小分子气体，产气率更高。但是，原料颗粒过小会使得更加容易形成粉尘，进而增加了燃气中的粉尘携带量，增加气体净化的负担。

2.4.2. 温度和含水率

垃圾中的水分会通过物理作用和化学作用综合影响垃圾的热解气化过程。首先，垃圾中含水量大，热值较低，需要通过干燥降低水分提高热值，干燥过程会吸收大量热量使气化的热效率降低。另外，水分同样会通过化学作用直接影响垃圾的热解气化过程及产物。水蒸气能够在气化过程中提供氢原子产生 H_2 、 CH_4 等气体，使产气量大幅增加，合成气热值随之增加。

温度是影响固废垃圾热解气化特性的一个重要因素[12]，与固废垃圾的含水率、当量比、气化剂等密切相关。陈巨辉等模拟研究了不同含水率下的生活垃圾气化特性，升温可以促进产气里的 H_2 、 CO 含量的提高，减少 CH_4 、 CO_2 、 H_2O 的含量；垃圾含水率的提高促进 H_2 的产生，抑制 CO_2 、 H_2O 的产生，气化温度小于 650°C 时含水率的提高促进 CO 、 CH_4 的产生，气化温度大于 650°C 时含水率提高会抑制 CO 、 CH_4 的产生。当气化温度一定时，随着含水率的提高会促进碳转化率的提高，垃圾含水率小于 15% 时提高气化温度并不会实现碳的全部转化，碳转化率只能达到 78.6%，含水率大于 25% 时，温度大于 850°C 可以实现碳的全部转化。综合碳转化率和产气热值考虑，垃圾含水率 25% 时气化温度为 850°C ，不仅可以实现碳的全部转化，也可以获得较高的产气热值为 $11,269 \text{ kJ/m}^3$ 。

2.4.3. 气化剂

气化剂的种类是关系到垃圾气化性能的另一关键因素。不同的气化剂会在气化过程中产生具有明显差异的合成气组分。空气气化的反应压力一般为常压，气化产生的合成气中含有大量未参与反应的 N_2 ，合成气热值一般在 5 MJ/m^3 左右。氧气气化有利于焦油的二次裂解，气体产率和合成气热值也因此得以提升。高温条件下，水蒸气与碳发生气化反应，能够促进焦油的二次裂解，提高气化产物中 H_2 含量。在相同条件下以水蒸气作为气化介质的气化效率最高，气化温度为 850°C ，水蒸气占比为 50% 时，气化效

果最好[13]。

2.4.4. 灰熔点

灰熔点及其黏温特性是控制气化操作温度的关键依据。垃圾焚烧灰渣成分与低灰熔点煤灰的成分大体一致[11]，但硫、氯和磷含量相对较高。垃圾的灰熔点大体在 1200℃~1300℃之间，熔融态时均呈现玻璃状液滴。灰熔点升高，气化产物有效气体摩尔流量和碳转化率不断降低，灰熔点每升高 100℃，碳转化率下降 2.9%。

3. 城市固废垃圾热解气化技术

垃圾热解气化技术根据反应器的类型，可分为固定床、流化床、旋转床等气化工艺；根据垃圾气化和气化产物后续应用耦合工艺，又可分为垃圾热解气化直接燃烧工艺和垃圾热解气化熔融工艺[5]。固废垃圾热解气化产生的合成气可直接燃烧回收热量产生蒸汽用于供热、内燃机直接燃烧发电、耦合燃煤发电减少煤炭消耗，热解高温气化熔融制氢合成低碳化学品等方面。

3.1. 热解气化 - 直接燃烧

固废垃圾热解气化直接燃烧是指在 300℃~800℃的温度范围内进行固废垃圾热解气化反应，产生可直接燃烧的合成气和半焦等物质。热解气化直接燃烧工艺如图 2 所示。

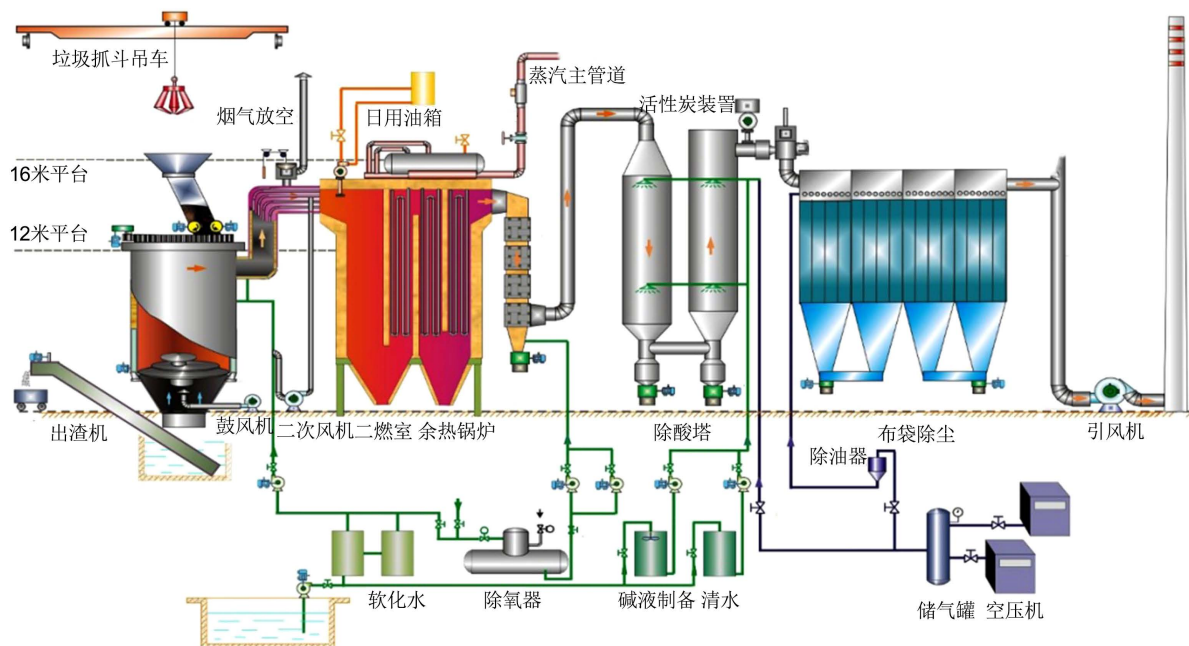


Figure 2. Rotating fixed bed pyrolysis gasification direct combustion system

图 2. 旋转固定床热解气化直接燃烧系统

热解气化直接燃烧系统一般由气化炉和二次燃烧室(二燃室)构成。垃圾热解气化过程中气化炉内过量空气系数较小，贫氧条件下热解气化产生的合成气直接进入二燃室与空气混合进行完全燃烧反应，二燃室内的高温条件可分解二噁英前驱物，能够从源头抑制二噁英的排放。垃圾热解气化直接燃烧工艺目前已达到商业化或准商业化水平，主要有固定床、流化床、回转窑等固废垃圾热解气化直接燃烧处理方式。

3.2. 热解气化 - 熔融工艺

气化熔融[14]技术是基于高炉原理发展而来, 固废垃圾在气化炉的上部被干燥, 下降到中部后垃圾被加热进行热分解气化, 热分解气化的气体产物主要含有 CO 、 H_2 、 CO_2 等从顶部排出, 制得的中热值可燃气体可用于发电、供热或作为化工原料, 如图 3 所示。

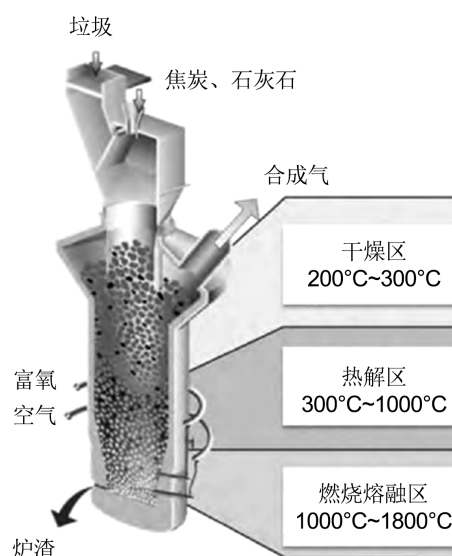


Figure 3. Solid waste gasification and melting process

图 3. 固废垃圾气化熔融工艺

在气化炉的底部, 通入纯氧或富氧空气, 焦炭和垃圾热解后残余的碳燃烧产生大量热, 可使温度最高达到 1500°C , 使底部的灰熔化, 熔融渣从渣口中排出并被水急速冷却变成玻璃态, 玻璃态残渣则作为建材使用。固废生活垃圾气化熔融技术具有资源循环利用率高, 环境效益更佳等优势, 是最具有发展潜力的新一代固废垃圾处理技术[15]。

3.3. 固废垃圾热解气化技术研究进展

美国早在 1929 年就开始了垃圾高温热解的实验研究。1967 年 Kisser 和 Friendmdii 先后进行了均质有机废物和非均质废物(城市生活垃圾)的高温热解的实验研究, 试验结果表明垃圾热解产生的气体能够作为燃料使用。欧洲主要根据不同垃圾的种类、不同的反应器类型和不同的运行条件, 研究各种不同条件下热解气化产物的性质和组分, 尤其重视不同系统在运行上的特点和问题。加拿大主要研究农业废弃物等生物质特别是木材的热解气化, 二十世纪 70 年代末期开始了以大量存在的废弃生物质资源为目的的研发计划, 相继开展了生物质回转窑、流化床气化的研究。日本 1973 年开始进城市生活垃圾热解气化熔融技术的研究。

鉴于固废垃圾热解气化良好的资源化应用前景, 发达国家一直投入大量人力物力推动此项技术的工业化应用。二十世纪 90 年代开始, 等离子气化技术应用于固废垃圾的无害化处理。城市生活垃圾等离子体气化技术的核心是热处理技术, 可分为直接等离子体气化和等离子结合常规气化技术。直接等离子气化是将等离子产生的 2000°C 的高温直接作用于固废垃圾促进热解反应, 该工艺电耗高, 产生的合成气成分主要是 CO 和 H_2 ; 等离子结合常规气化工艺是先将固废垃圾热解气化, 气化产生的合成气经过等离子体高温重整可以将合成气中的部分焦油分解, 该工艺相对直接等离子工艺功耗较低, 但需要加入更多的

O₂ 来维持温度，合成气中 CO₂ 和 N₂ 较多，合成气质量较差。

西门子西屋公司(现为 Alter NRG 的部门)采用直接等离子体气化技术[16]，等离子体气化系统主要由等离子气化炉和等离子炬组成。等离子炬的投入可使气化炉内温度达 1200℃~1500℃，在此高温条件下能够将灰渣等无机废物转变成玻璃态渣，极高的气化温度和缺氧的环境避免了二噁英和呋喃等有毒物质的生成。由于等离子体产生的高温直接作用于垃圾气化，导致电耗较高。西门子西屋公司开发的等离子气化炉如图 4 所示。

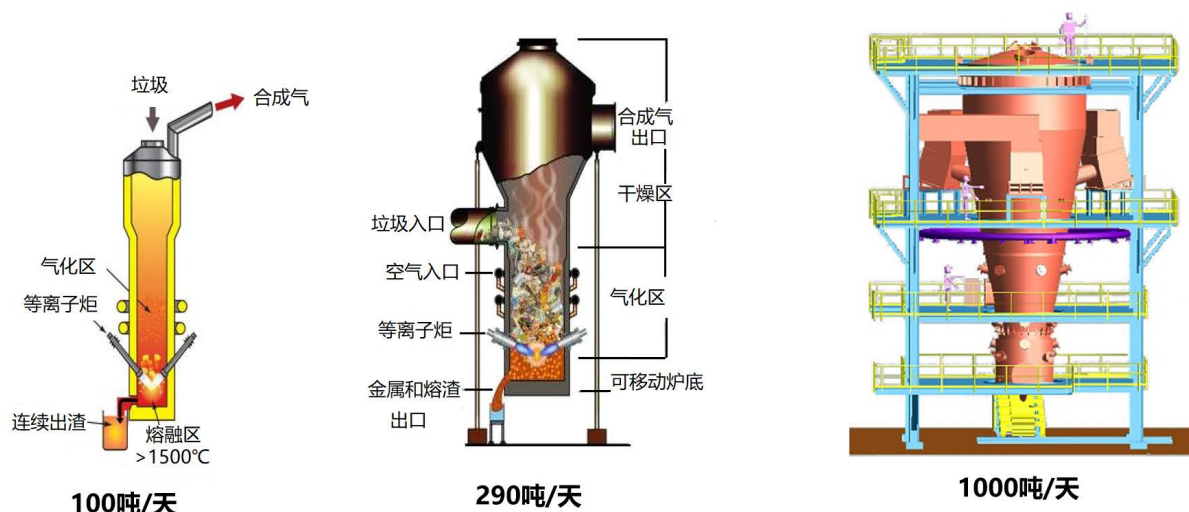


Figure 4. Plasma waste direct gasification device developed by Siemens Westinghouse
图 4. 西门子西屋公司开发的等离子垃圾直接气化装置

2000 年以来，西屋公司在全世界推广等离子体固废处理技术，已经有 4 个项目取得成功，其中包括在日本建设的 220 t/d 用于处理城市生活垃圾和汽车废渣的等离子体气化工厂项目，和 24 t/d 处理城市生活垃圾和污水污泥工厂，运行数据见表 3。

Table 3. Operation data of Westinghouse' demonstration facility in Japan
表 3. 西屋公司日本示范装置运行数据

参数	日本城市		歌志内		美滨 - 三方	
	排放标准	运行数据	排放标准	运行数据	排放标准	运行数据
灰分 mg/m ³	40	<10	20	<16~17	20	<16~17
硫化物 ppmv	120	0.2~2	60	<5	60	<5
氮氧化物 ppmv	150	79~130	150	69~84	150	69~84
氯化氢 mg/m ³	200	6~31	100	86~93	100	86~93
二噁英 ng-TEQ/m ³	0.01	0.0020~0.0094	0.05	0.00004~0.0026	0.05	0.00004~0.0026

加拿大普拉斯科公司、英国 APP (Advanced Plasma Power) 公司、和采用的等离子与常规气化结合技术具有一定的优势，由于采用两步热解气化工艺，降低了电耗，系统经济性大大提高。加拿大普拉斯科两步法等离子热解气化制氢工艺流程如图 5，垃圾含水率小于 20%，气化效率 80%~85%，垃圾处理量 135 吨/天，典型合成气组分见表 4。

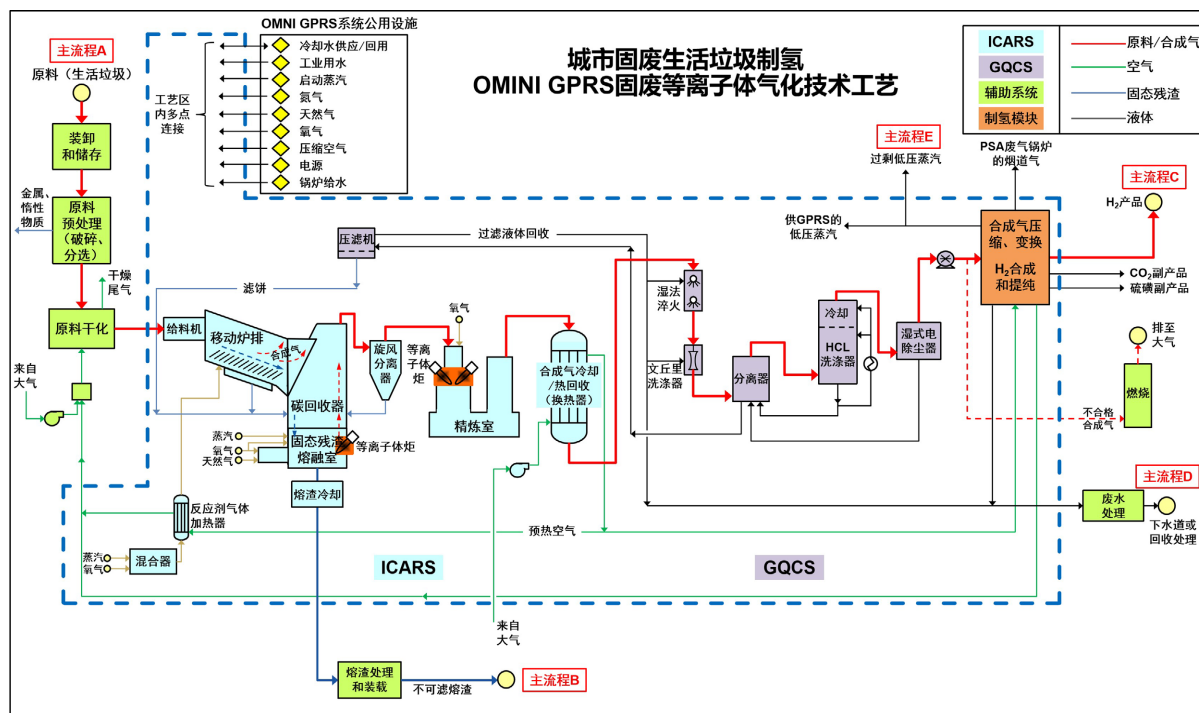


Figure 5. Two-step plasma pyrolysis gasification process for hydrogen production from municipal solid waste
图 5. 两步法等离子垃圾热解气化制氢工艺流程

Table 4. Synthesis gas components of two step plasma pyrolysis gasification hydrogen production process
表 4. 两步法等离子热解气化制氢工艺合成气组分

气体组分	H ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	N ₂	Ar	H ₂ O
百分比 %	39.7	25.5	0.7	0.1	2.3	1.3	3.0

国内在固废垃圾热解气化领域的研究相对较晚，热解气化技术落后于发达国家。20世纪90年代，中国科学院力学研究所开始进行等离子气化医疗废物和城市生活垃圾的研究，建成了两座危险废物的处理设备，设备的处理量达到5~10 t/d。广西环境保护科学研究院采用30 t/d的低温热解耦合等离子体工艺技术处理农村生活垃圾，热解温度650℃，每年可处理生活垃圾9900 t，热解碳化后废渣产率为12%，能有效抑制二噁英等有毒有害物质的生成。除此之外，华中科技大学、清华大学以及中山大学等机构对固体废物的等离子气化技术进行了研究[17]。

3.4. 固废垃圾热解气化制氢技术进展

随着气候变化和温室效应的加剧，低碳氢能的重要性得到提升，近年来多家企业和研究机构开始探索垃圾制氢技术的研究和产业化。据不完全统计，全球已有16个垃圾制氢产业化项目[2]，主要分布在欧洲、美国、日本等，这些项目大都处于规划或建设阶段。多数项目选择垃圾气化直接制氢，以产氢效率较高的不可回收塑料为主。每吨垃圾的氢气产量为40~100千克。国内企业也积极探索垃圾制氢，2021年，中国化学旗下五环公司在北京房山建成基于城市垃圾高温气化制氢、高温垃圾转化制氢油示范项目，日处理2吨分选后的城市生活垃圾。项目借鉴了现代高温煤气化的生产工艺，对城市垃圾进行干燥和压缩处理，采用纯氧燃烧、超高温气化的处理方式，可将垃圾直接气化，彻底消灭二噁英等有机化合物，之后经过洗涤、常压脱硫、压缩、变压吸附等过程转化为氢气，项目于2022年8月试运成功，打通了全

系统流程, 稳定产出了浓度 99.9% 的氢气。2024 年 2 月, 广东省佛山市南海区垃圾资源化项目开工建设, 应用创新性的生活垃圾碳化气化制氢技术, 项目达产后每天可处理生活垃圾约 500 吨, 每小时可产生纯度达 99.97% 的绿氢超 9100 标立方米。

4. 固废垃圾制氢技术的资源属性与减碳优势

4.1. 固废垃圾的能源资源属性

固体垃圾是放错地方的资源, 是城市的“矿产”。研究表明, 不同条件下基于热解气化的垃圾制氢方式的氢气产率范围较大, 每千克可燃固体废弃物能生产氢气约 20~178.7 克, 塑料和其他城市生活垃圾可能是未来垃圾制氢的主要原料[18]。据公开数据统计, 2023 年废塑料的废弃量高达 7410 万吨, 其中回收量约为 1860 万吨, 塑料垃圾总体回收率为 25.1%。如果未被回收利用的 5550 万吨塑料垃圾全部用于制氢, 按照每吨塑料产氢 70 千克计算, 每年可生产氢气 388 万吨, 约为 2023 年我国氢气总产量的 9%。2023 年全国城市生活垃圾清运量为 2.66 亿吨, 如果全部用于制氢, 按照每吨城市生活垃圾产氢 40 千克计算, 每年可生产氢气 1064 万吨, 约为 2023 年我国氢气总产量的 24.7%。

4.2. 固废垃圾气化制氢的减碳潜力

由于固废垃圾含有生物源碳, 其燃烧所产生的 CO_2 将参与大气碳循环, 不会对生态圈的碳浓度产生净影响, 同时垃圾中的生物源碳通过热解气化制氢可以替代传统化石燃料制氢的碳排放, 可实现碳减排[19][20][21]。碳排放量与固废垃圾各组分碳含量直接相关, 采用平衡法计算垃圾热解气化焚烧的碳排放。平衡法将混合垃圾分为惰性组分、生物源碳类型垃圾、化石源碳类型垃圾和水等 4 个组分, 通过计算 5 个质量平衡方程和 1 个能量平衡方程, 计算得到单位垃圾处理碳排放产生量为 $0.61 \text{ tCO}_2/\text{t}$, 其中, 化石源碳气化燃烧所产生的 CO_2 排放量为 $0.28 \text{ tCO}_2/\text{t}$, 占 45.9%, 生物源碳气化燃烧所产生的 CO_2 排放量为 $0.33 \text{ tCO}_2/\text{t}$, 占 54.1%。化石源碳质量占比小, 但其热值高, 碳排放量大。生物源碳气化燃烧所造成的碳排放量占总排放量的 50% 以上。由于生物源碳的碳排放可视作碳减排量, 因此垃圾热解气化制氢过程的碳减排量将非常可观[22]。

4.3. 固废垃圾气化制氢的经济性

垃圾气化制氢的总生产成本约为 28.74 元/千克, 其中垃圾热解气化的成本为 13.80 元/千克, 合成气净化、氢气分离提纯的成本为 14.94 元/千克, 形成规模效应后, 成本有望降到 20 元/千克以下, 与天然气等化石能源制氢技术成本相当。垃圾制氢项目的收入方面, 除了氢气销售收入, 还包括 40~50 元/吨垃圾处理费补贴、玻璃体灰渣销售收入, 以及 90~100 元/吨的碳交易收入, 能有效分摊制氢成本、降低氢气价格。

固废垃圾制氢具有重要现实意义: 一是热解气化制氢过程不产生二噁英等有毒有害物质, 处理后的气体和残渣均可利用, 大大助推固废垃圾减量化、资源化、无害化处理; 二是利用固废垃圾资源就地制氢, 缓解局部资源短缺导致的制氢瓶颈。

5. 结论与建议

固废垃圾中含有大量的有机可燃成分, 氢碳比氧碳比高于煤炭, 挥发分高, 适合采用热解气化的方式制氢, 制氢过程无二噁英重金属等有毒有害物质的排放; 固废垃圾中含有一定量的生物源碳, 热解气化过程产生的碳可视为碳减排量。固废垃圾热解气化对实现城市生活垃圾“减量化、无害化、资源化”处理, 对减碳降碳, 建设环境友好的“无废城市”都具有极高的现实意义。

固废垃圾具有类似煤炭的物理性质, 热解气化过程受含水率、热值、粒径大小、温度、气化剂、灰熔点等因素影响。可通过垃圾分选、干燥、破碎、压缩等公司降低含水率提高热值和产气率, 通过催化剂添加剂调节灰熔点提高造渣排渣效果。

固废垃圾成分复杂多变, 而且与国外垃圾成分属性也有很大区别。固废垃圾热解气化类似于煤气化制氢过程, 但也要考虑二噁英、重金属的排放和治理, 以及合成气脱氯等技术问题, 需开发低成本的垃圾原料预处理技术。优化气化设备性能, 提高技术的成熟度、可靠性、能源利用效率和氢气产率, 研究开发低能耗、低排放、高效率的垃圾气化制氢技术。

固废垃圾资源化、减量化、无害化热解气化熔融处理技术可与可再生能源发电制绿氢绿氧[23], 二氧化碳加氢制绿色甲醇技术相结合[24], 发展零碳排放的绿色甲醇产业[25]。

综合来看, 作为生活垃圾处理领域的新技术, 垃圾热解气化技术可真正意义上实现垃圾的无害化、减量化和资源化处置, 是当前最先进和最环保的垃圾处理技术, 必将成为未来生活垃圾处理及氢能领域的新发展方向。

基金项目

本研究得到陕西省秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2022-59)的资助。

参考文献

- [1] 孔晶, 等. 垃圾处理及其热解气化技术应用现状[J]. 当代化工研究, 2021(22): 107-109.
- [2] 李坤. 垃圾制氢技术研发与产业化进展[J]. 工业技术创新, 2022, 9(3): 73-82.
- [3] 付乾. “双碳”目标下城市生活垃圾制氢技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(2): 247-251.
- [4] 李文涛, 等. 生活垃圾气化技术研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(2): 322-327.
- [5] 韩景超, 等. 城市生活垃圾制气技术研究[J]. 环境与发展, 2020(12): 64-66.
- [6] 陈巨辉. 不同含水率下的生活垃圾气化特性模拟[J]. 化工进展, 2024.
- [7] 瞿海根. 煤气化技术选择设计中的主要考虑因素和依据[J]. 化学工业, 2013, 31(9): 26-29.
- [8] 陈延贵, 等. 基于 Aspen Plus 的煤-炼化污泥高温气化特性分析[J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5786-5793.
- [9] 刘忠慧, 等. 基于 Aspen Plus 的循环流化床工业气化炉模拟[J]. 化工进展, 2018, 37(5): 1709-1717.
- [10] 洪千惠. 城市生活垃圾灰渣的熔融和黏温特性研究[J]. 燃料化学学报, 2023, 51(3): 405-413
- [11] 阎常峰. 垃圾焚烧灰渣的成分分析及其熔融特性[J]. 热动力工程, 2003, 17(7): 356-358.
- [12] 陈玉龙. 基于 Aspen plus 餐厨垃圾 RDF 的热解气化模拟研究[J]. 辽宁化工, 2022, 51(11): 1537-1545.
- [13] 吴松. 基于 Aspen Plus 的 MSW 气化熔融工艺全流程模拟研究[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(1): 184-193.
- [14] 别如山. 垃圾焚烧技术和产品及其在垃圾分类条件下的新进展[J]. 工业锅炉, 2020, 3(1): 1-10.
- [15] 张瑜, 等. 传统有机固体废弃物气化制氢技术研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(7): 2129-2132.
- [16] 孙成伟, 等. 等离子气化技术用于固体废物处理的研究进展[J]. 物理学报, 2021, 70(9): 66-79.
- [17] 曹小玲. 等离子体气化技术处理城市生活垃圾的研究现状[J]. 现代化工, 2014, 34(9): 26-31.
- [18] 陈馨. 典型制氢工艺生命周期碳排放对比研究[J]. 当代石油石化, 2023(1): 18-25.
- [19] 黄静颖. 小型垃圾热解气化焚烧厂碳排放计算[J]. 环境卫生工程, 2021, 29(4): 1-6.
- [20] 中国建筑节能协会. 2022 中国城市生活垃圾处理碳排放研究报告[J]. 城乡建设, 2023(8): 72-79.
- [21] 朱松丽. 垃圾发电并非 100% 碳中和, 亟需调整统计口径[J]. 中国投资, 2023(9): 84-85.
- [22] 仲蕊. 垃圾制氢前景可期[N]. 中国能源报, 2021-09-27(009).
- [23] 冷智杰. 新能源制氢对传统化工产业绿色转型推动作用研究[J]. 精细与专用化学品, 2024, 32(1): 1-8.
- [24] 周明灿. 二氧化碳加氢制甲醇合成工艺探讨[J]. 化学工程设计, 2023, 33(3): 3-6.
- [25] 舒斌. 碳中和目标下推动绿色甲醇发展的必要性分析[J]. 化工进展, 2023, 42(9): 4471-4478.